UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

CARLOS MAGNO BAPTISTA LOPES

CONTROLE DOS EFEITOS DA MISTURA DE QUATRO
ONDAS (FWM) PARA MELHORIA NO
GERENCIAMENTO DO QoS ÓPTICO EM REDES
GMPLS/DWDM.

São Paulo

2011

CARLOS MAGNO BAPTISTA LOPES

CONTROLE DOS EFEITOS DA MISTURA DE QUATRO
ONDAS (FWM) PARA MELHORIA NO
GERENCIAMENTO DO QoS ÓPTICO EM REDES
GMPLS/DWDM.

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo como requisito parcial para obtenção do
Título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração:
Sistemas Digitais

Orientadora:
Prof^{ra}. Dr^aa. Tereza Cristina Melo de Brito Carvalho

São Paulo

2011

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, de maio de 2011.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Lopes, Carlos Magno Baptista

Controle dos efeitos da mistura de quatro ondas (FWM) para melhoria no gerenciamento do QoS óptico em redes GMPLS/DWDM / C.M.B. Lopes. -- ed.rev. -- São Paulo, 2011. 179 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais.

1. Redes ópticas 2. GMPLS 3. Mistura de quatro ondas I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais II. t.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Carlos Magno Baptista Lopes

Título: Controle dos Efeitos da Mistura de Quatro Ondas (FWM) para Melhoria no Gerenciamento do QoS Óptico em Redes GMPLS/DWDM.

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como requisito parcial para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração:
Sistemas Digitais

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Olympio e Maria de Lourdes, pela referência de moral e pelas inúmeras demonstrações de amor ilimitado.

À minha mulher Tânia, pelo amor compartilhado e dedicação, um porto seguro nas horas difíceis.

Aos meus filhos, Marília e Henrique, pelo aprendizado constante com a energia da juventude.

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a Deus, fonte essencial de onde emana a verdadeira luz da sabedoria, a qual me guiou por todo este tempo.

À Profª Drª Tereza Cristina, pela orientação e apoio recebidos durante todo o período de elaboração deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Eunézio Antonio de Souza (Thoróh), pela colaboração técnica e incentivo ao trabalho científico.

À Escola Politécnica da USP, em especial ao LARC (Laboratório de Arquitetura e Redes de Computadores) do Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais, por me proporcionar esta oportunidade.

Ao grupo de pesquisa do Laboratório de Fotônica do Mackenzie, oferecendo apoio e recursos necessários para elaboração deste trabalho.

Aos meus colegas da Universidade Anhembi Morumbi, pelos conselhos e momentos de desabafo.

Finalmente e não menos importante, agradeço a todos que, de alguma forma, me ajudaram para que eu cumprisse esta jornada.

Não existe obstáculo intransponível que não seja superado pela verdadeira fé.

RESUMO

Este trabalho investiga a influência dos efeitos da mistura de quatro ondas (FWM - *Four-Wave Mixing*) durante o estabelecimento de caminhos ópticos em uma rede GMPLS/DWDM (*Generalized MultiProtocol Label Switching/Dense Wavelength Division Multiplexing*). Para minimizar seus impactos e assim reduzir o bloqueio total da rede, são propostas estratégias por meio de extensões ao RSVP-TE (*Resource Reservation Protocol-Traffic Engineering*). A partir de uma plataforma de simulação que emula e integra a camada óptica e o Plano de Controle da arquitetura GMPLS, a solução proposta é validada. Os vários métodos de alocação de comprimentos de onda são avaliados e as contribuições na redução dos sinais interferentes quantificadas. Para minimizar o bloqueio na rede, uma nova classe de métodos de alocação, classificados como híbridos, é definida e seu desempenho é avaliado. O bloqueio da rede em função da variação de parâmetros que reforçam a eficiência da FWM, tais como a quantidade e espaçamento entre canais, é observado, confirmando a necessidade de métodos de alocação especialistas para gerenciamento do QoS (*Quality of Service*) óptico em cada caminho a ser estabelecido. Os resultados obtidos comprovam a eficiência da solução proposta e evidenciam a necessidade de um Plano de Controle GMPLS com acurada visibilidade das restrições da camada física, tanto os efeitos estáticos quanto às degradações associadas ao comportamento dinâmico da rede.

Palavras-chave: Redes Totalmente Ópticas. Mistura de Quatro Ondas. QoS Óptico. GMPLS. Métodos de Alocação de Comprimentos de Onda.

ABSTRACT

This work investigates the effects of the Four-Wave Mixing (FWM) during the lightpaths establishment in a GMPLS/DWDM (Generalized Multiprotocol Label Switching / Dense Wavelength Division Multiplexing) network. In order to minimize their impacts and thus reduce network blocking, strategies based on RSVP-TE (Resource Reservation Protocol-Traffic Engineering) extensions are proposed. The proposed solution is validated using a simulation platform that integrates and emulates the optical layer and the GMPLS Control Plane. The various wavelength allocation methods are evaluated and their contributions on the reduction of interfering signals are quantified. In order to minimize the network blocking, a new class of allocation methods (classified as hybrids) is defined and its performance is evaluated. The network blocking caused by the parameters that enhance the FWM efficiency, such as the number and spacing between channels, is also observed, confirming the need of specialized wavelength allocation methods for managing the optical QoS for each lightpath. The results obtained ascertain that the proposed solution is efficient and demonstrate the need for a GMPLS Control Plane endowed with an accurate visibility of the restrictions in the physical layer, concerning both static and dynamic effects.

Keywords: All Optical Networks. Four-Wave Mixing. Optical QoS. GMPLS. Wavelength Allocation Methods.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Definição do Contexto	20
1.2	Objetivo e Escopo	23
1.3	Organização da Tese	26
2	REDES DE TRANSPORTE, GMPLS E A CAMADA ÓPTICA	28
2.1	A Evolução das Redes de Transporte	28
2.2	A Comutação por Rótulos e o MPLS	32
2.3	A Comutação por Rótulos no Domínio Óptico e o GMPLS	37
2.3.1	Comutação por Rótulos no Domínio Óptico	37
2.3.2	O <i>Generalized</i> MPLS	38
2.3.3	Definição e Hierarquia de LSPs (<i>Label Switched Paths</i>)	39
2.4	Arquitetura do GMPLS e Descrição dos Protocolos	41
2.4.1	Plano de Controle do GMPLS	42
2.4.1.1	Controle de Roteamento	45
2.4.1.2	Controle de Sinalização	46
2.4.1.3	Gerenciamento de Enlace	52
2.4.1.4	Roteamento e Atribuição de Comprimento de Onda (RWA)	54
2.4.2	Implementações de Controladores GMPLS	55
2.5	O GMPLS e o Tratamento das Restrições da Camada Física Óptica	56
2.5.1	Efeitos Gerados pela Camada Óptica	57
2.5.2	Propostas para Tratamento dos Efeitos Lineares e Não Lineares	60
2.6	Considerações Finais	64
3	CARACTERIZAÇÃO DA MISTURA DE QUATRO ONDAS	66
3.1	Contexto das Redes Ópticas Atuais	66
3.2	A Origem do Fenômeno da Mistura de Quatro Ondas (FWM)	68
3.2.1	Geração de Novas Frequências: Canais Desigualmente Espaçados	73
3.2.2	Geração de Novas Frequências: Canais Igualmente Espaçados	75
3.2.3	Efeitos gerados pela FWM na transmissão de sinais WDM através da fibra	77
3.3	As Redes Ópticas Atuais e os Efeitos da Mistura de Quatro Ondas	80
3.4	Desafios para o Gerenciamento das Penalidades Impostas pela FWM	82
3.5	Considerações Finais	84
4	GERENCIAMENTO DOS EFEITOS DA FWM NAS REDES DE TRANSPORTE	85
4.1	Extensões ao Protocolo de Sinalização da Arquitetura GMPLS	87
4.1.1	Desenvolvimento das Extensões ao RSVP-TE	88
4.2	Métodos de Avaliação das Extensões ao RSVP-TE	89

4.2.1	Análise preliminar dos impactos da FWM	89
4.2.2	Geração da FWM Impairments Database (FID)	95
4.2.3	Avaliação do QoS óptico do <i>lightpath</i> pelo RSVP-TE estendido	100
4.2.4	Avaliação das melhorias obtidas com o RSVP-TE estendido	101
4.3	Considerações Finais	102
5	ESPECIFICAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DA PLATAFORMA DE TESTES.....	104
5.1	Ambiente de Simulação: Camada Óptica	107
5.1.1	Ferramentas de Simulação da Camada Óptica	107
5.1.2	Configuração e Parâmetros da Camada Óptica	108
5.1.3	Rede Manhattan Street	112
5.1.4	Wavelength Allocation Methods (WAM) implementados	115
5.2	Ambiente de Simulação: Plano de Controle GMPLS	120
5.2.1	Ferramentas de Simulação do Plano de Controle do GMPLS.....	121
5.2.2	Configuração e parâmetros do Plano de Controle GMPLS	122
5.3	Considerações Finais	128
6	COMPORTAMENTO DO BLOQUEIO NA REDE GMPLS COM GERENCIAMENTO DOS EFEITOS DA FWM	130
6.1	Condições de Testes	131
6.2	Comportamento do Bloqueio Médio da Rede <i>Manhattan Street</i> (8 canais por enlace): Validação das Extensões Propostas.	132
6.2.1	WAMs controlados por sequências de canais ótimos.....	135
6.3	Comportamento do Bloqueio Médio da Rede <i>Manhattan Street</i> (16 canais por enlace): Influência do número de canais	138
6.3.1	WAMs tradicionais	138
6.3.2	WAMs controlados por sequências de canais ótimos.....	142
6.3.3	Propostas de WAMs híbridos	144
6.3.4	Influência do espaçamento entre canais na eficiência dos métodos de alocação	148
6.4	Considerações Finais	150
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	151
7.1	Análise Crítica dos Resultados Obtidos.....	151
7.2	Contribuições desta Tese	154
7.3	Trabalhos Futuros	155
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	156
	ANEXO A	169

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Rede óptica WDM e seus elementos básicos.	30
Figura 2-2: Modelo de Arquitetura da Rede de Transporte formada por planos funcionais [FARREL, 2006].	32
Figura 2-3: Protocolos de camada de enlace e de rede integrados pelo MPLS.	34
Figura 2-4: Estrutura do quadro de camada de enlace compatível com MPLS [KUROSE, 2009].	34
Figura 2-5: Encaminhamento de pacotes através de uma rede MPLS.	35
Figura 2-6. Hierarquia dos LSPs [FARREL, 2006].	40
Figura 2-7: Arquitetura do plano de controle do GMPLS.	42
Figura 2-8: Arquitetura do Plano de controle do GMPLS [PAPADIMITRIOU, 2003].	43
Figura 2-9: Fluxo de mensagens RSVP-TE.	49
Figura 2-10: Criação de um LSP por meio de mensagens RSVP PATH e RESV.	51
Figura 2-11: Diagrama de tempo de mensagens RSVP-TE no estabelecimento e liberação de um LSP.	52
Figura 2-12. Estrutura de uma rede óptica GMPLS [YOSHIKANE, 2007].	56
Figura 2-13: Perfil de atenuação e dispersão cromática de uma fibra padrão típica.	58
Figura 2-14. Plano de Controle Centralizado com restrições físicas [MARTÍNEZ, 2006].	62
Figura 2-15: Plano de Controle Descentralizado com restrições físicas [MARTÍNEZ, 2006].	63
Figura 3-1: <i>Crosstalk intrachannel</i> na demultiplexação/multiplexação [RAMASWAMI, 2002].	69
Figura 3-2: <i>Crosstalk interchannel</i> na etapa de demultiplexação [RAMASWAMI, 2002].	69
Figura 3-3. Geração de frequências f_{ijk} devido ao efeito FWM em sistemas multicanais.	73
Figura 3-4. Caso de efeito FWM degenerado, com $f_i = f_j$	74
Figura 3-5. Geração de frequências a partir de f_1 , f_2 e f_3 não igualmente espaçadas [ITU, 2000a].	75
Figura 3-6: Efeitos FWM a partir de f_1 , f_2 e f_3 igualmente espaçadas [RAMASWAMI, 2002].	76
Figura 3-7. Perfil de atenuação e dispersão da fibra DSF.	81
Figura 4-1: Sistema DWDM de 3 canais (10 Gbps/canal), para avaliação dos efeitos da FWM.	90
Figura 4-2: Espectro do sinal transmitido pelo canal ativo n.	92
Figura 4-3: a) Espectro do sinal recebido; b) Diagrama de olho do canal ativo n.	92
Figura 4-4: Espectro dos sinais transmitidos pelos canais n-1, n e n+1.	93
Figura 4-5: a) Espectro dos sinais recebidos; b) Diagramas de olho dos canais n-1, n e n+1.	94
Figura 4-6: Penalidade de potência gerada pelo FWM.	95
Figura 4-7: Quantidade de enlaces por caminho na rede <i>Manhattan Street</i>	96
Figura 4-8: Fluxograma do RSVP-TE estendido para atendimento das restrições da FWM.	101
Figura 5-1: Plataforma de Desenvolvimento do GMPLS com extensões para as Restrições FWM.	105
Figura 5-2: Teste do enlace básico ponto a ponto com 8 canais DWDM.	108
Figura 5-3: Penalidade de potência para 1 e 3 canais ativos, com BER 10^{-9} e 10^{-11}	111
Figura 5-4: Topologia <i>Manhattan Street</i> com 9 nós e 18 enlaces.	112

Figura 5-5: Resultados de simulação de bloqueio para as topologias Malha 4 nós, Malha 7 nós e <i>Manhattan Street</i> 9 nós.	113
Figura 5-6: Topologia <i>Manhattan Street</i> com 9 nós e 8 canais DWDM por enlace (10 Gbps).....	114
Figura 5-7: Valor da SNR por canal, para um enlace de 5 Km de fibra e 8 canais ocupados.	118
Figura 5-8: Valor da SNR por canal, para um enlace de 10 Km de fibra e 16 canais ocupados.	119
Figura 5-9: Algoritmo para estimativa de comprimentos de onda viáveis por enlace em função da FWM.	127
Figura 5-10: Diagrama indicando os blocos funcionais utilizados para simulação da topologia <i>Manhattan Street</i> para uma rede GMPLS com o RSVP-TE estendido para atendimento das restrições da FWM.....	128
Figura 6-1: Limite Inferior de Bloqueio (LIB) e Limite Superior de Bloqueio (LSB) para a Rede <i>Manhattan Street</i> (8 canais 50 GHz).	133
Figura 6-2: Bloqueio médio para a Rede <i>Manhattan Street</i> (8 canais com espaçamento de 50 GHz) para os métodos EAW (<i>Edge Allocation Wavelength</i>) e LWS (<i>Largest Wavelength Spacing</i>). .	134
Figura 6-3: Valores médios da BER em função da ocupação do enlace, para NOA (<i>Non-Optimized Allocation</i>), EAW (<i>Edge Allocation Wavelength</i>), LWS (<i>Largest Wavelength Spacing</i>) e LIW (<i>Least Impaired Wavelength</i>).	136
Figura 6-4: Bloqueio médio na rede para os métodos NOA (<i>Non-Optimized Allocation</i>), EAW, (<i>Edge Allocation Wavelength</i>), LWS(<i>Largest Wavelength Spacing</i>) e LIW (<i>Least Impaired Wavelength</i>).	137
Figura 6-5: Comparativo dos valores de LIB (Limite Inferior de Bloqueio) e LSB (Limite Superior de Bloqueio) para a Rede <i>Manhattan Street</i> com 8 e 16 canais espaçados de 50 GHz.....	139
Figura 6-6: Bloqueio médio para o método LWS (<i>Largest Wavelength Spacing</i>) em função da carga de tráfego para a Rede <i>Manhattan Street</i> com 8 e 16 canais espaçados de 50 GHz.....	140
Figura 6-7: Bloqueio médio para a Rede <i>Manhattan Street</i> (16 canais com espaçamento de 50 GHz) para os métodos LWS (<i>Largest Wavelength Spacing</i>) e USA (<i>Unequal Spacing Allocation</i>). ...	142
Figura 6-8: Potência de FWM (<i>P_{fwm}</i>) por canal para rotas de 1 a 4 saltos.	143
Figura 6-9: Bloqueio médio para a Rede <i>Manhattan Street</i> (16 canais com espaçamento de 50 GHz) para os métodos LIW (<i>Least Impaired Wavelength</i>) e LIWA (<i>Least Impaired Wavelength Average</i>).	144
Figura 6-10: Bloqueio médio para a Rede <i>Manhattan Street</i> (16 canais com espaçamento de 50 GHz) para os métodos LIW(<i>Least Impaired Wavelength</i>), LIWA (<i>Least Impaired Wavelength Average</i>) e LIWSOA (<i>Least Impaired Wavelength Staggered Optimized Allocation</i>).....	148
Figura 6-11: Comportamento do Bloqueio médio para a Rede <i>Manhattan Street</i> (16 canais com espaçamento de 50 e 100 GHz) para os métodos USA (<i>Unequal Spacing Allocation</i>) e LIWSOA (<i>Least Impaired Wavelength Staggered Optimized Allocation</i>).....	149

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2-1: Mensagens do RSVP-TE para o GMPLS.	49
Tabela 3-1: Frequências FWM geradas a partir de f_1 , f_2 e f_3 igualmente espaçadas de Δf	76
Tabela 4-1: Sistema DWDM 3 canais - Distribuição das Frequências (Lasers e Filtros).	91
Tabela 4-2: FID populada para até 4 enlaces com método EAW (<i>Edge Allocation Wavelength</i>)	99
Tabela 5-1: Espectro de operação dos lasers no sistema DWDM.	109
Tabela 5-2: Parâmetros sistêmicos para simulação enlace ponto a ponto.	110
Tabela 5-3: Método NOA (<i>Non-Optimized Allocation</i>).	115
Tabela 5-4: Método LWS (<i>Largest Wavelength Spacing</i>).....	116
Tabela 5-5: Método EAW (<i>Edge Allocation Wavelength</i>).	116
Tabela 6-1: Método USA (<i>Unequal Spacing Allocation</i>).	141
Tabela 6-2: Alocação escalonada (LIWSA).	145
Tabela 6-3: Alocação escalonada otimizada (LIWSOA) para 1, 2, 3 e 4 enlaces.	146

LISTA DE ABREVIATURAS

ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
ASE	<i>Amplified Spontaneous Emission</i>
ASON	<i>Automatically Switched Optical Network</i>
ASTN	<i>Automatic Switched Transport Network</i>
ATM	<i>Asynchronous Transfer Mode</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
CPqD	Centro de Pesquisa e Desenvolvimento
CR-LDP	<i>Constraint-based Routing-Label Distribution Protocol</i>
DSF	<i>Dispersion Shifted Fiber</i>
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>
EAW	<i>Edge Allocation Wavelength</i>
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifiers</i>
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FDDI	<i>Fiber Distributed Data Interface</i>
FEC	<i>Forwarding Equivalence Class</i>
FID	<i>FWM Impairments Database</i>
FSC	<i>Fiber Switch Capable</i>
FTTH	<i>Fiber-to-the-Home</i>
FWM	<i>Four-Wave Mixing</i>
GLASS	<i>GMPLS Lightwave Agile Switching Simulator</i>

GMPLS	<i>Generalized MultiProtocol Label Switching</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
IETF	<i>Internet Engineering Task Force</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IS-IS	<i>Intermediate System to Intermediate System</i>
IS-IS-TE	<i>Intermediate System to Intermediate System – Traffic Engineering</i>
ISO	<i>International for Standartization Organization</i>
ISOC	<i>Internet Society</i>
ITU-T	<i>International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector</i>
L2SC	<i>Layer-2 Switch Capable</i>
LFIB	<i>Label Forwarding Information Base</i>
LIB	Limite Inferior de Bloqueio
LIW	<i>Least Impaired Wavelength</i>
LIWA	<i>Least Impaired Wavelength Average</i>
LIWSA	<i>Least Impaired Wavelength Staggered Allocation</i>
LIWSOA	<i>Least Impaired Wavelength Staggered Optimized Allocation</i>
LMP	<i>Link Management Protocol</i>
LSA	<i>Link State Advertisements</i>
LSB	Limite Superior de Bloqueio
LSC	<i>Lambda Switch Capable</i>

LSDB	<i>Link State DataBase</i>
LSP	<i>Label-Switched Path</i>
LSR	<i>Label-Switching Router</i>
LWPF	<i>Low Water Peak Fiber</i>
LWS	<i>Largest Wavelength Spacing</i>
LWS	<i>Largest Wavelength Spacing</i>
MERLiN	<i>Modeling Evaluation and Research of Lightwave Networks</i>
MPLS	<i>MultiProtocol Label Switching</i>
MPOA	<i>MultiProtocol Over ATM</i>
NAM	<i>Network AniMator</i>
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>
NOA	<i>Non-Optimized Allocation</i>
NZDF	<i>Non Zero Dispersion Fiber</i>
OADM	<i>Optical Add-Drop Multiplexer</i>
OCF	<i>Optical Control Plane</i>
OIF	<i>Optical Internetworking Forum</i>
OLT	<i>Optical Line Terminal</i>
OSNR	<i>Optical Signal Noise Ratio</i>
OSNR	<i>Optical Signal to Noise Ratio</i>
OSPF	<i>Open Shortest Path First</i>
OSPF-TE	<i>Open Shortest Path First - Traffic Engineering</i>

OTcl	<i>Object Tool Command Language</i>
OTDR	<i>Optical Time Domain Reflectometer</i>
OXc	<i>Optical Cross-Connect</i>
OWns	<i>Optical WDM Network Simulator</i>
PCE	<i>Path Computation Element</i>
PDH	<i>Plesyocronous Digital Hierarchy</i>
PMD	<i>Polarization Mode Dispersion</i>
PPP	<i>Point-to-Point-Protocol</i>
PRBS	<i>PseudoRandom Binary Sequence</i>
PSC	<i>Packet Switch Capable</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RFC	<i>Request for Comments</i>
RIP	<i>Routing Information Protocol</i>
RLA	<i>Reduced Load Approximation</i>
RNP	Rede Nacional de Ensino e Pesquisa
ROADM	<i>Reconfigurable Optical Ad-Drop Multiplexer</i>
RSVP	<i>Resource Reservation Protocol</i>
RSVP-TE	<i>Resource Reservation Protocol-Traffic Engineering</i>
RWA	<i>Routing and Wavelength Assignment</i>
SBS	<i>Stimulated Brillouin Scattering</i>
SDH	<i>Synchronous Digital Hierarchy</i>

SLA	<i>Service Level Agreement</i>
SMF	<i>Single Mode Fiber</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
SONET	<i>Synchronous Optical Network</i>
SPM	<i>Self Phase Modulation</i>
SRLG	<i>Shared Risk Link Group</i>
SRS	<i>Stimulated Raman Scattering</i>
SSFNet	<i>Scalable Simulation Framework Network</i>
TCP	<i>Transport Control Protocol</i>
TDM	<i>Time Division Multiplexing</i>
TE	<i>Traffic Engineering</i>
TIDIA	<i>Tecnologia da Informação no Desenvolvimento da Internet Avançada</i>
TLV	<i>Type/Length/Value</i>
TSC	<i>TDM Switch Capable</i>
USA	<i>Unequal Spacing Allocation</i>
VINT	<i>Virtual InterNetwork Testbed</i>
VoD	<i>Video on Demand</i>
VoIP	<i>Voice over IP</i>
VPI	<i>Virtual Photonics Incorporated</i>
VPN	<i>Virtual Private Network</i>
WAM	<i>Wavelength Allocation Method</i>

WDM *Wavelength Division Multiplexing*

xDSL *x Digital Subscriber Line*

XPM *Cross-Phase Modulation*

1 INTRODUÇÃO

Um dos principais requisitos para o desenvolvimento de aplicações avançadas de multimídia, inclusive para atender às atuais demandas por serviços ubíquos¹, é a disponibilidade de uma infraestrutura de comunicações que integra voz, dados e imagens, sendo capaz de suportar inclusive usuários com mobilidade geográfica. Esta rede de comunicações deve não só absorver o enorme volume de tráfego gerado pelo crescente número de usuários, mas também ser capaz de suportar uma ampla diversidade de requisitos de QoS (*Quality of Service*) relativos aos serviços oferecidos. Confirmando este cenário, segundo dados apresentados pela ISOC (*Internet Society*) em seu relatório “*Growing Pains: Bandwidth on the Internet*”, o volume global de dados trafegados através da Internet mundial foi da ordem de 12 exabytes² por mês para o ano de 2009, com previsão de crescimento anual da ordem de 40% até o ano de 2013 [ISOC, 2010]. Na indústria, números semelhantes foram encontrados, conforme divulgado pela CISCO em seu relatório anual “*Cisco Visual Networking Index – Forecast and Methodology, 2009–2014*”, onde a projeção para o ano de 2014 é de 767 exabytes por ano, ou seja, 64 exabytes por mês [CISCO, 2010].

Grande parte da infraestrutura de rede hoje disponível está baseada no conceito de comutação de pacotes que, embora impondo restrições para manter o nível mínimo de qualidade de serviço (QoS – *Quality of Service*) exigido, oferece alta flexibilidade para atender às diferentes necessidades de aplicações com naturezas distintas [SCHONWALDER, 2009], [XIA, 2009], [SZYMANSKI, 2010].

Hoje a Internet e seus bilhões de usuários é uma forte candidata a se tornar o *core*³ de uma infraestrutura de comunicação global e, para isto, suas limitações iniciais impostas pela arquitetura TCP/IP (*Transport Control Protocol/Internet Protocol*) de prestação de serviço *best-effort* devem ser superadas progressivamente [SZYMANSKI, 2010].

¹ A computação ubíqua é a integração das funcionalidades da computação móvel em um ambiente onde os recursos computacionais estão disponíveis de forma distribuída e imperceptível ao usuário. Assim, os serviços ubíquos oferecem aos usuários o acesso aos recursos embarcados no ambiente utilizando as técnicas da computação móvel.

² 1 Exabyte: 10^{18} bytes.

³ *Core*: Parte comum da estrutura de uma rede que abrange o núcleo central responsável pelo transporte de dados entre usuários finais.

O desenvolvimento de novas tecnologias para aplicação nas redes de comunicações está, usualmente, voltado para o incremento da banda de transmissão e a progressiva redução de investimentos de implantação e custos operacionais. Tais requisitos, por sua vez, ao mesmo tempo atendem às crescentes demandas impostas principalmente pelo aumento no tráfego devido aos novos usuários, mas também estimulam o surgimento de aplicações multimídia que necessitam de taxas de transmissão cada vez maiores.

Em função da proliferação dos serviços multimídia, o volume de tráfego de dados IP tem apresentado crescimento expressivo nos últimos anos. Tal crescimento deve-se, principalmente, à disseminação de serviços como o VoIP (*Voice over IP*), o VoD (*Video on Demand*), o IPTV (*Internet Protocol Television*) e as aplicações de videoconferência, representando um grande desafio diante do volume de informações e do nível de qualidade de serviço requerido [JELINSKIS, 2010], [SALIBA, 2010].

As tecnologias de comunicações ópticas, desde o final da década de 70, têm dado sua contribuição no atendimento às demandas crescentes de tráfego, graças à evolução significativa dos dispositivos ópticos, fibras, amplificadores e sistemas de comutação que compõem a camada física. Além disso, a otimização do uso do meio físico óptico multiplicou a já alta capacidade de transmissão das fibras, com o aprimoramento da tecnologia WDM⁴ (*Wavelength Division Multiplexing*) [XIA, 2009].

1.1 Definição do Contexto

Em função da demanda dos futuros serviços multimídia a serem disponibilizados pela Internet, será necessária uma infraestrutura de comunicações capaz de atender a um tráfego dinâmico e diversificado formado por voz, dados e vídeo. Este desafio deve ser vencido por uma nova geração de redes, chamada particularmente de Internet do Futuro, onde deve ser oferecido um nível de QoS exigido para cada aplicação em particular, acordados no Contrato de Nível de Serviço (SLA – *Service Level Agreement*) [XIA, 2009], [GRINGERI, 2010].

As redes ópticas hoje são as únicas em condições de oferecer largura de banda e confiabilidade para compor esta nova geração de redes. Entretanto, grande parte da infraestrutura da rede de transporte óptica instalada emprega a Hierarquia Digital Síncrona

⁴ WDM: Técnica de multiplexação por comprimento de onda, que permite a multiplicação da capacidade de transmissão das fibras por meio da inserção de várias portadoras ópticas.

(SDH – *Synchronous Digital Hierarchy*), adequada à transmissão de voz utilizando a comutação por circuitos, associada à tecnologia WDM, que aumenta a capacidade de transmissão das fibras.

Para atendimento dos novos serviços, é necessário então que a nova geração de redes tenha um plano de controle capaz de conciliar os paradigmas de comutação por pacotes das redes IP/MPLS (*Internet Protocol/Multiprotocol Label Switching*), a alta capacidade de transmissão e confiabilidade das redes ópticas WDM/SDH e o comportamento altamente dinâmico da rede, oferecendo QoS fim-a-fim para cada caminho óptico (*lightpath*⁵) [MUÑOZ, 2009], [PAVANI, 2010].

Importantes entidades de padronização trabalham hoje para estabelecer um plano de controle inteligente para a nova geração de redes, além de interfaces de acesso para as redes de transporte. É o caso do ITU-T (*International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector*) que estruturou uma arquitetura para o plano de controle de redes de transporte ópticas inteligentes denominada de ASON (*Automatically Switched Optical Network*) [ITU, 2006], [ITU, 2010a], definindo os requisitos e mecanismos de controle e gerenciamento desvinculados das tecnologias empregadas. Já o IETF (*Internet Engineering Task Force*) estabeleceu um conjunto de protocolos para exercer as funções do plano de controle chamado GMPLS (*Generalized MultiProtocol Label Switching*) descrito na RFC 3495 [MANNIE, 2004]. Neste plano de controle estão previstas funcionalidades de roteamento e sinalização que possibilitam a unificação e simplificação de uma rede heterogênea [JELINSKIS, 2010], podendo ser mapeado na arquitetura ASON, conforme proposto na RFC 4397 [BRYSKIN, 2006].

A arquitetura GMPLS utiliza protocolos baseados em IP com extensões de Engenharia de Tráfego ou TE⁶ (*Traffic Engineering*) para efetuar o roteamento, a sinalização e o gerenciamento de enlaces compostos por diversas tecnologias.

Originalmente, as extensões TE para os protocolos de roteamento do GMPLS, ou seja, OSPF-TE (*Open Shortest Path First – TE*) conforme RFC 4203 [KOMPELLA, 2005a] e IS-IS-TE (*Intermediate System to Intermediate System – TE*) conforme RFC 4205 [KOMPELLA, 2005b], não levam em consideração a ampla disseminação das informações relativas à

⁵ *Lightpath*: Caminho estabelecido na camada óptica que interliga dois nós, para atender uma requisição de conexão. São atribuídas portadoras ópticas (lambdas) para o transporte das informações [RAMASWAMI, 2002]

⁶ TE: Conjunto de técnicas que evoluíram a partir do processo de roteamento clássico. Prevê aperfeiçoamento nos critérios de alocação dos recursos, melhorando o desempenho da rede.

camada física óptica necessárias para um roteamento mais eficiente [BERNSTEIN, 2009], [SAMBO, 2009a], Analogamente, os protocolos de sinalização estendidos para atender o GMPLS, sendo eles o RSVP-TE (*Resource Reservation Protocol-Traffic Engineering*) conforme RFC 3473 [BERGER, 2003a] e o CR-LDP (*Constraint-based Routing-Label Distribution Protocol*) conforme RFC 3472 [ASHWOOD, 2003], também não tratam diretamente as restrições da camada física [SAMBO, 2009]. Como consequência disto, aumenta-se a contenção de comprimentos de onda e, conseqüentemente, cresce a probabilidade de bloqueio de circuitos ópticos, com uma redução significativa no desempenho, especialmente em redes muito dinâmicas [MUÑOZ, 2009].

Propor extensões ao plano de controle do GMPLS que possam oferecer às altas demandas de tráfego os sinais ópticos mais adequados, aumentando assim o desempenho das redes, é um desafio hoje enfrentado por diversos grupos de estudos, trabalhando em várias plataformas de Pesquisa e Desenvolvimento [CHAVA, 2010], [JELINSKIS, 2010], [MARTINELLI, 2010], [PAVANI, 2010], [SAMBO, 2010], [SAMBO, 2009], [SAMBO, 2009a].

Visando proporcionar ao GMPLS maior visibilidade com relação às restrições da camada física, recentemente surgiram propostas para proporcionar maior integração entre o plano de controle e a camada óptica, estendendo os protocolos de roteamento e sinalização com a inserção de parâmetros físicos [CHAVA, 2010], [SAMBO, 2009], [SAMBO, 2009a].

Com relação ao protocolo OSPF-TE, a inclusão de parâmetros da camada física torna o processo de roteamento mais abrangente que o modelo clássico, prevendo a distribuição de informações TE para o estabelecimento das rotas e a definição dos circuitos ópticos a serem utilizados. Analisando parâmetros específicos, uma abordagem onde o roteamento leva em conta a situação dos regeneradores ao longo dos enlaces ópticos foi proposta em [SAMBO, 2009a].

Os efeitos lineares e não lineares gerados pela camada física sobre uma rede GMPLS foram avaliados e propostas para gerenciá-los, utilizando algoritmos RWA⁷ (*Routing Wavelength Assignment*) foram inicialmente apresentadas por Anagnostopoulos [ANAGNOSTOPOULOS, 2007] e Fischer [FISHER, 2007]. Como uma forma de otimizar o processo de roteamento, o plano de controle GMPLS recebe suporte dos algoritmos RWA específicos, propostos por Pavani e Waldman, os quais disseminam informações referentes à

⁷ RWA: Algoritmos para escolha de comprimentos de onda adequados, dentro do processo de roteamento [RAMASWAMI, 2002].

estrutura e ao estado da rede, envolvendo inclusive as restrições impostas pela camada óptica de cada caminho selecionado [PAVANI, 2008], [PAVANI, 2010].

Quanto à sinalização, foram propostas extensões ao protocolo RSVP-TE com o objetivo de introduzir parâmetros físicos associados à qualidade do canal óptico a ser utilizado. A utilização de parâmetros específicos relacionados à camada física durante o processo de estabelecimento dos *lightpaths* tais como, o *crosstalk*⁸ entre canais, a situação dos regeneradores ópticos ao longo dos enlaces e a PMD (*Polarization Mode Dispersion*), são abordagens já apresentadas em [SAMBO, 2008], [SAMBO, 2009a] e [SAMBO, 2010] respectivamente.

Dentro do contexto aqui apresentado, cujo objetivo foi apontar possíveis estruturas que comporão as redes de nova geração, destacam-se dois aspectos bastante relevantes e que, combinados, motivaram a elaboração deste trabalho. De um lado existe uma vasta gama de tecnologias de transporte, gerenciadas pelo GMPLS, que possibilitarão o atendimento tanto das demandas crescentes de tráfego quanto da oferta de novos serviços multimídia com padrões de QoS extremamente rigorosos. De outro lado, existe uma estrutura de camada física óptica onde, apesar da grande capacidade de transmissão e alta confiabilidade, são geradas penalidades e restrições que podem degradar os sinais transmitidos e contribuir para o aumento da BER⁹ (*Bit Error Rate*) caso a escolha dos *lightpaths* não seja feita de forma adequada.

1.2 Objetivo e Escopo

As redes totalmente ópticas, também chamadas de transparentes¹⁰, atualmente são consideradas como a opção tecnológica mais adequada para compor a rede de transporte de nova geração, tanto do ponto de vista operacional, proporcionando flexibilidade e escalabilidade, quanto no atendimento aos requisitos dos novos serviços [GRINGERI, 2010].

⁸ *Crosstalk*: Efeito que ocorre em sistemas multicanaís, caracterizado pela interferência gerada por dado um canal em canais a ele adjacentes [RAMASWAMI, 2002].

⁹ BER: Indicador da qualidade de um sinal digital recebido, calculado pela relação entre o número de bits recebidos com erro e o número total de bits recebidos.

¹⁰ Redes ópticas transparentes: São redes que não utilizam as conversões O-E-O (Óptica-Elétrica-Óptica) ao longo dos caminhos, ou seja, os *lightpaths* permanecem no domínio óptico da origem até o destino.

Em contrapartida, a atual estrutura da camada física apresenta um alto grau de diversificação e complexidade, associando aos *lighpaths* múltiplas condições de transmissão (atenuação, dispersão e não linearidades) em função da combinação de segmentos da rede que são interligados no momento da requisição de um caminho comutado dentro da rede [LOPES, 2009], [CHAVA, 2010], [SAMBO, 2010].

Como uma característica das redes de nova geração, espera-se um alto grau de transparência na rede de transporte, agregando-se características desejáveis como disponibilidade de banda de transmissão e confiabilidade. Por outro lado, como os efeitos lineares e não lineares no meio óptico podem comprometer os sinais transmitidos na camada física, espera-se que o controle da qualidade destes sinais nos *lighpaths* deva ser garantido de alguma forma, pois, caso contrário, colocaria em risco toda a estratégia de roteamento e estabelecimento dos *lightpaths*. [JELINSKIS, 2010], [SAMBO, 2010], [PAVANI, 2010].

Tomando-se como base o conjunto de protocolos que compõem o GMPLS, o desenvolvimento de extensões que deem um tratamento adequado às restrições da camada física é um campo de pesquisa ainda em exploração, face às inúmeras publicações recentes aqui referenciadas, sendo este o objetivo geral deste trabalho. Comprovando a relevância do tema, o IETF está hoje propondo extensões ao plano de controle do GMPLS para tratar os efeitos da camada física a cada nó em um dado *lighpath*, conforme apresentado em [MARTINELLI, 2010].

Entre as soluções aqui discutidas para tratamento dos efeitos da camada física por meio do Plano de Controle do GMPLS, é importante salientar que extensões que envolvam os protocolos de roteamento necessitam que os parâmetros relativos à camada física sejam distribuídos e armazenados em cada um dos nós da rede, representando uma carga de tráfego adicional para a rede [SAMBO, 2010]. Por esta razão, o IETF está discutindo soluções mais escaláveis utilizando os protocolos de sinalização, mais especificamente o RSVP-TE, onde extensões tratam os efeitos da camada física óptica a partir da introdução de novos parâmetros, como por exemplo, o nível de potência do sinal óptico, a OSNR¹¹ (*Optical Signal to Noise Ratio*), a dispersão cromática e a PMD (*Polarization Mode Dispersion*) [SAMBO, 2010], [MARTINELLI, 2010].

¹¹ OSNR: Define-se para sinais elétricos a SNR (*Signal to Noise Ratio*) como sendo a relação entre a potência do sinal e a potência do ruído na recepção, normalmente dado em dB. Aplica-se o mesmo conceito para o caso de sinais ópticos, resultando na *Optical* SNR (OSNR).

Concentrando-se nas restrições da camada física óptica, uma das mais relevantes e que ainda hoje é objeto de intensa investigação é a mistura de quatro ondas, ou FWM (*Four-Wave Mixing*), efeito não linear presente em sistemas multicanais e considerado um dos maiores limitantes para a utilização de sistemas WDM [MARSDEN, 2009], [RANDHAWA, 2009], [SINGH, 2009], [SINGH, 2010]. São fatores que contribuem para o seu crescimento o alto grau de ocupação dos comprimentos de onda para atender as demandas de tráfego, a baixa dispersão cromática, o adensamento dos canais resultado do DWDM¹² (*Dense WDM*) e a operação com altos níveis de potência óptica, todos presentes no contexto das redes de nova geração. [MARSDEN, 2009], [SINGH, 2010]. Originado pela interação entre três frequências f_i , f_j e f_k resultando em sinais interferentes do tipo $f_{ijk} = f_i + f_j - f_k$, seus efeitos tornam-se importantes pois são geradas novas componentes f_{ijk} dentro do espectro de operação dos sistemas WDM. Sua caracterização e descrição de seus efeitos nos enlaces DWDM serão feitas nos Capítulos subsequentes.

Tanto nos trabalhos recentes aqui referenciados quanto nas proposições preliminares apresentadas pelo IETF [MARTINELLI, 2010], apesar de previstos parâmetros para tratamento dos efeitos da camada óptica no estabelecimento dos *lightpaths*, ainda não está definida toda a gama destes efeitos e não foram estabelecidos os mecanismos efetivos que o GMPLS utilizará para minimizar os seus impactos no desempenho da rede.

Procurando contribuir para a integração do plano de controle com a camada física óptica, abordando aspectos relevantes e ainda indefinidos, o objetivo específico deste trabalho é apresentar uma proposta de minimização dos impactos da FWM em uma rede óptica DWDM gerenciada pelo GMPLS. Tais impactos interferem diretamente na capacidade que a rede tem de prover caminhos ópticos com um determinado padrão de qualidade, definido neste trabalho como QoS óptico. Para avaliar o nível do QoS óptico o parâmetro a ser utilizado como referência é a SNR de cada canal óptico, medida no nó de destino. Importante salientar que, durante o desenvolvimento deste trabalho, será interessante avaliar a qualidade do sinal fim-a-fim percebida pelo nó de destino após a conversão OE (Óptica-Elétrica), sendo levantado neste caso o parâmetro SNR.

São propostas e avaliadas extensões ao protocolo de sinalização RSVP-TE que auxiliam na escolha dos *lightpaths* mais adequados para cada conexão ingressante provenientes de redes

¹² DWDM: Evolução dos sistemas WDM que prevê aumento da densidade das portadoras devido à redução do espaçamento entre canais para até 12,5 GHz ou, aproximadamente, 0,1 nm, conforme recomendação ITU-T Rec. G.694.1 [ITU, 2002].

de pacotes IP. Operando de forma conjunta com as extensões ao GMPLS, serão também apresentados e avaliados métodos de alocação de comprimentos de onda específicos que minimizem os efeitos interferentes da FWM tanto nas conexões ingressantes quanto nas já estabelecidas. Os resultados buscados devem comprovar a eficiência, tanto das extensões ao RSVP-TE quanto dos métodos de alocação de comprimento de onda. Para tanto, foram levantados valores de bloqueio da rede para cada uma das extensões propostas e os resultados comparados para diversas cargas de tráfego. Para obtenção dos resultados, foram desenvolvidos e integrados dois ambientes de simulação que, uma vez integrados, compõem a plataforma de desenvolvimento. Um dos ambientes emula o plano de controle da rede GMPLS e o outro emula a camada física óptica. Cada um destes ambientes, bem como a plataforma de desenvolvimento resultante serão descritos nos Capítulos subsequentes.

1.3 Organização da Tese

O presente trabalho foi organizado como descrito a seguir:

O Capítulo 2 fornece uma visão geral da área envolvida e a evolução tecnológica das redes de transporte, partindo do MPLS (*Multiprotocol Label Switching*) e concluindo com os principais conceitos do GMPLS e sua estrutura topológica. O capítulo é encerrado com uma abordagem sobre as restrições da camada física no contexto do GMPLS e sobre os trabalhos existentes para o gerenciamento de seus efeitos.

O Capítulo 3 aborda o problema a ser tratado, discutindo os fatores que contribuíram para o aumento da relevância dos efeitos da camada física na rede de transporte. Em seguida são caracterizadas as penalidades geradas pelo efeito FWM, suas origens nas redes ópticas modernas e as dificuldades de seu gerenciamento.

No Capítulo 4 é apresentado o método a ser empregado para atingir o objetivo principal da Tese, ou seja, melhorar o QoS óptico por meio do gerenciamento dos efeitos da FWM. A solução proposta prevê extensões ao RSVP-TE que, a partir de uma base de dados com as restrições da camada física, tem condições de avaliar a qualidade dos sinais ópticos associados aos *lightpaths*.

Uma vez definidos o problema a ser tratado e a proposta de solução, no Capítulo 5 é apresentada a implementação de uma plataforma de testes para, tanto validar a solução indicada quanto para observar o comportamento da rede em várias situações de tráfego e em função dos métodos de alocação de comprimentos de onda (WAM – *Wavelength Allocation*

Methods). A plataforma definida é formada por dois ambientes de simulação que emulam a camada óptica e o Plano de Controle do GMPLS. No Anexo A é apresentada a avaliação das principais ferramentas de simulação que foram candidatas a compor a plataforma de teste e abordados os critérios de escolha empregados.

A validação da solução e do método propostos, referente à extensão ao protocolo RSVP-TE, é apresentada no Capítulo 6. Os resultados obtidos nas simulações com relação ao comportamento do bloqueio da rede, em função dos WAMs, são apresentados e comparados. Propondo melhorias aos WAMs tradicionais, uma nova classe de métodos de alocação especialistas, aqui chamados de híbridos, é definida e seus resultados avaliados. Finalizando o Capítulo, uma análise da influência do espaçamento entre canais na eficiência dos WAMs é mostrada.

No Capítulo 7 são apresentadas as considerações finais deste trabalho, uma análise crítica dos resultados obtidos e as principais contribuições. São também indicados os possíveis trabalhos futuros, os quais poderão dar sequência ao tema aqui abordado.

2 REDES DE TRANSPORTE, GMPLS E A CAMADA ÓPTICA

Será apresentada, neste capítulo, uma visão das redes de transporte, partindo dos padrões SONET/SDH (*Synchronous Optical Network /Synchronous Digital Hierarchy*) e abordando em seguida as redes WDM (*Wavelength Division Multiplexing*). Serão apresentadas suas características principais e seus elementos funcionais serão caracterizados.

Os padrões atuais para as redes de transporte de nova geração serão descritos em seguida, sendo apresentadas as arquiteturas propostas pelo ITU-T (*International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector*) e pelo IETF (*Internet Engineering Task Force*).

Os princípios da comutação por rótulos utilizados no MPLS (*MultiProtocol Label Switching*), inclusive com aplicações diretamente no domínio óptico, tais como o *Optical MPLS* são apresentados. Em seguida serão discutidas as extensões que resultaram no GMPLS.

Ao final, as principais restrições da camada física e seus efeitos nas redes DWDM serão caracterizados. Algumas abordagens já propostas, envolvendo o GMPLS (*Generalized MPLS*) para estudar e minimizar os impactos destas restrições, são caracterizadas.

2.1 A Evolução das Redes de Transporte

As redes de comunicações surgiram originalmente para atendimento dos serviços telefônicos na área de telecomunicações, sendo que, a partir da década de 80, se desenvolveram intensamente com o advento dos computadores, passando a transportar dados, além da voz [FOROUZAM, 2008].

Mesmo antes da definição formal das redes de transporte, feita pelo ITU-T a partir da recomendação G. 805 [ITU, 2000], no final dos anos 80 são propostas arquiteturas digitais utilizando tecnologia TDM (*Time Division Multiplexing*) que teriam a missão de interligar redes de localidades distintas [ITU, 2000], [RAMASWAMI, 2002]. Integrando a tecnologia digital com os recursos que emergiam do domínio óptico, surgem as redes de transporte do

padrão SONET/SDH¹³ oferecendo níveis de desempenho e de confiabilidade necessários para atender os serviços de voz e dados da época [AMAZONAS, 2005], [RAMASWAMI, 2002].

Com a evolução para as redes de transporte totalmente ópticas, o uso da técnica WDM permitiu que, além do aumento da capacidade de transmissão das fibras, fosse possível oferecer um circuito comutado fim-a-fim dentro do domínio óptico, ou seja, utilizando-se um *lightpath* que interliga a origem e o destino da conexão por meio de uma sequência de nós da rede. Nesta estrutura, denominada na literatura de rede WDM, é importante ressaltar que nos nós intermediários podem ocorrer comutação entre fibras ou até conversão de comprimento de onda (utilizando a conversão O-E-O ou diretamente no domínio óptico), caso haja problema de continuidade que impeça o estabelecimento da conexão [RAMASWAMI, 2002].

Na Figura 2-1 está representada uma rede WDM típica e seus principais elementos. Nesta estrutura são oferecidos serviços de transporte de informações para roteadores IP e terminais SDH, que compõem as chamadas redes clientes. As principais funções de cada elemento são [RAMSWAMI, 2002]:

- Terminais Ópticos de Linha (OLT – *Optical Line Terminals*): têm tanto a função de multiplexar vários comprimentos de onda compondo o sinal WDM para então inserí-lo na fibra quanto a demultiplexação do sinal WDM vindo da fibra, decompondo em seus vários canais.
- Comutadores Ópticos (OXC - *Optical Cross-Connect*): representam cada um dos nós da rede e são interligados entre si pelos enlaces de fibras ópticas. Desempenham a função de roteamento por comprimento de onda, efetuando a comutação de canais entre fibras. Podem ter também a função de conversão de comprimento de onda.
- Multiplexadores Ópticos (OADM - *Optical Add-Drop Multiplexer*): utilizados em pontos da rede onde é necessária a inserção (*add*) ou retirada (*drop*) de canais referentes, respectivamente, às conexões originadas ou terminadas localmente.

¹³ SONET/SDH: Padrões de arquitetura de redes ópticas de transporte que realizam multiplexação TDM (*Time Division Multiplexing*) determinística (síncrona), concebidos na década de 80. Tais redes são estruturadas em diferentes níveis hierárquicos que operam em taxas crescentes e múltiplas da taxa básica. O padrão europeu SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) foi concebido pelo ITU-T e utiliza taxa básica de 155 Mbps. Já o padrão americano SONET (*Synchronous Optical Network*) foi estabelecido pela ANSI (*American National Standards Institute*), no qual esta taxa é igual a 51 Mbps [RAMASWAMI, 2002], [FOROUZAM, 2008].

Figura 2-1: Rede óptica WDM e seus elementos básicos.

Utilizando-se a tecnologia WDM é possível multiplicar a capacidade de transmissão das fibras e permitir que sejam alocados canais ópticos representados pelos comprimentos de onda λ_1 , λ_2 e λ_3 , os quais constituem os *lighthpaths*. Para o estabelecimento das conexões que interligam tanto os roteadores IP quanto os terminais SDH é importante observar que todos os elementos envolvidos (OADM, OXC, OLT e fibras ópticas) contribuem para a degradação do sinal transmitido, resultado dos diversos parâmetros ópticos envolvidos, tais como a atenuação, a dispersão cromática e as não linearidades, reduzindo a relação sinal ruído óptica (OSNR) e consequentemente aumentando a BER.

Importantes organizações de padronização têm direcionado esforços para a definição de uma arquitetura padrão para as redes de transporte de nova geração. De um lado o ITU-T, inicialmente conforme a recomendação G. 805 [ITU, 2001], onde foi proposto o modelo funcional genérico, que fosse independente da tecnologia empregada. Posteriormente, direcionando os estudos para as redes ópticas de transporte, o ITU-T definiu a arquitetura ASON (*Automatically Switched Optical Network*), conforme recomendação G. 8080 [ITU,

2006] e complementada pela recomendação G.8081 [ITU, 2010a]. Já o IETF, estendendo os conceitos de comutação por rótulos do MPLS para diversas tecnologias de comutação, apresentou o GMPLS conforme a RFC 3945 [MANNIE, 2004]. O GMPLS é formado por um conjunto de protocolos que compõem um plano de controle que é também candidato a compor as redes de nova geração [JELINSKIS, 2010], [TORNATORE, 2009]

Importante notar que tanto a proposta do ITU-T (ASON) quanto a do IETF (GMPLS) preveem uma rede de transporte totalmente óptica gerenciada por um plano de controle genérico o suficiente para suportar diferentes tecnologias [ITU, 2006], [MANNIE, 2004].

Farrel sugere uma visão das redes segmentada em estruturas funcionais, chamadas de planos, para melhor caracterizar as redes complexas e em particular as redes de transporte de última geração [FARREL, 2006]. Tais planos são formados por conjuntos de elementos com funções e responsabilidades similares e que se comunicam entre si por meio de mensagens específicas. [FARREL, 2006], [ITU-2006].

Uma estrutura clássica para a rede proposta por Farrel prevê a existência de três planos básicos: dados, controle e gerenciamento, conforme indicado na Figura 2-2 [FARREL, 2006]. Os dados entre usuários finais trafegam através do plano de dados, também denominado de plano de transporte, onde as conexões indicadas em linha tracejada representam os enlaces físicos estabelecidos na rede. O plano de controle é, por vezes, subdividido em plano de roteamento e plano de sinalização. No plano de roteamento operam protocolos que distribuem dinamicamente as informações de conectividade e alcance dos usuários, estabelecendo assim as possíveis conexões lógicas entre os nós de rede. Já no plano de sinalização operam os protocolos que são responsáveis pelo estabelecimento, gerenciamento e liberação das conexões físicas dentro do plano de dados, além de reservar e liberar os recursos necessários para cada conexão. Importante salientar que somente no plano de dados que os caminhos indicados na Figura 2-2 são realmente conexões físicas. Nos demais planos, as linhas indicadas em tracejado representam a comunicação entre os nós e são implementadas por conexões lógicas, não correspondendo necessariamente a uma conexão física equivalente no plano de dados.

Figura 2-2: Modelo de Arquitetura da Rede de Transporte formada por planos funcionais [FARREL, 2006].

Finalmente, na parte superior da arquitetura está o plano de gerenciamento, responsável pela monitoração da atividade da rede, gerenciando falhas, configurações e recursos, além de ativar diagnósticos e levantar estatísticas de desempenho.

2.2 A Comutação por Rótulos e o MPLS

O uso em larga escala das fibras ópticas, suportando transmissão em altas taxas com confiabilidade, facilitou o transporte do tráfego multimídia nas redes de dados. Em contrapartida, as redes TCP/IP originalmente não foram concebidas para escoar este tipo de tráfego, principalmente devido às exigências específicas quanto aos atrasos. Soluções integradas envolvendo as redes ATM no transporte de tráfego IP em altas velocidades sugeriram, como é o caso do MPOA (*MultiProtocol Over ATM*) [DOURADO, 2000], mas eram estruturas complexas e de alto custo de implantação e manutenção. Diante deste cenário, já no final da década de 90, foram direcionados esforços para o desenvolvimento de tecnologias que possibilitassem o transporte de pacotes IP identificados por uma sequência de rótulos de

tamanho fixo [KUROSE, 2009]. O IETF, num esforço conjunto entre a comunidade científica e a indústria criou um grupo de trabalho para padronizar as tecnologias de comutação por rótulos (*label switching*) emergentes na época.

Assim, a comutação por rótulos é caracterizada pelo encaminhamento de pacotes devidamente identificados, combinando os protocolos de controle IP e os mecanismos de estabelecimento de caminhos a partir da distribuição de rótulos pré-estabelecidos. O IETF especificou, por meio de RFCs (*Request for Comments*), como a RFC 3031 [ROSEN, 2001], um conjunto de protocolos denominado MPLS (*Multiprotocol Label Switching*), integrando efetivamente técnicas de comutação de circuitos virtuais em uma rede de datagramas com roteadores.

Em uma rede IP clássica, os pacotes são encaminhados via roteadores a partir de informações do cabeçalho IP, onde apenas a informação do endereço de destino é utilizada para efetuar o roteamento. Já em uma rede MPLS, os dados do cabeçalho IP são utilizados apenas pelo controle de admissão dos roteadores de ingresso para mapear o pacote em uma categoria denominada de FEC (*Forwarding Equivalence Class*). Uma FEC descreve um conjunto de pacotes que possuem características similares ou idênticas, como por exemplo, o endereço de destino. Todos os pacotes pertencentes a uma mesma FEC são encaminhados segundo o mesmo critério.

Cada pacote recebe um rótulo (*label*) ao ingressar na nuvem MPLS, que será utilizado exclusivamente para encaminhar os pacotes através do núcleo MPLS (o cabeçalho IP não é utilizado pelos algoritmos de chaveamento).

A inserção do rótulo MPLS possibilita a integração entre diferentes tecnologias da camada de enlace, entre elas as tecnologias da família Ethernet (*Fast e Gigabit Ethernet*), FDDI¹⁴ (*Fiber-Distributed Data Interface*), ATM, Frame Relay e PPP¹⁵ (*Point-to-Point-Protocol*) e de rede, conforme indicado na Figura 2-3, justificando assim o termo *MultiProtocol*.

¹⁴ FDDI: Tecnologia de redes ópticas padronizada pelo ANSI (*American National Standards Institute*) conforme a recomendação ISO/IEC 9314 e implementada por meio de anéis de fibra onde as transmissões de dados ocorrem mediante a posse de permissão (*token*) que circula pela rede [KUROSE, 2009].

¹⁵ PPP: Protocolo de camada de enlace que interliga dois nós (pontos) da rede conectados diretamente, e é, normalmente, implementado utilizando linhas telefônicas discadas [KUROSE, 2009].

IPv4		IPv6			Protocolos de Camada de Rede
MPLS					Comutação por Rótulos
Fast, Giga e 10Gigabit Ethernet	FDDI	ATM	Frame Relay	PPP	Protocolos de Camada de Enlace

Figura 2-3: Protocolos de camada de enlace e de rede integrados pelo MPLS.

A estrutura do pacote após a inserção do cabeçalho MPLS está apresentada na Figura 2-4.

Cabeçalho da Camada de Enlace	Cabeçalho MPLS	Cabeçalho IP	Restante do quadro da camada de Enlace
-------------------------------	----------------	--------------	--

Figura 2-4: Estrutura do quadro de camada de enlace compatível com MPLS [KUROSE, 2009].

O MPLS emprega um modo de entrega de pacotes que leva em conta também o controle do caminho na rede. Assim como no ATM, o roteador MPLS ou LSR (*Label-Switching Router*) examina o rótulo dentro do cabeçalho de 32 *bits*, e determina qual trajeto a ser seguido na rede, atribuindo ao pacote um novo rótulo em função do rótulo de entrada. O percurso assim estabelecido, utilizado por pacotes pertencentes a uma determinada FEC, é chamado de caminho comutado por rótulo ou LSP (*Label-Switched Path*) [XIAO, 2000].

Para possibilitar a comutação por rótulos dentro da nuvem MPLS, cada LSR possui uma tabela chamada LFIB (*Label Forwarding Information Base*), a qual é utilizada para determinar o encaminhamento dos pacotes que atravessam a rede. Quando um pacote é recebido em um LSR, o seu rótulo é consultado na LFIB e, de acordo com o rótulo de entrada, um novo rótulo de saída é atribuído e o pacote é encaminhado em uma interface de saída adequada. Já próximo ao destino, quando o pacote deixa a rede ou nuvem MPLS, o cabeçalho MPLS é removido.

Uma vez estabelecida uma correspondência entre uma determinada FEC e seu respectivo rótulo, fica definido um LSP para pacotes enviados pelo nó de origem A para um nó de destino B. A RFC 3031 [ROSEN, 2001] define que, nesta situação, o nó de origem A é chamado de *upstream* LSR e o de destino *downstream* LSR. Esta associação indica apenas que um determinado rótulo representa uma FEC em particular, para os pacotes que trafegam do nó *upstream* para o nó *downstream* [ROSEN, 2001].

A Figura 2-5 ilustra a operação de encaminhamento de pacotes através de uma nuvem MPLS.

Figura 2-5: Encaminhamento de pacotes através de uma rede MPLS.

Na Figura 2-5 estão indicadas duas conexões ingressantes à rede MPLS, sendo mostrada a comutação de rótulos feita pelos LSRs. A primeira conexão é feita a partir da Rede C, por meio do roteador R1, com destino à rede D. De acordo com o endereço de destino presente no cabeçalho IP e as informações da LFIB, o LSR1 (*upstream* LSR) associa cada pacote à respectiva FEC (D, no caso) e, conseqüentemente, a um LSP, atribuindo um rótulo ao pacote e encaminhando para o próximo salto. O LSR2 (*downstream* LSR) consulta as informações da LFIB para encaminhar corretamente os pacotes por meio do roteador R3, atingindo a rede D. Ao egressar da nuvem MPLS, nenhum rótulo é atribuído aos pacotes. Analogamente, a segunda conexão é feita a partir da rede B, por meio do roteador R2, com destino à rede A.

Consultando novamente a LFIB, o LSR1 associa cada pacote recebido à respectiva FEC (A, no caso) e atribui um rótulo ao pacote, encaminhando-o para o próximo salto. Os LSR3 e LSR4 consultam as informações da LFIB para conduzir os pacotes até a rede A via roteador R4.

Também com o aumento da extensão e complexidade das redes, surgiram ferramentas utilizadas para gerenciar o escoamento do tráfego, otimizando assim os recursos da rede. Ao conjunto de aplicações, mecanismos e princípios que permitem a monitoração, caracterização e controle do tráfego de pacotes com a finalidade de atingir determinado grau de desempenho na rede é chamado de Engenharia de Tráfego (TE) [AWDUCHE, 1999]. Tais técnicas foram propostas pelo IETF, conforme a RFC 2702 [AWDUCHE, 1999], e vieram ao encontro das necessidades das grandes redes, tais como a Internet, que até então utilizavam, basicamente, mecanismos de escolha de rotas em função dos menores caminhos (*shortest paths*). A utilização do critério do menor caminho pode, por um lado, otimizar a utilização dos recursos da rede pois ocupa um número menor de enlaces, mas, em contrapartida, pode gerar focos de congestionamento em determinados enlaces e, simultaneamente, recursos subutilizados em outros [XIAO, 2000].

O MPLS, além de normalmente oferecer ganhos devido à agilidade na comutação de pacotes, apresenta vantagens reais vão além, proporcionando à rede mecanismos eficientes de gerenciamento de tráfego e alocação de recursos. Esta nova visão abrange o conceito de engenharia de tráfego, ou TE (*Traffic Engineering*), que envolve um conjunto de mecanismos de controle e distribuição do tráfego para maximização do desempenho das redes [XIAO, 2000].

Neste sentido, o IETF estabeleceu a inclusão da extensão aos protocolos existentes para compor o conjunto de protocolos MPLS-TE, dentro dos conceitos de engenharia de tráfego, cujos parâmetros estão definidos na RFC 3346 [BOYLE, 2002]. Surgem daí as extensões para os protocolos de roteamento OSPF-TE (*Open Shortest Path First – TE*), conforme RFC 3630 [KATZ, 2003] e IS-IS-TE (*Intermediate System to Intermediate System-TE*) conforme RFC 3784 [SMIT, 2004], para alocação de recursos RSVP-TE (*Resource Reservation Protocol-TE*) com a RFC 3209 [AWDUCHE, 2001], além de controle e distribuição dos rótulos na rede CR-LDP (*Constraint-based Routing-Label Distribution Protocol*) com a RFC 3212 [JAMOSSI, 2002].

A rápida evolução dos dispositivos ópticos como OXCs (*Optical Cross-Connects*) e OADM (*Optical Add-Drop Multiplexer*) sugere a possibilidade das redes IP operarem diretamente sobre o DWDM, eliminando-se as camadas intermediárias. Assim, tal simplificação resulta

em uma rede com um custo menor, alta escalabilidade e maiores taxas de transmissão e de comutação, sendo denominada de arquitetura IP-sobre-DWDM [ZHENSHENG, 2001], [BANERJEE, 2001].

Apesar da sua simplicidade, a arquitetura IP/DWDM exige a implementação de funcionalidades adicionais na camada óptica para provimento de QoS [COMELLAS, 2003]. Além disto, o MPLS não prevê o controle de redes ópticas flexíveis, sendo necessário um plano de controle unificado para possibilitar a integração entre a camada IP/MPLS e a camada óptica.

2.3 A Comutação por Rótulos no Domínio Óptico e o GMPLS

O crescimento dos serviços baseados em IP/MPLS desencadeou um aumento na demanda por portadoras ópticas, obrigando as redes de transporte a incorporarem mecanismos de roteamento mais eficientes e totalmente automatizados. As técnicas de engenharia de tráfego, restauração e supervisão de enlaces passariam a ser aplicadas também nas redes ópticas, evoluindo conjuntamente com os sistemas DWDM, objetivando aumento de capacidade e alocação automática de comprimentos de onda [PAPADIMITRIOU, 2003].

Os paradigmas da comutação por rótulos migraram para a camada óptica e serviram como base para a proposição de extensões ao MPLS no domínio óptico, o *Multiprotocol Lambda Switching* (MP λ S) e o *Optical Multiprotocol Label Switching* (Optical MPLS) [BAGULA, 2007], [GORDON, 2006]. Neste contexto surge o GMPLS, cuja arquitetura funcional será apresentada nos itens subsequentes.

2.3.1 Comutação por Rótulos no Domínio Óptico

Com a expansão da rede IP suportada pela agilidade oferecida pelo MPLS, já a partir da década de 90 surgiram estudos para que a rede óptica passasse da condição de comutação manual de fibras, obtida por meio da conexão de fibras interligadas via sistemas DWDM, para a comutação automática e dinamicamente ajustável. Visando proporcionar a largura de banda e confiabilidade oferecidas pela camada óptica às redes clientes IP e com base nos paradigmas

presentes no MPLS, surge o *Multiprotocol Lambda Switching* (MP λ S), que utiliza comprimentos de onda como rótulos a serem comutados na rede óptica por meio de OXCs adequados [CHO, 2001], [PAPADIMITRIOU, 2003], [PAPADIMITRIOU, 2003a], [BAGULA, 2007].

Uma possível extensão do conceito MPLS para as redes totalmente ópticas foi proposta por inúmeros trabalhos, onde o gargalo imposto pelo domínio elétrico pode ser reduzido com a inserção de etiquetas ópticas ao pacote, técnica chamada de *Optical MPLS* [COMELLAS, 2003], [JEON, 2003], [GORDON, 2006]. Aguarda-se ainda a disponibilização de sistemas de comutação por rótulos ópticos, visto que a tecnologia para sua implementação ainda está em desenvolvimento [SAWADA, 2010].

A partir dos conceitos apresentados pelo MP λ S e o *Optical MPLS*, uma extensão da comutação por rótulos voltada para redes totalmente ópticas e com possibilidade de agregar diferentes tecnologias de comutação, surge o GMPLS para permitir a integração entre o IP e a camada óptica, provendo um plano de controle que transforme as redes ópticas em redes de próxima geração [COMELLAS, 2003], [JELINSKIS, 2010], [MUÑOZ, 2009], [PAPADIMITRIOU, 2003].

2.3.2 O Generalized MPLS

Diante do crescimento do tráfego IP no ambiente da Internet, a agregação de novos serviços com requisitos de garantia de banda e baixa latência impõe à rede um controle cada vez mais rígido da QoS oferecida. Estas tendências apontam para um novo cenário onde a integração entre as redes comutadas a circuito e as redes IP/MPLS seja plena, eficiente e propicie redução de custos.

Trabalhos desenvolvidos pelo IETF e pelo OIF (*Optical Internetworking Forum*) a partir de 2002, apontam para a tecnologia GMPLS como uma proposta para atender os requisitos das operadoras e usuários finais das redes. O conjunto de protocolos GMPLS estende os conceitos do MPLS por meio da implementação de um Plano de Controle comum para várias tecnologias de comutação, entre elas: por pacotes, por tempo, por comprimento de onda e por fibras, suportando assim as necessidades das redes avançadas [CHUNG, 2002].

Em 2004, o IETF propõe a arquitetura GMPLS conforme a RFC 3945 [MANNIE, 2004], definindo como uma plataforma para estabelecimento de caminhos na rede com base em requisitos dos usuários finais, conectando redes IP por meio de enlaces DWDM que são

comutados por determinados comprimentos de onda em fibras específicas. Além disto, o GMPLS prevê interfaces para diversas tecnologias de comutação, ou seja, por pacotes, por tempo, por comprimento de onda e por fibra. [MANNIE, 2004].

O GMPLS, apesar de estar sendo desenvolvido em grande parte pelo IETF, recebe um forte apoio da indústria, sendo também o padrão do plano de controle para a arquitetura ASON proposto pela ITU-T conforme previsto nas recomendações ITU-T G.7713.2 - *Distributed Call and Connection Management: Signalling mechanism using GMPLS RSVP-TE* [ITU, 2003] e G.7713.3 - *Distributed Call and Connection Management: Signalling mechanism using GMPLS CR-LDP* [ITU, 2003a].

2.3.3 Definição e Hierarquia de LSPs (*Label Switched Paths*)

O GMPLS difere do MPLS tradicional, pois, prevê um amplo espectro de domínios de comutação e, para prover um caminho ótimo baseado nos requisitos de cada tipo de tráfego, novas formas de rótulos foram previstas. A este conjunto de rótulos é dado o nome de rótulos generalizados [MANNIE, 2004]. Dentro desse conceito, um rótulo generalizado está associado não somente a um conjunto de pacotes, mas também identifica um intervalo de tempo, um comprimento de onda e uma determinada fibra óptica. Assim, cada rótulo generalizado é associado a um LSP (*Label Switched Path*) e vários LSPs podem ser multiplexados em cada uma das interfaces nos LSR (*Label Switching Routers*).

Para cada modalidade de comutação, foram definidas as correspondentes interfaces, que podem ser classificadas como [MANNIE, 2004], [FARREL, 2006]:

- **PSC (*Packet Switch Capable*):**
Interfaces que suportam comutação por pacotes, cujo encaminhamento de dados está baseado no conteúdo do cabeçalho de cada pacote. Roteadores MPLS podem ser exemplos que utilizam tal interface.
- **L2SC (*Layer-2 Switch Capable*):**
Interfaces que reconhecem quadros ou células e podem efetuar comutação por meio do cabeçalho de cada quadro/célula. Tais interfaces operam com comutadores Ethernet ou ATM.
- **TDM (*Time Division Multiplexing Switch Capable*) ou TSC (*TDM Switch Capable*):**
Interfaces com capacidade de multiplexação temporal (TDM), baseadas em intervalos de tempo repetitivos. Entre as tecnologias TDM, amplamente utilizadas inicialmente

nas redes de telecomunicações, pode-se citar duas importantes hierarquias digitais de transmissão: uma síncrona, o padrão SONET/SDH e uma plesiócrons, que compõe a estrutura PDH¹⁶ (*Plesiochronous Digital Hierarchy*).

- LSC (*Lambda Switch Capable*):

Interfaces que suportam a comutação por comprimentos de onda dentro do domínio óptico. Equipamentos como OXC e OADM são exemplos que utilizam tal interface;

- FSC (*Fiber Switch Capable*):

Interfaces com capacidade de comutação de dados entre fibras fisicamente distintas. Os equipamentos OXC apresentam tal interface, podendo operar com uma ou várias fibras.

A hierarquia entre as interfaces GMPLS pode ser visualizada na Figura 2-6 [FARREL, 2006].

Figura 2-6. Hierarquia dos LSPs [FARREL, 2006].

¹⁶ PDH: Tecnologia de transmissão digital plesiócrons que utiliza a multiplexação por divisão no tempo (TDM). Tal arquitetura é estruturada em diferentes níveis hierárquicos que operam em taxas crescentes e múltiplas da taxa básica. No padrão europeu PDH o primeiro nível (E1) é formado por 32 canais de 64 kbps cada, compondo um canal com 2,048 Mbps de hierarquia de primeira ordem. Já no padrão americano o primeiro nível (DS1) é formado por 24 canais de 64 kbps, resultando em um canal com 1,544 Mbps [RAMASWAMI, 2002], [FOROUZAM, 2008].

2.4 Arquitetura do GMPLS e Descrição dos Protocolos

O GMPLS utiliza protocolos baseados em IP com extensões TE adequadas para atender aos novos paradigmas desta tecnologia. No ambiente criado pelo GMPLS, as extensões TE incorporadas aos protocolos concebidos originalmente no ambiente IP procuraram, principalmente, aumentar a eficiência e a flexibilidade, tanto no gerenciamento como na alocação dos recursos da rede.

O estabelecimento dos LSPs, gerenciados pelo plano de controle do MPLS, previa originalmente o tratamento apenas de pacotes comutados por rótulos (PSC- *Packet Switch Capable*) ou comutados na camada 2 (L2SC - *Layer-2 Switch Capable*). Já o GMPLS estende este suporte para mais três classes adicionais de comutação (TSC, LSC e FSC), descritas na seção anterior, além de ampliar as funcionalidades já previstas pelo MPLS.

O plano de controle do GMPLS é constituído por alguns blocos funcionais já previstos no MPLS, formados pelos protocolos de roteamento e sinalização, devidamente estendidos e modificados. Um exemplo destas adequações foram as modificações realizadas no roteamento, o qual não se processa como no roteamento tradicional IP, onde a base de operação é a construção e atualização de tabelas formadas basicamente pelas informações de endereço destino, endereço do próximo salto e custo associado.

O roteamento GMPLS consiste na distribuição das informações TE, as quais serão utilizadas no estabelecimento das rotas para os circuitos ópticos. Para efetuar a distribuição destas informações, os mecanismos de inundação (*flooding*) dos protocolos de roteamento OSPF ou IS-IS são utilizados.

Além dos blocos de controle de roteamento e sinalização, está previsto um novo bloco funcional denominado de controle de enlace, o qual gerencia o estado de cada enlace por meio do protocolo LMP (*Link Management Protocol*). O acréscimo de tal bloco fez-se necessário devido à grande quantidade de canais e enlaces que cada nó GMPLS deverá tratar, principalmente devido ao uso de tecnologias como o DWDM, onde poderemos ter dezenas de comprimentos de onda em apenas uma fibra conectando nós adjacentes [MANNIE, 2004].

A arquitetura do GMPLS, bem como a definição dos seus blocos funcionais e os respectivos protocolos que constituem o seu plano de controle, é apresentada na RFC 3945 [MANNIE, 2004].

A formação básica do plano de controle GMPLS pode ser visualizada na Figura 2-7, onde os blocos funcionais de roteamento, sinalização e controle de enlace compõem o plano de controle, o qual atua sobre uma rede física totalmente óptica, que constitui o plano de dados.

Figura 2-7: Arquitetura do plano de controle do GMPLS.

2.4.1 Plano de Controle do GMPLS

O plano de controle das redes ópticas é responsável por estabelecer os parâmetros topológicos, gerenciar os recursos, além de estabelecer, manter e remover as conexões. As funções básicas de roteamento, sinalização e gerenciamento de enlaces são desempenhadas por protocolos específicos para cada uma destas funções [LI, 2002].

A composição do plano de controle de um nó GMPLS com seus blocos funcionais e a indicação do fluxo de informações são apresentadas na Figura 2-8.

Figura 2-8: Arquitetura do Plano de controle do GMPLS [PAPADIMITRIOU, 2003].

As principais funções de cada bloco e os respectivos fluxos de dados indicados na Figura 2-8 são [PAPADIMITRIOU, 2003], [MANNIE, 2004].

▪ Controlador de Roteamento:

Responsável pela atualização da base de dados topológicos (1a), controle do estado dos enlaces (1b) e pela disseminação das informações referentes à alcançabilidade (1c), definindo condições de adjacências feitas por meio de mensagens Hello¹⁷ [MANNIE, 2004]. No GMPLS, estão especificadas as extensões aos protocolos OSPT-TE na RFC 4203 [KOMPELLA, 2005a] e IS-IS-TE na RFC 4205 [KOMPELLA, 2005b].

¹⁷ Hello: Mensagens trocadas entre os roteadores de uma rede com objetivo de estabelecer suas vizinhanças e confirmar o estado operacional dos enlaces e de outros roteadores [KUROSE, 2009].

- **Controlador de Sinalização:**

Define condições de adjacências entre nós vizinhos (2a), gerencia o provisionamento de recursos e processa a troca de mensagens para estabelecer, manter, modificar e remover LSPs (2b). Estão previstos dois protocolos para esta finalidade, devidamente adaptados, o RSVP-TE, descrito na RFC 3473 [BERGER, 2003a] e o CR-LDP, conforme RFC 3472 [ASHWOOD, 2003].

- **Controlador de Enlaces:**

Desenvolvido especificamente para o GMPLS, entre suas funções podemos citar o levantamento e atualização das informações para configuração e manutenção dos chamados **canais de controle** (3a), responsáveis pela conectividade entre nós adjacentes. Além disto, este bloco deve administrar a agregação entre os diversos enlaces com características TE compatíveis e verificar o estado de enlaces por meio de mensagens de teste (3b), além de localizar, identificar e gerenciar falhas nos enlaces (3c). A implementação destas funcionalidades foi prevista no GMPLS no protocolo LMP [MANNIE, 2004].

- **Computação de Rotas (RWA):**

Determina a rota por onde será estabelecido um *lighthpath*, executando um algoritmo RWA (*Routing and Wavelength Assignment*). Tal algoritmo opera com base na topologia da rede e na disponibilidade de recursos, além de utilizar algum critério de otimização para indicar a rota mais adequada para minimizar as ocorrências de bloqueio entre os dispositivos de borda.

Assim, para atender às diversas modalidades de comutação previstas pelo GMPLS, os protocolos de roteamento e sinalização do ambiente MPLS necessitaram de adaptações. Com relação ao roteamento, foram implementadas extensões aos protocolos OSPF-TE e IS-IS-TE, definidas nas RFCs 4203 e 4205 respectivamente [KOMPELLA, 2005a], [KOMPELLA, 2005b]. Na sinalização, os protocolos RSVP-TE e o CR-LDP foram igualmente estendidos por meio das RFCs 3473 e 3472, respectivamente [BERGER, 2003a], [ASHWOOD, 2003]. Já no caso do gerenciamento de enlace, o GMPLS prevê a utilização do protocolo LMP (*Link Management Protocol*), definido pelo IETF por meio da RFC 4204 [LANG, 2005].

Dentro do controle de roteamento e sinalização, os procedimentos para a criação, estabelecimento e manutenção dos LSPs foram definidos pelo IETF conforme a RFC 4206 [KOMPELLA, 2005].

2.4.1.1 Controle de Roteamento

Uma das principais motivações para o desenvolvimento de novos protocolos de roteamento foi sanar as deficiências do protocolo RIP (*Routing Information Protocol*), agravadas pelo crescimento das redes, principalmente a Internet, impondo tempo de convergência e consumo de banda para disseminação das informações impraticáveis [ZULIANI, 2006]. Assim, a partir de 1987, iniciou-se o desenvolvimento do OSPF, cuja primeira versão foi disponibilizada em 1991. Com isto, foi possível evoluir de um protocolo que utiliza uma tabela de roteamento baseada em vetor de distância (por exemplo, número de *hops*) para outra modalidade de roteamento que utiliza métricas associadas ao estado do enlace, que, em conjunto com outros avanços, melhor atenderiam as necessidades das redes em expansão [ZULIANI, 2006], [KUROSE, 2009].

No OSPF, para cada rota é contabilizado um custo, calculado a partir de atributos associados a cada enlace, o qual é então divulgado para toda a rede. Além de eliminar as deficiências do RIP, o OSPF introduziu novas funcionalidades tais como a hierarquia de roteamento, os caminhos equivalentes (*equal-cost multipath*) e a segurança na troca de informações entre roteadores, todas elas previstas na versão 2 definida pela RFC 2328 [MOY, 1998].

Cada roteador operando com OSPF informa o estado de seus enlaces por meio de LSAs (*Link State Advertisements*), distribuídos na rede por meio do mecanismo chamado inundação confiável (*reliable flooding*). Tal mecanismo garante que todos os roteadores em uma área OSPF tenham o mesmo conjunto de informações de roteamento, chamado de LSDB (*Link State DataBase*) [ZULIANI, 2006]. Cada LSA carrega informações topológicas da rede para possibilitar a manutenção da LSDB (inclusão, atualização e remoção de informações).

A tabela de roteamento de cada roteador OSPF é preenchida utilizando um algoritmo SPF (*Shortest Path First*) em uma árvore de alcançabilidade construída a partir da LSDB. Este processo resulta em caminhos para cada uma das sub-redes conhecidas, e o próximo salto para cada destino alcançável é inserido na tabela de roteamento. Assim, todo tráfego para uma mesma sub-rede utilizará sempre a mesma rota, mesmo que não haja banda suficiente para cada um dos enlaces transportar toda a demanda de tráfego.

Problemas de congestionamento podem ocorrer porque não é possível realizar plenamente a Engenharia de Tráfego (TE) em uma rede utilizando apenas a informação do custo do enlace como parâmetro. Devido a esta restrição, outras propriedades dos enlaces devem ser levadas em consideração no estabelecimento de rotas. O IETF, ainda dentro do grupo de trabalho do

MPLS, propôs aperfeiçoamentos no protocolo OSPF para permitir o transporte de métricas de TE relacionadas a propriedades dos enlaces. Uma extensão do protocolo OSPF proposta pelo IETF, conhecida como OSPF-TE, foi especificada conforme a RFC 3630 [KATZ, 2003], [ZULIANI, 2006].

Novas métricas TE, tais como a banda reservável ou não reservável do enlace, o tipo de interface de comutação e o tipo de proteção do enlace, são utilizadas para calcular LSPs com QoS garantida dentro da nuvem MPLS [KATZ, 2003], [ZULIANI, 2006]. Para permitir a disseminação das métricas TE por meio do mecanismo de inundação do protocolo OSPF, um novo tipo de LSA foi inicialmente definido pela RFC 2370 [COLTUN, 1998], a qual foi posteriormente complementada pela RFC 3630 [KATZ, 2003]. Os dados a serem transportados, referentes às novas métricas do OSPF-TE, são organizados em estruturas de dados chamadas de trios TLV (tipo/Comprimento/Valor - *Type/Length/Value triplets*), também chamados de objetos na arquitetura GMPLS, proporcionando um método de codificação extensível para o transporte das informações TE. Conforme a RFC 3630 [KATZ, 2003], os campos de um trio TLV podem ser definidos como:

- *Type*: estabelece o tipo da informação transportada e seu valor é um código específico de aplicação que está sendo transportada;
- *Length*: informa o número de octetos (ou bytes) transportados no último campo (*Value*);
- *Value*: contém a informação a ser processada, descrita pelos dois primeiros campos anteriores.

Os campos *Type* e *Length* possuem um tamanho fixo de 16 bits cada um. Os TLVs podem ser aninhados, ou seja, podem conter outros TLVs, chamados de sub TLVs ou sub-objetos.

2.4.1.2 Controle de Sinalização

O controle da sinalização na arquitetura GMPLS amplia as funções dos protocolos de sinalização do MPLS, oferecendo maior flexibilidade diante das várias tecnologias disponíveis e suportando funcionalidades adicionais conforme as seguintes extensões [MANNIE, 2004]:

- I. Utilizar os rótulos de formato genérico, prevendo interligação de enlaces oriundos de diferentes tecnologias.

- II. Implementar interfaces PSC, TDM, LSC e FSC, empregando o conceito de rótulos generalizados (*Generalized Label*).
- III. Suportar a *waveband switching*¹⁸, otimizando a operação dos OXCs.
- IV. Agilizar o estabelecimento do LSP com finalidade de otimização, onde o nó *upstream*¹⁹ deve sugerir os rótulos generalizados, os quais são confirmados pelo nó *downstream*²⁰. Importante quando da necessidade do estabelecimento de LSPs com pequena latência²¹, como por exemplo ações de recuperação durante falhas na rede.
- V. Restringir a atribuição de determinados rótulos pelo nó *upstream*, principalmente no caso de redes com determinadas restrições da camada óptica, como por exemplo, limitação ou indisponibilidade de conversão de comprimento de onda em determinados nós da rede.
- VI. Permitir o estabelecimento de LSPs bidirecionais com resolução de contenção, ou seja, decisão no caso de alocação simultânea de recursos por LSPs em sentidos opostos. Nesta situação é necessário definir qual dos LSPs sofrerá contenção e qual será atendido.
- VII. Agilizar a notificação de falhas ocorridas na rede. São mecanismos que, a partir do instante da ocorrência da falha, cada nó que recebe esta informação dispara mensagens informando sobre a falha para toda a rede.
- VIII. Atribuir níveis de proteção do LSPs, dependendo da necessidade estabelecida pela aplicação. O provisionamento pode ser feito por meio de LSPs duplicados ou a partir de enlaces protegidos.
- IX. Controlar explicitamente rótulos e roteamento, permitindo um gerenciamento particular para um destino específico.
- X. Utilizar parâmetros de alocação de tráfego específicos por tecnologia.
- XI. Compor parâmetros administrativos de um LSP, relativos ao seu estado operacional;
- XII. Implementar os canais de controle em separado.

¹⁸ *Waveband Switching*: Caso particular da comutação por comprimento de onda (MPλS) processada em OXCs, porém quando se comuta integralmente toda uma banda de frequências, a qual engloba várias portadoras ópticas.

¹⁹ Nó *upstream*: dentro das convenções do GMPLS, é o nó estabelecido na origem da conexão [ITU, 2003].

²⁰ Nó *downstream*: analogamente ao upstream, é o nó estabelecido no destino da conexão. [ITU, 2003].

²¹ Latência: Também definida como retardo da rede, é o tempo necessário para que uma mensagem completa chegue até seu destino, desde o momento do envio do primeiro bit até a recepção do último bit [FOROUZAN, 2008].

Devido à sua natureza amplamente genérica, apenas os itens I, II e X são definidos como de implementação obrigatória. Já os itens VI e IX são classificados como recomendados e os demais são tratados como opcionais [MANNIE, 2004].

O processo de troca de mensagens no plano de controle para estabelecer, manter, modificar e remover LSPs compõe o controle de sinalização GMPLS. Estão previstos dois protocolos de sinalização: CR-LDP e suas extensões previstas na RFC 3472 [ASHWOOD, 2003] e o RSVP-TE e respectivas extensões, especificadas na RFC 3473 [BERGER, 2003a]. Embora a arquitetura GMPLS especifique ambos [MANNIE, 2004], o protocolo RSVP-TE vem sendo utilizado em maior escala [FARREL, 2006], o qual será detalhado a seguir.

A sinalização GMPLS foi concebida a partir de mensagens previstas no protocolo RSVP-TE, o qual foi derivado da estrutura original do RSVP utilizado no MPLS [BRADEN, 1997]. O protocolo RSVP prevê reserva de recursos (largura de banda, tipo de tecnologia de comutação e faixas de comprimento de onda ou fibras a serem utilizadas, por exemplo) ao longo de uma rota que foi previamente estabelecida. Na arquitetura GMPLS, o RSVP-TE é utilizado para distribuir rótulos generalizados e reservar parâmetros TE (disseminados pelo protocolo de roteamento) nos enlaces que compõem um LSP, levando-se em conta a existência das interfaces PSC, TDM, LSC e FSC.

A estrutura estendida do protocolo RSVP-TE prevê estabelecimento de caminhos na rede por intermédio de LSRs, definindo-se uma estrutura de comunicação onde a direção da origem é chamada de *upstream* e a do destino é chamada de *downstream*. [ITU, 2003].

As mensagens RSVP-TE e suas respectivas funções estão indicadas na Tabela 2-1.

Tabela 2-1: Mensagens do RSVP-TE para o GMPLS.

Tipo de Mensagem	Mensagem RSVP-TE
Estabelecimento de um LSP (<i>LSP Setup</i>)	Path
Aceitação de um LSP (<i>LSP Accept</i>)	Resv
Confirmação de um LSP (<i>LSP Confirm</i>)	ResvConfirm
Erro no LSP <i>Upstream</i> (<i>LSP Upstream error</i>)	PathErr
Erro no LSP <i>Downstream</i> (<i>LSP Downstream error</i>)	ResvErr
Liberação de um LSP <i>Downstream</i> (<i>LSP Downstream release</i>)	PathTear
Liberação de um LSP <i>Upstream</i> (<i>LSP Upstream release</i>)	ResvTear
Notificação de LSP (<i>LSP Notify</i>)	Notify
Estabelecimento de Vizinhaça (<i>Neighborhood</i>)	Hello

O fluxo de mensagens trocadas entre estas direções está apresentado na Figura 2-9.

Figura 2-9: Fluxo de mensagens RSVP-TE.

As principais funcionalidades do RSVP-TE estão associadas a uma sequência de mensagens com funcionalidades específicas que são trocadas entre a origem e o destino. Os requisitos que regem a sequência de troca de mensagens estão descritos a seguir [FARREL, 2006]:

- O processo de estabelecimento do LSP é iniciado, do lado do LSR *upstream*, a partir do envio de uma mensagem de pedido de estabelecimento de LSP (LSP *setup*) chamada de PATH;
- O LSR adjacente recebe a mensagem PATH e a reencaminha ao próximo LSR, caso haja recursos disponíveis. Este processo é repetido até que o destino seja atingido, ou seja, o LSR *downstream* seja alcançado;
- Uma vez que a mensagem PATH atinja o LSR *downstream* e o recurso solicitado esteja disponível, uma mensagem de confirmação (LSP *accept*) chamada de RESV é retornada ao LSR *upstream*. Neste ponto, é feita a reserva de recursos solicitados e o LSP é estabelecido;
- Uma mensagem de confirmação de estabelecimento de LSP (LSP *confirm*), chamada de ResvConfirm, deve ser emitida;
- No caso de ocorrência de erros durante o estabelecimento do LSP, serão geradas as mensagens PathErr ou ResvErr, caso os mesmos tenham origem no lado *upstream* ou *downstream*, respectivamente;
- No caso de remoção do LSP e liberação dos recursos envolvidos, tanto por parte do lado *upstream* ou *downstream*, as mensagens PathTear e ResvTear são enviadas respectivamente;
- Na ocorrência de falhas ou eventos associados ao plano de dados, os nós próximos devem gerar mensagens *Notify* que, enviadas em ambas as direções, provocam a propagação das informações do LSP em falha;
- A manutenção das relações de adjacência e sincronização entre pares RSVP-TE é efetivada por meio de uma mensagem *Hello* específica.

O processo de criação de um LSP entre duas redes (C e A) pode ser visualizado na Figura 2-10. Por meio da troca de mensagens do protocolo RSVP-TE, é possível efetuar reservas tanto do caminho como dos recursos envolvidos nos LSRs 1, 3 e 4.

Figura 2-10: Criação de um LSP por meio de mensagens RSVP PATH e RESV.

As etapas do processo de sinalização para estabelecimento de um LSP são:

- O roteador de ingresso LSR1 (*upstream* LSR) recebe uma requisição de estabelecimento de LSP com o LSR4 (*downstream* LSR), para transportar tráfego da rede C para a rede A. A rota do novo LSP será estabelecida por meio de LSR1-LSR3-LSR4;
- Uma mensagem PATH é enviada a partir do LSR1, contendo os recursos a serem reservados, no sentido *downstream* (LSR3). Esta mensagem sugere um rótulo (3) para ser utilizado pelo próximo nó;
- Ao receber a mensagem PATH, o LSR3 efetua a reserva de recursos e re-encaminha a mensagem para o próximo nó. Este processo é repetido até o recebimento da mensagem pelo nó de egresso (LSR4). Importante salientar que neste contexto a reserva de recursos feita pela mensagem PATH significa, de fato, reserva de rótulos, já que os rótulos representam os recursos da rede.
- Se as reservas foram efetuadas com sucesso, o LSR4 envia uma mensagem RESV para o LSR3, no sentido *upstream*, informando os recursos reservados e o rótulo utilizado, que pode ou não ser o rótulo sugerido;
- Este processo é efetuado até que o LSR1 receba a mensagem RESV. Quando isto ocorre, o LSP está pronto para receber o tráfego.

Após estabelecido o LSP, a confirmação sobre a alocação e o estado do LSP é efetuada por meio da mensagem ConfirmResv. Ao final da conexão, o RSVP-TE libera recursos alocados

no LSP, empregando-se as mensagens PathTear e ResvTear, [BERGER, 2003], [FARREL, 2006].

Supondo ainda a conexão entre as redes A e C descrita anteriormente, o processo de estabelecimento e liberação de um LSP, o diagrama de tempo com as mensagens envolvidas está indicado na Figura 2-11.

Figura 2-11: Diagrama de tempo de mensagens RSVP-TE no estabelecimento e liberação de um LSP.

2.4.1.3 Gerenciamento de Enlace

Em uma rede GMPLS, diversos elementos de rede adjacentes (comutadores, roteadores, OXCs, OADMs e sistemas WDM) podem estar conectados por uma grande quantidade de enlaces compostos normalmente por fibras ópticas que, por sua vez, podem conter vários comprimentos de onda. O tratamento manual das informações de identificação, capacidade e estado de cada canal presente nos LSR é totalmente inviável diante da complexidade atual das redes [FARREL, 2006]. Além disto, existe uma separação entre os Planos de Controle e de Transporte em redes GMPLS, os quais não necessariamente possuem a mesma topologia ou

compartilham o mesmo meio físico. Assim, no GMPLS, foi criado o protocolo LMP, responsável por gerenciar os enlaces entre nós adjacentes. Isto possibilita a operação dos protocolos de roteamento e sinalização a partir do estabelecimento de um canal de controle entre nós adjacentes, gerenciado pelo LMP [YAMANAKA, 2006].

Diante destas novas necessidades, o IETF introduziu o protocolo LMP (*Link Management Protocol*) [FREDETTE, 2005] [LANG, 2005], responsável pela manutenção dos canais de controle e descoberta de vizinhança e correlação das propriedades dos canais de dados. O protocolo LMP é um protocolo ponto a ponto, cujas mensagens são trocadas apenas por elementos de rede adjacentes no plano de dados [FARREL, 2006].

Um conceito importante definido no contexto do LMP é a condição de adjacência entre nós, estabelecida quando existe pelo menos um canal de controle bidirecional ativo entre eles. É por meio deste canal que são definidas as chamadas adjacências LMP [LANG, 2005].

As principais funcionalidades do LMP são [LANG, 2005], [FARREL, 2006], [CUNHA, 2004]:

- **Estabelecimento do canal de controle:** no processo de inicialização, nós vizinhos adjacentes trocam mensagens LMP para ativar o canal de controle e definir suas identidades e capacidades. Após a ativação do canal de controle, mensagens *Hello* regulares são trocadas para sua manutenção;
- **Descoberta de enlaces:** processo que auxilia um LSR a determinar a existência, a conectividade e a natureza de seus enlaces. Inicialmente, a única informação disponível sobre os enlaces são os seus identificadores locais, porém as mensagens trocadas durante este processo distribuem as informações referentes aos estados de operação e respectivos identificadores remotos;
- **Troca de capacidades de enlaces:** etapa em que os LSRs trocam informações sobre características específicas dos enlaces de dados, como por exemplo parâmetros TE;
- **Verificação do estado do enlace:** etapa ativada a qualquer momento, em que se verificam os estados dos enlaces entre dois nós;
- **Gerenciamento de Falhas:** procedimentos para detectar e localizar falhas nos enlaces, onde o LMP ativa uma sequência de mensagens capaz de isolar de forma eficiente o ponto exato de falha de um circuito. Trata-se de uma facilidade particularmente importante em redes ópticas, onde os mecanismos tradicionais de tratamento de falhas oferecidos pelas camadas inferiores são, muitas vezes, imprecisos.

2.4.1.4 Roteamento e Atribuição de Comprimento de Onda (RWA)

Para o estabelecimento dos *lightpaths*, é necessário o uso de algoritmos de roteamento e mecanismos de sinalização para configurar os elementos de rede. A escolha de comprimentos de onda adequados, dentro do processo de roteamento, é denominada de RWA (*Routing and Wavelength Assignment*). Neste processo, existem dois sub-problemas a serem tratados, o caminho a ser utilizado e a atribuição de um comprimento de onda (*lambda*) adequado para o uso em cada enlace pertencente à rota computada. Quanto à sua natureza de funcionamento, os algoritmos RWA são divididos em duas modalidades básicas [ZULIANI, 2006]:

- **RWA Estático:** O conjunto de conexões a serem estabelecidas é conhecido *a priori*, e as operações de roteamento e alocação de comprimento de onda são realizadas preliminarmente (*off-line*). Normalmente o objetivo é minimizar o número de comprimentos de onda necessário para estabelecer um certo conjunto de *lightpaths* para uma dada topologia física. Outra possibilidade é priorizar o número de conexões que podem ser estabelecidas considerando um número inicial de comprimentos de onda, para um dado conjunto de requisições de conexão.
- **RWA Dinâmico:** A matriz de tráfego não é conhecida *a priori*, ou seja, as operações de roteamento e alocação de comprimento de onda para o estabelecimento de *lightpaths* são feitas dinamicamente (*online*). O objetivo neste caso é atender às requisições de estabelecimento de circuitos individualmente, maximizando a probabilidade de sucesso das requisições subsequentes.

Diferentemente das redes de pacotes, o estabelecimento dos *lightpaths* nas redes que operam com RWA pode gerar restrições nas conexões, mesmo que hajam recursos livres. Denominadas de bloqueios, tais restrições são classificadas em três modalidades:

- **Restrição de Continuidade de Comprimento de Onda:** Ocorre em redes fotônicas, onde não é possível a conversão de comprimento de onda, o qual deve ser o mesmo em toda a rota;
- **Restrição de Diversidade:** Durante a seleção de rotas, dois ou mais *lightpaths* podem estar sujeitos às mesmas falhas, oferecendo um mesmo nível de risco, ou seja, são classificados como pertencentes ao mesmo SRLG (*Shared Risk Link Group*). O grau de risco resultante do conjunto de enlaces que compõe determinado *lightpath* deve ser avaliado e até rejeitado, caso o risco associado esteja acima do nível de confiabilidade desejado [YAMANAKA, 2006].

- **Restrições da Camada Física:** São restrições impostas pelo meio de transmissão óptico, que atenuam e/ou distorcem os sinais transmitidos através da fibra, prejudicando ou até inviabilizando a comunicação entre dois pontos da rede pela redução do QoS óptico abaixo dos níveis aceitáveis.

Propostas de algoritmos que tratam especificamente do problema RWA relativo às restrições da camada física são de particular interesse para o presente trabalho. Seus resultados podem ser encontrados em trabalhos apresentados por Fonseca e Waldman, [FONSECA, 2004], [FONSECA, 2004a], Pavani e Waldman, [PAVANI, 2008], [PANAVI, 2010], Mardens [MARDENS, 2009] e Randhawa [RANDHAWA, 2009]. A análise teórica do comportamento dos algoritmos RWA está fora do escopo deste trabalho.

2.4.2 Implementações de Controladores GMPLS

Trabalhos experimentais mostrando a viabilidade de implementação de redes totalmente ópticas com o gerenciamento do GMPLS surgiram a partir de 2002 com Sato [SATO, 2002], em que foi apresentada a arquitetura e a implementação de um roteador óptico com interfaces para comutação por pacotes (PSC) e comutação por comprimentos de onda (LSC). Posteriormente, Imajuku e Yoshikane em [IMAJUKU, 2007] e [YOSHIKANE, 2007], respectivamente, apresentaram experimentos em uma rede em anel onde as conexões são realizadas configurando-se dispositivos ópticos intermediários entre origem e destino, entre eles os OXCs e os ROADMs (*Reconfigurable OADM*).

A arquitetura empregada está indicada na Figura 2-12, a qual utiliza tanto a multiplexação como a comutação realizadas no domínio óptico [IMAJUKU, 2007], [YOSHIKANE, 2007].

Figura 2-12. Estrutura de uma rede óptica GMPLS [YOSHIKANE, 2007].

Tais propostas procuraram estabelecer as funcionalidades de um plano de controle para uma rede totalmente óptica. Por serem trabalhos iniciais, os efeitos lineares e não lineares, apesar de presentes nos dispositivos ópticos (OXC e ROADM) e na fibra, não foram inseridos como parâmetros de entrada para o gerenciamento do GMPLS. Propostas de arquiteturas para nós ROADM foram apresentadas recentemente por Bernstein e Gringeri, com aplicação direta nas redes ópticas controladas pelo GMPLS [BERNSTEIN, 2009], [GRENGERI, 2010].

Em trabalhos experimentais mais recentes foram propostas arquiteturas que, além de demonstrarem a viabilidade da implementação de um plano de controle GMPLS, apontaram a necessidade de inserir parâmetros da camada física para controlar a qualidade dos sinais ópticos [IMAJUKU, 2009], [LEE, 2009].

2.5 O GMPLS e o Tratamento das Restrições da Camada Física Óptica

A estrutura de transporte que o GMPLS se propõe a controlar apresenta uma grande diversidade de tecnologias e características físicas em que as múltiplas combinações de restrições da camada óptica (*physical impairments*), para cada *lightpath* estabelecido, poderão

inviabilizar sua utilização devido ao impacto nos valores da BER. O meio óptico, apesar de apresentar inúmeras características desejáveis para o transporte de informações, tais como, banda larga e alta imunidade aos ruídos eletromagnéticos, apresenta efeitos gerados pela interação da luz com o meio que interferem de forma importante no desempenho das redes atuais [CHAVA, 2010], [MARTINELLI, 2010], [SALADORI, 2009], [SAMBO, 2010].

2.5.1 Efeitos Gerados pela Camada Óptica

As degradações sofridas pelo sinal óptico ao percorrer o meio físico podem ser classificadas, de forma geral, em efeitos lineares e efeitos não lineares. Os efeitos lineares não dependem da intensidade do sinal óptico e atuam em comprimentos de onda específicos, gerando perdas e distorções associadas diretamente à atenuação ou dispersão do sinal na fibra. Já os efeitos não lineares dependem da potência do sinal e geram interferências e intermodulações em diversos comprimentos de ondas [KEISER, 2003], [RAMASWAMI, 2002].

Dentro do contexto dos efeitos lineares, um deles é a atenuação na fibra, que está vinculada a dois principais mecanismos de perda de potência do sinal óptico, um devido à absorção do material e outro devido ao espalhamento da luz ao percorrer a fibra.

A perda de potência pode ser calculada pela equação (1) [RAMASWAMI, 2002]:

$$P_{out} = P_{in} e^{-\alpha L} \quad (1)$$

Onde: P_{out} é a Potência na extremidade da fibra, P_{in} é a potência injetada no início da fibra, α é o coeficiente de atenuação da fibra e L é o comprimento da fibra. A expressão (1) mostra que a potência do sinal óptico ao longo da fibra decai exponencialmente com o aumento da distância. Normalmente o coeficiente de atenuação α é medido em dB/km, de modo que $\alpha_{dB} \cong 4,34 \alpha$.

Outro efeito linear é a dispersão, que se origina devido às diferentes velocidades de propagação que cada componente espectral ou modo de propagação do sinal transmitido assume ao percorrer a fibra. Assim a dispersão total é composta por duas parcelas, uma chamada de dispersão cromática, onde cada componente espectral do pulso óptico viaja em velocidade distinta, e outra chamada de distorção modal, a qual deriva das diferentes velocidades que cada modo de propagação possui. Já a dispersão cromática é subdividida em

outras duas parcelas, a material, onde cada componente espectral percebe um índice de refração diferente pois este é dependente do comprimento de onda, e a de guia de onda, onde o índice de refração efetivo depende da estrutura de confinamento da potência luminosa na fibra. O efeito global da dispersão, chamado de parâmetro de dispersão (D)²² e medido normalmente em $[\text{ps}/\text{nm.km}]$ ²³, tem efeito cumulativo em função da distância percorrida, provocando o alargamento temporal do pulso óptico e, conseqüentemente, limitando a capacidade de transmissão dos sistemas.

Tanto a atenuação quanto a dispersão cromática da fibra têm uma dependência com o comprimento de onda do sinal que nela trafega e seus valores variam também em função do tipo de fibra óptica empregada nos enlaces. Na Figura 2-13 está mostrado o perfil de atenuação e dispersão cromática que caracteriza o que normalmente PE classificada de fibra padrão ou *standard (SMF – SingleMode Fiber)* especificada pelo ITU-T conforme a recomendação G. 652 [ITU, 2009].

Figura 2-13: Perfil de atenuação e dispersão cromática de uma fibra padrão típica.

²² Parâmetro de dispersão (D): Quantifica o alargamento temporal (em ps) que um pulso óptico sofre, por nm de comprimento de onda e para cada km de fibra percorrida.

²³ A Dispersão refere-se ao alargamento do pulso óptico (dado em ps) para cada unidade de comprimento de onda (dado em nm) para um certo trecho percorrido de fibra (dado em km). Assim, a unidade do parâmetro de dispersão D é dada por $[\text{ps}/\text{nm.km}]$.

Ainda dentro da categoria de efeitos lineares, podemos citar a ASE (*Amplified Spontaneous Emission*), ruído acumulado gerado pelo processo de amplificação óptica ao utilizar-se os EDFAs (*Erbium Doped Fiber Amplifiers*) e a PMD (*Polarization Mode Dispersion*), tipo de distorção modal causada pela diferença de velocidade de propagação que cada componente ortogonal da luz apresenta devida à anisotropia do índice de refração na fibra, gerando alargamento no pulso durante o percurso do sinal óptico [AGRAWAL, 2001] [KEISER, 2003], [RAMASWAMI, 2002].

Os efeitos não lineares são capazes de degradar o desempenho da rede devido às perdas por transferência de potência entre diferentes comprimentos de onda [LEVANDOVSKY, 2001], [KEISER, 2003]. Tais perdas são induzidas basicamente por meio de dois mecanismos:

- Interações da luz com a estrutura das moléculas que compõem a fibra, gerando o espalhamento do sinal óptico. Entre os efeitos mais relevantes, pode-se citar o SBS (*Stimulated Brillouin Scattering*), que surge a partir da modulação em frequência do sinal óptico pelas vibrações acústicas moleculares (fônons), tendo como resultado a transferência de parte da potência óptica para outro comprimento de onda e com sentido contra-propagante ao sinal original. Outro efeito é o SRS (*Stimulated Raman Scattering*), de mesma natureza que o SBS, porém as interferências se propagam no sentido co-propagante.
- Interferências devidas às características dinâmicas da rede, ocorrendo em função da dependência do índice de refração da sílica com a intensidade de potência do sinal óptico. Esta dependência causa a modulação da fase do sinal propagante, sendo proporcional à sua potência óptica.

No caso da modulação de fase ser atribuída à potência do próprio sinal, este efeito é conhecido como automodulação de fase ou SPM (*Self-Phase Modulation*). Supondo um pulso óptico com perfil temporal do tipo gaussiano, o início e o fim do pulso possuem níveis de potência menores, e assim, submetidos a um índice de refração diferente daquele a que é submetido na região central do pulso. Nesse caso, as extremidades do pulso sofrem deslocamento de fase diferentes da parte central, provocando assim a automodulação de fase do pulso e dando origem ao *chirping*²⁴. O deslocamento de fase torna-se maior de acordo com o aumento da distância de propagação do pulso em um enlace com amplificação, podendo resultar em penalidades após a filtragem óptica do sinal, degradando a relação sinal ruído

²⁴ Chirping: Efeito no qual se observa a variação da frequência instantânea ao longo do pulso óptico, originado pela dependência do índice de refração com a potência do sinal propagante [RAMASWAMI, 2002].

óptica ou OSNR (*Optical Signal to Noise Ratio*) do sistema e provocando um aumento da BER [KEISER, 2003], [AGRAWAL, 2001].

Se a modulação do índice de refração for causada pelo excesso de potência de outros canais do sistema WDM, o efeito decorrente neste caso é chamado de modulação de fase cruzada (*XPM – Cross-Phase Modulation*). Neste caso, as penalidades impostas ao sistema são semelhantes às provocadas pela SPM (*Self-Phase Modulation*) [KEISER, 2003], [AGRAWAL, 2001].

Outro efeito não linear observado e bastante estudado é a mistura de quatro ondas ou FWM (*Four-Wave Mixing*). Neste fenômeno, a mistura dos campos de dois ou mais comprimentos de onda de um sistema WDM geram componentes de campo em novas frequências que se alojam na mesma banda de transmissão. Este efeito provoca um alto nível de diafonia que faz com que, no receptor, o sinal e as componentes geradas se misturem, produzindo um ruído capaz de inserir sérias penalidades ao sistema [RANDHAWA, 2009], [SINGH, 2009], [SINGH, 2010]. As penalidades impostas pelo efeito FWM tornam-se expressivas principalmente em fibras com baixa dispersão (DSF – *Dispersion Shifted Fiber*), que possuem dispersão nula na banda de transmissão dos canais WDM [ALI, 2002], [MARSDEN, 2009], [RAMASWAMI, 2002], [RANDHAWA, 2009]. As peculiaridades dos efeitos do FWM serão explicadas em detalhes no Capítulo 3.

2.5.2 Propostas para Tratamento dos Efeitos Lineares e Não Lineares

Apesar dos efeitos lineares e não lineares da fibra óptica já se encontrarem devidamente caracterizados em vários trabalhos, propostas de tratamento dos seus impactos por meio do plano de controle da rede formado pelo GMPLS têm sido apresentadas em pesquisas recentes que serão caracterizadas a seguir.

Considerando-se como premissa a inclusão, no plano de controle GMPLS, de funcionalidades que tratam dos efeitos degradantes da camada física, já foram propostas algumas alternativas de solução, envolvendo o gerenciamento de enlace, o controle de roteamento juntamente com os algoritmos RWA e o controle de sinalização, as quais serão descritas a seguir.

Abordando as extensões aos protocolos de sinalização e gerenciamento de enlace, Cugini em [CUGINI, 2004] apresenta um trabalho de modelagem, onde o GMPLS recebe e processa dados relativos à topologia da rede para assim decidir sobre a escolha do LSP que atenderá uma conexão recém admitida na rede. Apesar de utilizar apenas um único parâmetro referente

à atenuação no enlace, já é uma proposta inicial envolvendo as restrições da camada na escolha dos melhores caminhos na rede.

Propondo soluções dentro do controle de roteamento, onde são apresentadas extensões ao protocolo OSPF e aos algoritmos RWA, o objetivo é buscar os melhores caminhos na rede levando-se em consideração as restrições físicas. Nesta linha, uma análise dos efeitos lineares e não lineares dentro sob o ponto de vista do roteamento no GMPLS foi apresentada na RFC 4054 [STRAND, 2005] envolvendo parâmetros como a PMD e a ASE. A tecnologia GMPLS prevê o roteamento dinâmico de comprimento de onda sobre uma rede totalmente óptica, para estabelecimento e liberação de caminhos fim a fim por meio de um plano de controle comum. Neste ambiente, o estabelecimento das rotas e a atribuição do comprimento de onda adequado para cada *lightpath* é um problema complexo, tratado pelos já citados algoritmos RWA (*Routing and Wavelength Assignment*) [HUANG, 2005]. Algoritmos RWA sofisticados, que inserem parâmetros referentes à camada física, foram propostos abordando o problema das restrições físicas (*physical impairments*) de forma isolada e conjunta [HUANG, 2005]. Nesta linha, Huang propõe um algoritmo RWA que provisiona *lightpaths* em função de restrições originadas a partir do ruído de amplificação Raman, da PMD (*Phase Mode Dispersion*) e da diafonia em OXCs, para depois atribuí-lo a uma determinada conexão. Ainda com relação aos paradigmas de roteamento diante de restrições físicas, foram feitas propostas que analisam os impactos individualmente, onde Fonseca e Waldman, Marsden, além de Randhawa, propuseram algoritmos RWA para avaliação e redução das penalidades do efeito FWM na alocação dinâmica de comprimentos de onda [FONSECA, 2004], [FONSECA, 2004a], [MARSDEN, 2008], [RANDHAWA, 2009]. Novos algoritmos RWA operando a partir da avaliação analítica do fator Q^{25} do sinal óptico, foram propostos em [ANANOSTOPOULOS, 2007] e [FISHER, 2007], demonstrando ser possível estimar os impactos impostos por vários efeitos de forma conjunta, entre eles ASE, XPM e FWM. Ainda nesta linha, Pavani e Waldman apresentaram uma proposta de roteamento associada aos algoritmos RWA sensíveis aos efeitos da ASE, onde os resultados obtidos comprovam a redução do bloqueio da rede com o uso destas extensões [PAVANI, 2008].

Como proposta de modelos que implementem, no plano de controle GMPLS, parâmetros que envolvam os efeitos da camada física no estabelecimento dos *lightpaths*, inicialmente

²⁵ Fator Q: índice associado à qualidade de um sinal, o qual depende da relação sinal-ruído (SNR) deste sinal no receptor, estando relacionado com a BER, conforme será discutido no Capítulo 4.

Martinez [MARTÍNEZ, 2006] apresentou os requisitos e os desafios a serem superados em duas abordagens de controladores GMPLS, uma centralizada e outra distribuída.

A estrutura centralizada emprega extensões aos protocolos de roteamento e aos algoritmos RWA, onde os *lightpaths* são estabelecidos por meio de um elemento centralizado na rede, o PCE (*Path Computation Element*). O PCE atua como um servidor, atendendo às solicitações de conexões e retornando as informações para o respectivo elemento de controle no domínio óptico de origem, o OCP (*Optical Control Plane*). As informações da camada física são levantadas e armazenadas de forma centralizada, sendo válidas para todo o domínio da rede [MARTÍNEZ, 2006]. Tal estrutura pode ser visualizada na Figura 2-14.

Figura 2-14. Plano de Controle Centralizado com restrições físicas [MARTÍNEZ, 2006].

A implementação de uma estrutura centralizada foi feita por Cugini, utilizando-se um equipamento OTDR (*Optical Time Domain Reflectometer*), onde foi possível medir diretamente na camada física óptica as perdas por atenuação em cada enlace e popular a base de dados do PCE [CUGINI, 2007].

Já a concepção descentralizada foi proposta para atendimento da arquitetura da rede ASON (*Automatically Switched Optical Network*) integrada com o plano de controle distribuído proposto pelo GMPLS utilizando os protocolos de sinalização, onde cada OCP passa a processar, além das informações TE e de recursos da rede, também as informações de restrições físicas locais [MARTÍNEZ, 2006]. Tal abordagem pode ser visualizada na Figura 2-15.

Figura 2-15: Plano de Controle Descentralizado com restrições físicas [MARTÍNEZ, 2006]

Um estudo comparativo detalhado entre estas duas estruturas foi apresentado por Castoldi, em [CASTOLDI, 2007] onde ambos os modelos apresentaram bom desempenho. A opção distribuída, apesar de rápida e mais adaptada para redes com constantes mudanças pois os dados de cada nó da rede são locais, as soluções oferecidas pela Engenharia de Tráfego (TE) são menos efetivas, já que a visão que cada OCP (*Optical Control Plane*) tem envolve apenas as informações TE locais. Já a opção centralizada, oferece maiores garantias de efetividade das soluções TE adotadas, uma vez que as informações TE são únicas para toda a rede, porém pode ter problemas de escalabilidade, no caso de expansões, e confiabilidade, pois centraliza as funções do plano de controle em um único ponto da rede [CASTOLDI, 2007]. Trabalhos

mais recentes referentes a propostas para extensões ao OSPF-TE e RSVP-TE que atendam à abordagem com PCE foram apresentadas por Giorgetti em [GIORGETTI, 2010].

Como indicadores de uma tendência, surgiram recentemente vários trabalhos que direcionam as soluções para o tratamento das restrições físicas por meio de extensões ao controle de sinalização do GMPLS, em particular ao protocolo RSVP-TE. [CHAVA, 2010], [SALVADORI, 2009], [SAMBO, 2009a], [SAMBO, 2010]. Além disto, o RSVP-TE está sendo considerado mais adequado para tratar as informações da camada física, já que uma abordagem utilizando protocolos de roteamento (o OSPF-TE por exemplo) requer que tais informações sejam distribuídas por toda a rede, gerando significativo acréscimo de tráfego [SAMBO, 2010]. O próprio IETF reconhece este fato pois lançou trabalho recente onde indica possíveis extensões ao RSVP-TE para possibilitar o tratamento de informações da camada óptica, tais como a dispersão cromática, a PMD e o *crosstalk* [MARTINELLI, 2010].

Trabalhos onde o RSVP-TE trata de parâmetros específicos da camada física, tais como a influência dos amplificadores ao longo dos enlaces e a PMD, poderiam ser citados [SAMBO, 2009a] e [SAMBO, 2010], respectivamente.

Ainda propondo extensões ao RSVP-TE, com abordagens que envolvem cálculo analítico de vários parâmetros que englobam efeitos lineares (tais como atenuação, ASE e dispersão cromática) e não lineares (SPM, XPM e FWM), foram apresentados os trabalhos [SALVADORI, 2009] e [CHAVA, 2010], respectivamente.

2.6 Considerações Finais

As redes de comunicações evoluíram intensamente, impulsionadas pela tecnologia digital, oferecendo hoje uma plataforma bastante ampla para atendimento dos serviços multimídia. Como um exemplo clássico desta evolução, podemos citar a Internet, cujo crescimento explosivo tem possibilitado a progressiva inclusão digital.

Neste capítulo foi apresentado um panorama geral das redes de transporte, observando sua evolução dentro do paradigma de comutação por rótulos. Foram abordados aspectos da rede MPLS e sua evolução, até, finalmente, sua versão generalizada, a rede GMPLS.

A arquitetura da rede GMPLS foi discutida com base em suas principais especificações. As estruturas referentes à sinalização, roteamento e gerenciamento de enlaces foram apresentadas e caracterizadas, bem como seus respectivos protocolos.

Alguns trabalhos experimentais envolvendo o GMPLS foram apresentados e propostas iniciais de tratamento das restrições da camada óptica foram discutidas.

Foram caracterizados os efeitos lineares e não lineares presentes nas comunicações ópticas, inclusive suas origens, onde também foram discutidas abordagens para o tratamento dos seus efeitos.

Trabalhos recentes envolvendo extensões aos protocolos de sinalização, roteamento e algoritmos RWA, além de gerenciamento de enlace foram apresentados e caracterizados. Pesquisas propostas recentemente, envolvendo extensões ao protocolo RSVP-TE para tratamento de efeitos lineares e não lineares, foram discutidas.

A evolução da rede óptica de transporte empregando a solução combinada de fibras de baixa dispersão (DSF), amplificadores a fibra (EDFA) e alta densidade de canais (DWDM) propiciou o aumento dos efeitos das não linearidades, em particular pela FWM. No próximo Capítulo serão discutidos os aspectos que envolvem o problema a ser tratado, abordando os efeitos e as dificuldades no tratamento da FWM.

3 CARACTERIZAÇÃO DA MISTURA DE QUATRO ONDAS

Neste capítulo, inicialmente são apresentados, dentro do cenário e das tendências atuais, os fatores que têm influenciado a evolução das redes ópticas atuais, causando o surgimento de novos paradigmas de qualidade na camada óptica. Em seguida, são descritas as origens do fenômeno FWM (*Four-Wave Mixing*) do ponto de vista físico e os aspectos da rede óptica que o potencializam. Por último, os impactos gerados pelo efeito FWM no desempenho da rede são apresentados e as dificuldades para gerenciá-los são discutidas.

3.1 Contexto das Redes Ópticas Atuais

De uma forma geral, as restrições impostas pela camada física óptica são consequência de um conjunto de fatores intrínsecos às redes atuais. Em diversas ocasiões, a combinação dos recursos de cada enlace, definida no estabelecimento dos *lighpaths*, potencializa os efeitos restritivos da fibra óptica e pode reduzir o desempenho da rede. Por este motivo, é um grande desafio para o GMPLS compor o plano de controle das redes de transporte de próxima geração pois, além de integrar diversas tecnologias de comutação, deverá administrar as restrições físicas intrínsecas ao domínio óptico.

Alguns fatores foram decisivos para impulsionar a evolução das redes de transporte, entre eles o crescimento do tráfego das redes clientes e a demanda por largura de banda para os serviços multimídia [JELINSKIS, 2010], [SALVADORI, 2009], [SINGH, 2010].

A enorme capilaridade que a rede de telefonia fixa atual oferece, associada ao uso de tecnologias de acesso do padrão xDSL²⁶ (*x Digital Subscriber Line*), soluções amplamente utilizadas tanto no Brasil quanto na Europa e nos Estados Unidos, tem facilitado o acesso dos usuários à Internet [KUROSE, 2009]. Além disto, a evolução das redes de acesso empregando a FTTH²⁷ (*Fiber-to-the-Home*) tem viabilizado tecnologias como a PON (*Passive Optical*

²⁶xDSL: é um conjunto de tecnologias que fornecem um meio de transmissão digital de dados utilizando o cabeamento metálico da telefonia residencial. As velocidades de transmissão variam de 128 kbps até 24 Mbps [KUROSE, 2009].

²⁷ FTTH: Tecnologia de acesso que interliga residências por meio de fibras ópticas para o fornecimento de serviços de comunicação de dados, TV digital, rádio digital, acesso à Internet e telefonia convencional, podendo, potencialmente, prover taxas de até 40 Gbps [KUROSE, 2009].

Network)²⁸ [ITU, 2005], e assim disponibilizando aos usuários os novos serviços multimídia, incrementando a demanda por banda [KUROSE, 2009].

Além disso, com a expansão impressionante das redes de telefonia móvel nos últimos anos, criou-se um meio sem fio alternativo para ampliar ainda mais o acesso à Internet a partir de aparelhos celulares, computadores portáteis e dispositivos híbridos.

Esta crescente acessibilidade às redes, seja móvel ou fixa, na modalidade de banda larga, gerou um aumento significativo no volume do tráfego, exigindo do núcleo da rede o uso de equipamentos que operam em altas taxas (Gbps), além de um elevado nível de eficiência dos mecanismos de gerenciamento de recursos e roteamento.

Trabalhando nesta temática, existem estruturas (*testbeds*) que hoje estão em desenvolvimento por vários grupos de pesquisa. Entre elas têm-se a CANARIE (*Canadian Advanced Network and Research for Industry and Education*) do Canadá, a STARLight, a NRL (*National Lambda Rail*) e a INTERNET2 dos EUA, a UKlight da Inglaterra, a SURFNET da Holanda, a JGN-II (*Japan Gigabit Network*) do Japão e a CERNET2 (*China Education and Research Network*) da China [MAIER, 2009]. Em tais estruturas, busca-se desenhar as redes do futuro, as quais deverão suportar aplicações avançadas, tais como cinema 4K/8K²⁹, *WebLabs*, telemedicina e vídeo sob demanda, além de novas implementações para bibliotecas virtuais, educação à distância e teleconferência em alta definição. Além das novas aplicações, técnicas de implementação do plano de controle utilizando o GMPLS estão sendo propostas, visando melhorar a eficiência no uso dos recursos da rede. No Brasil, tal evolução tem sido discutida no contexto da RNP (Rede Nacional de Ensino e Pesquisa) do futuro e, em especial no estado de São Paulo, pelo projeto KyaTera dentro do programa TIDIA (Tecnologia da Informação no Desenvolvimento da Internet Avançada) financiado pela FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) [SILVA, 2006].

Os benefícios advindos da utilização do plano de controle oferecido pelo GMPLS fazem com que esta estrutura suporte, com maior facilidade, também modalidades de computação

²⁸ *Passive Optical Network* (PON): Tecnologia de acesso que utiliza fibras ópticas dedicadas para a conexão até a residência do usuário. É classificada como passiva porque a distribuição dos sinais ópticos é feita sem o uso de dispositivos eletro-ópticos ativos [ITU, 2005].

²⁹ Padrão 4K/8K: Padrões de vídeo de alta definição que comportam 4K pixels (4096 x 2160 pixels por frame) ou 8 K pixels (8192 x 4320 pixels por frame) respectivamente.

distribuída, como a *cloud computing*³⁰ [ZHAO, 2010]. Aplicações colaborativas que são processadas neste ambiente, tais como a *e-Science*, impõem requisitos de banda e velocidade de roteamento que só serão atingidos por uma rede com alta capacidade de transmissão e com um plano de controle eficiente [JUNG, 2010]. A integração entre um plano de controle óptico inteligente, proporcionado pelo GMPLS, e as técnicas de processamento utilizando *grid computing*³¹ é uma proposta para atender tais demandas [HABIB, 2006], [MAIER, 2009], [WANG, 2010].

Finalizando, as redes ópticas contextualizam-se numa área de alta tecnologia, onde a velocidade de lançamento de novos produtos é elevada, sempre com o objetivo de atendimento aos paradigmas dos novos serviços. Além disto, devido aos altos custos de implementação, os equipamentos ópticos acabam permanecendo em operação por um período maior, a fim de que sejam amortizados os investimentos (CAPEX)³². Isto justifica a enorme diversidade tecnológica dos elementos de rede hoje instalados, cada qual pertencente a uma geração tecnológica diferente, gerando restrições na utilização e multiplicando as dificuldades de integração dos recursos da rede.

3.2 A Origem do Fenômeno da Mistura de Quatro Ondas (FWM)

Em sistemas multicanais, o termo *crosstalk* retrata, de uma forma geral, as interferências que um dado canal pode sofrer a partir de outros canais do sistema. Em uma rede óptica, são muitos os elementos que podem introduzir tais efeitos, entre eles os multiplexadores/demultiplexadores, os filtros, os OXCs (*Optical Cross-Connect*), os amplificadores e inclusive a fibra óptica [RAMASWAMI, 2002].

³⁰ *Cloud Computing*: Modelo de sistema computacional que oferece acesso sob demanda, através da rede, a um conjunto compartilhado e configurável de recursos e aplicações. Na percepção do usuário, é como que se estes recursos estivessem disponíveis no próprio computador local.

³¹ *Grid Computing*: Plataforma computacional distribuída destinada ao processamento de grandes volumes de informações, na qual as tarefas são divididas entre diversas máquinas, podendo operar em rede local ou rede de longa distância.

³² CAPEX (*Capital Expenditure*): Investimento empregado na aquisição de bens físicos para a empresa.

Analisando-se, inicialmente, os efeitos nos elementos que compõem os sistemas WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), o *crosstalk* pode ocorrer de duas formas distintas, dependendo de sua natureza e em quais canais ele ocorre.

A primeira, chamada de *intrachannel*, é devida às interferências muito próximas a um determinado canal, decorrente, principalmente, das imperfeições no processo de filtragem durante a operação de multiplexação/demultiplexação.

A Figura 3-1 retrata esta situação onde, por imperfeição na demultiplexação do canal f_1 , parte do sinal é inserido em outro canal (f_1'). Em um processo de multiplexação posterior, os sinais f_1 e f_1' são novamente inseridos em uma mesma fibra, porém, apesar de possuírem a mesma informação, já não se encontram mais na mesma fase.

Figura 3-1: *Crosstalk intrachannel* na demultiplexação/multiplexação [RAMASWAMI, 2002].

Na segunda forma, chamada de *interchannel*, surgem frequências indevidas afastadas dos canais originais, mas que podem interferir no desempenho do sistema caso coincidam com frequências de outros canais ativos. Esta forma de *crosstalk* tem diversas origens, entre elas, as imperfeições na filtragem dos sinais durante a demultiplexação, conforme apresentado na Figura 3-2.

Figura 3-2: *Crosstalk interchannel* na etapa de demultiplexação [RAMASWAMI, 2002].

Estendendo agora os efeitos do *crosstalk* para as fibras que compõem os enlaces ópticos, percebe-se que existe outra causa importante que gera também interferências entre canais. Tais interferências decorrem dos efeitos não lineares presentes no meio de transmissão, entre eles a mistura de quatro ondas (FWM), foco principal deste trabalho, o qual será caracterizado a seguir.

Os sistemas ópticos modernos, operando com altas capacidades de transmissão utilizando a técnica DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) e transpondo longas distâncias, estabelecem condições propícias para o surgimento dos efeitos não lineares indesejáveis que ocorrem durante a propagação dos sinais ópticos através das fibras, entre os quais o fenômeno FWM é um dos mais acentuados [PACHNICKE, 2006], [RANDHAWA, 2009], [SINGH, 2009], [SINGH, 2010].

Parte dos efeitos não lineares que ocorrem no meio óptico tem sua origem na dependência do índice de refração desse meio com a intensidade do campo elétrico que compõe o sinal óptico, mais conhecido por Efeito Kerr Óptico [SINGH, 2009]. Esse efeito origina a suscetibilidade elétrica não linear de terceira ordem³³ ($\chi^{(3)}$) que provoca, além da FWM, outras não-linearidades como a SPM (*Self-Phase Modulation*) e a XPM (*Cross-Phase Modulation*), as quais não são objeto de estudo do presente trabalho [TKACH, 1995], [RAMASWAMI, 2002], [KEISER, 2003], [SINGH, 2009].

No caso da FWM, os efeitos não lineares ocorrem quando dois ou mais sinais de frequências diferentes se propagam juntos e interagem com um meio dielétrico passivo não linear. A fibra óptica, apesar de ter comportamento muito próximo do linear ao ser submetida a sinais de baixa potência, transforma-se em um meio não linear sob sinais mais intensos. Assim, ao se transmitir sinais DWDM de intensidade moderada (a partir de 3 mW/canal, por exemplo), ocorrerá a geração de um conjunto de novas frequências co-propagantes dentro do espectro de operação.

Diferentemente da SPM e da XPM, onde as altas taxas potencializam seus efeitos, o fenômeno FWM não mantém dependência com a taxa de transmissão. Em contrapartida, suas penalidades estão diretamente vinculadas ao espaçamento entre canais e os níveis de dispersão da fibra [RAMASWAMI, 2002].

³³ Suscetibilidade não linear de terceira ordem $\chi^{(3)}$: A suscetibilidade elétrica de um meio dielétrico é definida como a medida do quão facilmente esse meio se polariza em resposta a um campo elétrico. No caso de sinais ópticos com alta intensidade, a polarização do meio óptico assume componentes não lineares, das quais a de terceira ordem é particularmente importante para o estudo dos efeitos não lineares na fibra óptica.

Supondo um sistema WDM utilizando sinais com frequências angulares $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$, a dependência que o valor do índice de refração tem da intensidade do sinal não apenas induz deslocamentos de fase entre os canais transmitidos, como também origina novas frequências do tipo $(2\omega_i - \omega_j)$ e $(\omega_i + \omega_j - \omega_k)$. Daí a origem do termo “mistura de quatro ondas”, ou seja, a partir da combinação de três frequências $(\omega_i, \omega_j$ e $\omega_k)$ é gerada uma quarta frequência (ω_{ijk}) [RAMASWAMI, 2002].

Com o objetivo de detalhar os efeitos da mistura de quatro ondas, será considerado um sinal WDM composto pela soma de n ondas planas monocromáticas com direção de propagação z , amplitude máxima do campo elétrico E , frequência angular ω e constante de propagação β_i . O campo elétrico do sinal WDM resultante é dado pela expressão [RAMASWAMI, 2002]:

$$E(z, t) = \sum_{i=1}^n E \cos(\omega_i t - \beta_i z) \quad (2)$$

Para avaliação dos efeitos das não linearidades da fibra nos sinais propagantes, define-se a polarização não linear P_{NL} do sinal WDM resultante para o caso de três frequências $(\omega_i, \omega_j$ e $\omega_k)$, a qual é dada pela expressão [RAMASWAMI, 2002]:

$$P_{NL}(z, t) = \varepsilon_0 \chi^{(3)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n E_i \cos(\omega_i t - \beta_i z) E_j \cos(\omega_j t - \beta_j z) E_k \cos(\omega_k t - \beta_k z) \quad (3)$$

Onde $\chi^{(3)}$ é a Suscetibilidade não Linear de Terceira Ordem do meio e ε_0 é a Permissividade no vácuo.

Cada uma das componentes não lineares desta polarização pode ser calculada por meio do desenvolvimento da relação (3), ou seja:

$$P_{NL}(z, t) = \frac{3\epsilon_0\chi^{(3)}}{4} \sum_{i=1}^n \left(E_i^2 + 2 \sum_{j \neq i} E_i E_j \right) E_i \cos(\omega_i t - \beta_i z) + \quad (4-a)$$

$$+ \frac{\epsilon_0\chi^{(3)}}{4} \sum_{i=1}^n E_i^3 \cos(3\omega_i t - 3\beta_i z) + \quad (4-b)$$

$$+ \frac{3\epsilon_0\chi^{(3)}}{4} \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i} E_i^2 E_j \cos((2\omega_i - \omega_j)t - (2\beta_i - 2\beta_j)z) + \quad (4-c)$$

$$+ \frac{3\epsilon_0\chi^{(3)}}{4} \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i} E_i^2 E_j \cos((2\omega_i + \omega_j)t - (2\beta_i + 2\beta_j)z) + \quad (4-d)$$

$$+ \frac{6\epsilon_0\chi^{(3)}}{4} \sum_{i=1}^n \sum_{j>i} \sum_{k>j} E_i E_j E_k \left(\begin{aligned} &\cos((\omega_i + \omega_j + \omega_k)t - (\beta_i + \beta_j + \beta_k)z) + \\ &+ \cos((\omega_i + \omega_j - \omega_k)t - (\beta_i + \beta_j - \beta_k)z) + \\ &+ \cos((\omega_i - \omega_j + \omega_k)t - (\beta_i - \beta_j + \beta_k)z) + \\ &+ \cos((\omega_i - \omega_j - \omega_k)t - (\beta_i - \beta_j - \beta_k)z) \end{aligned} \right) \quad (4-e)$$

$$+ \frac{6\epsilon_0\chi^{(3)}}{4} \sum_{i=1}^n \sum_{j>i} \sum_{k>j} E_i E_j E_k \left(\begin{aligned} &+ \cos((\omega_i + \omega_j - \omega_k)t - (\beta_i + \beta_j - \beta_k)z) + \\ &+ \cos((\omega_i - \omega_j + \omega_k)t - (\beta_i - \beta_j + \beta_k)z) + \\ &+ \cos((\omega_i - \omega_j - \omega_k)t - (\beta_i - \beta_j - \beta_k)z) \end{aligned} \right) \quad (4-f)$$

$$+ \frac{6\epsilon_0\chi^{(3)}}{4} \sum_{i=1}^n \sum_{j>i} \sum_{k>j} E_i E_j E_k \left(\begin{aligned} &+ \cos((\omega_i - \omega_j + \omega_k)t - (\beta_i - \beta_j + \beta_k)z) + \\ &+ \cos((\omega_i - \omega_j - \omega_k)t - (\beta_i - \beta_j - \beta_k)z) \end{aligned} \right) \quad (4-g)$$

Assim, a suscetibilidade não linear da fibra gera uma série de novas componentes nas frequências angulares $(\omega_i \pm \omega_j \pm \omega_k)$ com ω_i , ω_j e ω_k não necessariamente distintas. O termo (4-a), proporcional ao campo E_i , refere-se à modulação de fase representando os efeitos do SPM e XPM. Os demais termos são responsáveis pela mistura de quatro ondas, sendo que 4-b, 4-d e 4-e podem ser desprezados pois não atendem a chamada condição de casamento de fase para quaisquer z e t , ou seja, a frequência resultante ω_{ijk} com fase praticamente nula em relação às frequências ω_i , ω_j e ω_k [RAMASWAMI, 2002]. Os demais termos (4-c, 4-f, 4-g e 4-h) são todos na forma $(\omega_i + \omega_j - \omega_k)$ com $i, j \neq k$, além de ω_i , ω_j e ω_k não necessariamente distintos. Tais termos, em determinadas situações de operação, respeitam a condição de casamento de fase considerando o pequeno espaçamento entre canais na região próxima à dispersão nula, resultando em β aproximadamente constante. Nessa condição, a qual potencializa os efeitos *crosstalk* da FWM, as componentes ω_{ijk} assim caracterizadas são representadas por meio da relação [RAMASWAMI, 2002]:

$$\omega_{ijk} = \omega_i + \omega_j - \omega_k \quad (5)$$

Nesse caso, a polarização não linear das componentes ω_{ijk} pode ser obtida por meio da relação [RAMASWAMI, 2002]:

$$P_{NLijk}(z, t) = \frac{\varepsilon_0 \chi^{(3)}}{4} D_{ijk} E_i E_j E_k \cos(\omega_i + \omega_j - \omega_k)t - (\beta_i + \beta_j - \beta_k)z \quad (6)$$

Onde o fator de degenerescência $D_{ijk} = 3$ para $i = j$ e $D_{ijk} = 6$ para $i \neq j$.

Uma forma equivalente que caracteriza as novas componentes geradas pela FWM é por meio de frequências do tipo f_{ijk} , a qual é mais frequentemente encontrada na literatura, sendo dada pela relação [TKACH, 1995], [TANG, 2003], [MARSDEN, 2008]:

$$f_{ijk} = f_i + f_j - f_k \quad (7)$$

De forma geral, em um sistema WDM com n canais, a quantidade f_g de componentes geradas a partir do efeito FWM pode ser calculada por meio da expressão [RAMASWAMI, 2002]:

$$f_g = n(n-1)^2 \quad (8)$$

3.2.1 Geração de Novas Frequências: Canais Desigualmente Espaçados

Como visto anteriormente, o fenômeno FWM é intrínseco aos sistemas multicanais e envolve a interação entre três sinais ópticos genéricos de frequências f_i , f_j e f_k . Uma vez transmitidos através da fibra, tais sinais interagem entre si e geram combinações de frequências do tipo f_{ijk} , dadas pela relação (7). Supondo que cada frequência represente um canal de transmissão, uma condição inicial seria um espaçamento desigual entre as frequências, conforme retratado na Figura 3-3 [TKACH, 1995], [CHANG, 2000], [TANG, 2003].

Figura 3-3. Geração de frequências f_{ijk} devido ao efeito FWM em sistemas multicanais.

As frequências f_{ijk} assim geradas merecem uma maior atenção, pois estão dentro do espectro de operação do sistema, podendo afetar de forma efetiva o desempenho da rede devido à geração do *crosstalk* e à redução de potência dos canais operantes.

Supondo um caso particular envolvendo 3 sinais ópticos, na condição em que as frequências $f_i = f_j$, ou seja, $f_1 = f_2$. Neste caso, o efeito FWM é classificado de degenerado e, a partir de (7), as frequências geradas f_3 e f_4 são dadas pelas relações abaixo [CHRAPLYVY, 1990]:

$$f_3 = f_1 + f_1 - f_2 = 2f_1 - f_2 \quad (9)$$

Ou seja,

$$f_4 = f_2 + f_2 - f_1 = 2f_2 - f_1 \quad (10)$$

Nesta situação, supondo um espaçamento entre canais igual a Δf , o espectro de frequências após os efeitos da FWM pode ser visualizado na Figura 3-4.

Figura 3-4. Caso de efeito FWM degenerado, com $f_i = f_j$

No caso de 3 portadoras com frequências $f_i \neq f_j$, ou seja, $f_1 \neq f_2$, o espectro gerado está mostrado na Figura 3-5 [CHRAPLYVY, 1990], [ITU, 2000a].

Figura 3-5. Geração de frequências a partir de f_1 , f_2 e f_3 não igualmente espaçadas [ITU, 2000a].

Assim, para canais com espaçamentos desiguais, nota-se que, apesar da formação de doze novas frequências, nenhuma delas coincide com as frequências originais f_1 , f_2 e f_3 , minimizando assim a degradação dos sinais ativos [CHRAPLYVY, 1990].

3.2.2 Geração de Novas Frequências: Canais Igualmente Espaçados

Existe um grande interesse no estudo dos efeitos do FWM no caso de portadoras igualmente espaçadas de um intervalo Δf , pois retratam as condições reais de operação de sistemas WDM. Na prática, recomendações, como a G.694.1 do ITU-T, estabelecem que o espaçamento entre canais nos sistemas DWDM deve ser constante, em intervalos de 100, 50, 25 e 12,5 GHz, [ITU-T-2002].

No caso de canais igualmente espaçados, as frequências das componentes de maior interesse são obtidas também a partir das combinações do tipo $f_{ijk} = (f_i + f_j - f_k)$. Como exemplo, a frequência do sinal f_{123} , tendo como referência o sinal f_1 , pode ser calculada pela relação:

$$f_{123} = f_1 + f_2 - f_3 = f_1 + (f_1 + \Delta f) - (f_1 + 2\Delta f) = f_1 - \Delta f \quad (11)$$

De maneira análoga, podemos calcular a frequência de cada uma das doze componentes geradas pelo efeito FWM, conforme valores da Tabela 3.1 [RAMASWAMI, 2002].

Tabela 3-1: Frequências FWM geradas a partir de f_1, f_2 e f_3 igualmente espaçadas de Δf .

Componente	Combinação	Frequência (em relação a f_1)
f_{113}	$f_1 + f_1 - f_3$	$f_1 - 2\Delta f$
f_{213}	$f_2 + f_1 - f_3$	$f_1 - 1\Delta f$
f_{123}	$f_1 + f_2 - f_3$	$f_1 - 1\Delta f$
f_{112}	$f_1 + f_1 - f_2$	$f_1 - 1\Delta f$
f_{223}	$f_2 + f_2 - f_3$	f_1
f_{132}	$f_1 + f_3 - f_2$	$f_1 + 1\Delta f$
f_{312}	$f_3 + f_1 - f_2$	$f_1 + 1\Delta f$
f_{221}	$f_2 + f_2 - f_1$	$f_1 + 2\Delta f$
f_{231}	$f_2 + f_3 - f_1$	$f_1 + 3\Delta f$
f_{321}	$f_3 + f_2 - f_1$	$f_1 + 3\Delta f$
f_{332}	$f_3 + f_3 - f_2$	$f_1 + 3\Delta f$
f_{331}	$f_3 + f_3 - f_1$	$f_1 + 4\Delta f$

De acordo com a Tabela 3-1, todas as 12 componentes geradas possuem frequências que coincidem com canais de operação do sistema, já que estão distantes no espectro em múltiplos inteiros de Δf a partir de canais ativos (por exemplo f_1) [RAMASWAMI, 2002]. Neste caso, a situação do espectro, levando-se em conta os efeitos do FWM, está apresentada na Figura 3-6. É possível observar que as componentes afetam todos os canais ativos e, com maior intensidade, o canal com frequência f_2 .

Figura 3-6: Efeitos FWM a partir de f_1, f_2 e f_3 igualmente espaçadas [RAMASWAMI, 2002].

3.2.3 Efeitos gerados pela FWM na transmissão de sinais WDM através da fibra

A expressão (7) mostra que são geradas frequências f_{ijk} e, portanto, existe uma transferência de potência dos canais i , j e k para compor cada um dos novos canais ijk e que, no caso de sinais WDM igualmente espaçados, coincidirão com a frequência de canais previstos no sistema.

A partir da expressão (6) é possível calcular a potência gerada para cada uma das componentes FWM [RAMASWAMI, 2002]. Em estudos mais detalhados para estimar analiticamente tais valores, Hill [HILL, 1978] e, posteriormente, Shibata [SHIBATA, 1987] apresentaram expressões que foram amplamente utilizadas na literatura. Posteriormente, modificações foram propostas por Song [SONG, 1999] e aplicações recentes foram apresentadas por Marsden [MARSDEN, 2008]. Tais estudos teóricos são utilizados na avaliação numérica da potência de ruído FWM, cuja expressão é dada por:

$$P_{ijk}(L) = \frac{\eta}{9} D^2 \gamma^2 P_i P_j P_k e^{-\alpha L} \left[\frac{(1 - e^{-\alpha L})^2}{\alpha^2} \right] \quad (12)$$

P_i , P_j e P_k são as potências dos canais de frequências f_i , f_j e f_k respectivamente, L é o comprimento da fibra, α é o coeficiente de atenuação, o fator de degenerescência D é igual a 3 para 2 canais com frequências iguais (FWM degenerada) ou 6 para 3 canais com frequências diferentes (FWM não degenerada) e η é a eficiência FWM, definida pela relação entre a potência dos sinais FWM e a potência de transmissão de cada canal e dada por:

$$\eta = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + (\Delta\beta)^2} \left[\frac{1 + 4e^{-\alpha L} \sin^2\left(\frac{\Delta\beta L}{2}\right)}{(1 + e^{-\alpha L})^2} \right] \quad (13)$$

Sendo que $\Delta\beta$ é o Fator de Acoplamento de Fase, dado por:

$$\Delta\beta = \frac{2\pi\lambda_k^2}{c} \Delta f_{ik} \Delta f_{jk} \left[D_c + \frac{\lambda_k^2}{2c} (\Delta f_{ik} + \Delta f_{jk}) \frac{dD_c(\lambda_k)}{d\lambda} \right] \quad (14)$$

Onde $\Delta f_{mn} = |f_m - f_n|$ é o espaçamento entre os canais em análise com $m, n = (i, j, k)$, D_c é o valor da dispersão cromática da fibra, λ_k é o comprimento de onda da frequência k , $[dD_c(\lambda_k)/d\lambda_k]$ é a inclinação da dispersão para λ_k e c é a velocidade da luz no vácuo.

Já o coeficiente não linear da fibra γ é dado por:

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{eff}} \quad (15)$$

Sendo o índice de refração não linear da fibra n_2 dado por:

$$n_2 = \frac{48\pi^2}{cn^2} \chi^{(3)} \quad (16)$$

Já λ é o comprimento de onda no vácuo e A_{eff} é a área efetiva da fibra³⁴, n é o índice de refração da fibra e $\chi^{(3)}$ é a Suscetibilidade não Linear de Terceira Ordem.

Como o comprimento efetivo da fibra L_{eff} é dado por:

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha} \quad (17)$$

A expressão da potência do ruído FWM é obtida substituindo (17) em (12), resultando em:

$$P_{ijk}(L) = \frac{\eta}{9} D^2 \gamma^2 P_i P_j P_k e^{-\alpha L} L_{eff}^2 \quad (18)$$

A partir da expressão (18), pode-se observar que os efeitos da FWM dependem diretamente do nível de potência dos sinais transmitidos e da eficiência FWM, sendo que esta última, de acordo com a expressão (13), decresce com o aumento da dispersão cromática e com o aumento do espaçamento entre canais. Além disto, diferentemente dos efeitos da SPM e da XPM particularmente críticos em altas taxas, não é observada a influência da taxa de transmissão na geração do ruído FWM [RAMASWAMI, 2002].

³⁴ Área Efetiva (A_{eff}): Área da fibra onde a potência óptica é efetivamente transmitida. Nas fibras monomodo, esta área é proporcional ao diâmetro do campo modal, que é tipicamente superior ao diâmetro físico do núcleo.

Concluindo, a FWM é um dos efeitos não lineares mais importantes dentro do contexto das redes ópticas atuais, sendo um dos fatores limitantes na transmissão em sistemas DWDM por impactar diretamente na OSNR (*Optical Signal to Noise Ratio*) de cada canal individualmente e que ocorre, principalmente, na presença de três fatores [CHRAPLYVY, 1990], [TKACK, 1995], [TANG, 2003], [ITU, 2000a]:

- A utilização de sinais ópticos de alta intensidade, principalmente em trechos com amplificação, a fim de vencer grandes distâncias. A fibra, quando submetida a elevados níveis de potência óptica, aumenta a eficiência do efeito FWM (η).
- Alta densidade de canais igualmente espaçados (Δf), condições particularmente presentes em sistemas DWDM. Como em todos os sistemas FDM (*Frequency Division Multiplexing*), a maior proximidade entre os canais no espectro favorece o surgimento de batimentos entre portadoras (*crosstalk*);
- A baixa dispersão cromática, principalmente com a implantação das fibras DSF (*Dispersion Shifted Fiber*), que possuem dispersão nula na banda de operação da 3ª janela óptica (1550 nm). A dispersão cromática da fibra aumenta o descasamento de fase entre as frequências originais e as frequências geradas, reduzindo a interação entre elas. Uma baixa dispersão da fibra favorece o casamento de fase entre os sinais originais e gerados, colaborando para aumentar a eficiência da FWM (η), potencializando seus efeitos degenerativos.

Os efeitos do fenômeno FWM, apesar de normalmente nocivos às comunicações ópticas, são amplamente utilizados na implementação de dispositivos ópticos, tais como os amplificadores paramétricos³⁵ e conversores de comprimento de onda³⁶ para canais WDM [RAMASWAMI, 2002].

³⁵ Amplificador óptico paramétrico: Dispositivos que efetuam a amplificação baseada em processos ópticos não lineares, como, por exemplo, a FWM.

³⁶ Conversor de comprimento de onda: Dispositivo utilizado nos sistemas WDM que faz a conversão do comprimento de onda de um sinal óptico na entrada em um possível comprimento de onda diferente na saída. Possibilita, além da interligação de enlaces que operam em janelas ópticas diferentes, o reuso de comprimentos de onda em pontos diferentes da rede.

3.3 As Redes Ópticas Atuais e os Efeitos da Mistura de Quatro Ondas

Entre as motivações para o emprego das fibras ópticas, a grande capacidade de transporte de informações por longas distâncias é uma das mais relevantes. Mas, para o aproveitamento de toda esta capacidade, foram necessárias implementações de diversas técnicas de comutação e transmissão que, integradas, contribuíram também para induzir um comportamento não linear indesejável na camada física.

Entre estas técnicas podem-se citar a DWDM, que multiplica a capacidade da fibra à custa de uma grande concentração de portadoras ópticas em uma dada faixa do espectro, operando com taxas típicas a partir de 10 Gbps, atingindo 40 e até 100 Gbps, prevendo espaçamento entre canais de 100, 50, 25 e 12,5 GHz (ITU-T G.694.1). Para operação na 2ª janela óptica³⁷ (1310 nm) as fibras padrão (SMF – *Single Mode Fiber*) conforme recomendação ITU-T G.652 [ITU, 2009] eram as mais indicadas devido à sua baixa dispersão cromática nesta região, reduzindo as restrições tanto no alcance dos enlaces quanto na taxa de transmissão admissível. O deslocamento para a 3ª janela (1550 nm) foi importante para usufruir-se das baixas atenuações desta região espectral e, possibilitando também o aumento do alcance dos enlaces com o uso dos amplificadores de fibra dopada com érbio (EDFA - *Erbium Doped Fiber Amplifiers*). Para operação nesta janela eram indicadas fibras ópticas específicas (DSF – *Dispersion Shifted Fiber*) conforme recomendação ITU-T G.653 [ITU, 2010], com comprimento de onda para dispersão nula próximo desta região (λ_0).

A solução conjugada DWDM, EDFA e DSF, apesar de aumentar a capacidade global e o alcance da rede óptica, ocasionou o surgimento, de forma significativa, do efeito FWM, já que o mesmo tem uma relação direta com o espaçamento entre canais, o nível de potência do sinal óptico injetado e a dispersão cromática da fibra [ITU, 2000a]. Por conta destes fatores, esta região do espectro sofre impactos severos para espaçamento entre canais $\Delta f < 100 \text{ GHz}$ combinado com o uso de fibras tipo DSF. Na Figura 3-7, pode-se observar esta situação, onde o comprimento de onda λ_0 para a fibra DSF ocorre por volta de 1550 nm, faixa onde operam os EDFAs.

³⁷ Janelas ópticas: Regiões espectrais utilizadas nas comunicações ópticas, onde a sílica oferece atenuações reduzidas. As principais janelas localizam-se em torno dos seguintes comprimentos de onda: a 1ª a 850 nm, a 2ª a 1300 nm e a 3ª a 1550 nm.

Figura 3-7. Perfil de atenuação e dispersão da fibra DSF.

Visando amenizar tais restrições, hoje já estão disponíveis fibras com dispersão não nula (NZDF - *Non-Zero Dispersion-Shifted Single-Mode Fibre*) conforme recomendação ITU-T G.655 [ITU, 2009a], que possuem valores de dispersão intermediários que contribuem para que o processo FWM tenha a menor eficiência possível, dentro da janela de 1550 nm. Apesar disto, mesmo com o uso das fibras NZDF, o impacto da FWM pode ser significativo caso o espaçamento entre canais seja reduzido, dentro da grade DWDM estabelecida pelo ITU-T [ITU, 2002], como demonstrado em trabalhos experimentais [NIKODEM, 2008].

Normalmente, os efeitos gerados pelo processo FWM são mais significativos no trecho inicial do enlace óptico, ou seja, no segmento da fibra onde a potência óptica é suficientemente alta e o efeito da dispersão é ainda pequeno.

O conhecimento do valor do λ_0 das fibras instaladas é de fundamental importância para a alocação de canais de comprimentos de onda em redes DWDM para que a penalidade seja mínima. Usualmente, o valor do λ_0 é definido em função do tipo de fibra empregada e informado pelo fabricante, porém, este valor representa uma média entre os possíveis comprimentos de onda de dispersão nula nas fibras ao longo do enlace, não representando a pior região para alocação dos canais DWDM em todas as situações.

Assim, os efeitos do processo FWM dependem de um conjunto de características sistêmicas que, quando combinadas, podem levar a uma redução na eficiência da rede, com baixa qualidade do sinal óptico atribuído ao *lightpath*, tornando-se um dos maiores fatores de

degradação presentes nos sistemas DWDM [TKACH, 1995], [SONG, 1999], [TANG, 2003], [PACHNICKE, 2006], [MARSDEN, 2008].

Em resumo, o efeito global das penalidades impostas pela FWM pode ser dividido em duas parcelas, sendo elas:

- **Queda de potência em cada uma das portadoras ópticas ativas**, ou seja, o sinal injetado perde potência para os novos comprimentos de onda gerados. Tais efeitos somam-se à própria atenuação da fibra, reduzindo a potência do sinal e penalizando determinados canais na recepção;
- **Ruído induzido reciprocamente entre canais ativos adjacentes ou separados por múltiplos de Δf** , isto é, como as novas frequências geradas coincidem com as frequências dos canais ativos, como discutido anteriormente, serão inseridos ruídos que geram interferências em todos os canais ativos.

Pode-se deduzir que ambas as parcelas citadas contribuem diretamente para reduzir a qualidade do sinal na recepção, seja por perda de potência ou por inserção de ruído. A combinação dos dois efeitos ocasiona a redução da relação sinal-ruído (SNR) e afeta diretamente a BER (*Bit Error Rate*), fator importante na composição da QoS percebida pelo usuário final.

3.4 Desafios para o Gerenciamento das Penalidades Impostas pela FWM

Devido à complexidade do tratamento das não linearidades ópticas, são grandes os desafios a serem vencidos para capacitar o plano de controle das redes ópticas no sentido de gerenciar adequadamente tais penalidades [SAMBO, 2008]. Além disto, como originalmente o GMPLS não prevê estratégias efetivas para tratamento das restrições da camada física [CASTOLDI, 2007], [CUGINI, 2007], [SAMBO, 2010], apesar da sua indicação para compor as futuras redes ópticas utilizando a arquitetura ASON (*Automatically Switched Optical Network*) [BRYSKIN, 2006], [ITU, 2003], [TORNATORE, 2009], abrem-se perspectivas para a proposição de trabalhos que possam preencher esta lacuna. Com relação aos efeitos da FWM, cujo impacto no desempenho das redes é o foco deste trabalho, as principais dificuldades para gerenciamento e minimização dos seus efeitos no desempenho da rede são:

- A grande diversificação de modalidades de fibras que compõem cada um dos enlaces dificultará a composição dos *lightpaths*, quando o critério em avaliação for a dispersão cromática resultante. Um cuidado especial deve ser tomado quando a escolha recair sobre enlaces com fibras de baixa dispersão, fator que contribui bastante para potencializar as penalidades do fenômeno FWM;
- Gerenciamento do nível de potência do sinal óptico na fibra, estabelecendo caminhos na rede que reduzam, ao mínimo, o número de amplificadores, minimizando assim o estímulo aos efeitos não lineares;
- Análise do espaçamento entre canais, função da alocação dinâmica dos comprimentos de onda. É um problema de solução complexa, que é hoje tratado pelos algoritmos de alocação de comprimento de onda (RWA);
- Tendência progressiva de redução do espaçamento entre canais, hoje previsto pelo ITU-T para até 12,5 GHz no DWDM [ITU, 2002];
- A dificuldade de tratar os parâmetros relativos às não linearidades em tempo real durante o estabelecimento do *lightpath*, exigindo um grande esforço computacional para atender às demandas de uma rede com alto tráfego.

Atualmente, como não existe uma recomendação específica que norteie o desenvolvimento de extensões ao conjunto de protocolos do GMPLS para o tratamento das restrições da camada física, esta é a principal temática deste trabalho. Por ser o efeito FWM uma não linearidade que assume grande importância em redes ópticas heterogêneas, dinâmicas e de alta velocidade, será priorizada, dentro desta proposta de solução, a minimização deste efeito.

Apesar dos efeitos da FWM serem apontados como fatores limitantes de relevância a serem tratados dentro do plano de controle GMPLS estendido para o tratamento das restrições físicas, falta hoje a definição de uma estrutura contendo parâmetros que contemple tais serviços. Estudos recentes em estágio preliminar caminham nesta direção, como proposto por Martinelli [MARTINELLI, 2010], mas carecem de informações mais precisas sobre as condições em que as penalidades FWM ocorrem, as formas de obtenção dos dados e se o tempo de processamento das informações obtidas poderá prejudicar os mecanismos de escolha dos LSPs face ao dinamismo da rede.

3.5 Considerações Finais

Em uma análise preliminar, aspectos tecnológicos como: a implantação de fibras com baixa dispersão, a operação na 3ª janela óptica, o emprego de amplificadores ópticos a fibra dopada de Érbio e o adensamento de canais com o uso de sistemas DWDM, potencializam as penalidades dos efeitos não lineares. Além destes fatores, outros aspectos também contribuíram para o aumento da relevância destes efeitos, tais como a grande expansão da rede, o aumento do tráfego devido aos novos serviços e a grande diversidade de equipamentos ópticos. Dentro deste contexto, o FWM está entre os fenômenos que merecem maior atenção. Neste capítulo, foram apresentados conceitos físicos, que descrevem os efeitos da mistura de quatro ondas em sistemas multicanais. Foi avaliada a geração de novas frequências a partir de canais desigualmente espaçados. Em seguida, a condição de canais igualmente espaçados foi analisada, configuração que corresponde aos sistemas DWDM reais. O ruído FWM em canais WDM foi calculado analiticamente e confirmado quais os parâmetros que potencializam seus efeitos.

Finalizando foram apresentados os aspectos das redes atuais que favorecem a ocorrência dos efeitos FWM e a dificuldade em gerenciar estes efeitos.

No próximo capítulo, será apresentada a proposição de uma solução para os efeitos da mistura de quatro ondas nas redes GMPLS, que será validada em ambientes de simulação. Serão discutidas as características de cada uma das plataformas disponíveis e suas vantagens e desvantagens.

4 GERENCIAMENTO DOS EFEITOS DA FWM NAS REDES DE TRANSPORTE

Com o objetivo de melhorar o desempenho das redes de transporte atuais face às restrições descritas no Capítulo 3, é importante o gerenciamento das penalidades que a camada física impõe nas redes ópticas transparentes. Para tanto, é proposta uma extensão ao protocolo RSVP-TE (*Resource Reservation Protocol-Traffic Engineering*) que permite ao GMPLS (*Generalized Multiprotocol Label Switching*) avaliar as características restritivas do meio óptico durante o estabelecimento dos *lightpaths*, possibilitando assim rejeitar os caminhos com QoS óptico abaixo do valor aceitável. Entre os efeitos não lineares, o fenômeno FWM (*Four-Wave Mixing*) é prioritariamente tratado e mecanismos para minimizar as degradações por ele geradas são descritos e validados.

No roteamento GMPLS, como já mencionado no Capítulo 2, as informações TE (*Traffic Engineering*) para estabelecimento dos *lightpaths* são distribuídas via respectivos protocolos de roteamento OSPF (*Open Shortest Path First*) ou IS-IS (*Intermediate System to Intermediate System*). Entretanto, para que tais protocolos façam a escolha de um circuito óptico adequado para uma determinada rota, é necessário estendê-los de forma que levem em conta as restrições impostas pela camada física, tal como proposto por Pavani e Waldman em [PAVANI, 2008] e Sambo em [SAMBO, 2009a].

Como discutido no Capítulo 2, a arquitetura GMPLS provê um plano de controle totalmente distribuído para o estabelecimento automático de *lightpaths*. Assim, os caminhos no domínio óptico são definidos pelos LSPs (*Label-Switched Paths*) estabelecidos pelos protocolos de sinalização, dentro das rotas traçadas pelos protocolos de roteamento. Tais mecanismos poderiam apresentar resultados otimizados caso considerassem as restrições de camada física. Em particular para o fenômeno FWM, seus efeitos poderiam interferir na qualidade óptica dos sinais que compõem o *lightpath* de um determinado LSP, impondo valores de BER (*Bit Error Rate*) acima do mínimo recomendado (10^{-9}) [RAMASWAMI, 2002], [AGRAWAL, 2002], impactando a QoS (*Quality of Service*) no nível do usuário, além de aumentar a probabilidade de bloqueio de circuitos ópticos reduzindo assim o desempenho da rede.

Apesar de alguns trabalhos proporem abordagens sobre algoritmos de roteamento que envolvem aspectos físicos como atrasos, taxas de transmissão e disponibilidade de comprimentos de onda aplicados ao ambiente GMPLS, tais como em [HERMAN, 2008], [TORNATORE, 2009] e [GIORGETTI, 2010], a especificação original da arquitetura

GMPLS não estabelece claramente a interação entre os protocolos de roteamento e os algoritmos RWA (*Routing and Wavelength Assignment*), em particular diante das restrições da camada física. Mesmo em documentação preliminar recente emitida pelo IETF (*Internet Engineering Task Force*), conforme [BERNSTEIN, 2010], embora propostos parâmetros da rede óptica a serem tratados pelos algoritmos RWA, não é abordado como os protocolos de roteamento e o RWA devem operar. Para que sistemas RWA mais eficazes (que calculam simultaneamente a rota e o comprimento de onda e consideram as restrições físicas) possam ser utilizados em redes GMPLS, os algoritmos de roteamento devem ser adequados para transportar tanto as informações adicionais sobre o plano de controle óptico quanto sobre a disponibilidade de comprimentos de onda nos enlaces. O problema é que uma solução que estenda os protocolos de roteamento para incorporar as restrições da camada física apresenta alguns inconvenientes. Entre eles, podemos citar as dificuldades de convergência e escalabilidade destes protocolos caso as restrições da camada física fossem tratadas em cada nó [CUGINI, 2008], [SAMBO, 2010]. Além disto, um grande volume de informações deveria ser atualizado em toda a rede, mesmo que poucos LSPs apresentassem restrições físicas importantes, podendo gerar sobrecarga no plano de controle [CUGINI, 2008], [SAMBO, 2010].

Especificamente quanto aos efeitos da FWM, apesar de alguns trabalhos já apresentarem abordagens para tratá-los utilizando algoritmos RWA específicos [MARSDEN, 2009], [RANDHAWA, 2009], [SINGH, 2010], existe uma dificuldade adicional em controlá-los por meio dos protocolos de roteamento. Durante o processo de roteamento, são definidas as rotas com base em determinados critérios (como por exemplo o de menor caminho), porém, para uma avaliação mais abrangente dos efeitos da FWM é necessária uma análise mais global da rede, inclusive envolvendo os *lightpaths* já existentes, o que está além dos paradigmas básicos destes protocolos [SAMBO, 2008]. Apesar disso, foram propostas em trabalhos específicos estruturas matemáticas para a álgebra de caminhos que incorporaram novas métricas de roteamento baseadas em múltiplas restrições [HERMAN, 2008].

Para gerenciamento das restrições da camada física óptica, extensões aos protocolos de sinalização do GMPLS têm sido apontadas como soluções viáveis para suprir os *lightpaths* com QoS ópticos adequados, conforme trabalhos recentes que propõem tal abordagem [CHAVA, 2010], [SALVADORI, 2009], [SAMBO, 2009], [SAMBO, 2009a]. Nesta direção, mas ainda em fase preliminar (*Internet –Draft*), o IETF apresentou extensões ao RSVP-TE para validação do *lightpath* que transportam informações da camada óptica incorporadas nas mensagens, tais como dispersão cromática e potência óptica, mas não fazendo menção aos

efeitos não lineares e aos métodos de atualização destas informações no plano de controle do GMPLS [MARTINELLI, 2010].

Diante deste cenário, como contribuição dessa tese são apresentadas neste Capítulo propostas de extensões ao plano de controle do GMPLS, mais especificamente ao protocolo de sinalização RSVP-TE, que possibilitem o tratamento das restrições físicas impostas pela FWM no plano de dados.

4.1 Extensões ao Protocolo de Sinalização da Arquitetura GMPLS

Para que os recursos de uma rede óptica sejam utilizados de forma eficiente, é desejável que os mecanismos de provisionamento de *lightpaths* do plano de controle disponham de uma série de informações sobre o plano de dados, inclusive sobre os efeitos não lineares da FWM. Diante do cenário apresentado, a fim de que o plano de controle possa gerenciar as restrições físicas do meio óptico, a proposta de solução apresentada neste trabalho é estender o controle de sinalização para tratar tais restrições, especificamente as geradas pela FWM.

O objetivo é apresentar mecanismos a serem incorporados ao protocolo RSVP-TE para permitir que, após uma análise dos efeitos cumulativos da FWM, seja estabelecido dinamicamente um LSP compatível com as necessidades de uma dada conexão e em função da disponibilidade de recursos. Para uma avaliação mais abrangente dos efeitos da FWM para um dado LSP, é necessário levar em conta a potência do sinal injetado na fibra, a dispersão cromática acumulada e o espaçamento efetivo entre portadoras no momento do estabelecimento do caminho na rede.

Como comentado no início deste Capítulo, nas propostas atuais de atualização do RSVP-TE com relação às restrições físicas, os novos parâmetros não são específicos para os efeitos do FWM, além disso os métodos de obtenção e atualização dos dados e as alterações nos mecanismos de estabelecimento dos LSPs ainda não são definidos.

Diante deste cenário, são apresentadas neste Capítulo extensões ao protocolo de sinalização RSVP-TE para possibilitar o tratamento de restrições da camada óptica decorrentes do efeito FWM. Estas extensões são adequações ao RSVP-TE para introdução de mecanismos que utilizem os dados levantados na camada óptica relativos à FWM para validação ou não de *lightpaths* a serem estabelecidos.

4.1.1 Desenvolvimento das Extensões ao RSVP-TE

Como já mencionado, extensões ao protocolo RSVP-TE para gerenciar os efeitos da atenuação, dispersão cromática, SPM (*Self-Phase Modulation*) e PMD (*Polarization Mode Dispersion*) já foram propostas por Cugini, Castoldi e Sambo em [CUGINI, 2007 a], [CASTOLDI, 2007], [SAMBO, 2008] e [SAMBO, 2010], respectivamente. Entretanto, o controle dos efeitos do FWM é, ainda, um grande desafio a ser vencido, pois estes variam a todo instante em função do dinamismo da rede, ou seja, dependem do volume de tráfego na rede, do método de alocação de comprimentos de onda e da extensão das rotas.

O volume do tráfego na rede incrementa os efeitos da FWM devido à maior ocupação dos canais nos enlaces ópticos, uma vez que a probabilidade de alocação de canais adjacentes ou próximos aumenta.

Como o nível dos sinais interferentes gerados pela FWM depende do espaçamento relativo entre os canais ativos, como visto no Capítulo 3, a alocação de um canal para uma conexão recém admitida na rede pode interferir na qualidade dos canais próximos. Nesta situação, o método de alocação de canais desempenha importante papel no controle dos efeitos da FWM, fazendo parte de um conjunto de algoritmos denominado genericamente na literatura de RWA e definido neste trabalho por *Wavelength Allocation Methods* (WAM).

Outro aspecto a analisar seria o comportamento dos efeitos da FWM ao longo de uma determinada rota, composta por um ou mais enlaces. Apesar da potência dos sinais interferentes da FWM decrescer com a atenuação dos sinais principais e o acúmulo da dispersão, como foi visto no Capítulo 3, a degradação acentuada estabelecida no trecho inicial permanece e seus efeitos se acumulam ao longo da rota, reduzindo a OSNR do sinal óptico.

Assim, os principais requisitos que nortearam o desenvolvimento das novas extensões ao RSVP-TE para controlar os efeitos da FWM foram:

- **Impacto da ocupação dos canais na rede:**

O efeito FWM em uma rota depende da quantidade de canais ativos num dado instante e de como tais canais estão posicionados entre si em cada enlace;

- **Influência dos WAMs nos efeitos FWM:**

Como os níveis de ruído da FWM dependem da distribuição dos canais ativos no espectro, os critérios de alocação adotados pelos WAM podem interferir na oferta de canais com QoS óptico adequado. É importante avaliar os critérios de alocação de cada WAM e propor algoritmos mais eficientes;

- **Contabilização do efeito FWM acumulado:**

Os dados referentes à qualidade de cada canal (QoS óptico), devem retratar os efeitos FWM para cada comprimento de rota (um, dois ou mais enlaces). Os valores destas penalidades serão levantados e disponibilizados para que o RSVP-TE estendido possa utilizá-las na validação dos *lightpaths*;

- **Análise do impacto na admissão de novos *lightpaths*:**

O ingresso de novas conexões deve ser avaliado segundo o critério da manutenção da SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) global ($SNR_i \geq SNR_{TH}$ para i canais ocupados), pois pode interferir nas conexões já estabelecidas.

4.2 Métodos de Avaliação das Extensões ao RSVP-TE

Para avaliação da solução proposta é necessário estabelecer um método que possibilite ao plano de controle obter da camada óptica informações sobre os efeitos da FWM, permitindo assim a validação dos *lightpaths* na fase de estabelecimento dos mesmos. Para tanto, é necessário que:

- A camada física forneça os indicadores do QoS óptico para cada canal em função da taxa de ocupação de cada enlace e para cada rota;
- As extensões ao RSVP-TE, de posse das informações da camada óptica, possam analisá-las e assim possa dar sequência ao estabelecimento do *lightpath*, caso este tenha QoS óptico adequado.

4.2.1 Análise preliminar dos impactos da FWM

Os impactos gerados pela FWM podem ser verificados por meio de simulação, observando-se sinais ópticos transmitidos em um enlace de fibra óptica DWDM ponto a ponto sem amplificação, onde os principais parâmetros de simulação estão baseados em trabalhos correlatos [FONSECA, 2004a], [HUANG, 2005], [MARSDEN, 2008], [SINGH, 2009]. A análise preliminar dos impactos da FWM foi observada utilizando-se uma ferramenta de simulação comercial chamada VPI (*Virtual Photonics Incorporated*), cuja descrição detalhada consta no Anexo A. Os parâmetros do sistema simulado e os resultados obtidos são apresentados a seguir.

Foi configurado um sistema DWDM de 3 canais, no qual a influência da transmissão simultânea dos sinais através de uma fibra óptica foi observada e avaliada.

A Figura 4-1 apresenta a topologia empregada neste estudo.

Figura 4-1: Sistema DWDM de 3 canais (10 Gbps/canal), para avaliação dos efeitos da FWM.

No lado da transmissão, os três canais (n , $n-1$ e $n+1$) são gerados por um conjunto de 3 lasers com potência de 3 mW cada um (4,77 dBm), operando na 3ª janela óptica, onde a frequência do canal n é igual a 193,1 THz (1550 nm) e espaçamento entre canais de 50 GHz (0,4 nm). Ainda na transmissão, os três canais são modulados externamente por um sinal digital de 10 Gbps em NRZ (*Non-Return-to-Zero*)³⁸ gerado por meio de um módulo PRBS (*Pseudo Random Binary Sequence*) com período de repetição de $(2^{23}-1)$, e, em seguida, multiplexados (MUX) e injetados na fibra. A partir daí, os sinais são transmitidos por 20 quilômetros de fibra DSF (*Dispersion Shifted Fiber*) com dispersão de 0,2 ps/nm-km para $\lambda_0 = 1550$ nm e atenuação α de 0,2 dB/km.

³⁸ *Non-Return-to-Zero*: Método de conversão de dados digitais no qual o sinal digital resultante não retorna ao estado zero durante o tempo do bit, permanecendo em nível alto para representar o bit “1” e nível baixo para o bit “0” [FOROUZAM, 2008].

No lado da recepção, o sinal DWDM é demultiplexado (DEMUX) e cada canal é filtrado e medido. Para as condições descritas, ou seja, baixa dispersão cromática, potência de transmissão moderada e pequeno espaçamento entre canais, entre as não linearidades atuantes, os efeitos da FWM são predominantes. Para observação dos efeitos da FWM no destino, o sinal DWDM é demultiplexado e filtrado em 8 canais igualmente espaçados de 50 GHz, a partir do canal central n , ou seja, de $(n-4)$ até $(n+3)$. A Tabela 4-1 apresenta os valores das frequências dos sinais dos lasers e a frequência central de cada um dos filtros na recepção.

Tabela 4-1: Sistema DWDM 3 canais - Distribuição das Frequências (Lasers e Filtros).

Transmissão		Recepção	
Canal	Frequência do Laser (THz)	Canal	Frequência central do Filtro (THz)
-	-	n-4	192,9
-	-	n-3	192,95
-	-	n-2	193,0
n-1	193,05	n-1	193,05
n	193,1	n	193,1
n+1	193,15	n+1	193,15
-	-	n+2	193,20
-	-	n+3	193,25

Inicialmente, os canais $(n-1)$ e $(n+1)$ são desativados, eliminando assim qualquer efeito *crosstalk* entre canais. O diagrama espectral do sinal transmitido está representado na Figura 4-2.

Figura 4-2: Espectro do sinal transmitido pelo canal ativo n.

Na Figura 4-3-a é mostrado o espectro do canal n na recepção e seu respectivo diagrama de olho do canal, Figura 4-3-b, obtido pelo analisador de canais.

Figura 4-3: a) Espectro do sinal recebido; b) Diagrama de olho do canal ativo n.

Pode-se observar que o diagrama de olho apresenta ampla abertura, indicando alta qualidade do sinal recebido nestas condições. Como é transmitido apenas um canal, não ocorre o efeito FWM, não existindo componentes espectrais fora da frequência de 193,1 THz.

Após a ativação dos três canais DWDM, o diagrama espectral do sinal transmitido foi levantado e representado pela Figura 4-4.

Figura 4-4: Espectro dos sinais transmitidos pelos canais n-1, n e n+1

O espectro do sinal e os diagramas de olho dos canais na recepção estão apresentados nas Figuras 4-5-a e 4-5-b, respectivamente.

Figura 4-5: a) Espectro dos sinais recebidos; b) Diagramas de olho dos canais $n-1$, n e $n+1$.

Analisando o espectro do sinal recebido, é possível observar, além dos canais originais ($n-1$), (n) e ($n+1$), a presença de componentes FWM exatamente nas posições dos canais ($n-2$), ($n-3$), ($n+2$) e ($n+3$), que certamente reduzirão a OSNR dos sinais transmitidos quando tais canais forem ativados. Além disto, no canal (n) os efeitos do FWM podem ser verificados qualitativamente por meio da redução da abertura do olho deste canal, quando comparada com a situação anterior, ou seja, canais ($n-1$) e ($n+1$) desativados.

Uma análise quantitativa das degradações que o FWM ocasiona neste exemplo pode ser feita, verificando-se a penalidade em potência que este fenômeno gera nos sinais DWDM. Para tanto, um levantamento da potência em função da BER é um recurso bastante utilizado no estudo das degradações que ocorrem em sistemas ópticos. Por meio da curva que relaciona a potência recebida e a BER, é possível levantar qual a potência adicional que o efeito FWM exige para que a BER seja mantida dentro de valores aceitáveis ($BER \leq 10^{-9}$).

Na Figura 4-6, tem-se um gráfico que compara a potência mínima necessária para prover BER aceitável (10^{-9}) nas duas situações simuladas, ou seja, apenas o canal (n) ativo e os três canais ($n-1$, n e $n+1$) ativados.

Figura 4-6: Penalidade de potência gerada pelo FWM.

A reta tracejada na Figura 4-6 representa o limite mínimo aceitável da BER, ou seja, 10^{-9} . Comparando-se as duas curvas nota-se que, para manter a BER em 10^{-9} , é necessária uma potência mínima de -23 dBm para 1 canal ativo e -19 dBm para 3 canais ativos. Isto indica que os efeitos do FWM, para a situação mostrada, geram uma penalidade no sistema de, aproximadamente, 4 dB. Os dados aqui informados estão coerentes inclusive com valores experimentais já obtidos anteriormente por [TKACH, 1995] em contexto semelhante.

Os resultados obtidos nesta simulação, além de comprovar os efeitos da FWM nos enlaces DWDM, validam o método para levantar os dados que servirão como base para avaliar seus impactos em uma determinada rota, para cada WAM investigado.

4.2.2 Geração da FWM Impairments Database (FID)

Para disponibilizar ao RSVP-TE estendido informações para estabelecimento de *lightpaths* com QoS óptico adequado, os dados da camada física serão levantados a partir de simulações para cada uma das possíveis rotas a serem estabelecidas na rede. Para uma rota qualquer entre uma origem (O_i) e um destino (D_i), os possíveis caminhos foram estabelecidos a partir do Algoritmo Dijkstra de menor distância (*shortest path*).

Considerando inicialmente um caso mais geral, onde cada rota pode ser composta de um ou até quatro enlaces, atendendo assim a topologia de 9 nós Manhattan Street (12 enlaces), como indicado na Figura.4-7.

Figura 4-7: Quantidade de enlaces por caminho na rede *Manhattan Street*.

Uma forma de avaliação do QoS óptico de um caminho formado por n enlaces é avaliar a condição do sinal óptico na recepção, ou seja, a OSNR. Um critério mais abrangente de levantar a qualidade do canal ponto a ponto é calcular a relação entre o sinal e o ruído na recepção após o sinal óptico ser processado pelo fotodetector, já no domínio elétrico, ou seja, a SNR (*Signal-to-Noise-Ratio*) na recepção.

Outro parâmetro utilizado como referência da qualidade do sinal óptico é a BER, cujo valor considerado aceitável na literatura é 10^{-9} [AGRAWAL, 2002], [RAMASWAMI, 2002]. Será mostrado a seguir que é possível relacionar a BER e a SNR e assim estabelecer qual deve ser o nível de sinal ruído de um canal para que seu QoS óptico esteja associado à uma BER considerada aceitável (10^{-9}).

A BER, como apresentado anteriormente, se relaciona com o fator Q ³⁹ conforme a expressão [AGRAWAL, 2002]:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \quad (19)$$

³⁹ Fator Q: Parâmetro associado à qualidade de um determinado sinal. No cálculo da BER, onde as distribuições de probabilidades de ocorrência de bit “0” ou bit “1” são dadas por curvas gaussianas, Q é a relação entre a diferença dos níveis médios de “1” e “0” e a soma das variâncias destes níveis, ou seja: $Q = (I_1 - I_0) / (\sigma_1 + \sigma_0)$ [AGRAWAL, 2002].

Já no domínio elétrico, desprezando-se o ruído na fotodetecção, o fator Q é dado por [AGRAWAL, 2002]:

$$Q = \sqrt{SNR} \quad (20)$$

Onde SNR é a relação entre o sinal e o ruído após a fotodetecção.

Assim, tem-se que:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{SNR}{2}} \right) \quad (21)$$

E, portanto:

$$SNR_{dB} = 10 \log SNR = 10 \log Q^2 (dB) \quad (22)$$

Supondo como valor aceitável $BER_{TH} = 10^{-9}$, a partir de (19) tem-se:

$$\frac{1}{2} \operatorname{erfc}(x) = 10^{-9} \therefore x = 4,24$$

E a partir de (20) e (21) calcula-se SNR e Q respectivamente :

$$x = 4,24 = \sqrt{\frac{SNR}{2}} \therefore SNR = 35,95 \cong 36$$

$$Q = \sqrt{SNR} \therefore Q = 6$$

A partir de (22), calcula-se SNR em dB, ou seja:

$$SNR_{dB} = 10 \log SNR = 15,56 dB$$

Nestas condições é possível obter a SNR do sinal elétrico recebido a partir do fator Q medido e, assim, estimar a qualidade óptica do sinal de cada canal em uma determinada rota, estipulando como limite mínimo aceitável o valor de 15,56 dB, definido aqui de SNR_{TH} . Este será o parâmetro adotado neste trabalho para avaliar o QoS óptico de um determinado canal e assim, durante a etapa de sinalização, o RSVP-TE terá condições de avaliar o canal a ser alocado no *lightpath* e assim decidir se o processo de sinalização deve prosseguir ou não.

É importante ressaltar que, levando-se em conta que o fator restritivo dominante na rede em estudo é a FWM, existem três aspectos principais que impactam no valor da SNR para uma dada rota:

- A quantidade de enlaces (*hops*) que compõem a rota em análise;
- A taxa de ocupação de canais em cada enlace, quando da admissão da conexão;
- O critério para a escolha do canal livre para atender determinada conexão, ou seja, o WAM utilizado.

Assim, a forma adotada para proporcionar à rede GMPLS subsídios para estabelecer os *lightpaths* com qualidade óptica adequada é levantar os valores de SNR para cada uma das rotas possíveis e disponibilizá-los ao RSVP-TE para utilização na etapa de sinalização. Para isto, por meio de simulações para cada uma das situações indicadas na Figura 4-7, ou seja, rotas com 1, 2, 3 e 4 enlaces e para cada um dos WAM adotados, os valores de Q de cada canal são levantados no destino. A partir dos valores de Q é calculada a SNR para cada canal, como indicado anteriormente, cujos valores popularão a base de dados *FWM Impairments Database* (FID) a ser utilizada pelo RSVP-TE.

Na Tabela 4-2 temos como exemplo uma FID já populada com dados de rotas de um a quatro enlaces. O WAM utilizado foi o *Edge Allocation Wavelength* (EAW), onde a alocação é feita a partir dos canais mais afastados da frequência central (f_0), procurando assim manter as componentes interferentes da FWM fora do espectro de operação.

Uma discussão mais detalhada sobre tais métodos será feita no próximo Capítulo.

Tabela 4-2: FID populada para até 4 enlaces com método EAW (*Edge Allocation Wavelength*)

1 Enlace (EAW)						
Canais Ativos	Canais Candidatos	Canal 1		....	Canal 8	
		SNR (dB)	Penalidade (dB)	.....	SNR (dB)	Penalidade (dB)
Nenhum	1	27,878	2,432	.	-59,372	63,795
1	8	27,875	2,435	.	28,726	1,525
18	2	27,637	2,961	.	27,666	2,585
128	7	23,582	7,016	.	22,301	8,202
1278	3	20,677	9,921	.	19,624	10,879
12378	6	14,732	15,866	.	16,298	14,205
123678	4	11,726	18,871	.	11,806	18,697
1234678	5	8,070	22,527	.....	7,287	23,216
2 Enlaces (EAW)						
Canais Ativos	Canais Candidatos	Canal 1		....	Canal 8	
		SNR(dB)	Penalidade (dB)	.....	SNR (dB)	Penalidade (dB)
nenhum	1	26,550	3,760	.	-59,372	63,795
1	8	26,571	3,739	.	28,726	1,525
18	2	26,392	4,206	.	27,666	2,585
128	7	21,465	9,133	.	22,301	8,202
1278	3	17,574	13,023	.	19,624	10,879
12378	6	12,128	18,470	.	16,298	14,205
123678	4	10,011	20,586	.	11,806	18,697
1234678	5	6,279	24,319	.....	7,287	23,216
3 Enlaces (EAW)						
Canais Ativos	Canais Candidatos	Canal 1		....	Canal 8	
		SNR (dB)	Penalidade (dB)	.....	SNR (dB)	Penalidade (dB)
nenhum	1	24,389	5,921	.	-14,972	19,395
1	8	24,421	3,457	.	24,196	6,055
18	2	24,702	3,173	.	23,473	6,778
128	7	21,208	6,429	.	20,548	9,955
1278	3	16,950	6,632	.	16,319	14,184
12378	6	12,343	8,334	.	12,865	17,638
123678	4	10,053	4,679	.	9,880	20,623
1234678	5	6,088	5,639	.....	4,354	26,149
4 Enlaces (EAW)						
Canais Ativos	Canais Candidatos	Canal 1		....	Canal 8	
		SNR (dB)	Penalidade (dB)	.....	SNR (dB)	Penalidade (dB)
nenhum	1	22,266	8,045	.	-22,093	26,516
1	8	22,296	8,014	.	22,387	7,864
18	2	23,001	7,597	.	22,039	8,212
128	7	20,905	9,693	.	19,967	10,536
1278	3	15,682	14,915	.	16,695	13,808
12378	6	12,023	18,574	.	12,212	18,291
123678	4	9,454	21,144	.	9,619	20,884
1234678	5	6,551	24,047	.....	4,534	25,969

Nesta FID as células foram identificadas com cores para facilidade na classificação pela qualidade óptica de cada canal, ou seja:

- Células em branco significam canais ainda não ocupados (indicam penalidade alta pois não há sinal);

- Células em verde indicam canais alocados e viáveis, ou seja, com qualidade óptica aceitável ($SNR \geq 15,56$);
- Células em vermelho são canais inviáveis, ou seja, sem qualidade óptica aceitável ($SNR < 15,56$) e, portanto, não devendo ser alocados.

Durante o processo de simulação para geração dos dados que popularão cada FID, a partir do primeiro canal alocado, a SNR é calculada e a cada nova ocupação, de acordo com o WAM adotado, a SNR de todos os canais são recalculadas e as novas condições de qualidade óptica são definidas. A partir de um certo nível de ocupação do enlace, um ou mais canais se tornam inviáveis, ou seja, sem qualidade óptica ($SNR < 15,56$), os quais são marcados com a cor vermelha.

Importante salientar que o RSVP-TE consultará a FID para verificar a disponibilidade de canais com QoS óptico adequado a cada nó. Caso não hajam canais nessas condições ou o atendimento deste novo LSP degrade os LSPs existentes, o processo de alocação deve ser interrompido, pois, caso prossiga, além de não atender adequadamente à nova solicitação de caminho, também serão prejudicadas as conexões já estabelecidas. Na Tabela 4-2 são também fornecidos os valores de penalidade total para cada canal alocado, computando-se as parcelas com que cada um dos enlaces contribuiu para compor o valor final da SNR para cada caminho.

4.2.3 Avaliação do QoS óptico do *lightpath* pelo RSVP-TE estendido

Durante a fase de sinalização, a versão estendida do RSVP-TE analisa a penalidade acumulada gerada pelo FWM ao longo do *lightpath* a ser reservado. Em cada nó é feita uma avaliação da qualidade de cada canal com relação à SNR, para o caminho selecionado, comparando-se com nível mínimo requerido (SNR_{TH}) e, assim, é decidido se o *lightpath* a ser reservado é viável ou não. Esta etapa é realizada por meio de mensagens PATH na direção *downstream*, ou seja, do nó de origem até o nó de destino. A cada nó intermediário, o valor da penalidade FWM é reavaliado e, novamente, comparado com a SNR_{TH} .

Em cada nó intermediário, após a análise da SNR global, existem duas situações a considerar:

- Caso os níveis de penalidades FWM acumulados estejam abaixo do limite aceitável ($SNR_{AC} \leq SNR_{TH}$), a reserva do *lightpath* é efetivada por meio do envio de mensagens RESV, até o nó de origem;

- Caso contrário ($\text{SNR}_{\text{AC}} > \text{SNR}_{\text{TH}}$), o nó de destino envia uma mensagem PATH ERR na direção *upstream*, ou seja, até o nó de origem, liberando os recursos inicialmente alocados. Neste caso, é necessário reiniciar o processo de estabelecimento do *lightpath*.

Na Figura 4-8, é apresentado um fluxograma que contempla as extensões ao protocolo RSVP-TE para atender os requisitos descritos.

Figura 4-8: Fluxograma do RSVP-TE estendido para atendimento das restrições da FWM.

4.2.4 Avaliação das melhorias obtidas com o RSVP-TE estendido

Com as extensões ao RSVP-TE aqui propostas, é possível evitar que canais sem qualidade óptica sejam alocados aos *lightpaths*, evitando-se assim degradação da QoS a nível do cliente. No caso de impossibilidade de alocação de um canal adequado, o processo de reserva de recursos do protocolo RSVP-TE é interrompido e a conexão é rejeitada, conforme procedimentos já estabelecidos no GMPLS [FARREL, 2006], [MANNIE, 2004]. Assim, o comportamento restritivo em relação aos *lightpaths* com QoS óptico inadequado ($SNR_{AC} > SNR_{TH}$) imposto pelas extensões aqui implementadas deve melhorar o desempenho

da rede, o qual pode ser avaliado levantando-se os novos níveis de bloqueio da rede, abordagem amplamente utilizada em trabalhos correlatos [CHAVA, 2010], [PAVANI, 2010], [SAMBO, 2009], [SAMBO, 2009a], [SAMBO, 2010].

A partir de uma topologia clássica já consagrada na literatura (*Manhattan Street* por exemplo), são levantados os níveis de bloqueio para cada uma das condições da rede, conforme descritas abaixo:

- Comportamento do bloqueio médio teórico da rede, onde serão inicialmente definidos os limites teóricos de bloqueio (máximo e mínimo), que funcionarão como referências para o nosso estudo.
- Investigação da influência dos WAMs no comportamento do bloqueio médio da rede.
- Investigação da influência do espaçamento entre canais no comportamento do bloqueio médio da rede.
- Proposição de WAMs especialistas para mitigar os efeitos da FWM.

4.3 Considerações Finais

Existem, basicamente, duas abordagens para implementação, no plano de controle do GMPLS, de uma sistemática para tratamento das restrições impostas pela camada física. A primeira envolve extensões aos protocolos que compõem o controle de roteamento e os algoritmos (RWA), onde são envolvidas novas métricas para estabelecimento dos melhores caminhos a partir de parâmetros da camada física. A segunda abordagem estende os protocolos de controle de sinalização para possibilitar a avaliação do QoS óptico de cada *lightpath* durante o seu estabelecimento.

É proposta então como solução a extensão ao controle de sinalização, mais especificamente ao protocolo RSVP-TE, para tratar as restrições físicas, particularmente as geradas pela FWM.

Os dados sobre as restrições FWM (SNR por canal) que ocorrem nos enlaces ópticos da rede em estudo, quando da ocupação dos comprimentos de onda utilizando-se um dado WAM (*Wavelength Allocation Method*), serão gerados e disponibilizados para o protocolo RSVP-TE pela FID (*FWM Impairments Database*).

As extensões ao RSVP-TE possibilitam que, por meio de uma consulta aos dados da FID, seja possível validar ou não um LSP, evitando utilização de *lightpaths* que não apresentem o nível de QoS requerido.

Para avaliar os impactos das extensões ao RSVP-TE aqui apresentadas, é necessário investigar como as restrições aos canais sem QoS óptico influenciam no desempenho da rede. O método proposto para tal avaliação analisa o comportamento do bloqueio médio da rede em função dos WAMs utilizados e do espaçamento entre canais

5 ESPECIFICAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DA PLATAFORMA DE TESTES

Considerando-se as condições para simulação da rede de transporte em estudo para validação das propostas aqui apresentadas, tanto o Plano de Dados (camada física óptica) quanto o Plano de Controle (GMPLS - *Generalized MultiProtocol Label Switching*) são ambientes complexos e bastante distintos. Diante de tal complexidade, a arquitetura da plataforma de testes para validação da proposta apresentada no Capítulo 4 foi idealizada considerando a implementação individual de cada um destes ambientes em ambientes de simulação distintos. Posteriormente foi efetuada a integração entre estes ambientes para a obtenção dos resultados finais. A plataforma de testes assim composta possibilitou levantar as restrições impostas pela camada óptica para cada conexão e validar as funcionalidades das extensões ao GMPLS aqui propostas, permitindo avaliar o desempenho global da rede em função de diversos parâmetros, entre eles a topologia, o número de canais em cada enlace, a carga de tráfego e os algoritmos WAM (*Wavelength Allocation Methods*).

O primeiro ambiente é composto por um simulador de redes ópticas que opera na camada física, o qual emula o Plano de Dados do GMPLS. Tal *software* tem capacidade de gerar, a partir da topologia física da rede (como por exemplo: lasers, sistemas DWDM, comutadores ópticos, fibras ópticas e fotodetectores), as informações referentes aos parâmetros envolvidos no efeito FWM (*Four-Wave Mixing*), tais como, penalidades de potência, BER (*Bit Error Rate*) e SNR (*Signal Noise Ratio*) dos sinais na recepção. Além disto, o simulador permite a implementação de algoritmos WAM, já que o critério de alocação de canais tem influência no QoS óptico para cada conexão. Como comentado na Capítulo 4, os dados levantados por este simulador comporão uma base de dados com as restrições da camada física, a FID (*FWM Impairments Database*), a ser utilizada pelo Plano de Controle do GMPLS.

Já o segundo ambiente emula as funcionalidades básicas do Plano de Controle do GMPLS, permitindo configurações relativas à sinalização, principalmente no que concerne ao gerenciamento dos efeitos da FWM, e roteamento. A partir dos dados físicos levantados e a FID devidamente populada, a mesma será utilizada pelo Plano de Controle GMPLS quando do estabelecimento dos *lighpaths*. Uma vez que os dois ambientes estejam já adaptados, configurados e integrados, é possível estabelecer critérios para validação de LSPs a partir da análise das penalidades físicas relativas ao FWM durante a etapa de estabelecimento dos

lightpaths. A estrutura completa que compõe a plataforma de desenvolvimento está indicada na Figura 5.1.

Figura 5-1: Plataforma de Desenvolvimento do GMPLS com extensões para as Restrições FWM.

Os módulos indicados na Figura 5-1 compõem a plataforma de testes formada pelos dois ambientes, ou seja, a camada óptica e o Plano de Controle do GMPLS, cujas respectivas funcionalidades são descritas a seguir:

No ambiente de camada óptica temos:

- Topologia da Rede: formada pelos componentes da rede óptica, ou seja, lasers, multiplexadores/demultiplexadores DWDM, fibras ópticas, fotodetectores e módulos para medição de OSNR. Tais componentes, com parâmetros a serem apresentados nas próximas seções, estão interligados conforme a topologia em estudo no caso deste trabalho, a *Manhattan Street* 9 nós.

- WAM: Trata-se do algoritmo que estabelece a sequência de ocupação dos canais no enlace. Serão investigadas neste trabalho algumas modalidades de WAM, conforme apresentado no próximo Capítulo.
- Restrições da Camada Física: Base de dados com os valores de SNR de cada canal para um dado WAM, para cada comprimento de rota (1, 2, 3 e 4 *hops*).

No ambiente do Plano de Controle do GMPLS temos:

- Controle de Configuração da Rede: Estabelece todas as características topológicas da rede em estudo, como por exemplo, número de nós, matriz de conectividade entre os nós e valores de tráfego que a rede será submetida.
- Sinalização (RSVP-TE estendido): Módulo com as funcionalidades básicas do RSVP com adequações na mensagem *Path* para transportar informações sobre as restrições da camada óptica relativas à FWM.
- Roteamento (OSPF-TE): módulo que implementa a funcionalidade de roteamento básico do GMPLS, baseado na escolha única para cada rota estabelecida através do menor caminho (Dijkstra).
- FID (*FWM Impairments Database*): base de dados populada a partir dos dados de SNR fornecidos pelo ambiente de camada óptica.
- Cálculo de Bloqueio da Rede: a partir da quantidade de *lightpaths* bloqueados por apresentarem QoS óptico inadequado, serão calculadas as taxas de bloqueio médio da rede. Os valores assim obtidos fornecerão subsídios para investigar tanto a influência das restrições físicas no desempenho da rede GMPLS, objetivo principal deste trabalho, como também propor novos WAM especialistas nos efeitos da FWM.

Importante ressaltar que o ambiente que emula a camada óptica opera em modo *off-line*, ou seja, os dados são coletados previamente e de forma independente da simulação no Plano de Controle do GMPLS. Propostas de operação *on-line* foram indicadas no Capítulo 7, como possíveis trabalhos futuros.

Além disto, na plataforma de teste aqui proposta foram implementadas apenas as funcionalidades necessárias para atingir os objetivos específicos deste trabalho, referente ao gerenciamento do QoS óptico dos *lightpaths* em uma rede GMPLS/DWDM na qual os efeitos da FWM são fatores restritivos.

5.1 Ambiente de Simulação: Camada Óptica

Como discutido no início deste Capítulo, será utilizado um ambiente de simulação que emula uma rede óptica DWDM real com o objetivo de levantar dados referentes à qualidade óptica dos canais em cada um dos enlaces em função da carga de tráfego oferecida à rede. Uma vez levantados tais dados, os mesmos são disponibilizados para a rede GMPLS, os quais servem de subsídios para eleger apenas caminhos que possuam QoS óptico adequado para a transmissão, como definido no Capítulo 4.

Nas próximas seções a ferramenta de simulação é apresentada e são indicados os parâmetros de caracterização dos dispositivos ópticos utilizados na rede, bem como os procedimentos adotados na simulação para levantamento das informações da camada física.

5.1.1 Ferramentas de Simulação da Camada Óptica

Para a simulação da camada óptica foram avaliadas duas opções de ferramentas distintas, onde quesitos como funcionalidades, desempenho e documentação foram comparados. As ferramentas foram:

- LightD - *Software* para Projeto de Sistemas Ópticos [LIGHTD, 1998], é uma ferramenta desenvolvida pelo CPqD (Centro de Pesquisa e Desenvolvimento) com finalidades acadêmicas e comerciais. Trata-se de um simulador óptico utilizado para o desenvolvimento de dispositivos fotônicos e redes ópticas e, gentilmente, disponibilizado para avaliação e uso restrito a este projeto.
- VPI (*Virtual Photonics Incorporated*) - Simulador de redes ópticas disponível sob licença e desenvolvido pela VPIphotonics™, uma divisão da empresa VPIsystems® [VPI, 2010]. É uma ferramenta bastante completa, já consagrada nos ambientes de pesquisa, desenvolvimento e projetos de redes ópticas, com diversos recursos já implementados, inclusive interface para aplicativos matemáticos e de simulação como o MATLAB.

Com base na avaliação feita nas ferramentas apontadas, o VPI se apresentou como a opção mais indicada, principalmente devido à constante atualização e aos vários recursos disponíveis, inclusive possuindo uma vasta biblioteca com a maior parte dos elementos de

redes ópticas que foram utilizados neste trabalho [VPI, 2010]. O processo de avaliação das ferramentas citadas está detalhado no Anexo A deste trabalho

5.1.2 Configuração e Parâmetros da Camada Óptica

Como já discutido no Capítulo 4, a base de estudo para estruturação da rede óptica a ser avaliada é um enlace ponto a ponto parametrizado de tal forma que favoreça a ocorrência dos efeitos da FWM. A partir do enlace analisado anteriormente, onde já se observa a influência da FWM na qualidade óptica dos canais DWDM, foram ajustados os parâmetros para definição de um enlace ponto a ponto básico que conecta cada um dos nós da rede a ser estudada, de acordo com valores já adotados na literatura para trabalhos correlatos [TKACH, 1995] [FONSECA, 2004a]. Na Figura 5-2, tem-se representado este enlace, tal como foi inserido no ambiente de simulação do VPI, cujos componentes são agora descritos.

Figura 5-2: Teste do enlace básico ponto a ponto com 8 canais DWDM.

Na transmissão, o sinal óptico DWDM é formado por 8 canais multiplexados com um espaçamento Δf igual a 50 GHz, conforme indicado na parte inferior esquerda da Figura 5-2. Tais sinais são gerados por um conjunto de lasers modulados externamente pelo sinal digital a ser transmitido, com taxa de 10 Gbps e gerado a partir de uma PRBS (*Pseudo Random Binary Sequence*) com período de repetição de $(2^{23}-1)$ bits. Para acomodar cada canal dentro do espectro de operação, cada laser tem sua frequência deslocada a partir da frequência central da região da 3ª Janela, ou seja, $f_0 = 193,1$ THz, conforme apresentado na Tabela 5-1.

Tabela 5-1: Espectro de operação dos lasers no sistema DWDM.

Transmissão		
Canal	Espaçamento a partir do canal central	Frequência do Laser (THz)
1	$f_0 - 3,5 \Delta f$	192,925
2	$f_0 - 2,5 \Delta f$	192,975
3	$f_0 - 1,5 \Delta f$	193,025
4	$f_0 - 0,5 \Delta f$	193,075
5	$f_0 + 0,5 \Delta f$	193,125
6	$f_0 + 1,5 \Delta f$	193,175
7	$f_0 + 2,5 \Delta f$	193,225
8	$f_0 + 3,5 \Delta f$	193,275

Nesta fase das simulações, o meio de transmissão é formado por uma fibra óptica do tipo DSF (*Dispersion Shifted Fiber*), com extensão de 20 quilômetros, com dispersão de 0,2 ps/nm-km para $\lambda_0 = 1550$ nm e inclinação da curva de dispersão igual a 0,07 ps/nm².km. Como indicado na Figura 5-2, o OXC 2x8 (*Optical Cross-Connect*) com 2 entradas/saídas e 8 canais por entrada/saída permite controlar o número de canais a ser injetado na fibra (de 0 a 8). A potência injetada na fibra é de 3 mW para cada canal (4,77 dBm), estando coerente com

valores experimentais propostos por Tkach em [TKACH, 1995] e de simulação propostos por Fonseca e Waldman em [FONSECA, 2004a] e Singh em [SINGH, 2009]. Os parâmetros utilizados na simulação estão apresentados na Tabela 5-2.

Na recepção, o processamento do sinal DWDM está ilustrado na parte inferior direita da Figura 5-2. Cada canal é demultiplexado e conduzido a um filtro passa faixa com largura de banda igual a 80 GHz, sendo posteriormente detectado e sua BER calculada por um módulo específico. Para as condições descritas, ou seja, baixa dispersão cromática, potência de transmissão moderada e pequeno espaçamento entre canais, entre as não linearidades atuantes, os efeitos do FWM são predominantes e impactam diretamente na qualidade óptica dos sinais recebidos.

Tabela 5-2: Parâmetros sistêmicos para simulação enlace ponto a ponto.

Parâmetro	Valor Adotado
Potência de saída do laser	3 mW
Área efetiva da fibra	55 μm^2
Interferência entre sinais de entrada (OXC)	30 dB
Largura de banda óptica/canal (Recepção)	80 GHz
Coeficiente de atenuação da Fibra	0,2 dB/km
Perdas de inserção (conectores)	0 dB
Coeficiente de Dispersão	0,2 ps/nm.km.
Inclinação da curva de dispersão (<i>slope</i>)	0,07 ps/nm ² .km
Índice de Refração Não Linear (n_2)	$3,2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$
Coeficiente de propagação não linear (γ)	$2,35 (\text{W.km})^{-1}$
Responsividade (fotodetector)	1,0 (A/W)

Como discutido no Capítulo 4, os efeitos da FWM podem ser avaliados determinando-se a penalidade que a inserção de canais provoca para a manutenção da BER em níveis aceitáveis (10^{-9}). A Figura 5-3 apresenta os valores das penalidades de potência, para um e três canais alocados, em função da BER na recepção.

Figura 5-3: Penalidade de potência para 1 e 3 canais ativos, com BER 10^{-9} e 10^{-11} .

Por meio do gráfico da Figura 5-3, é possível observar que, para apenas 3 canais ativos (canais 4, 5 e 6), a penalidade de potência imposta já é da ordem de 4 dB para uma BER de 10^{-9} . Já para padrões mais rigorosos, com BER igual a 10^{-11} , o valor já atinge aproximadamente 8 dB.

Face aos dados obtidos, estas simulações preliminares reforçam a necessidade de se controlar os efeitos não lineares do meio óptico, em particular a FWM. Além disto, o simulador de camada óptica se mostrou capaz de gerar dados associados à degradação da FWM em função da BER, a partir da qual é possível se calcular a relação sinal ruído (SNR – *Signal-to-Noise Ratio*) para cada canal, os quais popularão a base de dados FIB. No Plano de Controle do GMPLS, cada elemento de rede terá disponível tais informações, as quais serão utilizadas pelo protocolo RSVP-TE estendido no estabelecimento dos *lightpaths* mais adequados.

5.1.3 Rede Manhattan Street

Para a simulação mais próxima possível do ambiente real, além dos parâmetros ópticos até aqui descritos, é necessário adotar uma topologia de rede que, além de reproduzir situações reais, ofereça uma maior flexibilidade na elaboração de simulações, ampliando as possibilidades de testes com novas propostas de algoritmos para gerenciamento das restrições da camada física. Diante desta premissa, um modelo muito utilizado na literatura já aqui referenciada e adotado neste trabalho é a topologia do tipo *Manhattan Street* de 9 nós e 18 enlaces. Sua estrutura básica está apresentada na Figura 5-4.

Figura 5-4: Topologia *Manhattan Street* com 9 nós e 18 enlaces.

Além de ser uma topologia bastante estudada pela comunidade científica, sua escolha também se justifica por ser um modelo com alta capacidade de tráfego e robustez às falhas. Além disto, devido à grande quantidade de trabalhos envolvendo este modelo, é possível comparações entre os resultados já publicados e os obtidos no presente trabalho. Na Figura 5-5, com dados obtidos a partir de simulação, é possível comparar o comportamento quanto à probabilidade de bloqueio teórico de três topologias distintas, malha 4 nós, malha 7 nós e *Manhattan Street* 9 nós, comprovando a eficiência desta última.

Figura 5-5: Resultados de simulação de bloqueio para as topologias Malha 4 nós, Malha 7 nós e *Manhattan Street* 9 nós.

Para compor a topologia em estudo, cada um dos nós é composto por um comutador óptico OXC e conectado aos outros OXCs adjacentes por meio de enlaces de fibra óptica ponto a ponto idêntico ao estudado no item anterior. Cada origem O_i simula usuários que originam conexões na rede, representados na camada física pelo conjunto de lasers, da mesma forma que cada D_i representa usuários finais de destino, o que corresponde ao conjunto de fotodetectores no domínio óptico. Importante ressaltar que no presente trabalho não está prevista a conversão de comprimento de onda, cujo tema pode ser objeto de investigações futuras, como comentado no Capítulo 7.

Na Figura 5-6 está apresentada a topologia *Manhattan Street* implementada no ambiente do VPI. Cada OXC opera com duas entradas e duas saídas, sendo que nestas podem ser conectadas fibras ou dispositivos finais (lasers ou fotodetectores).

Figura 5-6: Topologia Manhattan Street com 9 nós e 8 canais DWDM por enlace (10 Gbps)

Nesta topologia, é importante ressaltar que a rede simulada é totalmente simétrica, ou seja, todos os enlaces e OXCs, além de cada conjunto de fotodetectores e lasers, apresentam as mesmas características. Cada fibra representa o fluxo de informação da conexão entre dois OXCs da rede em um sentido (de O_i para D_i), sendo que o fluxo de retorno (de D_i para O_i), devido à simetria da rede, sofrerá as mesmas penalizações.

Para a geração dos valores de SNR que popularão a FID, o simulador dispõe de um módulo (Receptor) que calcula as condições do sinal óptico de cada canal na recepção (fator Q e BER), possibilitando levantar a SNR, parâmetro que será utilizado para avaliar o QoS óptico em cada comprimento de rota (1, 2, 3 ou 4 enlaces).

Uma vez definida a topologia e definidos os métodos WAM a serem aplicados, é possível automatizar a tarefa de geração das correspondentes FID no VPI por meio de *scripts* de simulação, uma ferramenta importante que agiliza a execução de tarefas repetitivas.

5.1.4 Wavelength Allocation Methods (WAM) implementados

Como referenciados anteriormente, são numerosos na literatura trabalhos sobre os algoritmos RWA, onde os critérios de escolha tanto de caminhos quanto de alocação de comprimentos de onda são propostos e avaliados. Neste trabalho, tais algoritmos são chamados de métodos de alocação de comprimento de onda ou WAM (*Wavelength Allocation Methods*), que são detalhados a seguir.

Os WAMs procuram associar um caminho óptico a uma conexão ingressante e estes podem influenciar no desempenho da rede óptica no que diz respeito à capacidade de escoar tráfego, cuja investigação faz parte de um dos objetivos deste trabalho. Para que os WAMs possam contribuir para um melhor desempenho da rede, é necessário que cada método utilize um critério que procure minimizar efeitos indesejáveis existentes na camada óptica, de forma a reduzir seus efeitos. No caso da rede em estudo, a potência moderada de transmissão, o uso de fibras com baixa dispersão e o adensamento dos canais WDM favorecem o aparecimento da FWM e, neste caso, WAM apropriados a este contexto são propostos e avaliados. Considerando, inicialmente, que existem disponíveis 8 canais DWDM, os métodos tradicionais utilizados são os descritos a seguir:

a) NOA (*Non-Optimized Allocation*)

Apesar não ser um WAM específico para combater a FWM, é utilizado como referencial para avaliar outros métodos. É um método trivial que não segue nenhum critério otimizado para ocupação dos canais e, neste trabalho, foi adotada a alocação crescente de canais, ou seja, os comprimentos de onda são ocupados a partir do primeiro até o último disponível, conforme apresentado na Tabela 5-3.

Tabela 5-3: Método NOA (*Non-Optimized Allocation*).

Canais Ativos	Canais a ativar
Nenhum	1
1	2
1 2	3
1 2 3	4
1 2 3 4	5
1 2 3 4 5	6
1 2 3 4 5 6	7
1 2 3 4 5 6 7	8

b) LWS (*Largest Wavelength Spacing*)

Este método procura manter o espaçamento relativo entre canais o maior possível, minimizando um dos fatores que potencializam os efeitos interferentes da FWM que é a proximidade entre canais. Assim, os canais são acomodados sucessivamente, procurando-se maximizar a distância espectral entre eles. A sequência de alocação proposta por este método é apresentada na Tabela 5-4.

Tabela 5-4: Método LWS (*Largest Wavelength Spacing*).

Canais Ativos	Canais a ativar
nenhum	1
1	8
1 8	5
1 8 5	3
1 8 5 3	6
1 8 5 3 6	4
1 8 5 3 6 4	7
1 8 5 3 6 4 7	2

c) EAW (*Edge Allocation Wavelength*)

O EAW define que os canais são alocados a partir das posições espectrais mais afastadas da frequência central (f_0), mantendo assim as componentes FWM fora da banda de operação. Outra justificativa para seu uso é que os canais de frequências mais altas são menos sensíveis aos efeitos da FWM, pois nesta região as fibras DSF apresentam dispersão maior. Neste método, a sequência de alocação é feita a partir das bordas, ou seja $(f_0 - 3,5 \Delta f)$ e $(f_0 + 3,5 \Delta f)$, como apresentado na Tabela 5-5.

Tabela 5-5: Método EAW (*Edge Allocation Wavelength*).

Canais Ativos	Canais a ativar
nenhum	1
1	8
1 8	2
1 8 2	7
1 8 2 7	3
1 8 2 7 3	6
1 8 2 7 3 6	4
1 8 2 7 3 6 4	5

d) LIW (*Least Impaired Wavelength*) para 8 canais no enlace.

Outra forma de implementar métodos de alocação de comprimentos de onda sensíveis às interferências da FWM é a implementação de WAMs especialistas por meio da utilização de sequências de canais ótimos devidamente ordenados, proposta feita por Fonseca e Waldman, além de Lopes [FONSECA, 2004], [LOPES, 2009]. Investigando tais métodos, foram desenvolvidos algoritmos baseados na alocação sequencial dos canais menos afetados pelas restrições impostas pela camada física (*physical impairments*), chamados aqui de LIW (*Least Impaired Wavelength*). Os canais candidatos são alocados em ordem decrescente de qualidade óptica, onde é esperado que os primeiros a serem ocupados são justamente aqueles que possuem condições melhores para conviver com o crescente nível de interferências ocasionadas pela FWM.

O parâmetro de classificação do canal quanto à sua qualidade óptica pode ser a SNR ou, especificamente para as condições da rede aqui estudada, a potência FWM específica em cada canal.

Considerando nesta análise que o método LIW emprega os canais menos afetados com relação à SNR, inicialmente devem ser levantados os valores para cada canal na pior situação do enlace com relação aos efeitos da FWM, ou seja, todos os canais ocupados.

Na Figura 5-7 estão apresentados os valores da SNR para cada canal, na condição de ocupação total, para um enlace de fibra DSF de 5 Km.

Figura 5-7: Valor da SNR por canal, para um enlace de 5 Km de fibra e 8 canais ocupados.

É possível observar que os canais centrais são os mais penalizados, pois trata-se da região onde a dispersão cromática é próxima de zero (λ_0). Além disto, tais canais são os mais penalizados pelas interferências da FWM geradas pelos canais laterais adjacentes. Neste caso, a sequência ótima de alocação de canais baseada na SNR decrescente é composta pelos canais: 6 - 7 - 8 - 1 - 2 - 4 - 5 - 3.

e) LIW (*Least Impaired Wavelength*) para 16 canais no enlace.

Investigando agora a comportamento dos WAMs especialistas que utilizam sequências de canais com menores restrições (LIW), a exemplo do que foi efetuado para enlaces de 8 canais, neste caso foram levantados os valores da SNR para cada um dos 16 canais simultaneamente ativados. Na Figura 5-8 estão apresentados os valores da SNR para cada canal, na condição de pior caso, ou seja, ocupação total, para um enlace de fibra DSF de 10 Km.

Figura 5-8: Valor da SNR por canal, para um enlace de 10 Km de fibra e 16 canais ocupados.

Novamente, os canais da região próxima a λ_0 são os mais degradados em função da FWM acentuada e, neste caso, a sequência ótima de alocação de canais baseada na SNR decrescente é composta pelos canais: 15 - 2 - 16 - 14 - 3 - 1 - 13 - 10 - 5 - 12 - 7 - 8 - 9 - 6 - 4 - 11. No VPI, seguindo-se a sequência ótima de canais, a FID LIW é populada com dados de SNR a cada nova alocação e, em seguida, utilizada na simulação do bloqueio médio da rede em função da carga de tráfego.

Como na rede em estudo, os efeitos da FWM são dominantes e dependem da quantidade de enlaces (saltos) percorridos em cada rota, cabem aqui investigações sobre algoritmos especialistas, que utilizam a sequência de canais ótimos do ponto de vista do nível dos sinais interferentes. Assim, o parâmetro adotado passa a ser a potência média da FWM (P_{FWM}) para cada canal, considerando cada comprimento de rota (de 1 a 4 enlaces). Com o cálculo da P_{FWM} média procura-se contabilizar o caráter cumulativo da FWM ao longo da extensão da rota e o método assim definido é aqui chamado de LIWA (*Least Impaired Wavelength Average*).

O cálculo aproximado da P_{FWM} por canal para um sinal óptico do tipo OOK (*On Off-Keying*) em função dos parâmetros da detecção foi proposto por Inoue em [INOUE, 1995]. Assumindo inicialmente que os efeitos dos ruídos térmico e *shot* na detecção são desprezados, o fator Q pode ser calculado analiticamente por:

$$Q = \frac{R_0 P_s}{\sqrt{N_{FWM}}} \quad (23)$$

Em que R_0 é a responsividade do detector, P_s é a potência do canal na recepção e N_{FWM} é o batimento sinal-ruído da FWM, o qual é dado por:

$$N_{FWM} = 2R_0^2 \frac{P_{FWM}}{8} \quad (24)$$

Sendo que a P_{FWM} é a potência total dos sinais interferentes gerados pela FWM no canal.

Substituindo-se (24) em (23) temos que a P_{FWM} pode ser obtida por:

$$P_{FWM} = \frac{4P_s^2}{Q^2} \quad (25)$$

Conforme a expressão (25), uma vez obtido o valor do fator Q e da potência recebida, é possível determinar o valor da potência total da FWM em cada canal. Como a P_{FWM} depende da extensão de cada rota, a sequência de canais ótimos que o método LIWA utiliza é estabelecida a partir da média entre os valores obtidos para cada comprimento de rota.

5.2 Ambiente de Simulação: Plano de Controle GMPLS

A plataforma que representa a Rede GMPLS deve permitir a construção de uma topologia em malha, na qual são emuladas as funções básicas do plano de controle do GMPLS, principalmente quanto aos requisitos de roteamento e sinalização. Uma vez estruturada a camada óptica, serão desenvolvidas as extensões necessárias ao GMPLS para possibilitar o tratamento das restrições da camada física originadas pelos efeitos da FWM.

Atendendo aos objetivos deste trabalho, as extensões aqui propostas são direcionadas para o controle de sinalização, mais especificamente o protocolo RSVP-TE. Neste caso, as funcionalidades básicas de roteamento e necessárias para desenvolvimento deste trabalho serão mantidos em sua versão original.

5.2.1 Ferramentas de Simulação do Plano de Controle do GMPLS

Para escolha da plataforma do Plano de Controle GMPLS, três simuladores disponíveis foram avaliados, sendo eles:

- GLASS (*GMPLS Lightwave Agile Switching Simulator*), um *software* de simulação desenvolvido na linguagem Java pelo NIST (*National Institute of Standards and Technology*) [GLASS, 2001], [GLASS, 2010]. Foi idealizado para atender à especificidade requerida pelo ambiente a ser simulado, no caso o GMPLS, apresentando as vantagens de ser disponibilizada em código aberto e possuir vários módulos funcionais GMPLS já implementados. Alguns trabalhos acadêmicos já utilizaram este simulador, considerado hoje em uma versão mais estável quando comparada com as versões iniciais [DUARTE, 2006], [DIAS, 2008].
- ns2 (*Network Simulator 2nd version*), assim como o GLASS, é um *software* de domínio público, o que facilita a implementação de novas funcionalidades. Atualmente, sua versão disponível é a ns-2.34 datada de 17 de Junho de 2009. O ns2 foi desenvolvido e vem sendo atualizado pelo Projeto VINT (*Virtual InterNetwork Testbed*) e foi previsto, originalmente, para operar na plataforma Linux, mas pode ser utilizado na plataforma Windows por meio do aplicativo Cygwin [NS2, 2010].
- *WDM Network Blocking Computation Toolbox* trata-se de um conjunto de ferramentas para análise de bloqueio de redes WDM desenvolvido no ambiente do simulador matemático MATLAB na versão V6.5 (R13). Foi implementado por Pawelczak a partir de estudos analíticos feitos por Birman e Kovacevic em [BIRMAN, 1996] e [KOVACEVIC, 1996], estando disponível para uso livre em código aberto em [PAWELCZAK, 2004], viabilizando novas implementações.

Com base na avaliação feita nas ferramentas citadas para compor o Plano de Controle do GMPLS, o conjunto *WDM Network Blocking Computation Toolbox* desenvolvido, inicialmente, por Pawelczak [PAWELCZAK, 2004], e, posteriormente, adaptado por Ferreira

[FERREIRA, 2006] mostrou-se mais adequado para atender às premissas deste trabalho, devido aos fatores descritos a seguir:

- Tem como base o modelo analítico (Erlang), já consolidado e utilizado em vários trabalhos na literatura [PAWELCZAK, 2004a], [FONSECA, 2006], [LUO, 2004], [OZDAGLAR, 2003].
- Disponibilidade de diversos módulos com funcionalidades específicas disponíveis desde a sua versão original, conforme [PAWELCZAK, 2004].
- Extremamente estável, face aos resultados obtidos durante a avaliação.
- Tanto a versão original quanto a versão modificada são bem documentadas, agilizando o aprendizado, disponível em [PAWELCZAK, 2004].
- Totalmente modular, facilitando as expansões para novos contextos e novas funcionalidades.

O processo de avaliação das ferramentas citadas está detalhado no Anexo A deste trabalho.

Uma vez disponíveis as FIDs já populadas pelo VPI, é necessário que seja configurado o *WDM Toolbox* para simular o ambiente formado pela rede GMPLS, contemplando suas funcionalidades básicas de roteamento e sinalização, além de suportar as extensões ao RSVP-TE para análise da qualidade óptica do canal oferecido à conexão ingressante. A nova estrutura dos módulos que compõe o *WDM Network Blocking Computation Toolbox* é apresentada e discutida a seguir.

5.2.2 Configuração e parâmetros do Plano de Controle GMPLS

Para suportar a rede DWDM/GMPLS, com suas características básicas de roteamento e de sinalização, além de implementar as novas funcionalidades previstas na extensão ao RSVP-TE aqui propostas, foram necessárias adaptações nos módulos existentes do *WDM Network Blocking Computation Toolbox*, além da inclusão de novos módulos. As configurações básicas e as novas funcionalidades desenvolvidas serão apresentadas a seguir.

A rede é concebida pelo programa como sendo um conjunto de nós definidos por uma Matriz de Adjacências (indicação de quais nós se conectam diretamente) conforme a topologia a ser estudada. São chamadas de rotas cada caminho formado por um conjunto de enlaces que interligam um nó de origem e um nó de destino. A partir da topologia estabelecida, define-se

a chamada Matriz de Enlaces, que caracteriza cada enlace por meio de seus respectivos nós. Tais parâmetros serão detalhados na sequência.

Para simulações de bloqueio da rede face a uma determinada carga de tráfego, o programa considera que, tratando-se de uma rede de comutação por circuitos (comprimentos de onda no DWDM), podem ocorrer perdas (bloqueios) por indisponibilidade de recursos. Neste trabalho, como não há conversão de comprimento de onda, o bloqueio ocorre caso não exista um determinado comprimento de onda que esteja livre para estabelecer o *lightpath* em todos os enlaces que compõem a rota. Além disto, cada rota é composta por um ou mais enlaces, sendo que cada enlace pode transportar várias rotas simultâneas, cada uma ocupando um comprimento de onda. Assim, é possível calcular a probabilidade média de bloqueio da rede computando-se o tráfego de cada um dos enlaces, o qual é calculado levando-se em conta a contribuição em tráfego (*Erlang*) que cada rota gera em cada um dos enlaces que ela ocupa [BIRMAN, 1996], [KOVACEVIC, 1996]. O detalhamento analítico destas considerações consta no Anexo A deste trabalho.

No programa foram adotadas as seguintes premissas para o cálculo analítico do bloqueio, válidas para as três etapas de avaliação:

- Existem W comprimentos de onda disponíveis na fibra, sendo que cada um deles representa um canal a ser utilizado integralmente.
- Todos os enlaces possuem o mesmo número de comprimentos de onda.
- Cada estação gera e recebe o tráfego por meio de um arranjo de W transmissores e receptores, respectivamente.
- O padrão de tráfego é considerado estático, considerando todos os pares de nós origem/destino da rede, seguindo a distribuição de Poisson para chegada de conexões com tempo médio de duração exponencialmente distribuído, possibilitando a aplicação da distribuição de Erlang [JESZENSKY, 2004].
- O sistema descarta as conexões de imediato caso não haja recursos para atendê-las, ou seja, utiliza comutação por perdas⁴⁰ com acessibilidade plena⁴¹.

⁴⁰ Comutação por Perdas é a modalidade de tratamento do tráfego onde requisições de conexões que não podem ser atendidas são descartadas, ou seja, não há filas de espera.

⁴¹ Acessibilidade Plena em um sistema de comutação significa que cada uma das entradas pode acessar quaisquer uma das saídas, ou seja, não há restrição de acesso aos recursos disponíveis na rede.

- Os tráfegos em cada enlace são independentes e distribuídos uniformemente entre os pares origem/destino.
- As rotas são definidas estaticamente, ou seja, o caminho entre determinados nós é, fixo, tipicamente definido pelo algoritmo Dijkstra. Neste trabalho, o roteamento sempre adotará caminho único entre dois nós, não sendo consideradas rotas alternativas.
- A ocupação dos canais segue os métodos de alocação de comprimentos de onda (WAM), os quais são estabelecidos a cada simulação, definindo assim os respectivos valores de SNR por canal de cada FID.
- Existe a possibilidade de simulações prevendo a conversão de comprimentos de onda, cujo estudo não é objeto deste trabalho.

A estrutura completa do GMPLS/DWDM *Toolbox* e suas principais funcionalidades são apresentadas e discutidas a seguir, supondo a simulação para obtenção do bloqueio da rede *Manhattan Street* de 9 nós e 18 enlaces.

a) Criação da topologia da Rede, estabelecendo a Matriz de Adjacências $[A]$ entre nós (9). Cada linha representa a conectividade direta de cada nó aos demais nós da rede, sendo que o valor (0) indica sem conexão e o valor (1) indica conectado.

$$[A] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

b) Determinação da Tabela de Enlaces $[TE]$.

Matriz de enlaces na qual os dois primeiros elementos de cada linha representam os possíveis pares de nós adjacentes (18), indicando cada enlace, sendo que o terceiro elemento representa a respectiva distância entre os nós (em km), para o caso de cálculo da BER.

$$[TE] = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 10 \\ 2 & 3 & 10 \\ 1 & 4 & 10 \\ 2 & 5 & 10 \\ 3 & 6 & 10 \\ 4 & 5 & 10 \\ 5 & 6 & 10 \\ 4 & 7 & 10 \\ 5 & 8 & 10 \\ 6 & 9 & 10 \\ 7 & 8 & 10 \\ 8 & 9 & 10 \\ 1 & 7 & 10 \\ 2 & 8 & 10 \\ 3 & 9 & 10 \\ 1 & 3 & 10 \\ 4 & 6 & 10 \\ 7 & 9 & 10 \end{bmatrix}$$

c) Construção da matriz de pares origem/destino (s,d) $[combos]$.

Indica as rotas (36) entre cada par de nós (s,d) .

$$[combos] = \begin{bmatrix} (1,2);(1,3);(1,4);(1,5);(1,6);(1,7);(1,8);(1,9);(2,3);(2,4);(2,5);(2,6);(2,7);(2,8);(2,9); \\ (3,4);(3,5);(3,6);(3,7);(3,8);(3,9);(4,5);(4,6);(4,7);(4,8);(4,9);(5,6);(5,7);(5,8);(5,9); \\ (6,7);(6,8);(6,9);(7,8);(7,9);(8,9) \end{bmatrix}$$

d) Definição da Tabela de Rotas $[TR]$ para cada par (s,d)

Efetuada o roteamento utilizando o algoritmo de menor caminho (Dijkstra), são geradas a(s) rota(s) (sequência de nós) de menor caminho entre nós (s) e (d) . Para efeito de simulações, deve ser observado que, como a rede é simétrica e o modelo de tráfego adotado é estático, caso haja mais de uma rota ótima é escolhida a primeira.

$$[TR] = [[1,2][1,3][1,4][1,2,5;1,4,5] \cdots [7,8][7,9][8,9]]$$

e) Geração da Matriz de Enlace por Rota $[TER]$.

Associação dos enlaces utilizados para cada rota ótima, estabelecida a partir da matriz $[TR]$, para cada par (s,d) . Como a rede é simétrica, caso haja mais de uma rota ótima, na simulação é escolhida a primeira.

$$[TER] = [(1)(16)(3) [1,4;3,6] [16,5;3,17] (13) [1,14;13,11] \cdots [7,9;10,12] (10)(11)(18)(12)]$$

f) Criação da Matriz de Incidência $[a_{s,l}]$.

Em cada linha da matriz é estabelecida a ocupação ou não de cada enlace (s) em uma determinada rota (l), ou seja, cada enlace (18) é utilizado (1) ou não (0) em uma determinada rota (36).

$$[a_{s,l}] = \begin{bmatrix} 100100100100100000000000000000000000 \\ 000000001001001010010000000000000000 \\ 001110000000000000000000000000000000 \\ 000000000111000000000000000000000000 \\ 000000000000000111000000000000000000 \\ 000000000000000000001001001000000000 \\ 0000000000000000000000001001010000 \\ 000000000000000000000000111000000000 \\ 0000000000000000000000000111000000 \\ 00000000000000000000000000111000 \\ 00000000000000000000000000000000100 \\ 00000000000000000000000000000000001 \\ 000001110000000000000000000000000000 \\ 000000000000111000000000000000000000 \\ 000000000000000000111000000000000000 \\ 010010010000000100100000000000000000 \\ 00000000000000000000010010000100000 \\ 00000000000000000000000000000000010 \end{bmatrix}$$

g) Geração da Matriz de Tráfego por rota $[A^l]$, considerando distribuição de tráfego homogêneo entre as rotas.

$$[A^l] = \left[\left(\frac{\text{Tráfego Total}}{\text{Número de rotas}} \right) \right]$$

h) Cálculo do bloqueio da rede, inicializando as variáveis $L_s(n) = B_s(n) = P^l(n) = P_B(n) = 0$ e $\varepsilon =$ erro de aproximação (0,00001).

i) Cálculo do número de comprimentos de onda (λ) viáveis em função do método de alocação (WAM) e da ocupação do enlace. O algoritmo utilizado para calcular o impacto do FWM no bloqueio da rede prevê que, em um dado enlace, cada rota que utiliza o enlace ocupará um canal. Assim, os canais podem ser ocupados até o momento que a SNR atinja o valor limite estabelecido no Capítulo 4, ou seja $SNR_{TH} = 15,6$ dB. tanto para o canal a ser ocupado quanto para canais com conexões já em andamento. Nesta situação, o RSVP-TE compara a SNR resultante consultando a FID e verifica se tal limite foi atingido. Para que seja estimado o número efetivo de canais viáveis que cada enlace irá dispor, em função das restrições da FWM, basta levantar a média do número de canais viáveis de cada rota que este enlace transporta. O fluxograma da Figura 5-9 apresenta a sequência de passos para obtenção do número médio de canais viáveis por enlace.

Figura 5-9: Algoritmo para estimativa de comprimentos de onda viáveis por enlace em função da FWM.

- j) Cálculo, para n iterações, do tráfego total de cada enlace s ($L_s(n)$);
- k) Cálculo do bloqueio por enlace s ($B_s(n)$) para o tráfego $L_s(n)$;
- l) Cálculo do bloqueio de cada rota l (P^l);

- m) Cálculo da probabilidade média de bloqueio da rede ($P_B(n)$);
- n) Comparação entre $P_B(n)$ e $P_B(n-1)$. Se $[P_B(n) - P_B(n-1)] \geq \epsilon$, voltar ao item j) e calcular $P_B(n+1)$. Caso contrário, $P_B(n) = P_B$.

Na Figura 5-10 está apresentado um diagrama com a configuração dos módulos descritos e suas interligações. Tal plataforma foi utilizada para obtenção dos resultados apresentados no próximo Capítulo.

Figura 5-10: Diagrama indicando os blocos funcionais utilizados para simulação da topologia *Manhattan Street* para uma rede GMPLS com o RSVP-TE estendido para atendimento das restrições da FWM.

5.3 Considerações Finais

A solução proposta neste trabalho para proporcionar QoS óptico adequado a cada *lightpath* utilizando o protocolo RSVP-TE prevê a integração de duas plataformas de simulação, uma que implementa a topologia da rede física, representando o Plano de Dados, e outra que emula o Plano de Controle do GMPLS, representando o Plano de Transporte.

Após análise de várias ferramentas disponíveis e já utilizadas em trabalhos correlatos, foram eleitas duas delas, uma para cada ambiente, em função de requisitos como, disponibilidade, confiabilidade, documentação e facilidade de novas implementações.

Para o caso do ambiente de simulação da rede física, a escolha recaiu sobre o aplicativo VPI, onde será configurada uma rede totalmente óptica. Nesta topologia, os dados sobre as restrições FWM que ocorrem nos enlaces quando da ocupação dos canais serão gerados e disponibilizados para o plano do controle do GMPLS por meio da FID (*FWM Impairments Database*).

Já para a rede GMPLS, a opção que se apresentou mais interessante para este trabalho foi um conjunto de ferramentas disponíveis no MATLAB, o *WDM Network Blocking Computation Toolbox*, que após as devidas adaptações e inclusões relativas ao protocolo RSVP-TE estendido, teve condições de estabelecer critérios de escolha dos caminhos a partir dos dados fornecidos pelo plano de transporte representado pelo VPI.

As duas ferramentas foram integradas de tal forma que as restrições físicas possam ser utilizadas como um dos parâmetros no estabelecimento dos LSPs. No domínio óptico, o VPI levanta e disponibiliza a SNR resultante por canal, compondo a base de dados FID para cada método WAM, a qual retrata as restrições impostas pela FWM em condições próximas às redes reais. Emulando o plano de controle (roteamento e sinalização) da rede GMPLS, foi criado o *GMPLS/WDM Toolbox* que, com base nos dados da FID, tem condições de gerenciar o estabelecimento dos LSPs, evitando a utilização de *lightpaths* que não apresentem o nível de QoS óptico requerido.

6 COMPORTAMENTO DO BLOQUEIO NA REDE GMPLS COM GERENCIAMENTO DOS EFEITOS DA FWM

No contexto das redes ópticas, as restrições da camada física apresentam-se como um desafio adicional ao estabelecimento dos *lightpaths*. Para atendimento dos requisitos de um determinado serviço, além dos mecanismos de gerenciamento de atrasos e recuperação de pacotes, não basta que os algoritmos de roteamento escolham o caminho considerado ótimo e que a continuidade do comprimento de onda ao longo dos enlaces esteja satisfeita. Um outro aspecto a ser observado é a qualidade do sinal óptico ao longo do *lightpath*. Uma alternativa para controlar as restrições físicas é definir um limite para o comprimento físico de cada rota na qual o *lightpath* será estabelecido, criando-se as denominadas ilhas de transparência dentro da rede. Esta estrutura, apesar de facilitar o estabelecimento das conexões no interior das ilhas, apresenta um fator negativo que é a necessidade de inserção de conversores de comprimento de onda para interconexão entre ilhas distintas, soluções normalmente custosas. Assim, para uma melhoria no desempenho da rede, com reflexo no nível da QoS, é necessário considerar as restrições da camada óptica (*physical impairments*) durante a seleção dos *lightpaths*.

A qualidade do sinal óptico associado ao canal DWDM em uma rede com as características aqui apresentadas (baixa dispersão cromática, potência óptica moderada e adensamento de canais) é definida, principalmente, pela SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) elétrica resultante dos efeitos interferentes entre os canais ativos gerados pela FWM (*Four-Wave Mixing*). Por sua vez, a SNR interfere diretamente na BER (*Bit Error Rate*), o índice global que influencia tanto na QoS (*Quality of Service*) perceptível pelo usuário final quanto na taxa de bloqueio da rede devido à retransmissão de pacotes perdidos. Assim, em uma determinada conexão, a SNR fim a fim deve ser mantida dentro de certos limites, de forma a garantir que a BER apresente valores aceitáveis, oferecendo níveis de QoS óptico adequados.

Neste Capítulo, são apresentados os resultados obtidos a partir de extensões propostas ao RSVP-TE (*Resource Reservation Protocol-Traffic Engineering*) que possibilitam a análise da qualidade óptica de um dado *lightpath* em uma rede GMPLS/DWDM (*Generalized MultiProtocol Label Switching/Dense Wavelength Division Multiplexing*) no momento da admissão da conexão e a interferência causada pela sua utilização nos *lightpaths* já estabelecidos.

Inicialmente as melhorias obtidas a partir da implementação das extensões ao RSVP-TE são apresentadas e discutidas. São mostrados os dados que comprovam a validade da solução proposta no Capítulo 4 e implementada conforme descrito no Capítulo 5, utilizando-se os WAMs (*Wavelength Allocation Method*) tradicionais. Em seguida é avaliado o comportamento da rede em função dos WAMs controlados por canais ótimos, para enlaces com 8 e 16 canais. Além disto, como contribuição deste trabalho, foi definida uma nova modalidade de WAMs, os aqui chamados de híbridos, que empregam mais de um critério para alocação dos canais candidatos.

Concluindo o Capítulo, será analisada a influência do espaçamento entre canais para as situações de 50 e 100 GHz.

6.1 Condições de Testes

A partir das extensões no plano de controle do GMPLS e dos métodos de alocação de comprimento de onda específicos propostos neste trabalho para o gerenciamento dos efeitos da FWM, espera-se, como resultados, um aumento no grau de eficiência da rede observando-se uma redução no bloqueio de conexões ingressantes devido à atribuição de *lightpaths* com QoS óptico inadequado. Para tanto, faz-se necessário que os parâmetros que identificam a degradação do sinal óptico ao longo do *lightpath* não excedam os valores limites aceitáveis, ou seja, uma relação sinal ruído limite $SNR_{TH} \geq 15,6$ dB na recepção, com $BER \leq 10^{-9}$ e fator $Q \geq 6$.

Existem duas situações em que o gerenciamento dos efeitos FWM deve atuar:

- Avaliação individual, ou seja, no canal a ser alocado no enlace na fase de admissão de novas conexões. Deve-se evitar que as mesmas sejam associadas a *lightpaths* que utilizam sinais ópticos que apresentam baixa qualidade ($SNR_{TH} < 15,6$ dB).
- Avaliação coletiva, ou seja, na alocação de um novo canal no enlace, mesmo que individualmente ele apresente SNR adequada, sua ocupação não deve desencadear ruídos interferentes que possam degradar os canais já alocados.

Como apresentado no Capítulo 5, a solução proposta neste trabalho é composta por duas plataformas de simulação que implementam a camada óptica e o Plano de Controle do

GMPLS. Em ambas, é configurada uma rede com a topologia *Manhattan Street* 9 nós/18 enlaces, inicialmente com 8 canais DWDM por enlace, como descrito na Subseção 5.1.3.

A camada óptica, representada pelo VPI (*Virtual Photonics Incorporated*), implementa a topologia indicada e os dados sobre as restrições FWM que ocorrem nos enlaces quando da ocupação dos canais serão gerados e disponibilizados para o Plano de Controle do GMPLS pela FID (*FWM Impairments Database*).

O Plano de controle do GMPLS foi implementado utilizando-se o MATLAB *WDM Network Blocking Computation Toolbox*, adaptado para as extensões ao protocolo RSVP-TE aqui propostas. Neste ambiente, além de simular as condições básicas de roteamento, sinalização, geração de tráfego e cálculo de bloqueio, foi possível estabelecer critérios de escolha dos *lightpaths* a partir do RSVP-TE, com base nos dados fornecidos da camada física levantados pelo VPI.

Para avaliação do comportamento da rede com relação ao bloqueio médio, foram executadas as seguintes etapas:

- A partir do VPI foram levantados dados de SNR para cada um dos WAMs em estudo. Foram consideradas rotas com 1,2, 3 e 4 enlaces;
- As FIDs (*FWM Impairments Database*) de cada WAM são populadas com os respectivos dados levantados.
- Uma vez que as FID sejam populadas, para cada WAM, são executadas as simulações de bloqueio na rede utilizando o GMPLS/DWDM *Toolbox* para cada valor de tráfego oferecido.

6.2 Comportamento do Bloqueio Médio da Rede *Manhattan Street* (8 canais por enlace): Validação das Extensões Propostas.

Para ser possível realizar uma análise comparativa dos resultados obtidos e assim validar a extensão ao RSVP-TE aqui proposta, são inicialmente definidos os limites teóricos do comportamento do bloqueio da rede em estudo, considerando-se o pior e o melhor caso, ou seja, a condição de máximo e mínimo bloqueio respectivamente. Tais limites, estabelecidos para cada valor de tráfego oferecido, funcionam como referenciais que permitiram comparar e quantificar as melhorias obtidas. Tais limites são definidos da seguinte forma:

- Limite Inferior de Bloqueio (LIB): é o valor de bloqueio mínimo teórico médio que a rede impõe a uma determinada carga de tráfego calculada apenas levando-se em conta o modelo de Erlang B por perdas para cada enlace e estendido para a rede como um todo, de acordo com as considerações propostas por [Kovacevik] e apresentadas na Subseção 5.2.2. Importante salientar que não estão consideradas quaisquer restrições da camada física, ou seja, os canais são ideais.
- Limite Superior de Bloqueio (LSB): é o valor de bloqueio maximizado calculado já levando-se em conta as restrições da FWM, porém utilizando um método WAM não otimizado, ou seja, que não contribui para que as restrições a camada física sejam minimizadas. Neste caso, foi utilizado o WAM NOA (*Non-Optimized Allocation*) com alocação crescente de canais, condição esta que, inclusive, reforça os efeitos interferentes da FWM ao alocar canais adjacentes sequencialmente.

Na Figura 6-1 são apresentadas as curvas de LIB e LSB para a rede *Manhattan Street* estudada.

Figura 6-1: Limite Inferior de Bloqueio (LIB) e Limite Superior de Bloqueio (LSB) para a Rede Manhattan Street (8 canais 50 GHz).

Pode-se observar que os valores de LSB obtidos, conforme a Figura 6-1, representam a condição de baixo desempenho da rede face a não utilização de quaisquer mecanismos que

reduzam os efeitos da camada física, inclusive da FWM, durante a alocação dos canais. Nesta situação, o bloqueio observado na rede é elevado (45% para uma carga de tráfego de 50 Erlangs) no qual tem-se alta probabilidade de degradação tanto dos *lightpaths* a serem estabelecidos quanto dos já alocados em conexões já criadas. Já os valores de LIB, conforme curvas semelhantes levantadas por Fonseca em [FONSECA, 2004a], representam a condição em que, como as restrições da camada física não são consideradas no bloqueio dos *lightpaths*, a rede apresenta a menor probabilidade de bloqueio (10% para uma carga de 50 Erlangs).

Assim, como tanto o LIB quanto o LSB representam os limiares de mínimo e máximo bloqueio médio da rede, respectivamente, as extensões ao RSVP-TE propostas devem resultar em valores intermediários entre estes limites, que dependem dos WAMs utilizados. Outro fator importante a observar é que um método de alocação de comprimentos de onda é tão mais eficiente quanto mais os resultados obtidos para bloqueio da rede se aproximarem do limiar inferior LIB.

Para validação das extensões aqui propostas, foram utilizados os WAMs tradicionais LWS (*Largest Wavelength Spacing*) e EAW (*Edge Allocation Wavelength*) já estudados na Subseção 5.1.4. As curvas de bloqueio médio para a rede em topologia *Manhattan Street* de 8 canais por enlace e espaçamento de 50 GHz estão apresentadas na Figura 6-2.

Figura 6-2: Bloqueio médio para a Rede Manhattan Street (8 canais com espaçamento de 50 GHz) para os métodos EAW (*Edge Allocation Wavelength*) e LWS (*Largest Wavelength Spacing*).

Como pode ser observado, as curvas obtidas com o RSVP-TE estendido estão dentro dos limites definidos pelos limiares LIB e LSB, indicando que a solução proposta é válida, ou seja, o Plano de Controle do GMPLS, por meio de extensões ao protocolo RSVP-TE, é capaz de gerenciar as restrições da camada física geradas pelos efeitos FWM e assim reduzir a taxa média de bloqueio da rede.

Além disto, foi observado que os WAMs tradicionais EAW e LWS oferecem ganhos em relação ao método não otimizado (NOA), apesar de ainda apresentarem valores de bloqueio próximos ao limite superior LSB.

Comparando-se os resultados obtidos entre os métodos EAW e LWS, observa-se que o método por alocação pelas bordas (EAW) apresentou melhor resultado (aproximadamente 10% de redução na probabilidade de bloqueio para um tráfego total na rede de 50 Erlangs). Este resultado pode ser justificado devido à natureza do algoritmo de alocação do EAW, o qual inicialmente procura maximizar o espaçamento entre canais, além de gerar frequências interferentes FWM fora do espectro de operação do DWDM.

6.2.1 WAMs controlados por sequências de canais ótimos

Investigando a influência dos WAMs nos valores de bloqueio da rede, será avaliado o método de alocação que utiliza como critério de escolha a qualidade óptica do canal, chamado aqui de LIW (*Least Impaired Wavelength*), já apresentados na seção 5.1.4. São os WAMs controlados por sequências de canais ótimos.

Para confirmar a eficiência das sequências ordenadas pela qualidade óptica do canal, na Figura 6-3 são comparados os valores médios da BER para ativação sequencial de 1 a 8 canais utilizando os métodos NOA, EAW e LWS comparados com o LIW, utilizando um enlace de 30 km de fibra.

Figura 6-3: Valores médios da BER em função da ocupação do enlace, para NOA (*Non-Optimized Allocation*), EAW (*Edge Allocation Wavelength*), LWS (*Largest Wavelength Spacing*) e LIW (*Least Impaired Wavelength*).

Por meio do gráfico da Figura 6-3 é possível observar que no método LIW, ocorre a ocupação de praticamente quatro canais ainda mantendo o valor médio da BER abaixo do limiar aceitável de 10^{-9} , comportamento semelhante ao método EAW. Este resultado preliminar confirma o bom desempenho deste tipo de método, visto que ele prioriza a utilização de canais que possuem maior robustez em relação aos efeitos cumulativos da FWM.

A proposta de utilização de WAMs que operam por meio de canais ótimos apresenta-se como uma opção eficiente do ponto de vista de bloqueio e, neste trabalho, é obtida a um baixo custo computacional, uma vez que todos os dados são coletados de forma *off-line*. Na Figura 6-4, foram levantadas as curvas de bloqueio médio da rede em função da carga de tráfego para os métodos EAW, LWS e LIW, além dos limiares NOA (LSB) e Sem Restrições (LIB).

Figura 6-4: Bloqueio médio na rede para os métodos NOA (*Non-Optimized Allocation*), EAW, (*Edge Allocation Wavelength*), LWS(*Largest Wavelength Spacing*) e LIW (*Least Impaired Wavelength*). em função da carga de tráfego.

Com base na Figura 6-4 observa-se que, dos WAMs investigados até o momento, o método LIW que utiliza a sequência de canais ótimos devido à SNR foi o algoritmo que apresentou melhor desempenho. Este método obteve melhor desempenho, explorando, justamente, a robustez que cada canal apresenta individualmente, que basicamente depende do fator de eficiência FWM (η). Apesar de mais eficiente que os WAMs tradicionais, seus resultados ainda estão acima do LIB em aproximadamente 50% para uma carga de tráfego de 50 Erlangs.

Uma forma de melhor avaliar o comportamento da rede diante do ruído interferente da FWM é aumentar o número de canais para que os algoritmos utilizados pelos WAMs tenham uma maior quantidade de combinações na ocupação dos comprimentos de onda, além de permitir flexibilidade na implementação de algoritmos híbridos entre os WAMs tradicionais e os que empregam sequências de canais ótimos. Nos próximos itens é investigado o comportamento da rede com enlaces de 16 canais e são propostos novos WAMs especialistas no gerenciamento dos efeitos da FWM.

6.3 Comportamento do Bloqueio Médio da Rede *Manhattan Street* (16 canais por enlace): Influência do número de canais

Até aqui, foi avaliada a influência dos efeitos interferentes da FWM na eficiência em alocar comprimentos de onda que proporcionem QoS adequada em um ambiente GMPLS, mesmo com o aumento de carga na rede. A investigação deste problema pode ser ampliada caso existam disponíveis uma maior quantidade de canais disponíveis, tendência que atualmente predomina nos sistemas DWDM, operando com grandes quantidades de comprimentos de onda (128 ou mais) dentro da grade espectral estabelecida pelo ITU-T [ITU, 2002]. Além disto, havendo maior disponibilidade de canais, as alternativas de alocação aumentam, diversificando os algoritmos utilizados e tornando significativos os eventuais ganhos na utilização de WAMs especialistas.

Seguindo esta tendência, para a rede *Manhattan Street* em estudo, foram incorporados enlaces com 16 canais DWDM centrados na 3ª janela óptica, sendo necessária a devida adequação dos transmissores, receptores e OXCs. Foram mantidas as demais características sistêmicas adotadas nas simulações anteriores, tais como a potência transmitida e o espaçamento entre canais.

6.3.1 WAMs tradicionais

A exemplo do que foi feito no item anterior, foram inicialmente estabelecidos os valores referenciais relativos aos limiares inferior e superior de bloqueio, ou seja, LIB e LSB respectivamente. Foram mantidas as mesmas condições de simulação do item anterior para a rede *Manhattan Street* 9 nós, porém agora com enlaces de 16 canais, na qual era esperada uma expansão na área compreendida entre LIB e LSB.

A Figura 6-5 apresenta as curvas obtidas para comparação entre os valores dos limiares de bloqueio da rede para 8 e 16 canais.

Figura 6-5: Comparativo dos valores de LIB (Limite Inferior de Bloqueio) e LSB (Limite Superior de Bloqueio) para a Rede *Manhattan Street* com 8 e 16 canais espaçados de 50 GHz.

Como esperado, a região compreendida entre o LSB e LIB para 16 canais foi ampliada e se deslocou para baixo, confirmando um aumento na capacidade de escoamento de tráfego da rede.

Para uma avaliação do ganho efetivo em desempenho que o aumento de canais proporciona na rede, foram levantadas as curvas de bloqueio para enlaces com 8 e 16 canais empregando-se o método LWS, conforme mostrado na Figura 6-6.

Figura 6-6: Bloqueio médio para o método LWS (*Largest Wavelength Spacing*) em função da carga de tráfego para a Rede *Manhattan Street* com 8 e 16 canais espaçados de 50 GHz.

Avaliando os resultados obtidos, percebe-se que a redução do bloqueio em função do aumento de canais é pequena, ou seja, no caso do método LWS uma expansão de 100% no número de canais resultou em uma redução de apenas 7% no bloqueio da rede, para 50 Erlangs de tráfego oferecido. Este fato pode ser justificado face ao aumento dos sinais interferentes com a inclusão de novos canais DWDM.

Em função da expansão do número de canais no enlace, possibilitando que os algoritmos de escolha operem com uma quantidade maior de combinações de sequências, outros métodos de alocação tradicionais podem ser explorados. Entre eles, um em particular comumente citado na literatura, utiliza o espaçamento desigual entre os canais ativos para reduzir a eficiência da FWM, chamado de USA (*Unequal Spacing Allocation*). Neste método, cada canal a ser ativado é alocado em uma posição que resulte, sempre que possível, em uma distribuição heterogênea no espectro, cuja sequência de alocação utilizada está apresentada na Tabela 6-1.

Tabela 6-1: Método USA (*Unequal Spacing Allocation*).

Canais Ativos	Canais a ativar
1	3
1 3	6
1 3 6	10
1 3 6 10	15
1 3 6 10 15	12
1 3 6 10 15 12	4
1 3 6 10 15 12 4	7
1 3 6 10 15 12 4 7	16
1 3 6 10 15 12 4 7 16	13
1 3 6 10 15 12 4 7 16 13	9
1 3 6 10 15 12 4 7 16 13 9	2
1 3 6 10 15 12 4 7 16 13 9 2	14
1 3 6 10 15 12 4 7 16 13 9 2 14	5
1 3 6 10 15 12 4 7 16 13 9 2 14 5	11
1 3 6 10 15 12 4 7 16 13 9 2 14 5 11	8

Para verificação do comportamento da rede em função do uso de WAMs tradicionais que procuram minimizar os sinais interferentes da FWM, na Figura 6-7 estão apresentados os resultados de bloqueio para os métodos LWS e USA, comparados com as curvas de limiares LIB e LSB para 16 canais e 50 GHz de espaçamento.

Figura 6-7: Bloqueio médio para a Rede Manhattan Street (16 canais com espaçamento de 50 GHz) para os métodos LWS (*Largest Wavelength Spacing*) e USA (*Unequal Spacing Allocation*).

Pode-se observar pelo gráfico que o espaçamento desigual entre canais utilizado pelo USA é um critério que apresenta resultados progressivamente melhores que a maximização da distância empregada pelo LWS, principalmente a partir de 90 Erlangs. A crescente ocupação do enlace e o fato dos sinais serem DWDM, ou seja, o espaçamento reduzido entre os canais, contribui para o melhor desempenho do método USA.

6.3.2 WAMs controlados por sequências de canais ótimos

O aumento do número de canais facilita a investigação de WAMs especialistas que possam minimizar os efeitos da FWM a partir de sequências de canais ótimos. Conforme apresentada na Subseção 5.1.4, uma evolução ao método LIW seria estabelecer a sequência a ser seguida com base na potência média da FWM (P_{FWM}) para cada canal, considerando cada comprimento de rota (de 1 a 4 enlaces), método aqui chamada de LIWA (*Least Impaired Wavelength Average*).

Como mostrado na Subseção 5.1.4, uma vez obtido o valor do fator Q e da potência recebida, é possível determinar o valor da potência total da FWM em cada canal. Como a P_{FWM}

depende da extensão de cada rota, a sequência de canais ótimos que o método LIWA utiliza é estabelecida a partir da média entre os valores obtidos para cada comprimento de rota. Na Figura 6-8 estão mostrados os níveis de P_{FWM} para cada canal, supondo rotas de 1 a 4 saltos.

Figura 6-8: Potência de FWM (P_{fwm}) por canal para rotas de 1 a 4 saltos.

A partir do gráfico da Figura, a sequência de canais ótimos utilizada no método LIWA é:

1 - 15 - 16 - 2 - 3 - 14 - 13 - 4 - 12 - 5 - 6 - 7 - 11 - 10 - 8 - 9.

Na Figura 6-9 estão apresentados os resultados comparativos entre os dois métodos que utilizam sequência de canais ótimos em função dos sinais interferentes, o LIW e o LIWA, para enlaces com 16 canais.

Figura 6-9: Bloqueio médio para a Rede *Manhattan Street* (16 canais com espaçamento de 50 GHz) para os métodos LIW (*Least Impaired Wavelength*) e LIWA (*Least Impaired Wavelength Average*).

Os resultados apresentados mostram que o método LIWA, apesar de priorizar os efeitos da FWM na escolha do canal contemplando todos os comprimentos de rotas no cálculo da P_{FWM} média, apresentou pior desempenho que o LIW, com um bloqueio 6% superior. Um dos fatores que explica este comportamento é que a topologia estudada utiliza rotas com, no máximo, dois enlaces, fato que favorece o método LIW, cujo parâmetro SNR é calculado para a condição de apenas um enlace.

6.3.3 Propostas de WAMs híbridos

Como visto anteriormente, cada WAM procura minimizar os efeitos de um ou mais parâmetros da camada física que contribuem para o aumento da eficiência FWM, originando dois tipos clássicos de métodos de alocação, os tradicionais e os ativados por sequências de canais ótimos. Uma forma de beneficiar-se dos pontos positivos tanto dos WAMs tradicionais quanto dos WAMs controlados por sequências é a implementação de métodos de alocação híbridos, uma das contribuições deste trabalho.

Neste trabalho é classificado como um WAM híbrido um método que utiliza uma combinação de algoritmos considerados ótimos para uma dada fase da alocação ou extensão da rota. Ou seja, dependendo da taxa de ocupação dos canais no enlace é empregado um critério de alocação mais conveniente, resultando em um algoritmo mais flexível e adaptado às condições da rede (topologia, características dos dispositivos, extensão das rotas e número de canais por enlace).

Com os métodos híbridos uma maior escalabilidade pode ser suportada, quando comparados com os métodos LIW. Nos métodos LIW propostos anteriormente, o critério de alocação elege o canal menos impactado em relação à P_{FWM} em um enlace (LIW) ou toma a média dos valores da P_{FWM} entre as possíveis extensões de rota (LIWA). Uma forma de oferecer maior escalabilidade é efetuar a alocação a partir do canal ótimo escalonada em cada extensão de rota, método chamado de LIWSA (*Least Impaired Wavelength Staggered Allocation*). Assim, com base na Figura 6-8, foram definidas sequências de canais ótimos em função de cada extensão de rota, conforme apresentado na Tabela 6-2.

Tabela 6-2: Alocação escalonada (LIWSA).

Extensão da Rota	Sequência de canais ótimos
1 Enlace	15 1 16 14 3 2 13 4 12 5 7 6 10 8 9 11
2 Enlaces	1 16 15 2 3 14 13 4 12 5 11 6 7 10 8 9
3 Enlaces	1 16 15 2 3 14 13 4 12 5 11 6 10 7 8 9
4 Enlaces	1 16 15 2 3 14 13 4 5 12 11 6 10 7 8 9

A alocação escalonada (LIWSA), por estar adaptada às características de cada rota, deve proporcionar reduções no bloqueio médio da rede mas, a partir do momento que pelo menos um dos canais (já alocado ou candidato à alocação) atingir o limiar de QoS óptico aqui considerado ($SNR_{TH} \cong 15,6$ dB), qualquer nova conexão deve ser rejeitada, mesmo ainda havendo canais livres. Para evitar tal problema, nesta fase é ativado um segundo algoritmo que identifica possíveis alocações sem comprometer as conexões em andamento. Este segundo algoritmo elege, a partir da existência de pelo menos 1 canal com SNR próximo ao limiar, os canais que estão na região espectral mais livre, ou seja, afastados dos canais já ativados. Este critério de alocação é mantido até que não existam mais canais nestas situações, momento em que o processo retorna ao critério de alocação original. Este método híbrido,

denominado aqui de LIWSOA (*Least Impaired Wavelength Staggered Optimized Allocation*), inicia a alocação escalonada utilizando a sequência de canais ótimos até que pelo menos um atinja o limiar ($\text{SNR}_{\text{TH}} \cong 15,6 \text{ dB}$) e, em seguida, otimiza a busca por canais viáveis remanescentes no espectro ainda livre.

A Tabela 6-3 retrata toda a sequência de alocação para os 16 canais do enlace, para rotas com 1 a 4 enlaces. Para facilitar a visualização da ocupação dos canais, na coluna “Canais Alocados” temos a representação dos 16 canais, onde “1” representa canal livre e “0” canal alocado.

Tabela 6-3: Alocação escalonada otimizada (LIWSOA) para 1, 2, 3 e 4 enlaces.

	1 Enlace		2 Enlaces	
Canais	Critério	Canais Alocados	Critério	Canais Alocados
1	P_{FWM}	1111111111111101	P_{FWM}	0111111111111111
2	P_{FWM}	0111111111111101	P_{FWM}	0111111111111110
3	P_{FWM}	0111111111111100	P_{FWM}	011111111111110 0
4	P_{FWM}	0111111111111000	P_{FWM}	0011111111111100
5	P_{FWM}	0101111111111000	P_{FWM}	0001111111111100
6	P_{FWM}	0001111111111000	c 12	0001111111101100
7	c 10	0001111110111000	c 6	0001101111101100
8	c 7	0001110110111000	c 10	0001101110101100
9	c 5	0001010110111000	ch4	0000101110101100
10	c 12	0001010110101000	P_{FWM}	0000101110101000
11	P_{FWM}	0001010110100000	P_{FWM}	0000101110100000
12	P_{FWM}	0000010110100000	P_{FWM}	0000001110100000
13	P_{FWM}	0000000110100000	P_{FWM}	0000001110000000
14	P_{FWM}	0000000010100000	P_{FWM}	0000000110000000
15	P_{FWM}	0000000000100000	P_{FWM}	0000000010000000
16	P_{FWM}	0000000000000000	P_{FWM}	0000000000000000

	3 Enlaces		4 Enlaces	
Canais	Cr��rio	Canais Alocados	Cr��rio	Canais Alocados
1	P_{FWM}	0111111111111111	P_{FWM}	0111111111111111
2	P_{FWM}	0111111111111110	P_{FWM}	0111111111111110
3	P_{FWM}	0111111111111100	P_{FWM}	0111111111111100
4	P_{FWM}	0011111111111100	P_{FWM}	0011111111111100
5	P_{FWM}	0001111111111100	P_{FWM}	0001111111111100
6	c 12	0001111111101100	c 12	0001111111101100
7	c 6	0001101111101100	c 6	0001101111101100
8	c 10	0001101110101100	c 10	0001101110101100
9	c 4	0000101110101100	P_{FWM}	0001101110101000
10	P_{FWM}	0000101110101000	P_{FWM}	0001101110100000
11	P_{FWM}	0000101110100000	P_{FWM}	0000101110100000
12	P_{FWM}	0000001110100000	P_{FWM}	0000001110100000
13	P_{FWM}	0000001110000000	P_{FWM}	0000011100000000
14	P_{FWM}	0000000110000000	P_{FWM}	0000000110000000
15	P_{FWM}	0000000010000000	P_{FWM}	0000000010000000
16	P_{FWM}	0000000000000000	P_{FWM}	0000000000000000

Para melhor compreenso do algoritmo, tomemos como exemplo na Tabela 6-3 a rota com um enlace. O critrio de escolha de canal o de maior P_{FWM} at que, aps alocao de 6 canais, atinge-se o limiar de SNR. A partir da, a escolha passa a ser na regio espectral mais livre com maximizao de espaamento, sendo escolhidos os canais 10, 7, 5 e 12. A partir deste ponto, como no h mais canais nestas condies, retorna-se ao critrio de P_{FWM} at a ocupao completa do enlace.

Para comprovar a melhoria oferecida pelos mtodos hbridos, na Figura 6-10 constam os valores de bloqueio para os mtodos LIW e LIWA comparados com o LIWSOA.

Figura 6-10: Bloqueio médio para a Rede *Manhattan Street* (16 canais com espaçamento de 50 GHz) para os métodos LIW(*Least Impaired Wavelength*), LIWA (*Least Impaired Wavelength Average*) e LIWSOA (*Least Impaired Wavelength Staggered Optimized Allocation*).

Pode-se observar que o método LIWSOA proporciona uma redução no bloqueio médio de aproximadamente 4% em relação ao LIW para uma carga de 50 Erlangs, representando o melhor resultado quando comparado aos demais métodos investigados neste trabalho. Uma justificativa para a redução no bloqueio na utilização do método híbrido LIWSOA é que ele ameniza o aspecto estático dos algoritmos tradicionais aqui utilizados, readequando o critério de alocação quando a sequência de canais ótimos deixa de ser eficiente.

6.3.4 Influência do espaçamento entre canais na eficiência dos métodos de alocação

Outro aspecto importante a ser investigado é a influência do espaçamento entre canais no cálculo do bloqueio da rede para cada tipo de método de alocação. Por apresentarem os melhores resultados nas suas modalidades, os métodos USA e LIWSOA foram escolhidos para avaliação, representando os WAMs tradicionais e híbridos, respectivamente. O gráfico

da Figura 6-11 representa o bloqueio médio da rede para cada um dos métodos considerando espaçamento entre canais de 50 e 100 GHz.

Figura 6-11: Comportamento do Bloqueio médio para a Rede *Manhattan Street* (16 canais com espaçamento de 50 e 100 GHz) para os métodos USA (*Unequal Spacing Allocation*) e LIWSOA (*Least Impaired Wavelength Staggered Optimized Allocation*).

Como pode ser visualizado na Figura 6-11, o método LIWSOA apresenta melhor desempenho também para espaçamento de 100 GHz, comprovando a eficiência deste tipo de WAM. Cabe aqui ressaltar o método USA mostrou-se mais sensível ao aumento do espaçamento, apresentando uma redução no bloqueio de aproximadamente 15% para 50 Erlangs de carga contra apenas 8% obtido pelo LIWSOA nas mesmas condições. Estes resultados reforçam a tese de que os WAMs que operam com base em sequências de canais ótimos têm uma visão mais realista da situação da camada óptica, conduzindo a rede a níveis de bloqueio menores quando comparados com os WAMs tradicionais.

6.4 Considerações Finais

Foram apresentados os resultados obtidos a partir de simulação utilizando a plataforma de teste caracterizada no Capítulo 5. Tal plataforma é composta por dois ambientes de simulação que, integrados, emulam a camada óptica e o Plano de Controle do GMPLS. A camada óptica é representada por uma rede DWDM configurada na topologia *Manhattan Street* e implementada no ambiente VPI. Como Plano de Controle do GMPLS, foi desenvolvido o GMPLS/DWDM Toolbox utilizando-se o aplicativo matemático MATLAB.

Inicialmente, foi investigado o comportamento da rede com relação ao bloqueio médio para enlaces de 8 canais, onde foram validadas as extensões e métodos definidos no Capítulo 4.

Foi avaliada a influência dos métodos de alocação de comprimentos de onda empregados envolvendo os WAMs tradicionais (EAW e LWS) e os WAMs que utilizam sequências de canais ótimos (LIW e LIWA).

Para ampliar as possibilidades de análise do comportamento da rede, foram feitas simulações com enlaces de 16 canais tanto para os WAMs tradicionais (USA e LWS) quanto para os controlados por sequência de canais ótimos (LIW e LIWA).

Além disto, como contribuição deste trabalho, foi definida uma nova modalidade de WAMs, os aqui chamados de híbridos (LIWSOA), que empregam dois ou mais critérios para escolha dos canais candidatos.

A influência do espaçamento entre canais foi investigada, dentro das recomendações do ITU-T, para as grades de 50 e 100GHz. Os valores de bloqueio foram obtidos utilizando-se WAM tradicional (USA) e WAM híbrido (LIWSOA), comprovando a eficiência superior destes últimos.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente Tese apresentou um estudo sobre a influência dos efeitos gerados pela camada física no desempenho das redes totalmente ópticas e os mecanismos de gerenciamento destes efeitos.

Em trabalhos recentes aqui referenciados, apesar de previstos parâmetros para tratamento dos efeitos da camada óptica no estabelecimento dos *lightpaths*, ainda não está definida toda a gama destes efeitos nem foram estabelecidos os mecanismos para que o Plano de Controle minimize os seus impactos no desempenho da rede.

Neste trabalho é apresentada uma proposta de minimização dos impactos da FWM (*Four-Wave Mixing*) em uma rede óptica DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) gerenciada pelo Plano de Controle do GMPLS (*Generalized MultiProtocol Label Switching*).

7.1 Análise Crítica dos Resultados Obtidos

Conforme apresentado no Capítulo 1, o objetivo desta Tese é, dentro do ambiente GMPLS/DWDM, apresentar e avaliar extensões ao protocolo de sinalização RSVP-TE (*Resource Reservation Protocol-Traffic Engineering*) que, associadas aos métodos de alocação de comprimentos de onda (WAM) especialistas, gerenciem os efeitos da camada física relativos à FWM, auxiliando na escolha de *lightpaths* com QoS óptico adequado.

O foco principal da investigação aqui realizada refere-se ao efeito dos sinais interferentes gerados pela FWM no desempenho das redes ópticas. Assim, diante do contexto das redes totalmente ópticas submetidas às condições de alto tráfego, alta densidade de canais, elevado nível de potência óptica e baixa dispersão, os efeitos interferentes não lineares da FWM tornam-se importantes e, por isso, foram prioritariamente investigados.

Para resolver tal problema, propôs-se como solução a minimização dos impactos da FWM por meio da integração entre o Plano de Controle estruturado pelo GMPLS e a camada óptica DWDM. Tal proposta envolve extensões ao protocolo RSVP-TE que possibilitam avaliar os efeitos das restrições FWM presentes quando da ocupação dos comprimentos de onda utilizando-se um dado WAM (*Wavelength Allocation Method*).

Os dados relativos aos efeitos da FWM, traduzidos em SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) por canal, refletem o nível de QoS óptico associado ao canal a ser alocado. Tais dados são

gerados e disponibilizados ao protocolo RSVP-TE por intermédio de uma base de dados, a FID (*FWM Impairments Database*). Já as extensões ao RSVP-TE, ao consultar os dados da FID, avaliam o QoS óptico do canal a ser alocado verificando a respectiva SNR e validam ou não o *lightpath*.

A solução proposta foi avaliada por meio de uma série de testes executados em uma plataforma que integra dois ambientes de simulação que representam a camada óptica DWDM e o Plano de Controle do GMPLS. Tal plataforma, que foi estruturada tanto para validar a solução proposta quanto para obter os demais resultados, envolveu a integração de dois ambientes de simulação, um deles emulou as funcionalidades básicas do Plano de Controle do GMPLS e o outro representou a camada física óptica e seus elementos essenciais. Além disto, foi também investigada a influência dos WAMs tradicionais e por sequência ótima de canais no desempenho da rede. Foram também propostos WAMs especialistas e híbridos, onde a contribuição destes métodos na redução do bloqueio da rede foi avaliada. Diante do exposto, pela primeira vez na literatura, um estudo direcionado ao ambiente GMPLS/DWDM, com propostas de extensões ao RSVP-TE associadas a novos WAMs especialistas no gerenciamento dos efeitos da FWM, foi apresentado.

Os testes realizados consideram a topologia *Manhattan Street* com 9 nós e 18 enlaces DWDM, sendo, inicialmente, utilizados enlaces de 8 canais com espaçamento de 50 GHz. A partir dos resultados obtidos das simulações, pode-se verificar que:

- Para possibilitar a validação da solução proposta e avaliação dos WAMs estudados, foi determinado o Limite Inferior de Bloqueio (LIB) para a topologia estudada supondo-se que não ocorre nenhuma interferência entre os canais alocados. O WAM utilizado foi chamado de Sem Restrições e resultou num bloqueio aproximado de 13% para um tráfego de 50 Erlangs. Prevvia-se que todos os demais métodos resultassem em valores maiores que este, fato que se confirmou durante as simulações.
- Para o WAM não otimizado NOA (*Non-Optimized Allocation*), classificado como Limite Superior de Bloqueio (LSB) dentro das condições ópticas previstas para a rede, os efeitos da FWM degradam diretamente o QoS óptico. Para o método NOA, no qual a alocação dos canais é crescente, a rede apresentou um valor de bloqueio médio elevado, da ordem de 45% para um tráfego de 50 Erlangs. Diante deste resultado, o gerenciamento dos efeitos da camada física associado à utilização de WAMs sensíveis a estes efeitos é necessário.
- Para validação das soluções aqui propostas, foram utilizados WAMs tradicionais. Os resultados obtidos estão entre os limites superior (LSB) e inferior (LIB) de bloqueio

médio da rede, validando assim a solução e o método aqui propostos para minimização dos efeitos da FWM. Os WAMs tradicionais contribuem para a redução no bloqueio, pois exploram um ou mais parâmetros que potencializam o fator de eficiência da FWM. Dos métodos investigados, O EAW (*Edge Allocation Wavelength*) apresentou melhor resultado que o LWS (*Largest Wavelength Spacing*) (31% contra 40% para 50 Erlangs, respectivamente) pois apenas 8 canais não proporcionam possibilidades de amplo espaçamento quando do aumento da ocupação do enlace.

- A investigação dos métodos que empregam sequências de canais ótimos LIW (*Least Impaired Wavelength*) gerou resultados que confirmam sua eficiência, com taxa de bloqueio da ordem de 27% para 50 Erlangs. Sua visibilidade para com as diferentes sensibilidades dos canais diante dos efeitos da FWM é a sua característica mais favorável, sendo o WAM que mais se aproximou do bloqueio sem restrições (LIB).

Para uma investigação mais apurada dos WAMs utilizados, o número de canais foi aumentado para 16, mantendo-se o espaçamento em 50 GHz, e, dos resultados das simulações pode-se verificar que:

- Foram levantados os novos limites inferior (LIB) e superior (LSB), resultando em 0,12 e 42% respectivamente para 50 Erlangs. Comprovou-se um aumento na capacidade de escoamento de tráfego da rede, principalmente com a redução expressiva do LIB (de 13% para 0,12%). Já o LSB se manteve próximo, pois o método de alocação crescente adotado no NOA prejudica substancialmente a rede onde a presença da FWM é acentuada, pois ocupa canais sequencialmente vizinhos.
- Entre os WAMs tradicionais, foi incluso o USA (*Unequal Spacing Allocation*), o qual apresentou o melhor resultado (18% para 50 Erlangs) devido ao aumento das possibilidades de combinações de canais com espaçamentos distintos.
- Com relação aos métodos que empregam sequências de canais ótimos (LIW) e sua variação (LIWA), os resultados confirmam uma melhoria em relação aos WAMs tradicionais. Os valores de bloqueio resultaram em 20% e 14% com um tráfego de 50 Erlangs, para os métodos LIWA e LIW respectivamente. A utilização de parâmetros ligados diretamente ao efeito degenerativo (no caso a P_{FWM}) torna o método mais sensível às particularidades da camada física. Como mencionado anteriormente, os resultados obtidos mostram que o método LIWA, apesar de contemplar a P_{FWM} média por enlace (de 1 a 4), apresentou desempenho menor que LIW. Pode-se justificar tal

comportamento devido à particularidade da topologia estudada, que utiliza rotas com, no máximo, dois enlaces. Isto favorece o método LIW, cujo parâmetro SNR é calculado para a condição de apenas um enlace.

- Com relação aos WAMs híbridos, foi proposto o LIWSOA (*Least Impaired Wavelength Staggered Optimized Allocation*), método que apresentou os melhores resultados dentro das investigações feitas neste trabalho, com uma taxa de bloqueio da ordem de 10% para um tráfego de 50 Erlangs. Uma justificativa para seu melhor desempenho é a sua escalabilidade, pois após implementar alocação escalonada utilizando a LIWSA (*Least Impaired Wavelength Staggered Allocation*) até que pelo menos um canal atinja o SNR_{TH} , é então ativado um segundo algoritmo que aloca os próximos canais na região espectral mais livre. De acordo com os resultados obtidos neste trabalho, esta opção mostrou-se mais eficiente para a redução do bloqueio causado pelos sinais interferentes da FWM.

Ampliando-se o espaçamento entre canais para 100 GHz, dos resultados obtidos conclui-se que:

- Ao ser investigada a influência do espaçamento entre canais no cálculo do bloqueio da rede para cada tipo de WAM, os métodos USA (tradicional) e LIWSOA (híbrido) foram avaliados, por apresentarem os melhores resultados dentro de suas respectivas classes. Os resultados obtidos mostram que o método LIWSOA apresenta melhor desempenho também para espaçamentos maiores, o que comprova o bom desempenho dos WAM híbridos propostos neste trabalho. A visibilidade que esta classe de métodos possui com respeito à camada física os colocam em condições de, em conjunto com o RSVP-TE devidamente estendido, agregar ao plano de controle do GMPLS a capacidade de gerenciamento do QoS óptico de uma rede DWDM.

7.2 Contribuições desta Tese

As principais contribuições desta Tese estão apresentadas nos itens a seguir:

- Proposta de um método para gerenciamento das restrições da camada física que trata, prioritariamente, os efeitos da FWM, utilizando-se o Plano de Controle do GMPLS em uma rede totalmente óptica DWDM.

- Foram apresentadas extensões ao protocolo RSVP-TE que permitiram tratar as informações sobre as penalidades impostas pela camada óptica sob o efeito da FWM utilizando uma base de dados referente ao QoS óptico associado a cada canal em função da ocupação do enlace.
- Com foco no gerenciamento dos efeitos da FWM, foi proposta uma nova classe de WAMs, chamados aqui de híbridos, que apresenta melhor desempenho que os métodos tradicionais e especialistas.
- Foi apresentada uma solução flexível, a qual permite a implementação e validação de novas funcionalidades para futuras extensões propostas ao GMPLS, inclusive com aplicabilidade em situações reais.

7.3 Trabalhos Futuros

Dando prosseguimento a este trabalho, como prováveis temas de futuras investigações, pode-se citar:

- Investigação das restrições físicas impostas pela FWM em um ambiente de simulação dinâmico, onde o plano de controle do GMPLS possa operar de forma *on-line*, inclusive utilizando topologias reais.
- Novas condições e efeitos não lineares que, isoladamente ou em conjunto, penalizem a rede, inclusive em situações que exijam QoS óptico diferenciado ($BER = 10^{-11}$).
- Procurando obter soluções otimizadas, associar aos mecanismos aqui apresentados algoritmos de roteamento igualmente sensíveis às restrições da camada física.
- Suporte à conversão de comprimentos de onda nos OXCs (parcial ou total), procurando tanto evitar o bloqueio por descontinuidade quanto minimizar os efeitos não lineares da fibra.
- Suporte mais efetivo ao Plano de Gerenciamento, por meio da disponibilização de uma ferramenta com dados estatísticos sobre a utilização dos recursos da rede após a implementação do RSVP-TE estendido.
- Repetição dos estudos aqui apresentados prevendo a amplificação óptica nos enlaces.
- Implementação de fluxos de tráfegos compatíveis com as interfaces PSC (*Packet Switch Capable*) e TSC (*TDM Switch Capable*), avaliando as interferências da camada física em uma situação real a ser oferecida ao GMPLS.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[AGRAWAL, 2001] AGRAWAL, G. P. **Applications of nonlinear fiber optics**. 5th ed. San Diego: Academic Press, 2001.

[AGRAWAL, 2002] _____. **Fiber-Optic Communication Systems**. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 2002.

[ALI, 2002] ALI, M.; LEBOUCHER, V.; PENNINGKX, D. Intelligent lightpath selection schemes. In: EUROPEAN CONFERENCE OF OPTICAL COMMUNICATION - ECOC, 28., 2002. Copenhagen. v. 2, p. 1-2.

[AMAZONAS, 2005] AMAZONAS, J. R. A. **Projeto de sistemas de comunicações ópticas**. São Paulo: Manole, 2005.

[ANAGNOSTOPOULOS, 2007] ANAGNOSTOPOULOS, V. et al. Physical layer impairment aware wavelength routing algorithms based on analytically calculated constraints. **Elsevier: Optics Communications**, Amsterdam, v. 270, n. 2, p. 247-254, 2007.

[ANTONIADES, 2002] ANTONIADES, N. et al. Performance engineering and topological design of metro WDM optical networks using computer simulation. **IEEE Journal on Selected Areas Communications**, New York, v. 20, n. 1, p. 149-165, 2002.

[ASHWOOD, 2003] ASHWOOD-SMITH, P.; BERGER, L. Generalized multi-protocol label switching (GMPLS) signaling constraint-based routed label distribution protocol (CR-LDP) signaling extensions. **IETF RFC 3472** (Standards Track), Jan. 2003.

[AWDUCHE, 1999] AWDUCHE, D. et al. Requirements for traffic engineering over MPLS. **IETF RFC 2702** (Informational), Sept. 1999.

[AWDUCHE, 2001] AWDUCHE, D. et al. RSVP-TE: extensions to RSVP for LSP tunnels. **IETF RFC 3209** (Standards Track), Dec. 2001.

[BAGULA, 2007] BAGULA, A. B. On achieving bandwidth-aware LSP/ λ SP multiplexing/separation in multi-layer networks. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, New York, v. 25, n. 5, p. 987-1000, June 2007.

[BANERJEE, 2001] BANERJEE, A. et al. Generalized multiprotocol label switching: an overview of signaling enhancements and recovery techniques. **IEEE Communications Magazine**, New York, v. 39, issue 7, p. 144-151, 2001.

[BENJAMIN, 2001] BENJAMIN D.; TRUDEL R.; SHEW S.; KUS E. Optical services over the intelligent optical network. **IEEE Communications Magazine**, New York, p. 73-78, 2001.

[BERGER, 2003] BERGER, L. Generalized multi-protocol label switching (GMPLS) signaling functional description. **IETF RFC 3471** (Standards Track), Jan. 2003.

[BERGER, 2003a] _____. Generalized multi-protocol label switching (GMPLS) signaling resource reservation protocol-traffic engineering (RSVP-TE) extensions. **IETF RFC 3473** (Standards Track), Jan. 2003.

[BERNSTEIN, 2001] BERNSTEIN, G.; MANNIE, E.; SHARMA, V. Framework for MPLS-based control of optical SDH/SONET networks. **IEEE Network**, New York, v. 15, n. 4, p. 20-26, 2001.

[BERNSTEIN, 2009] BERNSTEIN, G. et al. Modeling WDM wavelength switching. systems for use in GMPLS and automated path computation. **OSA/IEEE Optical Communications and Networking Journal**, Washington DC, v. 1, n. 1, p. 187-195. June 2009.

[BERNSTEIN, 2010] BERNSTEIN, G. et al. Routing and wavelength assignment information encoding for wavelength switched optical networks. IETF Internet Draft (Standard), Dec. 2010, Expiration: June 2011. Disponível em: <<http://www.ietf.org/id/draft-ietf-ccamp-rwa-wson-encode-07.txt>>. Acesso em: 10 Dec. 2010.

[BIRMAN, 1996] BIRMAN, A. Computing approximate blocking probabilities for a class of all-optical network. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, New York, v. 14, Jun. 1996.

[BOYLE, 2002] BOYLE, J. et al. Applicability statement for traffic engineering with MPLS. **IETF RFC 3346** (Informational), Aug. 2002.

[BRADEN, 1997] BRADEN, R. et al. Reservation protocol (RSVP). **IETF RFC 2205** (Standards Track), Sept. 1997.

[BRYSKIN, 2006] BRYSKIN, I.; FARREL, A. A lexicography for the interpretation of generalized multiprotocol label switching (GMPLS) terminology within the context of the ITU-T's automatically switched optical network (ASON) architecture. **IETF RFC 4397** (Informational), Feb. 2006.

[CASTOLDI, 2007] CASTOLDI, P. et al. Centralized vs. distributed approaches for encompassing physical impairments in transparent optical networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OPTICAL NETWORKING DESIGN AND MODELING – ONDM, 11, 2007, Athens, p. 68-77.

[CHANG, 2000] CHANG, K.; YAUNG, G. Determination of FWM products in unequal-spaced-channel WDM lightwave systems. **IEEE Journal of Ligthwave Technology**, New York, v.18, n. 12, p. 2113-2122, 2000.

[CHAVA, 2010] CHAVA, V. et al. Toward deployment of signalling-based approach for linear and non-linear impairment-aware lightpath setup in transparent optical networks. **IEEE Communications Letters**, New York, v. 14, n. 3, p. 254-256, March 2010.

[CHAVES, 2008] CHAVES, D. A. R.; MARTINS-FILHO, J. F. ; BASTOS-FILHO, C. J. A. Ferramenta computacional para simulação de redes ópticas transparentes. In: MOMAG 2008, Florianópolis. Anais do MOMAG, São Paulo: SBMO, 2008, v. 1, p. 908-913.

[CHRAPLYVY, 1990] CHRAPLYVY, A. R. Limitations on lighthwave communications imposed by optical-fiber nonlinearities. **IEEE Journal of LighthwaveTechnology**, New York, v. 8, n. 10, p. 1548-1557, 1990.

[CHO, 2001] CHO, G. Y.; CHUNG, J. Analysis of MPLS vs. MPLambdaS Next Generation Networking Technologies. In: SIGNALS, SYSTEMS AND COMPUTERS CONFERENCE, Pacific Grove, 2001, v. 1 p. 518-522.

[CHRISTIANSEN, 2003] CHRISTIANSEN, H.; WESSING, H. Modeling GMPLS and optical MPLS networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE TELECOMMUNICATIONS- ICT, 10., Anchorage, 2003, v. 1, n. 23, p. 288-294.

[CHUNG, 2002] CHUNG, J. et al. Analysis of GMPLS architectures, topologies and algorithms. In: CIRCUITS AND SYSTEMS - MIDWEST SYMPOSIUM, 45., Tulsa, 2002, v. 3, p. 284-287.

[CISCO, 2010] Cisco Systems, Inc. Cisco Visual Networking Index – Forecast and Methodology, 2009–2014. June 2010. Disponível em: http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white_paper_c11-481360.pdf. Acesso em 13 Dec. 2010.

[COLTUN, 1998] COLTUN, R. The OSPF Opaque LSA Option. **IETF RFC 2370** (Standards Track), July 1998.

[COMELLAS, 2003] COMELLAS, J. et al. Integrated IP/WDM routing in GMPLS-based optical networks. **IEEE Network**, New York, v. 17, n. 2, p. 22-27, 2003.

[CUGINI, 2004] CUGINI, F. et al. A novel signaling approach to encompass physical impairments in GMPLS networks. In: GLOBAL TELECOMMUNICATIONS CONFERENCE WORKSHOPS. GLOBECOM WORKSHOPS, 2004, Dallas, 2004, p. 369-373.

[CUGINI, 2007] _____. Implementing a path computation element (PCE) to encompass physical impairments in transparent networks. In: OPTICAL FIBER CONFERENCE - OFC, 2007, Anaheim, session OWK6, p. 1-3.

[CUGINI, 2007a] _____. GMPLS extensions to encompass shared regenerators in transparent optical networks. In: EUROPEAN CONFERENCE AND EXHIBITION ON OPTICAL COMMUNICATION – ECOC, 33., 2007, Berlin.

[CUGINI, 2008] _____. Enhancing GMPLS signaling protocol for encompassing quality of transmission (QoT) in all-optical networks. **IEEE Journal of Lightwave Technology**, Washington DC, v. 26, n. 19, p. 3318-32328, 2008.

[CUNHA, 2004] CUNHA, D.; BRESSAN, G. Análise lógica do protocolo LMP em um ambiente GMPLS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES – SBT, 2004, Belém.

[DIAS, 2008] DIAS, K. L. et al. Dimensionamento de Túneis LSPs através da ferramenta GLASS: uma proposta de implementação de um novo módulo de re-roteamento dinâmico. In:

SOCIEDADE BRASILEIRA DE COMPUTAÇÃO, 28., 2008, Anais do XXVIII Congresso da SBC, Pará, 2008, p. 95-110.

[DOURADO, 2000] DOURADO, R. S. Jr. et al. Um estudo sobre MPOA (Multi-Protocol Over ATM). In: WORKSHOP RNP2, 2000, Belo Horizonte.

[DUARTE, 2006] DUARTE, R. L. **Provisionamento baseado em web services de conexões fim a fim em redes ópticas GMPLS**. 2006, 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade de Campinas, Campinas, 2006.

[FARREL, 2006] FARREL, A.; BRYSKIN, I. **GMPLS: architecture and applications**. Morgan Kaufmann, 2006.

[FARREL, 2006a] _____. Encoding of attributes for multiprotocol label switching (MPLS) label switched path (LSP) establishment using resource reservation protocol-traffic engineering (RSVP-TE). **IETF RFC 4420** (Standards Track), Feb. 2006.

[FERREIRA, 2006] FERREIRA, J. C. V. **Algoritmo para roteamento e alocação de comprimentos de onda em redes ópticas com inclusão de penalidades físicas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

[FISCHER, 2007] FISCHER, T. Physical layer impairment (PLI) routing and wavelength assignment (RWA) in dispersion-managed DWDM networks. In: EUROPEAN CONFERENCE AND EXHIBITION ON OPTICAL COMMUNICATION – ECOC, 6., 2007, Berlin.

[FONSECA, 2004] FONSECA, I. E.; WALDMAN, H.; ALMEIDA, R. C. Jr.; RIBEIRO, M. R. N. Meeting optical QoS requirements with reduced complexity in dynamic wavelength assignment. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BROADBAND NETWORKS – BROADNETS, 1., San José, 2004. Proceedings, n. 25-29, p. 331-333, 2004.

[FONSECA, 2004a] FONSECA, I. E.; WALDMAN, H.; RIBEIRO, M. R. N.; ALMEIDA, R. C. Jr. Preserving global optical QoS in FWM impaired dynamic networks. **IEEE Electronics Letters**, New York, v. 40, n. 3, p.191-192, 2004.

[FOROUZAM, 2008] FOROUZAM, A. F. **Comunicação de dados e redes de computadores**. 4 ed. São Paulo: MacGraw Hill, 2008.

[FREDETTE, 2005] FREDETTE, A.; LANG, J. Link management protocol (LMP) for dense wavelength division multiplexing (DWDM) optical line systems. **IETF RFC 4209** (Standards Track), Oct. 2005.

[GIORGETTI, 2010] GIORGETTI, A. et al. Path state-based update of PCE traffic engineering database in wavelength switched optical networks. **IEEE Communications Letters**, New York, v. 14, n. 6, p. 575-577, June 2010.

[GLASS, 2001] National Institute of Standards and Technology (NIST). The GMPLS Lightwave Agile Switching Simulator GLASS – An Overview. Version: Draft 1.0. Disponível em: <<http://www-x.antd.nist.gov/glass/>>. Acesso em 10 Dec. 2010.

[GLASS, 2010] GLASS (GMPLS Lightwave Agile Switching Simulator). Disponível em: <<http://www-x.antd.nist.gov/glass/>>. Acesso em 10 Dec. 2010.

[GORDON, 2006] GORDON, R. E.; CHEN, L. R. Demonstration of all-photonic spectral label-switching for optical MPLS networks. **IEEE Photonics Technology Letters**, New York, v. 18, n. 4, p. 586-588, Feb. 2006.

[GRINGERI, 2010] GRINGERI, S. et al. Flexible architectures for optical transport nodes and networks. **IEEE Communications Magazine**, New York, p. 40-50, July 2010.

[GUMASTE, 2003] GUMASTE, A; ANTONY, T. **DWDM networks designs and engineering solutions**. Indianapolis: Cisco Press, 2003.

[HABIB, 2006] HABIB, I. W. et al. Deployment of the GMPLS control plane for grid applications in experimental high-performance networks. **IEEE Communications Magazine**, New York, v. 44, n. 3, p. 65-73, March 2006.

[HANSELMAN, 2007] HANSELMAN, D.; LITTLEFIELD, B. **Matlab® 6 – Curso Completo**. São Paulo: Pearson, 2007.

[HERMAN, 2008] HERMAN, W. P. **Formulação algébrica para algoritmos multi-restritivo Hop-by-Hop**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, , São Paulo, 2008.

[HILL, 1978] HILL, K. et al. CW three-wave mixing in single-mode fibers. **Journal of Applied Physics**. New York, v. 49, n. 10, p. 5098-5106, Oct. 1978.

[HUANG, 2005] HUANG, Y.; HERITAGE, J. P.; MUKHERJEE, B. Connection Provisioning With Transmission Impairment Consideration In Optical WDM Networks With High-Speed Channels. **Journal of Lightwave Technology**, Washington DC, v. 23, n. 4, 2005.

[IMAJUKU, 2007] IMAJUKU, W. et al. Multi-area MPLS/GMPLS interoperability trial over 14-vendor packet/TDM/ROADM/OXC network. OPTICAL FIBER CONFERENCE - OFC, 2007, Anaheim, OthQ2.

[IMAJUKU, 2009] IMAJUKU W. et al. A multi-area MPLS/GMPLS interoperability trial over ROADM/OXC network. **IEEE Communications Magazine**, New York, p. 168-175, Feb. 2009.

[INOUE, 1995] Inoue K. A simple expression for optical FDM network scale considering fiber four-wave mixing and optical amplifier noise. **IEEE Journal of Lightwave Technology**, Washington DC, v. 13, n. 5, May 1995.

[ISOC, 2010] Internet Society. **Growing pains: bandwidth on the internet**: briefing paper. Geneva: ISOC, 2010. 20p. Disponível em: <<http://www.isoc.org/isoc/conferences/bwpanel/docs/bp-growingp-201003-en.pdf>>. Acesso em: 15 Dec. 2010.

[ITU, 2000] ITU-T. **Rec. G.805**. Generic functional architecture of transport networks. Geneva, Mar. 2000.

- [ITU, 2000a] _____. **Rec. G.663**. Application related aspects of optical amplifier devices and sub-systems. Geneva, Apr. 2000.
- [ITU, 2002] _____. **Rec. G.694.1**. Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid. Geneva, June 2002.
- [ITU, 2003] _____. **Rec. G.7713.2**. Distributed call and connection management: signalling mechanism using GMPLS RSVP-TE. Geneva, Mar. 2003.
- [ITU, 2003a] _____. **Rec. G.7713.3/Y.1704.3**. Distributed call and connection management: signalling mechanism using GMPLS CR-LDP. Geneva, Mar. 2003.
- [ITU, 2005] _____. **Rec. G.983.1**. Broadband optical access systems based on Passive Optical Networks (PON). Geneva, Jan. 2005.
- [ITU, 2006] _____. **Rec. G.8080/Y.1304**. Architecture for the automatically switched optical network (ASON). Geneva, June 2006.
- [ITU, 2009] _____. **Rec. G.652**. Characteristics of a single-mode optical fibre and cable. Geneva, Nov. 2009.
- [ITU, 2009a] _____. **Rec. G.655**. Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable. Geneva, Nov, 2009.
- [ITU, 2010] _____. **Rec. G.653**. Characteristics of a dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable. Geneva, July 2010.
- [ITU, 2010a] _____. **Rec. G.8081/Y.1353**. Terms and definitions for Automatically Switched Optical Networks (ASON). Geneva, Sept. 2010.
- [JAMOUISSI, 2002] JAMOUISSI, B. et al. Constraint-Based LSP Setup using LDP. **IETF RFC 3212** (Standards Track), Jan. 2002.
- [JELINSKIS, 2010] JELINSKIS, J.; LAUKS, G. Fuzzy approach for QoS aware application driven traffic control in GMPLS networks. In: IEEE R8 INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTACIONAL TECHNOLOGIES IN ELETRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING – SIBIRCON, 2010, Irkutsk Listvyanka, Jul. 2010. p. 199-203.
- [JEON, 2003] JEON, M. Y. et al. Demonstration of all-optical packet switching routers with optical label swapping and 2R regeneration for scalable optical label switching network applications. **IEEE Journal of Ligthwave Technology**, Washington DC, v. 21, n. 11, p. 2723-2733, 2003.
- [JESZENSKY, 2004] JESZENSKY, P. J. E. SISTEMAS TELEFÔNICOS, São Paulo: Manole, 2004.
- [JUNG, 2010] JUNG, E. S.; RANKA, S.; SAHNI, S. Topology aggregation for e-science networks. In: IEEE/ACM INTERNATIONAL CONFERENCE ON CLUSTER, CLOUD AND GRID COMPUTING, 10., 2010, Melbourne, p. 530-533.

[KAMINOW, 1997] KAMINOW, I. P.; KOCH, T. L. **Optical fiber telecommunications**. Burlington: Academic Press, v. 3A, 1997.

[KATZ, 2003] KATZ, D.; KOMPELLA, K.; YEUNG D. Traffic engineering (TE) extensions to OSPF version 2. **IETF RFC 3630** (Standards Track), Sept. 2003.

[KEISER, 2003] KEISER, G. **Optical communications essentials**. New York: McGraw-Hill, 2003.

[KELLY, 1986] KELLY, F. P. **Blocking probabilities in large circuit switched networks**. **Advances in Applied Probability**, New Ireland, v. 18, p. 473-505, 1986.

[KELLY, 1990] _____. Routing and capacity allocation in networks with trunk reservation. **Mathematics of Operation Research**, Hanover, v. 15, n. 4, 1990.

[KIM, 2002] KIM, Y. et al. GLASS (GMPLS lightwave agile switching simulator) - A scalable discrete event network simulator for GMPLS-based optical internet. **National Institute of Standards and Technology (NIST)**, 2002.

[KOMPELLA, 2005] KOMPELLA, K.; REKHTER, Y. Label switched paths (LSP) hierarchy with generalized multi-protocol label switching (GMPLS) traffic engineering (TE). **IETF RFC 4206** (Standards Track), Oct. 2005.

[KOMPELLA, 2005a] _____. OSPF extensions in support of generalized multi-protocol label switching (GMPLS). **IETF RFC 4203** (Standards Track), Oct. 2005.

[KOMPELLA, 2005b] _____. Intermediate system to intermediate system (IS-IS) extensions in support of generalized multi-protocol label switching (GMPLS). **IETF RFC 4205** (Informational), Oct. 2005.

[KOMPELLA, 2005c] _____. Routing extensions in support of generalized multi-protocol label switching (GMPLS). **IETF RFC 4202** (Standards Track), Oct. 2005.

[KORNIK, 2008] KORNIK, J.; ROZYCKI P. Implementation of signaling tunnel in the GMPLS control plane. In: CONFERENCE ON HUMAN SYSTEM INTERACTIONS - HSI, 2008, Krakow, p. 989-993.

[KOVACEVIC, 1996] KOVACEVIC, M.; ACAMPORA, A. Benefits of wavelength translation in all-optical clear channel networks. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, New York, v. 14, Jun 1996.

[KUROSE, 2009] KUROSE, J. F.; ROSS, K. W. **Redes de computadores e a internet**. 5 ed. São Paulo: Pearson, 2009.

[LANG, 2005] LANG J. Link management protocol (LMP), **IETF RFC 4204** (Standards Track), Oct. 2005.

[LEE, 2009] LEE J. H. et al. Field trial of all-optical networking controlled by intelligent control plane with assistance of optical performance monitors. **Journal of Lightwave Technology**, Washington DC, v. 27, n. 2, Jan. 2009, p. 94-100.

[LEVANDOVSKY, 2001] LEVANDOVSKY, D. Wavelength routing based on physical impairments. In: OPTICAL FIBER COMMUNICATION CONFERENCE – OFC, 2001, Anaheim, v. 2, p. TuG7-1 - TuG7-3.

[LI, 2002] LI, G; YATES, J.; WANG, D.; KALMANEK, C. Control plane design for realible optical networks. **IEEE Communications Magazine**, New York, v. 40, issue2, p. 90-96, 2002.

[LIGHTD, 1998] LightD © – Software para Projeto de Sistemas Ópticos, Manual do Usuário, Campinas: Fundação CPqD, 1998.

[LOPES, 2009] LOPES, C. M. B. et al. FWM physical impairments aware GMPLS signaling. In: SBMO/IEEE MTT-S INTERNATIONAL MICROWAVE & OPTOELECTRONICS CONFERENCE - IMOC, Pará, 2009. p. 634-640.

[LU, 2003] LU, K. et al. Intermediate-node initiated reservation (IIR): a new signaling scheme for wavelength-routed networks. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE - ICC, Anchorage, 2003, v. 2, n. 11-15, p. 1386-1390.

[LUO, 2004] LUO, Y.; ANSARI, N. A computational model for estimating blocking probabilities of multifiber WDM optical networks. **IEEE Communications Letters**, New York, v. 8, n. 1, p. 60-62, Jan. 2004.

[MAIER, 2009] MAIER, M.; HAMAD, A.; HERZOG, M. A global overview of optical switching network testbed activities. **Journal of Lightwave Technology**, Washington DC, v. 27, n. 19, p. 4377-4384, Oct. 2009.

[MANNIE, 2004] MANNIE, E. Generalized multi-protocol label switching (GMPLS) architecture. **IETF RFC 3945** (Standards Trak), Oct. 2004.

[MARSDEN, 2008] MARSDEN, A.; MARUTA, A.; KATAYAMA, K. Routing and wavelength assigment encompassing FWM in WDM lightpath networks. In: OPTICAL NETWORK DESIGN AND MODELING INTERNATIONAL CONFERENCE – ONDM, Vilanova, 2008, p. 1-6.

[MARSDEN, 2009] MARSDEN, A.; MARUTA, A; KITAYAMA, K. Reducing the lightpath establishing time of FWM-aware dynamic RWA for wavelength-routed optical networks. **Photonic Network Communications**, Berlin, v. 18, n. 2, p. 183-190, 2009.

[MARTINELLI, 2010] MARTINELLI G.; ZANARDI, A. GMPLS Signaling extensions for optical impairment aware lightpath setup. **IETF Internet Draft (Standard Track)**. Oct. 2010. Disponível em: <<http://tools.ietf.org/pdf/draft-martinelli-ccamp-optical-imp-signaling-03.pdf>>. Acesso em: 10 Dec. 2010.

[MARTÍNEZ, 2006] MARTÍNEZ, R. et al. Challenges and requirements for introducing impairment-awareness into the management and control planes of ASON/GMPLS networks. **IEEE Communications Magazine**, New York, p. 76-85, 2006.

[MOY, 1998] MOY, J. OSPF Version 2. **IETF RFC 2328** (Standards Track), Apr. 1998.

[MUÑOZ, 2009] MUÑOZ, R.; MARTÍNEZ, R.; CASELLAS, R. Challenges for GMPLS lightpath provisioning in transparent optical networks: wavelength constraints in routing. **IEEE Communications Magazine: topics in optical communications**, New York, p. 26-34, Aug 2009.

[NIKODEM, 2008] NIKODEM, M. P.; ZURAWSKI, W.; ABRAMSKI, K. M. Four-wave mixing in non-zero dispersion shifted fibers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRANSPARENT OPTICAL NETWORKS - ICTON, 10., 2008, Athens, v. 4, p. 342-345.

[NS2, 2010] The VINT Project - UC Berkeley, LBL, USC/ISI and Xerox PARC. **The ns manual (formerly ns notes and documentation)**. May, 2010 Disponível em: http://www.isi.edu/nsnam/ns/doc/ns_doc.pdf. Acesso em: 14 Dec. 2010.

[OZDAGLAR, 2003] OZDAGLAR, A. E.; BERTSEKAS, D. P. Routing and wavelength assignment in optical networks. **IEEE/ACN Transactions on Networking**, New York, v. 11, n. 2, p. 259-272, Apr. 2003.

[PACHNICKE, 2006] PACHNICKE, S. et al. Physically constrained routing in 10-Gb/s DWDM networks including fiber nonlinearities and polarization effects. **Journal of Lightwave Technology**, Washington DC, v. 24, n. 9, p. 3418-3426, 2006.

[PAPADIMITRIOU, 2003] PAPADIMITRIOU, D.; ROUSSEAU, B. Demystifying GMPLS: A technical perspective. **Alcatel Technical White Paper**, Dec. 2003.

[PAPADIMITRIOU, 2003a] PAPADITRIOU, D.; BART, R. Generalized Multi-Protocol Label Switching: The telecommunications holy grail or a pragmatic means of raising carrier profitability?. **Alcatel Technical White Paper**, Dec. 2003.

[PAVANI, 2004] PAVANI, G. S.; WALDMAN H. Dynamic routing and wavelength assignment with power constraints In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES - SBT, 21., Belém, 2004.

[PAVANI, 2008] PAVANI, G. S.; WALDMAN, H.; MAGALHÃES, M. F.; ZULIANI, L. G. Distributed approaches for impairment-aware routing and wavelength assignment algorithms in GMPLS networks. **Elsevier: Computer Networks**, Amsterdam, v. 52, n. 10, p. 1905-1915, July 2008.

[PAVANI, 2010] _____. Routing and wavelength assignment with crankback re-routing extensions by means of ant colony optimization. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, New York, v. 28, n. 4, p. 532-540, May 2010.

[PAWELCZAK, 2004] PAWELCZAK, P. **WDM network blocking computation toolbox**. 2004. Disponível em: <<http://www.mathworks.de/matlabcentral/fileexchange/4797-wdm-network-blocking-computation-toolbox>>. Acesso em: 10 Dec. 2010.

[PAWELCZAK, 2004a] PAWELCZAK, P. **Traffic Engineering in All-Optical Networks**. M. Sc Thesis. Poland, 2004.

[RAMASWAMI, 2002] RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K. N. **Optical networks: a practical perspective**, 2nd ed., San Diego: Academic Press, 2002.

[RANDHAWA, 2009] RANDHAWA, R.; SOHALB, J. S.; KALERC, R. S. Optimum algorithm for WDM channel allocation for reducing four-wave mixing effects. **Elsevier/Optik - International Journal for Light and Electron Optics**, Amsterdam, v. 120, n. 17, p. 898-904, Nov. 2009.

[ROSEN, 2001] ROSEN, E.; VISWANATHAN, A.; CALLON, R. Multiprotocol Label Switching Architecture, **IETF RFC 3031** (Standards Track), Jan. 2001.

[SALIBA, 2010] SALIBA, C.; FARRUGIA, R. A. Quality of service aware ant colony optimization routing algorithm. In: IEEE MEDITERRANEAN ELECTROTECHNICAL CONFERENCE - MELECON, 15., Valletta, Apr. 2010, p. 343-347.

[SALVADORI, 2009] SALVADORI E. et al. Distributed optical control plane architectures for handling transmission impairments in transparent optical networks **Journal of Lightwave Technology**, Washington DC, v. 27, n. 13, , p. 2224-2239, July 2009.

[SAMBO, 2006] SAMBO N. et al. GMPLS signaling feedback for encompassing physical impairments in transparent optical networks. In: GLOBAL TELECOMMUNICATIONS CONFERENCE – GLOBECOM, 2006, San Francisco, p. 1-5, OPN09-03.

[SAMBO, 2007] _____. Lightweight RSVP-TE extensions to account for shared regenerators in translucent optical networks. **IEEE Photonics in Switching**, New York, n. 19-22, p. 35-36, 2007.

[SAMBO, 2008] _____. Introducing crosstalk-awareness into GMPLS-controlled transparent optical networks. In: OPTICAL FIBER CONFERENCE – OFC, 2008, San Diego, OtuA4.

[SAMBO, 2009] _____. GMPLS-Controlled dynamic translucent optical networks. **IEEE Network**, New York, p. 34-40, May 2009.

[SAMBO, 2009a] _____. Accounting for shared regenerators in GMPLS-controlled translucent optical networks. **Journal of Lightwave Technology**, Washington DC, v. 27, n. 19, p. 4338-4347, Oct 2009.

[SAMBO, 2010] _____. Accounting for PMD temporal correlation during lightpath set up in transparent optical networks. **Journal of Lightwave Technology**, Washington DC, v. 28, n. 22, p. 3307-3313, Nov. 2010.

[SARADHI, 2008] SARADHI, C. V. et al. Physical layer impairment (PLI) aware transponder selection policies for GMPLS/WDM optical networks. In: OPTICAL FIBER CONFERENCE – OFC, 2008, San Diego, OWA5.

[SATO, 2002] SATO, K. GMPLS – Based photonic multilayer router (Hikari Router) architecture: an overview of traffic engineering and signaling technology. **IEEE Communications Magazine**, New York, v. 40, n. 3, p. 96-101, 2002.

[SAWADA, 2010] SAWADA, K. UENOHARA, H. High-speed optical label recognition technique using an optical digital-to-analog conversion and its application to optical label

switch. **Journal of Lightwave Technology**, Washington DC, v. 28, n. 13, p. 1889-1896, July 2010.

[SCHONWALDER, 2009] SCHONWALDER, J. et al. Future internet = content + services + management. **IEEE Communications Magazine**, New York, v. 47, n. 7, p. 27-33, July 2009.

[SHIBATA, 1987] SHIBATA, N.; BRAUN, R. P.; WARREN, R. G. Phase-mismatch dependence of efficiency of wave generation through four-wave mixing in a singlemode fiber. **IEEE Journal Quantum Electronics**, New York, v. QE-23, p. 1205-1211, July 1987.

[SILVA, 2006] SILVA, M. et al. Fiberbased testbed architecture enabling advanced experimental research. In: INTERNATIONAL IEEE/CREATE-NET CONFERENCE ON TESTBEDS AND RESEARCH INFRASTRUCTURES FOR THE DEVELOPMENT OF NETWORKS AND COMMUNITIES, 2., Barcelona, Mar. 2006, Track 1 Regular Papers, Session 6.

[SINGH, 2009] SINGH, R. ; KUMAR, M. .Trade-off between fiber dispersion & effective length v/s FWM Penalties in WDM networks. In: HIGH-CAPACITY OPTICAL NETWORKS AND ENABLING TECHNOLOGIES - HONET, 6., 2009, Alexandria, p. 236-239.

[SINGH, 2010] SINGH, S.P.; IYER, S.; NETAJI, S. Effect of SRS and FWM on performance of optical star WDM networks: a deterministic approach. In: WIRELESS AND OPTICAL COMMUNICATIONS NETWORKS - WOCN, 7., 2010, p. 1.

[SMIT, 2004] SMIT, H.; LI, T. Intermediate system to intermediate system (IS-IS) extensions for traffic engineering (TE). **IETF RFC 3784** (Informational), Jun. 2004.

[SONG, 1999] SONG, S. et al. Intensity-dependent phase-matching effects on four-wave mixing in optical fibers. **IEEE Journal of Lightwave Technology**, New York, v. 17, n. 11, p. 2285-2290, 1999.

[SONG, 2002] SONG, T. et al. Statistical study of crosstalk accumulation in WDM optical network using different RWA. **Elsevier: Optics Communications**, Amsterdam, v. 202, p. 131-138, 2002.

[SSFNet, 2010] SSFNet - Scalable simulation framework network. Disponível em <<http://www.ssfnet.org/homePage.html>>. Acesso em 10 Dec. 2010.

[STRAND, 2005] STRAND, J.; CHIU, A. Impairments and other constraints on optical layer routing. **IETF RFC 4054** (Informational), May. 2005.

[SZYMANSKI, 2010] SZYMANSKI, T. H.; GILBERT, D. Provisioning mission-critical tele robotic control systems over internet backbone networks with essentially-perfect QoS. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, New York, v. 28, n. 5, p. 630-643, June 2010.

[TANENBAUM, 2003] TANENBAUM, A. S. **Redes de computadores**. 4 ed. São Paulo: Elsevier, 2003.

[TANG, 2003] TANG, J.; KHEONG, C.; ZHANG, L. Optical nonlinear effects on the performance of IP traffic over GMPLS-based DWDM networks. **Elsevier : Computer Communications**, Amsterdam, p. 1330-1340, 2003.

[TKACH, 1995] TKACH, R. W. et al. Four-photon mixing and high-speed WDM systems. **Journal of Lightwave Technology**, Washington DC, v. 13, n. 5, p. 841-849, 1995.

[TORNATORE, 2009] TORNATORE, M. et al. Effects of outdated control information in control-plane-enabled optical networks with path protection. **IEEE/OSA Optical Communications and Networking Journal**, Washington DC, v. 1, n. 2, p. A194-A204, July 2009.

[TRIPATHI, 2000] TRIPATHI, T.; SIVARAJAN, K. N. Computing approximate blocking probabilities in wavelength routed all-optical networks with limited-range wavelength conversion. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, New York, vol. 18, Oct 2000.

[VPI, 2010] **Virtual Photonics Incorporated**. Photonic Design Automation Expert Solutions for Optical Equipment Design. Disponível em: <<http://www.vpiphotonics.com/ProductBrochures.php>>. Acesso em: 14 Dec. 2010.

[WANG, 2010] WANG, Z. Z.; LI, H.; JI, Y. F. Demonstration of lightpath sharing for video streaming and data collection in lambda grid networks. **IET Electronics Letters**, Stevenage, v. 46, n. 6, Mar. 2010.

[WEN, 2001] WEN, B. et al. Optical wavelength division multiplexing (WDM) network simulator (OWNs): architecture and performance studies. **Optical Networks Magazine: Special Issue on Simulation, CAD, and Measurement of Optical Networks**, Mar 2001.

[XIA, 2009] XIA, M. et al. Service-centric provisioning in WDM backbone networks for the future internet. **Journal of Lightwave Technology**, Washington DC, v. 27, n. 12, p.1856-1865, June 2009.

[XIAO, 2000] XIAO, X.; HANNAN, A.; BAILEY, B. Traffic engineering with MPLS in the internet. **IEEE Network**, New York, p. 28-33, 2000.

[YAMANAKA, 2006] YAMAMANAKA, N.; SHIOMOTO, K.; OKI, E. **GMPLS technologies – broadband backbone networks and systems**. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2006.

[YOSHIKANE, 2007] YOSHIKANE, N. et al. GMPLS-based multi-ring metro WDM networks employing OTN-based client interfaces for 10GbE services. In: Optical Fiber Conference – OFC, 2007, Anaheim, Session OMJ2.

[ZHAO, 2010] ZHAO, H.; LIU, Z.; XIE, X. Research on next generation network architecture based on IPv6 and GMPLS. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED COMPUTER THEORY AND ENGINEERING - ICACTE, 3., Chengdu, 2010.

[ZHENSHENG, 2001] ZHENSHENG, Z. et al. Lightpath routing for intelligent optical networks. **Network IEEE**, New York, v. 15, n. 4, p. 28-35, 2001.

[ZULIANI, 2006] ZULIANI, L.G.; SAVASINI, M.; PAVANI, G.S.; PASQUINI, R.; VERDI, F.L.; MAGALHAES, M. An implementation of an OSPF-TE to support GMPLS-controlled all-optical WDM networks. In: INTERNATIONAL TELECOMMUNICATIONS SYMPOSIUM, 2006, Fortaleza, p. 300-305.

ANEXO A

AVALIAÇÃO DAS FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO

ANEXO A

1 AVALIAÇÃO DAS FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO

Durante o desenvolvimento deste trabalho, foram avaliadas ferramentas para compor a plataforma de testes, referente à camada óptica e ao Plano de Controle do GMPLS. A avaliação de cada uma destas ferramentas está descrita a seguir.

1.1 Plataforma de Camada Óptica

Para a implementação das redes ópticas, torna-se necessário estimar a degradação do sinal óptico ao longo dos possíveis *lightpaths*. Uma forma de mensurar os impactos destes efeitos é a utilização de simuladores de redes ópticas. Vários simuladores de redes ópticas já foram desenvolvidos, os quais podem ser divididos em dois grupos.

No primeiro grupo estão as ferramentas que não consideram a degradação do sinal na camada óptica, do qual fazem parte o OWns (*Optical WDM network simulator*), o OPNET Simulator, o NIST MERLiN e o TONetS (*Transparent Optical Network Simulator*) [CHAVES, 2008]. Já no segundo grupo, onde as restrições da camada física são consideradas, temos, por exemplo, o simulador SIMON [10], o LightD [LIGHTD, 1998] e o VPI (*Virtual Photonics Incorporated*) [VPI, 2010]. O primeiro considera apenas parte dos efeitos da camada óptica (atenuação, saturação de ganho dos amplificadores ópticos e o *crosstalk* nos comutadores ópticos). Já o segundo, apesar de tratar a maioria dos efeitos da camada óptica, não dispõe de dispositivos de rede como OXC (*Optical Cross-Connect*) e OADM (*Optical Add-Drop Multiplexer*).

Com base nestes dados, a opção para implementação da camada óptica recaiu sobre o simulador VPI, devido principalmente à abordagem dos efeitos da camada física importantes para a investigação aqui proposta, além de já possuir implementado em biblioteca praticamente todos os dispositivos ópticos necessários para emular a rede DWDM em estudo. A seguir será descrita tal ferramenta e apresentadas suas principais funcionalidades.

A ferramenta VPI é desenvolvida pela VPIphotonics™. Trata-se de um programa de simulação para desenvolvimento de dispositivos e sistemas de comunicações ópticas. É um produto comercial e já consolidado, amplamente utilizado pela indústria e por entidades de pesquisa e desenvolvimento. Dispõe de recursos de simulação envolvendo, por exemplo, o

aplicativo MATLAB, além de possuir uma biblioteca com os principais elementos de redes ópticas já implementados, além de permitir novas implementações de acordo com a necessidade [VPI, 2010].

Esta ferramenta é composta por três pacotes básicos, sendo eles:

- **VPItransmissionMaker™:** Destinado ao projeto e avaliação de desempenho de redes de acesso, metropolitanas e de transporte;
- **VPIcomponentMaker™:** Utilizado para o desenvolvimento de componentes e subsistemas ópticos;
- **VPIphotonicsAnalyzer™:** Constitui uma plataforma para coleta e análise dos dados de simulação, particularmente útil em sistemas WDM. É possível a avaliação do desempenho do sistema e de cada canal individualmente, levantando-se parâmetros como o diagrama de olho, a OSNR, o fator Q e a BER.

Uma ferramenta importante do VPItransmissionMaker™ é a co-simulação, recurso que possibilita a integração com outros programas e linguagens, tais como o MATLAB e o C/C++, oferecendo um ambiente de criação e simulação de novos conceitos e aplicações. Assim, é possível ter interfaces com programas externos, e assim, avaliar novas funcionalidades que não estão disponíveis nos módulos pré-existent.

Na Figura 1-1, a tela do módulo VPIphotonicsAnalyzer™ é apresentada, sendo possível visualizar as várias famílias de componentes de redes ópticas disponíveis (barra à esquerda) e as opções de parâmetros de configuração e simulação (barra de ferramentas na parte superior). Na área de trabalho é apresentado um exemplo de um enlace DWDM ponto a ponto.

Figura 1-1: Ambiente do VPItransmissionMaker™ para estudo de redes ópticas.

O VPI dispõe de vários módulos que fazem a análise conjunta dos sinais transmitidos, particularmente úteis em avaliações de sistemas multicanais, como é o caso do WDM.

Na Figura 1-2 está apresentada a tela gerada por um destes módulos (*channel analyser*) ao avaliar o sinal de recepção de um sistema DWDM com 16 canais operando na 3ª janela óptica (1550 nm).

Figura 1-2: Tela do Analisador de Canais do VPI para uma rede DWDM de 16 canais

Como é possível observar na Figura 1-2, o módulo de análise (*Channel Analyser*) recebe o sinal WDM de 16 canais, efetua a demultiplexação e apresenta os parâmetros ópticos de cada canal, tais como: a frequência e potência do sinal recebido, potência do ruído, valor da BER, entre outros.

Para avaliação da ferramenta, estudos preliminares sobre os efeitos do FWM foram realizados, empregando-se os módulos *VPItransmissionMaker™* e o *VPIphotonicsAnalyzer™*. Neste ambiente, foi criado um enlace óptico DWDM ponto a ponto, cujos principais parâmetros de simulação e os resultados obtidos estão apresentados na Subseção 4.2.1.

1.2 Plataforma de Rede GMPLS (Plano de Controle)

Para a plataforma que representa a Rede GMPLS foram avaliadas as seguintes ferramentas: o GLASS (*GMPLS Lightwave Agile Switching Simulator*), o ns2 (*Network Simulator 2nd version*) e o WDM Network Blocking Computation Toolbox, as quais serão caracterizadas a seguir.

1.2.1 O simulador GLASS

O GLASS é uma plataforma de desenvolvimento que permite simulação a eventos discretos¹ para a rede óptica controlada pelo GMPLS. Possibilita a avaliação de protocolos de roteamento, restauração e sinalização dentro do ambiente de uma rede óptica [GLASS, 2001]. O GLASS é um programa de simulação que derivou de outro aplicativo chamado MERLiN (*Modeling Evaluation and Research of Lightwave Networks*), sendo este uma ferramenta de desenvolvimento destinada ao modelamento e avaliação de algoritmos RWA (*Routing and Wavelength Assignment*) em redes WDM. A partir de 2001, o próprio NIST redesenhou o GLASS, utilizando agora a plataforma SSFNet (*Scalable Simulation Framework Network*), onde foi associado um programa gráfico para criação de topologias, visualização e simulação chamado TSC (*Topology and Simulation Creator*) [SSFNet], [GLASS, 2001].

Desenvolvido totalmente em linguagem JAVA, o GLASS é de domínio público, o que facilita a introdução de novas funcionalidades. É uma das poucas ferramentas de simulação disponíveis que tratam de redes ópticas de nova geração [GLASS, 2001], [GLASS, 2010].

Para a versão disponível na época de desenvolvimento deste trabalho (GLASS *version 2.0.2*) foi feita uma avaliação com base na análise da documentação disponível e nos resultados das simulações, utilizando-se topologias disponíveis como exemplos no próprio aplicativo. Concluiu-se que, apesar de ser uma das poucas ferramentas voltada para simulação de redes ópticas modernas dentro do contexto do GMPLS, o GLASS apresenta desvantagens importantes a serem consideradas, entre elas:

- Comportamento instável observado, durante as simulações, com vários problemas funcionais (*bugs*) em determinadas condições de teste;

¹ Simulação a eventos discretos: Modalidade de simulação que não é processada em tempo real. O tempo de simulação passa a ser descontínuo e vinculado à execução de eventos de maior interesse.

- Implementação de novas funcionalidades dificultada pela documentação disponível ser carente de informações estruturais básicas, além de não contemplar todos os módulos já implementados;
- Lista de discussão de usuários praticamente inativa, devido à pouca utilização atualmente;
- Projeto atualmente suspenso e sem previsão de retomada, sendo que a última atualização oficial foi disponibilizada em 2004.

1.2.2 O simulador ns2

A segunda plataforma analisada foi o ns2 (*Network Simulator 2nd version*), um simulador orientado a objeto de uso bastante disseminado na área acadêmica e em constante atualização. Trata-se de um simulador de eventos discreto, ou seja, modela uma topologia de rede real por meio de eventos em uma linha de tempo discreta e virtual, onde o tempo de processamento não é contabilizado no tempo de execução virtual. Sua estrutura prevê a utilização de duas linguagens de programação [NS2, 2010]:

- C++: Linguagem de programação compilada e orientada a objetos, que compõe o núcleo do ns2, destinada à codificação dos módulos funcionais;
- OTcl (*Object Tool Command Language*): Linguagem de *script* interpretada que opera como *front-end* do simulador, ou seja, é uma interface de comandos e configurações que trata dos dados referentes à topologia da rede e parâmetros de simulação. É utilizada para descrever os cenários, possibilitando efetuar modificações de forma mais simplificada.

As duas linguagens são integradas de tal forma que o simulador suporta classes similares em ambas. Assim, o usuário cria, na linguagem OTcl, as chamadas classes de hierarquia interpretada e, a partir destas, são reproduzidas na linguagem C++ as classes de hierarquia compilada [NS2, 2010].

Oferecendo apoio à simulação, estão disponíveis para o usuário duas interfaces gráficas:

- NAM (*Network AniMator*) - . Implementa efeitos visuais referentes aos eventos que ocorrem durante a simulação;
- XGraph - Gera gráficos a partir dos dados levantados durante a simulação.

Para avaliação do ns2, foram feitas simulações com a versão disponível quando do desenvolvimento deste trabalho (ns-2.34). Tal versão do ns2 foi instalada na plataforma Linux Ubuntu 9.04, conforme recomendações dos próprios usuários do programa.

Após análise dos dados levantados durante as simulações e verificação da documentação disponível, conclui-se que o ns2 é uma ferramenta poderosa e bastante ampla, oferecendo suporte desde simulações para estudo de teoria de filas até ambiente complexos envolvendo redes padrão TCP ou variantes tanto para camada física cabeada quanto *wireless*. Assim, as principais vantagens no uso do ns2 são:

- Simulador padrão amplamente utilizado pela comunidade científica e acadêmica;
- licença livre e código aberto;
- Grande variedade de protocolos e tecnologias já disponíveis, principalmente na arquitetura TCP/IP;
- Oferta de boa infraestrutura para desenvolver novos protocolos;
- Possibilidade para estudar interações de protocolos em ambiente controlado;
- Lista de discussão de usuários bastante ativa, importante para discussão e esclarecimento de dúvidas sobre instalação e funcionalidades.

Tomando como base o contexto do presente trabalho, o qual envolve o plano de controle GMPLS integrado a uma rede óptica DWDM, o ns2 apresenta algumas restrições importantes a serem consideradas, entre elas:

- A documentação não descreve funcionalidades relevantes relativas ao MPLS, mesmo na versão mais atual hoje disponível [NS2, 2010];
- Apesar de existirem trabalhos de implementação de funcionalidades relativas à arquitetura GMPLS no ns2, tais como as propostas por Korniak [KORNIK, 2008], as mesmas não foram incorporadas, validadas e documentadas nas versões mais atualizadas;
- Não estão disponíveis módulos ópticos (nós e enlaces WDM) para a versão atual. Um módulo de comutação de comprimentos de onda (OWns - *Optical WDM Network Simulator*) foi apresentado por Wen em 2001 para a versão ns 2.1b6 compatível com a distribuição Linux Red Hat 7 mas sem garantias de funcionamento para versões atuais [WEN, 2001]. Foi feita instalação deste módulo no ns 2.34 para a plataforma Linux Ubuntu 9.04 e as possíveis incompatibilidades alertadas por Wen foram confirmadas.

- Exige conhecimento aprofundado sobre duas linguagens de programação (C++ e OTcl), além de conhecimento sobre a própria plataforma operacional Linux, apresentando assim uma curva de aprendizado lenta.

1.2.3 O módulo WDM Network Blocking Computation Toolbox

A terceira opção analisada, *WDM Network Blocking Computation Tool*, é um módulo desenvolvido para o programa matemático MATLAB, formado por um conjunto de ferramentas para análise de tráfego e bloqueio em redes WDM [PAWELCZAK, 2004]. A agilidade do MATLAB no tratamento de operações envolvendo matrizes e sua alta eficiência de processamento foram os principais fatores que o elegeram como ambiente candidato para a implementação deste conjunto de ferramentas [HANSELMAN, 2007].

Com objetivo principal de calcular a probabilidade de bloqueio de uma rede WDM com uma dada topologia quando esta rede é submetida a uma matriz de tráfego pré-definida, foi desenvolvido um conjunto de ferramentas com base nos trabalhos analíticos apresentados por Birman [BIRMAN, 1996], Tripathi [TRIPATHI, 2000], Chung [CHUNG, 1993A], Kelly [KELLY, 1990] e Kovacevic [KOVACEVIC, 1996].

O módulo original é composto por vários *scripts* que, interligados, formam um ambiente de simulação para calcular o bloqueio de uma topologia de rede específica sob diversas condições de roteamento e tráfego. Os *scripts* são divididos em grupos conforme indicado a seguir [PAWELCZAK, 2006]:

- **Redes (*Networks*):** Criação da Topologia da Rede e Geração da Matriz de Tráfego
- **Grafos (*Graphs*):** Criação dos Grafos utilizando os algoritmos de escolha de melhor caminho Dijkstra, Dijkstra Modificado ou BFS (*Breadth-First Search*).
- **RLA (*Reduced Load Approximation*):** Cálculo de bloqueio da rede simplificado com base nos trabalhos propostos por Birman [BIRMAN, 1996] e Kovacevic [KOVACEVIC, 1996]. Dispõe também do cálculo de perdas por Erlang B, cálculo de bloqueio por rota e cálculo de canais livres por rota.
- **Exemplos (*Examples*):** Exemplos de Simulação com e sem conversão de comprimento de onda .

Para avaliação da ferramenta foram efetuadas duas etapas de simulações, não sendo consideradas as restrições da camada física, a saber:

- Simulação de uma topologia simples (ponto a ponto);
- Simulação de uma topologia mais complexa (malha).

Ao final de cada uma das etapas, os resultados levantados foram comparados com dados apresentados por trabalhos semelhantes disponíveis na literatura.

Para a avaliação inicial, foi calculado o bloqueio médio da rede para uma topologia formada por uma única sequência de enlaces ponto a ponto, conhecida como conexão *multihop* e os resultados foram levantados e analisados.

No programa foram adotadas as seguintes premissas para o cálculo analítico do bloqueio, válidas para as três etapas de avaliação:

- Existem W comprimentos de onda disponíveis na fibra, sendo que cada um deles representa um canal a ser utilizado integralmente;
- Todos os enlaces possuem o mesmo número de comprimentos de onda;
- Cada estação gera e recebe o tráfego por meio de um arranjo de W transmissores e receptores, respectivamente;
- O padrão de tráfego considerado é aplicado entre pares de nós (origem/destino), seguindo a distribuição de Poisson para chegada de conexões com tempo médio de duração exponencialmente distribuído;
- O sistema descarta as conexões de imediato caso não haja recursos para atendê-las, ou seja, utiliza comutação por perdas com acessibilidade plena;
- Os tráfegos em cada enlace são independentes e serão considerados, estatisticamente, mutuamente independentes;
- As rotas são definidas estaticamente, ou seja, o caminho entre determinados nós é fixo, tipicamente definido pelos algoritmos Dijkstra ou Dijkstra Modificado;
- A alocação de comprimentos de onda é randômica, ou seja, os canais são alocados em função da disponibilidade, opção adotada no caso em que não há conversão de comprimento de onda.
- Existe a possibilidade de simulações prevendo a conversão de comprimentos de onda, cujo estudo não é objeto deste trabalho.

A partir das premissas apresentadas e considerando, inicialmente, que não há conversão de comprimentos de onda, supondo que T seja a duração média da conexão e λ_n , a taxa média de chegadas no enlace n , o tráfego médio oferecido ao enlace é dado em *Erlangs* pela relação:

$$L_n = \lambda_n T \quad (1)$$

Considerando apenas um dado enlace n pertencente a um caminho *multihop*, a probabilidade $p_k^{(n)}$ que k comprimentos de onda sejam ocupados no enlace n do caminho é dada por [KOVACEVIC, 1996]:

$$p_k^n = \frac{(\lambda_n T)^k}{k!} p_0^n = \frac{\frac{L_n^k}{k!}}{\sum_{i=0}^w \frac{L_n^i}{i!}} \quad (2)$$

Sendo $p_0^{(n)}$ a probabilidade de nenhum canal estar em uso no enlace n . Para o cálculo da probabilidade de bloqueio das conexões para todo o caminho, é determinada $q_{(n)}^k$ como sendo a probabilidade de existir k comprimentos de onda ocupados nos enlaces do caminho. Importante ressaltar que para o comprimento de onda ser considerado ocupado basta que ele esteja ocupado em pelo menos um enlace do caminho, já que uma das premissas adotadas é a não conversão de comprimentos de onda. Supondo o caso de 2 enlaces, chamados de a e b , que compõem o caminho e considerando n_a como o número de comprimentos de onda livres no enlace a e n_b como o número de comprimentos de onda livre do enlace b , a probabilidade de k comprimentos de onda estarem livres para conexão no caminho é igual à probabilidade destes estarem livres em ambos os enlaces. Ou seja, a probabilidade condicional de que k comprimentos de onda estejam livres dado que n_a e n_b comprimentos de onda estejam disponíveis (assumindo que a alocação de comprimentos de onda nos enlaces a e b são mutuamente independentes) é dada por [KOVACEVIC, 1996]:

$$R(k | n_a, n_b) = \frac{\binom{n_a}{k} \binom{W - n_a}{n_b - k}}{\binom{W}{n_b}} \quad (3)$$

para $k \leq \min(n_a, n_b)$, caso contrário $R = 0$

Para melhor compreender a relação (3), basta imaginar n_a comprimentos de onda como sendo bolas vermelhas e n_b comprimentos de onda como sendo bolas azuis, ambas distribuídas

aleatoriamente em W cestas. R seria a probabilidade de haver j cestas contendo duas bolas, uma vermelha e uma azul [BIRMAN, 1996].

Utilizando a probabilidade condicional, a probabilidade de k comprimentos de onda ocupados em dois enlaces é dada pela distribuição [KOVACEVIC, 1996]:

$$q_k^{(2)} = \sum_{i=0}^w \sum_{j=0}^w R(W - k | W - i, W - j) p_i^{(1)} p_j^{(2)} \quad (4)$$

Assim, a probabilidade de bloqueio para conexões utilizando dois enlaces é dada por:

$$P^{(2)} = q_W^{(2)} \quad (5)$$

É possível estender a análise apresentada para uma conexão com n enlaces (com $n \geq 1$), utilizando a fórmula recursiva na qual fornece a distribuição de comprimentos de onda ocupados em um caminho com n enlaces a partir da distribuição de comprimentos de onda ocupados por meio dos primeiros $(n-1)$ enlaces e da distribuição dos comprimentos de onda ocupados por meio do n -ésimo enlace. Para o caso de $n > 1$, tem-se:

$$q_k^{(n)} = \sum_{i=0}^w \sum_{j=0}^w R(W - k | W - i, W - j) q_i^{(n-1)} p_j^{(n)} \quad (6)$$

De maneira análoga ao caso de 2 enlaces, a probabilidade de bloqueio para conexões utilizando n enlaces é dada por:

$$P^{(n)} = q_W^{(n)} \quad (7)$$

Na primeira etapa de validação, inicialmente foram feitas simulações para a topologia *multihop* utilizando cinco comprimentos de onda por fibra com 1 Erlang de tráfego por enlace para as condições de com e sem conversão de comprimento de onda, seguindo o contexto apresentado por Kovacevic [KOVACEVIC, 1996]. Nesta etapa, os caminhos são eleitos utilizando-se o Algoritmo de Dijkstra e os impactos da camada física foram desconsiderados. Um exemplo de uma topologia testada está apresentada na Figura 1-3 para a situação de 3 enlaces/4 nós, onde consta a lista das rotas usuárias por enlace.

Figura 1-3: Exemplo de Topologia *multihop* com 3 enlaces/4 nós e rotas usuárias por enlace.

Um diagrama de interligação dos módulos utilizados está indicado na Figura 1-4, onde foram simuladas topologias *multihop* de 2 a 20 enlaces e levantados os respectivos valores de bloqueio total da rede. Os resultados obtidos podem ser visualizados na Figura 1-5, onde é possível observar que as curvas obtidas são praticamente idênticas.

Figura 1-4: Diagrama com os blocos funcionais utilizados para simulação da topologia *Multihop*.

Figura 1-5: Simulação em topologia *Multihop* com 5 comprimentos de onda e 1 Erlang/enlace.

Com base nos resultados das simulações para rotas com 1 a 20 enlaces é possível observar que os valores de bloqueio obtidos (*WDM Toolbox*) são praticamente idênticos aos apresentados por Kovacevic em [KOVACEVIC, 1996], o que valida inicialmente a ferramenta para contextos mais simples, envolvendo topologias *multihop* sem a inclusão das restrições da camada física no estabelecimento dos caminhos.

Para a segunda etapa de avaliação, foi calculado o bloqueio médio da rede para uma topologia em malha sem ainda introduzir critérios de escolha de caminhos mediante restrições da camada física. Neste caso, é eleito um caminho por meio do algoritmo Dijkstra e o bloqueio da rede é computado a partir do número médio de conexões descartadas por falta de comprimento de onda disponível quando da requisição. De modo análogo à etapa anterior, os resultados obtidos foram comparados com trabalhos semelhantes publicados.

Para estender os conceitos até aqui estabelecidos para uma rede em malha de topologia genérica, é considerado um enlace s de uma rota l que faz parte da rede, onde B_s é a probabilidade de bloqueio neste enlace e pode ser calculada por meio da fórmula de Erlang para perdas, dada por:

$$B_s = \text{Erlang}(L_s, W) = \frac{\frac{L_s^W}{W!}}{\sum_{i=0}^W \frac{L_s^i}{i!}} \quad (8)$$

Onde L_s é o tráfego no enlace s , em *Erlangs*, e W é o número de comprimentos de onda de cada enlace.

Considerando uma matriz de tráfego oferecido, onde o tráfego em cada rota l tem o valor de A_l e P^l é a probabilidade de bloqueio nesta rota. Uma proposta para o cálculo aproximado do tráfego total oferecido a um dado enlace s , tal que $s \in l$ da rede, foi, inicialmente, apresentada por Kelly e, posteriormente, utilizada por Kovacevic. Para redes com conversão de comprimento de onda, o tráfego oferecido L_s ao enlace s é dado por [KELLY, 1986] [KOVACEVIC, 1996]:

$$L_s = \sum_l a_{s,l} A^l \frac{1 - P^l}{1 - B_s} \quad (9)$$

Onde $a_{s,l}$ é a matriz de incidência de enlace em rota, onde $a_{s,l} = 1$ se $s \in l$ e 0 caso contrário. Assim, a probabilidade média de bloqueio da rede é calculada pela média ponderada entre as probabilidades de bloqueio em cada rota e o tráfego na rota, ou seja:

$$P_B = \frac{\sum_l P^l A^l}{\sum_l A^l} \quad (10)$$

É importante ressaltar que na rede com conversão de comprimento de onda, o processo de chegada de conexões é independente do número de conexões estabelecidas no enlace, podendo ser considerada com uma distribuição de Poisson, cuja probabilidade que k comprimentos de onda estejam ocupados no enlace pode ser calculada por meio da expressão (2).

Como ponderado por Kovacevic, no caso da rede em que a conversão de comprimento de onda não é permitida, a taxa de conexões que chegam ao enlace não é independente do número de comprimentos de onda ocupados [KOVACEVIC, 1996]. Importante notar que, neste caso, o bloqueio da rede ocorre tanto pela falta de recursos (nenhum comprimento de onda disponível em um ou mais enlaces) quanto pela incompatibilidade de comprimento de onda, ou seja, na situação em que não existe comprimento de onda que esteja livre em todos os enlaces da rota. Assim, uma conexão bloqueada por incompatibilidade de comprimento de onda não contribui na taxa de conexões que chegam em qualquer enlace, pois quando a quantidade de comprimentos de onda ocupados aumenta, a taxa de bloqueio devido à incompatibilidade também aumenta, a qual, por sua vez, acaba reduzindo a taxa de chegadas

de conexões no enlace [KOVACEVIC, 1996]. Para tratar o problema do bloqueio da rede quando não há conversão de comprimento de onda, a taxa de conexões que chegam é assumida como uma distribuição de Poisson, sem perda de significativa de precisão, conforme considerado por Kovacevic [KOVACEVIC, 1996]. Neste caso, são utilizadas as expressões (8) e (9) para calcular o tráfego oferecido em cada enlace da rede mesmo no caso de não conversão de comprimentos de onda [KOVACEVIC, 1996].

Assim, a probabilidade de bloqueio B_s em um dado enlace pode ser obtida resolvendo-se o conjunto de equações não lineares oriundas das expressões (8) e (9) combinadas, ou seja:

$$B_s = \text{Erlang} \left(\sum_l a_{s,l} A^l \frac{1 - P^l}{1 - B_s}, W \right) \quad (11)$$

A expressão (11) fornece um conjunto de equações que é solução para a rede no caso de conversão de comprimento de onda. Kovacevic comprovou que a solução destas equações também é aplicável para redes onde a conversão de comprimentos de onda não é permitida. Para resolução destas equações não lineares e para o cálculo do bloqueio médio da rede, foi utilizado um processo iterativo. Considerando que as variáveis $L_s(n)$, $B_s(n)$, $P^l(n)$ e $P_B(n)$ são os valores calculados na n -ésima iteração e os seus valores iniciais são $L_s(n) = B_s(n) = P^l(n) = P_B(n) = 0$, com $\varepsilon =$ erro de aproximação (0,00001), este processo iterativo segue os seguintes passos: [KOVACEVIC, 1996]:

- **Passo 1** (controle do número de iterações): $n = 1$;
- **Passo 2** (cálculo de L_s para cada enlace s): Calcular $L_s(n)$, o tráfego total de cada enlace s , utilizando a expressão (9). É contabilizado o tráfego gerado por todas as rotas que utilizam cada enlace s ;
- **Passo 3** (cálculo de B_s para cada enlace s com tráfego L_s): Calcular $B_s(n)$, o bloqueio por enlace s para o tráfego L_s , utilizando a expressão (8);
- **Passo 4** (cálculo de P^l para cada rota l): Calcular $P^l(n)$, o bloqueio de cada rota l , utilizando as expressões de (2) a (7) para não conversão de comprimentos de onda. São contabilizados todos os enlaces que compõem cada rota l ;
- **Passo 5** (cálculo de $P_B(n)$ para a rede como um todo): Calcular $P_B(n)$, a probabilidade média de bloqueio da rede, utilizando a expressão (10). São calculados a média ponderada entre as probabilidades de bloqueio em cada rota e o tráfego na rota;
- **Passo 6**: Se a diferença entre $P_B(n)$ e $P_B(n-1)$ for menor que ε , P_B foi encontrado. Caso contrário fazer $n = n+1$ e retornar ao Passo 2.

Nesta segunda etapa de validação, foram feitas simulações para a topologia em malha *Manhattan Street* com 9 nós, com oito comprimentos de onda por enlace, seguindo agora o contexto apresentado por Fonseca e Waldman [FONSECA, 2004a].

Novamente, os caminhos são eleitos empregando-se o Algoritmo de Dijkstra e as restrições da camada física foram desconsiderados. A topologia testada é apresentada na Figura 1-6, onde consta a lista das rotas usuárias por enlace.

Figura 1-6: Topologia tipo *Manhattan Street* com 10 enlaces/9 nós.

O respectivo diagrama de interligação dos módulos do *WDM Toolbox* utilizados está apresentado na Figura 1-7, onde foi simulada a topologia *Manhattan Street* e levantados os respectivos valores de bloqueio total da rede para tráfegos crescentes.

Os resultados obtidos podem ser visualizados na Figura 1-8.

Figura 1-7: Diagrama com os blocos funcionais para simulação na topologia *Manhattan Street*.

Figura 1-8: Resultados comparativos de simulação em topologia tipo *Manhattan Street*.

Comparando-se os resultados das simulações para cargas de até 100 Erlangs é possível observar que as curvas obtidas, apesar de não serem coincidentes (diferença de 5% de bloqueio para 50 Erlangs), apresentam comportamentos semelhantes. Aqui cabem os seguintes comentários:

- Os dados apresentados por Fonseca e Waldman [FONSECA, 2004] resultam de uma simulação dinâmica, ou seja, todos os eventos, a partir do ingresso da conexão na rede, são representados sequencialmente em uma escala de tempo. Já o *WDM Toolbox* tem funcionamento baseado no modelo analítico de cálculo de tráfego e bloqueio, sendo, portanto, estático em relação às mudanças no comportamento do tráfego ao longo do tempo. Assim, diante de plataformas tão distintas do ponto de vista funcional, era esperado que valores divergentes fossem encontrados, embora os gráficos obtidos resultassem semelhantes.
- Os resultados de bloqueio apresentados por Fonseca e Waldman [FONSECA, 2004] levam em conta que, caso um determinado enlace esteja totalmente ocupado, são efetuadas novas tentativas com todas as alternativas de rotas de mesmo custo (*hops* no caso). Como neste trabalho é utilizado o modelo teórico de tráfego por Erlang B (perda), apenas uma rota é adotada como única escolha. Isto resulta em uma taxa de bloqueio maior, pois caso ocorra indisponibilidade de canal em um dado enlace da rota escolhida, a conexão é rejeitada de imediato.
- Observa-se ainda que, apesar do modelo dinâmico representar uma situação mais próxima da real, o modelo analítico apresentou um comportamento mais conservador, ou seja, estima um bloqueio médio pouco superior quando comparado com o modelo dinâmico, o que pode ser desejável, pois estabelece margens de segurança referentes à situação de carga na rede.

Com base nas simulações executadas nas avaliações aqui apresentadas, a ferramenta MATLAB WDM Toolbox apresentou resultados coerentes com trabalhos correlatos [FONSECA, 2004a], [KOVACEVIC, 1996], [PAVANI, 2004], viabilizando sua utilização no presente trabalho.