

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM

CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

**“Estudo de Algoritmos RWA em Redes GMPLS Sobre
DWDM”**

ALUNA: Mariana Massimino Feres

São Carlos-SP

Maio/2009

Mariana Massimino Feres

**“Estudo de Algoritmos RWA em Redes GMPLS Sobre
DWDM”**

*DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA
AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO DO
DEPARTAMENTO DE COMPUTAÇÃO DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM
CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO*

Orientador: Prof. Dr. Luis Carlos Trevelin

São Carlos-SP

Maio/2009

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

F349ea

Feres, Mariana Massimino.

Estudo de algoritmos RWA em redes GMPLS sobre DWDM / Mariana Massimino Feres. -- São Carlos : UFSCar, 2010.

98 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2009.

1. Redes de computação. 2. Redes de longa distância (Redes de computação). 3. Generalized Multiprotocol Label Switching (GMPLS). I. Título.

CDD: 004.6 (20ª)

Universidade Federal de São Carlos
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação

“Estudo de Algoritmos de RWA em
Redes GMPLS sobre DWDM”

MARIANA MASSIMINO FERES

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Ciência da
Computação da Universidade Federal de São
Carlos, como parte dos requisitos para a
obtenção do título de Mestre em Ciência da
Computação

Membros da Banca:



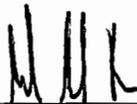
Prof. Dr. Luis Carlos Trevelin
(Orientador - DC/UFSCar)



Prof. Dr. Hélio Crestana Guardia
(DC/UFSCar)



Prof. Dr. Marcos Rogério Salvador
(CPqD)



Prof. Dr. Murilo Araújo Romero
(EESC/USP)

São Carlos
Junho/2009



*Dedico essa
dissertação às minhas
queridas avós Leonor e
Geny*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelas oportunidades que recebo todos os dias.

Aos meus pais, Edgar e Carmem, irmã, Juliana e avós Leonor e Geny, pelo apoio imensurável, amor e carinho. Pessoas fundamentais na minha formação profissional e moral.

Aos meus amigos, que sempre contribuem, de alguma forma, para o meu bem estar.

Aos integrantes do laboratório GSDR, alunos e professores, dos quais muitos agradeço como meus amigos.

Ao professor Luis Carlos Trevelin, pela orientação e apoio dados durante esses dois anos de mestrado.

À CAPES pelo auxílio financeiro concedido.

Quem mata o tempo não é assassino: é suicida. (Millor Fernandes)

Quando se tem uma meta, o que era um obstáculo passa ser uma das etapas do plano. (Gerhard Erich Boehme)

Maior que a tristeza de não haver vencido é a vergonha de nunca ter lutado. (Rui Barbosa)

RESUMO

O aumento de usuários e o surgimento de aplicações de redes sofisticadas impulsionam as pesquisas para aprimorar as tecnologias de transmissão de dados, e assim suprir a exigência por largura de banda. Em redes ópticas, um dos principais avanços é o surgimento da multiplexação de comprimento de onda (WDM). Desta forma, uma questão essencial no projeto de redes ópticas compreende na definição de como a rede será controlada, isto é, qual tipo de sinalização será utilizado para reserva de recursos, definição de rotas, tratamento de falhas, entre outras funções formadoras do plano de controle. Isso implica na necessidade de diversos dispositivos para garantir o bom funcionamento da rede. A diversidade e complexidade de administração desses dispositivos incentivam a criação do GMPLS (*Generalized Multiprotocol Label Switching*), a fim de prover controle, não somente para domínios baseados em pacotes (como faz o MPLS - *Multiprotocol Label Switching*), mas também em tempo, comprimento de onda e fibra. Porém, a comutação de rótulos sobre a multiplexação de comprimento de onda pode gerar um problema NP-Completo envolvendo o roteamento e a associação de comprimento de onda, uma vez que se ambas não obtiverem sucesso, ocorrerá o bloqueio da conexão e perda de desempenho da rede. Outra questão relevante é que, em redes totalmente ópticas, existem problemas inerentes da camada física os que influenciam na probabilidade de bloqueio e devem ser levados em consideração em algoritmos RWA (roteamento por associação de comprimento de onda). O presente trabalho realiza o estudo do plano de controle GMPLS e de algoritmos RWA para o estabelecimento de conexões em redes WDM transparentes. Além disso, é feito um estudo de duas restrições da camada física (dispersão por modo de polarização e relação sinal ruído óptica) inserindo-as no algoritmo RWA para diminuir a probabilidade de bloqueio devido a elas. Os resultados mostraram que o algoritmo *MostUsed* possui melhor desempenho em relação ao *BestFit* e ao *Random* quando considerado bloqueio por falta de recursos (lambdas). Além disso, o uso de algoritmos cientes de restrições da camada física influencia significativamente na diminuição da probabilidade de bloqueio. Portanto, o melhor desempenho foi observado no uso de algoritmos cientes de restrições físicas juntamente com o algoritmo *MostUsed*.

Palavras-chave: Redes Ópticas Transparentes, WDM, GMPLS e RWA.

ABSTRACT

The increase in the number of users and the emergence of sophisticated network applications motivate the research to improve the data-communication technologies, and thus to meet the requirement for bandwidth. In optical networks, one of the main advances is wavelength division multiplexing (WDM). An essential issue in designing of optical networks is how the network will be controlled, that is, which type of signaling will be used for resources reservation, routing and wavelength assigning, and how physical impairments will be dealt with. This implies in the necessity of several devices to guarantee the good functioning of the network. The diversity and complexity of administration of these devices stimulate the creation of GMPLS (Generalized Multiprotocol Label Switching), in order to provide control, for domains not only based on packages (as it makes the MPLS - Multiprotocol Label Switching), but also on time slots, wavelength and fiber. However, the labels switching on the wavelength multiplexing can generate a NP-complete problem involving the routing and wavelength assignment: if both do not succeed, the connection blocking will occur with and loss of network performance. Another relevant question is that, in all-optical networks, there is some physical impairment that influence the blocking probability and must be taken in consideration in algorithms RWA. This work presents the study of the control plan GMPLS and RWA algorithms for the setting up of connections in all-optical WDM networks. Moreover, the study of two physical impairments (polarization mode dispersion and optical signal noise rate) was done, inserting them in RWA algorithm to reduce the blocking probability due to them. The results had shown that the MostUsed algorithm has better performance than the BestFit and the Random one when considered the connection blocking due to resources (λ s). Moreover, the use of impairments-aware algorithms influence significantly in the reduction of the blocking probability. Therefore, the more advantageous performance was observed in the use of impairment-aware algorithms simultaneously with the MostUsed algorithm.

Keywords: All-Optical Networks, WDM, GMPLS e RWA.

ÍNDICE DE FIGURA

<i>Figura 1: Espectro eletromagnético: faixa utilizada pelas comunicações ópticas em ordem cronológicas.</i>	3
<i>Figura 2: Atenuação presente em diversos comprimentos de onda (SAVASINI e SÁENZ, 2005).</i>	4
<i>Figura 3: Funcionamento de um amplificador óptico EDFA (SAVASINI e SÁENZ, 2005).</i>	4
<i>Figura 4: Evolução da estrutura de redes ópticas para modelo em duas camadas (ALOIA, 2003; ZULIANI, 2006; KORNIK e RÓZYCKI, 2006).</i>	5
<i>Figura 5: Princípio do WDM.</i>	15
<i>Figura 6: Grade de comprimentos de onda ITU (MUKHERJEE, 2006).</i>	17
<i>Figura 7: Representação da base de dados contida no roteador (CUNHA, 2006).</i>	19
<i>Figura 8: Localização de um rótulo MPLS e seus campos.</i>	20
<i>Figura 9: Encaminhamento de pacotes e troca de rótulos MPLS (ZULIANI, 2006).</i>	21
<i>Figura 10: Configuração de um LSP. As setas azuis representam o pedido de conexão pelo nó upstream, setas vermelhas a resposta do nó downstream quanto ao rótulo e a linha verde pontilhada o fluxo dos dados.</i>	23
<i>Figura 11: Hierarquia LSP (FARREL e BRYSKIN, 2006).</i>	26
<i>Figura 12: Rótulos generalizados.</i>	27
<i>Figura 13: Disposição em blocos da arquitetura do plano de controle GMPLS.</i>	28
<i>Figura 14: Sinalização na criação de um LSP (ZULIANI, 2006).</i>	31
<i>Figura 15: Representação dos três tipos de roteamentos. Roteamento fixo (a), roteamento fixo-alternativo (b) e roteamento adaptativo (c) (MUKHERJEE, 2006).</i>	39
<i>Figura 16: Degradação sofrida pelo sinal nos diversos equipamentos em redes ópticas transparentes (MARTÍNEZ et al, 2006).</i>	43
<i>Figura 17: Dispersão entre dois modos de polarização. Ey e Ex representam os dois principais planos de oscilação.</i>	45
<i>Figura 18: Algoritmo IRWA. (a) primeira abordagem, (b) segunda abordagem.</i>	49
<i>Figura 19: Algoritmo RWA ciente de PMD e OSNR (FERES, 2009).</i>	50
<i>Figura 20: Exemplo da utilização do Suggested Vector (ADRIOLLI et al., 2006).</i>	54
<i>Figura 21: Modelo de sinalização proposto por (Muñoz, Martínez e Junyent, 2007).</i>	57
<i>Figura 22: Arquitetura do caminho óptico simulado por Huang e colaboradores (2005).</i>	59
<i>Figura 23: Representação modular da arquitetura do GLASS.</i>	65
<i>Figura 24: Representação da classe PolarizationModeDispersion que realiza o cálculo da PMD.</i>	68
<i>Figura 25: Representação da classe SignalNoiseRate que realiza o cálculo da PMD.</i>	69
Figura 26: Modelos de rede comparados. Baseado em (HUANG, HERITAGE e MUKHERJEE, 2005).	71
<i>Figura 27: Fases do projeto Kyatera.</i>	72
<i>Figura 28: Disposição geográfica da rede Kyatera.</i>	73
<i>Figura 29: Topologia parcial do projeto Kyatera utilizada para realização dos testes</i>	73
<i>Figura 30: Topologia utilizada para realização dos testes (PAVANI et al., 2008).</i>	75
<i>Figura 31: Comparação entre os algoritmos Random, BestFit e MostUsed para 4 comprimentos de onda disponíveis.</i>	76
<i>Figura 32: Comparação entre os algoritmos Random, BestFit e MostUsed para 10 comprimentos de onda disponíveis.</i>	77
<i>Figura 33: Comparação feita entre os algoritmos RWA sem e com ciência de PMD com B = 10 Gbps.</i>	78
<i>Figura 34: Comparação feita entre os algoritmos RWA sem e com ciência de PMD com B = 100 Gbps.</i>	79
<i>Figura 35: Causas de bloqueio de conexão.</i>	79
<i>Figura 36: Probabilidade de bloqueio versus a carga usando algoritmo FirstFit no cenário Kyatera.</i>	81
<i>Figura 37: Probabilidade de bloqueio versus a carga usando algoritmo MostUsed no cenário Kyatera.</i>	81
<i>Figura 38: Probabilidade de bloqueio versus a carga usando algoritmo Randon no segundo cenário.</i>	82
<i>Figura 39: Probabilidade de bloqueio versus a carga usando algoritmo FirstFit no segundo cenário.</i>	82

Figura 40: Probabilidade de bloqueio versus a carga usando algoritmo MostUsed no segundo cenário.83

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1: Tabela de atribuição a uma FEC (ZULIANI, 2006)..</i>	<i>21</i>
<i>Tabela 2: LFIBs de Y, W e Z (ZULIANI, 2006)..</i>	<i>22</i>
<i>Tabela 3: Heurísticas utilizadas para atribuição de comprimento de onda (BRASSOLATI, 2006)..</i>	<i>41</i>
<i>Tabela 4: Algumas restrições físicas que podem ocorrer em redes WDM transparentes modificada de (MARTÍNEZ et al, 2006).</i>	<i>44</i>
<i>Tabela 5: Trabalhos que consideram restrições físicas em seus modelos. Modifica de (MARTÍNEZ, PINART E, COMELLAS, 2006).</i>	<i>63</i>
<i>Tabela 6: representação das cidades do Kyatera usados na simulação</i>	<i>74</i>
<i>Tabela 7: Parâmetros utilizados nos testes.</i>	<i>77</i>
<i>Tabela 8: Parâmetros utilizados para simulação.</i>	<i>80</i>

LISTA DE SIGLAS

ADMs	Add-Drop Multiplexors
ADSL	Assymmetric Digital Subscriber Line
ASE	Amplified Spontaneous Emission
ASON	Automatically Switched Optical Network
DLE	Dynamic Lightpath Establishment
DWDM	Division Wavelength Multiplexing
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
FDM	Frequência Division Multiplexing
FRP	Forward Reservation Protocol
FSC	Fiber-Switch Capable
FWM	Four wave mixing
GMPLS	Generalized MuiltProtocol Label Switching
ISCD	Interface Switching Capability Descriptor
L2SC	Layer-2 Switch Capable
LSA	Link State Advertisement
LSC	Lambda Switch Capable
MPLS	MuiltProtocol Label Switching
NGI	Next Generation Internet
OXC	Cross-Connects ópticos
OSNR	Optical Signal-to-Noise Ratio

PMD	Polarization Mode Dispersion
SLE	Static Lightpath Establishment
TDM	Time Division Multiplexing
UDP	User Datagram Protocol
VPN	Virtual Private Network
IRWA	Impairment-aware RWA
SIR	Source Initiated Reservation
SPM	Self-phase Modulation
WDM	Wavelength Multiplexing
XPM	Cross-phase Modulation

SUMÁRIO

<i>CAPÍTULO I</i>	<i>1</i>
<i>INTRODUÇÃO</i>	<i>1</i>
1.1. Redes Ópticas	2
1.2. Gerência de Redes Ópticas	5
1.3. Algoritmo RWA e Restrições da Camada Física	9
1.4. Objetivos	11
1.5. Organização do trabalho	11
1.6. Considerações Finais	12
<i>CAPÍTULO II GERENCIAMENTO DE REDES WDM COM GMPLS</i>	<i>13</i>
2.1. Redes WDM	14
2.2. Evolução para DWDM	16
2.3. MultiProtocol Label Swiching (MPLS)	18
2.3.1. Funcionamento	20
2.3.2. Evolução para GMPLS	24
2.4. Conjunto de Protocolos	27
2.4.1. Protocolos de Roteamento	28
2.4.2. Protocolos de Sinalização	29
2.4.3. Protocolos de Gerenciamento de Enlace	32
2.5. Considerações Finais	33
<i>CAPÍTULO III PROBLEMA RWA E RESTRIÇÕES DA CAMADA FÍSICA: ESTUDOS E PROPOSTAS</i>	<i>34</i>
3.1. Problema RWA	35
3.1.1. Subproblema do Roteamento	37
3.1.2. Subproblema da Atribuição de Comprimento de Onda	39
3.2. Restrições da camada física em redes WDM	42
3.2.1. Dispersão por modo de polarização	45
3.2.2. Relação Sinal-Ruído Óptica (OSNR)	47
3.3. RWA com Ciência de Restrições	47
3.4. Algoritmo proposto	50
3.5. Considerações finais	51
<i>CAPÍTULO IV ESTADO DA ARTE</i>	<i>52</i>

4.1.	Trabalhos Realizados Utilizando o Plano de Controle	52
4.1.1.	Feng e colaboradores (2004)	53
4.1.2.	Muñoz, Martínez, Sorribes e Junyent (2005)	53
4.1.3.	Andriolli e colaboradores (2006)	54
4.1.4.	Veeraraghavan e Li (2007)	55
4.1.5.	Salvadori e colaboradores (2007)	55
4.1.6.	Muñoz, Martínez e Junyent (2007)	56
4.2.	Trabalhos sobre Rwa Com/Sem Restrições da Camada Física	57
4.2.1.	Cieutat e Binh (2003)	58
4.2.2.	Huang e colaboradores (2005)	58
4.2.3.	Zulkifli, Okonkwo e Guild (2006)	59
4.2.4.	Martínez e colaboradores (2006)	60
4.2.5.	Wason e Kaler (2007)	61
4.2.6.	Harhira e Pierre (2008)	61
4.2.7.	Outros Trabalhos	62
4.3.	Uso de simulações	63
4.3.1.	Lightwave Agile Switching Simulator (GLASS)	64
4.3.2.	Módulo PMD	67
4.3.3.	Módulo OSPF	68
4.4.	Considerações finais	69
<i>CAPÍTULO V RESULTADOS E DISCUSSÕES</i>		70
5.1.	Estudos de caso	70
5.1.1.	Primeiro cenário: Rede Kyatera	71
5.1.2.	Segundo cenário: Pavani <i>et al.</i> Modificado	74
5.2.	Simulação com algoritmos tradicionais	75
5.3.	Simulação com PMD	77
5.4.	Simulações com PMD e OSNR	79
5.5.	Considerações finais	83
<i>CAPÍTULO VI CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</i>		84
6.1.	Trabalhos Futuros	85
<i>REFERÊNCIAS</i>		87
<i>Apêndice A – Diagrama de classes referente aos algoritmos utilizados.</i>		98

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A entrada no novo milênio é marcada por alterações significativas na indústria de telecomunicações que geram implicações para o estilo de vida das pessoas. Existem diversos tipos de mudanças: impulsionadas pela rígida necessidade de mais capacidade na rede, pelo aumento de usuários na Internet que permanecem mais tempo conectados que antes, e assim consomem mais largura de banda (RAMASWAMI e SIVARAJAN, 2002).

Esse enorme e crescente tráfego gerado pela Internet, a partir do momento que passou de rede predominante apenas na comunidade científica e atingiu usuários comuns, impulsiona a evolução das tecnologias de rede. A oferta de serviços de entretenimento, tais como vídeo e TV, além de redes privadas (VPN – *Virtual Private Network*) faz com que o volume de tráfego de dados IP superasse o de voz, tornando-se dominante.

Para atender a esse novo contingente, as redes ópticas são cotadas como uma das principais tecnologias para transporte de dados, oferecendo taxas de 40 Gbps em cada canal, com até 160 canais por fibra (MAESSCHALCK et al, 2003; SIVALINGAMAND e SUBRAMANIAM, 2004).

1.1. Redes Ópticas

A necessidade de sistemas que permitissem comunicações simultâneas começou nas primeiras décadas do século XX. Por volta de 1926 foram criados os sistemas telefônicos com onda portadora para transmissão de dois ou quatro canais de voz. Os equipamentos sofreram rápida evolução, levando a uma enorme ampliação na quantidade de contatos telefônicos. O aumento na demanda dos serviços de telecomunicações trouxe um congestionamento e uma saturação dos sistemas que empregavam as faixas de frequência tradicionais, incluindo as frequências de microondas. Este fato motivou o emprego de frequências cada vez mais elevadas, onde as portadoras fossem capazes de transportar um número bem maior de conexões simultâneas, por meio dos sistemas de multiplexação das mensagens.

Nos últimos anos intensificaram-se as aplicações na faixa de ondas milimétricas, acima de 30 GHz, concentrando as pesquisas na idéia de se empregar frequências de luz, ainda que não fossem na faixa visível. Visualizando o espectro de frequência abaixo (Figura 1) é possível observar as regiões buscadas ao longo do desenvolvimento em fibras. Essas regiões (em vermelho) são chamadas janelas, e são utilizadas de acordo com a atenuação a qual estão sujeitas. A ordem em que foram dispostas na figura representa uma linha cronológica, ou seja, dos primeiros sistemas desenvolvidos até os atuais (CISCO, 2003).

De acordo com Mukherjee (2006), a disposições das janelas utilizadas para a transmissão óptica são representadas da seguinte maneira: a janela 2, de 200 nm, é centralizada aproximadamente em 1310 nm e possui atenuação menor que 0.5 dB/Km; centralizado em 1550 nm existe uma janela com tamanho similar à anterior, com atenuação menor que 0.2 dB/Km consistindo nas bandas *S-band*, (1460-1530 nm), *C-band* (1530-1560 nm) e *L-band* (1560-1630 nm). A combinação das duas janelas descritas provê, teoricamente, uma largura de banda de 50 THz.

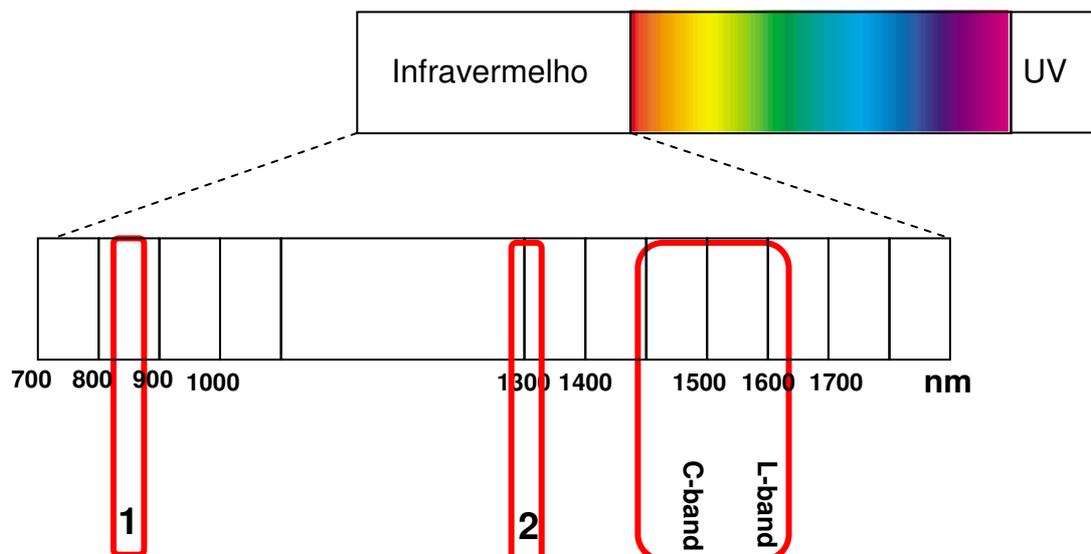


Figura 1: Espectro eletromagnético: faixa utilizada pelas comunicações ópticas em ordem cronológicas.

A utilização de comprimentos de onda com menor atenuação na quarta janela é uma opção para tentar amenizar esse efeito, no entanto ele continua presente, pois depende do comprimento de onda usado pelo *laser* e precisa ser compensado por meio de amplificadores (SAVASINI e SÁENZ, 2005) (Figura 2). Para estender os limites dos enlaces, surge, no final dos anos 80, amplificadores utilizando fibras dopadas de um elemento o qual pode amplificar o sinal (ALOIA, 2003). Segundo Mukherjee (2006) o elemento mais comumente utilizado é o érbio (EDFA – *Erbium Doped Fiber Amplifier*), cuja amplificação é entre 1525 nm e 1560 nm. No final da fibra amplificadora um *laser* transmite um forte sinal que estimula os átomos dopados em um nível de energia muito alto permitindo a liberação de fótons. A Figura 2 acompanha detalhadamente o processo de amplificação.

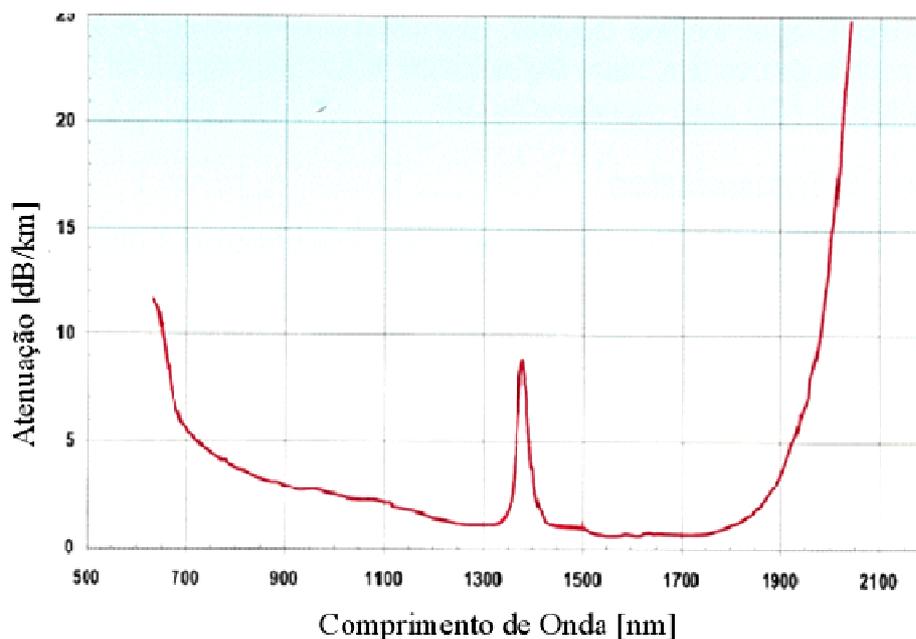


Figura 2: Atenuação presente em diversos comprimentos de onda (SAVASINI e SÁENZ, 2005).

Organizações e comunidades de projetistas de redes (IETF – *Internet Engineering Task Force*, OIF – *Optical Internet Working Fórum*) trabalham em prol da criação de especificações para definir padrões que auxiliem no desenvolvimento de novas soluções relacionadas a redes ópticas. Há um consenso de que as futuras redes de transmissão compreenderão centenas de Gbps de banda disponível (DUARTE, 2006).

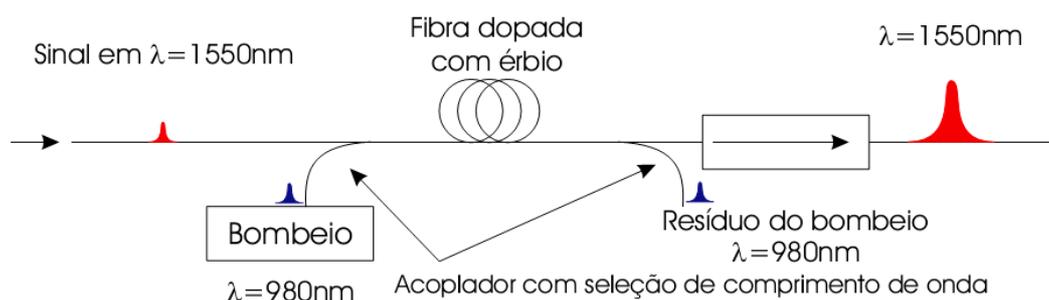


Figura 3: Funcionamento de um amplificador óptico EDFA (SAVASINI e SÁENZ, 2005).

De acordo com (MANNIE, 2004), as redes consistirão em elementos tais como roteadores, comutadores, sistemas DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*), ADMs (*Add-Drop Multiplexors*), comutadores ópticos (OXC), os quais utilizarão GMPLS (*Generalized Multi-Protocol Label Switching*) para disponibilizar

dinamicamente recursos e prover tolerância a falhas usando técnicas de proteção e restauração.

1.2. Gerência de Redes Ópticas

O volume de dados gerado pela Internet era transportado por meio de uma arquitetura composta por quatro camadas como ilustrado na Figura 4 (ALOIA, 2003; ZULIANI, 2006; KORNIK e RÓZYCKI, 2006): IP para atender aplicações e serviços; ATM para engenharia de tráfego (controle de fluxo, monitoramento e qualidade de serviço); SONET/ SDH com finalidade de oferecer qualidade de transporte à carga paga sobre o meio físico, além de monitoramento de erros e proteção; DWDM para transporte.

No entanto, esse modelo de transporte possui desvantagens. Em algumas situações de tráfego elevado pode não suportar esse cenário (ALOIA, 2003). Isso é decorrente do empilhamento não satisfatório das camadas. Com muitos níveis torna-se problemático configurar e gerenciar as características de cada camada e das interfaces entre elas. Além disso, existe a preocupação com a manutenção dos equipamentos utilizados nesse modelo (ZULIANI, 2006).

A arquitetura multicamada sofre um efeito gargalo, considerando a possibilidade de qualquer camada se comportar como limitador da escalabilidade da rede. Além disso, mostra-se como uma solução com custo elevado devido aos equipamentos exigidos em cada um dos níveis (BRASSOLATI, 2006; KORNIK e RÓZYCKI, 2006).

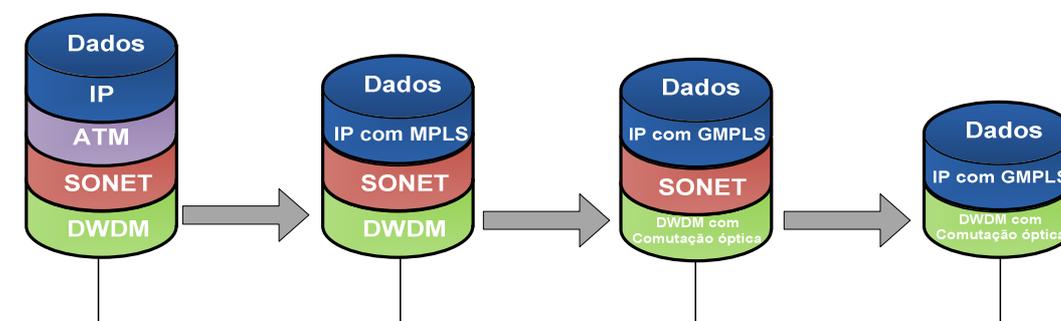


Figura 4: Evolução da estrutura de redes ópticas para modelo em duas camadas (ALOIA, 2003; ZULIANI, 2006; KORNIK e RÓZYCKI, 2006).

A necessidade de estruturas mais simples e a busca por preços mais competitivos impulsionam a evolução da arquitetura de redes para prover transporte mais eficiente. Isso refletirá na otimização dos custos da multiplexação e da comutação de dados para grande volume de tráfego.

Nesse contexto, redes WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) e sua evolução DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) mostram-se como ótimas alternativas para a diminuição do custo do bit transmitido, além de proporcionarem velocidades próximas àsquelas propostas pelas redes ópticas (dezenas de terabits por segundo), pois criam fibras virtuais dentro de uma física (BRASSOLATI, 2006; GOLDMAN *et al.*, 2007).

O natural, então, é a ocorrência da diminuição das camadas mencionadas anteriormente, sendo necessária a absorção das funcionalidades das camadas extintas pelas conservadas: aspectos de engenharia de tráfego devem ser absorvidos pela camada IP, enquanto as capacidades de transporte (proteção, roteamento e comutação) pela camada óptica (ALOIA, 2003). A Figura 4 ilustra a evolução da estrutura das redes ópticas.

No primeiro modelo ilustrado na figura (quatro camadas) é exigido um tempo muito grande para prover serviços diferentes dos existentes, ou seja, reservar recursos para um novo circuito é uma tarefa complexa e com prazo extenso devido à necessidade de reserva manual para cada camada (ZULLIANI, 2006).

É visível na figura que o futuro das redes ópticas está direcionado para um modelo estrutural de apenas duas camadas: IP transportado diretamente sobre redes fotônicas. No entanto, para potenciais avanços nessa vertente é preciso serviços IP mais inteligentes, escaláveis e flexíveis. Essa necessidade é suprida com o aparecimento das tecnologias MPLS (*Multiprotocol Label Switching*) e GMPLS (*Generalized MPLS*) (MANNIE, 2004; CUNHA, 2006).

Entidades de padronização trabalham coordenadamente a fim de padronizar um plano de controle inteligente para estabelecer circuitos de forma automática (ZULLIANI, 2006). A ITU-T (*International Telecommunication Union-Telecommunication Standardization Sector*) definiu uma arquitetura chamada ASON (*Automatically Switched Optical Network*), que define os requisitos e mecanismos de

controle e gerenciamento, independente de protocolo ou tecnologia. A proposta do plano de controle ASON é executar uma função de restauração, facilitar a configuração rápida e eficiente de conexões na camada de transporte, além de reconfigurar ou modificar conexões as quais suportam chamadas previamente estabelecidas (ITU-T, 2006).

O plano de controle ASON é composto por diferentes componentes que provêm funções específicas incluindo aquelas de determinação e sinalização de rotas, por meio de três planos distintos: Plano de Controle, para automatizar a criação e encerramento de circuitos entre origem e destino; Plano de Gerência, responsável pela configuração, monitoramento, contabilização e recuperação de falhas; e para finalizar, o Plano de Transporte com a função de transportar efetivamente a informação (DUARTE, 2006; ITU-T, 2006).

De acordo com Grobe e Harris (2007) existe a necessidade das redes tornarem-se mais dinâmicas, serem mais efetivas no uso de recursos e assegurar a manutenção desses objetivos. Nesse contexto, a ASON alcança as necessidades listadas, reduzindo o gargalo de dados em áreas metropolitanas e facilitando a transição para redes ópticas automatizadas e de auto-recuperação.

Paralelo ao desenvolvimento da arquitetura ASON, existe o plano de controle GMPLS que pode ser interpretado na perspectiva do modelo anteriormente descrito (BRYSKIN E FARREL, 2006). O modelo ASON também foi utilizado pela OIF (*Optical Internet working Forum*) para criar a interface de acesso à rede de transporte óptico, UNI (*User Network Interface*) que proporciona mecanismos para a solicitação de circuitos em uma rede óptica (OIF, 2001).

O protocolo IP, melhorado com o advento das capacidades de engenharia de tráfego do MPLS, é atualmente utilizado e muito cotado para a nova geração da Internet (NGI - *Next Generation Internet*). Além disso, avanços na tecnologia WDM fazem dela uma forte candidata para a base tecnológica da próxima geração do transporte em redes ópticas, dessa forma, uma das possíveis arquiteturas para NGI é IP/MPLS-over-DWDM (KUBILINSKAS e PIÓRO, 2004). No entanto, o MPLS abrange apenas comutação de rótulos para redes IP (pacotes), ou seja, seus protocolos são específicos para esse fim. Para alcançar uma rede verdadeiramente dinâmica, é necessário um método de controle

atuando dentro de um núcleo óptico (DUARTE, 2006). É a partir dessa necessidade que a generalização do MPLS (GMPLS) é proposta.

Com a finalidade de aumentar a velocidade de encaminhamento de pacotes e oferecer engenharia de tráfego, o MPLS introduziu um conceito de comutação de rótulos na camada dois, facilitando a operação da rede por utilizar um caminho (DUARTE, 2006; SHIOMOTO, 2004). Essa nova idéia aproxima-se do conceito de circuito virtual. Redes como X.25, ATM e *frame relay* também incluem, em cada pacote, um rótulo identificador de circuito virtual. Em seguida, cada switch realiza uma pesquisa de rótulo em uma tabela com a finalidade de encontrar a rota adequada. No entanto, existem diferenças substanciais entre o estabelecimento de rotas e o modo como a Internet trata isso, sendo assim, a técnica proposta pela comutação de rótulos certamente não se equivale à comutação de circuitos tradicional (TANENBAUM, 2003).

A limitação em relação ao número de protocolos tratados no MPLS sugere seu aperfeiçoamento de modo a englobar demais tecnologias presentes nas estruturas das redes atuais, estendendo o rótulo para TDM (*Time Division Multiplexing*), comprimento de onda e fibra (SHIOMOTO, 2004). De acordo com (FARREL e BRYSKIN, 2006) a base de protocolos de controle do MPLS poderiam ser aplicados dentro de redes de transportes para torná-las mais reativas, fáceis para controlar e mais receptivas aos requerimentos de serviços avançados.

O GMPLS oferece um plano de controle comum para o manejo de diversas tecnologias de rede, permitindo serviços de grande magnitude (FARREL e BRYSKIN, 2006). A manutenção e gerenciamento da rede são simplificados por: automatização do provisionamento fim-a-fim de conexões orientadas a serviço, manejo de recursos de rede, oferta de Qualidade de Serviço rígida e alta resiliência para possíveis falhas (GROBE E HARRIS , 2007). O conjunto de protocolos contidos no plano de controle fornece uma semântica consistente e uniforme para sinalização, roteamento e gerenciamento de enlace. Os protocolos pertencentes a essa divisão são respectivamente RSVP-TE (*Resource Reservation Protocol – Traffic Engineering*), OSPF-TE (*Open Shortest Path First-Traffic Engineering*), LMP (*Link Management Protocolo*) (DUARTE, 2006; MANNIE, 2004; CUNHA, 2006).

1.3. Algoritmo RWA e Restrições da Camada Física

Como mencionado anteriormente, a estrutura de duas camadas IP/GMPLS sobre DWDM tende a permanecer para a próxima geração de redes ópticas. Essa combinação revela algumas dificuldades em relação ao roteamento e atribuição de comprimento de onda. Em redes DWDM, múltiplos canais independentes e diferenciados por seus comprimentos de onda são transmitidos sobre uma única fibra operando em suas velocidades máximas. A identificação dos comprimentos de onda é essencial para o bom funcionamento da rede, pois as conexões são representadas por eles. Sobre cada ligação entre um par origem/destino é formado um caminho óptico com um comprimento de onda associado, chamado de *lightpath*. Dado um conjunto de requisições por conexão, a forma como serão estabelecidos seus *lightpaths* (roteamento e atribuição de num comprimento de onda) é chamado de problema RWA (*Routing and Wavelength Assignment*). De uma maneira mais simplificada, o objetivo de um algoritmo RWA é montar *lightpaths* e nomear comprimentos de onda de forma a minimizar, em média, o bloqueio para os pedidos atuais e futuros (CIEUTAT E BINH, 2003).

O tráfego em cada conexão de uma rede óptica pode ser encaminhado com ou sem conversor de comprimento de onda. Caso seja seguida a segunda opção, um caminho deve fazer uso do mesmo comprimento de onda em todo seu percurso garantindo a restrição de continuidade de comprimento de onda. Essa restrição é única em redes DWDM e pode culminar em uma ineficiente utilização dos comprimentos de onda além de queda no desempenho. Para contornar esses problemas é possível introduzir conversores de comprimento de onda aos nós da rede para permitir a conversão óptica de um comprimento de onda em outro. No entanto, essa tecnologia ainda é imatura e de alto custo (CIEUTAT E BINH, 2003; DANTE, 2006).

Tipicamente o tráfego de rede pode ser estático ou dinâmico. Dessa forma o problema RWA pode ser classificado como: SLE (*Static Lightpath Establishment*) em que todos os pedidos de conexão são realizados previamente e não mudam, enquanto no DLE (*Dynamic Lightpath Establishment*) todas as requisições chegam dinamicamente (CIEUTAT E BINH, 2003; DANTE, 2006).

A grande capacidade de transporte da tecnologia WDM não é totalmente usada pelas redes ópticas atuais. Tal ineficiência sobre o uso da largura de banda é devido ao uso de *transponders* de alto custo para conversão eletro-óptica (redes opacas) causando um gargalo eletrônico (grande parte do problema está no desempenho do aparato eletrônico).

As redes opacas possuem importantes benefícios: regeneração eletrônica do sinal e capacidade intrínseca de converter comprimentos de onda. Apresentam, porém, algumas desvantagens: complexa estrutura de camadas, sensibilidade a formatos de sinal e taxa de transmissão, elevado CAPEX¹ e OPEX² e não aproveita de maneira ótima a capacidade do WDM. Assim, futuras redes ópticas deverão superar essas limitações otimizando o uso da tecnologia WDM. Isso será alcançado com o uso de comutadores totalmente ópticos (ROADM – *Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexers*, OXC – *Optical Cross-connects*) que atuam no domínio óptico (redes transparentes). A introdução desses comutadores permite eliminar a necessidade de transponders eletro-ópticos, reduzindo o custo efetivo da rede. Porém, isso também resulta na perda da regeneração do sinal que, por sua vez, favorece o aparecimento de: limitação da camada física (dispersão, atenuação, não linearidades), ruído de amplificação óptica (ASE – *Amplified Spontaneous Emission*) e interferências produzidas pelos componentes ópticos (MARTÍNEZ *et al.*, 2006). Nesse contexto, para garantir uma boa qualidade do sinal e diminuir a probabilidade de bloqueio perante essas restrições, é necessário incluir alguns parâmetros nos algoritmos de roteamento e atribuição de comprimento de onda. Esses algoritmos são os chamados IRWA (*Impairment-Aware Routing and Wavelength Assignment*) (HUANG, HERITAGE e MUKHERJEE, 2005), muito visados pela comunidade acadêmica e industrial (SALVADORI *et al.* 2007).

Neste contexto, as restrições estudadas no presente trabalho foram a dispersão de modo de polarização (PMD), considerada uma das mais penosas em redes com taxas de transmissão a partir de 10 Gbps e a relação sinal ruído (OSNR) do canal.

¹ Sigla derivada da expressão *Capital Expenditure*, que significa o capital utilizado para adquirir ou melhorar os bens físicos de uma empresa, tais como equipamentos, propriedades e imóveis.

² Sigla derivada da expressão *Operational Expenditure*, que significa o capital utilizado para manter ou melhorar os bens físicos de uma empresa, tais como equipamentos, propriedades e imóveis. As despesas operacionais (muitas vezes abreviado a OPEX) são os preços contínuos para dirigir um produto, o negócio, ou o sistema

1.4. Objetivos

O objetivo desse trabalho é analisar a probabilidade de bloqueio de conexões para algoritmos RWA em três situações distintas:

- Sem ciência de restrições físicas em uma rede ideal (sem restrições físicas);
- Sem ciência de restrições físicas em uma rede que sofre degradação do sinal.
- Com ciência de restrições físicas em uma rede que sofre degradação do sinal.

Analisa, também, aspectos de controle de redes ópticas utilizando a tecnologia GMPLS por meio do simulador GLASS (*GMPLS Lightwave Agile Switching Simulator*) e extensões implementadas.

1.5. Organização do trabalho

A seqüência do presente trabalho é dividida em cinco capítulos:

- Capítulo II – Gerenciamento de Redes WDM com GMPLS: descreve aspectos das tecnologias WDM, DWDM, MPLS e GMPLS.
- Capítulo III – Problema RWA e Restrições da Camada Física: refere-se ao problema RWA tradicional, às restrições físicas e a algoritmos IRWA.
- Capítulo IV – Estado da Arte: apresenta trabalhos relacionados aos assuntos abordados.
- Capítulo V – Resultados e Discussões.
- Capítulo VI – Conclusões e trabalhos futuros.

1.6. Considerações Finais

O presente capítulo abordou aspectos gerais relacionados às redes ópticas, dando ênfase às tecnologias de comutação de rótulos, multiplexação por divisão de comprimento de onda e algoritmos RWA com e sem ciência de restrições físicas. Ele contextualizou o trabalho, apresentando os problemas a serem atacados, sua motivação e objetivos.

CAPÍTULO II

GERENCIAMENTO DE

REDES WDM COM GMPLS

A procura crescente por aplicações de rede sofisticadas, somado ao aumento de tráfego na Internet, deu origem à necessidade de aprimoramento nas tecnologias de transmissão de dados para suprir a exigência por largura de banda .

De acordo com (TANENBAUM, 2003), os custos para manter troncos de alta ou baixa largura de banda entre duas estações de comutação são equivalentes, indicando que são decorrentes da instalação propriamente dita. Assim, as companhias telefônicas desenvolveram esquemas elaborados para multiplexar chamadas em um único tronco físico: TDM (*Time Division Multiplexing*) e FDM (*Frequêncy Division Multiplexing*).

Em se tratando de redes ópticas, um dos principais avanços foi o surgimento da multiplexação por comprimento de onda (WDM), pois apresenta transmissão com taxas próximas aos limites teóricos das fibras ópticas. Uma questão essencial no projeto de redes ópticas trata da definição de como a rede será controlada, isto é, qual o tipo de sinalização será utilizado para reserva de recursos, definição de rotas, tratamento de falhas, entre outras funções formadoras do plano de controle (GOLDMAN *et al.*, 2007). Isso implica na necessidade de diversos dispositivos para garantir o bom funcionamento da rede, tais como OXCs (*optical cross-connect*), ADMs (*Add/Drop Multiplexing*), multiplexadores e demultiplexadores de comprimento de onda.

A diversidade e a complexidade de operação desses dispositivos influenciaram a evolução e o aprimoramento do conjunto de protocolos GMPLS (*Multiprotocol Label Switching*) a fim de prover controle, não somente para domínios baseados em pacotes, mas também em tempo, comprimento de onda e fibra (SZEGEDI, GAJEWSKI e IMAJUKU, 2007).

Alguns problemas relacionados ao roteamento tradicional de pacotes (tais como *overhead*) incentivaram o desenvolvimento da comutação de rótulos. Cada pacote, em uma camada de rede sem conexão (datagrama), trafega de um roteador para outro que decide qual caminho a ser seguido. Os roteadores analisam os cabeçalhos dos pacotes e executam algum algoritmo de roteamento. A nova rota (próximo salto) é escolhida independentemente por cada roteador baseado na análise do cabeçalho do pacote e no resultado da execução do algoritmo (ROSEN, VISWANATHA E CALLON, 2001). A escolha dessa nova rota é proveniente de uma associação de prefixos entre o endereço contido no pacote e os endereços presentes na tabela FIB³. Esse processo é relativamente lento, principalmente quando a FIB possui quantidade elevada de entradas e parâmetros de qualidade de serviço (*Quality of Service – QoS*) (CUNHA, 2006).

Planos de controle baseados no GMPLS oferecem potenciais capacidades para reduzir a quantidade de tarefas que o sistema de gerência de rede (*network management system - NMS*) fazem em ambientes legados (SHIOMOTO, INOUE e OKI, 2008).

2.1. Redes WDM

Em redes de fibra óptica, é utilizada a tecnologia WDM para desempenhar a tarefa de multiplexação; cada comprimento de onda pode representar um canal de comunicação, multiplexados em uma única fibra e independentes uns dos outros. A Figura 5 ilustra o princípio básico do WDM.

³FIB (*Forwarding Information Base* - base de dados de envio): contém a lista com os endereços de rede conhecidos pelo roteador e a interface apropriada para encaminhamento do pacote.



Figura 5: Princípio do WDM.

Os comprimentos de onda 1, 2, 3, 4 e 5 representam cinco fibras distintas e são combinados em uma única fibra compartilhada para serem transmitidos a um host remoto. O número de comprimentos de onda nas duas extremidades é equivalente.

A comunicação entre dois usuários finais em uma rede WDM ocorre por meio de canais ópticos denominados *lightpath*, representado por uma seqüência de enlaces ópticos entre um par origem/destino. Um *lightpath* pode atravessar ligações de múltiplas fibras, por exemplo, prover uma conexão entre dois nós distantes na topologia de rede de fibra física e com pesado fluxo de tráfico. Cada nó intermediário no *lightpath* provê uma facilidade de passagem (*bypass*) óptica essencialmente para apoiá-lo. As redes capazes de prover *lightpaths* são denominadas redes roteadas por comprimento de onda.

A tecnologia WDM é a favorita em comunicação óptica pelo fato de oferecer um método rentável para prover concorrência entre transmissões múltiplas no domínio de comprimento de onda. Múltiplos canais podem ser operados simultaneamente ao longo de uma fibra simples, cada qual em um comprimento de onda diferente. Assim, em WDM alcançam-se elevadas larguras de banda por fibra (por exemplo, 100 Gbps), que são compatíveis com o máximo da velocidade em relação ao processo eletrônico. Redes ópticas baseadas em WDM são contempladas por englobar áreas locais, metropolitanas e de longa distância (DORF, 2003).

Um lambda (comprimento de onda) pode transportar conteúdos digitais distintos utilizando taxas variadas e em diferentes formatos ou encapsulamentos (SONET, Ethernet e ATM). Podem trafegar, simultaneamente, um sinal Ethernet OC-12 de 622 Mbps e, na mesma fibra, em outro comprimento de onda, um sinal SONET OC-192 de aproximadamente 10 Gbps (BICUDO, 2005; TANWIR, 2007).

A independência dos canais proporcionada por diferentes comprimentos de onda torna a camada óptica conhecedora das conexões, pois é possível distingui-las pelos diferentes lambdas empregados (BRASSOLATI, 2006). Essa estrutura somada a um plano de controle é definida como ION *Intelligent Optical Network* (CIEUTAT; BINH, 2003).

2.2. Evolução para DWDM

A tecnologia WDM tem evoluído em grande escala. Foi inicialmente utilizada no final da década de 80, usando dois comprimentos de onda amplamente espaçados nas regiões de 1310 e 1550 nm (ou 850 e 1310 nm). Já no início da década de 90, surgiu a segunda geração do WDM, usando de dois a oito canais, estes canais são espaçados num intervalo de 400 GHz na janela de 1550 nm. Em meados da mesma década, o sistema *dense* WDM (DWDM) evoluiu para 16 a 40 canais e espaçamento com frequências de 100 a 200 GHz. Já no final da década de 90, o DWDM disponibilizava de 64 a 160 canais paralelos, densamente distribuídos em intervalos de 25 a 50 GHz (BRACKETT, 1990; CISCO, 2003; LAIDEVANT, RAMBACH e HOFFMANN, 2007).

Isso significa que com 32 comprimentos de onda 5 milhões de pessoas poderiam falar simultaneamente ao telefone. Sistemas atuais podem transmitir até 160 comprimentos de onda em canais de dez 10 Gbps, totalizando 1,6 Tbps sobre uma única fibra (BICUDO, 2005; MUKHERJEE, 2006; SILVA, 2004; DIXIT, 2003).

De acordo com Mukherjee (2006), o espaçamento entre os canais pode ser de 200 GHz (1,6 nm), 100 GHz (0,8 nm), 50 GHz (0,4 nm), podendo chegar a 25 GHz (0,2 nm). A grade de 100 GHz é representada na Figura 6. Para um agrupamento denso de canais, a grade de 50 GHz foi definida com o acréscimo de um canal exatamente ao meio de dois canais de 100 GHz. As grades de 50 e 100 GHz são definidas na mesma frequência de 193,1 THz (1552,52 nm).

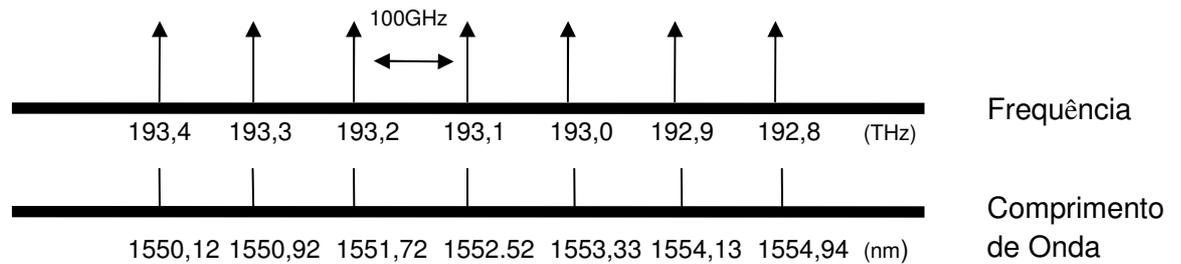


Figura 6: Grade de comprimentos de onda ITU (MUKHERJEE, 2006).

O funcionamento da tecnologia DWDM é semelhante ao de seu antecessor WDM (Figura 5), com a diferença de ter mais comprimentos de onda a serem multiplexados na fibra. Segundo Cisco (2001) as principais funções executadas pelo sistema são:

- Geração de sinal: a fonte deve prover luz estável dentro de uma largura de banda específica e estreita a qual transporta dados digitais, modulados como um sinal analógico;
- Combinação de sinais: emprego de multiplexadores para combinar os sinais. As perdas inerentes ao processo de multiplexação e demultiplexação dependem do número de canais e são reduzidas com o emprego de amplificadores ópticos que atuam sem a necessidade de conversão elétrica;
- Transmissão do sinal: os efeitos de *crosstalk* e degradação ou perda devem ser considerados em transmissão de fibra óptica. Esses efeitos podem ser minimizados por meio do controle de variáveis, tais como o espaçamento de canais, a tolerância de comprimento de onda e níveis potência da fonte de luz.
- Separação do sinal recebido: no terminal receptor o sinal multiplexado deve ser separado.
- Recepção do sinal: a demultiplexação do sinal é recebida por um fotodetector.

Na tecnologia DWDM, é possível que cada sinal transmitido esteja em taxas ou formatos diferentes, assim como mencionado na sessão anterior. Desta forma, a capacidade de transmissão de sistemas DWDM pode ser ampliada consideravelmente e

de maneira relativamente fácil, além de ser capaz de manter o mesmo grau de desempenho, confiabilidade e robustez do sistema.

O controle e gerenciamento de sistemas DWDM podem ser realizados com o auxílio da tecnologia de comutação de rótulos simplificando a configuração de conexões.

2.3. MultiProtocol Label Swichting (MPLS)

Cabeçalhos de pacotes contêm mais informações que o necessário, simplesmente para escolher o próximo salto. Sendo assim, (ROSEN, VISWANATHA e CALLON, 2001) sugere uma maneira diferente para o encaminhamento de pacotes: primeiro dividir as entradas em classes de equivalência (*Forwarding Equivalence Classes – FECs*) e em seguida, mapeá-las em um próximo salto. À medida que decisões de encaminhamento são concedidas, diferentes pacotes mapeados em diferentes classes são indistinguíveis. Todos os pacotes pertencentes a uma particular, vindos de um nó comum, seguirão o mesmo caminho (ou um dos caminhos associados à FEC).

Um rótulo é um identificador pequeno e de tamanho fixo utilizado para representar uma FEC, usualmente com valor local (ROSEN, VISWANATHA e CALLON, 2001). Geralmente um pacote é associado a uma FEC devido ao seu endereço de destino proveniente da camada de rede. Porém o rótulo não costuma ser apenas uma codificação de endereço. Ao vincular o pacote a uma classe de equivalência (rotulado – *label binding*), o transporte será baseado na comutação de rótulos. Em alguns casos, a designação de um rótulo pode ser baseada em critérios de envio com o intuito de proporcionar engenharia de tráfego e diferenciação de serviço.

O termo *multiprotocol* em MPLS significa que a tecnologia pode ser utilizada como base de qualquer protocolo de rede (IP, ATM, *Frame Relay*). Esta arquitetura foi padronizada pelo IETF – *Internet Engineering Task Force*. Os fundamentos do MPLS estão especificados em (ROSEN, VISWANATHA E CALLON, 2001).

No *label switching* cada pacote recebe um rótulo utilizado para definir sua rota, o qual serve de base para o encaminhamento. Cada rótulo é um identificador único, e geralmente com valor local, onde cada roteador usa-o para determinar o próximo salto. Os roteadores (LSR – *Label Switching Router*) possuem uma base de dados de envio (LFIB – *Label Forwarding Information Base*) para mapear o par interface/rótulo de entrada e de saída como ilustrado na Figura 7. (FARREL e BRYSKIN, 2006; CUNHA, 2006).

O pacote é encaminhado de acordo com o rótulo de entrada e na saída recebe outro, que será base para os encaminhamentos subsequentes. Na Figura 7, a transmissão do roteador A para o B ocorre por meio do par 2/15 (interface/rótulo) chegando à interface 3 (em B). B verifica sua base de dados, encontra o par 2/9 correspondente, faz a troca do rótulo 15 por 9 e envia os dados pela saída 2 (como indicado na tabela). As linhas coloridas representam um rótulo que foi atribuído ao pacote e o caminho seguido por ele. A diminuição de comparações feitas em relação ao modelo tradicional de associação de prefixos longa é visível, pois a quantidade de rótulos é inferior a quantidade de endereços IP.

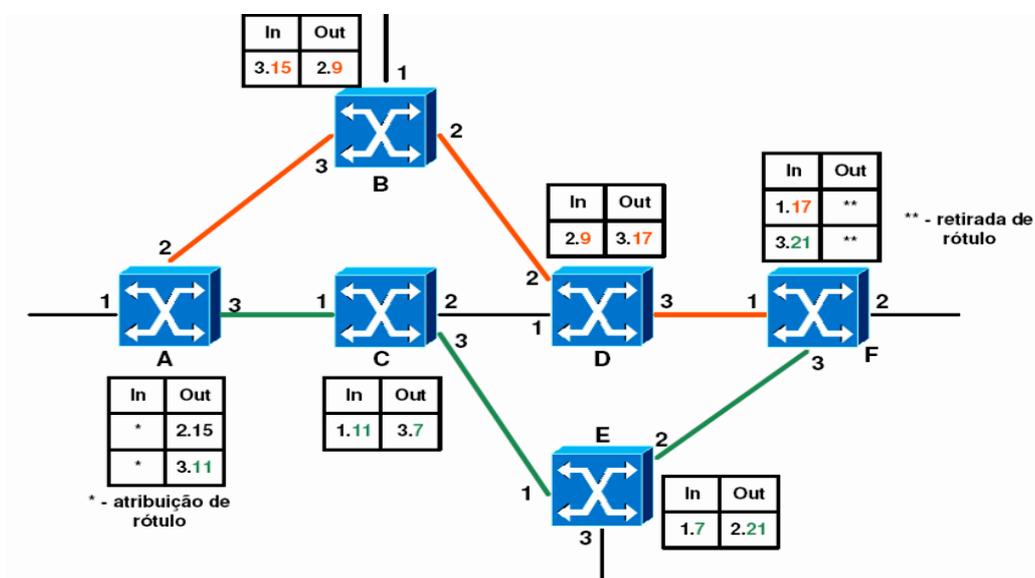


Figura 7: Representação da base de dados contida no roteador (CUNHA, 2006).

Na rede MPLS os pacotes são rotulados com a inserção de uma informação entre o cabeçalho das camadas dois e três do modelo OSI, pois originalmente não possui um espaço para esse fim. De acordo com (FARREL e BRYSKIN, 2006) a informação

adicionada carrega um rótulo de 20 bits. Minei (2005), Tanenbaum (2003) e Osborne (2003) acrescentam a existência dos campos:

- EXP (3 bits): para representar a classe de serviço, na segunda referência representado por QoS;
- S (1 bit): representa a presença de empilhamento de vários rótulos em redes hierárquicas;
- TTL (8 bits): utilizado para evitar *loops* de encaminhamento, além ser usado para trilhar o caminho.

A Figura 8 ilustra a localização e a composição do cabeçalho MPLS, também conhecido como *Shim Header* (PETERSON, 2003; FARREL e BRYSKIN, 2006). É posicionado entre a camada 2 e a camada 3 do modelo OSI, sendo assim, é intitulado como “camada 2.5” (TANENBAUM, 2003).

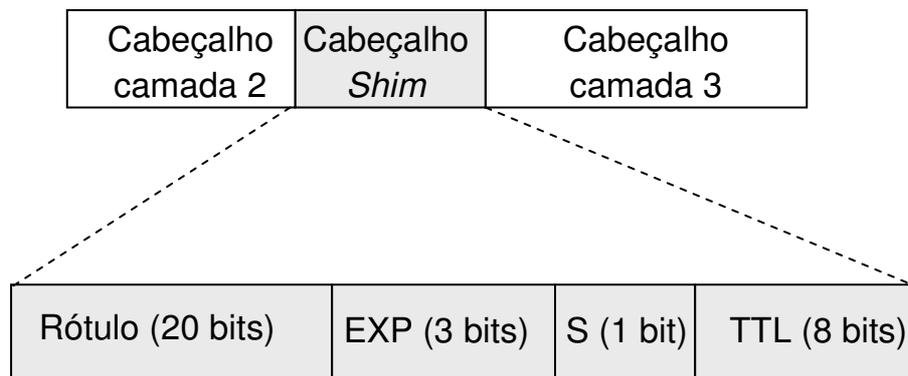


Figura 8: Localização de um rótulo MPLS e seus campos.

2.3.1. Funcionamento

Quando os pacotes são recebidos no LSR (*Label Switching Router*), ele identifica a interface sobre cada um e busca o rótulo no *Shim Header*. Esse valor é procurado na tabela LFIB para descobrir a interface de saída e qual o novo rótulo a ser anexado. Quando um roteador recebe um pacote rotulado, ele passa por três etapas (*label swapping*): procura o rótulo entrante, busca a interface e o rótulo de saída e, por

último, troca o rótulo entrante por outro apropriado e o manda para a interface de saída (OSBORNE e SIMHA, 2003).

A Figura 9, a Tabela 1 e a Tabela 2 representam as três etapas citadas. O roteador A encaminha pacotes às subredes 10.10/16 (roteador B) e 192.168.0/24 (roteador C). Baseado no endereço de destino e na Tabela 1, o LSR X associa cada pacote a uma FEC pela atribuição de um rótulo e o encaminhando ao próximo *hop*. Y, W e Z (todos LSRs) consultam suas LFIBs (representado pela Tabela 2) para proporcionar o correto encaminhamento. Na saída da nuvem MPLS, não são atribuídos rótulos aos pacotes.

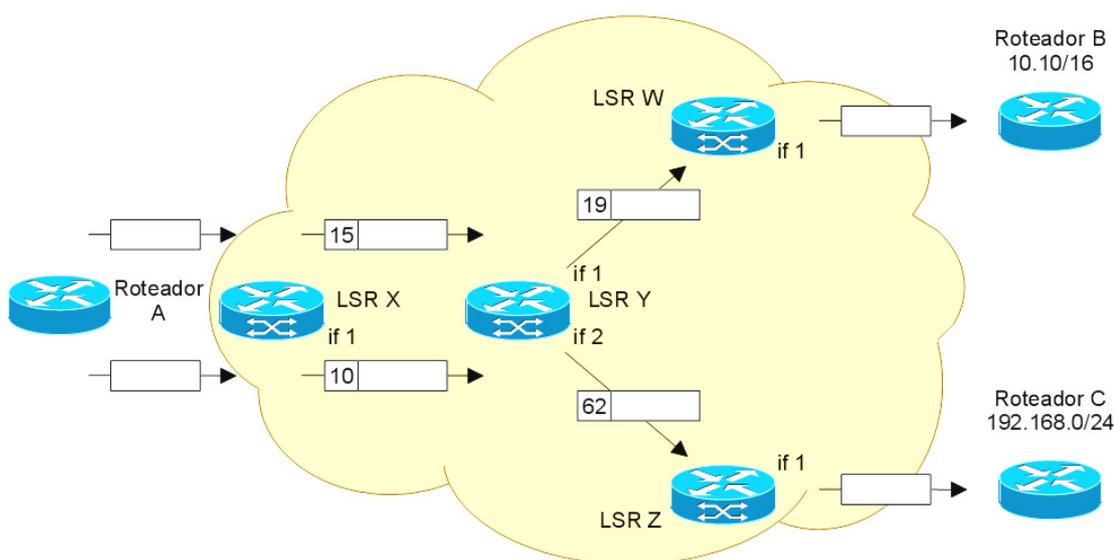


Figura 9: Encaminhamento de pacotes e troca de rótulos MPLS (ZULIANI, 2006).

Tabela 1: Tabela de atribuição a uma FEC (ZULIANI, 2006)..

FEC	RÓTULOS	PRÓXIMO HOP	INTERFACE DE SAÍDA
10.10/16	15	Y	if1
192.168.0/24	10	Y	if1

Tabela 2: LFIBs de Y, W e Z (ZULIANI, 2006)..

LSR	RÓTULO DE ENTRADA	RÓTULO DE SAÍDA	PRÓXIMO SALTO	INTERFACE DE SAÍDA
Y	15	19	W	if1
Y	10	62	Z	if2
W	19	-	B	if1
Z	62	-	C	if1

Redes MPLS utilizam dois tipos de roteadores. O primeiro é aquele presente na borda da rede (LER – *Label Edge Router*), ou seja, primeiro ou último equipamento MPLS encontrado pelo pacote, no caso da Figura 9, estão representados por LSR X, Y e Z. Na situação de entrada de pacotes, esse equipamento é denominado LSR de ingresso e na de saída LSR de egresso (ALOIA, 2003), (MINEI e LUCEK, 2005). Aqueles roteadores encontrados no interior da rede MPLS são conhecidos como LSR de núcleo. Eles participam do estabelecimento dos LSP comutando o tráfego de dados pelas rotas estabelecidas. Em outras palavras, tem a função de encaminhar os pacotes com base nos respectivos rótulos (ALOIA, 2003), (ROSEN, VISWANATHA E CALLON, 2001).

O caminho percorrido pelo pacote é chamado de LSP (*Label Switching Path*). Uma vez que o pacote já foi rotulado no começo do LSP, esse caminho já é bem conhecido e estável no roteador de egresso. Assim, a dificuldade existente está no ingresso, local de classificação (determinação para um LSP específico) dos pacotes de acordo com seu destino e serviço provido (baseado em um tipo de aplicação ou demanda de QoS) (FARREL e BRYSKIN, 2006).

Quando pacotes entram em uma rede MPLS, o roteador de ingresso (LER de ingresso) determina a qual classe de equivalência o pacote corresponde. Fluxos de dados semelhantes pertencem, na maioria das vezes, à mesma FEC. Requisitos de qualidade de serviço também podem ser utilizados para atribuição à determinada classe. Elementos pertencentes à mesma FEC são, geralmente, tratados da mesma forma e encaminhados da mesma maneira. Além disso, um mesmo rótulo é adicionado aos pacotes (MINEI e LUCEK, 2005), (ROSEN, VISWANATHA E CALLON, 2001).

Roteador de borda verifica a qual FEC o pacote entrante pertence e o encaminha por meio do LSP correspondente. Dessa forma é possível observar uma associação *pacote-rótulo-FEC-LSP*. A primeira associação é realizada apenas uma vez, o que proporciona grande escalabilidade e flexibilidade.

Na arquitetura de MPLS, a decisão para ligar um rótulo particular L para um FEC F é feita pelo LSR que está *downstream*⁴ com respeito àquela ligação. O roteador *downstream* informa, então, ao *upstream*⁵ sobre a ligação. Assim rótulos são designados ao *downstream* e a atribuição do rótulo é distribuída na direção *downstream-upstream* (ROSEN, VISWANATHA E CALLON, 2001).

É o papel do roteador de ingresso determinar o apropriado roteador de egresso e o LSP associado a uma FEC (Figura 10). A tecnologia MPLS tem a propriedade de possibilitar a multiplexação de diversos tipos de tráfego para um único LSP. Então, se for desejado pelo operador de rede, um único LSP pode ser usado para levar todo o tráfego (por exemplo, VPN, IP público e Camada 2) entre ingresso e egresso particulares.

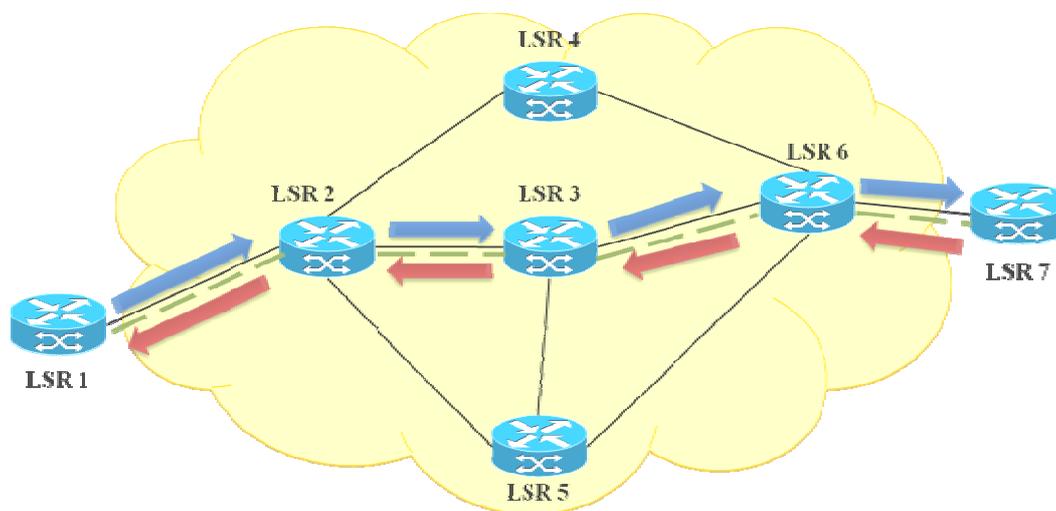


Figura 10: Configuração de um LSP. As setas azuis representam o pedido de conexão pelo nó *upstream*, setas vermelhas a resposta do nó *downstream* quanto ao rótulo e a linha verde pontilhada o fluxo dos dados.

Roteadores ao longo do caminho do LSP tomam a decisão de encaminhamento com base em um formato de cabeçalho MPLS fixo e conseqüentemente não precisam

⁴ Entende-se como *downstream* o sentido do tráfego, nesse caso, o de espera de dados.

⁵ Entende-se como *upstream* o sentido do tráfego, nesse caso, o de envio de dados.

armazenar rotas. Esta é uma propriedade importante, caso contrário, cada roteador de núcleo teria que levar informação de encaminhamento equivalente à soma da informação de encaminhamento transportada por todos os roteadores de extremidade na rede.

2.3.2. Evolução para GMPLS

Com o aumento da popularidade das redes WDM no fim dos anos 90, provedores de serviços e fornecedores de equipamentos começaram a pesquisar por um plano de controle inteligente para simplificar o provisionamento de conexões, reduzir as despesas e suportar novos serviços. Foi observado que o mecanismo de comutação básico em redes WDM é logicamente semelhante ao de dispositivos MPLS. É preciso de um comutador para converter um comprimento de onda entrante para um de saída semelhante ao mapeamento MPLS ($\{input\ label, incoming\ interface\}$ para $\{output\ label, outgoing\ interface\}$). A partir dessa observação inicial, foi criado o MP λ L (*Multiprotocol Lambda Switching*) cuja primeira especificação foi baseada nos protocolos de sinalização e roteamento do MPLS. Foi assumido que, embora a LFIB seja logicamente embutida nos dispositivos de comutação, as operações de cruzamento de conexão (*cross-connect*) são idênticas às operações realizadas na LFIB ($\{incoming\ lambda, incoming\ interface\}$ to $\{outgoing\ lambda, outgoing\ interface\}$) (FARREL e BRYSKIN, 2006).

A tecnologia MPLS resolve problemas de rede IP tradicionais para habilitar a transmissão rápida de pacotes e o suporte a QoS. Porém, essa técnica não está disponível sob a camada IP na arquitetura de rede atual. Uma nova vertente chamada MPLS Generalizado (GMPLS) foi criada para combinar diversas tecnologias de rede incluindo ATM (L2SC – *Layer-2 Switch Capable*), TDM (TDM – *Time-Division Multiplex Capable*), DWDM (LSC – *Lambda Switch Capable*) e comutação de fibra (*Fiber-Switch Capable* –FSC) (HWANG, HUANG e YU, 2004), (MANNIE, 2004). Há, nessa nova técnica, o intuito de fornecer um plano de controle único (formado pela sinalização e o roteamento) para dispositivos que suportam as tecnologias citadas.

Simplifica a operação de redes e fornecer gerenciamento automático de conexões e recursos, garantindo um nível de QoS esperado por novas e sofisticadas aplicações (IEC, _).

Para suportar às diversas tecnologias, o GMPLS estende algumas funções básicas do MPLS tradicional e, em alguns casos, algumas funcionalidades são adicionadas. Estas mudanças e adições causam impacto sobre as propriedades do LSP: como são requeridos e comunicados os rótulos, a natureza unidirecional de LSPs, como são propagados erros e informação de sincronização entre o ingresso e egresso (MANNIE, 2004).

Na utilização do GMPLS, um circuito só pode ser estabelecido entre interfaces do mesmo tipo. No entanto é possível realizar o encapsulamento de LSPs, ou seja, criar uma hierarquia. Isso significa que LSPs de diferentes interfaces de controle podem ser englobados por outro LSP (CUNHA, 2006; PAPADIMITRIOU e MANNIE, 2002; MANNIE, 2004).

O fato da tecnologia GMPLS lidar com diversos tipos de comutações (pacote, TDM, lambda e outras) provoca uma hierarquização natural baseada na granularidade. Lambdas podem ser encapsulados dentro das fibras, *slots* de tempo em lambdas e pacotes em *slots*. Ocorre uma agregação de túneis, oferecendo engenharia de tráfego escalável e eficiência no uso da largura de banda em redes de transporte, assim como a facilidade de integração de diferentes tipos de comutação para prover conectividade fim a fim (FARREL e BRYSKIN, 2006).

A Figura 11 ilustra a questão descrita há pouco. Os pacotes já rotulados recebem outro indicador de FEC, mas relacionado com a tecnologia TDM. Em seguida outro rótulo é adicionado, agora, com características de uma rede comutada por comprimento de onda. Por fim, o fluxo de dados que passa pela fibra também possui um rótulo diferente dos demais. Todo esse percurso caracteriza uma hierarquia de LSP e cada tipo de rótulo representa um túnel. Comellas (2003) acrescenta que os nós intermediários enxergam apenas o LSP externo. Não é necessário que os nós mantenham estados de encaminhamento para cada LSP interno e mensagens de sinalização.

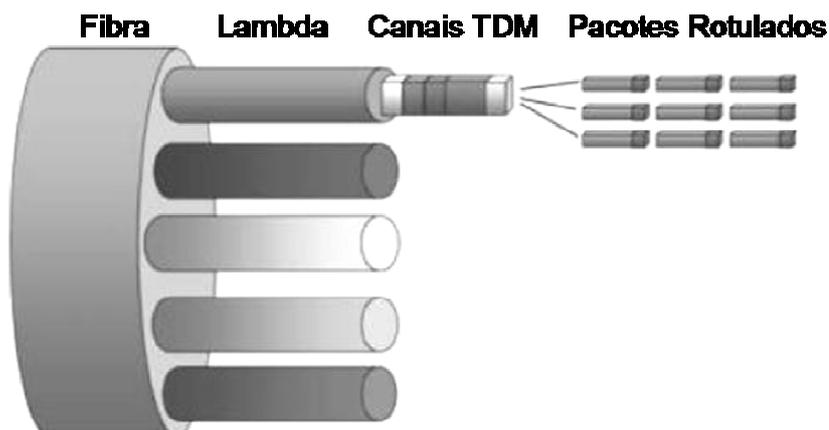


Figura 11: Hierarquia LSP (FARREL e BRYSKIN, 2006).

Em redes MPLS, a técnica de tunelamento por hierarquia de LSP é eficaz apenas onde o *Shim Header* é usado para codificar o rótulo, ou seja, eles podem apenas ser usados em redes de pacotes, células ou *frames*. Em redes não baseadas em pacotes, onde o rótulo é diretamente associado com um recurso físico, não é possível produzir uma pilha de rótulos.

Hierarquia de LSP é uma das inovações acrescentadas pelo GMPLS para atender seus objetivos, entre eles (PAPADIMITRIOU e MANNIE, 2002; CUNHA, 2006): reutilização do paradigma *label swicting*, reutilização do conjunto de protocolos, de mecanismos MPLS com engenharia de tráfego (MPLS-TE) e reutilização da técnica de endereçamento IP. Outras inovações fazem parte do sucesso adquirido pelo GMPLS: LSPs bidirecionais, protocolo de gerenciamento de enlace e aprimoramento das capacidades de roteamento IGP-TE (*Interior Gateway Prootocol- Traffic Engineering*).

O rótulo generalizado recebe alguns atributos adicionais aos que compunham o rótulo original MPLS. Trata-se de uma extensão para representar rótulos associados não apenas a pacotes, mas também a lambdas e a *slots* de tempo ou fibra (MANNIE, 2004), (CUNHA, 2006). A Figura 12 ilustra dois tipos de rótulos: o primeiro com 32 bits e o segundo que indica uma determinada faixa de comprimento de onda, possuindo um tamanho de 96 bits, pois é um tipo diferente de rótulo dependente das informações sobre as extremidades da banda (32 bits cada).

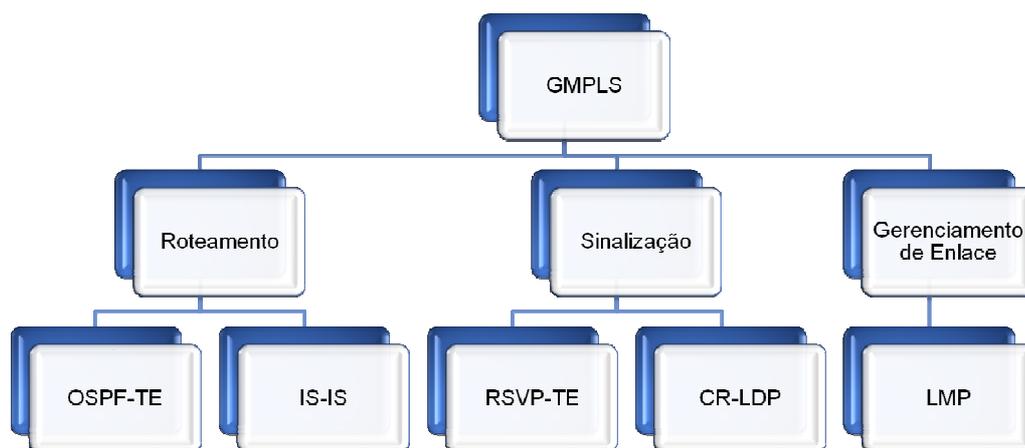


Figura 12: Rótulos generalizados.

2.4. Conjunto de Protocolos

No GMPLS são definidos protocolos de sinalização, roteamento e gerenciamento de enlace. Várias funções do MPLS são reutilizadas para facilitar o estabelecimento do caminho óptico. Diferente do IP/MPLS, o plano de controle é separado do plano de dados em redes TDM, por multiplexação de comprimento de onda e fibra. Um caminho bidirecional é utilizado nesse tipo de rede contrastando com o LSP unidirecional do MPLS. Assim são acrescentadas algumas funções para separar os dois planos a fim de estabelecer e encerrar LSPs bidirecionais (SHIOMOTO, 2004).

Protocolos de sinalização e roteamento foram estendidos acomodando características de redes ópticas e SONET/SDH. Além disso, um novo protocolo fez-se necessário: protocolo de gerenciamento de enlace (LMP – *Link Management Protocol*) (MANNIE, 2004). Este último tem a finalidade manter o bom funcionamento do plano de dados e de controle entre dois nós vizinhos. A Figura 13 ilustra a disposição em blocos da arquitetura do plano de controle GMPLS.

**Legenda:**

OSPF: *Open Shortest Path First*;

IS-IS: *Interior System to Interior System*;

RSVP-TE: *Resource Reservation Protocol – Traffic Engineering*;

CR-LDP: *Constraint-based Routing-label Distribution Protocol*;

LMP: *Link Management Protocol*

Figura 13: Disposição em blocos da arquitetura do plano de controle GMPLS.

A seguir serão exploradas algumas características dos protocolos componentes do conjunto GMPLS. Será seguida a ordem apresentada na Figura 13, da esquerda para a direita.

2.4.1. Protocolos de Roteamento

O roteamento GMPLS é responsável pela disseminação de informações relacionadas à alcançabilidade, topologia e recursos/capacidades (CUNHA, 2006). A auto-descoberta da topologia das redes com múltiplos enlaces de diferentes tecnologias e a propagação da disponibilidade de recursos presentes na mesma tornam-se seus objetivos (ALOIA, 2003).

O algoritmo OSPF-TE (*Open Shortest Path First – Traffic Engineer*) é estendido para facilitar o roteamento de estado de enlace. O estado do enlace é disseminado pela área da rede GMPLS e as atualizações periódicas são realizadas via

broadcast. Todos os nós conhecem a topologia da rede e inferem algumas informações, tais como a largura de banda disponível (DORF, 2003; SHIOMOTO, 2004; MUÑOZ e MARTÍNEZ, 2007).

Em uma rede com enlaces DWDM cada nó mantém informações sobre a disponibilidade de cada comprimento de onda em cada enlace. Em sistemas dinâmicos manter o estado global da rede de uma forma distribuída pode causar inconsistência de dados e conflitos: um pedido de *lightpath* tentará reservar um recurso que estava previamente disponível, mas, na verdade, foi reservado por outro.

A consequência global deste fenômeno é o aumento do número de pedidos bloqueados, devido a recursos que estão reservados por uma quantidade maior de tempo, mas nunca utilizada. O efeito se torna mais pronunciado tanto no aumento da taxa de provisionamento de requisições, quanto em distâncias maiores entre dois nós, além de sofrer influência do crescimento da rede.

Uma alternativa para a manutenção de informação do estado de enlace distribuída é persistir informações globais em um servidor centralizado e ter o gerenciamento de todos os pedidos de conexão. Esta abordagem elimina o problema de informação de estado antiquada. No entanto, o servidor centralizado pode se tornar um gargalo de processo e não poder controlar um número grande de pedidos dinâmicos de uma maneira oportuna (DORF, 2003).

2.4.2. Protocolos de Sinalização

A sinalização GMPLS pode ser resumida como sendo a troca de mensagens no plano de controle para manter, modificar e remover LSPs. Dois protocolos destacam-se: CR-LDP (*Constraint based Label Distribution Protocol*) e RSVP (*Resource ReSerVation Protocol*), com a utilização em maior escala do último.

Para configurar um caminho, o protocolo de sinalização troca informações entre nós e realiza reserva de recursos. Geralmente os protocolos para tal fim são categorizados com base no tipo de reserva: *Forward Reservation Protocol* (FRP),

também conhecido como *Source Initiated Reservation* (SIR), cujos recursos são reservados sequencialmente da origem para o destino e *Backward Reservation Protocol* (BRP ou DIR – *Destination Initiated Reservation*) com os recursos reservados sequencialmente do destino para a origem.

O protocolo de reserva de recursos RSVP (BERGER, 2003) foi originalmente proposto como um protocolo de sinalização para permitir a requisição de QoS. A troca de mensagens RSVP apropriadas permitia ao nó origem descrever as características do fluxo de dados para o receptor indicar o nível da reserva de recursos requerida e para os nós intermediários realizarem a reserva adequada dos recursos. O RSVP-TE foi proposto como protocolo de sinalização para estabelecer caminhos em redes MPLS (LSPs), utilizando objetos adicionais, tais como *Label Request*. No domínio GMPLS, o *Label Request* pode ser entendido como a requisição de um comprimento de onda (COMELLAS *et al*, 2003; ZULIANI, 2006; KOMOLAFE e SVENTEK, 2008).

A fase de sinalização do RSVP-TE no GMPLS consiste em um pedido de rótulo generalizado (*Generalized Label Request Object*), enviado em uma mensagem *PATH*. Ela percorre ponto-a-ponto do nó fonte para o destino, seguido por uma atribuição de rótulo generalizada (reserva), enviada dentro de uma mensagem *RSVP*, conduzida na direção oposta à fonte (COMELLAS *et al*, 2003). A Figura 14 ilustra o processo de sinalização no estabelecimento de um LSP. O roteador de ingresso (LSR A) recebe uma requisição para o estabelecimento de um LSP e envia um pedido de rótulo. Uma mensagem *PATH* é construída indicando os recursos a serem reservados e é enviada ao próximo LSR no sentido *downstream*. A recepção da mensagem pode sugerir um rótulo para ser utilizado pelo próximo nó. O roteador recebe a *PATH*, efetua a reserva de recursos e novamente a encaminha. Esse processo é concluído quando a mensagem é recebida pelo egresso (LSR C). No sucesso das reservas, uma mensagem *RESV* é enviada no sentido *upstream* informando o recurso reservado, que pode ou não ser o sugerido. Quando o LSP A recebe o *RESV* significa que o LSP está pronto para receber o tráfego. Erros podem ocorrer e são propagados por meio das mensagens *PATHError* e *RESVError*. Para a remoção de LSPs é realizado um processo similar ao de criação usando mensagens *PATHTear*. Por fim, mensagens *Notify* são disponíveis para propagar informações sobre as condições de operação de um LSP.

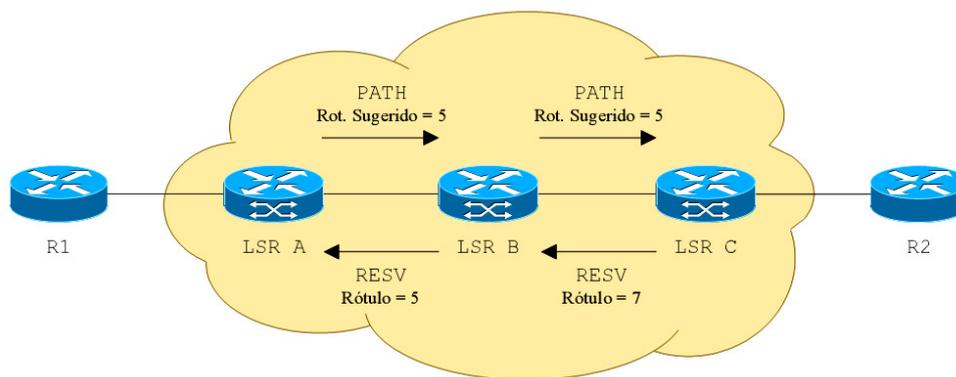


Figura 14: Sinalização na criação de um LSP (ZULIANI, 2006).

Para garantir a restrição de continuidade de comprimento de onda quando informações globais estão disponíveis, um *Label Set Object* é incluído na mensagem *PATH*. Esse *Label Set Object* permite que um nó *upstream* restrinja o número de rótulos que um nó *downstream* pode escolher.

Se o FRP for utilizado, todos os comprimentos de onda especificados em um *Label Set* são trocados em cada salto no caminho (reserva temporariamente dos recursos). Já o BRP, não realiza a reserva dos comprimentos de onda no caminho, ele apenas coleta as informações de uso dos comprimentos de onda. Cada nó atualiza o *Label Set* recebido, removendo os comprimentos de onda indisponíveis de acordo com as informações de recursos locais, reserva o comprimento de onda remanescente do *Label Set* em seu banco de dados (apenas para FRP) e encaminha o pacote. Se nenhum comprimento de onda está disponível, a requisição é bloqueada e todas as reservas realizadas com o FRP são liberadas.

Se a mensagem *PATH* alcançar o nó destino, um algoritmo para escolha de comprimento de onda é utilizado e inicia a mensagem *RESV* (caso esteja disponível o comprimento de onda). Um *Generalized Label Object* é adicionado à *RESV* com a escolha feita pelo algoritmo para ser configurada em cada *hop* pertencente ao caminho óptico.

Berfger (2003) mostra que é possível integrar os dois processos (FRP e BRP) por meio do *Suggested Label Object*, o qual permite o nó *upstream* começar a reserva e configuração do hardware com um rótulo proposto. O uso do *Suggested Label* é apenas uma otimização. Caso o rótulo sugerido seja inadequado, ele será ignorado e o processo

de estabelecimento de conexão contínua. Combinando o *Label Set Object* baseado no BRP e o *Suggest Label Object* baseado no BRP, é possível fazer um FRP baseado em um rótulo simples e caso isso falhe, o BRP deve continuar o estabelecimento da conexão.

2.4.3. Protocolos de Gerenciamento de Enlace

O protocolo LMP (*Link Management Protocol*) é responsável pela manutenção dos canais de controle, descoberta de vizinhos e correlação das propriedades dos enlaces. É um protocolo ponto-a-ponto e utiliza o UDP (*User Datagram Protocol*). As mensagens LMP são trocadas apenas entre elementos adjacentes. O LMP é encarregado de realizar uma série de funcionalidades distintas (FARREL e BRYSKIN, 2005; ZULIANI, 2006; CUNHA, 2006; SHIOMOTO, ICHIRO, OKI, 2008):

- Gerenciamento do canal de controle: para estabelecer, configurar e manter a conectividade entre nós adjacentes. Utiliza a troca de mensagens de configuração de canal de controle por uma troca de mensagens do tipo *keep-alive*.
- Correlação de propriedade de enlace: útil no uso de agregação de múltiplos enlaces de dados em um único enlace TE, além de ser usada para sincronizar as propriedades locais e remotas do enlace TE.
- Verificação de enlace: verifica a conectividade física dos enlaces. Pode ocorrer a qualquer instante para checar os estados dos enlaces.
- Gerenciamento de falhas: o LMP possui um sistema de mensagens capaz de isolar o ponto exato de falha de um circuito. Em redes fotônicas os circuitos ópticos são compostos por diversos enlaces e na ocorrência de uma falha todos os nós no sentido *downstream* devem ser notificados.
- Processo de Descoberta de Enlace: ajuda na determinação da existência, conectividade, e da natureza de seus enlaces, uma vez que, inicialmente, a única informação disponível são os identificadores locais.

A obtenção manual de informações, tais como identificação e capacidade do canal de dados nos LSR é uma tarefa inviável, tanto pela demora, quando pela alta probabilidade de erros. Por outro lado, o GMPLS separa o plano de controle do de dados e os mesmos não possuem, necessariamente, a mesma topologia ou compartilham o mesmo meio físico. Nesse sentido, surge o LMP.

2.5. Considerações Finais

Foram apresentados diversos aspectos de redes MPLS e sua evolução GMPLS. O uso dessa última aumenta a cada dia considerando a sofisticação e requerimentos das novas aplicações. A demanda por largura de banda e a necessidade de automatização no estabelecimento de circuitos impulsionam a evolução das redes ópticas. Surge, assim, novas tecnologias como DWDM que junto com o GMPLS oferecem transporte mais rápido e eficiente.

CAPÍTULO III

PROBLEMA RWA E

RESTRICÇÕES DA CAMADA

FÍSICA: ESTUDOS E PROPOSTAS

As redes ópticas estão se tornando o componente central de infra-estruturas de informações regionais e metropolitanas. A substituição de comutadores (switches) elétricos por totalmente ópticos promete um custo mais efetivo e um projeto de rede mais flexível (HE, BRANDT-PEARCE e SUBRAMANIAM, 2008). O avanço das tecnologias ópticas propicia o aparecimento de redes totalmente ópticas em que um sinal viaja através da rede totalmente inserido no domínio óptico, sem qualquer conversão optoeletrônica da origem até o destino.

Ao evitar as conversões do meio óptico para o elétrico, surge um problema: os caminhos ópticos na rede podem percorrer centenas de quilômetros sem regeneração elétrica do sinal, mas para isso precisam da ajuda de amplificadores e compensadores de dispersão. No entanto, com a não regeneração elétrica do sinal, pode haver o acúmulo de distorções lineares e não lineares causando degradação do sinal óptico e tornando o caminho inutilizável (HE, BRANDT-PEARCE E SUBRAMANIAM, 2008; SALVADORI *et al*, 2007). Para estabelecer um caminho com boa qualidade no sinal é preciso levar em consideração as restrições impostas pelo meio físico nessas novas

redes. Em outras palavras, os algoritmos de roteamento e atribuição de comprimento de onda devem estar cientes dos efeitos sofridos pelo sinal quando escolhida determinada rota e comprimento de onda. Esses algoritmos são chamados IRWA (*Impairment-aware RWA*).

Este capítulo apresenta o problema RWA tradicional (sem erros provocados por efeitos da camada física) e algoritmos utilizados para solucionar ou amenizar o problema da degradação do sinal por parte de restrições físicas. São enfatizadas as restrições PMD (*Polarization Mode Dispersion*) e OSNR (*Optical Signal-to-Noise Ratio*) consideradas algumas das mais penosas quando em velocidades iguais ou acima de 10 Gbps. São mostradas modelagens para prever esses efeitos e como elas são utilizadas no algoritmo apresentado nesse trabalho.

3.1. Problema RWA

O problema de roteamento e atribuição de comprimento de onda (RWA) é um aspecto de fundamental importância em redes DWDM, no qual uma solução pode afetar expressivamente o oferecimento de serviços diferenciados e o atendimento a QoS (KAVIAN *et al.*, 2007). O RWA mostra-se também relevante no roteamento óptico quando da ausência de conversores de comprimento de onda (GONG, LGEE e GU, 2003).

O *lightpath* (ou caminho óptico) deve ser estabelecido utilizando o mesmo comprimento de onda durante todo seu caminho (em todos os enlaces ópticos que atravessa). Essa propriedade é chamada de restrição de continuidade de comprimento de onda (DORF, 2003) e pode ser resolvida com a inclusão de conversores de comprimento de onda, no entanto é uma tecnologia cara. Esse problema pode resultar na utilização ineficiente dos comprimentos de onda disponíveis e degradar o desempenho da rede (CIEUTAT e BINH, 2003).

Diante da restrição de comprimento de onda surgem outros desafios para a gestão de redes: dado determinado conjunto de *lightpaths* e um limite de comprimentos

de onda, como determinar as rotas sobre os quais estes *lightpaths* deveriam ser estabelecidos? E como associar comprimentos de onda aos mesmos de forma a maximizar o número de caminhos ópticos estabelecidos?. Embora a escolha de rotas mais curtas seja mais preferível, essa decisão pode ser sacrificada para permitir o estabelecimento de mais *lightpaths*. Dessa forma, diversas rotas alternativas podem estar disponíveis e aqueles caminhos que não puderam ser montados são chamados de bloqueados. Em resumo, o problema de otimização de redes WDM compreende **a minimização da probabilidade de bloqueio** das requisições que chegam (MUKHERJEE, 2006).

Para resolver o problema são propostos algoritmos RWA com o objetivo de estabelecer rotas (representado pela letra R no símbolo - *Routing*) e atribuir comprimento de onda (*Wavelength Assignment*) de maneira automática a cada requisição de conexão (BRASSOLATI, 2006).

Tipicamente existem dois tipos de tráfego possíveis em redes ópticas roteadas por comprimento de onda: estático e dinâmico. Da mesma forma, dois tipos de estabelecimento de *lightpath* devem ser tratados (BRASSOLATI, 2006; CIEUTAT E BINH, 2003; AHUJA, 2006; TANWIR, 2007):

- **Estabelecimento estático de *lightpaths* (*Static Lightpath Establishment - SLE*).**

Estabelecer estaticamente os caminhos ópticos requer conhecer *a priori* a demanda de tráfego (as requisições de conexão) e não fazer alterações na mesma. Uma requisição para o estabelecimento de vias ópticas é fornecido inicialmente e as mesmas não são liberadas ao término da transmissão. Nesse caso, os critérios para determinação do melhor algoritmo RWA são a minimização da quantidade de comprimentos de onda para uma dada topologia, do número de fibras e do conjunto de vias ópticas demandadas.

- **Estabelecimento dinâmico de *lightpaths* (*Dinamic Lightpath Establishment - DLE*).**

O conjunto total de conexões é desconhecido. Para cada conexão gerada na rede, um caminho óptico deve ser configurado, visando minimizar o bloqueio das conexões

ou maximizar a quantidade de conexões estabelecidas. Após o término da transmissão em determinado caminho, o mesmo é liberado. O bloqueio da conexão pode acontecer caso não haja recursos suficientes na rede para seu estabelecimento. Assim, o critério para determinar qual o melhor algoritmo RWA a ser utilizado é a minimização da probabilidade de bloqueio de requisições para um dado número de comprimentos de onda.

O SLE pode ser formulado como um problema de programação linear inteira mista, o qual é NP-completo. No entanto, algumas soluções heurísticas são propostas, como por exemplo, uso de algoritmos genéticos (GA) que são técnicas bastante utilizadas para problema de difícil otimização relacionado à combinação de itens. A idéia básica é simular evolução de genótipos e seleção natural. Mais detalhes são encontrados em (DORF, 2003).

A estratégia utilizada para simplificar a implementação de algoritmos RWA é a divisão do mesmo em partes que são resolvidas separadamente. Trata-se do subproblema do roteamento e do subproblema de atribuição de comprimento de onda. Cunha (2006) também afirma que existe a construção de algoritmos que leva em consideração o roteamento juntamente com a atribuição de comprimento de onda. Porém não é a técnica mais usual devido à sua complexidade.

3.1.1. Subproblema do Roteamento

O subproblema de roteamento compreende basicamente em encontrar um caminho a um pedido de conexão proveniente de um par origem/destino. São sugeridas três técnicas para resolve-lo (PÁDUA, 2001; DORF, 2003; CIEUTAT E BINH, 2003; HWANG, HUANG E YU, 2004; CUNHA, 2006):

- **Roteamento fixo**

É um método muito simples de roteamento com apenas uma rota fixa determinada previamente entre um par origem/destino. Caso os recursos nessa rota

estejam ocupados por outra conexão, pode haver bloqueio da requisição, o que compreende em uma desvantagem para o método. Além disso, não é tolerante a falhas. Algoritmos de caminho mínimo (*Shortest Path Routing*) são exemplos do mecanismo descrito, tais como *Floyd* e *Dijkstra* (BHANDARI, 1999). Nesses algoritmos, a rota mais curta é calculada e utilizada para o estabelecimento da conexão.

- **Roteamento fixo-alternativo:**

Nesse caso múltiplos caminhos fixos estabelecidos previamente são considerados. Assim todas as combinações de pares de nós origem-destino possuem mais de uma rota. Em cada nó é necessário manter uma tabela de roteamento contendo uma lista ordenada de caminhos selecionados com base em algum critério. Esse critério pode ser a escolha das rotas mais curtas, por exemplo, o caminho mais curto será considerado como primário e os demais alternativos. Os algoritmos utilizados para o cálculo dos caminhos de acordo com o critério anterior são: algoritmo de *Yen*, *2-shortest path routing* e *Alternative shortest path routing* (ASPR). Na requisição de uma conexão, o nó fonte tenta estabelecer o caminho óptico por meio das vias disponíveis na tabela. Caso nenhum caminho seja encontrado, a requisição é perdida. Portanto, o roteamento fixo alternativo pode ser considerado mais tolerante a falhas e menos suscetível a bloqueios se comparado ao roteamento fixo.

- **Roteamento adaptativo:**

É baseado na disponibilidade de comprimentos de onda em cada enlace. Assim, qualquer rota disponível da origem ao destino pode ser candidata ao estabelecimento da conexão, dependendo apenas da política utilizada na rede. O caminho é escolhido dinamicamente de acordo com o estado atual da rede. Isso significa que todos os caminhos estabelecidos devem ser conhecidos em um instante de tempo. São atribuídos pesos distintos aos enlaces ocupados (peso infinito) e livres (peso unitário), os quais serão somados e comparados a fim de se escolher a melhor rota dentre todas as admissíveis. Um exemplo de algoritmo que se enquadra nas características descritas é o *Least loaded routing* (LLR). Consideradas todas as rotas possíveis entre pares de nós, a ordenação das mesmas obedece à condição de menor carga, ou seja, a menos congestionada. As vantagens do método descrito compreendem em maior tolerância a

falhas e menor probabilidade de bloqueio. No entanto, é computacionalmente mais complexo.

A Figura 15 ilustra os três métodos descritos anteriormente. A seta contínua indica a rota traçada em todos os três. A linha pontilhada em (b) representa a rota alternativa enquanto que o valor 1 e o símbolo ∞ representam os pesos dados aos enlaces em (c).

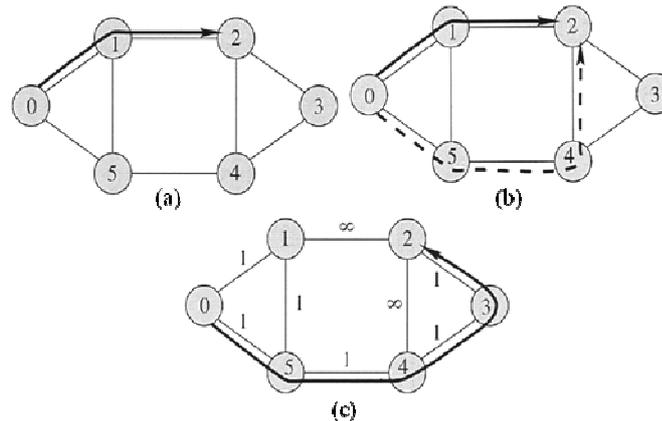


Figura 15: Representação dos três tipos de roteamentos. Roteamento fixo (a), roteamento fixo-alternativo (b) e roteamento adaptativo (c) (MUKHERJEE, 2006).

3.1.2. Subproblema da Atribuição de Comprimento de Onda

Em geral, existem diversos comprimentos de onda disponíveis entre o par origem/destino, fato desencadeador da necessidade de um algoritmo para selecionar um deles para o estabelecimento de um *lightpath*. A seleção pode ser efetuada durante a escolha da rota, de maneira paralela, ou após essa escolha (CIEUTAT e BINH, 2003).

O objetivo desse subproblema, então, é alocar os comprimentos de onda de maneira que não haja compartilhamento dos mesmos pelos caminhos. Ou seja, dois caminhos não podem fazer uso do mesmo comprimento de onda em uma mesma fibra. O intuito é maximizar o número de conexões a serem estabelecidas para contribuir na diminuição da probabilidade de bloqueio.

Semelhantes ao roteamento existem as atribuições de comprimento de onda fixa e adaptativa (MOKHTAR, AZIZOGLU, 1998; BRASSOLATI, 2006). No primeiro caso, um critério fixo é utilizado para formar o grupo de lambdas possíveis. Esse critério pode ser, por exemplo, a seleção do menor índice que estiver disponível. Por outro lado, na atribuição adaptativa, a verificação dos possíveis lambdas é efetuada no momento da requisição de acordo com o estado da rede e o critério adotado. Assim pode-se, por exemplo, fazer uso do comprimento de onda mais ou menos empregado na rede, técnica que exige a atualização constante do estado da mesma para a alteração dos lambdas dinamicamente. Na adaptativa, o conjunto de lambdas disponíveis é verificado quando ocorre a requisição de conexão e é dependente do estado atual da rede.

Os algoritmos utilizados para atribuição de comprimento de onda são heurísticos e classificados de diferentes formas na literatura. Brassolati (2006), baseado em (ZHOU e YUAN, 2002), sugere a classificação em (Tabela 3):

- **Balanceamento de carga**

Compreendem algoritmos os quais tentam balancear a carga na rede entre lambdas distintos para todos serem utilizados. Algoritmos como *Random Wavelength Assignment* (CHLAMTAC, GANZE e KARMI, 1989) e *Least-used* (SUBRAMANIAM e BARRY, 1997) representam essa classe.

O *Random* cria, ao longo da rota determinada, uma lista contendo todos os comprimentos de onda disponíveis para satisfazer o caminho. O comprimento de onda, então, é escolhido aleatoriamente. É um algoritmo computacionalmente simples e um dos escolhidos para o presente trabalho.

O segundo exemplo apresenta desempenho menor em relação ao anterior, pois utiliza informação global da rede para saber qual é o comprimento de onda disponível menos utilizado. Não é muito utilizado na prática.

- **Agrupamento**

Os comprimentos de onda são selecionados em uma faixa para serem selecionados em diversos pontos da rede. São algoritmos de fácil implementação e eficientes na presença de informações precisas sobre o estado da rede. Exemplos dessa classe são descritos a seguir.

No *FirstFit* (SUN *et al.*, 2003) a estratégia é enumerar todos os comprimentos de onda e selecionar de maneira crescente aquele lambda de menor índice da lista. Para isso, não requer informações globais (estado das conexões e sua topologia, por exemplo), o que resulta em baixo custo computacional. Nota-se, aqui, a sobrecarga dos comprimentos de onda de menor índice. No entanto possui bom desempenho em termos de probabilidade de bloqueio, além de ser bastante utilizado na prática. Esse algoritmo é um dos utilizados nas simulações.

Tabela 3: Heurísticas utilizadas para atribuição de comprimento de onda (BRASSOLATI, 2006).

Classificação das Heurísticas de Atribuição de Comprimento de Onda	Nome	Característica
Balanceamento de carga	<i>Least-used</i>	Selecionar os menos lambdas usados na rede.
	<i>Random</i>	Seleção aleatória.
Agrupamento	<i>First-Fit</i>	Indexação de lambdas e tentativa de seleção do menor índice
	<i>MostUsed</i>	Seleção dos lambdas mais utilizados.
	<i>Min-Product</i>	Multiplicação do número de fibras em cada enlace pelo número de lambdas disponíveis em cada um. O comprimento de onda que mínima esse valor e alocado. Utilizado em redes multi-fibras.
	<i>Least-loaded</i>	Seleciona o comprimento de onda com a maior capacidade residual para o enlace com maior carga ao longo da rota.
Globais	<i>Max-Sum</i>	Seleciona m lambda minimizando a perda de capacidade da rede óptica.
	<i>Relative Capacity Loss</i>	Calcula a perda da capacidade relativa para cada via em relação a cada lambda disponível e, então, seleciona a que minimiza a soma da perda de capacidade relativa em todas as vias.
	<i>Distributed Relative Capacity Loss</i>	<i>Relative Capacity Loss</i> com roteamento adaptativo.

O *MostUsed* (SUBRAMANIAM e BARRY, 1997) é caracterizado por alocar o comprimento de onda disponível mais utilizado com base nas informações do presente estado da rede. Os enlaces utilizados para cada lambda são contados e o comprimento

de onda disponível com maior número de enlaces será o escolhido. Possui desempenho relativamente melhor que o anterior. No entanto, o *overhead* de comunicação, armazenamento e custo computacional são parecidos aos do *Least-used*. O *MostUsed* é um dos algoritmos utilizados nas simulações.

- **Globais**

Os lambdas são selecionados de acordo com o estado da rede. Possuem melhor desempenho em relação aos demais descritos anteriormente. Porém, são de difícil implementação, pois são necessários cálculos e formulações matemáticas.

O *Max-Sum* (SUBRAMANIAM E BARRY, 1997) é um algoritmo baseado na TCL (*Total Capacity Loss* – perda total de capacidade) por comprimento de onda. Tem o objetivo de alocar um lambda minimizando a perda de capacidade da rede óptica. No recebimento de uma conexão, é feita uma seleção de todos os caminhos possíveis menos o do próprio pedido. Em seguida, são marcados, para cada comprimento de onda, os caminhos suscetíveis ao bloqueio se o comprimento de onda em questão for alocado. A soma de todos os caminhos futuramente bloqueados representa a perda total de capacidade. É um algoritmo que necessita de informações iniciais (topologia, estado da rede e conhecimento dos possíveis pedidos de conexão – matriz de tráfego). É um algoritmo difícil e caro de ser implementado.

Outros algoritmos são encontrados em (PÁDUA, 2001; CIEUTAT E BINH, 2003; DANTE, 2006; CUNHA, 2006). e um resumo deles está ilustrado na Tabela 3.

3.2. Restrições da camada física em redes WDM

Em redes opacas é necessário, em cada salto, realizar uma conversão do sinal para o domínio elétrico, sua regeneração e conversão para o domínio óptico novamente. Dessa forma, cada enlace isolado pode ser considerado um sistema análogo e restrições físicas podem ser resolvidas em cada nó (MARTÍNEZ *et al*, 2006).

Por outro lado, em redes transparentes, a partir de uma requisição, os nós são capazes de estabelecer conexões fim-a-fim totalmente inseridas no domínio óptico (*lightpaths*) (HUANG, HERITAGE E MUKHERJEE, 2005). As redes transparentes possuem alta vazão e flexibilidade na escolha das taxas e formato de dados, além da ausência de processamento de sinal em cada nó, reduzindo custos com equipamentos. Sem a regeneração em cada nó, um novo problema pode surgir: o acúmulo de restrições físicas tais como ruído, dispersão e não linearidades da fibra. A Figura 16 ilustra os efeitos sofridos pelo sinal, devido aos diversos equipamentos necessários para sua transmissão.

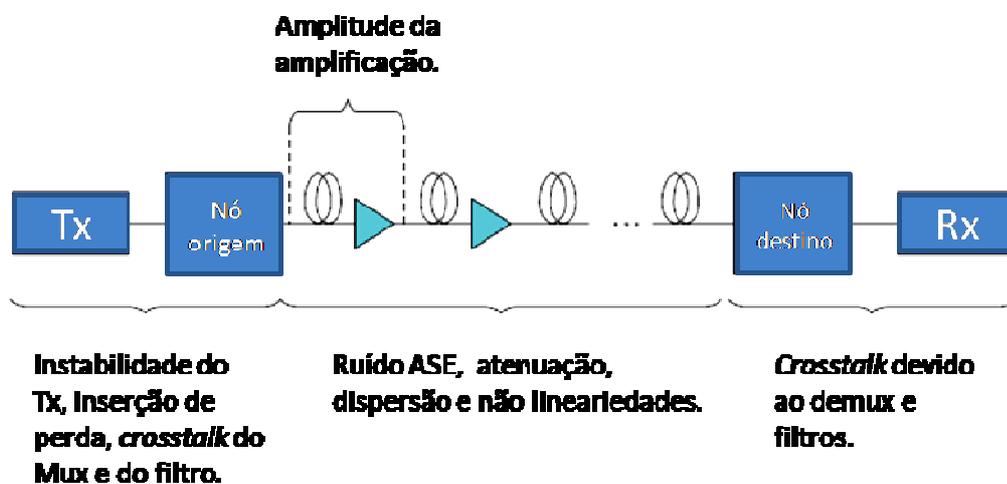


Figura 16: Degradação sofrida pelo sinal nos diversos equipamentos em redes ópticas transparentes (MARTÍNEZ *et al*, 2006).

Os efeitos introduzidos por componentes da camada física podem ser divididos em: lineares e não lineares. Os efeitos lineares são independentes da potência do sinal e afetam comprimentos de onda individualmente. São representados principalmente pela dispersão (cromática e por modo de polarização), ruído de amplificação (*Amplified Spontaneous Emission* – ASE), *crosstalk* entre outros (HUANG, HERITAGE E MUKHERJEE, 2005).

Efeitos não lineares são significativamente mais complexos (STRAND, CHIU E TKACH, 2001). Ocorrem na fibra óptica devido à alta potência concentrada em uma área pequena. Alguns dos principais efeitos são: auto-modulação de fase (*self-phase modulation*, SPM), a modulação de fase cruzada (*cross-phase modulation*, XPM), a mistura de quatro ondas (*four wave mixing*, FWM) e a intermodulação (*intermodulation*).

Na Tabela 4 são apresentados alguns parâmetros relevantes no cálculo ou estimativa da PMD e do OSNR, considerando um modelo de rede como ilustrado na Figura 16.

Uma das mais importantes restrições físicas é a dispersão, a qual tem como principais contribuintes as dispersões cromática e de modo de polarização (PMD). A dispersão cromática é determinística e pode ser compensada facilmente em um enlace de fibra. Por outro lado, a PMD é um efeito estocástico variante com o tempo que pode ser modelado estatisticamente, mas muito difícil de ser compensado. A PMD exerce influencia, principalmente, em sistemas com velocidades maiores que 10 Gbps e, geralmente é superada respeitando os limites do comprimento da fibra com determinada compensação de PMD (MARTÍNEZ *et al*, 2006).

Tabela 4: Algumas restrições físicas que podem ocorrer em redes WDM transparentes modificada de (MARTÍNEZ *et al*, 2006).

Parâmetro do Kth enlace	Descrição	Restrição de enlace física
Perdas de inserção nos nós	Captura a perda de inserção do nó e a interferência do mux/demux e filtros/comutadores	OSNR
Potência do ruído	Consiste em ruídos ASE, que é: - Ganho de amplificação - Fator de emissão de amplificação - Frequência de canais - Largura de banda óptica	OSNR
Comprimento do enlace	Representa o comprimento da fibra	PMD
Perda total do enlace	Representa a perda total do enlace <i>Kth</i> que é uma função da atenuação total da fibra e do ganho de amplificação.	OSNR
Parâmetro PMD de enlace	Representa o parâmetro PMD da fibra	PMD

Para adquirir informações sobre as restrições físicas é possível usar monitoramento em tempo real ou modelagem. O primeiro é realizado pela extração de informações fazendo escuta da fibra. Por outro lado, são encontrados na literatura modelos para estimar a penalidade que a restrição física pode causar. Em (HUANG, HERITAGE E MUKHERJEE, 2005), por exemplo, é proposto um modelo em camadas

para verificar se o caminho escolhido corresponde aos limiares de PMD e OSNR para manter a qualidade de serviço da conexão. Assim, a conexão apenas será estabelecida depois que confirmada a disponibilidade dos recursos e se as penalidades introduzidas por essas restrições físicas satisfizerem a QoS.

2.5.1. Dispersão por modo de polarização

A natureza ondulatória do campo eletromagnético que compõe a luz propicia a propagação de dois modos de polarização ortogonais em uma fibra óptica monomodo. A origem do PMD deve-se ao fato dessas diferentes polarizações viajarem com velocidades de grupos diferentes devido à determinada quantidade de anisotropia na fibra (que origina perda na simetria da mesma). Essa perda pode ocorrer na fabricação da fibra ou por algum campo tensional não simétrico aplicado a ela (ANDRÉ e PINTO, 2002). Além disso, a distribuição de energia do sinal sobre os diferentes estados de polarização muda vagarosamente com o tempo (RAMASWAMI e SIVARAJAN, 2002). Em outras palavras, a dispersão por modo de polarização é o alargamento do pulso óptico devido à diferença entre as velocidades dos dois modos de polarização na fibra como ilustrado na Figura 17.

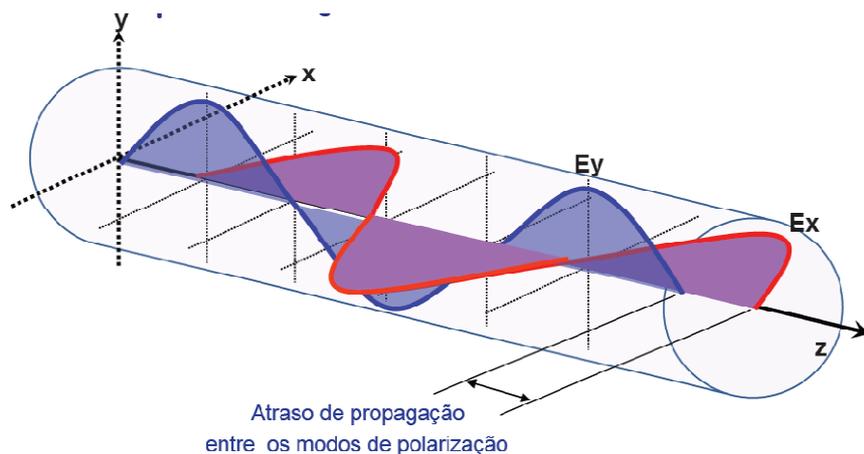


Figura 17: Dispersão entre dois modos de polarização. E_y e E_x representam os dois principais planos de oscilação.

Por sofrer influência de fatores ambientais, a medição da PMD deve ser feita após a instalação dos cabos de fibra e verificada periodicamente. A PMD é uma das principais fontes de penalidades em sistemas WDM e seus efeitos não são facilmente compensados.

Em um trecho de fibra totalmente óptico, o atraso de grupo (*Differential Group Delay – DGD*) entre dois estados ortogonais de polarização deve ser menos que alguma fração a da duração do bit, $T = 1 / B$, onde B é a velocidade de transmissão (STRAND, CHIU, 2005). Tipicamente o valor para a é 10% (ITU-T, 2003), mas para redes com projetos mais agressivos para compensar PMD podem permitir valores maiores que este. Para sistemas mais antigos um valor típico para o parâmetro PMD é de $0,5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$, limitando os segmentos em 400 km para taxas de 10Gbps e 25km para 40Gbps. Com os avanços na tecnologia de fibras, esses valores podem ser modificados. Em fibras mais atuais com parâmetro de PMD igual a $0,1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ o comprimento máximo de um segmento é de 10000 km para 10 Gbps e 625 km para 40 Gbps (STRAND E CHIU, 2005). Nesse artigo é considerado o valor do parâmetro a igual ou maior que 10%.

Para obter o valor do parâmetro a a seguinte equação foi utilizada (HUANG, HERITAGE E MUKHERJEE, 2005):

$$B * \sqrt{\sum_{k=1}^M D_{\text{PMD}}^2 * L(k)} \leq a \quad (1)$$

B representa a taxa de dados, $D_{\text{PMD}}(k)$ o parâmetro PMD da fibra e $L(k)$ o comprimento da fibra. O k representa um enlace que faz parte do caminho escolhido. Assim se a transmissão de dados for acontecer pelos nós 2, 5 e 7, por exemplo, M será igual a 3 e os parâmetros PMD utilizados serão os dos enlaces entre 2-5 e 5-7. Caso não seja atendido o limiar de 10% a rota deve ser recalculada.

A obtenção da PMD para cada enlace é em função de $D_{\text{PMD}}(k)$, mas, esse parâmetro pode variar de acordo com a fibra, resultando em diferentes valores de a . Por esse motivo, o presente artigo faz uso do mesmo valor de $D_{\text{PMD}}(k)$ para a maioria dos enlaces. Para aquele que não possuem o valor escolhido ($0,1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$), é utilizado outro um valor maior ($0,5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$) para testar a eficiência do algoritmo.

2.5.2. Relação Sinal-Ruído Óptica (OSNR)

A principal contribuição para a degradação OSNR em redes ópticas transparentes é o acúmulo do ruído de Emissão Espontânea Amplificada (ASE) gerado por amplificadores ópticos (ZULKIFLI, OKONKWO E GUILD, 2006).

O OSNR do sistema é representado pela potencia do sinal (P_{sig}) do nó no último estágio antes do nó de egresso dividido pela potência do ruído (P_{ase}).

$$OSNR_{sys} = P_{sig} / P_{ase} \quad (2)$$

A potência do sinal depois de k estágios é calculada por meio da potência no nó anterior multiplicado pelo produto das somas da perda na fibra e o ganho no $P_{sigk} = P_{sigk-1} \cdot L_f(k) \cdot G_{EDFAk}$ (3) (ZULKIFLI, OKONKWO E GUILD, 2006).

$$P_{sig}(k) = P_{sig}(k - 1) \cdot L_f(k) \cdot G_{EDFA}(k) \quad (3)$$

$$P_{ase}(k) = P_{ase}(k - 1) \cdot L_f(k) \cdot G_{EDFA}(k) + P_{ase}(k) \quad (4)$$

$$P_{ase}(k) = F \cdot h \cdot v \cdot (G - 1) \cdot B_0 \quad (5)$$

Na equação 4, F representa as perdas na fibra, h é a constante de Planck, v a frequência de transmissão e B_0 a largura de banda óptica.

O limite aceitável de OSNR é de 7,4 dB para uma taxa de erro (BER – *Bit Error Rate*) de 10^{-9} . Caso o caminho escolhido apresente ruídos que degrade o OSNR abaixo desse limiar, ele não poderá ser usado.

3.3. RWA com Ciência de Restrições

Originalmente, os algoritmos RWA assumem que se a rota e o comprimento de onda forem identificados, a conexão é possível de ser estabelecida. No entanto essa

afirmação pode não ser verdadeira em redes totalmente ópticas (MAS, VOGIATZIS E TOMKOS 2004). Em decorrência da ausência de regeneração do sinal por cada nó nessas redes, ocorre o acúmulo de efeitos gerados pelos equipamentos que penalizam a qualidade do sinal. Dessa forma, é necessário considerar as restrições físicas nos algoritmos RWA, os quais passam a serem chamados IRWA (*Impairment-aware RWA*).

Idealmente, um algoritmo de roteamento inteligente deve considerar os efeitos da camada física no estabelecimento do caminho. No entanto, a complexidade de tais algoritmos pode ser muito alta: é um desafio incorporar todos os efeitos em um algoritmo. Por esse motivo, a escolha de efeitos que exercem grande impacto na qualidade do sinal é válida na conjuntura dos algoritmos de roteamento. Caminhos com determinada degradação do sinal devem ser rejeitados e um possível caminho alternativo, escolhido durante o processo de seleção da rota (MUKHERJEE, HUANG E HERITAGE, 2004). Além de atender aos requisitos de qualidade considerando os efeitos físicos, é necessário encontrar rotas que aperfeiçoem a utilização de comprimento de onda e distribuição de carga nos enlaces. Tarefa particularmente complexa, pois um caminho pode ser selecionado por ter a melhor qualidade do sinal, no entanto prejudicar o desempenho da rede congestionando determinado enlace (TOMOKOS *et al*, 2004).

A falta de regeneração em redes totalmente ópticas dificulta a extração de valores necessários para a execução dos algoritmos. O que sugere a implementação de dispositivos específicos para esse fim, aumentando custos. Outra possibilidade é a utilização de modelos analíticos, tais como os descritos nas sessões anteriores. Essa abordagem elimina o custo adicional de dispositivos, mas aumenta a complexidade do algoritmo, principalmente quando são considerados efeitos não lineares. O tempo de resposta pode tornar-se maior.

Na literatura encontram-se algoritmos IRWA seguindo duas abordagens distintas. A primeira realizada em duas etapas (Figura 18a): cálculo do caminho (rota e comprimento de onda) em um módulo na camada de rede, em seguida a verificação da qualidade do sinal em uma camada física, se determinado limiar não for alcançado outro caminho deve ser avaliado. Em uma segunda abordagem (Figura 18b), são utilizadas três etapas: cálculo do caminho (da mesma maneira do exemplo anterior), para cada

caminho encontrado é verificada a qualidade do sinal e, em seguida, escolhida aquela que apresentar menor valor.

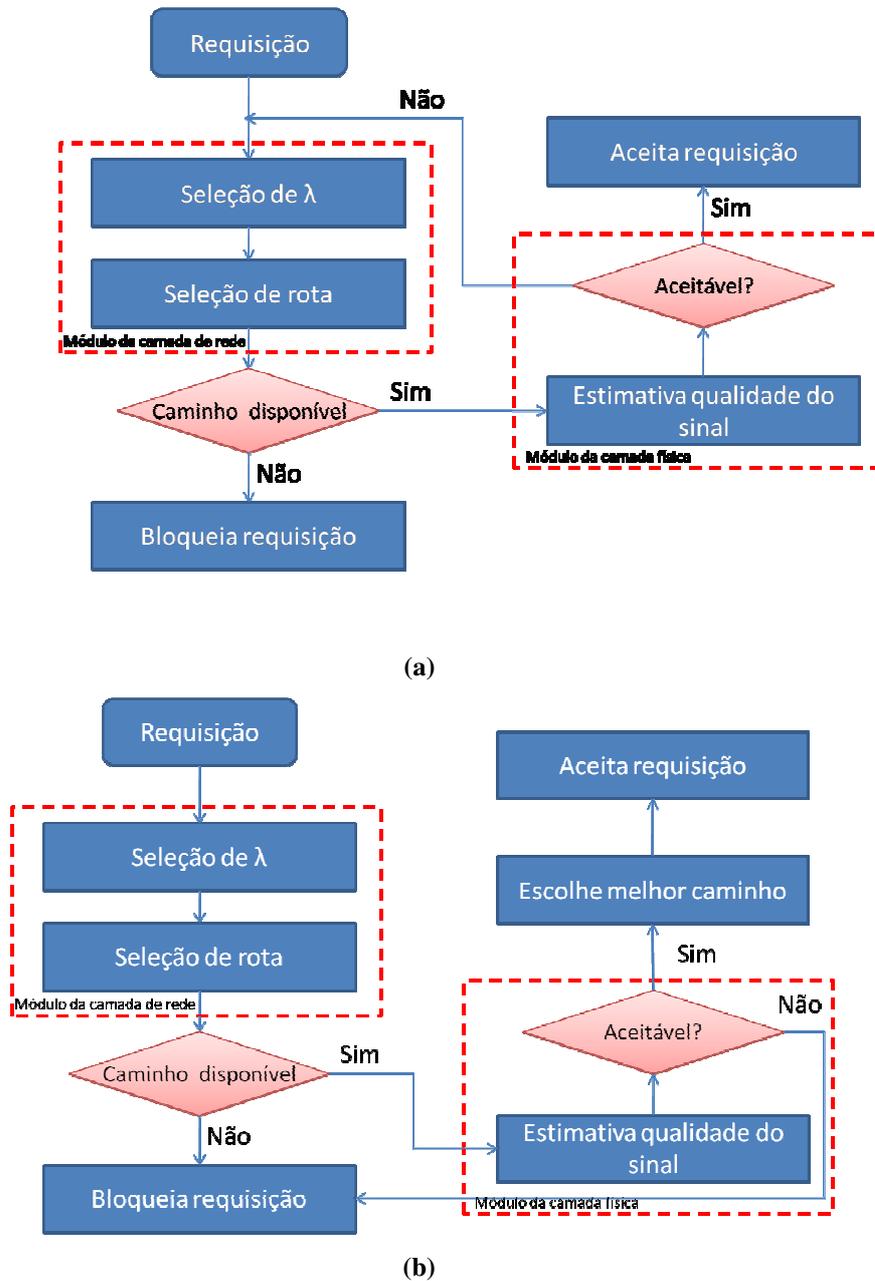


Figura 18: Algoritmo IRWA. (a) primeira abordagem, (b) segunda abordagem.

A abordagem utilizada no trabalho é semelhante à Figura 18(a), com algumas diferenças, no recálculo da rota. São utilizados os módulos da camada de rede e da camada física como ilustrado. O algoritmo proposto é descrito na sessão seguinte.

3.4. Algoritmo proposto

Visando incluir ciência de restrições físicas em algoritmos RWA, propomos o algoritmo apresentado na Figura 19. Este algoritmo leva em consideração as restrições PMD e OSNR, podendo ser estendido a demais restrições. Ambas as restrições foram utilizadas por serem críticas em velocidades iguais ou acima da utilizada no estudo de caso (10 Gbps).

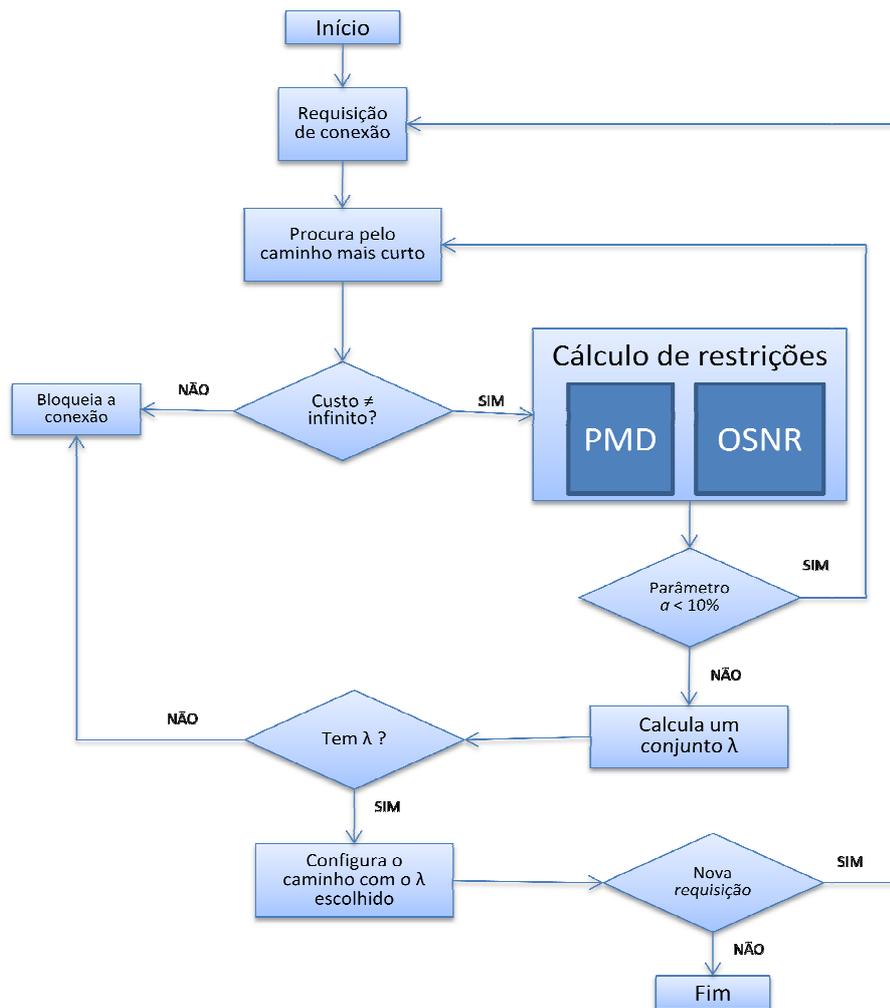


Figura 19: Algoritmo RWA ciente de PMD e OSNR (FERES, 2009).

Inicialmente recebe-se uma requisição para o estabelecimento de uma conexão. Essa requisição é passada para o algoritmo de roteamento (que nesse caso é o *Shortest Path*) para que o mesmo encontre o menor caminho para chegar ao destino. Se o custo do caminho tende ao infinito a conexão é bloqueada, caso contrário, é realizado o cálculo da PMD e do OSNR para a rota escolhida. Caso as penalidades inseridas pela

dispersão por modo de polarização e a relação sinal ruído forem superiores aos limiares estipulados é realizado o recálculo da rota.

O recálculo da rota é realizado caso haja bloqueio originado pelo acúmulo de penalidades do PMD ou OSNR. Como o algoritmo utilizado para obtenção da rota escolhe sempre o caminho mais curto, uma nova rota só será obtida se o peso de um dos enlaces pertencentes à antiga rota for alterado. Caso o bloqueio ocorra devido ao PMD, o peso do enlace com maior valor de $D_{\text{PMD}}^2 * L(k)$ receberá um valor infinito. A mesma coisa acontece quando não atingido o limiar para OSNR, o enlace com maior $P_{\text{ase}}(k)$ terá seu valor modificado para não ser utilizado novamente.

3.5. Considerações finais

O capítulo abordou o problema de roteamento e atribuição de comprimento de onda, mostrando quais os algoritmos tradicionais utilizados para minimizá-lo. Além disso, a degradação do sinal causada por efeitos provenientes da camada física (*impairments*) foi introduzida gerando novo algoritmo, enfatizando as restrições PMD e OSPF. Ambas fazem parte do algoritmo proposto e de outros presentes na literatura, por serem consideradas críticas em altas velocidades.

CAPÍTULO IV

ESTADO DA ARTE

Encontra-se na literatura diversos trabalhos referentes ao plano de controle GMPLS e ao problema RWA. Esse capítulo tem o intuito de apresentar artigos e outros trabalhos referentes a esses dois temas. Além disso, são citados trabalhos que consideram restrições da camada física no estabelecimento dos caminhos ópticos. Nota-se, também, que a maioria dos trabalhos citados utiliza a técnica de simulação para obtenção dos resultados. Nesse contexto, é apresentada a ferramenta utilizada na presente dissertação (*Lightwave Agile Switching Simulator - GLASS*).

Uma fração pequena, porém significativa, dos trabalhos utilizados na revisão bibliográfica da presente dissertação são listados. A ordem de apresentação dos trabalhos é cronológica, separados por autores.

4.1. Trabalhos Realizados Utilizando o Plano de Controle

Essa sessão é dedicada à apresentação de alguns trabalhos encontrados na literatura e que envolvem o plano de controle GMPLS.

4.1.1. Feng e colaboradores (2004)

Os autores propõem um protocolo de reserva híbrida adaptativa com a intenção de estabelecer caminhos em redes roteadas por comprimento de onda dinâmico de maneira rápida e eficiente. Esse protocolo utiliza um pacote especial de reserva e investigação, estendendo a sinalização para integrar *forward reservation* (FRP) e *backward reservation* (BRP) em um processo monolítico. Para diminuir a probabilidade de bloqueio que acontece em casos onde dois nós finais são associados com um enlace específico (podem simultaneamente reservar o mesmo comprimento de onda), uma política de seleção de comprimentos de onda adaptativa é especialmente empregada em AHRP (*Adaptive Hybrid Reservation Protocol*). Uma ferramenta de eventos discretos baseada no NS-2 foi desenvolvida pra investigar o desempenho do protocolo proposto. Os resultados mostram que durante condições de tráfego dinâmico alto, AHRP possui menor taxa de bloqueio, pouco atraso de configuração e menos sobrecarga de sinalização.

4.1.2. Muñoz, Martínez, Sorribes e Junyent (2005)

A necessidade de disseminação de mensagens para atualização das tabelas de rotas pode resultar em uma significativa sobrecarga de comunicação, e, além disso, um nó pode usar informações desatualizadas e realizar uma decisão de roteamento incorreta baseado nessas informações. É crucial estender o repositório GMPLS baseado em IP para provisionamento de anéis ópticos WDM. Entretanto, esquemas de estabelecimento de caminhos ópticos distribuídos baseado em GMPLS têm sido proposto e evoluído em redes *mesh*, mas possuem otimização para MAN baseada em anéis.

Apoiados na afirmação anterior, o objetivo dos autores foi propor um protocolo de sinalização baseado em GMPLS para anéis unidirecionais que permitisse ter informações globais sobre os recursos (lambdas) sem qualquer protocolo de roteamento em conexões com provisionamento bidirecionais. Esse esquema é nomeado como GRS – *Global Reservation Scheme* – e baseado em um protocolo de controle distribuído para

estabelecimento de caminhos ópticos bidirecionais sobre MAN baseada em anéis unidirecionais nomeados como SRP – *Salmon Reservation Protocol*.

4.1.3. Andriolli e colaboradores (2006)

Andriolli e colaboradores (2006a e 2006b) propuseram uma abordagem evitando mensagens adicionais para sinalização e explorando apenas informações de estados não persistentes usadas durante o estabelecimento de um LSP. Exploraram os *Suggested Label (SL)* e *Suggested Vector* (proposto pelos autores e aqui representado por SV) para enfocar esquemas de preferência de rótulo. Diversas metas de desempenho podem ser escolhidas, tais como redução de conversores de comprimento de onda, suavização de restrições da camada física, engenharia de tráfego, dentre outras. Cada uma dessas metas é direcionada para a atribuição de uma preferência de rótulo diferente. Também, apresentam um estudo de caso mirado na redução do uso de conversores de comprimento de onda. A Figura 20 ilustra o funcionamento do *Suggest Vector* indicando que o comprimento de onda 1 não precisa de nenhum conversor, enquanto o 3 necessita de um (no enlace de A para B). Escolhido o comprimento de onda, a mensagem *RESV* anuncia para o nó A o rótulo a ser utilizado.

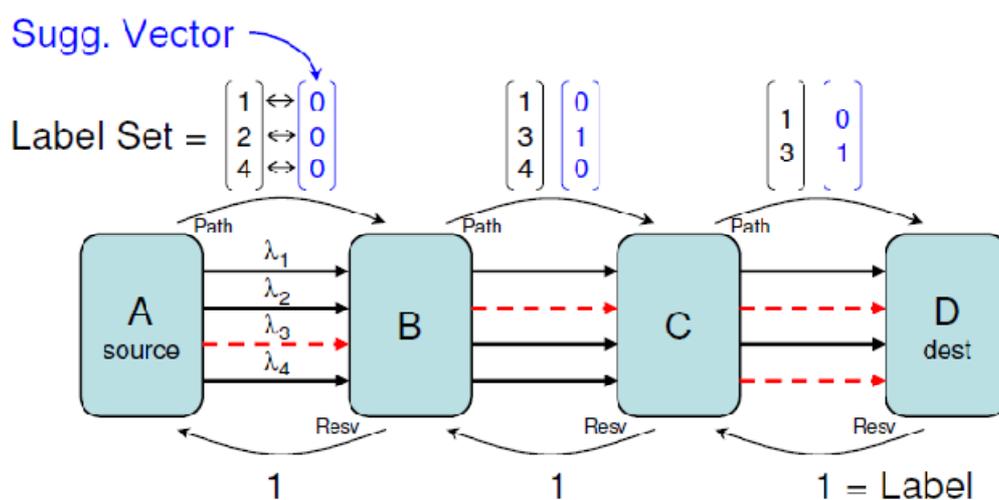


Figura 20: Exemplo da utilização do *Suggested Vector* (ADRIOLLI *et al.*, 2006).

Como dito anteriormente, é possível estender o conceito de SV para anunciar restrições da camada física. Como cada posição do SV está associada à outra do LS (diretamente vinculado a um comprimento de onda), o anúncio de uma restrição física também segue o mesmo princípio. Nesse caso, esse esquema não é utilizado quando considerada PMD, uma vez que não depende do comprimento de onda (ITU-T, 2003).

4.1.4. Veeraraghavan e Li (2007)

Veeraraghavan e Li (2007) compararam as opções de transporte *in-band*⁶ e *out-of-band*⁷ por meio da implementação do protocolo de sinalização e de aceleração por hardware. Para isso, utilizam transferência de arquivos, pois possui altas taxas de chegada e baixa retenção do canal. A consequência de grande quantidade de mensagens de sinalização torna importante o uso de soluções de transporte de sinalização. Atrasos de rede são menores no esquema *in-band* dado que não existem roteadores IP sobre esses caminhos. No entanto, as taxas de transmissão por canal são menores. Para o estudo foram definidos modelos de filas e obtida a estimativa do atraso. As análises mostraram que com aceleração de hardware, a sinalização *in-band* é a melhor opção para baixo atraso de configuração em chamadas fim-a-fim.

4.1.5. Salvadori e colaboradores (2007)

Nesse trabalho foi explorado o espaço de soluções para estender o protocolo de sinalização de um plano de controle GMPLS para o estabelecimento de caminho com prevenção de falha em redes ópticas transparentes. Quatro combinações de roteamento e arquiteturas de checagem de viabilidade óptica baseadas em modificações do RSVP-TE

⁶ Canais de sinalização entendidos como largura de banda desprezada entre dois nós (VEERARAGHAVAN e LI, 2007).

⁷ Interface Ethernet do processador de controle do switch para uma rede IP (VEERARAGHAVAN e LI, 2007).

são propostas e estudadas. Resultados de simulações mostraram que a combinação de roteamento hop-by-hop e checagem de viabilidade pode ser considerado um bom acordo em termos de probabilidade de bloqueio. Um tempo de estabelecimento do *lightpath* ligeiramente mais alto, comparado a outras arquiteturas, pode ser tolerado especialmente considerando o impacto sobre o comportamento atual protocolo RSVP e sua independência de parâmetros estritamente relacionada às propriedades de rede e topologia.

Os autores consideraram algumas características físicas lineares como: perda, ruído ASE, dispersão cromática, dispersão de modo de polarização e *crosstalk*. O grupo de falhas foi restringido aos lineares principalmente para diminuir a complexidade do problema estudado.

Foi utilizado o simulador Glass e algumas extensões foram implementadas para inserir restrições ópticas modeladas matematicamente.

4.1.6. Muñoz, Martínez e Junyent (2007)

Em redes roteadas por comprimento de onda e baseadas em GMPLS, cada nó origem realiza a decisão RWA baseado em informações do estado da rede (topologia e recursos) mantidas por eles, as quais podem ser locais ou globais. A disseminação de informações na rede pode ser feita com a extensão de protocolos de comunicação interior (IGP), que podem, periodicamente, inundar a rede com informações atualizadas sobre os recursos. Assim, cada nó pode ter o conhecimento global do estado da rede usando mensagens *Link-State Advertisement (LSA)* de atualização.

Um dos desafios envolvendo o estabelecimento de caminhos em redes ópticas é o desenvolvimento de algoritmos eficientes para selecionar rotas e associar comprimentos de onda para maximizar o número de conexões estabelecidas e aumentar a eficiência no uso dos recursos da rede. O LS (*Suggest Label Object*) foi introduzido para diminuir os atrasos no estabelecimento das conexões. Permite reservar e configurar o hardware com um lambda proposto pelo nó origem. No entanto, essa solução não é

ótima na ausência de conversores de comprimento de onda (WSN – *Wavelength Selective Networks*). A necessidade de garantir a restrição de continuidade de comprimento de onda, para conexões fim a fim combinado com a falta de informações globais de estado de enlace, aumenta a probabilidade de bloqueio no estabelecimento dos caminhos usando sugestão de rótulo.

Os autores propõem um aprimoramento do RSVP-TE com provisionamento contrabalanceado, que minimiza o tempo para a configuração de conexões, aumentando o desempenho da rede em termos de probabilidade de bloqueio e atraso de configuração (Figura 21

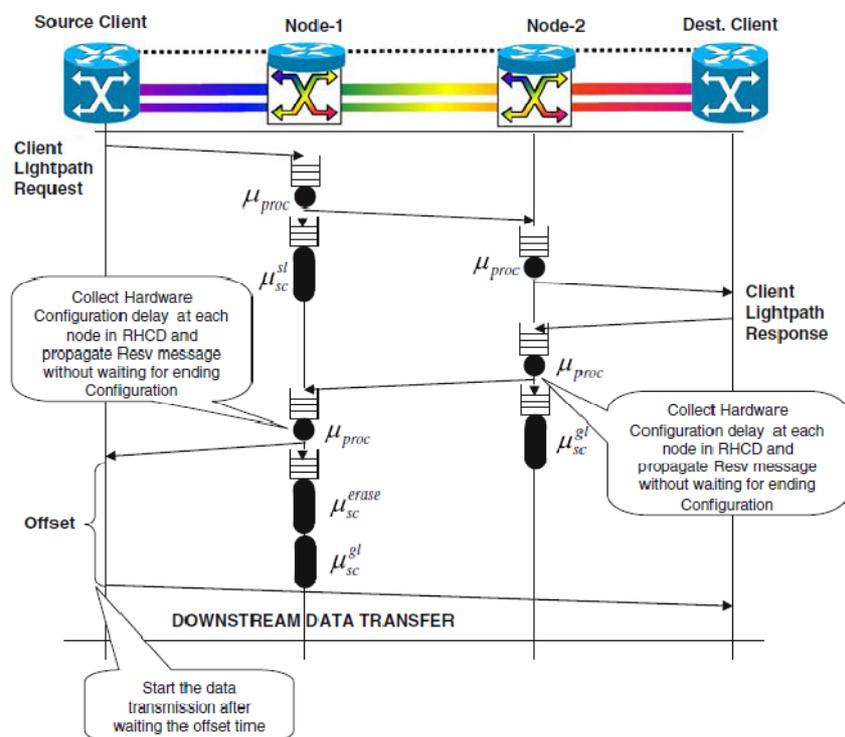


Figura 21: Modelo de sinalização proposto por (Muñoz, Martínez e Junyent, 2007).

4.2. Trabalhos sobre Rwa Com/Sem Restrições da Camada Física

Modelos de restrições para alguns parâmetros de desempenho são encontrados na literatura, e visam serem incorporados a IRWAs para a utilização em redes ópticas

transparentes. Essa sessão é dedicada à apresentação de alguns trabalhos que envolvem restrições da camada física.

4.2.1. Cieutat e Binh (2003)

Cieutat e Binh (2003) analisam maneiras de montar caminhos e associar comprimentos de onda com a finalidade de minimizar a média de bloqueio de requisições atuais e futuras. É proposto um esquema RWA dividido em três partes: roteamento, associação de comprimento de onda e um plano de reserva. Na primeira o roteamento foi baseado no OSPF e em diferentes *drafts* as quais estendem a capacidade do protocolo para roteamento em redes totalmente ópticas. Na segunda parte duas diferentes maneiras de associação de comprimento de onda foram implementadas: *First-Fit* e *Random*. E, para finalizar, na terceira parte foi desenvolvido um esquema de reserva paralela adequado para examinar o desempenho das duas partes anteriores. O desenvolvimento das partes um e dois foi auxiliado por um framework orientado a objetos para facilitar o reuso da implementação e para simulações futuras. O modelo foi implementado em C++ e simulado em OMNet++ (disponível em <http://www.omnetpp.org/>). Esse trabalho não leva em consideração restrições da camada física para a escolha das rotas, portanto é indicado para trabalhos que utilizam um modelo ideal de rede (livre de erros). Os autores recomendam a inserção de restrições físicas para estudos futuros (como um aprimoramento do algoritmo RWA).

4.2.2. Huang e colaboradores (2005)

Para prover garantia na qualidade do sinal, Huang e colaboradores (2005) investigaram algoritmos que consideram restrições da camada física. Quando a degradação do sinal induz a uma taxa de erro de bits (BER) inaceitável significa que o caminho óptico não pode ser utilizado, por não prover boa qualidade do sinal. Eles desenvolveram um algoritmo RWA ciente de restrições físicas que automaticamente

considera os efeitos que ocorrem na transmissão em redes de alta velocidade (acima de 10 Gbps). Como contribuição principal, um novo modelo RWA hierárquico para provisionamento de conexões de alta velocidade foi definido: o OSNR e a PMD são estimados na camada física e utilizados como métricas para a escolha do caminho óptico pela camada de rede.

A arquitetura dos enlaces dos caminhos ópticos (Figura 22) é utilizada para avaliar o OSNR. O amplificador de linha usa amplificador Raman distribuído com bombeamento reverso (DRA) e é utilizado a cada 82 Km (valor típico). Entre os amplificadores são utilizados 70 km de fibra SSMF (*Standard Single-Mode Fiber*), cuja dispersão é compensada por 12 km de fibra DCF (*Dispersion Compensation Fiber*). Dessa forma, o cálculo do OSNR leva em consideração os ruídos causados pela amplificação Raman, diferentemente, do modelo utilizado na presente dissertação, que considera, apenas, o ruído causado por amplificadores EDFA.

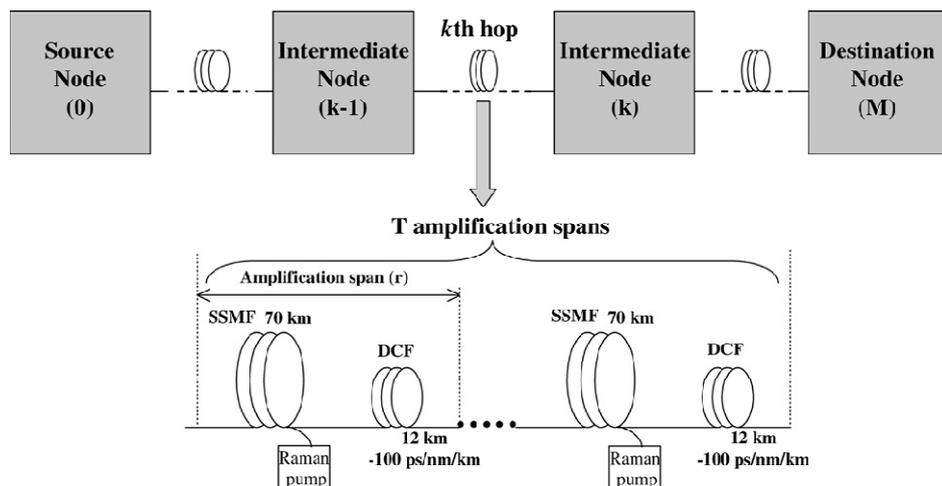


Figura 22: Arquitetura do caminho óptico simulado por Huang e colaboradores (2005).

4.2.3. Zulkifli, Okonkwo e Guild (2006)

Outro trabalho que considera restrições da camada física foi realizado por Zulkifli, Okonkwo e Guild (2006), os quais propõem algoritmos que contêm informações sobre a dispersão cromática para os subproblemas de roteamento e atribuição de comprimento de onda. O novo algoritmo é conhecido como *Dispersion*

Optimised Impairment Constraint-based RWA (DOIC). As restrições estudadas são a dispersão cromática e a OSNR e, assim como o trabalho descrito anteriormente, utiliza essas informações na camada de rede. Os resultados mostram que a probabilidade de bloqueio é reduzida quando utilizado o algoritmo proposto pelos autores.

Para investigar a probabilidade de bloqueio, foi construído um simulador de eventos discretos. Dois outros algoritmos diferentes foram simulados: *Conventional DisTancebased (CDT)* e *Modified Future Cost (MFC)*. A topologia utilizada é baseada no *backbone* italiano com comprimento máximo do enlace de 450 km.

Não é considerada a degradação causada pela PMD, mas os autores sugerem como trabalho futuro inserir no algoritmo essa e outras restrições, tais como não linearidades.

4.2.4. Martínez e colaboradores (2006)

São apresentadas e avaliadas uma abordagem híbrida (distribuída-centralizada) e duas distribuídas, que integram informações sobre as mais relevantes restrições da camada física em RWA. Ambas realizam o cálculo do caminho óptico de maneira centralizada no nível do plano de gerência, utilizando informações sobre restrições físicas, enquanto o provisionamento do caminho óptico é feito pelo plano de gerência ou de controle. As abordagens distribuídas estão inteiramente inseridas no escopo do plano de controle ASON/GMPLS. Para essas duas abordagens os autores proveram requerimentos e blocos funcionais de arquitetura e extensões de protocolos. Dessa forma é possível implementar ou um RWA de tempo real ciente de restrições físicas, ou um provisionamento de caminhos ópticos baseado em uma sinalização ciente de restrições.

O estudo mostrou que em um cenário com tráfego dinâmico, em que os efeitos provenientes da camada física podem variar frequentemente, a abordagem baseada em um plano de controle distribuído apresentaram-se mais apropriadas para gerenciar o

provisionamento de conexões rápidas que consideram a qualidade do sinal. Por outro lado, o modelo centralizado pode ser útil em redes com número reduzido de nós.

4.2.5. Wason e Kaler (2007)

Para Wason e Kaler (2007), o problema RWA é a única característica de redes WDM em que cada caminho óptico é implementado pela seleção da rota de um enlace físico entre os nós origem e destino e a reserva de um determinado comprimento de onda sobre cada enlace do caminho. Assim, o estabelecimento da conexão pode seguir duas abordagens: considerar roteamento e atribuição do comprimento de onda juntos ou separados. Wason e Kaler (2007) consideram a segunda opção, enfatizando os estudos na atribuição de comprimento de onda. Eles propõem a análise do subproblema de atribuição de comprimento de onda por meio de comparações feitas entre os algoritmos *FirstFit* e *Random* de acordo com a probabilidade de bloqueio em redes com e sem conversão de comprimento de onda. Em todas as simulações a probabilidade de bloqueio da rede é comparada dependendo do número de canais, carga e número de enlaces. O número de comprimentos de onda é mantido constante. Os resultados mostram que a probabilidade de bloqueio quando utilizado o algoritmo *Random* é sempre maior em relação ao *First-Fit* e, no caso de conversão de comprimento de onda, é mínima. Esse resultado é equivalente ao adquirido na presente dissertação. Em todas as simulações o *Random* mostrou-se com menor desempenho, no entanto, possui complexidade de implementação menor também.

4.2.6. Harhira e Pierre (2008)

Harhira e Pierre (2008) propõem um framework de engenharia de tráfego multicamada integrados que considera ambas as topologias, física e lógica, para dinamicamente, admitir novos caminhos (LSPs) na rede GMPLS. O controle de

admissão dinâmica é baseado sobre uma determinação ótima de um modelo de programação linear que leva em consideração, tanto os *lightpaths* disponíveis quanto a restrição de continuidade de comprimento de onda. Tendo em vista minimiza atrasos no estabelecimento dos LSPs, esse mecanismo primeiro considera a topologia lógica (conjunto de *lightpaths*) que já está no lugar antes de estabelecer um novo *lightpath* para o LSP entrante, resultando em um atraso adicional. Quando testado por simulação, os resultados confirmam que a formulação proposta efetivamente aumenta o desempenho da rede por reduzir as taxas de bloqueio enquanto garante restrições de atraso e ruído.

4.2.7. Outros Trabalhos

Outros trabalhos são citados na Tabela 5.

Tabela 5: Trabalhos que consideram restrições físicas em seus modelos. Modifica de (MARTÍNEZ, PINART E, COMELLAS, 2006).

	Modelo(s) de restrição	Restrições físicas consideradas	Algoritmo RWA
Ramamurthy <i>et al</i> (RAMASWAMI <i>et al</i> , 2002)	Estimativa BER	ASE (efeitos de transmissão linear e crosstalk)	Dois passos: 1. Solução de rede de camadas; e 2. Avaliação de rota da camada física (limiar).
Cardillo <i>et al</i> . (CARDILLO <i>et al.</i> , 2005)	OSNR	ASE (efeitos de transmissão linear e não linear)	
Kulkarni <i>et al</i> . (KULKARNI <i>et al.</i> , 2005)	Fator-Q	Dispersão cromática, PMD, ruído ASE, crosstalk e concatenação de filtro.	Três passos: 1. Custo do enlace; 2. Menor caminho; e 3. Validação da qualidade do sinal.
Pavani <i>et al</i> (PAVANI <i>et al</i> , 2006)	ASE	ASE	Extensão do protocolo OSPF-TE e usando a abordagem ACO (<i>Ant Colony Optimization</i>) para o cálculo de rotas
Marsden, Maruta e Kitayama (MARSDEN, MARUTA e KITAYAMA, 2008)	-	FWM	Introduz uma nova função de custo baseado no roteamento baseado na ciência de restrições físicas.

4.3. Uso de simulações

A maioria dos trabalhos citados faz uso de simulações para verificar o desempenho de algoritmos ou a validade de determinada idéia. De acordo com Din (2008), para avaliar o funcionamento de uma rede podem ser utilizadas duas técnicas: medição e preditiva. A primeira compreende no uso de um ambiente real de rede para realização de experimentos, assim detalhes sobre a operação da rede não são incluídos.

Por outro lado, nas técnicas preditivas estão incluídos o uso de modelos matemáticos e de simulação.

Análises matemáticas, em muitos casos, é uma tarefa complexa, tal como para análise do controle de admissão no plano de controle GMPLS (DIN, 2008). Em contraste, redes de alta complexidade podem ser analisadas utilizando simulação. Pitts e Schormans (2000) consideram a simulação um efetivo método para demonstrar conceitos. Por tais motivos, a presente dissertação faz-se uso dessa técnica.

4.3.1. Lightwave Agile Switching Simulator (GLASS)

Com o objetivo de avaliar a importância da utilização de algoritmos IRWA nas redes ópticas, foram efetuadas simulações, realizadas com o auxílio do GMPLS *Lightwave Agile Switching Simulator* (GLASS), uma ferramenta livre desenvolvida em Java para simulação de redes GMPLS, disponível em (NIST). Este software é originado de uma corporação do *High Speed Network Technologies Group e do Internetworking Technologies Group*, componentes da divisão de tecnologias de rede avançada da NIST (*National Institute of Standards and Technology*).

O GLASS Simulator consiste de um conjunto de objetos que funciona juntamente com o *Scalable Simulator Framework* (SSF) e seu complemento, SSFNet (SSFNet). Este último provê componentes de rede como hosts, roteadores, enlaces e vários protocolos de rede. O GLASS estende estes componentes com uma implementação de MPLS, OXC, roteadores de borda, enlaces ópticas, fibras e comprimento de onda. Basicamente o GLASS é um simulador de linha de comando que lê as configurações de simulação de um script e oferece a possibilidade para escrever o resultado em arquivos binários.

Para projetar cenários de simulação é utilizada a linguagem DML (*Data Modeling Language*), que permite um alto nível de descrição de componentes e de topologia. Os Esquemas DML podem ser escritos usando a sintaxe DML. A seguir é ilustrada a representação de um OXC em DML:

```

Oxc [
    id 5
    x 423
    y 431
    graph [
        ProtocolSession [
            name ip
            use gov.nist.antd.ssf.os.IP
        ]
        ProtocolSession [
            name oxcswitch
            use
gov.nist.antd.optical.OXCSwitch
            noAddDrop 10
        ]
    ]
    Onic [
        id 0
        FRM [
            use
gov.nist.antd.optical.ONICFailureModule
        ]
    ]
]

```

O GLASS possui uma arquitetura modular constituída de módulo de camada física, de camada lógica, e de protocolos. Sua implementação permite a adição de novos protocolos, bem como algoritmos. O presente trabalho é focado nas duas camadas em vermelho da arquitetura ilustrada em Figura 23. Primeiro são inseridos algoritmos para associação de comprimento de onda (algoritmos RWA), e em seguida restrições da camada física (framework óptico).

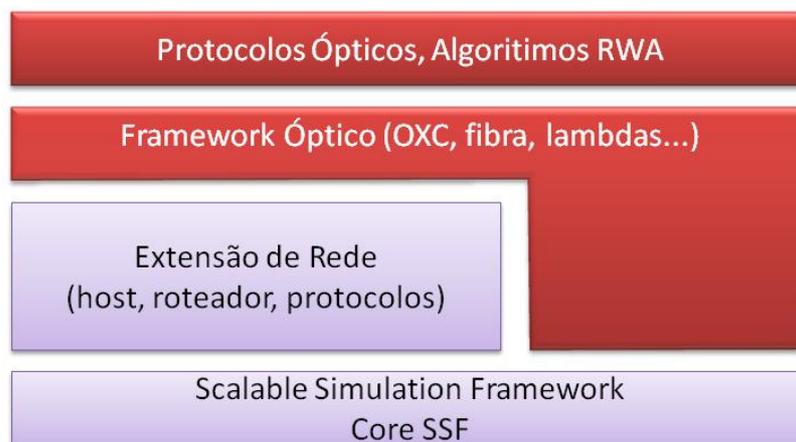


Figura 23: Representação modular da arquitetura do GLASS.

O GLASS prevê acesso total à biblioteca de protocolos disponíveis no SSF. Estes protocolos são executados no domínio não-óptico, porém, na parte óptica, o GLASS prevê a implementação de GMPLS, OSPF estático sobre redes ópticas, IP sobre redes ópticas, diversas exemplo de implementações de falha de propagação e protocolo de recuperação não baseados no IP (pura sinalização óptica).

O problema RWA é implementado usando os subproblemas de roteamento e atribuição de comprimento de onda. No entanto é previsto a implementação conjunta dos mesmos. Para esse trabalho foi utilizado a divisão em subproblemas por permitir maior flexibilidade na manutenção e por ser menos complexo. As rotas para cada conexão solicitada são escolhidas utilizando algoritmos para encontrar o caminho mais curto. Os disponíveis na ferramenta são:

- *Shortest Path Distance* (`ShortestPathDistance.java`): Utiliza algoritmo Dijkstra apenas com a distância como custo do enlace. Este foi o algoritmo utilizado nos modelos simulados.
- *K-Shortest Path Distance*: representado pela classe `KspDisjoint.java`. Procura pelas menores rotas possíveis. Ao encontrar uma, remove seus nós do grafo para que o próximo menor caminho seja encontrado.
- *Shortest Path SRLG*: implementado na classe `ShortestPathSRLG.java`. Utiliza o algoritmo Dijkstra considerando a distância como custo do enlace, no entanto inclui SRLG (*Shared Risk Link Group*).

Para a atribuição de comprimento de onda estão disponíveis três tipos de algoritmos diferentes:

- *Random* (`RandomWA.java`): a partir de um conjunto de comprimentos de onda disponíveis é escolhido um ao acaso. A execução desse algoritmo compreende em um processo local, não considerando informações dos demais nós. Não é um algoritmo nativo da ferramenta, foi implementado de acordo com a literatura.
- *BestFit* (`BestFit.java`): escolhe um canal para uma *lightpath* de acordo com a idéia do algoritmo BestFit. Escolhe o primeiro comprimento de onda

que oferecer a largura de banda mais próxima do desejado. Já é implementado no GLASS.

- *Most-Used* (`MostUsed.java`): a partir de um conjunto de comprimentos de onda escolhe aquele que foi mais utilizado no estabelecimento das conexões anteriores. Também não é um algoritmo nativo da ferramenta.

Todas as classes mencionadas anteriormente estão representadas no diagrama de classes presente no Apêndice A. As classes que representam os algoritmos de roteamento e atribuição de comprimento de onda estendem a classe `AlgorithmTemplate`, que por sua vez, implementa as interfaces `Algorithm` e `DMLDump`. Essa classe foi criada para tornar mais rápida e mais fácil a implementação de outros algoritmos, pois parte da premissa que se as configurações básicas já estão feitas, o usuário foca apenas na implementação do algoritmo. Todos os algoritmos oferecidos no Glass estendem esse modelo.

Para ter acesso às classes dos algoritmos, é necessário utilizar o método `execute`, presente na classe abstrata `AlgorithmTemplate`. Como por exemplo, no trecho de código a seguir, extraído da classe `AlgoUtil`:

```
routeParam = ca.execute (net, routeParam, param);
```

Esse trecho executa o algoritmo de roteamento `ca`, que nesse caso é o *Shortest Path Distance*. Para execução é necessário da configuração da rede, da conexão óptica a ser estabelecida e de parâmetros extras, caso existam. Encontrada a rota, o algoritmo de atribuição de comprimento de onda é executado, da mesma forma como o anterior.

Como Glass não suporta restrições da camada física, foi desenvolvido um módulo para consideração do PMD e outro para OSNR. Esses módulos compreendem, respectivamente, no cálculo da dispersão por modo de polarização de acordo com as equações descritas no capítulo II.

4.3.2. Módulo PMD

Para avaliar se a qualidade do sinal é aceitável para determinada requisição de conexão, uma das classes utilizadas é a `PolarizationModeDispersion` (Figura 24) .

A chamada do módulo é realizada após a escolha da rota pelo algoritmo de roteamento. A partir dessa rota é realizado o cálculo introduzido na sessão 2.5.1 do Capítulo 3 pelos métodos `PMDCalculation` e `DpmdSun`. O primeiro realiza o cálculo efetivo, enquanto o segundo obtém a somatória da multiplicação entre o parâmetro PMD e o tamanho do enlace.

Os demais métodos foram implementados para auxiliar no recálculo da rota. Por exemplo, `getHighestElement` é utilizado para buscar o enlace com maior degradação do sinal para que o mesmo não seja utilizado no recálculo da rota.

PolarizationModeDispersion
<pre> ~ Dpmd_k : double ~ B : double = 10 ~ Vet_size : int ~ L : double </pre>
<pre> + PolarizationModeDispersion() + PolarizationModeDispersion(dpmd_k : double, b : double, m : int, l : double) + PMDCalculation(routes : Vector) : double[] + DpmdSun(route : OpticalConnection) : double + getDpmd(id : int) : double + getElemVet_Route(pos : int) : PMDstructure + getVet_size() : int + setVet_Route(vet_size : int) : void + showVet_Route() : void + getHighestElement() : int </pre>

Figura 24: Representação da classe **PolarizationModeDispersion** que realiza o cálculo da PMD.

4.3.3. Módulo OSNR

O cálculo da relação sinal ruído é realizado pela classe `SignalNoiseRate` (Figura 25). Os métodos mais importantes são: `SignalPowerCalculate`, `ASEPower` e `SignalNoiseRate`, os quais realizam, respectivamente, o cálculo da potência do sinal, cálculo da potência do ruído ASE e a relação entre essas duas potências.

Os demais métodos são utilizados para auxiliar no recálculo da rota quando a qualidade do sinal não satisfaz os limiares estipulados. Por exemplo do `showVet_Route` é utilizado para listar os elementos do vetor que armazena a relação sinal ruído dos enlaces.

SignalNoiseRate
~ Planck : double = 6.6e-36
~ Power : double
~ B : double = 70e9
~ G : double = 6
~ OP : double = 3
~ L : double = 0.25
~ T : int = 0
+ SignalNoiseRate(T : int)
+ SignalNoiseRate()
+ OSNRCalculate(routes : Vector) : double[]
+ SignalPowerCalculate(links : ArrayList, k : int) : double
+ ASEPower(links : ArrayList, k : int) : double
+ getVet_route() : ArrayList
+ setVet_route(size : int) : void
+ showVet_Route() : void
+ getHighestElement() : int

Figura 25: Representação da classe **SignalNoiseRate** que realiza o cálculo da PMD.

4.4. Considerações finais

O uso de simulação para realização de testes é uma técnica muito utilizada pela comunidade acadêmica, uma vez que o nível de complexidade é menor comparado com a manipulação de modelos analíticos. Além disso, para realizar experimentos práticos é necessária infra-estrutura adequada que requer um alto investimento.

A ferramenta GLASS, escolhida para realização dos testes, oferece componentes ópticos e serviços do plano de controle GMPLS. No entanto, em se tratando de atribuição de comprimento de onda a ferramenta prevê, apenas, o algoritmo *BestFit*. Os algoritmos *Random* e *MostUsed* foram implementados para a realização de comparações.

Outras modificações realizadas na ferramenta compreendem na inclusão de módulos para prover ciência das restrições físicas PMD e OSNR. O recálculo da rota, também foi uma das alterações feitas no simulador.

CAPÍTULO V

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta comparações entre os resultados de dois tipos de redes: ideal e com restrições da camada física (mais realísticas). Os ambientes foram simulados em três diferentes circunstâncias: com algoritmo RWA tradicional, porém sem restrições físicas (ideal); rede com restrições e algoritmo RWA tradicional; e rede com restrições e RWA ciente delas. Os cenários utilizados para obtenção dos resultados foram o Projeto Kyatera e outro utilizado por Pavani e colaboradores (2006). A ferramenta utilizada para simulação foi GMPLS Lightwave Agile Switching Simulator (GLASS). Os resultados mostram que o uso de algoritmos cientes das restrições inerentes à camada física ajuda na diminuição da taxa de bloqueio de conexões.

5.1. Estudos de caso

O modelo ilustrado na Figura 26 foi utilizado para obter os resultados: uma rede ideal e uma rede com restrições físicas. Na rede ideal é considerada a ausência de erro devido a efeitos provenientes da camada física, portanto é utilizado o algoritmo RWA tradicional. No modelo de rede com restrições físicas, são consideradas as restrições PMD e OSNR, tornando a rede mais realística. Nesse caso são feitas comparações em

relação à probabilidade de bloqueio entre o uso do algoritmo RWA e o algoritmo proposto ciente de restrições.

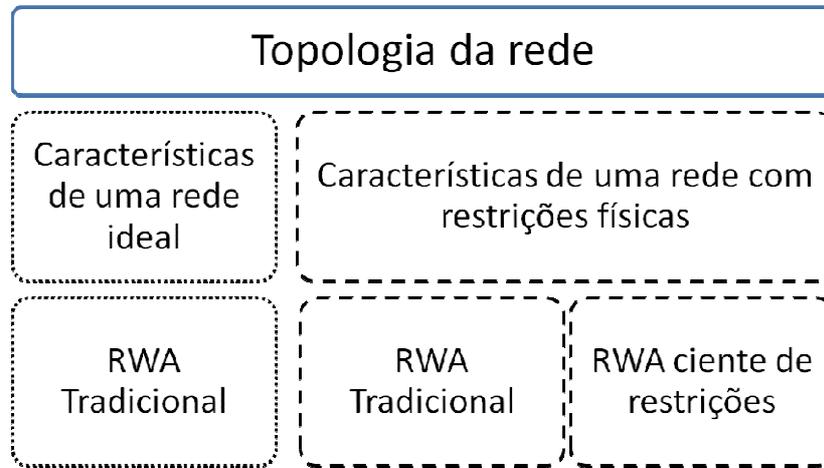


Figura 26: Modelos de rede comparados. Baseado em (HUANG, HERITAGE e MUKHERJEE, 2005).

Para o cálculo da probabilidade de bloqueio (BP) em todos os testes foi utilizado a equação $BP = NBR / TN$ (6). NBR representa o número de requisições bloqueadas e NT o total de requisições feitas.

$$BP = NBR / TN \quad (6)$$

As requisições são criadas randomicamente, as origens e os destinos são escolhidos por uma função aleatória integrada ao simulador. A chegada das conexões consiste em um processo poissoniano.

5.1.1 Primeiro cenário: Rede Kyatera

O projeto Kyatera⁸ é um *testbed* óptico implementado entre universidades do estado de São Paulo. Surgiu com o intuito de reunir recursos e competências no desenvolvimento de pesquisas nos domínios da ciência, tecnologia e Internet. Os pesquisadores participantes são interligados por cabos de fibra óptica diretamente conectados aos laboratórios (FTTH – *Fiber To-The-Lab*). A conexão do Kyatera com

⁸ <http://kyatera.incubadora.fapesp.br/portal>

outros países é realizada por um enlace entre São Paulo e Miami com velocidade de 2,5 Gbps (<http://www.glif.is/>). A realização do projeto é financiada pela *National Science Foundation* (EUA) e pela *Fapesp*, por meio da iniciativa *WHREN* (*Western Hemisphere Research and Education Networks*).

A rede Kyatera é uma rede óptica de pesquisa implementada em três fases distintas (Figura 27). Os nós principais estão localizados nas cidades de São Paulo, Campinas, São Carlos, Rio Claro, Ribeirão Preto, São José dos Campos, Santos, Bauru e São José do Rio Preto. O anel principal é formado pelas três primeiras cidades mencionadas constituído de dois circuitos logicamente separados, capazes de transmitir 1 e 10 Gbps respectivamente.



Figura 27: Fases do projeto Kyatera.

Em abril de 2007 o *backbone* da rede Kyatera tornou-se completo devido a um convênio assinado entre Fapesp e Telefônica para liberar o uso do legado da empresa telefônica para interligar as cidades configurando a disposição ilustrada na Figura 28.

A Rede Kyatera é dividida em duas partes: rede estável e experimental. A rede estável é baseada no protocolo Ethernet (RFC 3378) e interliga todos os laboratórios do projeto utilizando uma malha óptica de fibras SMF (*Single Mode Fiber*, ITU G.652) dedicada. Sua principal função é disponibilizar recursos e serviços para os participantes

do projeto (videoconferência, por exemplo). É oferecido para cada laboratório uma taxa de transmissão mínima de 1 Gbps sustentada por um *backbone* com velocidade de 10Gbps interligando os centros concentradores da rede (São Paulo, Campinas e São Carlos). A rede experimental é utilizada para a realização de experimentos colaborativos e distribuídos de transmissão óptica. São disponibilizadas diversas fibras apagadas, monomodo e/ou multimodo, seguindo a necessidade do laboratório.



Figura 28: Disposição geográfica da rede Kyatera.

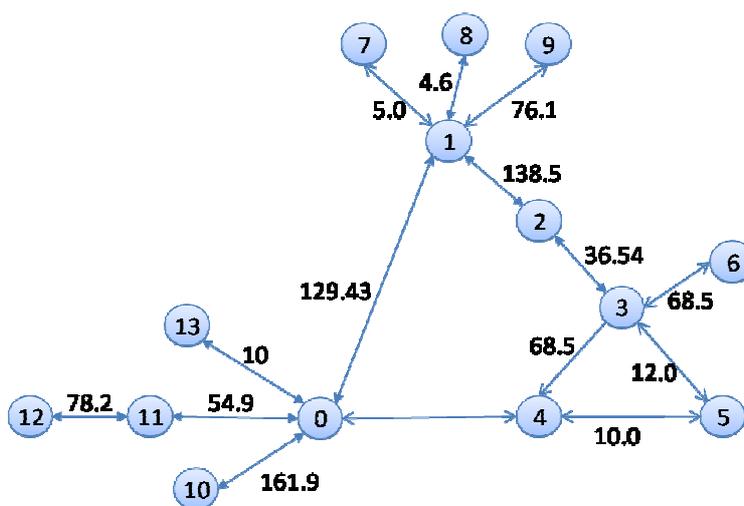


Figura 29: Topologia parcial do projeto Kyatera utilizada para realização dos testes. (O número nas arestas significa a distância em Km)

Para a realização desse trabalho foi utilizada a topologia ilustrada na Figura 29, representando a topologia constituída nos principais nós na rede Kyatera. As cidades são representadas por números tal qual a Tabela 6.

Tabela 6: representação das cidades do Kyatera usados na simulação

Representação no grafo	Cidade
0	USP
1	UNICAMP
2	UNESP Rio Claro
3	CDCCS
4	USP São Carlos
5	UFscar
6	UNESP Araraquara
7	CPqD
8	PUCCamp
9	CenPRA
10	ITA
11	UFABC
12	UNISANTOS
13	Nap Barueri

5.1.2 Segundo cenário: Pavani *et al.* Modificado

Outro cenário utilizado está ilustrado na Figura 30. Em (Pavani *et al.*, 2008), o caminho de 5 para 4 passando por 6 é colocado para desafiar o algoritmo proposto pelos autores. Aqui esse caminho tem quase a mesma funcionalidade, pois nesse trecho foi inserido um valor mais alto de D_{PMD} .

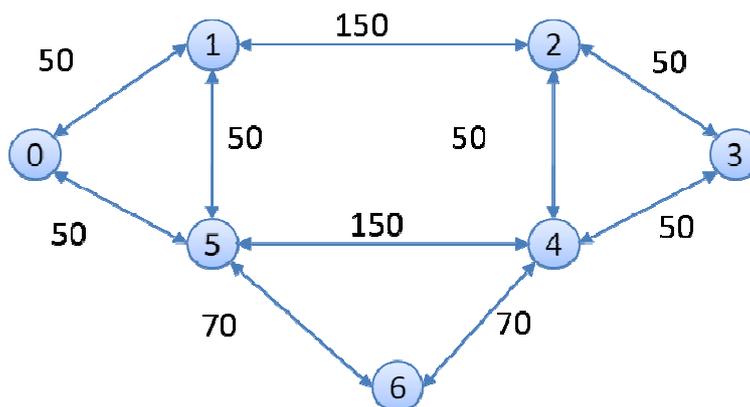


Figura 30: Topologia utilizada para realização dos testes (PAVANI *et al.*, 2008).

Como o caminho entre os nós citados é menor, o algoritmo de roteamento freqüentemente escolherá esse enlace, se possível. Por esse motivo, o uso de parâmetros D_{PMD} mais altos ajuda no teste do algoritmo com ciência de restrição (especificamente a PMD). O algoritmo terá que escolher outra rota quando verificar que o valor tolerante para PMD foi ultrapassado.

5.2. Simulação com algoritmos tradicionais

Para realizar o estabelecimento da conexão, primeiramente é escolhida a menor rota pelo algoritmo *Shortest Path Distance*. A rota encontrada é passada por parâmetro ao algoritmo de atribuição de comprimento de onda (WA), que, nesse trabalho, pode ser o *Random*, *BestFit* ou o *MostUsed*. A atribuição de comprimentos de onda não é uma tarefa trivial, já que é preciso manter a restrição de continuidade de comprimento de onda (devido à ausência de conversores de comprimento de onda). As Figura 31: e Figura 32 ilustram as comparações entre os algoritmos WA citados de acordo com a probabilidade de bloqueio de uma requisição.

Primeiramente, foram utilizados 4 comprimentos de onda e taxa de transmissão de 10 Gbps (Figura 31:). O modelo de rede simulado foi ideal (livre de erros causados por restrições físicas) tal qual Figura 26. O algoritmo *MostUsed* apresenta, em média (principalmente em cargas acima de 30 Erlang), melhor desempenho que os demais devido ao fato de sobrecarregar os comprimentos de onda mais utilizados, reservando

um excedente com aqueles menos utilizados na rede. Os comprimentos de onda são escolhidos em ordem decendente de utilização. Os algoritmos *BestFit* e *Random* utilizam informações locais para a escolha do comprimento de onda e possuem desempenho semelhante a partir de cargas acima de 30 Erlang. Quando se utiliza 10 comprimentos de onda (Figura 32), a probabilidade de bloqueio diminui para todos os algoritmos e as diferenças são mantidas. No entanto, com um número maior de lambdas, é possível que o algoritmo *MostUsed* não tenha o melhor desempenho. Os testes para comprovar tal fato é um dos futuros trabalhos propostos.

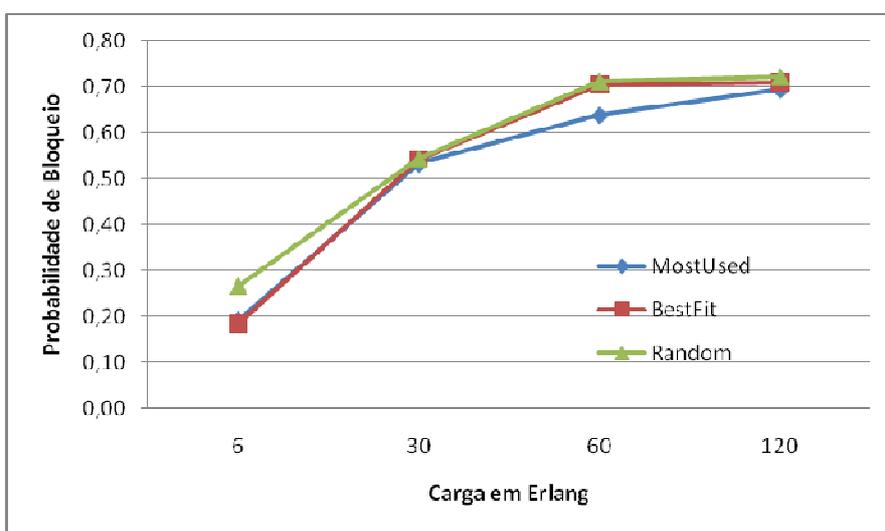


Figura 31: Comparação entre os algoritmos *Random*, *BestFit* e *MostUsed* para 4 comprimentos de onda disponíveis.

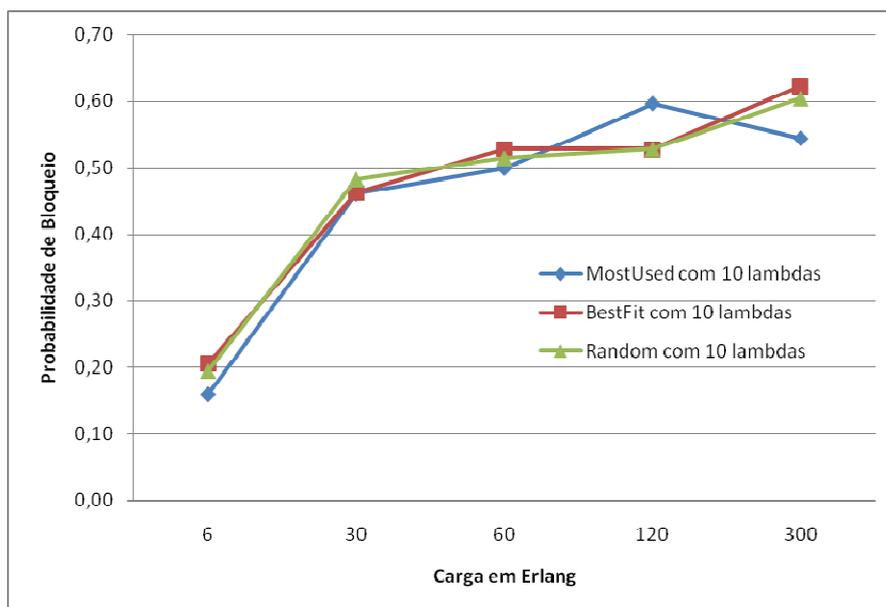


Figura 32: Comparação entre os algoritmos *Random*, *BestFit* e *MostUsed* para 10 comprimentos de onda disponíveis.

5.3. Simulação com PMD

A primeira restrição a ser considerada foi a PMD. Os primeiros testes utilizaram o segundo cenário com os parâmetros contidos na Tabela 7. Foram utilizados 4 comprimentos de onda com velocidade de transmissão igual a 10 Gbps e 100 Gbps cada, com esses valores os efeitos da dispersão por modo de polarização já são prejudiciais. O parâmetro PMD igual a $0.1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ é utilizado em quase todos os enlaces, exceto entre 5-6 e 4-6, cujo valor é igual a $0.5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$. Esse último valor foi escolhido baseado em (STRAND e CHIU, 2005), considerando que esse trecho da rede possui instalações mais antigas.

Tabela 7: Parâmetros utilizados nos testes.

Parâmetros	Valores
Comprimentos de onda (nm)	1549.2 ~ 1550.8 com espaçamento de 0.8nm
Velocidade de transmissão do canal	10 Gbps e 100 Gbps
Largura de Banda	40Ghz
Parâmetro PMD padrão utilizado	$0.1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$
Parâmetro PMD utilizado nos enlaces 5-6 e 4-6	$0.5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$

As requisições são criadas randomicamente, as origens e os destinos são escolhidos por uma função aleatoriamente integrada ao simulador. A chegada das conexões consiste em um processo poissoniano.

Primeiramente os resultados foram obtidos utilizando o *Shortest Path Distance* para o cálculo das rotas e o *BestFit* para atribuição de comprimento de onda. A dispersão por modo de polarização é inserida nos enlaces de acordo com os valores da Tabela 7. Levando em consideração essa restrição física e utilizando algoritmos que **não** são cientes de suas penalidades, a probabilidade de bloqueio alcança níveis prejudiciais ao estabelecimento das conexões. O número de conexões bloqueadas nos nós cujo

D_{PMD} é $0.5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ corresponde a 80% em média do total de conexões não estabelecidas devido à PMD. Esse fato justifica a necessidade de extensão dos algoritmos para considerar essa restrição.

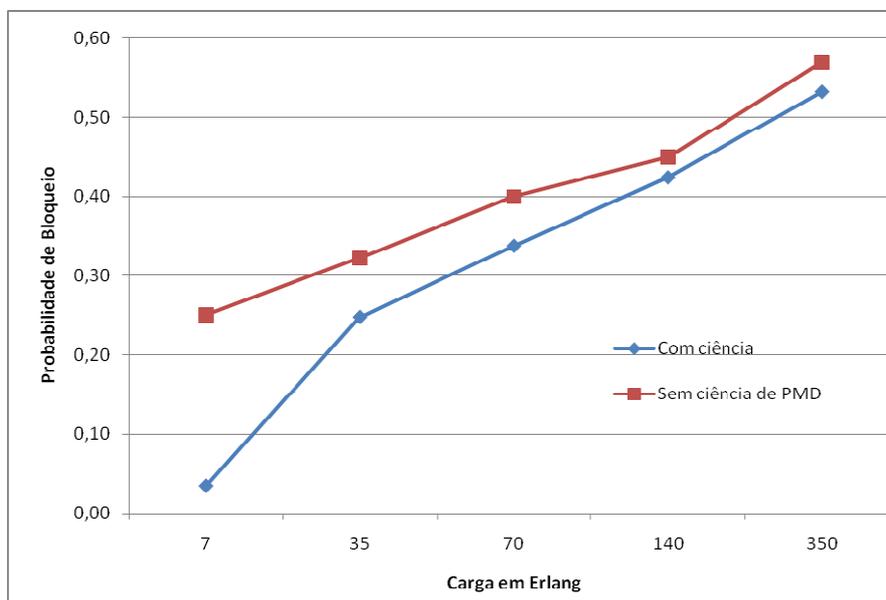


Figura 33: Comparação feita entre os algoritmos RWA sem e com ciência de PMD com $B = 10 \text{ Gbps}$.

Em outro teste, foi utilizado um algoritmo RWA com ciência da PMD tal como no fluxograma ilustrado na Figura 19. O gráfico na Figura 34 ilustra a redução da probabilidade de bloqueio, principalmente quando as rotas passam pelos enlaces 4-6 ou 5-6. Isso porque, quando o algoritmo detecta que a rota apresenta degradação do sinal maior que o limiar estipulado, ele tenta encontrar outra. A conexão será bloqueada caso nenhuma rota atenda aos requisitos de PMD, ou nenhum comprimento de onda foi atribuído. Nesse caso o bloqueio é resultado da falta de recursos da rede.

Em taxas de transmissão iguais a 100 Gbps, a penalidade sofrida pela rede em relação à probabilidade de bloqueio é maior em comparação à de 10 Gbps, principalmente entre 35 a 140 Erlangs, posteriormente tende aos mesmos valores. Esse fato é ilustrado no gráfico da Figura 34.

A maioria das requisições bloqueadas é causada por penalidades inseridas pela PMD, sendo que grande parte ocorre quando o caminho escolhido passa pelos enlaces com maior D_{PMD} . As barras em vermelho representam os bloqueios causados por falta de recursos, isto é, ou a requisição bloqueada por não ter rota ou por não haver comprimento de onda disponível no momento.

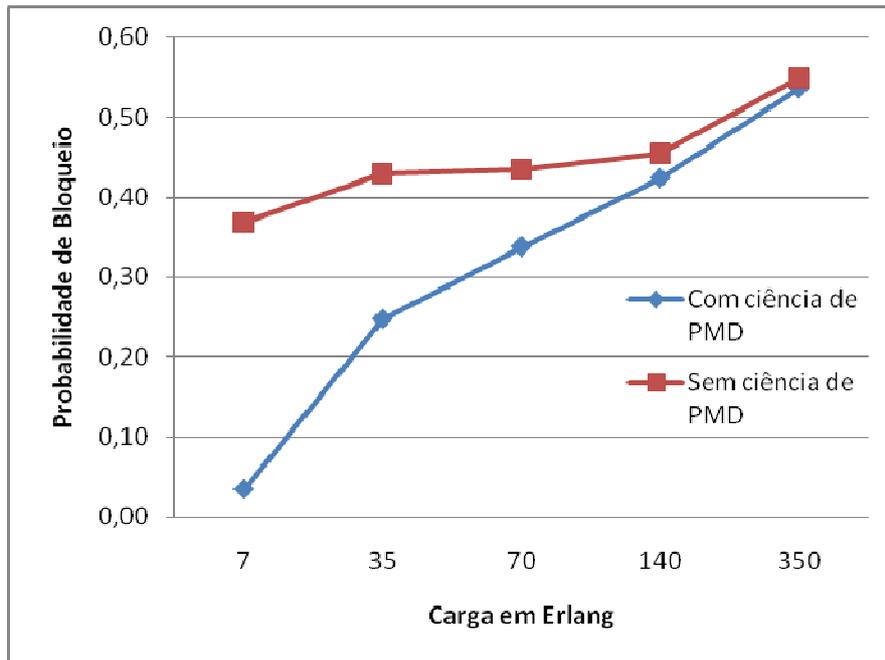


Figura 34: Comparação feita entre os algoritmos RWA sem e com ciência de PMD com $B = 100$ Gbps.

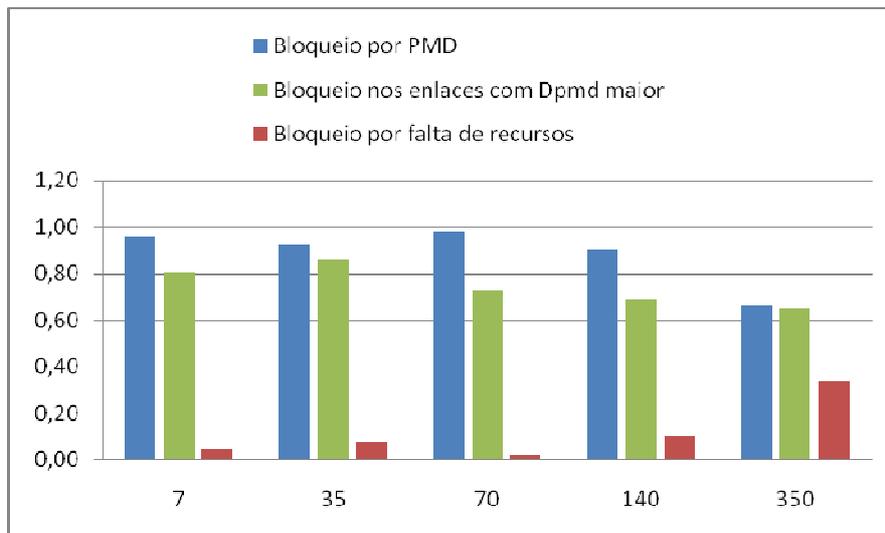


Figura 35: Causas de bloqueio de conexão.

5.4. Simulações com PMD e OSNR

Para avaliar o impacto causado pelo algoritmo proposto, considerando as restrições PMD e OSNR foram utilizados os dois módulos implementados na

ferramenta de simulação descritos no Capítulo IV. Os algoritmos para atribuição de comprimento de onda usados foram os citados anteriormente (*Random*, *BestFit* e *MostUsed*).

Os modelos sob estudo são os representados na Figura 26. No primeiro caso, foi usado um algoritmo RWA tradicional e os componentes da rede são considerados ideais. Já no modelo de rede com restrições, são consideradas PMD e OSNR, assumindo uma rede mais realística. Nesse caso, é feito um paralelo entre o algoritmo tradicional e o ciente dessas restrições.

Tabela 8: Parâmetros utilizados para simulação.

Parâmetros	Valores
Número de comprimentos de onda	4
Comprimentos de onda (nm)	1549.2 ~ 1550.8 (espaçamento de 0.8 nm)
Velocidade de transmissão do canal	10 Gbps
Largura de Banda	40 Ghz
D_{PMD} Típico	$0.1 \text{ ps}/\sqrt{km}$
D_{PMD} para fibras antigas	$0.5 \text{ ps}/\sqrt{km}$
Ganho do amplificador, G_{in}, G_{out}	12 dB, 6 dB
Limiar para OSNR	7.4 dB
Limiar para PMD	10% da taxa de bit
Perda na fibra	0.25 dB/Km
Potência óptica	3 dBm

Os testes foram realizados nos dois cenários descritos, seguindo os parâmetros da Tabela 8. Em ambos, o desempenho do algoritmo proposto aproxima-se do RWA tradicional quando este é aplicado em uma rede ideal. Esse fato é decorrente do bloqueio de conexões pela falta de recursos (ausência de rota ou comprimento de onda). No cenário Kyatera, a melhora alcançada (Figura 36) em relação ao RWA tradicional inserido em uma rede mais realística é de aproximadamente 20% em cargas de 6.5 Erlang com o algoritmo *FirstFit*. Quando o algoritmo *MostUsed* é utilizado a melhora é 30%, uma vez que reduz o bloqueio por falta de recursos (lambdas).

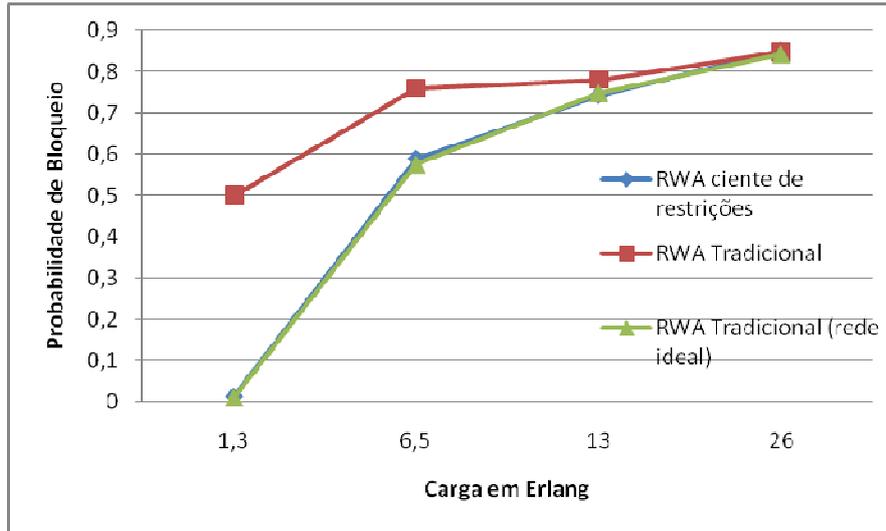


Figura 36: Probabilidade de bloqueio versus a carga usando algoritmo *FirstFit* no cenário Kyatera.

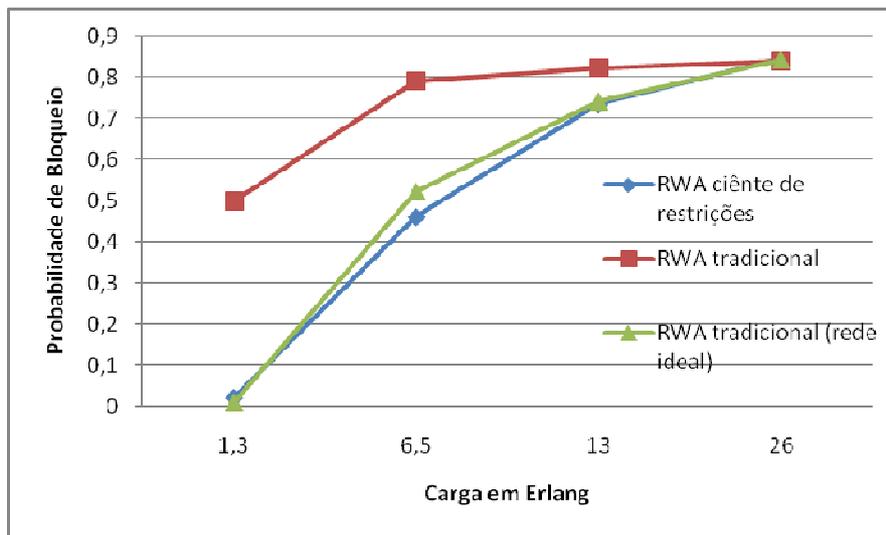


Figura 37: Probabilidade de bloqueio versus a carga usando algoritmo *MostUsed* no cenário Kyatera.

No segundo cenário a melhora alcançada é de 30% aproximadamente entre os algoritmo proposto e o tradicional utilizando *Random* e *BestFit*. Enquanto que para o *MostUsed* esse valor é de 35% devido ao mesmo motivo considerado no cenário Kyatera.

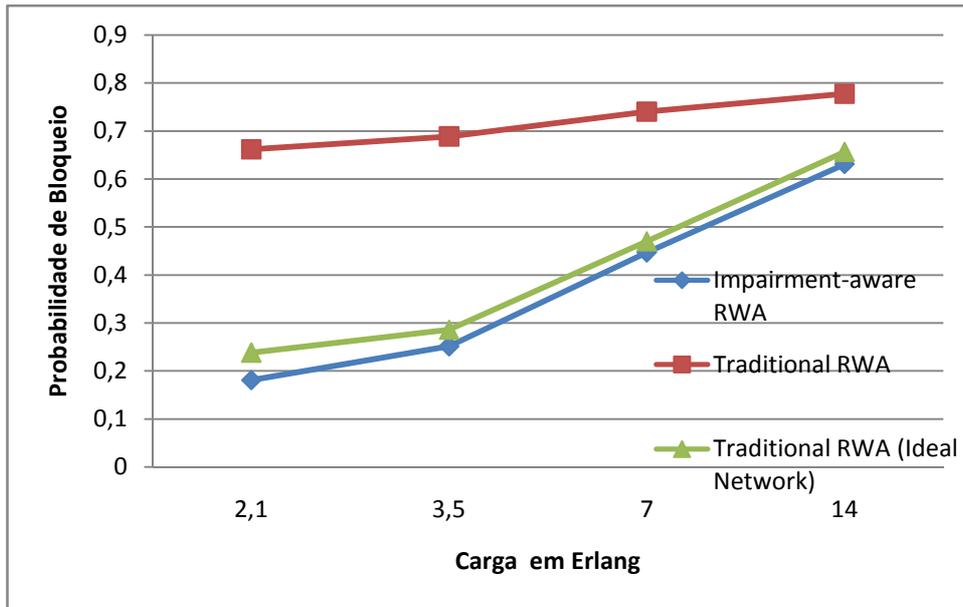


Figura 38: Probabilidade de bloqueio versus a carga usando algoritmo *Randon* no segundo cenário.

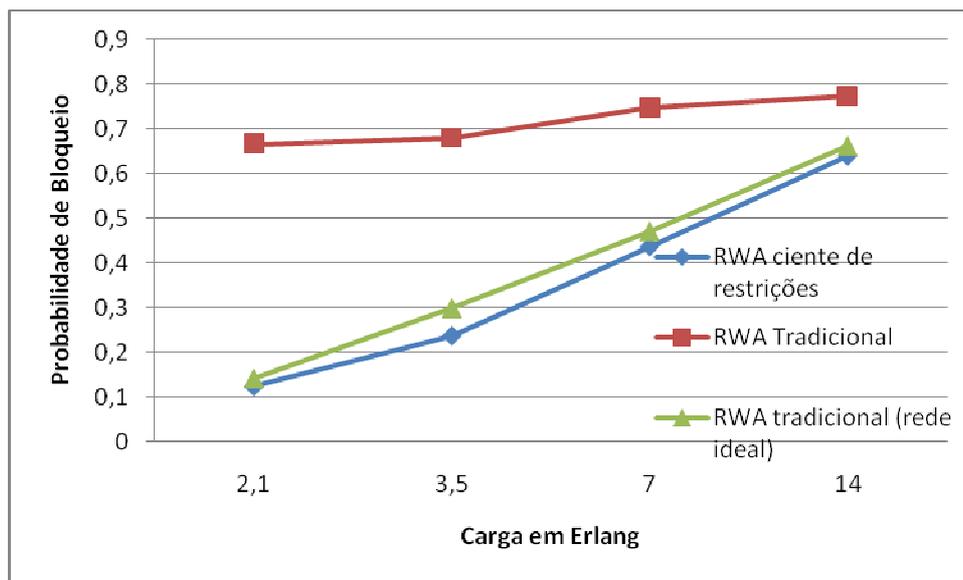


Figura 39: Probabilidade de bloqueio versus a carga usando algoritmo *FirstFit* no segundo cenário.

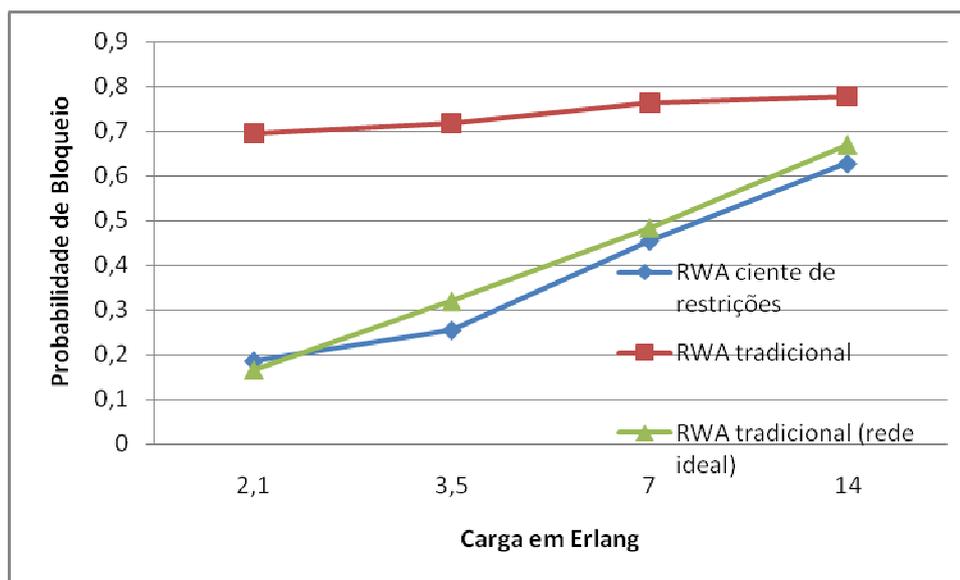


Figura 40: Probabilidade de bloqueio versus a carga usando algoritmo *MostUsed* no segundo cenário.

5.5. Considerações finais

O problema de roteamento e atribuição de comprimento de onda têm grande influência no estabelecimento de conexões. Diversas heurísticas são utilizadas para amenizar o problema e minimizar a probabilidade de bloqueio de requisições. No entanto, a maioria dos algoritmos utilizados não considera o bloqueio de conexões devido a problemas provenientes da camada física: são utilizados em modelos ideais, livres desse tipo de erro.

Em velocidades muito altas e grandes distâncias, características das redes de alta velocidade, os efeitos da camada física tornam-se prejudiciais a qualidade do sinal. Ter ciência desses efeitos faz-se necessário, uma vez que a demanda por largura de banda e a velocidade das redes aumentam (10 Gbps ou mais), propiciando o aparecimento dos mesmos.

Como visto nos gráficos, em modelos de redes mais realísticas, isto é, cientes das restrições, a degradação do sinal eleva significativamente a probabilidade do bloqueio. O uso de algoritmos que consideram essa degradação minimiza o bloqueio, conforme observado nos dois cenários considerados.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES E

TRABALHOS FUTUROS

O surgimento de sistemas de transmissão óptica (OADM, OXC, WDM, etc.) tem, drasticamente, aumentado a capacidade óptica das redes e tem permitido o surgimento de novas e sofisticadas aplicações. A diversidade e dificuldade de manipular esses dispositivos é um dos principais fatores que impulsionam o aprimoramento da suíte de protocolos MPLS para prover controle, não apenas a pacotes, mas também a comprimentos de onda, *slots* de tempo e fibras. O GMPLS estende o conjunto de protocolos baseados no IP que gerencia e controla o estabelecimento e a liberação de LSP que atravessa qualquer combinação de pacote, TDM e redes ópticas.

Em redes WDM o estabelecimento das configurações é feito com o auxílio de algoritmos para roteamento e atribuição de comprimento de onda que visam diminuir a probabilidade de uma requisição seja bloqueada. Diversas heurísticas podem ser utilizadas, no entanto, algumas apresentam melhor desempenho que outros.

O trabalho apresentou alguns algoritmos para atribuição de comprimentos de onda e mostrou que o melhor desempenho foi obtido pelo algoritmo *MostUsed*, pois sobrecarrega os lambdas mais utilizados na rede e deixa um excedente daqueles menos usados.

Foram consideradas as restrições da camada física PMD e OSNR de forma que, caso um caminho não possua boa qualidade do sinal, o mesmo será descartado e a rota recalculada por meio da proposta .

Os cenários utilizados compreendem na topologia da rede Kyatera (principais cidades) e outro retirado de (PAVANI *et al.*, 2008). Os resultados mostraram uma melhora que pode variar de 20 a 30% aproximadamente, sendo os valores mais altos atribuídos ao uso de RWA ciente de restrições juntamente com *MostUsed* e os menos com *FirstFit* ou *Random*.

Portanto, o uso de algoritmos cientes de restrições da camada física é essencial em redes totalmente ópticas e de alta velocidade, situação em que esses efeitos são mais expressivos degradando qualidade do sinal.

6.1. Trabalhos Futuros

Na realização desse trabalho diversos conceitos foram estudados. Em se tratando de plano de controle, o GMPLS oferece mecanismos para facilitar o estabelecimento, manutenção e encerramento de caminhos ópticos. No mecanismo de sinalização GMPLS, podem ser inseridos diversos objetos na mensagem *PATH* para ajudar na reserva de recursos. Um desses objetos é o *Suggested Vector*, proposto por (ANDRIOLLI *et al.*, 2006b), cuja finalidade é associar o número de conversores de comprimento necessários aos lambdas existentes.

Efeitos da camada física influenciam significativamente no bloqueio de conexões e podem ser previstas por meio de modelagem matemática ou adquiridas por monitoramento em tempo real.

Sendo assim, algumas sugestões par trabalhos futuros são:

- Inserir mais restrições físicas no algoritmo.
- Comparar o algoritmo proposto com outros da literatura que seguem a mesma linha.

- Associar o objeto *Suggested Vector* com restrições da camada física a fim de facilitar o estabelecimento de conexões cientes dessas restrições.
- analisar o impacto das restrições físicas no estabelecimento de conexões em outros cenários, tais como em redes multicast.

REFERÊNCIAS

ANDRÉ, P. S. E PINTO J. L. **Birrefringência e Dispersão Devido aos Modos de Polarização em Fibras Ópticas**. Revista do Detua Vol. 3, Nº 5. 2002.

ANDRIOLLI, N., BURON, J., RUEPP, S., CUGINI, F., VALCARENGHI, L. and CASTOLDI, P., *Label preference schemes in GMPLS controlled networks*. IEEE Commun. Lett. v12 i10. 849-851. 2006a.

ANDRIOLLI, N., BURON, J., RUEPP, S., CUGINI, F., VALCARENGHI, L. and CASTOLDI, P., *Signaling protocol extensions for converter-saving wavelength assignment in GMPLS optical network*. In Proc. HPSR'06, pp. 349–355. 2006b

AHUJA, S.S.; KRUNZ, M.; RAMASUBRAMANIAN, S.. *Wavelength Assignment in Optical Networks with Imprecise Network State Information*. In: **Broadband Communications, Networks and Systems**, p. 1-10, 2006.

ALOIA J. E.. *Sistematização Crítica das Tendências de Padronização de Arquiteturas e Protocolos em Redes Ópticas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia). São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.

AUDUCHE, D; REKHTER, Y. *Multiprotocol Lambda Switching: Combining MPLS Traffic Engineering Control with Optical Cross-connects*. In: IEEE COMMUNICATIONS MAGAZINE.. v. 39, n. 3, p. 111-116, 2001.

BERGER L. *Generalized Multi-Protocol Label Switching(GMPLS) Signaling Resource ReserVation Protocol-Traffic Engineering (RSVP-TE) Extensions*. Network Working Group, RFC 3473, 2003.

BICUDO, Marco D. D.. *Sobrevivência em Redes Ópticas Transparentes*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

BHANDARI R., *Survivable Networks: Algorithms for Diverse Routing*, San Francisco, Morgan Kauffman Publishers, 1999.

BRACKETT, Charles A.. *Dense Wavelength Division Multiplexing Networks: Principles and Applications*. In: IEEE JOURNAL. Proceedings on Selected Areas In Communications. v. 8, n. 6, 1990.

BRASSOLATTI, Ivo R. *Dimensionamento de redes GMPLS com vasa em algoritmos RWA: verificação da influência do número de lambdas, do tipo de algoritmo RWA e das estatísticas de falha no bloqueio de conexões, para dimensionamento de uma rede GMPLS com tráfego dinâmico*. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Computação) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia da Computação e sistemas Digitais, São Paulo, SP, 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. Network Working Group, RFC 4397, 2006.

CARDILLO R., *et al.*, *Considering transmission impairments in wavelength-routed networks*, In Proc. ONDM 2005, Milan, Italy, Feb. 2005.

CHLAMTAC, I.; GANZ, A.; KARMI, G. *Purely optical networks for terabit communication*. In: IEEE COMPUTER AND COMMUNICATIONS. Proceedings of the Eighth Annual Joint Conference. v. 3. p 887 – 896, 1989.

CIEUTAT, L. C.; BINH, L.N.. *Routing and Wavelength Assignment in GMPLS - based Optical Networks: an OMNeT++ modelling platform*. TECHNICAL REPORT OF MONASH UNIVERSITY, 2003.

COMELLAS, Jaume; MARTÍNEZ, Ricardo; PRAT, Josep; SALES, Vicente; JUNYENT, Gabriel. *Integrated IP/WDM Routing in GMPLS-Based Optical Networks*. In: Network, IEEE. v. 17, p. 22-27, 2003.

CUNHA, Daniela Vieira. *Análise lógica de protocolos, proposta e avaliação de desempenho de um algoritmo de atribuição de rótulos baseado em SRLG em um ambiente GMPLS-WDM*. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais. São Paulo, 2006.

DANTE, Reinaldo G.. *Desenvolvimento de algoritmos de roteamento e atribuição de comprimentos de onda para as redes ópticas inteligentes e transparentes*. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. Campinas, SP, 2006.

DIXIT, S. *IP over DWDM, Building the Next-Generation Optical Internet*. Edited Wiley & Sons publication, 2003. 557 p.

DORF, Richard C. *The handbook of optical communication networks*. CRC Press, 2003. 459 p.

DUARTE, Rafael. *Provisionamento baseado em web services de conexões fim-a-fim em redes ópticas GMPLS*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Campinas, SP, 2006.

FARREL, Adrian; BRYSKIN, Igor. *GMPLS Architecture and Applications*. Academic Press, 2006. 412 p.

FERES, Mariana M.; TREVELIN, Luis C. *RWA Algorithm Aware of PMD and ASE for All-Optical Networks*. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRANSPARENT OPTICAL NETWORKS, 11th, Portugal, aceito para publicação.

CISCO. *Introduction to DWDM Technology*, Cisco Technology Papers, 2001. Disponível em:

http://www.cisco.com/en/US/products/hw/optical/ps2011/products_technical_reference_chapter09186a00802342e0.html#wp1040880 . Último acesso: Março/2007.

GOLDMAN, Alfredo; et al. *TAQUARA-Tecnologia, Aplicações e Qualidade de Serviço em Redes Avançadas no Projeto GIGA*. Relatório Técnico. Projeto Giga/RNP 2460 6 de janeiro de 2007.

GONG, Yongtao; LGEE, Peiyuan; GU, Wanyi. *A Novel Adaptive RWA Algorithm in Wavelength-routed Network*. In GLOBAL TELECOMMUNICATIONS CONFERENCE, 5., 2003, China. p. 2580- 2584.

GROBE, Klaus; HARRIS, Richard. *Gmpls - Automating Reconfigurable Optical Networks*. ADVA Optical Networking, 2007.

HARHIRA, Hichem Ayed; PIERRE, Samuel. *A novel admission control mechanism in GMPLS-based IP over optical networks*. ScienceDirect, Computer Networks 52 1281–1290, 2008.

HE, J., BRANDT-PEARCE, M. and SUBRAMANIAM, S., *Optimal RWA for Static Traffic in Transmission-Impaired Wavelength-Routed Networks*. Communications Letters, IEEE Volume: 12, Issue: 9 . pp 693-695

HUANG, Y., HERITAGE, J. P., and MUKHERJEE, B., *Connection Provisioning with Transmission Impairment Consideration in Optical WDM Networks with High-Speed Channels*, IEEE/OSA J. Lightwave Tech., vol. 23, no. 3, , Mar. 2005, pp. 982–93.

HWANG, I-Shyan; HUANG, I-Feng; YU, Shin-Cheng. *Dynamic RWA Scheme using Fuzzy Logic Control (FLC RWA) on IP with GMPLS over DWDM Networks*. In: NETWORKING, SENSING & CONTROL. Proceedings International Conference. Taiwan, 2004.

IEC. *Generalized Multiprotocol Label Switching*. Tutorial do IEC - THE INTERNATIONAL ENGINEERING CONSORTION. Disponível em: <http://www.iec.org/online/tutorials/gmpls/>. Último acesso: Janeiro/2008.

ITU-T. *Architecture for the Automatically Switched Optical Network (ASON)*. ITU-T Recommendation G.8080/Y.1304, 2006.

ITU-T, *Optical Fibers and Amplifiers*. ITU-T Recommendation G.663 – Amendment 1. 2003.

KAVIAN, Y.S.; RASHVAND, H.F.; REN, W.; LEESON, M.S.; HINES, E.L.; NADERI, M.. *RWA problem for designing DWDM networks-delay against capacity optimisation*. In: ELECTRONICS LETTERS 2007, v.43, n.16.

KOMOLAFE, Olufemi; SVENTEK, Joe. *Impact of GMPLS Control Message Loss*. Journal of Lightwave Technology, Vol. 26, Issue 14, pp. 2029-2036. 2008

KORNIAK, Janusz; RÓZYCKI, Pawel. *GMPLS - simulation tools*. Tools of Information Technology. Rzeszów, 2006.

KUBILINSKAS, Eligijus; PIÓRO, Michal. *An IP/MPLS over WDM network design problem*. Institute of Telecommunications, Warsaw University of Technology, Poland, 2004.

KULKARNI, P., *et al.*, *Benefits of Q-factor based routing in WDM metro networks* in Proc. ECOC 2005, Glasgow, U.K.. 2005.

LAIDEVANT, Didier; RAMBACH, Franz; HOFFMANN, Marco. *Availability of Connections in Ethernet over DWDM Core Networks*. In: TRANSPARENT OPTICAL NETWORKS. Proceedings: 9th International Conference on, v. 4, p. 24-27.

MARSDEN, A., MARUTA, A. e KITAYAMA, K.. *Routing and wavelength assignment encompassing FWM in WDM lightpath networks*. In: International Conference on Optical Network Design and Modeling, 2008. ONDM 2008. Março 2008.

MANNIE E..*Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Architecture*. RFC3945, IETF, 2004.

MINEI, Ina; LUCEK, Julian. *MPLS-enabled applications: emerging developments and new technologies*. John Wiley & Sons Ltd, 2005. 406 p.

MOKHTAR, A.; AZIZOGLU, M.; *Adaptative Wavelength Routing in All-Optical Nerwork*. In: IEEE/ACM, Transactions on Networking (TON), v. 6, n. 2, p. 197-206, Piscataway, NJ, USA, 1998.

MUKHERJEE B.. *Optical WDM Networks*. 1ª ed. Springer, University of California. Davis, 2006.

MUÑOZ, Raúl; MARTÍNEZ, Ricardo; JUNYENT, Gabriel. *An experimental switching-aware GMPLS-based lightpath provisioning protocol in wavelength-routed Networks*. In: PHOTONIC NETWORK COMMUNICATIONS. v. 14, n. 3. 2007.

NIST (NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY). *GMPLS Lightwave Agile Switching Simulator (GLASS)*. 2001. Disponível em: <http://www-x.antd.nist.gov/glass/>.

DIN, N. M. and FISAL, N. 2008. *Modeling of IP-GMPLS Multimedia Traffic and Network for Admission Control Using ns-2*. In *Proceedings of the 2008 Second Asia international Conference on Modelling & Simulation (Ams)* May 2008.

OIF. *User Network Interface (UNI) 1.0 Signaling Specification*. Implementation Agreement OIF-UNI1.0. 2001.

OSBORNE, Eric; SIMHA, Ajay. *Traffic Engineering With Mpls*. Cisco Press. Cisco Press, 2003. 608 p. (Série Networking Technology).

PAPADIMITRIOU, D.; MANNIE, Eric. *Analysis of Generalized MPLS-based Recovery Mechanisms (including Protection and Restoration)*. Internet-draft <draft-design-team-gempls-recovery-analysis-00.txt>, 2002.

PADUA, Fabiano J. L.. *Proposta de um algoritmo heurístico adaptativo para RWA em redes fotônicas DWDM*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação. Campinas, 2001.

PETERSON, Larry L.; DAVIE, Bruce S.. *Computer Networks: a Systems Approach*. Morgan Kaufmann Publishers, São Francisco (EUA), 2003.

PITTS, J. M; SCHORMANS, J. A. *Introduction to IP and ATM Design and Performance*. 2nd Edition. New York: J. Wiley, 2000.

RAMAMURTHY B., et al., *Impact of transmission impairments on the teletraffic performance of wavelength-routed optical networks*, J. Lightwave Technol., vol. 10. pp. 1713-1723, Oct. 1999.

RAMASWAMI R.; SIVARAJAN K.N., *Optical Networks: A Practical Perspective*. 2^a ed. Academic Press, p.406 - 433, 2002.

ROSEN E.; VISWANATHA A.; CALLON R.. *Multiprotocol Label Switching Architecture*. Network Working Group, ROSEN, VISWANATHA E CALLON, 2001.

SAVASINI, Marcio Sáenz. *Esquemas de proteção e conversão de comprimento de onda em redes ópticas WDM*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. Campinas, SP, 2005.

SHIOMOTO, Kohei. *Overview of GMPLS Protocols and Standardization*. NTT TECHNICAL REVIEW. Japão. v. 2, n. 6, p. 76-80, 2004.

SILVA, Eduardo R. T.. *Internet Baseada em Redes*. Dissertação (Mestrado Profissional em Computação) – Universidade de Campinas, Instituto de Computação. Campinas, 2004.

SUN, X.; LI, Y.; LAMBADARIS, I.; ZHAO, Y.Q.. *Performance analysis of first-fit wavelength assignment algorithm in optical networks*. In: TELECOMMUNICATIONS CONTEL 2003. Proceedings of the 7th International Conference on, vol 2, pgs 403- 409. 2003.

SUBRAMANIAM, S.; BARRY, R. A.. *Wavelength Assignment in Fixed Routing WDM Networks*. In: IEEE ICC'97. p. 406-410, 1997.

STRAND, John, CHIU, Angela L., TKACH, Robert. *Issues For Routing In The Optical Layer. IEEE Communications Magazine*. February 2001.

SZEGEDI, Peter; GAJEWSKI, Tomasz; IMAJUKU, Wataru; OKAMOTO, Satoru. *Optical Networks Functional Evolution and Control Technologies*. In: IEICE Transactions Communications, vol.E90–B, n.8. Agosto/2007

TANENBAUM, Andrew S.. *Redes de Computadores*. 4. ed. Rio de Janeiro: Editora Campus, 2003. 945 p..

TANWIR, Savera. *Network Resource Scheduling and Management of Optical Grids*. Dissertação (mestrado em Ciência da Computação) – North Carolina State University, Raleigh, NC, 2007.

TOMOKOS I., VOGIATZIZ G., MAS C., ZACHAROPOULOS I., TZANAKAKI A., VARVARIGOS E., *Performance engineering of metropolitan area optical networks through impairment constraint routing*, Communications Magazine, v. 42, n.8, p. 40-47, Agosto 2004.

VEERARAGHAVAN, Malathi, LI, Tao. *Signaling Transport Options in GMPLS Networks: In-band or Out-of-band*. Proceedings: 16th International Conference on Computer Communications and Networks, 2007. ICCCN 2007: 503-509. 2007.

WASON, Amit e KALER, R. S. *Wavelength Assignment Problem in Optical WDM Networks*. IJCSNS International Journal of Computer Science e Network Security, VOL.7 No.4, 2007.

ZULIANI, Luiz G. *Arquitetura e implementação de um serviço de informações topológicas e de engenharia de tráfego para sistemas RWA*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. Campinas, SP,2006.

ZULKIFLI Nadia, OKONKWO, Chigo, e GUILD, Ken. *Dispersion Optimised Impairment Constraint Based Routing e Wavelength Assignment Algorithms for All-Optical Networks*. ICTON 2006.

ZHOU, Jun; YUAN, Xin. *A Study of Dynamic Routing and Wavelength Assignment with Imprecise Network State Information*. ICCPP_Workshops Journal, 2002.

Apêndice A – Diagrama de classes referente aos algoritmos utilizados

