



**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

Área Departamental de Engenharia de Electrónica  
e Telecomunicações e de Computadores

# **Sobrevivência das Redes de Transporte da Nova Geração**

por

**Henrique Manuel da Fonseca Fernandes**

Trabalho Final de Mestrado para Obtenção do Grau de Mestre  
em Engenharia de Electrónica e Telecomunicações

Orientador:

Prof. Doutor Pedro Renato Tavares Pinho

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Mário Pereira Véstias

Vogal-Arguente: Prof. Doutor António Luís de Jesus Teixeira

Vogal-Orientador: Prof. Doutor Pedro Renato Tavares Pinho

**Novembro de 2015**



# Agradecimentos

Gostaria de agradecer em especial à minha esposa, pela forte dedicação e enorme compreensão durante todo o meu percurso de desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu filho que foi a minha grande força e motivação.

Ao meu orientador Professor Doutor Pedro Pinho por tão bem ter orientado este trabalho e por toda a ajuda, esclarecimentos e sugestões fornecidas que foram extremamente importante para a realização desta dissertação.

Aos meus pais por me terem criado todas as oportunidades para poder realizar este trabalho.

Aos meus colegas, amigos e família por entenderem a minha ausência.



# Resumo

A presente dissertação tem como principal objectivo estudar os vários tipos de esquemas de sobrevivência em redes ópticas de alta capacidade, designadamente em redes WDM (*Wavelength Division Multiplexing*).

Para tal, foi efectuada inicialmente uma revisão da literatura, a qual se encontra estruturada em duas etapas. Primeiro é apresentada uma visão global das redes ópticas de transporte com destaque para evolução das redes WDM e seus componentes. De seguida, são apresentadas as técnicas de sobrevivência em NGNs (*Next Generation Networks*). Depois de uma breve exposição de conceitos, são apresentadas as técnicas mais importantes no que diz respeito aos esquemas de protecção e restauro em redes de transporte de alta capacidade. São também abordados os Planos de Controlo, Dados e Gestão do GMPLS (*Generalized Multiprotocol Label Switching*) no contexto da sobrevivência das NGNs.

Com recurso a um modelo de simulação de redes WDM, baseado no simulador de redes ns-3, são analisados três cenários de falha. São eles, falha num *link*, falha em múltiplos *links* e falha num nó. Assim, foi possível verificar o comportamento do algoritmo RWA (*Routing and Wavelength Assignment*), na ocorrência de uma falha.

O algoritmo RWA permitiu, nos três cenários de falha analisados, reenca-minhar os canais para um caminho alternativo, e desta forma assegurar a continuidade da transmissão.

## ***Palavras-Chave***

Sobrevivência, WDM, NGN, RWA, GMPLS, OTN



# Abstract

This thesis aims to study the various types of survival schemes in high-capacity optical networks, in particularly in WDM networks (*Wavelength Division Multiplexing*).

This was done initially carried out a literature review, which is structured in two stages. First is shown an overview of optical transport networks highlighted the evolution of WDM networks and its network components. Then, an overview of the survivable techniques in NGNs (*Next Generation Networks*) is shown. After a brief concepts exposure are shown the most important techniques in regard to the protection and restoration schemes for high capacity transmission systems. They are also addressed the Control Plane, Data Plane and Management Plane of GMPLS (*Generalized Multiprotocol Label Switching*) in the context of survivability of NGN.

Using a WDM network simulation model, based on ns-3, are analyzed three failure scenarios. They are, single-link failure, multiple-link failure and node failure. Thus, it was possible to verify the behavior of the RWA algorithm (Routing and Wavelength Assignment), in such event of failure.

The RWA algorithm have allowed in the three failure scenarios, rerouting the channels to an alternate path, and thus ensures the continuity of transmission.

## **Keywords**

Survivability, WDM, NGN, RWA, GMPLS, OTN





# Índice

<b>Agradecimentos</b> .....	<b>iii</b>
<b>Resumo</b> .....	<b>v</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>vii</b>
<b>Índice</b> .....	<b>ix</b>
<b>Índice de Figuras</b> .....	<b>xiii</b>
<b>Índice de Tabelas</b> .....	<b>xvii</b>
<b>Acrónimos</b> .....	<b>xix</b>
<b>1 Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1 Enquadramento .....	2
1.2 Motivação .....	3
1.3 Objectivos .....	4
1.4 Organização do Documento .....	5
<b>2 Redes Ópticas</b> .....	<b>7</b>
2.1 Estado da arte .....	8
2.2 Hierarquia Geográfica de uma Rede Óptica .....	13
2.3 Arquitecturas das redes de transporte .....	14
2.3.1 Rede Core .....	15
2.3.2 Rede Metro .....	16
2.3.3 Rede Acesso .....	17
2.4 Evolução das redes ópticas .....	18
2.5 Evolução das redes ópticas WDM .....	19
2.5.1 Primeira geração das redes ópticas WDM .....	20
2.5.2 Segunda geração das redes ópticas WDM .....	21
2.5.3 Terceira geração das redes ópticas WDM .....	22
2.6 Topologia de rede WDM .....	22
2.7 Equipamentos de rede WDM .....	25
2.7.1 Amplificador Óptico .....	25
2.7.1.1 Amplificador EDFA .....	25
2.7.1.2 Amplificador Raman .....	26

---

2.7.1.3	Tipos de configuração.....	27
2.7.2	OLT.....	28
2.7.3	OLA.....	28
2.7.4	OADM.....	29
2.7.5	ROADM.....	31
2.7.6	OXC.....	31
2.7.6.1	OXC Opaco.....	32
2.7.6.2	OXC Transparente.....	33
2.8	Tecnologias de comutação para WDM.....	33
2.8.1	<i>Optical Circuit Switching</i> .....	34
2.8.2	<i>Optical Packet Switching</i> .....	35
2.8.3	<i>Optical Burst Switching</i> .....	37
2.9	<i>Optical Transport Network</i> .....	38
<b>3</b>	<b>Sobrevivência em Redes Ópticas.....</b>	<b>45</b>
3.1	<i>Routing and Wavelength Assignment</i> .....	46
3.1.1	Estabelecimento de caminhos de luz.....	47
3.1.1.1	<i>Static Lightpath Establishment</i> .....	47
3.1.1.2	<i>Dynamic Lightpath Establishment</i> .....	48
3.1.2	Algoritmos <i>Shortest-Path</i> .....	49
3.1.3	<i>Wavelength Assignment</i> .....	50
3.2	<i>Next Generation Networks</i> .....	52
3.3	Evolução do MPLS para o GMPLS.....	53
3.4	GMPLS.....	60
3.4.1	Plano de Controlo.....	61
3.4.1.1	Protocolo de Encaminhamento.....	62
3.4.1.2	Protocolo de Sinalização.....	64
3.4.1.3	Tipos de falha no Plano de Controlo.....	67
3.4.1.3.1	Falha no <i>link</i> de Plano de Controlo.....	67
3.4.1.3.2	Falha no nó de Plano de Controlo.....	68
3.4.1.3.3	Falha no módulo de <i>software</i> do Plano de Controlo.....	69
3.4.1.4	Protecção e Restauro do Plano de Controlo.....	70
3.4.2	Plano de Dados.....	73
3.4.2.1	Tipos de Falha em redes Ópticas.....	73
3.4.2.2	Técnicas de Protecção e de Restauro.....	73
3.4.2.3	Mecanismos de Protecção.....	75
3.4.2.3.1	<i>Shared Risk Link Group</i> .....	77
3.4.2.3.2	Protecção de <i>span</i> .....	78
3.4.2.3.3	Protecção de caminho.....	80
3.4.2.3.4	Recuperação de segmento.....	81
3.4.2.4	Mecanismos de Restauro.....	84
3.4.2.4.1	Restauro de Linha.....	84
3.4.2.4.2	Restauro de Caminho.....	84
3.4.3	Plano de Gestão.....	85

---

<b>4</b>	<b>Simulação de uma rede óptica.....</b>	<b>87</b>
4.1	Tecnologias usadas .....	88
4.1.1	Sistema Operativo .....	88
4.1.2	Network simulator 3 – ns-3 .....	89
4.1.3	Instalação do simulador ns-3 .....	90
4.2	Módulo para simulação de redes WDM .....	90
4.2.1	helper API WDM.....	91
4.2.2	Instalar OXC e MUX/DEMUX .....	92
4.2.3	Instalar TxRx DWDM com atribuição de canal DWDM .....	92
4.2.4	Interligação entre TxRx DWDM e a porta MUX IN e DEMUX OUT .....	93
4.2.5	Interligação das portas MUX OUT e DEMUX IN com o OXC .....	93
4.2.6	Interligação entre OXCs.....	94
4.2.7	RWA – Cálculo do caminho óptico .....	95
4.2.8	Instalação de OSA.....	96
4.2.9	<i>Stack</i> de internet para teste de conectividade.....	96
4.3	<i>Script</i> de Simulação.....	98
4.3.1	<i>Boilerplate</i> .....	98
4.3.2	Módulos incluídos e <i>namespace</i> .....	98
4.3.3	Função principal.....	99
4.3.3.1	Componente de log .....	99
4.3.3.2	Topologia .....	100
4.3.3.3	Objecto animação .....	100
4.3.3.4	Simulação.....	101
4.3.4	Compilar e correr o <i>script</i> de simulação .....	101
4.4	NetAnim .....	102
4.5	Resultados .....	104
4.5.1	Ligações de fibra óptica entre dispositivos WDM .....	104
4.5.2	Simulação sem falhas na topologia de rede .....	106
4.5.2.1	Interligações entre dispositivos WDM para o exemplo do canal DWDM com o ID-1 .....	106
4.5.2.2	Cálculo de canal.....	108
4.5.2.3	<i>Pathloss</i> do canal DWDM ID-1 .....	109
4.5.2.4	Tabelas de comutação de comprimento de onda.....	110
4.5.2.5	Medida de potência óptica com OSA.....	111
4.5.3	Falha no <i>link</i> entre o OXC-1 e OXC-2 .....	112
4.5.3.1	Cálculo de canal.....	113
4.5.3.2	<i>Pathloss</i> do canal DWDM ID-1 .....	114
4.5.3.3	Tabelas de comutação de comprimento de onda .....	115
4.5.3.4	Medida de potência óptica com OSA.....	115
4.5.4	Falha nos <i>links</i> , entre o OXC-0 e OXC-5, OXC-2 e OXC-3, e OXC-4 e OXC-5 .....	117
4.5.4.1	Cálculo de canal.....	118
4.5.4.2	<i>Pathloss</i> do canal DWDM ID-1 .....	118
4.5.4.3	Tabelas de comutação de comprimento de onda .....	119
4.5.4.4	Medida de potência óptica com OSA.....	120

4.5.5	Falha no OXC-2.....	121
4.5.5.1	Cálculo de canal .....	122
4.5.5.2	<i>Pathloss</i> do canal DWDM ID-1 .....	123
4.5.5.3	Tabelas de comutação de comprimento de onda .....	123
4.5.5.4	Medida de potência óptica com OSA .....	124
<b>5</b>	<b>Conclusões e Trabalho Futuro.....</b>	<b>127</b>
5.1	Conclusões .....	127
5.2	Limitações da Investigação .....	128
5.3	Trabalho Futuro.....	129
	<b>Bibliografia.....</b>	<b>131</b>

# Índice de Figuras

Figura 2.1 – Modelo arquitectónico de três camadas (adaptado de [3]).	8
Figura 2.2 - <i>Flexgrid</i> (adaptado de [10]).	10
Figura 2.3 - Hierarquia Geográfica de uma Rede Óptica (adaptado de [3]).	14
Figura 2.4 - Estrutura genérica de uma rede de telecomunicações moderna (adaptado de [15]).	15
Figura 2.5 - Evolução da rede WDM (adaptado de [25]).	20
Figura 2.6 - Topologia de rede (adaptado de [3]).	23
Figura 2.7 - a) Nó de grau três com um ROADM e um OLT. b) Dois ROADMs com alguns <i>transponders</i> (adaptado de [3]).	24
Figura 2.8 – Representação aproximada das Bandas-C, S e L com correspondência típica das perdas na fibra óptica (adaptado de [3]).	24
Figura 2.9 - EDFA esquematizado (adaptado de [1]).	26
Figura 2.10 - Amplificador Raman distribuído usando laser bomba de propagação no sentido contrário ao sinal, a funcionar com EDFA discretos (adaptado de [1]).	27
Figura 2.11 – Amplificador de Potência, Amplificador de Linha e Pré-Amplificador (adaptado de [1]).	27
Figura 2.12 - Diagrama de bloco de um OLT (adaptado de [1]).	28
Figura 2.13 - Diagrama de blocos típico de um OLA (adaptado de [1]).	29
Figura 2.14 - Exemplo de uma rede para ilustrar o papel de um OADM (adaptado de [1]).	30
Figura 2.15 - Diferentes cenários para implementação de OXC (adaptado de [1]).	32
Figura 2.16 - Rede OCS (adaptado de [19]).	35
Figura 2.17 - Rede OPS (adaptado de [19]).	36
Figura 2.18 - Rede OBS (adaptado de [19]).	38
Figura 2.19 - Contentores OTH (adaptado de [28], [61]).	40
Figura 2.20 – a) Hierarquia OTN (adaptado de [1], [18] e [62]); b) Camadas OTN (adaptado de [1]).	43
Figura 3.1 - Planos funcionais das redes ASON e GMPLS (adaptado de [4]).	53
Figura 3.2 - <i>Shim header</i> inserido entre o cabeçalho do protocolo de rede e o cabeçalho IP (adaptado de [32]).	54
Figura 3.3 – Pacote IP a atravessar um LSP (adaptado de [24]).	55

Figura 3.4 - Diagrama de fluxo do encaminhamento do caminho de luz em GMPLS (adaptado de [34]).	56
Figura 3.5 - Evolução em direcção à <i>photonic networking</i> (adaptado de [35]).	57
Figura 3.6 - a) <i>Overlay model</i> ; b) <i>Peer model</i> (adaptado de [35]).	59
Figura 3.7 - Separação do Plano de Controlo e Plano de Dados (adaptado de [37]).	60
Figura 3.8 - Arquitectura de Plano de Controlo (adaptado de [37]).	62
Figura 3.9 - Modelo de recuperação do Plano de Controlo (adaptado de [31]).	71
Figura 3.10 - Taxonomia dos principais esquemas de recuperação de falha em NGNs (adaptado de [4]).	77
Figura 3.11 - Exemplo de quadro SRLGs (i.e., g1, g2, g3 e g4) adaptado de [31].	77
Figura 3.12 - Protecção de ligação (adaptado de [3]).	78
Figura 3.13 - a) Protecção de <i>link 1+1</i> ; b) Protecção de <i>link 1:1</i> (adaptado de [33]).	79
Figura 3.14 - Protecção de caminho (adaptado de [3]).	80
Figura 3.15 - Protecção de Caminho 1+1 (adaptado de [33]).	81
Figura 3.16 - Protecção de segmento. a) Segmentos não sobrepostos. b) Segmentos sobrepostos (adaptado de [3]).	82
Figura 3.17 - Restauro de Caminho. (adaptado de [33]).	85
Figura 4.1 - Principais módulos do ns-3. (Adaptado de [51]).	89
Figura 4.2 - Diagrama de interligações entre TxRx, Mux/Demux e OXC.	94
Figura 4.3 - Topologia de rede WDM em estudo.	95
Figura 4.4 - Topologia em estudo representada no NetAnim.	102
Figura 4.5 - Endereços IP e MAC atribuídos a cada <i>device</i> de internet instalado nos TxRx DWDM.	103
Figura 4.6 - Fluxo de pacotes UdpEchoClient e UdpEchoServer entre o internet device instalado no TxRx-6 e TxRx-9 representados no NetAnim.	103
Figura 4.7 - Fluxo de pacotes UdpEchoClient e UdpEchoServer entre o internet device instalado no TxRx-6 e TxRx-9 recolhidos nos logs de output.	103
Figura 4.8 - Representação do mapeamento topológico das ligações de fibra óptica entre todos os dispositivos WDM da topologia e canais DWDM.	105
Figura 4.9 - Simulação sem falhas na topologia de rede.	106
Figura 4.10 - Diagrama de fluxo para o canal DWDM com o ID-1.	107
Figura 4.11 - Continuação do diagrama de fluxo para o canal DWDM com o ID-1.	108
Figura 4.12 - Medida de potência óptica para o canal DWDM ID-1, ID-2 e ID-3, entre o OXC-1 e OXC-2.	111
Figura 4.13 - Medida de potência óptica para o canal DWDM ID-5, entre o OXC-5 e OXC-0.	112
Figura 4.14 - Falha no <i>link</i> entre o OXC-1 e OXC-2.	113

---

Figura 4.15 - Medida de potência óptica para o canal DWDM ID-1 e ID-5, entre o OXC-5 e OXC-0.....	116
Figura 4.16 - Medida de potência óptica para o canal DWDM ID-1, ID-2, ID-3 e ID-5, entre o OXC-5 e OXC-4. ....	116
Figura 4.17 - Falha nos <i>links</i> , entre o OXC-0 e OXC-5, OXC-2 e OXC-3 e OXC-4 e OXC-5.....	117
Figura 4.18 - Medida de potência óptica para o canal DWDM ID-1, ID-2, ID-3 e ID-5, entre o OXC-1 e OXC-2. ....	120
Figura 4.19 - Medida de potência óptica para o canal DWDM ID-1, ID-2 e ID-5, entre o OXC-2 e OXC-4.....	121
Figura 4.20 - Falha no OXC-2.....	122
Figura 4.21 - Medida de potência óptica para o canal DWDM ID-1 e ID-5, entre o OXC-5 e OXC-0.....	124
Figura 4.22 - Medida de potência óptica para o canal DWDM ID-1, ID-2 e ID-5, entre o OXC-4 e OXC-5.....	125





# Índice de Tabelas

Tabela 2.2 - Hierarquia de <i>bit rate</i> para a comutação/multiplexagem OTN (adaptado de [3]).....	39
Tabela 2.1 - Comparativo entre os <i>bit rates</i> OTN e SONET/SDH (adaptado de [1] e [3])	39
Tabela 3.1 - Mecanismos de Protecção e de Restauo do Plano de Controlo (adaptado de [31]).....	72
Tabela 4.1 - Cálculo do canal DWDM ID-1 no sentido TxRx-6 >TxRx-9 num ambiente sem falhas.....	109
Tabela 4.2 - Cálculo do canal DWDM ID-1 no sentido TxRx-9 >TxRx-6 num ambiente sem falhas.....	109
Tabela 4.3 - <i>Pathloss</i> do canal DWDM ID-1.....	110
Tabela 4.4 - Tabela de comutação de comprimentos de onda de todos os OXCs da rede num ambiente sem falhas.....	110
Tabela 4.5 - Cálculo do canal DWDM ID-1 no sentido TxRx-6 >TxRx-9 com falha no link entre o OXC-1 e OXC-2.....	113
Tabela 4.6 - Cálculo do canal DWDM ID-1 no sentido TxRx-9 >TxRx-6 com falha no link entre o OXC-1 e OXC-2.....	114
Tabela 4.7 - <i>Pathloss</i> do canal DWDM ID-1.....	114
Tabela 4.8 - Tabela de comutação de comprimentos de onda de todos os OXCs da rede com falha no <i>link</i> entre o OXC-1 e OXC-2.....	115
Tabela 4.9 - Cálculo do canal DWDM ID-1 no sentido TxRx-6 >TxRx-9 com falha nos <i>links</i> entre o OXC-0 e OXC-5, OXC-2 e OXC-3 e OXC-4 e OXC-5.....	118
Tabela 4.10 - Cálculo do canal DWDM ID-1 no sentido TxRx-9 >TxRx-6 com falha nos <i>links</i> entre o OXC-0 e OXC-5, OXC-2 e OXC-3 e OXC-4 e OXC-5.	118
Tabela 4.11 - <i>Pathloss</i> do canal DWDM ID-1.....	119
Tabela 4.12 - Tabela de comutação de comprimentos de onda de todos os OXCs da rede com falha nos <i>links</i> entre o OXC-0 e OXC-5, OXC-2 e OXC-3 e OXC-4 e OXC-5.....	119
Tabela 4.13 - Cálculo do canal DWDM ID-1 no sentido TxRx-6 >TxRx-9 com falha no OXC-2.....	122
Tabela 4.14 - Cálculo do canal DWDM ID-1 no sentido TxRx-9 >TxRx-6 com falha no OXC-2.....	123

Tabela 4.15 - <i>Pathloss</i> do canal DWDM ID-1.....	123
Tabela 4.16 - Tabela de comutação de comprimentos de onda de todos os OXCs da rede com falha no OXC-2.....	124

# Acrónimos

Acrónimo	Designação
3R	<i>Reamplification, Retiming, Reshaping</i>
ABT-IT	<i>ATM Block Transfer with Immediate Transmission</i>
ADSL	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i>
AIS	<i>Alarm Indication Signal</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
ASON	<i>Automatically Switched Optical Networks</i>
ATM	<i>Asynchronous Transfer Mode</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
CAPEX	<i>Capital Expenditures</i>
CATV	<i>Cable Television</i>
CBR	<i>Constant Bit Rate</i>
CD	<i>Chromatic Dispersion</i>
CM	<i>Cable Modem</i>
CO	<i>Central Office</i>
CR-LDP	<i>Constraint-Based Routing Label Distribution Protocol</i>
DCC	<i>Data Communication Channel</i>
DCF	<i>Dispersion Compensated Fiber</i>
DCN	<i>Data Communication Network</i>
DLCI	<i>Data Link Connection Identifier</i>
DLE	<i>Dynamic Lightpath Establishment)</i>
DOCSIS	<i>Data Over Cable Service Interface Specification</i>
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>
EDFA	<i>Erbium-Doped Fiber Amplifier</i>
FC	<i>Fiber Channel</i>
FDL	<i>Fiber Delay Line</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>

FEC	<i>Forwarding Equivalence Class</i>
FTTB	<i>Fiber-To-The-Building</i>
FTTH	<i>Fiber-To-The-Home</i>
FTTx	<i>Fiber-To-The-x</i>
GbE	<i>Gigabit Ethernet</i>
GCC	<i>General Communication Channel</i>
GFP	<i>Generic Framing Procedure</i>
GMPLS	<i>Generalized Multiprotocol Label Switching</i>
GNU GPL	<i>GNU General Public License</i>
GPON	<i>Gigabit Passive Optical Network</i>
HFC	<i>Hybrid Fiber Coaxial</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IETF	<i>Internet Engineering Task Force</i>
IGP	<i>Interior Gateway Protocol</i>
ILP	<i>Integer Linear Program</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IPFRR	<i>IP Fast Reroute</i>
IS-IS	<i>Intermediate System to Intermediate System</i>
IS-IS-TE	<i>IS-IS with Traffic Engineering</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
ITU-T	<i>ITU Telecommunication Standardization Sector</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LFIB	<i>Label Forwarding Information Base</i>
LMP	<i>Link Management Protocol</i>
LOL	<i>Loss Of Light</i>
LPT	<i>Link Protection Type</i>
LSDB	<i>Link State Database</i>
LSP	<i>Label Switched Path</i>
LSR	<i>Label Switch Router</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MCN	<i>Management Communication Network</i>
MPLS	<i>Multi-Protocol Label Switching</i>
MPLS-TP	<i>MPLS-Transport Profile</i>
MPλS	<i>Multiprotocol Lambda Switching</i>
NGN	<i>Next Generation Network</i>

NMS	<i>Network Management System</i>
OADM	<i>Optical Add-Drop Multiplexer</i>
OAMP	<i>Optical Amplifier</i>
OBS	<i>Optical Burst Switching</i>
OCh	<i>Optical Channel</i>
OCS	<i>Optical Circuit Switching</i>
ODN	<i>Optical Distribution Network</i>
ODU	<i>Optical Channel Data Units</i>
OIF	<i>Optical Internetworking Forum</i>
OLA	<i>Optical Line Amplifier</i>
OLS	<i>Optical Label Switching</i>
OLT	<i>Optical Line Terminal</i>
OMS	<i>Optical Multiplexed Section</i>
ONU	<i>Optical Network Unit</i>
OPS	<i>Optical Packet Switching</i>
OPU	<i>Optical Channel Payload Unit</i>
OSA	<i>Optical Spectrum Analyzer</i>
OSC	<i>Optical Supervisory Channel</i>
OSNR	<i>Optical Signal-to-Noise Ratio</i>
OSPF	<i>Open Shortest Path First</i>
OSPF-TE	<i>OSPF with Traffic Engineering</i>
OTH	<i>Optical Transport Hierarchy</i>
OTN	<i>Optical Transport Network</i>
OTS	<i>Optical Transmission Section</i>
OTU	<i>Optical Channel Transport Unit</i>
OXC	<i>Optical Cross-connect</i>
OXS	<i>Optical 'X' Switching</i>
PBB-TE	<i>Provider Backbone Bridge with Traffic Engineering</i>
PON	<i>Passive Optical Network</i>
PSD	<i>Power Spectral Density</i>
PSTN	<i>Public-Switched Telephone Network</i>
PtP	<i>Point-to-Point</i>
PXC	<i>Photonic Cross-connect</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RCL	<i>Relative Capacity Loss</i>

RF	<i>Rádio Frequência</i>
ROADM	<i>Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexing</i>
RRL	<i>Resilient Routing Layer</i>
RSVP-TE	<i>Resource Reservation Protocol with Traffic Engineering</i>
RWA	<i>Routing and Wavelength Assignment</i>
SCN	<i>Signaling Communication Network</i>
SDH	<i>Synchronous Digital Hierarchy</i>
SLA	<i>Service Level Agreement</i>
SLE	<i>Static Lightpath Establishment</i>
SONET	<i>Synchronous Optical Networking</i>
SRLG	<i>Shared Risk Link Groups</i>
SRS	<i>Stimulated Raman Scattering</i>
SSMF	<i>Standard Single-Mode Fiber</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TDM	<i>Time Division Multiplexing</i>
TE	<i>Traffic Engineering</i>
TED	<i>Traffic Engineering Database</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
UNI	<i>User-to-Network Interface</i>
VCI	<i>Virtual Circuit Identifier</i>
VDSL	<i>Very-High Speed Digital Subscriber Line</i>
VPI	<i>Virtual Path Identifier</i>
VPN	<i>Virtual Private Network</i>
WA	<i>Wavelength Assignment</i>
WAN	<i>Wide Area Network</i>
WCC	<i>Wavelength Continuity Constraint</i>
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>
WSS	<i>Wavelength Selective Switching</i>
xDSL	<i>Digital Subscriber Line technologies</i>

# 1

## Introdução

Desde o início do novo milénio, têm-se vindo a observar enormes mudanças na indústria das telecomunicações que têm tido um grande impacto no estilo de vida das pessoas. O maior e principal contributo para estas mudanças é a contínua necessidade de maior capacidade na rede [1]. Esta procura tem sido alimentada pelo crescimento constante de uma variedade de novos serviços de banda larga, tais como aplicações de internet de alta velocidade, serviços residenciais de *video-on-demand*, serviços na nuvem [2] e VPNs (*Virtual Private Networks*) empresariais com acesso remoto a enormes bases de dados. Em resposta a esta mudança, os operadores têm vindo a realizar alterações profundas nas suas redes metropolitanas e core para aumentar consideravelmente a sua capacidade de rede [3].

Uma mudança a nível global nas redes de capacidade elevada (NGNs) está a surgir no horizonte da indústria das redes de telecomunicações. Por detrás destas transições e crescimentos estão os grandes avanços desenvolvidos em tecnologias de fibra óptica. Componentes como o PXC (*Photonic Cross-connect*), OADM (*Opti-*

cal *Add-Drop Multiplexer*) e OXC (*Optical Cross-connect*) mudaram substancialmente a metodologia de concepção das redes de alta capacidade. Em vez de se projectar ligações ópticas com comutação/regeneração eléctrica, a tendência é desenhar redes com capacidade para modificar o comprimento de onda de canal, sem envolver sinais eléctricos (O-E-O) [4].

Neste capítulo é efectuado o enquadramento do trabalho, apresentando o problema em estudo e a sua importância no contexto actual. Serão ainda definidos os objectivos que o presente trabalho se propõe atingir.

## 1.1 Enquadramento

As fibras ópticas são utilizadas em todo o tipo de redes de telecomunicações, disponibilizando uma grande largura de banda quando comparado com os cabos de cobre [1].

Com o aparecimento dos sistemas de transmissão por fibra óptica, WDM e DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) a largura de banda numa única fibra cresceu substancialmente [4]. O aumento da utilização deste meio de transmissão, veio também favorecer significativamente o risco da perda de grandes volumes de dados provocados por um corte na ligação de fibra óptica ou falha num nó [5].

As falhas em redes ópticas são inevitáveis. Estas podem ocorrer durante um trabalho de manutenção de uma infra-estrutura, ou numa escala maior, como o resultado de um desastre natural ou avaria num equipamento. Como consequência, a disponibilidade de serviço, um aspecto importante da QoS (*Quality of Service*), é degradada. Técnicas apropriadas de recuperação de falha, são portanto, essenciais para cumprir os requisitos dos SLAs (*Service Level Agreements*) entre os prestadores de serviços e os seus clientes [6]. Um dos requisitos fundamentais numa rede óptica de alta capacidade é a sua sobrevivência, que consiste na capacidade de uma rede recuperar o tráfego afectado num ambiente de falha e providenciar vários tipos de serviços continuamente [4]. Outro aspecto importante e de grande relevância no projecto de rede é seleccionar qual, ou quais as camadas de rede onde serão implementadas as protecções. Por exemplo, os protocolos de camada superior, tal como o IP (*Internet Protocol*), tipicamente têm mecanismos de protecção já normalizados. No entanto, esses mecanismos são geralmente utilizados numa granula-



ridade de tráfego relativamente pequena; com o aumento do tráfego, implementar a recuperação de falha unicamente nestas camadas pode-se tornar bastante lenta [3]. Em contrapartida, o tempo de recuperação ao nível da camada óptica leva apenas alguns milissegundos para minimizar as perdas de tráfego e é bastante vantajoso considerar os mecanismos de recuperação de falha ao nível da camada óptica pelas seguintes razões [7]:

- A camada óptica pode multiplexar recursos de protecção de forma eficiente (tais como comprimentos de onda e fibras alternativas), entre várias aplicações de camada superior;
- A capacidade de sobrevivência ao nível da camada óptica permite a protecção a protocolos das camadas superiores que possam não ter protecção na sua essência;

Existem inúmeras abordagens para garantir a sobrevivência da rede de fibra óptica. As arquiteturas de sobrevivência de rede são baseadas ou em recursos dedicados ou em recuperação dinâmica. Na protecção com recurso dedicado, os recursos de rede podem ser dedicados para cada cenário de falha, ou partilhados entre diferentes cenários de falha. Na recuperação dinâmica, a capacidade disponível de reserva dentro da rede é utilizada para recuperar os serviços afectados. Geralmente, os esquemas dinâmicos são mais eficientes no que diz respeito à utilização da capacidade de rede devido à multiplexagem dos requisitos de capacidade alternativos e em fornecer resiliência contra diferentes tipos de falhas. Enquanto que, os esquemas de protecção com recurso dedicado têm um tempo de recuperação mais rápido e fornecem garantia na capacidade de protecção [7].

## 1.2 Motivação

As mudanças que se verificam na indústria das telecomunicações têm um forte impacto na vida das pessoas. Devido, sobretudo, ao crescimento da internet verifica-se o aumento do tráfego IP em redes de telecomunicações. Nesse sentido, existe a necessidade de aumentar a capacidade das infra-estruturas com base em sistemas de WDM.

No paradigma das redes ópticas da nova geração, um sistema de protecção que seja rápido e fiável é essencial para minimizar o impacto da falha na operação de rede e na prestação de serviços [8]. É necessário e fundamental ter em conta no

*design* de rede a existência de caminhos alternativos ou equipamentos de *backup* que assegurem esta função. A protecção óptica, que opera na granularidade do comprimento de onda (*wavelength*<sup>1</sup>), tem recebido especial atenção, em grande parte devido à sua capacidade em se escalonar com mais facilidade com o aumento do volume do tráfego [3]. Torna-se assim, pertinente analisar e compreender os diferentes tipos de falhas bem como, as técnicas que permitem garantir a sobrevivência da rede de transporte óptica, por forma a minimizar o impacto da falha numa rede de alta capacidade.

Espera-se que a presente dissertação contribua para sensibilizar e demonstrar a importância de incluir no *design* de rede a existência de recursos que contribuam para a sobrevivência da rede óptica.

### 1.3 Objectivos

A presente dissertação tem como principal objectivo:

- Analisar a sobrevivência e técnicas de restauro em redes ópticas;

Para alcançar o objectivo geral estabelecido, será necessário cumprir vários objectivos específicos, nomeadamente:

1. Analisar o conceito de sobrevivência de uma rede óptica no paradigma das NGNs;
2. Analisar e estudar a evolução das redes ópticas WDM;
3. Identificar as características e técnicas de restauro no contexto das NGNs, quer ao nível do Plano de Dados, quer ao nível do Plano de Controlo;

---

<sup>1</sup> O termo “*wavelength*” é tipicamente utilizado em dois contextos diferentes: primeiro, refere-se a um canal de luz; segundo, refere-se ao ponto específico no espectro de luz onde o canal está centrado (e.g., 1550 nanómetros) [3].

## 1.4 Organização do Documento

A dissertação está organizada em cinco capítulos, desempenhando cada um deles um papel específico na estrutura do trabalho de investigação.

Capítulo 1 – Trata-se de um capítulo introdutório, onde é efectuado o enquadramento teórico e apresentado o problema em estudo. São ainda definidos os objectivos que a presente dissertação se propõe atingir e apresentada a estrutura deste documento.

Capítulo 2 – Neste capítulo analisa-se o estado da arte, estuda-se a hierarquia das redes de transporte óptica e detalham-se as suas arquitecturas. É descrita a evolução das redes ópticas com especial destaque para as redes ópticas WDM. São detalhas as topologias, equipamentos e tecnologias de comutação de rede WDM, bem como apresentada e estudada a hierarquia OTN (*Optical Transport Network*);

Capítulo 3 – Neste capítulo analisa-se o estado da arte no que respeita aos esquemas de sobrevivência de uma NGN. São descritos os principais factores que causam as falhas em redes de fibra óptica e são apresentadas as técnicas mais relevantes de protecção e de restauro em redes WDM. É contextualizada a evolução do MPLS (*Multiprotocol Label Switching*) para o GMPLS e detalhados os mecanismos e tecnologias do Plano de Controlo, Plano de Dados e Plano de Gestão;

Capítulo 4 – Neste capítulo analisa-se e estuda-se em ambiente de simulação, vários cenários de falha numa rede core óptica, com especial destaque para o estudo do algoritmo RWA.

Capítulo 5 – Trata-se do último capítulo da dissertação, onde são apresentadas as principais conclusões e as limitações do estudo efectuado. São ainda apresentadas sugestões para trabalhos futuros.



# 2

## Redes Ópticas

A função básica de uma rede de telecomunicações é permitir a comunicação entre dois pontos distintos da mesma. Apesar da simplicidade desta afirmação, é conhecido que as propriedades que estão por detrás de uma rede podem afectar de uma forma significativa o seu desempenho. A capacidade de rede, fiabilidade, custo, escalabilidade e a simplicidade de operação são algumas das referências mais importantes na avaliação de uma rede, e são dos dilemas mais complicados com que se debatem frequentemente os *designers* de rede na procura de avanços tecnológicos [3].

Uma rede óptica, para além de providenciar uma enorme capacidade, também é capaz de proporcionar uma infra-estrutura comum ao longo da qual uma variedade de serviços pode ser disponibilizada. Estas redes estão cada vez mais a tornarem-se capazes de fornecer largura de banda de uma forma flexível, onde e quando necessário [1].

A Figura 2.1 ilustra o modelo arquitectónico de três camadas, onde no topo do modelo está a camada de aplicações, que inclui todos os tipos de serviços que a rede pode fornecer, tais como voz, vídeo, e dados. A camada intermédia engloba a multiplexagem, transporte e comutação baseada em tecnologia eléctrica. Por

exemplo, esta camada inclui *routers* IP, *switches* Ethernet, *switches* ATM (*Asynchronous Transfer Mode*), *switches* SONET (*Synchronous Optical Networking*)/SDH(*Synchronous Digital Hierarchy*), e *switches* OTN. Cada um destes protocolos tem um método particular para transportar os dados da origem para o destino.

Os *payloads* da camada eléctrica são passados para a camada óptica, onde são transportados em comprimentos de onda. A camada óptica é baseada na tecnologia WDM e utiliza *switch* ópticos que são capazes de encaminhar os comprimentos de onda dinamicamente. Deste modo, a camada inferior deste modelo pode também ser referida como “camada WDM reconfigurável” [3].

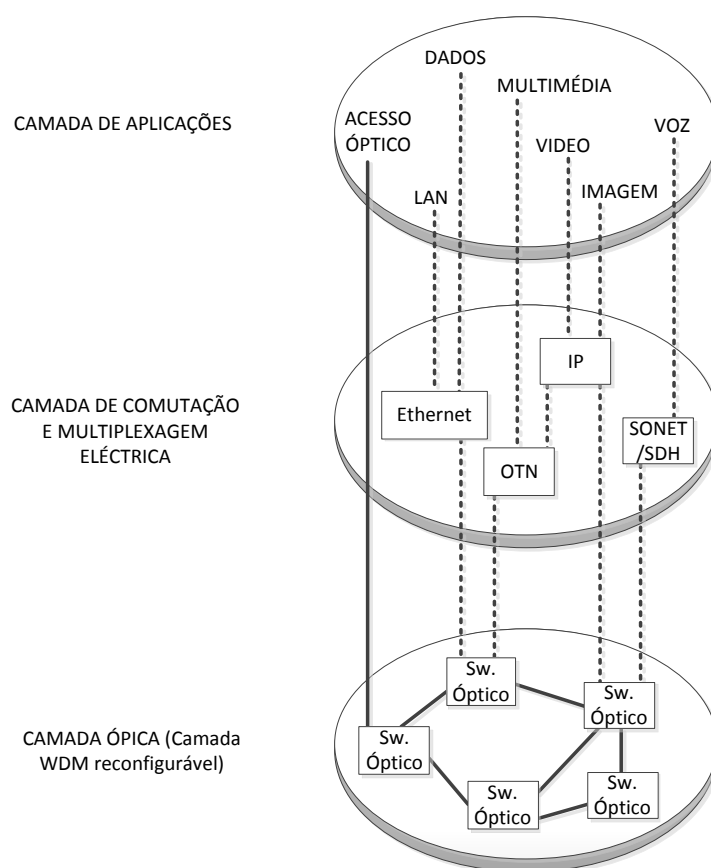


Figura 2.1 – Modelo arquitectónico de três camadas (adaptado de [3]).

## 2.1 Estado da arte

As redes ópticas core e metropolitanas dependem fortemente das ligações ópticas de alta capacidade que utilizam a tecnologia WDM. As soluções tradicio-

nais de planeamento de rede aplicadas em redes ópticas são baseadas na utilização de ligações com capacidade fixa pré-determinada entre os nós da rede, compreendendo canais de comprimento de onda permanente e pré-planeados [9].

A grelha ITU (*International Telecommunication Union*) WDM que tem sido usada nos últimos 15 anos tem permitido aos operadores escolher um espaçamento fixo de 50GHz ou 100GHz entre canais. Estas *fixed grids networks* têm permitido acomodar o crescimento do tráfego quer pelo aumento do *bit rate* do *transponder* em cada canal ou movendo o tráfego para uma grelha de espaçamento mais densa (espaçamento de 12.5GHz e 25GHz entre canais). Ao longo deste tempo, os *transponders* aumentaram o seu *bit rate* por canal de 2.5Gbps até 100Gbps com melhorias na tecnologia que lhes permitiu manterem-se dentro de um canal de 50GHz [10].

Para os sistemas da próxima geração, têm sido realizados estudos sobre o desenvolvimento de *transponders* com *bit rates* de 400Gbps usando formatos de modulação normalizados. Para que o sinal possa continuar a ser transportado sobre distâncias aceitáveis essa investigação tem mostrado que é difícil manter a largura espectral abaixo dos 50GHz. Isto significa que a grelha com espaçamento de 50GHz não acomodará o crescimento do tráfego futuro. Mover o tráfego para uma grelha de 100GHz seria uma opção, mas isto contribuiria para um desperdício de espectro para serviços que usem *transponders* com canais com baixa largura de banda. Uma outra possibilidade é a utilização de uma grelha fixa com *slots* de frequência com diferentes tamanhos para acomodar *transponders* com diferentes *bit rates*, mas isto requeria a priori, um conhecimento de onde e quando irá ocorrer o crescimento do tráfego.

As *Flexgrid networks* permitem uma abordagem menos rígida e fixa na alocação do comprimento de onda. Estas redes combinam dois conceitos na camada de WDM: granularidade fina de comprimentos de onda e a possibilidade de juntar *slots* adjacentes de comprimento de onda para formar um canal com tamanho arbitrário. Neste tipo de sistemas é possível acomodar canais de 10, 40, 100, 400 e 1000Gbps, como representado na Figura 2.2 [10].

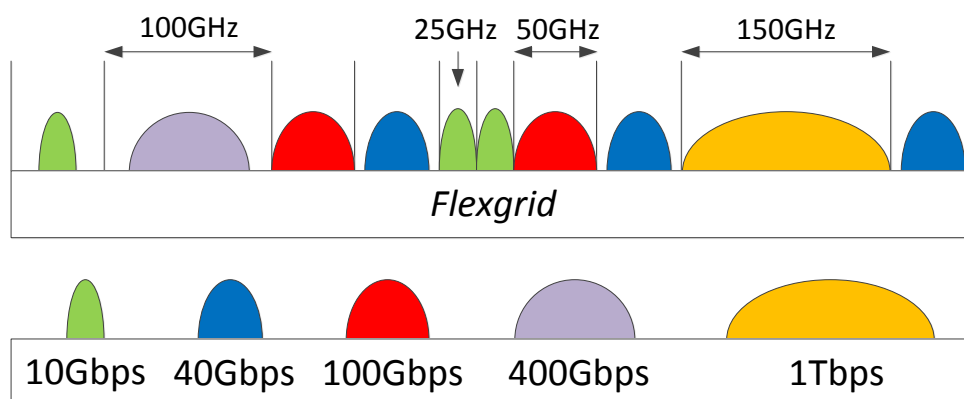


Figura 2.2 - *Flexgrid* (adaptado de [10]).

A otimização do desenho de rede é um processo complexo que é frequentemente realizado em dois passos [9].

- A matriz de tráfego<sup>1</sup> dos pedidos de ligações individuais é preparada primeiro dentro de pedidos agregados ajustados à granularidade da capacidade disponível na camada óptica. O objectivo deste primeiro passo é minimizar o número de comprimentos de onda necessários na camada óptica, que em geral se traduz em menores problemas de contenção de comprimento de onda, menor número de recursos necessário, e conseqüentemente, menores custos. Isto também determina o número de comprimentos de onda que serão usados dentro da rede.
- O segundo passo da otimização de rede é então levada a cabo através de algoritmos de RWA que atribuem um caminho e um comprimento de onda para cada pedido tendo em conta a topologia da rede e problemas na infraestrutura. Estes algoritmos serão descritos mais à frente na secção 3.1. O critério mais comum para otimização é a redução do custo da rede, que muitas vezes se correlaciona com a minimização do número de regeneradores optoelectrónicos necessários (que são necessários para “limpar” os sinais das distorções e ruídos, permitindo a transmissão ao longo de milhares de quilómetros) em toda a rede. A flexibilidade destas redes é limitada ao que é permitido pelos lasers sintonizáveis (isto é, não é atribuído a cada *transpon-*

---

<sup>1</sup> Uma Matriz de Tráfego ou *Traffic Matrix* representa o volume de tráfego que entra e sai de uma rede num determinado intervalo de tempo [58].



der um comprimento de onda fixo) e pelas limitações de reconfiguração permitidas pelos nós de comutação óptica.

No entanto, a rede não fica indefinidamente na configuração definida durante a fase de planeamento de rede. As configurações de rede podem mudar durante a fase de planeamento devido a qualquer mudança de tráfego (normalmente um aumento) ou falhas na ligação ou nó. A introdução das tecnologias de ROADM (*Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexing*) e WSS (*Wavelength Selective Switching*) proporcionam um grau de liberdade adicional para implementação da engenharia de rede, permitindo a reconfiguração das ligações com base no aumento ou modificação do volume de tráfego [9].

A actual abordagem para dinamizar as redes ópticas implementadas permite deixar estabelecidas ligações intactas (até ficarem obsoletas ou com problemas) e tratar novos pedidos de ligação ou falhas usando os recursos livres na rede (ou sugerindo a implementação de recursos adicionais, como *transponders*). Isto causa o mínimo de disrupção no tráfego já estabelecido, produzindo configurações de rede que partem de forma significativa da alocação óptima de recursos. O aumento gradual da capacidade numa rede é tipicamente tratado desta maneira. No entanto, ainda existe uma desvantagem significativa por resolver e que está relacionada com a questão da largura de banda subutilizada devido à granularidade pouco fina e rígida do sistema (ou seja, a granularidade ao nível do comprimento de onda), que é especialmente evidente quando apenas uma pequena parte da capacidade total do canal de comprimento de onda é usado [9].

O Plano de Controlo (*Control Plane*) e de Gestão (*Management Plane*) das redes ópticas são responsáveis por distribuir a gestão e a coordenação dos diferentes elementos que compõem a rede. Além de introduzirem funções inteligentes e autónomas, com o intuito de proporcionar de forma rápida e automática a provisão de ligações ponto-a-ponto, também disponibilizam engenharia de tráfego ou TE (*Traffic Engineering*) com protecção e restauro. O Plano de Controlo é o pilar do sucesso das redes ópticas da nova geração e onde diversas organizações tais como IETF (*Internet Engineering Task Force*), o OIF (*Optical Internetworking Forum*), e ITU têm trabalhado. As principais responsabilidades do Plano de Controlo incluem a propagação da informação de encaminhamento, cálculo de caminho, sinalização, estabelecimento de ligação, e gestão de recursos, implementado em termos de protocolos de controlo executados entre entidades de comunicação [9].

É amplamente reconhecido que o GMPLS é o melhor candidato para o Plano de Controlo óptico, especialmente adequado para o paradigma previsto do IP-sobre-WDM. Embora haja um conjunto básico de funcionalidades suportadas pelas recomendações para a implementação do protocolo GMPLS, existem algumas desvantagens, principalmente devido à imaturidade desta tecnologia. Grandes esforços estão a ser empenhados no desenvolvimento de novas funcionalidades de melhoria da performance do Plano de Controlo do GMPLS. Um Plano de Controlo integrado baseado no GMPLS com múltiplas camadas e múltiplos domínios, que permite uma maior eficiência da utilização dos recursos de rede, é o objectivo dos próximos anos [9].

Redes ópticas de core e metro que têm sido instaladas ao longo dos últimos anos demonstram excelentes desempenhos no que diz respeito às exigências das necessidades e têm melhorado consideravelmente ao longo da última geração de redes implementadas. No entanto, as actuais redes ópticas instaladas trabalham com equipamentos que foram desenvolvidos com especificações muito rígidas: grelha de espaçamento fixa (*Fixed grid*), formatos de modulação e *bit rates* fixos. Isto faz com que o processo de *upgrade* da rede seja muito complicado bem como o número de componentes que têm de ser alterados (CAPEX<sup>1</sup> elevado e necessário) ou limitando as alterações com base na capacidade de crescimento dos componentes existentes. A flexibilidade de rede e a elasticidade na alocação de recurso que seria proporcionado pelos novos elementos de rede será certamente necessário para as futuras redes e permitirá oferecer uma nova geração de aplicações/serviços de alta-performance/qualidade aos utilizadores finais a um baixo custo [9]. Esta flexibilidade será proporcionada aos operadores através das futuras *Flexgrid networks*, que permitirão alocar de forma mais flexível o espectro WDM e maximizar o tráfego transportado [10].

No domínio das redes de acesso, ao longo dos próximos anos, as ligações por cobre e por cabo coaxial que actualmente constituem a maioria da infra-estrutura instalada serão substituídos por fibras ópticas fazendo com que a rede de fibra óptica se mova para mais perto dos utilizadores finais. Os clientes irão poder exigir novos serviços de comunicação com alta disponibilidade e altos débitos. Actual-

---

<sup>1</sup> CAPEX (*Capital Expenditures*), diz respeito ao custo associado ao equipamento de rede [3].

mente os sistemas de acesso óptico FTTH (*Fiber-To-The-Home*) usam principalmente arquiteturas PtP (*Point-to-Point*) e tecnologias PON (*Passive Optical Network*) com uma tendência para estender o alcance e o número de utilizadores conectados por nó de acesso, permitindo a redução do número de CO (*Central Office*) na área de acesso. Estas estratégias podem ajudar na introdução de infraestrutura de fibra óptica no domínio de acesso. A análise da utilização da tecnologia WDM nas redes de acesso ópticas tem estado em investigação e desenvolvimento, mas é esperado que esteja disponível brevemente [9].

## 2.2 Hierarquia Geográfica de uma Rede Óptica

Quando se considera a introdução de uma nova tecnologia de rede, pode ser útil segmentar a rede em múltiplos níveis geográficos, tal como representado na Figura 2.3. Os principais índices diferenciadores entre níveis são o número de clientes servidos, a capacidade necessária e a extensão geográfica.

No extremo de uma rede, juntos aos clientes finais, encontra-se a rede de acesso. Esta rede tem como objectivo distribuir e agregar o tráfego de e para os clientes da rede. As redes de acesso geralmente servem dezenas a centenas de clientes e com um alcance de apenas alguns quilómetros. A rede de acesso pode ser subdividida em rede de acesso empresarial e rede de acesso residencial.

A rede metro é responsável por agregar o tráfego de milhares de clientes das redes de acesso, e normalmente, interliga vários CO numa extensão de dezenas a centenas de quilómetros. Múltiplas redes metro são interligadas através das redes regionais. Uma rede regional transporta o tráfego que se estende por múltiplas redes metro, e é partilhada por centenas de milhares de clientes, com uma extensão geográfica com várias centenas a milhares de quilómetros. O tráfego inter-regional é transportado pela rede core.

As redes core podem ser partilhadas por milhões de clientes e tipicamente estendem-se por milhares de quilómetros [3].

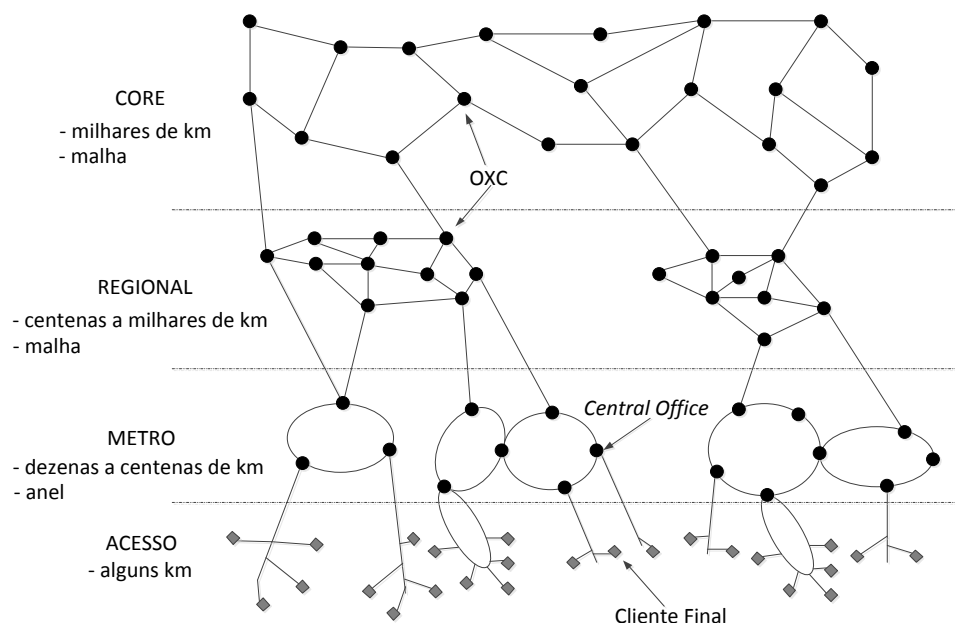


Figura 2.3 - Hierarquia Geográfica de uma Rede Óptica (adaptado de [3]).

## 2.3 Arquitecturas das redes de transporte

As redes de telecomunicações evoluíram substancialmente desde os tempos em que existia apenas o serviço telefónico. Estão implementadas uma grande variedade de tecnologias, suportando um número significativo de falhas bem como uma vasta gama de aplicações baseadas na diversidade de equipamentos de cliente e multiplicidade de ritmos de transmissão. Por outro lado, novos serviços e *networking modes* (e.g., *peer-to-peer*) estão a aparecer e a multiplicar-se muito rapidamente, modificando o perfil de tráfego espacial e temporal de uma forma bastante imprevisível.

É amplamente reconhecido que as arquitecturas de redes de transporte existentes falham em acomodar os novos requisitos. No entanto, as limitações não existem apenas na componente tecnologia. A evolução na arquitectura pressupõe um consenso entre os fornecedores de equipamento que, muitas vezes, é difícil de alcançar. Este facto contribui para problemas de interoperabilidade que, potencialmente limitam qualquer vantagem competitiva inerente à inovação tecnológica. O proteccionismo do mercado pode estagnar os avanços tecnológicos. No entanto, uma grande reformulação nas arquitecturas de rede é obrigatória na procura por uma rede de telecomunicações eficiente, rentável e segura. Os esforços têm-se articulando em torno das noções sobre como a dinâmica de rede pode ser melhorada,

como o custo de aquisição de equipamento e serviços de rede podem ser reduzidos [11].

O objectivo desta secção é descrever os cenários possíveis para a evolução das redes de telecomunicações core, metro e de acesso, tendo em conta os diversos tipos de arquitecturas e equipamentos (ver Figura 2.4).

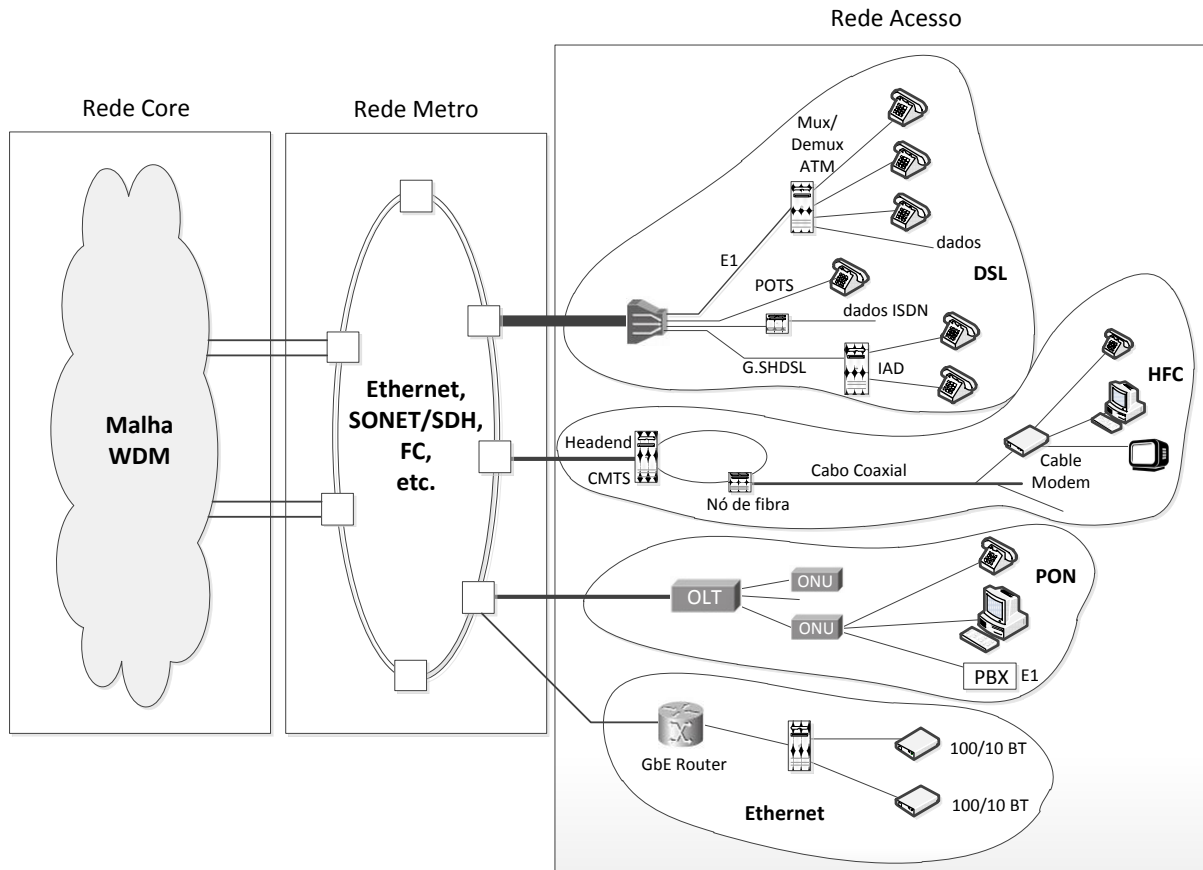


Figura 2.4 - Estrutura genérica de uma rede de telecomunicações moderna (adaptado de [15]).

### 2.3.1 Rede Core

A rede core é tipicamente referida como sendo a infra-estrutura de *backbone* de uma rede de telecomunicações, que interliga grandes cidades, e que abrange distâncias compreendidas dentro de um país, continente, ou até mesmo intercontinentais. A rede core é baseada num padrão de interligações em malha que transporta uma enorme quantidade de tráfego proveniente das áreas periféricas da rede. Isto significa que são necessárias interfaces apropriadas (Ethernet, SONET/SDH, FC (*Fiber Channel*), etc) para as interligações com as redes metro e acesso, que têm

como papel principal, agregar e distribuir o tráfego de modo a que os utilizadores separados por longas distâncias consigam comunicar entre si através da rede core [12].

Dentro da rede core, as tecnologias ópticas são amplamente usadas para suporte da infra-estrutura física e proporcionar alta velocidade, capacidade e escalabilidade. Para controlar e gerir uma rede óptica com inteligência, muitos equipamentos e tecnologias de gestão de alto nível têm sido desenvolvidas. Como exemplo, as arquitecturas de rede baseadas em IP sobre SDH, IP sobre WDM, ou IP sobre SDH sobre WDM têm sido desenvolvidas nas últimas duas décadas [12].

### **2.3.2 Rede Metro**

A rede metro é a parte da rede de telecomunicações que abrange tipicamente a região metropolitana, cobrindo áreas com dezenas a centenas de quilómetros [13], e cujo papel é agregar o tráfego de assinantes residenciais e empresariais [9] (e.g., disponibiliza interfaces à rede de acesso, tais como xDSL (*Digital Subscriber Line technologies*) e FTTx (*Fiber-To-The-x*)), e fornecer ligações directas à rede core para ligação à internet. Em todo o mundo têm sido desenvolvidas diferentes tecnologias para as redes metropolitanas. As três tecnologias dominantes em redes metro são o SDH, WDM e Metro Ethernet. Os anéis de WDM na rede metro são propostos para tirar partido das vantagens da tecnologia óptica, tais como os elevados ritmos e a grande escalabilidade. A arquitectura de anéis SDH também têm o seu papel importante e está bastante implementada nas redes metro, por conseguir agregar o tráfego de baixo débito da rede metro para ser entregue às ligações de alto débito da rede core [12]. Esta tecnologia, já baptizada em muita literatura como *legacy*, começou a perder o seu protagonismo em termos comerciais a partir do ano 2012 para o mercado Metro Ethernet. Segundo [14], estima-se que em 2017 o contributo dos serviços Ethernet seja superior a 75% da largura de banda global.

### 2.3.3 Rede Acesso

A rede de acesso é considerada a “*last mile*” de uma rede de telecomunicações e interliga o CO com os utilizadores finais. A rede de acesso compreende a maior parte da rede de telecomunicações. Existem diversas tecnologias de acesso propostas e instaladas no mercado. Estas tecnologias podem ser classificadas em duas categorias, as tecnologias com fio (tais como xDSL, CM (*Cable Modem*) e FTTx) e as tecnologias sem fio, mais conhecidas como tecnologias *Wireless* [12].

Os sistemas xDSL abrangem várias tecnologias sendo o ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*) e o VDSL (*Very-High Speed Digital Subscriber Line*) os serviços mais comuns. Estes sistemas usam a infra-estrutura PSTN (*Public-Switched Telephone Network*) existente, tirando partido da gama de alta frequência disponível no par de cobre para disponibilizar serviço de Internet [15].

O sinal do serviço CATV (*Cable Television*) é transmitido do *headend*<sup>1</sup> office para os nós remotos de fibra (designado de nó *hub*) onde os sinais são convertidos para o domínio RF (*Rádio Frequência*) e transmitidos através do cabo coaxial até aos utilizadores finais. Devido a este tipo de topologia, os sistemas CATV são também designados de sistemas HFC (*Hybrid Fiber Coaxial*). Estes sistemas usam *modems* baseados em DOCSIS (*Data Over Cable Service Interface Specification*) para a comunicação de dados [16].

É reconhecido que a tecnologia de fibra óptica tem ganho expressão face às tecnologias xDSL e CATV na rede de acesso. As três principais arquitecturas de rede FTTH/B (*Fiber-To-The-Home/Building*) são o Ethernet FTTH ponto-a-ponto (*Home-run Fiber-To-The-Home*), PON FTTH e o WDM PON FTTH [17], sendo a PON a escolha líder para a instalação da rede de acesso por fibra por ter apenas elementos passivos na ODN (*Optical Distribution Network*) [12].

A arquitectura PON usa *splitters* passivos na rede de acesso para permitir que múltiplos utilizadores, normalmente grupos de 4, 8, 16 ou 32, partilhem a fibra de distribuição que tipicamente transporta 2.5Gbps de tráfego GPON (*Gigabit Passive Optical Network*). Os dois principais elementos numa arquitectura PON

---

<sup>1</sup> Um *cable headend* é designado pelos provedores de serviço como sendo o CO ou um nó de core. Está localizado junto ao core [15].

são: o OLT (*Optical Line Terminal*), localizado no CO, e a ONU (*Optical Network Unit*) localizado no (ou perto do) utilizador final [12]. A rede de acesso PON usa pelo menos dois comprimentos de onda, um comprimento de onda para *downstream*, tipicamente 1490nm, e um para *upstream*, tipicamente 1310nm. Um segundo lambda de *downstream* também pode ser usado para o vídeo RF *overlay*, normalmente 1550nm. A distância típica de uma rede de acesso PON FTTH é de 20km. A largura de banda em *downstream* disponibilizada por uma ligação PON FTTH, por subscritor, é normalmente 80Mbps por GPON, ou 2.5Gbps divididos por 32 subscritores. A largura de banda de *upstream*, por subscritor, é tipicamente 40Mbps, ou 1.25Gbps divididos por 32 subscritores [17].

## 2.4 Evolução das redes ópticas

Por mais de um século, a visão tradicional das redes de telecomunicações tem sido uma combinação inteligente de tecnologias de transmissão e de encaminhamento. Mesmo que a transmissão e a comutação ainda estejam presentes na composição básica de uma rede, os fundamentos de redes de telecomunicações abrangem muito mais do que isso. Esta nova visão preliminar deve-se à introdução das tecnologias digitais que abriram caminho para as redes baseadas em pacotes.

Em contraste com as antigas redes analógicas, as redes digitais baseadas em pacotes podem ser ou não orientadas à conexão, podendo ter um plano de controlo para automação de algumas funções, implementar vários esquemas de resiliência e realizar uma série de serviços de rede com suporte a aplicações de utilizadores. Na última década, a proliferação das tecnologias electrónicas e de fibra óptica permitiu que os serviços de rede evoluíssem a partir do exclusivo suporte telefónico para uma abundância de serviços transportados sobre IP. Estes avanços têm tido um impacto significativo na evolução das redes. O desenho e o planeamento de rede é o resultado da interacção de diversos factores tecnológicos, legais e económicos [11].

Em 2010, a comunidade científica celebrou o 50º aniversário da primeira demonstração do laser, o 40º aniversário da primeira demonstração da fibra óptica de baixas perdas, e o primeiro aniversário da atribuição do Prémio Nobel a Dr. Charles Kao, que foi quem propôs pela primeira vez a sílica como material para as comunicações por fibra óptica de longa distância. Estas evoluções facilitaram a revolução das telecomunicações ópticas que começaram em meados dos anos 70 até



ao presente. Desde a primeira comunicação por fibra óptica ponto-a-ponto a ritmos que rondavam os Mbps sobre alguns quilómetros de fibra, até aos dias hoje em que se consegue vários Tbps em sistemas de DWDM com capacidade para grandes distâncias, as redes de comunicação óptica têm sofrido ano após ano notáveis aumentos na produtividade, que são medidas pela sua capacidade de crescimento, redução de custo e aumento da flexibilidade e automatização [9].

O termo “redes ópticas” significa redes de telecomunicações de alta capacidade baseadas em tecnologias ópticas e componentes que são capazes de providenciar capacidade, *provisioning*, encaminhamento, agregação, ou restauro ao nível do comprimento de onda. É entendido e apreciado que as redes ópticas através do aumento de capacidade que oferecem e o custo reduzido por bit transmitido por quilómetro, comparando com outras tecnologias de redes de longa distância (como redes sem fio, redes de cobre e cabo coaxial) têm permitido a revolução da internet que começou em meados dos anos 90 e tem resultado num impacto enorme na nossa sociedade [9].

As primeiras redes ópticas a operar num único comprimento de onda por fibra óptica eram opacas, isto é, o sinal num caminho era regenerado através da conversão optoelectrónica em cada nó, e toda a comutação do sinal e funções de processamento eram implementadas na camada eléctrica. Esta primeira geração de redes ópticas era designada de SDH. Tecnologia esta que normalizou débitos de linha, esquemas de codificação, hierarquias de *bit rates*, e funções de operação e manutenção, bem como os elementos de rede necessários, e arquitecturas de rede que os fabricantes poderiam implementar, e as funcionalidades que cada nó deveria realizar [9].

## 2.5 Evolução das redes ópticas WDM

Desde os meados dos anos 90, foi introduzida uma nova técnica nas redes de comunicação óptica que permite a transmissão de dezenas de sinais ópticos numa única fibra. Esta técnica, designada WDM, além de oferecer uma grande capacidade de transmissão por fibra óptica, tem possibilitado a realização de redes de encaminhamento de comprimentos de onda (*Wavelength routed networks*) com a utilização de nós com comutação eléctrica ou nós baseados em comutação óptica (ver secção 2.7.6). O alcance óptico desta técnica sem regeneração optoelectrónica

ronda os 600km usando SSMF (*Standard Single-Mode Fiber*) com DCFs (*Dispersion Compensated Fibers*) distribuídas periodicamente ao longo do caminho com o intuito de restringir o impacto da CD (*Chromatic Dispersion*) [18]. Redes de encaminhamento óptico de múltiplos comprimentos de onda (WDM) constituem a segunda geração de redes ópticas [9] e que se dividem em três gerações de evolução descritas nas secções 2.5.1, 2.5.2 e 2.5.3 (Figura 2.5).

### 2.5.1 Primeira geração das redes ópticas WDM

A primeira geração das redes ópticas WDM disponibiliza apenas ligações físicas ponto-a-ponto estáticas ou manualmente configuradas. Neste tipo de redes todo o tráfego que chega a um nó é aí terminado, convertido do domínio óptico para o domínio eléctrico, processado electronicamente, e convertido do domínio eléctrico para o domínio óptico antes de sair do nó. O *add/drop* do tráfego em cada nó da rede incorre numa sobrecarga significativa quer em termos de complexidade de comutação quer em termos de processamento electrónico. As questões técnicas principais associadas com a implementação desta primeira geração incluem o *design* e desenvolvimento de lasers e amplificadores ópticos [19].

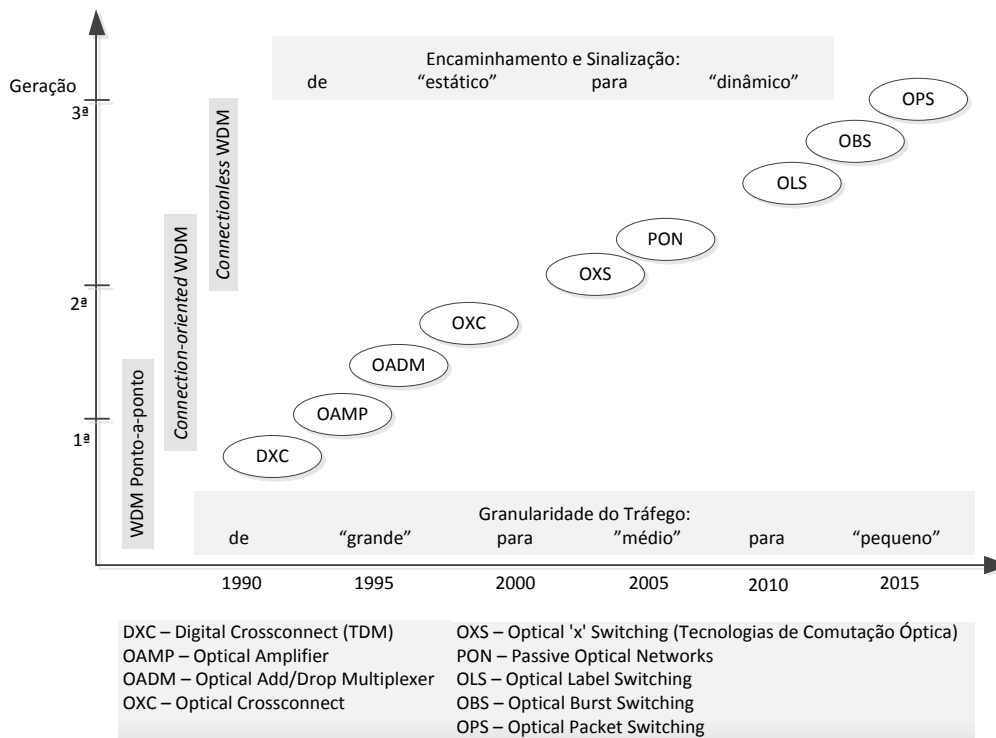


Figura 2.5 - Evolução da rede WDM (adaptado de [25]).

### 2.5.2 Segunda geração das redes ópticas WDM

A segunda geração das redes ópticas WDM é capaz de estabelecer na camada óptica caminhos de luz (*lightpaths*) extremo-a-extremo orientados à conexão. Desta forma é possível implementar topologias em anel ou malha, onde os caminhos de luz são operados numa topologia virtual (em cima da topologia física) que pode ser dinamicamente reconfigurada em resposta às mudanças do tráfego e/ou planeamento de rede. Os equipamentos que permitiram atingir estes resultados foram o desenvolvimento do OADM e OXC que serão descritos detalhadamente na secção 2.7 [20].

Estes elementos de rede foram baseados sobre a premissa de que a maioria do tráfego que entra num nó está a ser encaminhado através deste até ao seu destino final em vez de ser destinado a esse mesmo nó. Se o tráfego de trânsito permanecer no domínio óptico, em vez de incorrer em sucessivas conversões O-E-O para processamento electrónico e retransmissão, o custo associado à alta capacidade de comutação e encaminhamento em cada nó seria substancialmente reduzido [3].

A primeira e segunda geração de redes WDM têm sido instaladas em inúmeras redes de operador, onde inicialmente eram apenas instaladas no *long-haul*<sup>1</sup> [20] mas rapidamente se aproximaram das redes de acesso. A razão económica por detrás deste movimento é que à medida que se aproxima da periferia da rede, o custo de uma rede num nível hierárquico particular (Core-metro-acesso) é amortizado em poucos utilizadores. Devido a essa diferença de sensibilidade entre o custo desses níveis, muitas vezes há uma tendência para implementar novas tecnologias em primeiro lugar na rede de core. À medida que a tecnologia amadurece e atinge um custo mais baixo, esta gradualmente estende-se até à rede de acesso. Um factor importante que deve ser tomado em consideração é que com a entrada das redes ópticas na rede de acesso, vai existir uma proliferação de aplicações de banda larga nos utilizadores finais, fazendo com que um potencial crescimento de largura de banda aumente através da rede hierárquica, obrigando os prestadores de serviços a

---

<sup>1</sup> Termo usado para definir redes ópticas de longa distância, tipicamente designadas de redes core ou redes de *backbone* inter-regionais [3];

estarem preparados para lidar com o grande volume de tráfego sem constrangimentos [3].

### 2.5.3 Terceira geração das redes ópticas WDM

A terceira geração de redes WDM é também baseada nos elementos de rede OADM e OXC, oferecendo uma rede óptica de comutação de pacotes não orientada à conexão, onde são adicionados cabeçalhos ou etiquetas (*labels*) ópticas aos dados, transmitidos com o *payload*, e processados em cada comutador óptico WDM [20]. A interoperabilidade entre as redes WDM e as redes IP torna-se uma importante preocupação desta geração e onde está previsto que tenha duas partes funcionais principais: uma rede core interna e múltiplas redes de acesso. As redes de acesso são compatíveis com as arquitecturas de redes de transporte de internet e são responsáveis por agregar o tráfego IP dos utilizadores finais. Estas redes são constituídas por tecnologias de transporte eléctrica ou óptica de baixa velocidade tais como as PON. As redes de acesso são interligadas pela rede core interna através de nós fronteira. A rede core consiste numa malha de elementos de rede de comutação óptica (e.g., OXC e OADM) interligados através de ligações ópticas *long-haul* de alta velocidade. Existem três tecnologias de transporte *all-optical* (O-O-O) propostas para a rede de core, nomeadamente o *wavelength routing* ou OCS (*Optical Circuit Switching*), OPS (*Optical Packet Switching*) e OBS (*Optical Burst Switching*) [21] que serão introduzidas em detalhe na secção 2.8.

## 2.6 Topologia de rede WDM

A Figura 2.6 representa de uma forma genérica a topologia de uma rede WDM e as terminologias adoptadas neste tipo de redes. Os círculos representam os nós da rede. Estes são os pontos na rede onde é iniciado/terminado e comutado o tráfego. As linhas que interligam os nós são referidas como *links*. Nestes *links* são tipicamente usados um ou mais pares de fibra óptica, onde cada fibra transporta o tráfego apenas numa direcção. Os amplificadores ópticos devem ser periodicamente localizados ao longo de cada fibra, especialmente nas redes de core desde que a

distância não ultrapasse os 80km [1]. A porção de um *link* entre dois amplificadores, ou entre um amplificador e um nó é designado de *span*.

Um conceito também bastante importante é o *nodal degree* (grau de um nó). Os graus de um nó são o número de *links* incidentes num nó. É possível observar na Figura 2.6 que os nós A e B são de grau dois, enquanto que o nó C é de grau três. O grau de um nó é muito importante para determinar que tipo de equipamento é apropriado a cada nó [3].

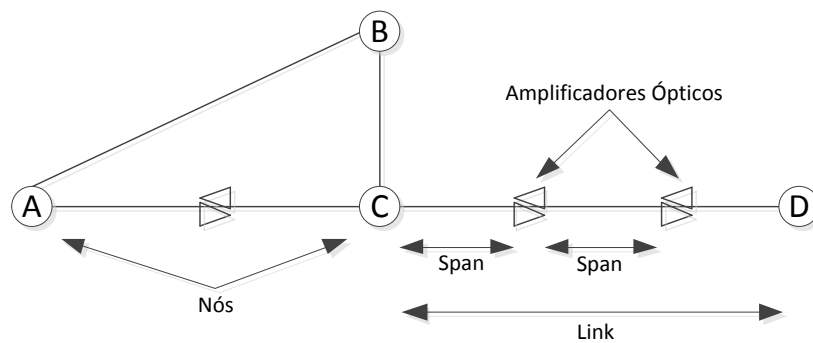


Figura 2.6 - Topologia de rede (adaptado de [3]).

A Figura 2.7a) representa um nó de grau três equipado com um ROADM e um OLT. O *bypass* óptico<sup>1</sup> é possível apenas para o tráfego entre os *links* Este e Oeste. O tráfego entre os *links* Sul e Este ou Sul e Oeste deve passar pela conversão O-E-O pelos *transponders*. A Figura 2.7b) representa um nó de grau quatro equipado com dois ROADMs. O *bypass* óptico é possível entre os *links* Este e Sul e entre os *links* Norte e Oeste, mas não entre os restantes pares de *links*. A estratégia de *design* com estas arquitecturas é implementar o ROADM(s) na direcção onde se espera a maior quantidade de tráfego. No entanto, se o tráfego real acaba por ser muito diferente do previsto, então pode haver um inesperado aumento da quantidade de *transponders* necessários; isto é, as arquitecturas da Figura 2.7 não são tolerantes à alteração do que está previsto [3].

---

<sup>1</sup> Redes de *bypass* óptico ou *Optical-bypass-enabled networks*, são redes puramente ópticas, cuja conversão O-E-O não existe [3];

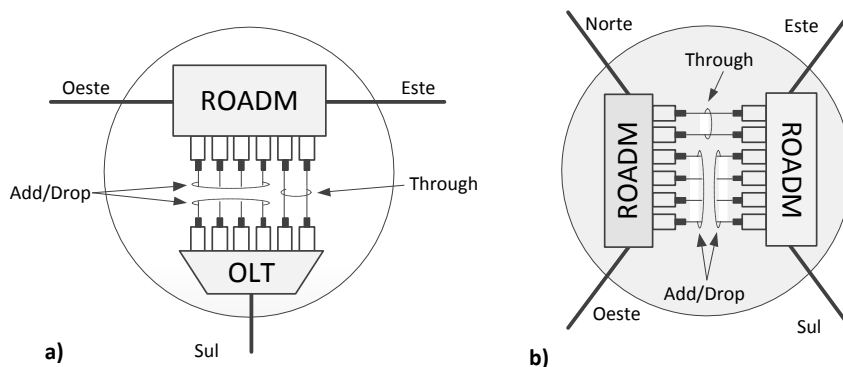


Figura 2.7 - a) Nó de grau três com um ROADM e um OLT. b) Dois ROADMs com alguns *transponders* (adaptado de [3]).

Uma rede óptica que tire partido da tecnologia WDM geralmente usa uma fatia restrita do espectro de luz. A Figura 2.8 representa a porção do espectro eletromagnético de trabalho dos sistemas de transmissão baseados na tecnologia WDM. A escolha deve-se às baixas perdas de atenuação na fibra óptica de sílica nesta zona do espectro. Esta faixa espectral está dividida em três regiões: a banda convencional designada de Banda-C [1530-1565nm]; a banda de comprimento de onda longo ou Banda-L [1565-1625nm]; e a banda de comprimento de onda curto ou Banda-S [1460-1530nm]. A maioria dos sistemas WDM usa a Banda-C, no entanto estes sistemas têm-se expandido para a Banda-L e Banda-S para aumentar a sua capacidade [3]. Os comprimentos de onda devem ser escolhidos entre um conjunto de grelhas de frequências (12.5, 25, 50 ou 100GHz de espaçamento [22]) definidas pela ITU.

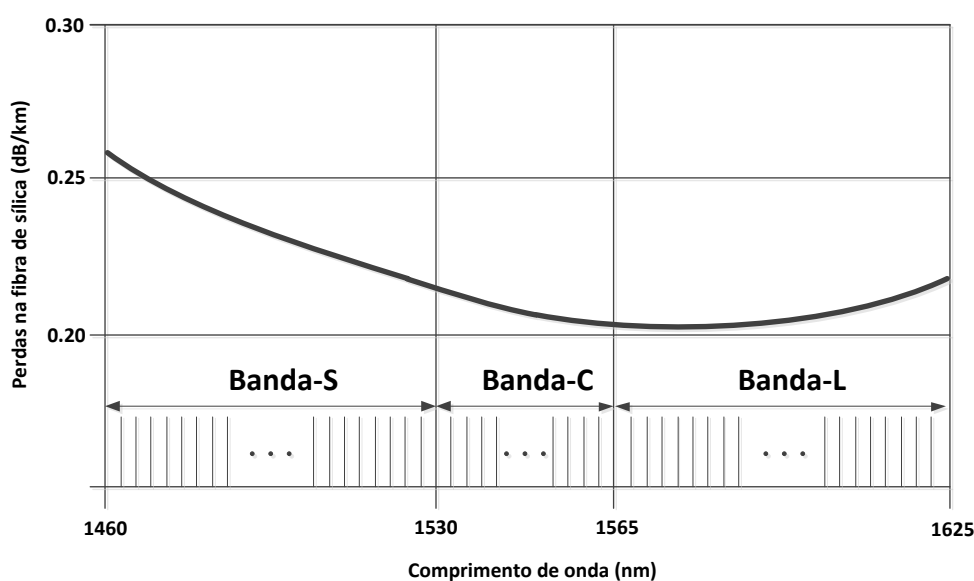


Figura 2.8 – Representação aproximada das Bandas-C, S e L com correspondência típica das perdas na fibra óptica (adaptado de [3]).

## 2.7 Equipamentos de rede WDM

Tendo como base a Figura 2.6, nesta secção serão descritos em detalhes as características dos equipamentos usados em redes WDM, nomeadamente os Amplificadores Ópticos, OLTs, OLAs (*Optical Line Amplifiers*), OADMs, ROADMs e OXCs.

### 2.7.1 Amplificador Óptico

Os amplificadores ópticos tornaram-se um componente essencial em sistemas de transmissão WDM para compensar as suas perdas. O amplificador mais comum é o EDFA (*Erbium-Doped Fiber Amplifier*). Este tipo de amplificador é usado na maioria dos sistemas WDM, enquanto que os amplificadores Raman tipicamente são usados em conjunto com os EDFA em sistemas *long-haul* [1].

#### 2.7.1.1 Amplificador EDFA

O amplificador EDFA é formado por um segmento de fibra óptica de sílica, com alguns metros de comprimento, fortemente dopada no seu núcleo com erbium. Os comprimentos de onda de excitação mais convenientes são o 980nm e o 1480nm. Quando este comprimento de onda é bombeado para dentro da fibra dopada, os iões de erbium são excitados e a emissão estimulada acontece, libertando energia fotónica [5].

A Figura 2.9 representa o amplificador EDFA esquematizado. De modo a combinar a saída do laser bomba com o sinal de entrada (sinal a amplificar), a fibra dopada é precedida de um acoplador selectivo de comprimento de onda. À saída, outro acoplador selectivo de comprimento de onda pode ser usado se necessário para separar alguma potência do sinal do laser bomba existente. Tipicamente é usado um isolador na entrada e/ou na saída do amplificador para prevenir reflexões dentro deste [1].

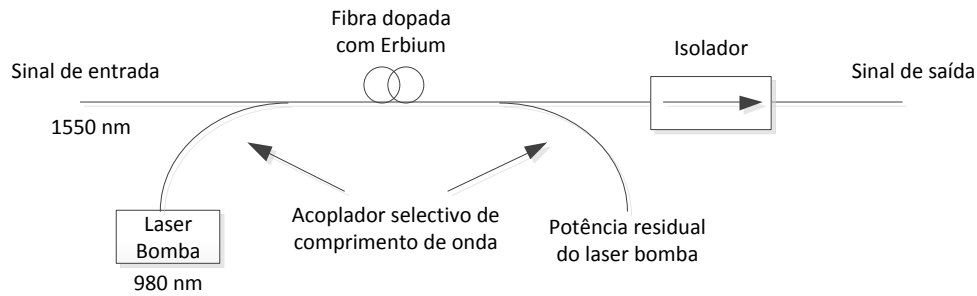


Figura 2.9 - EDFA esquematizado (adaptado de [1]).

O amplificador EDFA teve um grande contributo na redução dos custos em sistemas WDM. Antes da implementação deste tipo de amplificadores, cada comprimento de onda numa fibra tinha de ser individualmente regenerado (para repor a qualidade do sinal) aproximadamente em intervalos de 40km, usando equipamento electrónico dispendioso. Em contrapartida, os EDFA, instalados em intervalos de 80km, permitem a amplificação de todos os comprimentos de onda simultaneamente no domínio óptico. Os primeiros sistemas WDM que utilizavam o EDFA, permitiam a transmissão do sinal até 500km antes de ser necessário regenerar cada comprimento de onda. Com os sistemas mais recentes, esta distância aumentou para 1500-2500km [3].

### 2.7.1.2 Amplificador Raman

Os amplificadores Raman exploram as não linearidades (SRS - *Stimulated Raman Scattering*) que afectam a propagação do sinal óptico na fibra óptica para amplificar o sinal. A mesma fibra de sílica usada na transmissão do sinal de dados é a mesma fibra usada para injectar o sinal do laser bomba. A Figura 2.10 representa um amplificador Raman distribuído usando um laser bomba de propagação no sentido contrário ao do sinal a amplificar, operando em conjunto com EDFA discretos.

O espectro do ganho deste tipo de amplificador é bastante amplo sendo o pico do ganho centrado a cerca de 13THz abaixo da frequência do sinal usado no laser bomba (perto da região dos infravermelhos). Esta separação significa que, o comprimento de onda do laser bomba está cerca de 80-100nm abaixo da janela de ganho do amplificador.



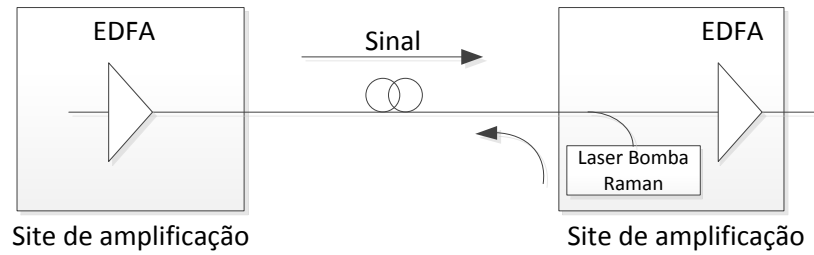


Figura 2.10 - Amplificador Raman distribuído usando laser bomba de propagação no sentido contrário ao sinal, a funcionar com EDFA discretos (adaptado de [1]).

Pequenos atributos distinguem os amplificadores Raman dos EDFAs. Ao contrário dos EDFA, é possível usar o efeito de Raman para disponibilizar ganho a qualquer comprimento de onda. O EDFA disponibiliza ganho tipicamente na Banda-C e Banda-L. Assim a amplificação de Raman pode permitir a amplificação noutras bandas WDM, tais como a janela dos 1310nm, ou na Banda-S. É também possível usar em simultâneo múltiplos laser bomba com diferentes comprimentos de onda e diferentes potências para adaptar de forma global o ganho de Raman. A utilização mais comum deste tipo de amplificadores é complementar a amplificação dos EDFAs, proporcionando ganho adicional de uma maneira distribuída em sistemas WDM de longa distância. [1].

### 2.7.1.3 Tipos de configuração

Como representado na Figura 2.11, os amplificadores ópticos são usados em três tipos de configuração. O pré-amplificador óptico é usado apenas na recepção para melhorar a sensibilidade do sistema. Este tipo de amplificadores são desenhados para disponibilizar um grande ganho e a maior sensibilidade possível, isto é, a menor quantidade de adição de ruído. O amplificador de potência é usado depois da transmissão para aumentar a potência de saída do sistema. O amplificador de linha é tipicamente usado no meio de um *link* para compensar as suas perdas, sendo desenhado para providenciar a combinação das duas configurações anteriores, a de amplificador de potência e a de pré-amplificador [1].

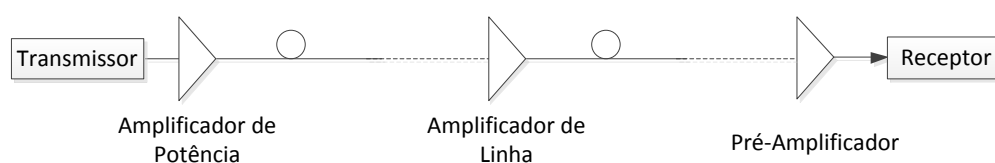


Figura 2.11 – Amplificador de Potência, Amplificador de Linha e Pré-Amplificador (adaptado de [1]).

### 2.7.2 OLT

Um OLT é composto por *multiplexers*, *desmultiplexers*, dispositivos de adaptação designados de *transponders* e opcionalmente amplificadores ópticos. Os *transponders* representam uma porção significativa do custo do sistema. Estes convertem o sinal proveniente do cliente (Routers IP, SONET/SDH, Ethernet, etc) num sinal apropriado para ser transmitido num comprimento de onda normalizado ITU compatível com a grelha WDM e vice-versa. O *transponder* não é necessário se o equipamento de cliente conseguir enviar e receber um sinal compatível com um lambda normalizado do ITU. O OLT também termina e separa o OSC (*Optical Supervisory Channel*) usado para gestão dos equipamentos WDM.

O OLT é usado nos extremos de uma ligação WDM ponto-a-ponto. Multiplexa múltiplos comprimentos de onda numa única fibra e desmultiplexa o sinal WDM composto por múltiplos comprimentos de onda nos seus sinais individuais [1].

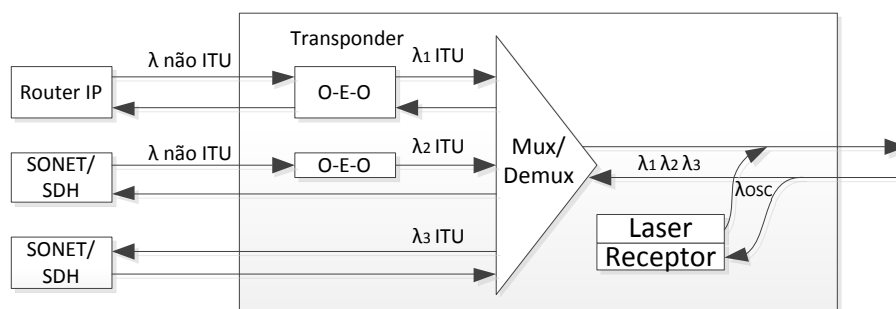


Figura 2.12 - Diagrama de bloco de um OLT (adaptado de [1]).

### 2.7.3 OLA

Os OLA são instalados no meio de um *link* de fibra óptica tipicamente em intervalos de 80-120km. A Figura 2.13 mostra o diagrama de blocos de um OLA. O elemento básico é um bloco de ganho com fibra dopada com erbium (EDFA). Os amplificadores geralmente usam dois ou mais blocos de ganho em cascata, designado de *midstage access*. Esta característica permite colocar alguns elementos de perda entre os dois estágios de amplificação sem impacto significativo na figura de ruído do amplificador. Estes elementos incluem os compensadores de dispersão

para compensarem a dispersão cromática acumulada ao longo do *link*, e também os OADMs.

Pode ser usado um Raman *pump* (laser bomba Raman) para disponibilizar ganho adicional ao sistema usando o *span* de fibra óptica. O OSC é filtrado e terminado à entrada, e é inserido novamente à saída. Num sistema que use a Banda-C e L, as bandas são separadas à entrada, antes da amplificação, e são usados EDFAs separados para cada uma das bandas [1].

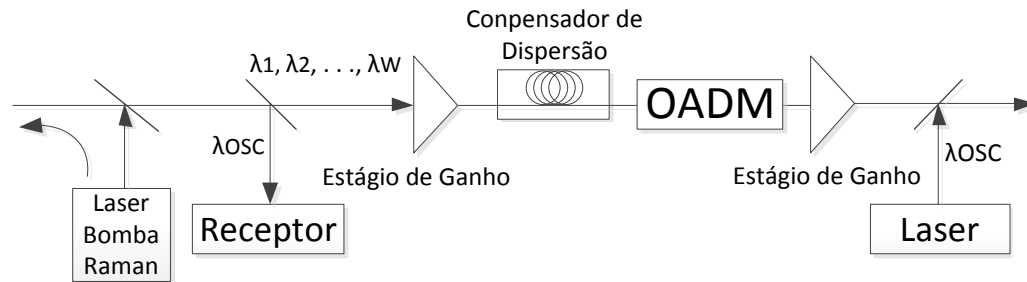


Figura 2.13 - Diagrama de blocos típico de um OLA (adaptado de [1]).

## 2.7.4 OADM

O OADM disponibiliza um meio de baixo custo para tratar o tráfego de *passthrough* nas redes metro e core. Este equipamento pode ser usado em redes core nos *sites* de amplificação (OLA) para fazer add/drop de canais, mas também pode ser usados como um nó *stand-alone*, em particular nas redes metro. Para se compreender melhor o papel de um OADM, considere-se a rede composta por três nós, o nó A, B e C, como representado na Figura 2.14. Esta rede suporta o tráfego entre os nós A e B, B e C, e A e C, sendo que o tráfego entre A e C faz *passthrough* no nó B. Para simplificar, assume-se que os *links* e ligações são full-duplex, sendo este o caso mais comum nas redes WDM. Assim, a rede da Figura 2.14, na realidade é constituída por um par de fibras ópticas que transportam o tráfego nas duas direcções.

Assumindo os seguintes requisitos de tráfego: um comprimento de onda entre os nós A e B, um comprimento de onda entre os nós B e C, e três comprimentos de onda entre os nós A e C. Para suportar o tráfego resultante, assume-se que está instalado um sistema WDM ponto-a-ponto. O resultado da solução da Figura 2.14a) é o que se segue. Estão instalados dois sistemas ponto-a-ponto, um

entre os nós A e B e outro entre os nós B e C. Como descrito na secção 2.7.2, cada sistema ponto-a-ponto usa um OLT em cada extremo do *link*.

Considerando o que é necessário no nó B. Este nó é composto por dois OLTs. Em cada OLT terminam quatro comprimentos de onda e portanto, necessitam de quatro *transponders* para terminar os canais. No entanto, apenas um desses quatro comprimentos de onda tem como destino o nó B. Os restantes *transponders* são usados para suportar o tráfego de *passthrough* entre os nós A e C. Estes *transponders* estão ligados costas com costas para providenciar esta função. No entanto, seis dos oito *transponders* instalados no nó B são usados para lidar com o tráfego de *passthrough*, o que torna esta solução muito cara.

Considerando a solução OADM da Figura 2.14b), em vez de estarem instalados sistemas WDM ponto-a-ponto, está instalada uma rede de encaminhamento de comprimento de onda. A rede usa um OLT nos nós A e C e um OADM no nó B. O OADM extrai um dos quatro canais e termina-o num *transponder*. Os restantes comprimentos de onda passam directamente no domínio óptico sobre o nó B, sem serem utilizados *transponders*. Comparando com os oito *transponders* necessários no exemplo da Figura 2.14a), este exemplo representa uma redução de custo significativa.

Este tipo de equipamento, embora esboce uma enorme vantagem do ponto de vista da redução de custo do sistema, é bastante inflexível do ponto de vista da reconfiguração. Isto significa que, por ser constituído por elementos estáticos, não permite o controlo por software de quais os canais é que são retirados ou passam no equipamento. Na secção 2.7.5 é apresentado o ROADM, que usa filtros e lasers sintonizáveis [1].

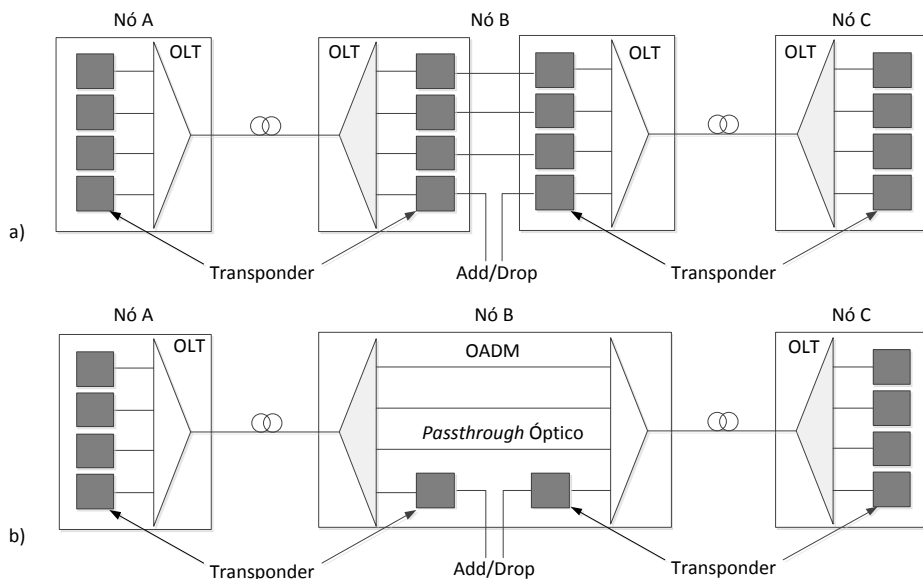


Figura 2.14 - Exemplo de uma rede para ilustrar o papel de um OADM (adaptado de [1]).

### 2.7.5 ROADM

A reconfigurabilidade é um atributo que confere ao OADM a possibilidade de seleccionar qualquer comprimento de onda que se deseja extrair ou adicionar ao sistema, sem haver a necessidade de planejar e implementar com antecedência o equipamento apropriado. Isto permite aos operadores que sejam flexíveis quando estão a planejar as suas redes e possibilita que os caminhos de luz sejam instalados ou removidos dinamicamente consoante as necessidades. Para se conseguir uma reconfiguração completa num OADM são usados *transponders* sintonizáveis (que usam lasers sintonizáveis) capazes de se adaptar a qualquer comprimento de onda [1], representando uma solução mais cara que o OADM.

### 2.7.6 OXC

Os OADMs são úteis para lidar com topologias de rede simples, tais como a topologia linear mostrada na Figura 2.14 ou a topologia em anel, e um número relativamente modesto de comprimentos de onda. O OXC é capaz de lidar com topologias de rede mais complexas como a topologia em malha e um grande número de comprimentos de onda, lidando com enormes quantidades de tráfego. O OXC é também um elemento de rede importante em redes ópticas reconfiguráveis, onde os caminhos de luz podem ser implementados ou removidos quando se quiser, sem haver a necessidade de serem estaticamente implementados. Embora se use o termo *óptico*, o *switch fabric* de um OXC pode ser puramente óptico ou eléctrico [1].

A comutação do sinal óptico no domínio eléctrico é a primeira abordagem para realizar um OXC designado de OXC eléctrico ou OXC opaco (*Opaque cross-connect*), sendo a segunda abordagem baseada apenas na comutação no domínio óptico (*All-optical cross-connects* ou *O-O-O cross-connect*), designado também de OXC transparente ou PXC [23]. Nas secções 2.7.6.1 e 2.7.6.2 são descritos em detalhe a diferença entre os dois tipos de comutadores.

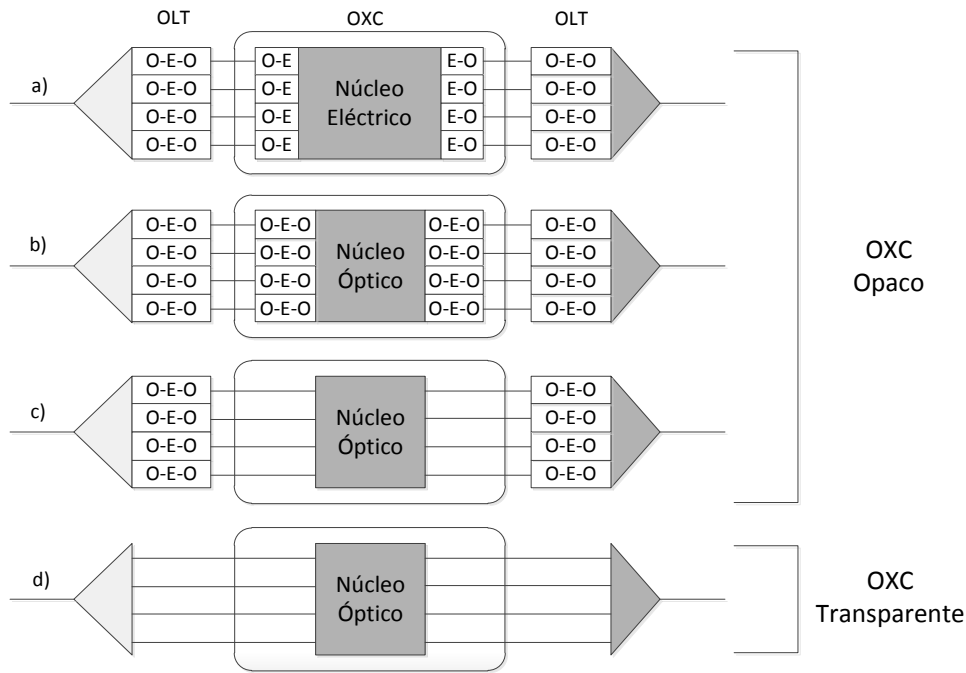


Figura 2.15 - Diferentes cenários para implementação de OXC (adaptado de [1]).

### 2.7.6.1 OXC Opaco

Neste tipo de configuração o núcleo de comutação pode ser eléctrico ou óptico. Isto é, os sinais podem ser comutados ou no domínio eléctrico ou no domínio óptico [1].

A Figura 2.15a) representa um OXC com comutação eléctrica onde os sinais ópticos são convertidos primeiro num sinal eléctrico, comutados electricamente e convertidos novamente no domínio óptico. Este tipo de comutação é designado de comutação O-E-O. Esta abordagem carrega algumas desvantagens. A primeira desvantagem é a velocidade de comutação eléctrica não conseguir acompanhar as capacidades ópticas. A segunda desvantagem é que a comutação O-E-O não é transparente ao débito binário e ao formato dos dados. Quando o débito binário aumenta, os *transponders* e os *switch core* eléctricos têm de ser substituídos [24].

Nos OXC com núcleo de comutação óptico, existem duas abordagens, a primeira como representado na Figura 2.15b), o núcleo de comutação está rodeado de conversores O-E-O com interfaces ópticas de curto alcance que interligam o OXC e o OLT. Estes conversores permitem monitorizar a integridade do sistema [24]. Na Figura 2.15c), o núcleo de comutação está directamente interligado com os *transponders* no OLT. Os sinais ópticos (lambda normalizado do ITU) de cliente

são convertidos em sinal eléctrico e convertidos novamente em sinal óptico. Estes sinais são comutados no domínio óptico, em seguida convertidos para o domínio eléctrico e finalmente convertidos novamente no domínio óptico (lambda normalizado do ITU). Esta opção pode melhorar o desempenho da *cross-connection*, uma vez que o núcleo de comutação óptica não tem as limitações de largura de banda e dos consumos de energia de um núcleo de comutação eléctrica. Os OXCs opacos permitem a conversão de comprimentos de onda, monitorização de QoS e regeneração do sinal. No entanto, uma vez que existe conversão O-E-O o ritmo de transmissão e a transparência dos dados é perdido [24].

### 2.7.6.2 OXC Transparente

Os OXCs transparentes comutam os dados sem qualquer tipo de conversão eléctrica. Como representado na Figura 2.15d), o núcleo de um OXC transparente é um comutador óptico que é independente do débito binário e do protocolo, fazendo com que a *cross-connection* esteja preparada para futuros *upgrades* no sinal. Outra vantagem deste tipo de comutador é a redução do custo, tamanho, e complexidade. Uma desvantagem deste tipo de comutador é que não permite a regeneração do sinal com *retiming* e *reshaping* (3R). Isto limita a distância que o sinal óptico pode percorrer [24].

## 2.8 Tecnologias de comutação para WDM

As tecnologias de comutação óptica são geralmente referidas com OXS (*Optical 'X' Switching*), onde  $X=\{C,P,B,L,F\}$ , *circuit*, *packet*, *burst*, *label* e *flow*, respectivamente [25]. As três principais técnicas propostas pela literatura para transporte de IP sobre redes baseadas em WDM são o OCS, OPS e OBS [19]. Estas técnicas estão descritas e detalhadas nas secções que se seguem.

### 2.8.1 *Optical Circuit Switching*

Nas redes baseadas em OCS (Figura 2.16), são estabelecidos canais WDM dedicados, ou *lightpaths*, entre a origem e o destino [21]. O estabelecimento destes *lightpaths* envolve várias fases tais como a descoberta da topologia e recursos, RWA, sinalização e reserva de recursos. Manter o controlo da informação do estado da rede é o principal objectivo da tarefa da descoberta da topologia e recursos. A informação do estado da rede inclui informações sobre a topologia de rede física e a disponibilidade de largura de banda nas ligações de rede. Para redes de encaminhamento de comprimento de onda, informações sobre a disponibilidade de comprimentos de onda num determinado *link* na rede é essencial. Um dos problemas centrais neste tipo de redes é determinar qual o encaminhamento e qual o comprimentos de onda utilizar para cada *lightpath*, conhecido como RWA [26]. Estes *lightpaths* podem ser estabelecidos de forma estática ou dinâmica. Quando o conjunto de ligações é conhecido à partida, o problema da criação do *lightpath* é conhecido como estabelecimento de *lightpath* estático e o objectivo é minimizar os recursos de rede consumidos tais como o número de comprimentos de onda ou fibras usadas na rede. No estabelecimento de *lightpaths* dinâmicos, estes são criados de forma dinâmica com a chegada dos pedidos de ligação de forma *online*. O objectivo neste caso é minimizar o bloqueio de ligação e assim maximizar o número de ligações estabelecidas na rede ao mesmo tempo [26]. Um *lightpath* é transportado dentro de um comprimento de onda em cada *link* intermediário ao longo de uma rota física e comutado de um *link* para outro em cada nó intermédio. Se existirem conversores de comprimento de onda na rede, o *lightpath* deve ser convertido de um comprimento de onda para outro. Caso contrário, o mesmo comprimento de onda deve ser utilizado em todos os *links* entre a origem e o destino. Esta propriedade é conhecida como WCC (*Wavelength Continuity Constraint*). Um comprimento de onda pode ser usado por diferentes *lightpaths* desde que eles não tenham nenhum *link* em comum. Isto permite a reutilização espacial do mesmo comprimento de onda em diferentes partes da rede sendo esta propriedade designada de reutilização de comprimentos de onda [21].



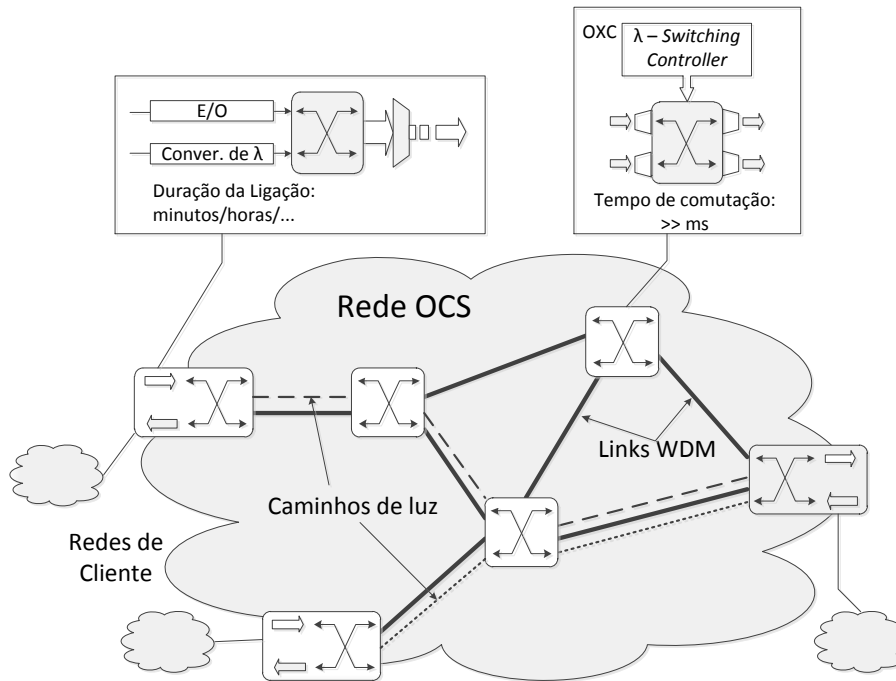


Figura 2.16 - Rede OCS (adaptado de [19]).

Embora o *wavelength routing* seja uma melhoria importante da primeira geração de arquiteturas ponto-a-ponto, esta tem algumas limitações. Primeiro, os *lightpaths* são estáticos e com ligações de largura de banda fixa cuja capacidade de acomodar com eficiência a grande variação do tráfego de internet é reduzida. Além disso, o número de ligações numa rede é tipicamente maior que o número de comprimentos de onda e o ritmo de transmissão de uma ligação é mais pequena que a capacidade de um comprimento de onda. Portanto, apesar da reutilização espacial de comprimentos de onda, nem sempre é possível ou eficiente alocar um comprimento de onda em todas as ligações. Este problema pode ser aliviado pelo *traffic grooming*, que agrega várias ligações dentro do mesmo *lightpath*. No entanto, algumas ligações devem continuar a ter múltiplos *lightpaths* entre nós origem e destino. Tais ligações irão incorrer em múltiplas conversões O-E-O e múltiplas interligações ao longo da rede, aumentando o consumo de recursos e atrasos [21].

### 2.8.2 *Optical Packet Switching*

OPS é um paradigma de redes ópticas de comutação de pacotes no domínio óptico (Figura 2.17). Nesta abordagem, os pacotes ópticos são enviados ao longo

da rede com os seus cabeçalhos sem qualquer reserva ou configuração prévia. Ao alcançar um nó core, o pacote irá ser armazenado num *buffer* óptico enquanto o seu cabeçalho é extraído e processado electronicamente. A ligação entre o porto de entrada e o porto de saída é estabelecida para a transmissão do pacote óptico. Logo após a transmissão do pacote a ligação é libertada. Assim, um *link* pode ser estatisticamente partilhado entre várias ligações ao nível do sub-comprimento de onda (*subwavelength level*) [21].

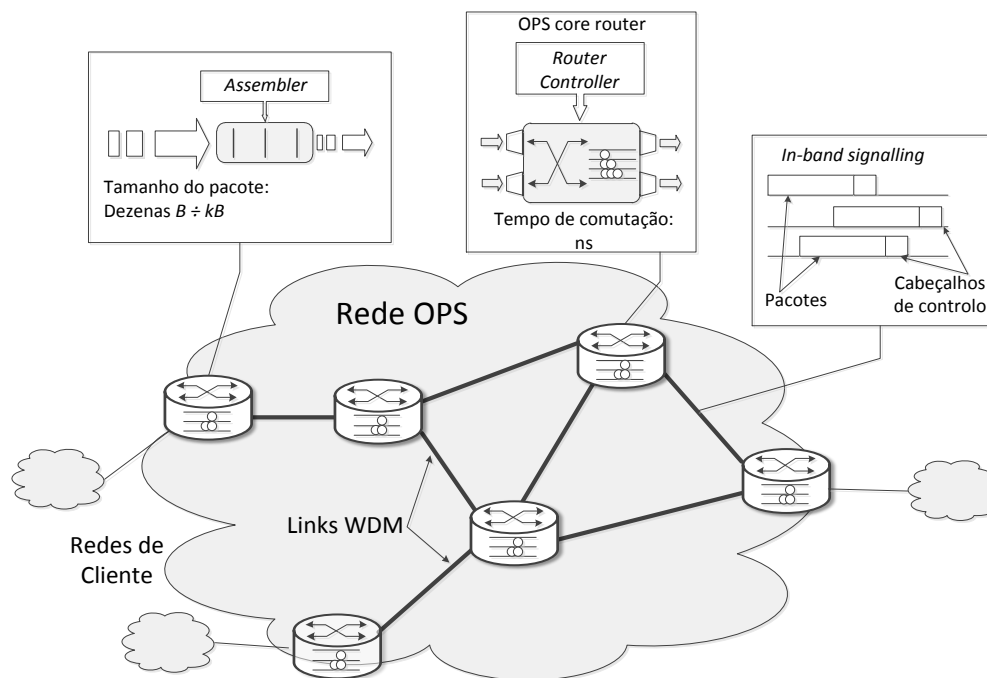


Figura 2.17 - Rede OPS (adaptado de [19]).

O objectivo do OPS é permitir capacidade de comutação de pacotes a ritmos comparáveis com os dos *links* ópticos e substituindo assim o encaminhamento de comprimento de onda na futura rede óptica. No entanto, este paradigma enfrenta vários desafios que envolvem tecnologias ópticas que ainda estão imaturas e caras. Um desses desafios é a falta de memória de acesso óptico aleatório para *buffering*, causando problemas graves de contenção comparando com as redes de comutação de pacotes no domínio eléctrico tradicionais [26]. Os *buffers* ópticos são realizados por simples FDLs (*Fiber Delay Lines*), que não são memórias totalmente funcionais. O tamanho do *buffer* é severamente limitado pelas limitações do espaço físico. De modo a atrasar um pacote óptico por alguns microssegundos, é necessário um quilómetro de fibra óptica [26]. Por causa desta limitação, um nó OPS pode ser muito ineficiente em lidar com grandes quantidades ou *bursts* de tráfego. Outra

solução para o problema da contenção é encaminhar os pacotes que estão em disputa pela mesma porta de saída por outra porta. Esta técnica é conhecida como encaminhamento de deflexão. Este tipo de encaminhamento pode causar *loops* e entrega de pacotes fora de ordem e requer um estudo mais aprofundado. Outras tecnologias necessárias e que ainda estão num estágio ainda muito primitivo de desenvolvimento incluem: a rápida comutação óptica, sincronização óptica e a extracção do cabeçalho dos pacotes ópticos [21].

### 2.8.3 *Optical Burst Switching*

O OBS é uma alternativa ao OPS cuja unidade de transporte básica é um *burst*, que é construído a partir de vários pacotes IP (Figura 2.18). O OBS também emprega um mecanismo designado de *one-pass reservation*, em que um pacote de cabeçalho (*header packet*)/informação de controlo é enviado primeiro para reservar um comprimento de onda e configurar os comutadores ao longo do caminho. O *burst* correspondente segue sem esperar por uma confirmação que a ligação foi estabelecida. Se um comutador ao longo do caminho não conseguir encaminhar o *burst* devido a contenção, o *burst* é simplesmente descartado. Este mecanismo tem as suas origens numa normalização da ITU-T (*ITU Telecommunication Standardization Sector*) para as redes ATM conhecido como ABT-IT (*ATM Block Transfer with Immediate Transmission*). A utilização de *bursts* de grande tamanho como unidade básica de transporte conduz a uma comutação com baixa frequência e *overhead*. Portanto, os nós OBS podem usar menos *switching fabrics* e processamento electrónico comparado com o OPS. A redução de *overhead* ocorre em dois lugares. Primeiro, o rácio cabeçalho/*payload* é reduzido, conduzindo a uma baixa sinalização *overhead*. Segundo, o rácio entre os intervalos de guarda entre os *burst* quando um *link* está em *idle* e o tempo que este está a transmitir é também reduzido [21].

Uma característica de distinção do OBS é a separação entre o pacote de cabeçalho e o seu *burst* de dados. O *burst* não é enviado imediatamente após o pacote de cabeçalho, mas atrasado por um determinado *offset*. O tempo de *offset* é escolhido para ser pelo menos igual à soma dos atrasos de processamento do pacote de cabeçalho em todos os nós intermédios. Isto serve para garantir que existe tempo suficiente em cada nó para completar o processamento do cabeçalho antes do

*burst* chegar. A Figura 2.18 também ilustra a utilização do tempo de *offset*. Neste tipo de redes, a sinalização é implementada *Out-of-band*, quer seja por um comprimento de onda dedicado ou por uma rede de controlo separada [19]. Isto significa que a sinalização é separada dos canais de dados. Esta separação permite a implementação electrónica do caminho de controlo de sinalização enquanto mantém completamente transparente o caminho óptico dos dados para transmissão a alta velocidade [21].

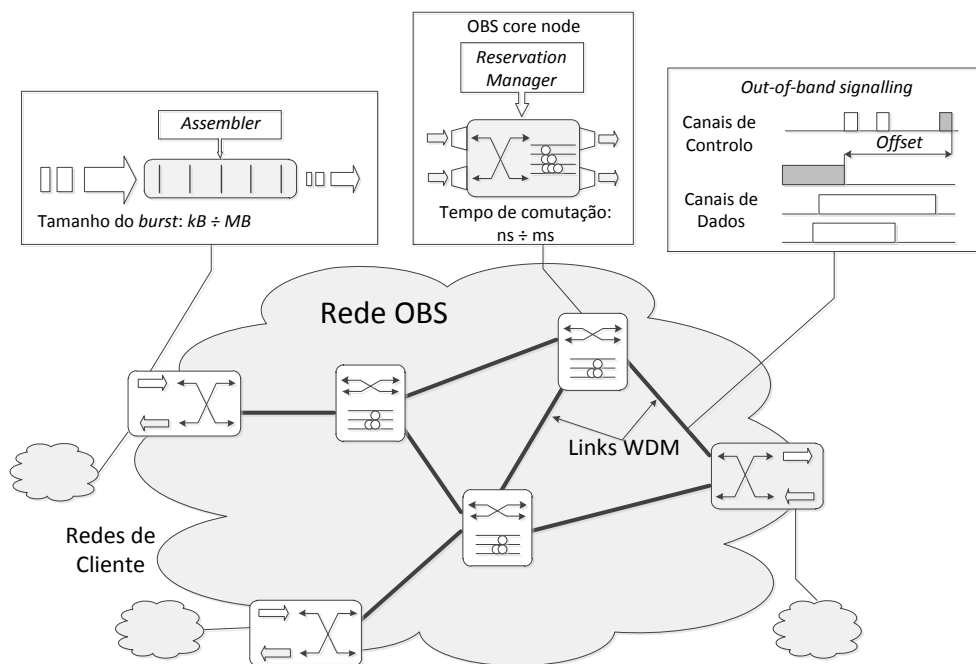


Figura 2.18 - Rede OBS (adaptado de [19]).

## 2.9 Optical Transport Network

No final dos anos 90, a ITU-T começou a trabalhar na OTN para melhorar as necessidades das redes ópticas e das redes multisserviço. A hierarquia de transporte e formato associado estão definidos na norma ITU-T G.709 [3]. Estas redes foram desenhadas para transportar tráfego por pacotes tais como o IP e Ethernet sobre fibras ópticas, assim como o tráfego *legacy* e em particular o SONET/SDH.

OTN (G.709)	Bit rate nominal	SONET/SDH	Bit rate nominal
<b>OTU1:</b>	2.666 Gb/s	STS-48/STM-16:	2.488 Gb/s
<b>OTU2:</b>	10.709 Gb/s	STS-192/STM-64	9.953 Gb/s
<b>OTU3:</b>	43.018 Gb/s	STS-786/STM-128:	39.813 Gb/s
<b>OTU4:</b>	111.810 Gb/s	N.A	N.A

Tabela 2.1 - Comparativo entre os *bit rates* OTN e SONET/SDH (adaptado de [1] e [3])

Tipo ODU	Bit rate nominal
<b>ODU-Flex (CBR):</b>	Bit rate do sinal de cliente
<b>ODU-Flex (GFP):</b>	$N \times \sim 1.25$ Gb/s
<b>ODU0:</b>	1.244 Gb/s
<b>ODU1:</b>	2.499 Gb/s
<b>ODU2:</b>	10.037 Gb/s
<b>ODU3:</b>	40.319 Gb/s
<b>ODU4:</b>	104.794 Gb/s

Tabela 2.2 - Hierarquia de *bit rate* para a comutação/multiplexagem OTN (adaptado de [3])

A *frame* básica de transporte é designada de OTU (*Optical Channel Transport Unit*). O *bit rate* da hierarquia OTN é ligeiramente superior ao do SONET/SDH com o intuito de acomodar o *overhead* adicional, tal como mostrado na Tabela 2.1. É provável que a hierarquia OTN seja estendida para além do OTU4 para suportar débitos superiores a 400 Gb/s e 1 Tb/s.

Cada *frame* de transporte (OTU) contém um ou mais ODU (*Optical Channel Data Units*), onde o ODU é a unidade básica para a comutação/multiplexagem. A hierarquia ODU é apresentada na Tabela 2.2. De notar que a granularidade ODU é mais fina que o OTU, suportando ritmos inferiores como 1.25 Gb/s. Por exemplo, uma ligação GbE (*Gigabit Ethernet*) pode ser mapeada num ODU0. Como não existe correspondência OTU0, múltiplos ODU0 são multiplexados num ODU de hierarquia superior, e então transportados numa *frame* OTU $k$  ( $k$  pode ser 1-4). A Figura 2.19 representa os contentores OTH (*Optical Transport Hierarchy*) e como o conjunto, Sinal de Cliente, ODU de Baixa Ordem, ODU de Alta Ordem e OTU são mapeados entre si.

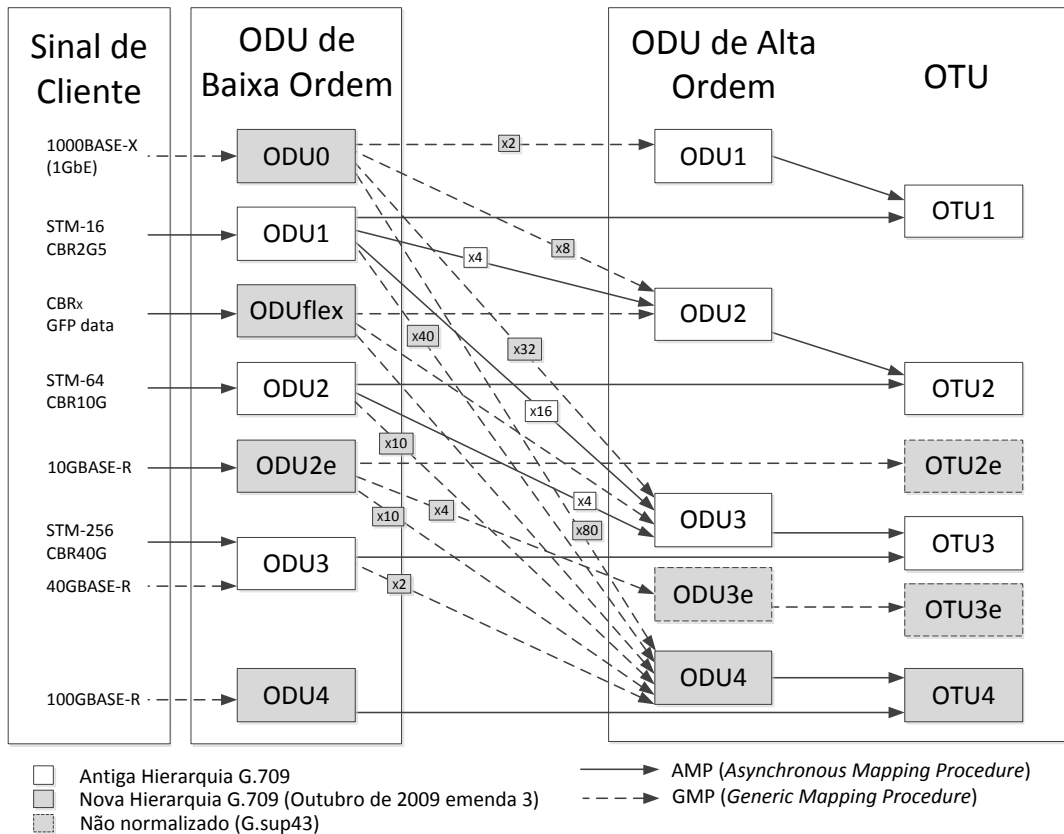


Figura 2.19 - Contentores OTH (adaptado de [28], [61]).

O ODU-Flex foi adicionado à hierarquia ODU para permitir ao OTN ser usado como um mecanismo eficiente de transporte de *data rates* e serviços mais amplo. Existem duas variantes do ODU-Flex. Com o ODU-Flex-GFP (*Generic Framing Procedure*), um número apropriado de *slots* tributários ODU $k$  ( $k$  pode ser 2-4) são alocadas para o serviço, onde cada *slot* tributário corresponde aproximadamente a 1.25 Gb/s (o débito de cada tributário depende de  $k$ ). Por exemplo, quatro *slots* tributários ODU2 seriam alocados para transportar uma ligação 4-Gb/s FC. Para além do ODU-Flex-GFP, existe o ODU-Flex-CBR (*Constant Bit Rate*), onde o *overhead* ODU é colocado à volta do sinal de cliente para transportar uma ligação de *bit rate* arbitrário [3].

O ODU2e, que foi especificado no suplemento G.Sup43, representa uma solução pragmática para o transporte dos 10G Ethernet sobre OTN porque o *bit rate* 10G Ethernet (10.3125 Gb/s) é superior à capacidade do *payload* do ODU2 (9.99528 Gb/s). Tendo em conta a rápida penetração dos sistemas de transmissão 40Gb/s, a procura para o transporte de 4xODU2e sobre sistemas de transmissão 40Gb/ tem vindo a aumentar. A ITU-T SG15 (*Study Group 15*) especificou o novo ODU/OTU como ODU3e/OTU3e. O *bit rate* do ODU3e/OTU3e é muito próximo

ao existente no ODU3/OTU3, 41.600Gb/s e 44.571Gb/s [27], respectivamente. Portanto, a ITU-T mantém o ODU3/OTU3 na Recomendação G.709 e especificou o ODU3e/OTU3e no Suplemento G.Sup43 (*Transport of IEEE 10GBASE-R in OTN*) [28].

Comparado com o SONET/SDH, o OTN providencia alguns benefícios tais como maior eficiência em comutar e multiplexar serviços de alto débito, melhorando as capacidades de monitorização, e FEC (*Forward Error Correction*) mais robusto. O FEC permite identificar os bits errados durante a transmissão do sinal para serem corrigidos quando o sinal é decodificado. Um FEC melhorado pode ser usado para compensar transmissões com condições mais severas. Por exemplo, o FEC pode potencialmente permitir a multiplexagem de mais comprimentos de onda na mesma fibra, ou permitir um sinal permanecer no domínio óptico por distâncias mais longas, o que é importante para sistemas de *bypass* óptico.

O OTN permite a combinação da transparência e gestão. A estrutura da *frame* OTN, muitas vezes referida como um “*digital wrapper*”, pode transportar diferentes protocolos transparentemente sem afectar o conteúdo, *control channels*, ou *timing*. As suas capacidades de OAM proporcionam uma visão consistente de gestão para uma variedade de serviços. O OTN potencialmente proporciona uma convergência de camadas para redes ópticas, onde os operadores podem suportar múltiplos serviços com uma única rede em vez da implementação de redes paralelas, sem comprometer a forte capacidades de operação e gestão que os operadores têm sido habituados do SONET/SDH.

O OTN e o SONET/SDH são camadas de transporte baseadas em circuito. Nesse sentido, eles não são optimizados para transportar serviços baseados em pacotes, tais como o IP e Ethernet. Os circuitos são encaminhados sobre “canais” dedicados numa rede e que permanecem activos durante a sessão de comunicação. Em contrapartida, os pacotes são blocos de dados que devem ser individualmente encaminhados na rede; a largura de banda é tipicamente partilhada entre os pacotes para múltiplos serviços. Embora o encaminhamento baseado em pacotes seja geralmente mais eficiente no que diz respeito à gestão da largura de banda, isto também pode resultar em perdas de pacotes, excesso de latência ou variação do atraso (*jitter*). Estes factores têm de ser tidos em conta quando se transporta tráfego por pacotes para garantir que o serviço atinja a QoS desejada. Deste modo, têm existido iniciativas para se desenvolver também uma camada de transporte de pacotes. A ITU e a IETF têm trabalhado em conjunto no MPLS-TP (*MPLS -*

*Transport Profile*); o IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) desenvolveu a normalização PBB-TE (*Provider Backbone Bridge-Traffic Engineering*). Em ambos os protocolos, houve uma tentativa de transformar normas baseadas em pacotes amplamente utilizadas (MPLS e Ethernet) em tecnologias de transporte orientadas à conexão com capacidades de OAM semelhantes ao SONET/SDH e OTN [3].

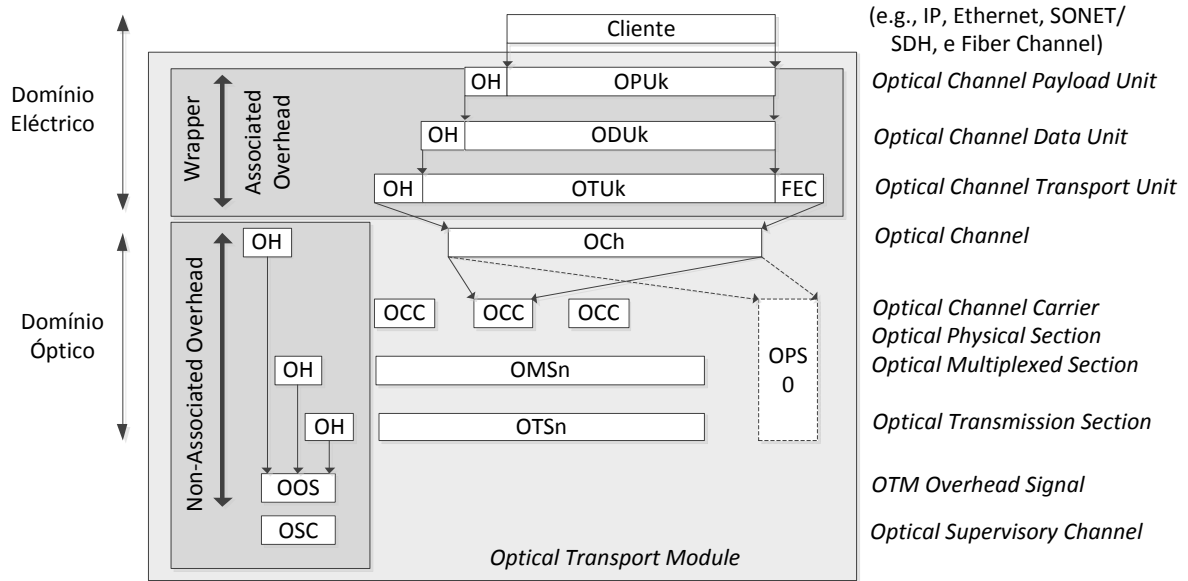
### Hierarquia OTN

A Figura 2.20a) e Figura 2.20b) representam a hierarquia e as camadas OTN, respectivamente. As camadas OTS (*Optical Transmission Section*), OMS (*Optical Multiplexed Section*) e OCh (*Optical Channel*) são no domínio óptico. A camada OTS gere os segmentos de ligação de fibra óptica entre os componentes ópticos tais como amplificadores ópticos, ou amplificadores ópticos e *multiplexers* WDM. A camada OMS gere a ligação de fibra óptica entre os *multiplexers* e os comutadores ópticos e a camada OCh as ligações ópticas entre regeneradores 3R (e.g., caminhos de luz).

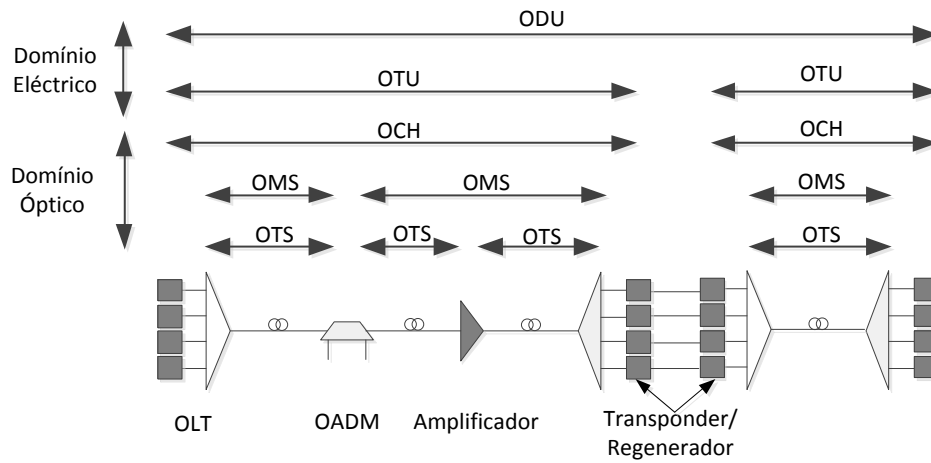
O OTU e o ODU têm funções similares às camadas de secção, linha e caminho do SONET/SDH. O OTU é similar à camada de secção do SONET/SDH, onde agora a camada OCh permite ligações ópticas entre regeneradores 3R. A camada OCh tem *overhead* para delinear as *frames* OTN, disponibiliza identificação da ligação óptica, monitoriza a performance de BER (*Bit Error Rate*), transporta indicadores de alarme para falha no sinal, e fornece um canal de comunicação entre os extremos da ligação óptica. Esta camada adiciona ainda o FEC às *frames* OTN e faz o *scramble* das mesmas antes da transmissão. Além disto, fornece informação de sincronização para *multiframe*. *Multiframes* são um método para enviar mensagens sobre múltiplas *frames* OTN.

O ODU tem funções similares com as camadas linha e caminho do SONET/SDH. Suporta até seis monitorizações de ligações *tandem*. Cada monitorização fornece identificação, monitoriza a performance de BER, transporte de indicadores de alarmes e fornece GCC (*General Communication Channel*) para os *end-points*. A camada ODU tem a subcamada OPU (*Optical Channel Payload Unit*) que adapta o sinal de cliente à *frame* OTN [1].





a)



b)

Figura 2.20 – a) Jerarquía OTN (adaptado de [1], [18] e [62]); b) Capadas OTN (adaptado de [1]).



# 3

## Sobrevivência em Redes Ópticas

A falha num elemento de rede, quer por problemas electrónicos ou por problemas na ligação de fibra óptica, pode causar a falha de diversos caminhos de luz, e desta forma a perda de enormes quantidades de tráfego e de receita. Os mecanismos de recuperação de falha, conhecidos como mecanismos de protecção e de restauro, são essenciais numa rede para sobreviver a tais falhas. Se os recursos de *backup* estão pré-calculados e reservados, tais como rotas e comprimentos de onda, são designados de esquemas de protecção. Caso estes recursos não estejam já determinados e reservados quando ocorre uma falha, e necessitem portanto de ser dinamicamente descobertos por cada ligação interrompida, então são designados de esquemas de restauro. Geralmente, os esquemas dinâmicos de restauro são mais eficientes na utilização dos recursos de rede porque estes não têm alocado a priori um caminho alternativo, e providenciam resiliência contra diferentes tipos de falha (incluindo múltiplas falhas); mas os esquemas de protecção têm um tempo rápido de recuperação e conseguem garantir o restabelecimento de serviços interrompidos (garantia esta que não pode ser providenciada pelos esquemas de restauro) [13].

### 3.1 *Routing and Wavelength Assignment*

As redes de telecomunicações são geralmente tão grandes e complexas que desenhar manualmente uma rede numa quantidade de tempo razoável é extremamente difícil. Os *designers* de rede baseiam-se principalmente em algoritmos automáticos para determinar, por exemplo, como encaminhar o tráfego através da rede, como protegê-lo e como colocá-lo num comprimento de onda.

Quando se desenham algoritmos de rede, é importante considerar o tamanho do problema em termos do número de nós da rede, a quantidade de tráfego transportado na rede, e as especificações do sistema. As redes metro têm dezenas de nós e não mais de 40 comprimentos de onda por fibra, enquanto que as redes core podem ter até 100 ou mais nós e 80 (ou 160) comprimentos de onda por fibra. Qualquer algoritmo usado no processo de planeamento de rede deve ser escalável nestas condições.

O tempo de execução de um algoritmo de planeamento de rede é muito importante. Num ambiente dinâmico e em tempo real, uma nova ligação pode precisar de ser estabelecida em menos de um segundo. O processo de planeamento do encaminhamento de uma ligação e determinar que recursos de rede devem ser alocados a esta, podem precisar de ser concluídos em menos de 100ms para dar tempo para a rede ser configurada de forma adequada para realizar a ligação. Além disso, o *design* em tempo real podem ser executadas de uma forma distribuída nos nós da rede, onde as capacidades de processamento e de memória podem ser limitadas [3].

O problema em encontrar uma rota para um caminho de luz e atribuir um comprimento de onda a esse mesmo caminho é muitas vezes referido como o RWA. O objectivo do RWA é encaminhar os caminhos de luz e atribuir comprimentos de onda de maneira a minimizar a quantidade de recursos que são consumidos na rede. É também de seu propósito, assegurar ao mesmo tempo que dois caminhos de luz não tenham o mesmo comprimento de onda no mesmo *link*. Além disso, na ausência de dispositivos de conversão de comprimento de onda, o RWA opera sobre a restrição de que o caminho de luz deve ocupar o mesmo comprimento de onda em cada *link* da rota. Esta restrição é conhecida como WCC [29].

### 3.1.1 Estabelecimento de caminhos de luz

O encaminhamento é o processo de selecção de um caminho para o tráfego através da rede, onde existem tipicamente muitos caminhos possíveis da origem ao destino. É importante ter em conta vários factores quando se selecciona um caminho. O primeiro factor chave a considerar é o custo. O caminho seleccionado deve, quando possível, adicionar o mínimo de custo à rede. A distância e o número de *links* num caminho devem também ser relevantes, uma vez que estes são indicadores da largura de banda ocupada pelo caminho. Estes factores também podem afectar a fiabilidade da ligação. Contudo, isto não implica que os caminhos de luz devam ser sempre encaminhados pelo caminho mais curto possível ou pelo caminho com o menor número de *links* [3]. Existem duas categorias de estabelecimento de caminhos de luz, um é o SLE (*Static Lightpath Establishment*), e o outro é o DLE (*Dynamic Lightpath Establishment*) [30].

#### 3.1.1.1 *Static Lightpath Establishment*

O SLE é usado na fase de planeamento de capacidade e de desenho da arquitectura de uma rede óptica. Pode ser dividido logicamente em quatro *sub-problems*. Assumindo que não existe conversão de comprimento de onda, estes são listados como se seguem [30]:

- ***Topology sub-problem:*** determinar a topologia lógica a ser imposta na topologia física, que é, determinar os caminhos de luz em termos dos seus nós origem e nós destino;
- ***Lightpath routing sub-problem:*** determinar os *links* físicos que cada caminho de luz vai passar, isto é, encaminhar os caminhos de luz sobre a topologia física;
- ***Wavelength assignment sub-problem:*** determinar o comprimento de onda de cada caminho de luz, ou seja, atribuir um comprimento de onda a cada caminho de luz na topologia lógica de modo a que as restrições de comprimento de onda sejam obedecidas para cada ligação física;
- ***Traffic routing sub-problem:*** encaminhar os pacotes de tráfego entre os nós origem e o destino sobre a topologia lógica obtida.

O SLE é referido também como RWA estático, pode ser formulado como um ILP (*Integer Linear Program*) onde o objectivo é maximizar o número de ligações que são encaminhadas com sucesso. Para mais detalhes consultar [29], [30].

### 3.1.1.2 *Dynamic Lightpath Establishment*

Quando os caminhos de luz são estabelecidos e retirados dinamicamente, as decisões de encaminhamento e de atribuição de comprimento de onda devem ser feitas conforme os pedidos de ligação que chegam à rede. É possível que, para um dado pedido de ligação, possa não haver recursos de rede para estabelecer o caminho de luz. Neste caso o pedido de ligação será bloqueado, a ligação deve também ser bloqueada se o comprimento de onda não estiver disponível em todos os *links* ao longo da rota escolhida. Assim, o objectivo numa situação dinâmica é escolher uma rota e um comprimento de onda que maximize a probabilidade de estabelecer uma dada ligação, enquanto tenta ao mesmo tempo minimizar o bloqueio de futuras ligações. Semelhante ao SLE, o RWA dinâmico também pode ser dividido em *sub-problems*. As abordagens para resolver o *routing sub-problem* podem ser categorizadas como sendo fixas ou adaptativas [29]:

- ***Fixed Routing:*** a abordagem mais simples de encaminhamento de uma ligação é escolher sempre a mesma rota fixa para um dado par origem-destino. Isto é chamado de encaminhamento fixo e é de fácil implementação. No entanto, é bastante limitado em termos de opções de encaminhamento e pode lidar com uma grande probabilidade de bloqueio. Com o objectivo de minimizar o bloqueio em redes de encaminhamento fixo, precisam de ser seleccionadas rotas predeterminadas de forma a equilibrar a carga uniformemente pelos *links* de rede. Esquemas de encaminhamento fixo, não precisam de manutenção da informação do estado global da rede;
- ***Fixed-Alternate Routing:*** trata-se uma abordagem de encaminhamento que considera várias rotas. Esta abordagem aumenta a probabilidade de estabelecer uma ligação, tendo em conta as informações do estado da rede. Cada nó precisa de manter uma tabela de encaminhamento que contém uma lista ordenada de um número de rotas fixas para cada nó destino. O

*Fixed-Alternate Routing* fornece simplicidade de controlo para estabelecer e remover caminhos de luz e pode também ser usado para providenciar algum grau de tolerância a falhas após falhas no *link*. Pode reduzir significativamente a probabilidade de bloqueio em relação às ligações de encaminhamento fixo;

- ***Adaptive Routing***: no encaminhamento adaptativo, a rota é escolhida dinamicamente do nó origem ao nó destino. O estado da rede é determinado pelo estado de todas as ligações que estão actualmente estabelecidas. Com o intuito de escolher uma rota ideal, é atribuído um custo a cada *link* com base na informação do estado actual da rede, tal como a disponibilidade de comprimentos de onda nos *links*. Um algoritmo *least-cost* é então executado para encontrar o custo mínimo da rota. Sempre que uma ligação é estabelecida ou removida, a informação do estado da rede é actualizada.

### 3.1.2 Algoritmos *Shortest-Path*

A maioria das estratégias de encaminhamento incorporam algum tipo de algoritmo *shortest-path* para determinar que caminho minimiza uma métrica em particular. O algoritmo *shortest-path* discutido em [3], assume que a métrica para um caminho extremo-a-extremo é a soma das métricas dos *links* que compõem o caminho. Existe uma variedade de métricas que podem ser usadas em algoritmos *shortest-path* dependendo do objectivo do processo de encaminhamento. As duas métricas mais comuns são encontrar o caminho com a distância mais curta e o caminho com o menor número de saltos. Por exemplo, para encontrar o caminho com a distância geográfica mais curta, a cada *link* é atribuído uma métrica igual à sua própria distância. O algoritmo *shortest-path* calcula o caminho que tenha o menor número de saltos (o termo salto (ou *hop*) é muitas vezes usado para designar cada *link* num caminho). Outro exemplo, assumindo que cada *link* de rede tem uma certa probabilidade de estar disponível (ou seja, sem falha), e assumindo que cada *link* numa rede falha de forma independente de tal modo que a disponibilidade de um caminho é o resultado das disponibilidades de cada *link* no caminho (não considerando a falha de um nó). A métrica de um *link* pode ser escolhida para ser o negativo do logaritmo da disponibilidade de um *link*, onde a função logarítmica é

usada geralmente para converter uma métrica multiplicativa numa métrica aditiva. A maior disponibilidade de um *link* corresponde a uma métrica de *link* menor; assim, a execução do algoritmo *shortest-path* com esta métrica produz o caminho com a disponibilidade mais alta. Como demonstrado neste último exemplo, a métrica pode não estar relacionada com a distância; assim o termo “*shortest-path*” é, em geral, inapropriado [3].

Um algoritmo *shortest-path* bem conhecido é o algoritmo Dijkstra, onde as entradas para o algoritmo são a topologia de rede, a origem, e o destino do caminho. Trata-se de um *greedy algorithm* (ou algoritmo ganancioso) que garante o caminho mais curto entre a origem e o destino, assumindo que existe um caminho. Os *greedy algorithms* prosseguem escolhendo a opção ideal em cada passo, sem considerar os passos seguintes. No caso do algoritmo Dijkstra, esta estratégia produz o resultado global óptimo (em geral, no entanto estes algoritmos nem sempre produzem a solução óptima.) [3].

### 3.1.3 *Wavelength Assignment*

Em geral, se existirem múltiplos comprimentos de onda possíveis entre o nó origem e o nó destino, existe a necessidade de usar um algoritmo WA (*Wavelength Assignment*) para determinar qual o comprimento de onda a atribuir a um determinado caminho de luz. A selecção do comprimento de onda pode ser executada ou depois de uma rota estar determinada, ou em paralelo, durante o processo de descoberta da rota.

Uma vez que o mesmo comprimento de onda deve ser o mesmo em todos os *links* do caminho (não considerando a conversão de comprimento de onda, mais detalhes em [3]), é importante que os comprimentos de onda sejam escolhidos de maneira a reduzir o bloqueio das futuras ligações. Nos casos em que existam múltiplos comprimentos de onda possíveis entre o nó origem e o nó destino, devem ser usados métodos heurísticos para atribuir um comprimento de onda a um caminho de luz. São vários os esquemas existentes para atribuição de comprimento de onda [30]:



- ***Random***: este esquema pesquisa primeiro o espaço de comprimentos de onda para determinar o conjunto de todos os comprimentos de onda que estão disponíveis para a rota solicitada;
- ***First-Fit (fixed-order)***: todos os comprimentos de onda são numerados. Depois da pesquisa dos comprimentos de onda disponíveis, é escolhido um comprimento de onda com o índice mais baixo. A ideia por detrás deste esquema é, agrupar todos os comprimentos de onda que estão a ser utilizados para a parte inferior do espaço de comprimentos de onda. Isto permite que os comprimentos de onda com um índice maior sejam usados para ligações com maior distância;
- ***Least-Used***: selecciona o comprimento de onda que é menos usado na rede, de modo a que a carga seja equilibrada em todos os comprimentos de onda;
- ***Most-Used***: é o esquema oposto do *Least-Used*, selecciona o comprimento de onda que seja o mais usado na rede. Agrupa as ligações em poucos comprimentos de onda;
- ***Min-Product***: é usado em redes multi-fibra<sup>1</sup>. Agrupa os comprimentos de onda nas fibras, minimizando o número de fibras na rede;
- ***Least-Loaded***: é também usado em redes multi-fibra. Escolhe o comprimento de onda que tem a maior capacidade residual no *link* que tem mais carga ao longo da rota;
- ***Max-Sum***: é proposto para redes multi-fibra, mas também pode ser usado em redes única-fibra (apenas um par de fibras por *link*). De um modo geral, o esquema considera todos os caminhos possíveis na rede e tenta maximizar as restantes capacidade do caminho após o seu estabelecimento.
- ***RCL (Relative Capacity Loss)***: é baseado no *Max-Sum*. O RCL calcula uma perda de capacidade relativa para cada caminho em cada comprimento de onda disponível, em seguida, escolhe o comprimento de onda que minimize a soma das perdas de capacidade relativa de todos os caminhos;

---

<sup>1</sup> Uma rede WDM multi-fibra, consiste numa rede WDM onde cada *link* é constituído por múltiplas fibras, e cada fibra transporta a informação de múltiplos comprimentos de onda. O WCC é menos problemático em rede de multi-fibra porque um comprimento de onda que não possa continuar numa fibra pode ser comutado para outra usando OXC, desde que o comprimento de onda esteja disponível na outra fibra [29].

- **Wavelength Reservation:** reserva alguns comprimentos de onda para ligações *multi-hop*. Este esquema reduz o bloqueio para o tráfego *multi-hop*, mas às vezes pode penalizar o tráfego *single-hop*;
- **Protecting Threshold:** onde numa ligação *single-hop* é atribuído um comprimento de onda apenas se o número de comprimentos de onda disponíveis no *link* é igual ou superior a um dado limite;

O algoritmo RWA usado na componente prática desta dissertação usa o algoritmo Dijkstra e a métrica do caminho com o menor número de saltos para calcular o canal entre a origem e o destino (secção 4.2.7).

## 3.2 *Next Generation Networks*

Para criar as NGNs, a ITU-T e IETF normalizaram as especificações da ASON (*Automatically Switched Optical Networks*) e do GMPLS, respectivamente. Ambas contêm os seguintes três planos funcionais (Figura 3.1), [4]:

- **Plano de Transporte**, também referido como **Plano de Dados**, responsável pelo transporte e comutação do tráfego;
- **Plano de Controlo**, responsável pela gestão das ligações e recursos, definido como um plano baseado em IP, que pode ser associado ou separado da gestão da rede de transporte;
- **Plano de Gestão**, responsável pela supervisão e gestão de todo o sistema (incluindo os planos de transporte e de controlo);

As especificações dos dois modelos concentram-se em descrever as funcionalidades do Plano de Controlo [31]. A ASON é uma arquitectura que define os componentes e as interações entre eles, no Plano de Controlo [4], e concentra-se na gestão de ligações, pedidos e nos mecanismos de encaminhamento para provisionar serviços SDH e OTN. Embora a maior parte das especificações ASON sejam independentes do protocolo, as implementações preferidas para sinalização são baseadas no mesmo conjunto de protocolos e mecanismos utilizados pelo GMPLS: RSVP-TE (*Resource Reservation Protocol with Traffic Engineering*) ou CR-LDP (*Constraint-Based Routing Label Distribution Protocol*) [31]. O GMPLS é uma extensão do conceito MPLS (em detalhe na secção 3.4), que se preocupa com o

encaminhamento e QoS das NGNs. Este protocolo envolve a aplicação do conceito para múltiplos comprimentos de onda numa rede óptica [4].

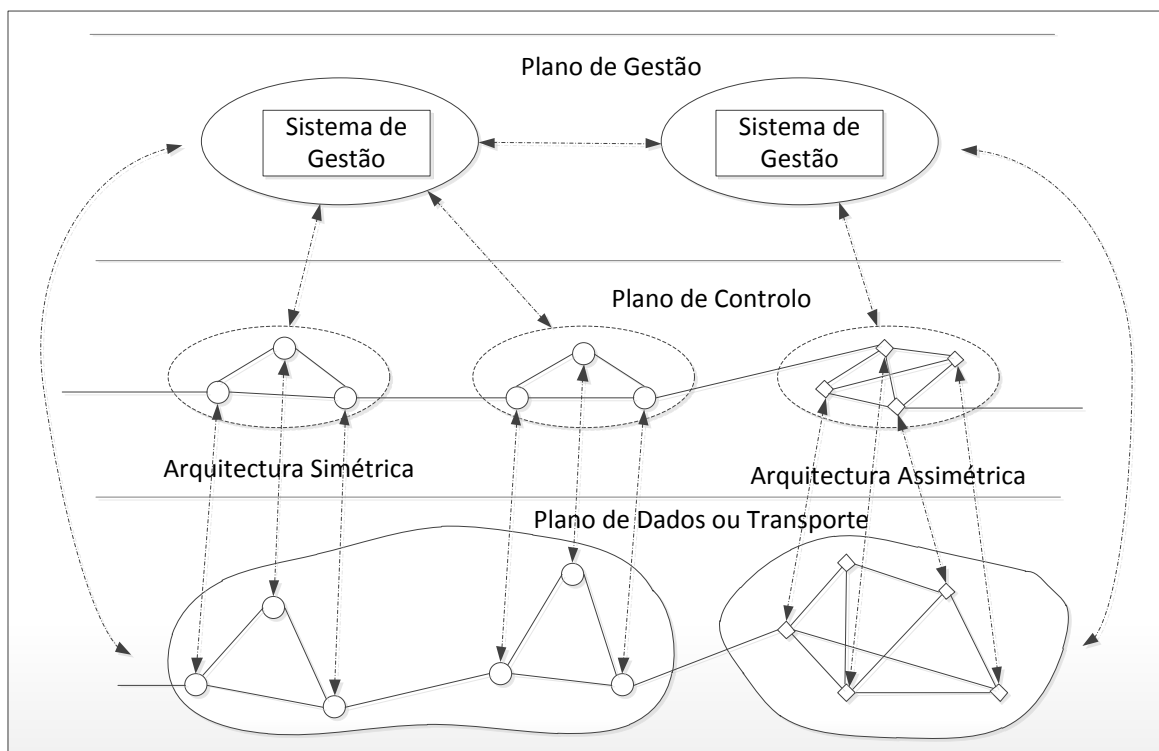


Figura 3.1 - Planos funcionais das redes ASON e GMPLS (adaptado de [4]).

### 3.3 Evolução do MPLS para o GMPLS

O MPLS tem as suas raízes em muitas tecnologias de comutação de pacotes IP desenvolvidas no início e meados dos anos 90. Em 1997 o IETF criou um grupo de trabalho com o intuito de normalizar protocolos para o MPLS.

A comutação de pacotes IP é o processo de encaminhar os pacotes de dados numa rede, baseada em etiquetas ou identificadores associados a cada pacote. O encaminhamento IP tradicional é de certa maneira uma forma de comutação de pacotes. Cada pacote transporta o endereço IP destino que pode ser usado para determinar o próximo salto no caminho até ao destino através da informação contida na tabela de encaminhamento. No entanto, o encaminhamento IP tem limitações quanto à velocidade e escalabilidade, o que levou à investigação de outras técnicas de comutar os pacotes de dados [32].

O *Label Switching* baseia-se na associação de uma pequena etiqueta, com formato fixo em cada pacote, de modo a que este possa ser transmitido pela rede.

Isto significa que cada pacote, trama, ou célula deve transportar um identificador que seja usado pelos nós de rede para encaminhar o pacote. Em cada salto ao longo da rede, o pacote é encaminhado com base no valor da etiqueta recebida e despachado para o destino com uma nova etiqueta. A etiqueta é trocada (*swapped*) e os dados são comutados com base no valor da etiqueta, que dá origem a dois termos: troca de etiqueta (*label swapping*) e comutação de etiqueta (*label switching*).

Numa rede MPLS, os pacotes são etiquetados através da adição de uma informação adicional designada de *shim header* que se encontra entre o cabeçalho de rede e o cabeçalho IP, tal como representado na Figura 3.2.

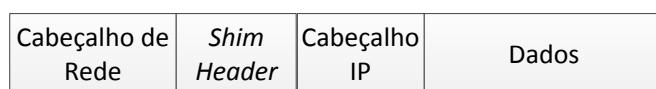


Figura 3.2 - *Shim header* inserido entre o cabeçalho do protocolo de rede e o cabeçalho IP (adaptado de [32]).

O *shim header* MPLS transporta uma etiqueta de 20 *bits* que é usada para determinar o caminho que o pacote deve seguir. Cada elemento de rede, designado de LSR (*Label Switch Router*), mantém uma tabela de informação LFIB (*Label Forwarding Information Base*) que permite determinar o próximo salto. A LFIB contém o mapeamento da {interface de entrada, etiqueta de entrada} para a {interface de saída, etiqueta de saída}. Isto é, quando um pacote é recebido, o LSR determina em que interface chega o pacote e pesquisa a etiqueta no seu *shim header*. O LSR com base no valor da etiqueta de entrada, pesquisa na LFIB a interface de saída a usar para encaminhar o pacote, alterando a etiqueta de entrada por uma nova etiqueta de saída. A Figura 3.3 representa o caminho que um pacote MPLS segue ao longo da rede, designado de LSP (*Label Switched Path*). Uma vez que um pacote tenha sido etiquetado no começo de um LSP (no *ingress*), o seu caminho para o *egress* é bem conhecido e estável por causa do mapeamento feito nas LFIBs de cada LSR, sendo este também bem conhecido e estável. Assim, a complexidade apenas existente no *ingress* onde cada pacote deve ser classificado de acordo com o seu destino e o serviço fornecido (baseado no tipo de aplicação, ou QoS exigido) e associado a um LSP específico [32].

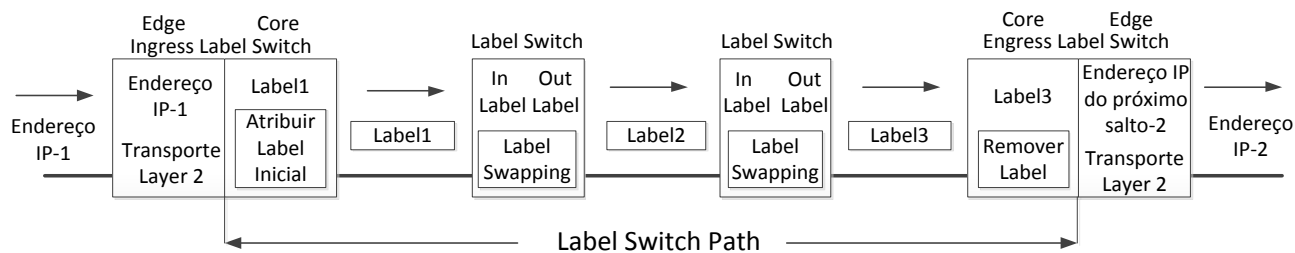


Figura 3.3 – Pacote IP a atravessar um LSP (adaptado de [24]).

As *labels* só são significativas apenas no *link* cuja a *label* está a atravessar e são usadas para identificar uma FEC (*Forwarding Equivalence Class*). Uma FEC é um conjunto de pacotes que são encaminhados sobre o mesmo caminho numa rede e são mapeados em LSPs. Os pacotes que pertencem à mesma FEC não têm necessariamente o mesmo destino. Os pacotes podem ser associados às FECs, dependendo da sua origem e destino, requisitos de QoS, e outros parâmetros. Isto é uma vantagem particular para os prestadores de serviços uma vez que torna a rede mais flexível. Um novo serviço pode ser adicionado simplesmente modificando a maneira como os pacotes são assignados às FECs.

A separação da informação de encaminhamento do conteúdo do cabeçalho do pacote IP possibilita a utilização do MPLS em dispositivos como os OXCs, cujo Plano de Dados não é capaz de reconhecer o cabeçalho IP [24].

Um dos aspectos chave do MPLS é a adição de uma nova abstracção de conectividade: caminho ponto-a-ponto explicitamente encaminhado (*explicitly routed point-to-point path*). Isto é conseguido através do conceito de LSPs explicitamente encaminhados. Como discutido a seguir, esta abstracção de conectividade permite o suporte para *constraint-based routing*, que por sua vez é a base para o GMPLS.

O MPLS é baseado nos seguintes conceitos chave [33]:

- Separação da informação de encaminhamento (*label*) do conteúdo do cabeçalho IP;
- Utilização de um único paradigma de encaminhamento (*label swapping*) no Plano de Dados para suportar múltiplos paradigmas de encaminhamento no Plano de Controlo;
- Utilização de diferentes tecnologias e *link layer mechanisms* para realizar o *label swapping*; como exemplo, existe o *shim header* no Ethernet e nos pacotes sobre SONET/SDH, o DLCI (*Data Link Connection Identifier*) em redes

Frame Relay, e os VCI/VPI (*Virtual Circuit/Path Identifier*) em redes ATM;

- Flexibilidade na formação de FECs;
- O conceito de uma hierarquia de encaminhamento via *label stacking*;

Uma aplicação do MPLS é o *constraint-based routing*, que é usado para calcular o caminho que satisfaça vários requisitos sujeitos a um conjunto de restrições. O *constraint-based routing* é utilizado nas redes de telecomunicações modernas com duas finalidades: Engenharia de tráfego (*Traffic Engineering*) e reencaminhamento rápido (*fast reroute*). Uma das vantagens do MPLS é que permite a eliminação de camadas de redes redundantes migrando algumas das funcionalidades disponibilizadas pelas camadas do ATM e SONET/SDH para o Plano de Controlo IP/MPLS.

Com o *constraint-based routing* do MPLS, a extensão do OSPF (*Open Shortest Path First*) e do IS-IS (*Intermediate System to Intermediate System*) permite aos nós trocar informações não só apenas relativas à topologia de rede, mas também relativas à disponibilidade de recursos e restrições administrativas. Esta informação é usada como entrada para o algoritmo de cálculo de caminho baseado em restrições, que calcula os caminhos sujeitos à topologia, recursos e restrições administrativas [33]. O algoritmo RWA no *Path Selector* (Figura 3.4) é usado para seleccionar um caminho de luz baseado nas especificações anteriores. O algoritmo de cálculo de caminho usa a informação da topologia e dos recursos guardados e mantidos na LSDB (*Link State Databases*) e TED (*Traffic Engineering Database*) [34]. Depois do cálculo de um caminho adequado, um protocolo de sinalização tal como o RSVP-TE ou CR-LDP é então usado para criar um *label forwarding state* ao longo do caminho [33].

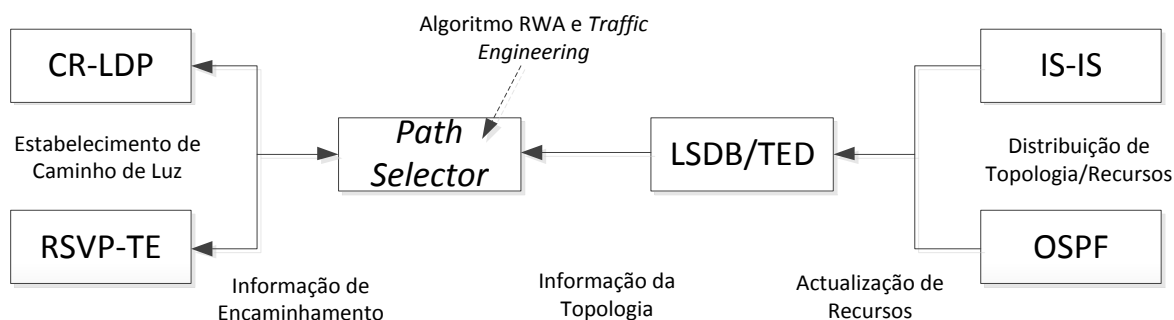


Figura 3.4 - Diagrama de fluxo do encaminhamento do caminho de luz em GMPLS (adaptado de [34]).

Foram feitos trabalhos para estender e adaptar o Plano de Controlo do MPLS, e em particular o *constraint-based routing*, para que possa não só ser usado em *routers* e *switches* ATM, mas também em OXCs. Isto é um passo fundamental na evolução e na integração das arquitecturas de redes ópticas e de dados. Usar o MPLS como base para o estabelecimento da ligação e um plano de controlo comum atende a várias questões relacionadas com a evolução desta rede (Figura 3.5). Em primeiro lugar, um plano de controlo comum simplifica a operação e a gestão de rede, que em última análise, resulta numa redução dos custos operacionais. Em segundo lugar, um plano de controlo comum possibilita uma grande variedade de cenários de implementação, desde o *overlay model* ao *peer model* [33].

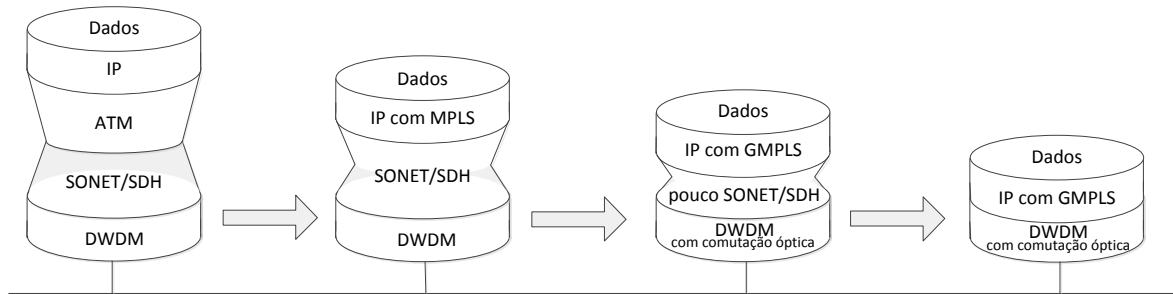


Figura 3.5 - Evolução em direcção à *photonic networking* (adaptado de [35]).

O *overlay model* (Figura 3.6a)) é separado num plano de controlo IP e num plano de controlo óptico, sendo os dois interligados pela UNI (*User-to-Network Interface*). Estes dois planos têm o mínimo de interacção entre si [35]. A camada IP (*routers* IP) não conhece a topologia da camada óptica (OXCs), e a camada óptica não conhece a topologia da camada IP. Este modelo pode ser visto como um modelo cliente-servidor em que a camada superior é vista como o cliente (plano de controlo IP) e a camada inferior vista como um servidor (plano de controlo óptico). Quando um pedido para estabelecer um LSP entre *routers* IP é solicitado, a camada IP solicita à camada óptica, através da UNI, se é possível ou não oferecer o recurso desejado. Se for possível a implementação desse caminho, é implementado um LSP entre os *routers* IP usando os recursos da camada óptica [36].

No *peer model* (Figura 3.6b)), todos os *routers* IP e OXCs numa rede são controlados pelo mesmo plano de controlo. Os *routers* IP e os OXCs conseguem obter a informação da topologia das duas camadas, quer da camada IP, quer da camada óptica. Uma vez que este modelo é operado por um plano de controlo comum, é possível tirar partido da hierarquização de LSPs e do TE multicamada

que são elementos característicos do GMPLS para uma rede com uma estrutura de camadas complexa. Além disso, o *peer model* permite executar protecção ou res-tauro extremo-a-extremo mesmo existindo múltiplas camadas.

Contudo, como o estado dos *links* de todas as camadas são anunciadas para cada nó, são transferidas grandes quantidades de informação através do plano de controlo. Além disso, se o TE multicamada é executado considerando o estado dos *links* de todas as camadas, a quantidade de cálculos necessários torna-se enorme. Devido a estes problemas de escalabilidade, é difícil de realizar um *peer model* per-feito. Em contrapartida, o *overlay model* consegue resolver este problema de esca-labilidade.

O *peer model* pode explorar em pleno as vantagens do GMPLS, como o TE multicamada, mas no interesse de preservar a escalabilidade, o *overlay model* res-tringe a utilização total das funções do GMPLS através da separação do plano de controlo em duas camadas. O *overlay model* é considerado como um passo introdu-tório para a aplicação das redes GMPLS. As vantagens do TE multicamada do *peer model* e a vantagem da escalabilidade com planos de controlo independes do *overlay model* são contrabalançadas [36].

Uma outra aproximação é um *hybrid model* que combina os dois modelos acima descritos. Alguns *edge devices* servem como *peers* para a rede óptica e parti-lham a mesma instância de um plano de controlo comum com essa rede. Outros *edge devices* poderiam ter o seu próprio plano de controlo (ou uma instância de plano de controlo separado da rede de core), e interface com a rede óptica através da UNI. Isto representa a solução mais desejável oferecendo aos operadores e pres-tadores de serviços uma flexibilidade essencial para implementar o modelo mais rentável às suas necessidades [35].

Isto permite também que a escolha entre os modelos seja impulsionada por considerações comerciais e de engenharia, em vez de serem limitados pela aborda-gem da estratificação de sub-redes dentro dos domínios da tecnologia. Ao mesmo tempo, desenvolver um plano de controlo comum com a reutilização e a extensão dos protocolos de encaminhamento e de sinalização existentes, evita a necessidade de “reinventar a roda”, reduzindo assim os riscos associados com o desenvolvimen-to de novos protocolos e o *time to makert* para novos equipamentos de comutação óptica. Algumas melhorias são claramente necessárias aos protocolos de encami-nhamento e sinalização existentes no MPLS, para tratar as características peculia-res das redes de transporte ópticas. Estas extensões de protocolos foram normali-



zadas pela IETF no âmbito do GMPLS e que serão descritas e detalhadas na secção 3.4 [33].

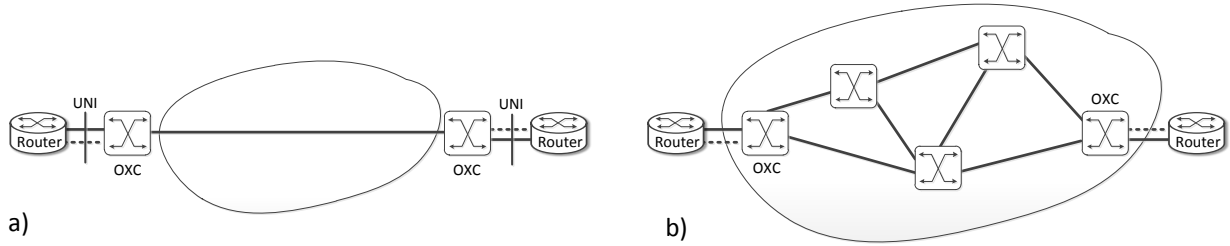


Figura 3.6 - a) *Overlay model*; b) *Peer model* (adaptado de [35]).

Embora a extensão dos protocolos MPLS para a gestão de redes ópticas possa parecer possível e desejável, não se deve deixar de ter em conta o facto de existirem diferenças significativas entre redes de comutação de pacotes e redes de comutação de circuitos. Por exemplo, em redes MPLS, as mensagens do Plano de Controlo e os pacotes do Plano de Dados partilham o mesmo meio de transmissão, e consequentemente, a mesma fiabilidade. Uma falha tanto afecta o encaminhamento do pacote de dados como o encaminhamento do pacote de controlo e vice-versa. Em contraste, o Plano de Dados e o Plano de Controlo em redes ópticas não são assim tão dependentes um do outro. Na realidade, estes não necessitam de partilhar a mesma topologia. Por exemplo, as mensagens trocadas entre OXCs podem ser enviadas *out-of-band* (ou *out-of-fiber configuration* [31]), por *bits* de *overhead* dos canais TDM (*Time Division Multiplexing*), ou por um comprimento de onda dedicado numa fibra óptica de interligação entre os nós (estes últimos designados também de *in-fiber configuration* [31]) (em detalhe na secção 3.4.3). Este canal de comunicação pode falhar independentemente do Plano de Dados. Do mesmo modo, um OXC tipicamente constituído por um *switching fabric* (referido como nó de Plano de Dados) e um processador de Plano de Controlo (referido como nó de Plano de Controlo), o nó de Plano de Controlo pode falhar independentemente do nó de Plano de Dados. Além disso, a topologia do Plano de Dados e de Controlo não precisam de ser idênticas. Dois OXCs que sejam adjacentes no Plano de Dados podem não ser do ponto de vista do Plano de Controlo.

A Figura 3.7 mostra na parte inferior a topologia do Plano de Dados e na parte superior a topologia do Plano de Controlo. Tendo em conta as exigências rigorosas da fiabilidade das ligações ópticas, é fundamental que as falhas no Plano de Controlo não devam resultar em nenhuma interrupção dentro do Plano de Dados [37].

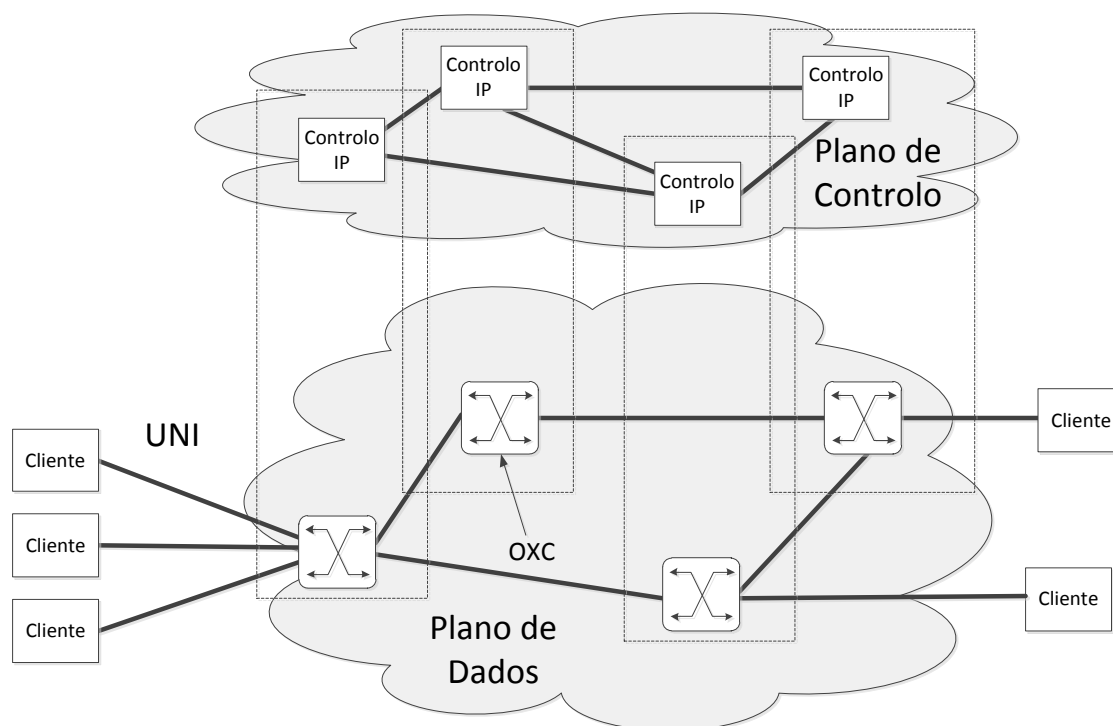


Figura 3.7 - Separação do Plano de Controlo e Plano de Dados (adaptado de [37]).

### 3.4 GMPLS

O GMPLS, também referido como MP $\lambda$ S (*Multiprotocol Lambda Switching*), é um paradigma de Plano de Controlo multifuncional que suporta não só dispositivos que realizam comutação de pacotes, mas também dispositivos que realizam comutação no domínio do tempo, comprimento de onda e espaço (fibras) [33]. O GMPLS é construído à volta do conceito chave do MPLS da separação dos Planos de Controlo e de Dados. No MPLS, esta separação é manifestada no LSP que pode ser estabelecido ao longo de uma rede para providenciar conectividade em malha para o encaminhamento de dados, enquanto que a sinalização e o encaminhamento apenas requerem simples adjacências. Em GMPLS, isto foi estendido para permitir as mensagens de controlo serem transmitidas sobre um meio físico separado do Plano de Dados associado [38].

Como referido anteriormente, para se atender às características peculiares das redes ópticas de transporte, o desenvolvimento do GMPLS implicou a melhoria dos protocolos de sinalização e de encaminhamento IP existentes. Estas extensões podem ser sumarizadas da forma que se segue [33]:

- Um novo LMP (*Link Management Protocol*) concebido para tratar das questões relacionadas com a gestão de *links* em redes ópticas;
- Melhorias nos protocolos de sinalização RSVP-TE e CR-LDP para permitirem a sinalização e criação de *optical channel trails* em redes de transporte ópticas e outros ambientes de rede orientados à conexão;
- Melhoria nos protocolos de encaminhamento IGP (*Interior Gateway Protocol*), tais como o OSPF-TE (*OSPF with Traffic Engineering*) e IS-IS-TE (*IS-IS with Traffic Engineering*) [39], para anunciar a disponibilidade dos recursos ópticos na rede (e.g., largura de banda disponível nos comprimentos de onda, tipos de interface, tipos de protecção de *link*, identificadores de fibras [35]) e outros tipos de atributos e restrições na rede;
- Melhorias na escalabilidade tais como formação de hierarquias LSP, *link bundling*, e *unnumbered links* [35];

Foram acrescentadas funções adicionais ao GMPLS para tratar de algumas limitações do Plano de Controlo do MPLS, tais como a incapacidade de estabelecer conexões num único pedido, e a ausência de mecanismos para contabilizar a largura de banda de protecção de modo a que possa ser usada para tráfego de baixa prioridade. Usando o MPLS e os seus protocolos de sinalização, uma falha num *link* ou nó (e.g., falha de energia) ao longo das rotas dos serviços estabelecidos só poderia ser tratada localmente, ou ao longo dos nós do caminho. No entanto, no contexto GMPLS, foram adicionadas capacidades adicionais, para que tais falhas que afectem as ligações de serviços também pudessem ser reportadas para um centro de alarmes pré-definido (e.g., *Centralized Management System*). Assim, os dispositivos na rede podem detectar e reportar a falha, e rapidamente determinar onde existe capacidade disponível noutras rotas, e em seguida usar a sinalização para restaurar o serviço para uma rota livre de problemas, contornando assim o ponto de falha [33].

### 3.4.1 Plano de Controlo

O plano de controlo é responsável pela gestão eficaz dos pedidos e ligações (estabelecimento, remoção e manutenção) bem como a gestão dos recursos de rede.

Estas funções são conseguidas essencialmente através de dois protocolos relacionados com o GMPLS: um protocolo de encaminhamento, para a descoberta de recursos e topologia (IS-IS ou OSPF), e um protocolo de sinalização, para estabelecimento, remoção e manutenção de ligações (RSVP-TE ou CR-LDP) [37]. De notar que os mesmos protocolos são usados em redes ASON [31].

A Figura 3.8 mostra uma simples arquitectura de um nó de Plano de Controlo. A *cross-connect* do Plano de Dados representa o *hardware* que providencia a *cross-connection* neste mesmo plano. As mensagens do Plano de Controlo são encaminhadas através do Módulo de Encaminhamento de Mensagens de Controlo IP. Assume-se que o nó de Plano de Controlo falha se este módulo falhar. Tanto o Módulo de Protocolo de Encaminhamento como o Módulo de Protocolo de Sinalização têm uma interface com o Módulo de Encaminhamento de Mensagens de Controlo IP [37].

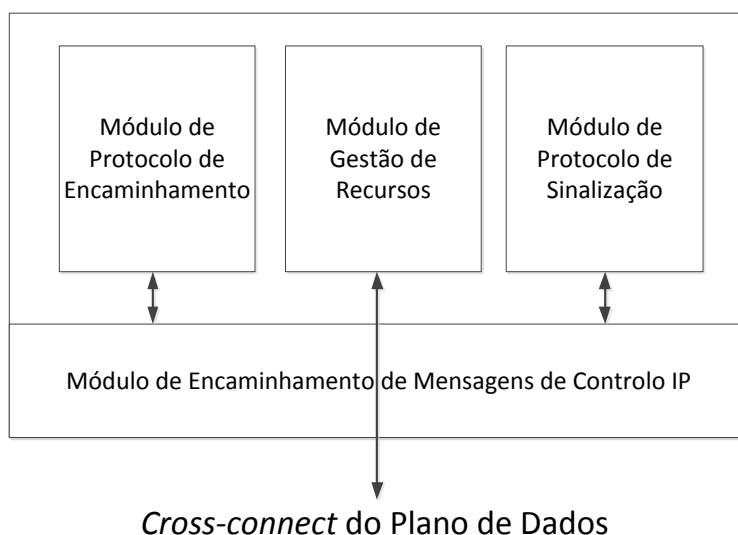


Figura 3.8 - Arquitectura de Plano de Controlo (adaptado de [37]).

### 3.4.1.1 Protocolo de Encaminhamento

Como referido no início da secção 3.4, o protocolo de encaminhamento é responsável por anunciar de forma fiável a topologia da rede óptica e o estado dos recursos (e.g., largura de banda disponível) dentro e entre os domínios da rede de encaminhamento. Na arquitectura representada na Figura 3.8, esta informação é mantida e utilizada pelo Módulo de Gestão de Recursos, que gere os recursos das *cross-connect* locais e resume esta informação para ser anunciada aos restantes nós

da rede. Este módulo usa também a informação recebida dos outros nós da rede para construir uma representação local da topologia da rede óptica. Esta representação é usada para executar a selecção do caminho quando as ligações são estabelecidas. Posto isto, a topologia do Plano de Dados e o Plano de Controlo não precisam de ser iguais, o protocolo de encaminhamento é responsável por anunciar estas duas topologias para que cada nó possa manter uma visão consistente das topologias de rede. A topologia do Plano de Dados é usada para a selecção do caminho durante o estabelecimento da ligação, enquanto que a topologia do Plano de Controlo é usada para construir a tabela de encaminhamento de mensagens de controlo IP.

Para garantir uma visão completa da topologia da rede óptica em todos os nós da rede, o protocolo de encaminhamento deve garantir a entrega da informação topológica da rede. O protocolo de encaminhamento deve ser também escalável para evitar falhas no protocolo resultantes da excessiva troca de informação de encaminhamento em redes de grande dimensão. As redes ópticas podem ser compostas por centenas a milhares de nós de rede, com componentes do Plano de Dados potencialmente contendo milhares de portos físicos. Uma aproximação para um protocolo de encaminhamento escalável é minimizar a informação global, mantendo a informação e tomadas de decisão localmente nos nós. Por exemplo, *links* paralelos individuais com características comuns podem ser agregados num *bundled link*, que esconde os detalhes individuais de cada *link*. Dessa forma, através do protocolo de encaminhamento, só é distribuída para toda a rede, a informação resumida desses *links*. Para lidar com a escalabilidade em termos de número de nós de rede, o protocolo de encaminhamento deve ser capaz de suportar encaminhamento hierárquico, através da sumarização de endereços e topologias. Por exemplo, o protocolo OSPF suporta uma única *routing área* de *backbone*, e múltiplas áreas *non-backbone*. Os *border routers* entre as áreas, podem sumarizar a informação anunciada sobre a topologia da área com o intuito de reduzir, quer o *overhead* das mensagens de encaminhamento, quer a quantidade de estados que têm de ser mantidos nos *routers*. Em redes ópticas de grandes dimensões, constituídas por múltiplas sub-redes, o protocolo de encaminhamento pode também ser desenhado para anunciar uma representação abstracta da topologia da sub-rede. Estas técnicas podem ser directamente aplicadas às redes ópticas, desde que a perda de informação devido ao encaminhamento hierárquico e sumarização não afectem de forma adversa a eficácia das rotas seleccionadas para ligações [37].

Ao contrário das actuais redes IP, as redes ópticas gerem explicitamente os recursos de rede por ligação. Como resultado, os protocolos de encaminhamento da rede IP foram estendidos para permitir a distribuição da informação destes recursos (OSPF-TE e IS-IS-TE). Isto resulta num *overhead* adicional das mensagens de encaminhamento quando comparado com as redes IP, que apenas distribuem o estado *up/down* dos *links*. Em [37] a informação do estado dos *links* é classificado *quasi-static information* e *dynamic information*. A *quasi-static information* não muda em resposta a alterações da ligação óptica (e.g., estabelecimento e remoção de ligações). Essas informações incluem relações de vizinhança, atributos *bundled link*, largura de banda total do *bundled link*, e SRLG (*Shared Risk Link Groups*). Em contraste, a *dynamic information* varia em resposta às operações das ligações ópticas. Esta informação inclui a largura de banda disponível no *bundled link*, e a fragmentação da largura de banda do *bundled link*. A *quasi-static information* pode ser fornecida através de configuração manual ou anúncios de encaminhamento pouco frequentes, enquanto que a *dynamic information* precisa de ser actualizada com o resultado das operações de ligação. Isto permite que a selecção do caminho para novas ligações, faça uso do estado actual das ligações. As extensões do protocolo de encaminhamento do IETF não fazem distinção entre *dynamic* e *quasi-static information*, causando uma enorme carga de informação quando a largura de banda disponível é alterada rapidamente.

Os operadores precisam de ajustar os parâmetros do protocolo de encaminhamento de modo a criar um compromisso entre o *overhead* causado pela troca de mensagens de encaminhamento e a informação de recursos desactualizada. Informação desactualizada pode resultar numa grande probabilidade de bloqueio da ligação e uma baixa utilização da rede óptica, enquanto que as actualizações muito frequentes pode resultar numa grande carga no Plano de Controlo desnecessária. Muitas vezes não é necessário anunciar as alterações na informação dos recursos do *link* depois de cada operação de ligação individual (estabelecimento/remoção), e em vez disso pode ser usado um *threshold* para despoletar os anúncios [37].

### 3.4.1.2 Protocolo de Sinalização

O protocolo de sinalização é usado para criar, manter, restabelecer, e remover ligações ópticas. Dessa forma, é também de sua responsabilidade inicializar e

processar as mensagens envolvidas nessas fases. Como resultado do processamento de cada uma destas mensagens, o Módulo de Sinalização em geral, inicia alterações no estado da *cross-connect* (i.e., ligações que terão sido estabelecidas ou removidas, correspondem à atribuição ou remoção de recursos). Para que o protocolo de sinalização seja fiável, o mesmo tem de ser capaz de, com rapidez, provisionar e restabelecer ligações, e ao mesmo tempo ser criterioso na remoção das mesmas. Como referido anteriormente, foram desenvolvidos pela IETF dois protocolos para suprir estas exigências, o RSVP-TE e o CR-LDP, para redes de comutação de pacotes e comutação de circuitos [37].

Os protocolos de sinalização devem ser cuidadosamente projectados de modo a que as operações do protocolo tratem e recuperem correctamente as mensagens perdidas, *bugs* implementados em nós par, e falhas no Módulo de Sinalização. Um protocolo de sinalização robusto requer mensagens de *acknowledgments* extremo-a-extremo, enquanto que as mensagens de *acknowledgments hop-by-hop* são essenciais para recuperar mensagens perdidas quando o tempo de resposta é crítico (e.g., durante a recuperação de falha). Estas características foram adicionadas às extensões dos protocolos de sinalização do GMPLS. Uma outra questão relacionada com o RSVP-TE é que os LSPs são mantidos à custa de um protocolo “*soft state*”. Este utiliza mensagens periódicas de *refresh* para manter o estado da ligação ao longo da rota do LSP; na ausência desta mensagem periódica, o estado da ligação é automaticamente expirado e removido, juntamente com LSP. Esta abordagem permite que qualquer cenário de falha seja removido pela ausência das mensagens periódica do protocolo *soft state*. No entanto, em redes ópticas, as ligações não devem ser mantidas usando uma abordagem *soft state* uma vez que isto permitiria que falhas no Plano de Controlo interrompessem as ligações estabelecidas no Plano de Dados. Nesse sentido, as ligações das redes ópticas devem usar uma abordagem “*hard state*”, com mecanismos para remover e tratar as falhas do Módulo de Sinalização e canais de controlo. O *hard state* significa que o estado das ligações só é removido apenas com o resultado explícito de uma mensagem de pedido de remoção. O RSVP-TE pode ser configurado para permitir tempos de *time-out* extremamente longos nos protocolos de *soft state*: o que é comparável com uma aproximação *hard state*. A perda de um pequeno número de mensagens de *refresh* poderia indicar a presença de um “problema” local, gerando um alarme não crítico para o NMS (*Network Management System*), mas sem o Plano de Controlo tomar a acção de remover a ligação.

Ligações fiáveis são normalmente providenciadas por técnicas de protecção ou restauro no Plano de Dados. Tipicamente, uma ligação requer dois caminhos: um para o serviço (caminho primário) e outro para restauro (caminho de protecção). Em MPLS, o protocolo de sinalização deve estabelecer dois *links* ou *node-disjoint* LSPs ao mesmo tempo para cada pedido LSP. O tráfego de dados pode ser encaminhado por um caminho enquanto o outro caminho é usado apenas quando o caminho primário falha. Isto é exequível, porque o segundo LSP, o LSP de protecção, não consome largura de banda se não estiver a enviar dados. No entanto, em redes ópticas, uma ligação estabelecida consome largura de banda nos *links* independentemente de estar ou não a enviar dados. Alguns esquemas de recuperação rápidos podem estabelecer a priori a ligação de protecção, antes do caminho primário falhar, para minimizar o tempo de recuperação do serviço. Mas esses mecanismos de protecção, *link-based* ou *path-based* (e.g., protecção *1+1*, *1:1*), geralmente requerem uma grande quantidade de recursos de protecção, e portanto, não são rentáveis para a maioria das aplicações dos clientes. Uma redução significativa da capacidade alocada para protecção é alcançada pela partilha do mesmo recurso de protecção por múltiplas falhas independentes. Isto significa portanto que, a ligação de protecção só é estabelecida após o caminho primário falhar.

O protocolo de sinalização poderá ser necessário para suportar múltiplos mecanismos de protecção, incluindo protecção *link-based*, protecção dedicada *path-based*, e restauro *shared mesh path-based*, bem como o restauro *dynamic routing*. Todos estes esquemas introduzem diferentes compromissos entre o tempo de interrupção do serviço devido a uma falha e a utilização do recurso de utilização. Recuperação de falha no Plano de Dados será discutida em detalhe nas secções 3.4.2.3 e 3.4.2.4.

A remoção de ligações é outra operação básica do protocolo de sinalização. Existem possíveis interacções entre a operação de remoção de ligação e o *fast restoration*, se a remoção de ligação for erradamente interpretada como uma falha de ligação, em especial em redes *all-optical*. Nesse sentido, essas funções precisam de ser bem coordenadas no desenvolvimento do Plano de Controlo [37].



### 3.4.1.3 Tipos de falha no Plano de Controlo

A separação do Plano de Controlo e Plano de Dados implica a possibilidade de manter o estado de encaminhamento no Plano de Dados no caso de um evento de falha no Plano de Controlo. De facto, esta característica permite manter as ligações mesmo na ausência de sinalização. Estas ligações, no entanto, são desprovidas de protecção ou mesmo da capacidade de remoção por parte da sinalização do Plano de Controlo. É por isso que não é possível manter o nível declarado de QoS, ficando as ligações no chamado *degradation state* [31].

Existem três tipos possíveis de falhas no Plano de Controlo: falha no *link* de Plano de Controlo, falha no nó de Plano de Controlo, e falha no módulo de *software* do Plano de Controlo. Alguns mecanismos de protecção podem ser usados para neutralizar o resultado de uma falha no Plano de Controlo. No entanto, é preciso salientar que, na maioria dos casos, seria importante usar alguns procedimentos adicionais para recuperar a perda de informação associada com as ligações suportadas [31].

#### 3.4.1.3.1 Falha no *link* de Plano de Controlo

Um *link* de Plano de Controlo é usado para transmitir mensagens de controlo baseadas em IP, incluindo mensagens de sinalização e de encaminhamento. As falhas nestes *links* podem ser protegidas usando protecção dedicada de *links* de controlo, ou por reencaminhamento ou *tunneling* do tráfego. Se for usada protecção dedicada de *links* de controlo (*1+1 dedicated link protection*), uma protecção redundante de *link* de controlo é disponibilizada a cada *link* de controlo primário. Quando o Plano de Controlo detecta uma falha no *link* de controlo, o *link(s)* de protecção será usado para encaminhar as mensagens de controlo. Apesar de rápido e simples, esta aproximação de fiabilidade do Plano de Controlo é dispendioso devido aos recursos de protecção necessários [31]. Uma técnica alternativa é usar o reencaminhamento na camada IP. O reencaminhamento nesta camada requer detecção de falha e convergência do protocolo de encaminhamento IP, permitindo com isso a actualização das tabelas de encaminhamento. Isto é fiável enquanto a rede de Plano de Controlo estiver conectada, sendo a sua desvantagem o tempo necessário para convergência. Outra opção é a existência de um túnel pré-definido

numa rota alternativa usado para os pacotes de controlo, em caso de falha. Nesse sentido, se a rede de Plano de Controlo estiver bem desenhada, uma pequena falha nos *links* de Plano de Controlo não deve afectar a operação básica da rede óptica.

Na solução de reencaminhamento na camada IP, o protocolo de encaminhamento IP é assumido para automaticamente descobrir a nova topologia de rede do Plano de Controlo após a falha num *link* de Plano de Controlo. Se o endereço usado nas mensagens do protocolo de encaminhamento e de sinalização for o endereço do nó em vez dos endereços das interfaces actualmente usadas pelo RSVP-TE, as mensagens serão encaminhadas para o destino desejado. A comunicação de vizinhança não será perdida enquanto a rede de Plano de Controlo estiver conectada e as tabelas de encaminhamento convergido. Esta solução pode ser aceitável se o tempo de convergência não for um problema e se a rede de Plano de Controlo estiver desenhada com redundância suficiente para lidar com as falhas. Se isto não for aceitável, uma das outras duas possibilidades devem ser utilizadas. De notar que, se os vizinhos de Plano de Controlo perderem toda a conectividade entre si, não será possível criar ou remover ligações entre esses nós. Neste tipo de cenários, o estado do Plano de Controlo deve ser sincronizado depois da reparação da falha no *link* de Plano de Controlo [37].

#### **3.4.1.3.2 Falha no nó de Plano de Controlo**

O nó de Plano de Controlo gere o estado do nó do Plano de Dados e mantém a informação das ligações que atravessam o Plano de Dados. Não podem ser realizadas operações durante uma falha no nó de Plano de Controlo. No entanto, desde que o nó de Plano de Dados não falhe, as ligações estabelecidas não devem ser afectadas ou reencaminhadas em resultado da falha no nó de Plano de Controlo. O protocolo de encaminhamento é assumido como sendo capaz de detectar a falha de um nó de Plano de Controlo e informar todos os outros nós de Plano de Controlo. Uma vez convergido o protocolo de encaminhamento com esta nova informação, uma nova ligação não deve se reencaminhada através deste nó afectado. No entanto, a remoção de ligações deve continuar a ser inicializada durante o período em que o nó de Plano de Controlo está indisponível. Se o nó de Plano de Controlo falhar, não poderá processar ou transmitir qualquer mensagem de remo-

ção de ligação. A ligação que atravessa um nó de Plano de Dados cujo nó de Plano de Controlo está com problemas, não será removida correctamente [37].

#### 3.4.1.3.3 Falha no módulo de *software* do Plano de Controlo

Os módulos do Plano de Controlo podem falhar devido a *bugs* de *software* ou *hardware*, ou erros lógicos nos protocolos. A recuperação deste tipo de falhas deve envolver a comutação para um *hot standby*, se existir um processo de *software* redundante implementado no módulo. No entanto, nem sempre estão disponíveis implementações de *software* com processos redundantes. Neste tipo de cenários, as falhas nos módulos devem ser detectadas e recuperadas tão rápido quanto possível.

Se os módulos de encaminhamento e sinalização estão implementados como processos separados, isto significa que qualquer um deles pode ter falhas independentes. Se o módulo de sinalização falhar, não podem ser estabelecidas novas ligações através deste nó, e as ligações estabelecidas não podem ser removidas. Se a falha não for resolvida rapidamente, o módulo de encaminhamento deve retirar os anúncios relacionados com os *links* associados com o nó que falhou, ou deve anunciar zero de largura de banda disponível para esses *links* para evitar ter novas ligações a tentarem usar as ligações desse nó. Se pelo contrário, falhar o módulo de encaminhamento num determinado nó, o nó continua a ser capaz de processar novos pedidos de estabelecimento de ligação, e remover as ligações existentes. Assim, o módulo de sinalização deve permanecer em funcionamento, e continuar a processar os pedidos. Um processo de encaminhamento deve ser capaz de detectar a falha no processo de encaminhamento de um nó vizinho. No encaminhamento IP, uma vez detectada a falha, o processo de encaminhamento remove imediatamente os anúncios dos *links* relacionados com o nó que falhou, uma vez que esses *links* não estarão disponíveis para o encaminhamento de pacotes de dados. Se o processo de encaminhamento falhar numa rede óptica, os *links* no Plano de Dados previamente anunciados pelo nó de Plano de Controlo com falha no processo de encaminhamento, devem estar disponíveis. No entanto, porque não existe nenhum processo de encaminhamento operacional, alterações no estado local (e.g., capacidade a ser atribuída/libertada) não serão anunciadas até o processo de encaminhamento ser recuperado, significando portanto que os outros nós irão trabalhar com informação desactualizada. Partindo do princípio que os módulos de sinalização estão

disponíveis, em vez de se retirar os anúncios dos *links* anunciados pelo processo que falhou, é preferível permitir que os nós continuem a utilizar a informação desactualizada [37].

#### 3.4.1.4 Protecção e Restauro do Plano de Controlo

Foi assumido pela comunidade científica que estudava o tema que o Plano de Controlo era muito fiável e, dessa forma, as técnicas de recuperação de falha concentravam-se apenas no Plano de Dados. No entanto, com o intuito de manter as ligações estabelecidas no Plano de Dados, os mecanismos de protecção no Plano de Controlo são também bastante importantes. Nesse sentido, um Plano de Controlo fiável é necessário para funcionamento adequado das NGNs, uma vez que este é responsável pelo encaminhamento, encaminhamento de mensagens e gestão das ligações e recursos. Além disso, a maioria dos mecanismos de protecção e de restauro no Plano de Dados precisam de uma sinalização eficiente do Plano de Controlo [4].

Foram descritos nas secções subjacentes à secção 3.4.1.3 os métodos para recuperar cada um dos tipos de falha no Plano de Controlo. Nesta secção serão descritos de uma forma genérica os passos para recuperar este plano em caso de falha e os tipos de mecanismos de protecção e de restauro usados de forma sintetizada.

Como mostrado na Figura 3.9, os principais passos para neutralizar uma falha no Plano de Controlo são os seguintes: detectar, localizar, notificar e comutar (protecção e/ou restauro), como representado pela sequência superior na figura, e a reversão opcional (*optional reversion*), representada pela sequência inferior na figura. Alguns procedimentos de ciclos de recuperação mostrados na Figura 3.9, tais como a *fault detection* e *fault hold-off*, devem ser dependentes de protocolos de camada inferior. O primeiro deve incluir procedimentos de detecção de falha de camada inferior como o *TCP (Transmission Control Protocol) timeout*, e o último é geralmente um tempo de espera para a camada inferior tomar uma acção proactiva, que poderia substituir o mecanismo de protecção do Plano de Controlo. Mais uma vez, durante o ciclo de reversão, o *fault clearing* é o período de tempo necessário para detectar (também pelos mecanismos de camada inferior) que o recurso que estava com problemas foi recuperado, e o *clear hold-off* é o tempo de espera

necessário para garantir que o recurso recuperado está estável. A possibilidade de manter o estado de encaminhamento durante o período de falha no Plano de Controlo, cria a necessidade de introduzir um passo adicional, que disponibiliza procedimentos para a recuperação da informação associada às ligações suportadas pelo Plano de Dados. De notar que, em caso de falha do *link*, o tráfego de sinalização pode ser comutado para um novo canal entre os nós (na maioria dos casos através de nós intermédios) e as ligações no Plano de Dados entre esses mesmos nós deve permanecer em funcionamento. Uma vez que algumas mensagens de sinalização podem ser perdidas durante o processo de *switchover* (comutação), alguns procedimentos adicionais são necessários para garantir a integridade do Plano de Controlo antes e depois deste processo. Da mesma forma, no caso da falha de um nó de Plano de Controlo, após a reinicialização de um nó que falhou e após o procedimento de reversão, é necessário um processo adicional para sincronizar o estado das ligações suportadas por esse nó. As setas a tracejado na Figura 3.9 representam esses procedimentos adicionais.

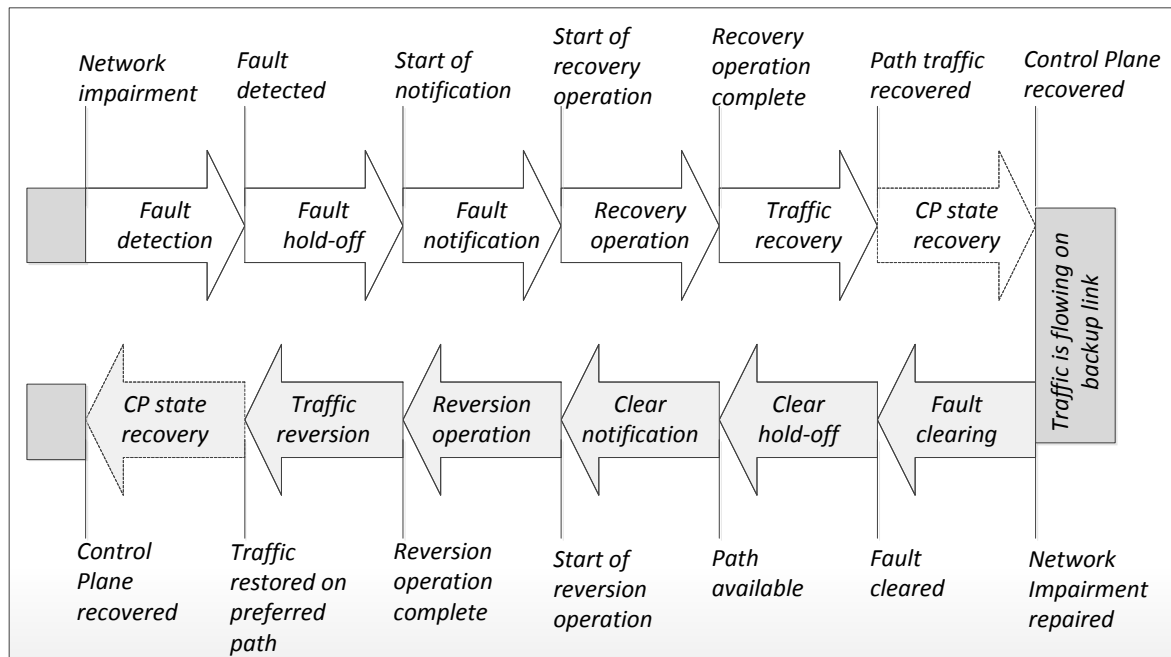


Figura 3.9 - Modelo de recuperação do Plano de Controlo (adaptado de [31]).

Existem inúmeras formas de detectar a falha no Plano de Controlo. Os procedimentos dependem dos protocolos usados e fazem parte das especificações do LMP, RSVP-TE, CR-LDP, ou em alguns casos, os protocolos subjacentes tais como o TCP. Todos estes procedimentos são baseados em trocas de mensagens de “*keep-alive*”, mas outras soluções, tais como a notificação através do Plano de Ges-

tão ou *link* de protecção (e.g., usando o protocolo LMP), poderia ser considerada para uma maior eficiência. A falta de mensagens de “*keep-alive*” significa que ocorreu uma falha. Além disso, uma notificação precisa ou algumas informações adicionais na mensagem de configuração da nova sessão estabelecida é capaz de mostrar o tipo de falha [31].

A Tabela 3.1 sintetiza alguns dos mecanismos de protecção e de restauro do Plano de Controlo. De notar que os mecanismos de protecção são uma alternativa ou um complemento aos mecanismos de restauro.

Para uma melhor utilização dos recursos disponíveis e para uma gestão mais flexível, existem certas soluções que poderiam ser tidas em consideração. Uma dessas soluções é a distribuição dos pacotes de sinalização ao longo de diversos *links* activos com diferentes esquemas de protecção. Neste cenário, é possível transferir as mensagens mais importantes por *links* com protecção dedicada (e.g., *packet 1+1 protection*), enquanto as outras mensagens poderiam ser transportadas através de *links* com protecção partilhada ou de todo sem protecção [31].

Protecção e Restauro do Plano de Controlo			
	Tipo de protecção	Características	Desvantagens
Reencaminhamento IP	Restauro	Simplicidade; Capacidade para descobrir automaticamente a nova topologia do Plano de Controlo;	Tempo de convergência elevado;
<i>1+1 dedicated link protection</i>	Protecção	Garante as melhores propriedades de protecção;	Muitos recursos alocados para os <i>links</i> de protecção; Muito caro para muitas aplicações;
<i>path 1+1 protection</i> (ou <i>packet 1+1 protection</i> )	Protecção	Transmissão das mensagens de sinalização em simultâneo nos dois caminhos; Ambos os caminhos são designados como activos, não havendo a necessidade de comutar para um caminho alternativo; Não necessita de mecanismo de detecção de falha; Os caminhos devem ser <i>link-disjoint</i> ou <i>node-disjoint</i> ;	Muitos recursos dedicados para protecção; Muito caro;

Tabela 3.1 - Mecanismos de Protecção e de Restauro do Plano de Controlo (adaptado de [31]).

### 3.4.2 Plano de Dados

Uma característica chave existente em redes ópticas e que deve ser preservada nas redes GMPLS é capacidade de resiliência de rede, que é, a capacidade de recuperar as ligações em caso de falhas na rede. A resiliência de rede pode ser garantida usando ou mecanismos de protecção ou de restauro, que são a relação de compromisso entre o tempo de recuperação com a eficiência dos recursos, respectivamente [38].

#### 3.4.2.1 Tipos de Falha em redes Ópticas

Existem dois tipos de falhas básicas numa rede óptica, falha na ligação de fibra óptica e falha no nó. A principal causa para o primeiro problema são os cortes na fibra óptica, que ocorrem com bastante frequência, apesar de existir um esforço considerável na protecção física dos cabos [40]. Segundo [7], para cada 10 km de fibra, é expectável um corte aproximadamente a cada 12 anos. Os factores que contribuem para este tipo de problemas incluem os trabalhos de construção civil (*backhoe fade*<sup>1</sup>), roedores, fogo ou erro humano. Os problemas que estão na causa da falha de um nó são tipicamente problemas causados por falha de energia eléctrica, *hardware* [4] ou até mesmo de *software* [3].

#### 3.4.2.2 Técnicas de Protecção e de Restauro

Nas últimas duas décadas, várias propostas têm sido apresentadas para recuperar o tráfego em caso de falha. Estas propostas baseiam-se na utilização de caminhos alternativos, de protecção, ou secundários [33] denominados de *BPs* (*backup paths*), usados para redireccionar o tráfego após uma falha num dos caminhos primários, denominados de *WPs* (*working paths*). Existem alguns esquemas específicos cujas técnicas se baseiam na protecção de *span* (ou *link*), caminho, segmento e *cycle* (esta última técnica e outras que não estão aqui referidas podem ser

---

<sup>1</sup> Termo usado na indústria de telecomunicações para definir um corte de fibra causado acidentalmente [59].

consultadas em detalhe em [4, 6]) [6]. Para providenciar a sobrevivência de uma rede óptica e para que esta seja efectivamente alcançada, é necessário garantir que os caminhos de protecção e os caminhos primários não tenham em comum ligações ou nós trânsito (*link- (node-) disjoint* [6]) [41]. Desta forma, uma NGN pode recuperar de uma falha por meio de esquema de protecção ou de restauro. Os esquemas de protecção são geralmente proactivos, uma vez que os caminhos de protecção são calculados a priori [4], garantindo uma recuperação completa em caso de falha [41]. Por outro lado, os esquemas de restauro são reactivos, uma vez que os caminhos de protecção são dinamicamente calculados após a detecção da falha [4], não garantindo com isso que seja encontrado um caminho alternativo [41].

Os mecanismos de protecção e de restauro podem ser aplicados numa NGN ao nível do *span*, segmento ou caminho [4]. Os mecanismos de protecção são tipicamente mais rápidos mas menos eficientes que os esquemas de restauro no que diz respeito à utilização dos recursos de rede [6]. O tempo ideal de recuperação após uma falha numa rede de alta capacidade deve ser  $\leq 50$ ms. Uma interrupção do sinal por um período  $\leq 50$ ms é entendida pelas camadas superiores como apenas um erro de transmissão, ao passo que para intervalos maiores, algumas aplicações podem ter perdas de pacotes [4].

Um requisito chave para o desenvolvimento de um plano de controlo comum para as redes ópticas e electrónicas é a necessidade de funções nos protocolos de sinalização, encaminhamento, e LMP que permitam a gestão de falha inteligente. Ao nível da ligação, a gestão de falha consiste nos seguintes passos principais:

- Detecção de Falha;
- Localização da Falha;
- Notificação da Falha;
- Mitigação da Falha (através de esquemas de protecção e restauro);

A detecção de falha deve ser tratada na camada mais perto da falha; em redes ópticas trata-se da camada física (óptica). Uma medida de detecção de falha na camada física é detectar o LOL (*Loss Of Light*); outras técnicas baseadas em OSNR (*Optical Signal-to-Noise Ratio*), BER medido opticamente, dispersão, *cross-talk*, e atenuação estão ainda em desenvolvimento.

A localização de falha requer a comunicação entre os nós para determinar onde a falha ocorreu (e.g., o AIS (*Alarm Indication Signal*) do SONET/SDH, é



usado para localizar a falha entre os *spans*). Uma consequência interessante da utilização do LOL para detectar a falha é que este é propagado ao longo do caminho, e dessa forma todos os nós do caminho podem detectar a falha. O LMP inclui um procedimento concebido para localizar a falha nas redes transparentes (*all-optical*) e opacas (O-E-O). Isso é feito através do envio de mensagens LMP *ChannelFail* entre os nós adjacentes sobre um canal de controlo mantido em separado dos canais de dados (em detalhe na secção 3.4.3). Esta separação do Plano de Controlo e do Plano de Dados permite um único conjunto de mensagem a ser utilizado na localização da falha, independentemente do esquema de codificação do Plano de Dados [33].

Uma vez detectada e localizada a falha, a protecção e o restauro são usados para mitigar o problema. A protecção e o restauro utilizam duas técnicas: *path switching* e *line switching*. No *path switching*, a falha é tratada nos extremos do caminho (i.e., nos nós que iniciam e terminam o caminho), enquanto que no *line switching* a falha é tratada nos nós trânsito onde a falha é detectada. O *path switching* pode ser subdividido em protecção de caminho (em detalhe na secção 3.4.2.3.3), onde os caminhos de protecção são pré-atribuídos, e em restauro de caminho (em detalhe na secção 3.4.2.4.2), onde as ligações são reencaminhadas, ou dinamicamente ou usando caminhos pré-calculados (mas não pré-atribuídos). O *line switching* pode ser subdividido em protecção de *span*, onde o tráfego é comutado para um canal ou *link* alternativo entre os mesmo dois nós, e em restauro de linha (*line restoration*), onde o tráfego é comutado para uma rota alternativa entre os dois nós (isto envolve a passagem através de nós intermédios adicionais). Para usar a protecção de forma eficaz, deve haver mecanismos para [33]:

- Distribuir as propriedades relevantes do *link*, tais como as larguras de banda e capacidades de protecção;
- Estabelecer caminhos de protecção através da rede;
- Sinalizar uma comutação entre o caminho primário e o caminho de protecção e voltar ao caminho primário;

### 3.4.2.3 Mecanismos de Protecção

Baseado na disponibilidade dos recursos de rede, os mecanismos de protecção podem ser categorizados nas seguintes quatro classes, [4]:

- **Protecção 1+1:** Neste esquema, um caminho dedicado de protecção é predefinido para proteger um dado caminho primário numa rede. O tráfego é transmitido ao longo dos dois caminhos e um mecanismo de selecção irá seleccionar o melhor sinal, e por conseguinte, o melhor caminho;
- **Protecção 1:1:** Neste esquema, um caminho de protecção é predefinido, mas os dados são comutados para o caminho de protecção apenas depois do caminho primário falhar;
- **Protecção 1:N:** Nesta técnica, é predefinido um caminho de protecção para proteger  $N$  caminhos primários. Os dados serão comutados para o caminho de protecção, se algum dos caminhos primários falhar. Depois disso, os restantes  $N-1$  caminhos tornam-se caminhos não protegidos;
- **Protecção M:N:** São predefinidos  $1 \leq M \leq N$  caminhos de protecção, para proteger  $N \geq 1$  caminhos primários;

De salientar que as duas técnicas de protecção  $1:1$  e  $1:N$  são casos especiais da técnica  $M:N$ . Na protecção  $M:N$ ,  $M$  caminhos de protecção são usados para proteger  $N$  caminhos primários. Isto permite a melhor utilização dos recursos que a protecção  $1+1$ , uma vez que os caminhos de protecção são usados por múltiplos caminhos primários. Também, os caminhos de protecção que não estão activos podem ser usados para encaminhar tráfego de baixa prioridade, melhorando assim a utilização dos recursos de rede. No entanto, esta melhoria na utilização dos recursos na técnica  $M:N$  é obtida à custa de sinalização adicional e no aumento do tempo de comutação, o que irá aumentar o tempo de recuperação global na rede contra falhas [4]. Uma característica importante da protecção  $M:N$  partilhada é a possibilidade de reverter a ligação para o caminho primário quando a falha estiver resolvida. Isto permite libertar o recurso de protecção, para os restantes caminhos primários [38].

A Figura 3.10 representa a capacidade de redundância baseada na taxonomia das principais técnicas de recuperação de falha em NGNs descritas em [4], i.e., anéis baseados nas técnicas  $1+1$  e  $M:N$ , *Disjoint Paths*, *Protection Cycles*, *p-cycles*, *Redundant Trees*, RRLs (*Resilient Routing Layers*) e IPFRR (*IP Fast Reroute*). De salientar que nesta dissertação apenas serão discutidas as técnicas  $1+1$  e  $M:N$ .

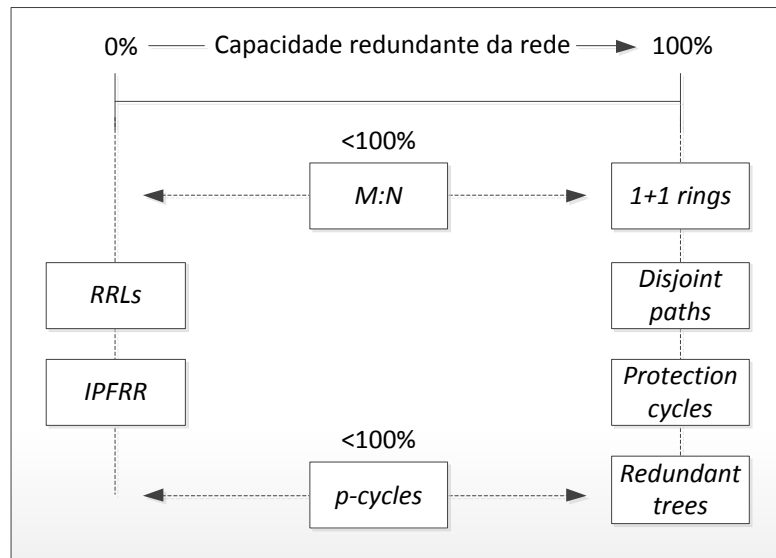


Figura 3.10 - Taxonomia dos principais esquemas de recuperação de falha em NGNs (adaptado de [4]).

### 3.4.2.3.1 *Shared Risk Link Group*

Todos os mecanismos de protecção apresentados na secção anterior, foram concebidos para proteger contra a falha de um *link* individual ou um conjunto diversificado de *links* (que também podem ter uma correlação de falha) numa rede. No entanto, existe um conceito muito mais abrangente conhecido como SRLG para criar redes sobreviventes. Refere-se às situações onde um conjunto de *links* partilham recursos em comum (fibras, cabos, condutas, etc) e se um *link* falhar, então os outros *links* no grupo podem também falhar. Assim, todos os *links* num SRLG partilham um risco de falha. A Figura 3.11a) e a Figura 3.11b) representam a camada óptica e a camada física, respectivamente. A falha do SRLG  $g^1$  ou  $g^2$  irá desconectar os nós 1 e 2 bem como os nós 1 e 4, enquanto que, a falha do SRLG  $g^3$  e  $g^4$  irá desconectar os nós 3 e 4 bem como os nós 1 e 4. O SRLG foi proposto como um conceito fundamental para a gestão de falhas em GMPLS [4].

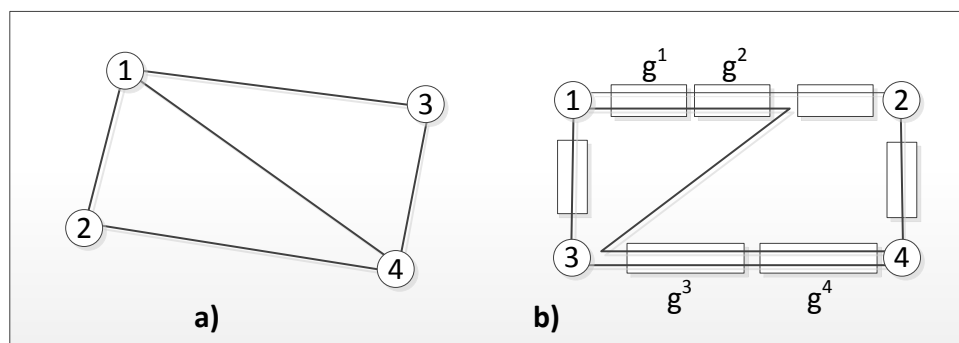


Figura 3.11 - Exemplo de quadro SRLGs (i.e.,  $g_1$ ,  $g_2$ ,  $g_3$  e  $g_4$ ) adaptado de [31].

### 3.4.2.3.2 Protecção de *span*

No que diz respeito à protecção ao nível do *span*, esta é realizada entre um par de nós adjacentes e envolve a comutação do tráfego entre um *link* ou canal alternativo [33]. No exemplo da Figura 3.12a), existe um caminho primário entre os nós *A* e *Z*. Assumindo uma falha na ligação entre os nós *J-K*, representada na Figura 3.12b), os recursos de protecção entre os nós *J-I-D-L-K* serão usados para reencaminhar o tráfego [3]. Este tipo de comutação é rápida e simples de implementar em *hardware* [4].

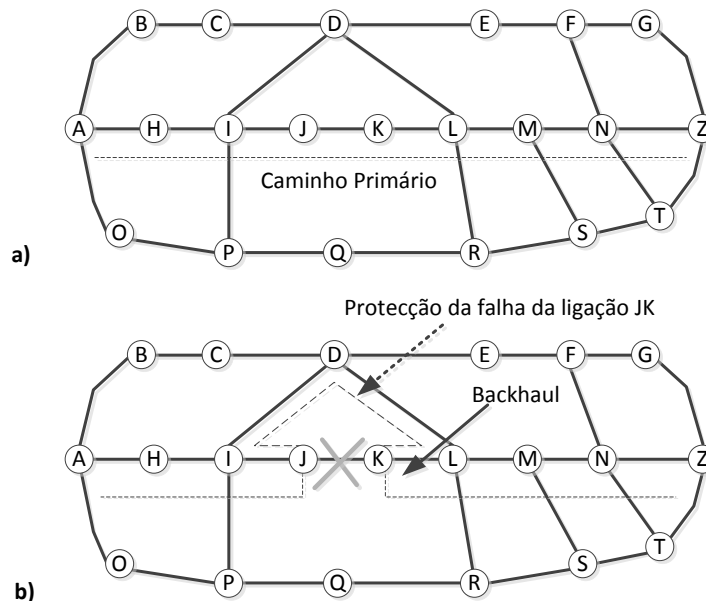


Figura 3.12 - Protecção de ligação (adaptado de [3]).

Como parte das extensões de encaminhamento do GMPLS o LPT (*Link Protection Type*) é anunciado para que a protecção de *span* possa usá-lo no cálculo da rota. Assim que uma rota alternativa é seleccionada, a ligação é sinalizada usando RSVP-TE ou CR-LDP, que incluem um *protection bit vector* indicando que LPTs são aceitáveis para a ligação.

A protecção *1+1* dedicada é a mais rápida (tempo de recuperação  $\leq 50\text{ms}$ ), porque o tráfego é transmitido em simultâneo sobre o caminho primário e de protecção (Figura 3.13a)). No entanto, comparando com um sistema não protegido, este requer o dobro dos recursos de rede, i.e., 100% de redundância (rácio da capacidade *spare to working* numa rede). Esta técnica tem sido amplamente aplicada na protecção automática de comutação nos serviços de alta disponibilidade ou *premium* [4]. No modo de operação mais simples, chamado *1+1* unidireccional, o

nó receptor selecciona o canal com o melhor sinal para o canal primário. Uma vez que o processo de selecção é controlado apenas pelo nó receptor, não existe a necessidade de sinalização adicional para realizar a comutação. Outro modo de operação é chamado de *1+1* bidireccional, que requer a coordenação entre nós, para que ambos seleccionem o mesmo canal primário. Isto requer uma troca de mensagens adicional entre os nós. No que diz respeito ao GMPLS, o nó de recepção deve notificar o nó de transmissão (e.g., usando as mensagens *Channel Status* do LMP) quando uma falha é detectada [38].

Para a protecção de *span M:N*,  $M$  canais de protecção são partilhados entre  $N$  canais primários. A Figura 3.13b) mostra o caso especial da protecção de *span 1:1*. Uma vez que os dados não são replicados nos dois canais (primário e de protecção), a falha deve ser primeiro localizada, o nó de recepção pode iniciar localmente a protecção de *span* através do envio da mensagem *RSVP Path Refresh*. Estas mensagens são uma característica distinta do RSVP que permitem aos nós intermédios actualizar o estado de um LSP. Esta característica permite a comutação do canal primário para o canal de protecção. De notar que o benefício de trocar antecipadamente a configuração de protecção partilhada usando o LMP é que este processo minimiza o potencial conflito de canal (*label*) de protecção quando a protecção comuta. Quando o nó de recepção recebe uma mensagem *RSVP Path* com o novo objecto, verifica os parâmetros, actualiza o estado de sinalização e, ou responde com uma mensagem *RSVP Resv* (detalhes das mensagens RSVP em [42]) com uma nova *label* ou gera uma mensagem de erro [33].

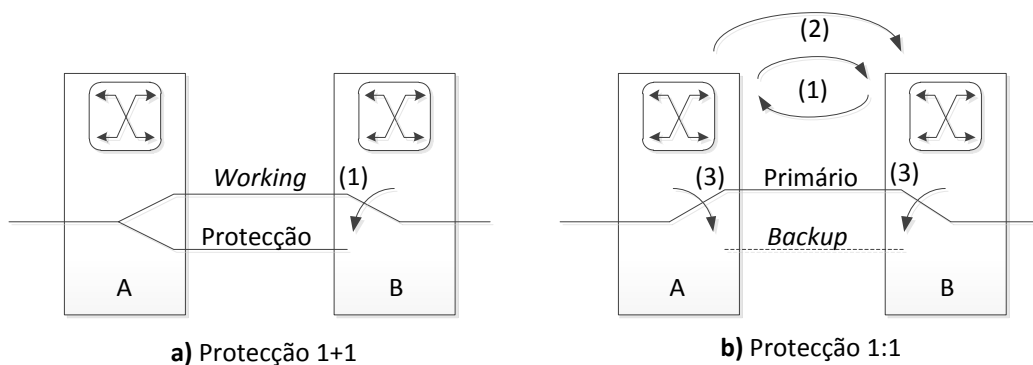


Figura 3.13 - a) Protecção de *link 1+1*; b) Protecção de *link 1:1* (adaptado de [33]).

### 3.4.2.3.3 Protecção de caminho

Em relação à recuperação ao nível do segmento ou caminho, os mecanismos de protecção e de restauro conseguem comutar o tráfego por segmentos ou caminhos redundantes entre os mesmos nós origem e destino [4]. A Figura 3.14 representa uma protecção de caminho, onde um caminho de protecção entre a origem e o destino é usado como alternativa, independentemente de onde tenha ocorrido a falha no caminho primário [3]. Este tipo de protecção é mais eficiente no que se refere à capacidade de rede que a protecção de *span*, porque evita os “backhauls” como representado na Figura 3.12b, e distribui os caminhos alternativos através de uma área mais alargada na rede [43].

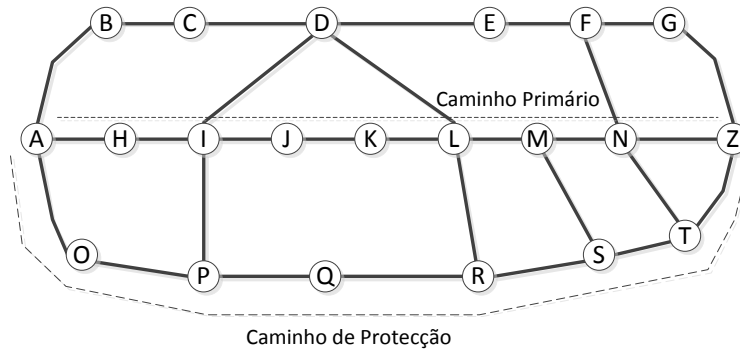


Figura 3.14 - Protecção de caminho (adaptado de [3]).

Para garantir que os *links* ao longo do caminho de protecção não partilham os mesmos recursos cuja falha afecta um *link* ao longo do caminho primário, o caminho não só deve ser *node-disjoint*, mas os *links* devem ser também *SRLG-disjoint*. Esta informação é determinada analisando os parâmetros (e.g., *node list* ou *SRLG*) contidos na LSDB que são anunciados pelo protocolo de encaminhamento.

Existem algumas variações da protecção de caminho que devem ser implementadas para disponibilizar diferentes tipos de níveis de protecção. A simples noção de protecção de caminho é seleccionar dois caminhos disjuntos (um caminho primário e um caminho de protecção) onde cada *link* ao longo dos dois caminhos não é protegido (esta informação pode ser aprendida pelo objecto LPT que é distribuído pelo protocolo de encaminhamento). Para caminhos de protecção *1+1* dedicados, o tráfego é transmitido sobre os dois caminhos em simultâneo e é usado um selector no receptor para determinar qual o melhor sinal (Figura 3.15). Isto é sinalizado usando GMPLS como dois LSPs primários onde os extremos percebem

que a protecção é do tipo  $1+1$ . Como na protecção de *span 1+1*, esta é a protecção mais rápida em caso de falha. Da mesma forma, requer o dobro dos recursos e pode necessitar de troca adicional de mensagens entre os extremos se os dois nós de um LSP bidireccional forem obrigados a seleccionar os mesmos caminhos, um como primário e outro como protecção.

Um aspecto comum da protecção  $M:N$  de caminho é quando  $M$  caminhos de protecção *SRLG-disjoint* estão preestabelecidos para proteger  $N$  caminhos primários *SRLG-disjoint*. De notar que, desde que os recursos estejam preestabelecidos, todos os caminhos  $M+N$  devem ser inicializados (e terminados) no mesmo nó de origem (e destino). Isto protege contra falhas no caminho primário. Os caminhos protegidos são estabelecidos como LSPs primários; tráfego extra de baixa prioridade deve ser encaminhado por estes caminhos de protecção desde que tenham a mesma origem e destino. Quando uma falha é detectada ao longo do caminho primário, o LMP pode ser usado para localizar a falha. Uma vez localizada a falha, a mensagem RSVP *Notify* é enviada para o nó origem. Após a notificação, o caminho de protecção é *re-sinalizado* usando a mensagem RSVP *Path* com o objecto *Administrative Status* a indicar que o LSP de protecção está agora activo como um LSP primário [38].

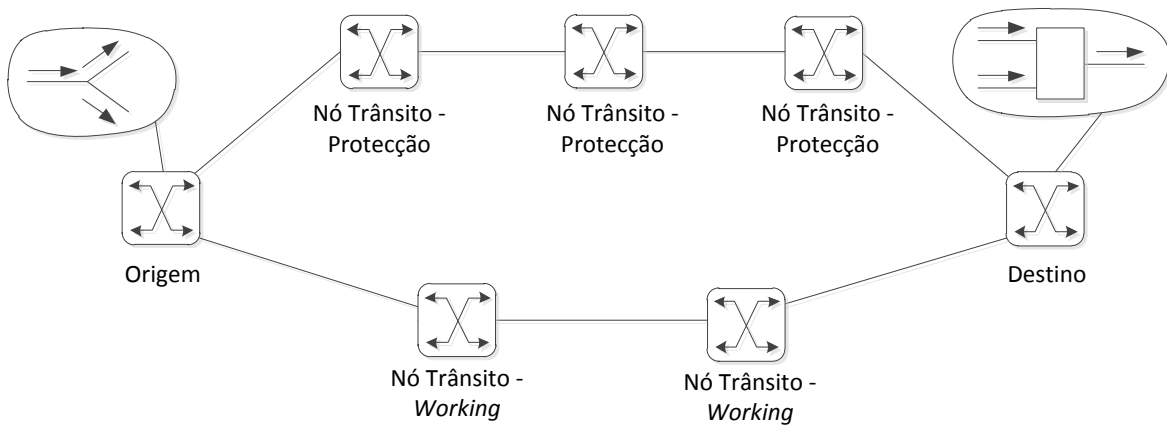


Figura 3.15 - Protecção de Caminho 1+1 (adaptado de [33]).

#### 3.4.2.3.4 Recuperação de segmento

A recuperação de segmento é usada com o propósito de disponibilizar protecção e restauro sobre uma porção do LSP extremo-a-extremo, evitando a protecção do caminho completo [32], como discutido na secção anterior. Este tipo de pro-

tecção é útil para proteger contra uma falha no *span*, nó, ou numa particular porção da rede usada pelo LSP. Este tipo de protecção/restauro é referido como Protecção de Segmento e Restauro de Segmento, ou como Recuperação de Segmento, no caso colectivo. Um LSP que disponibilize a protecção ou o restauro é referido como um LSP de Protecção de Segmento ou um LSP de Restauro de Segmento. O termo “LSP de Recuperação de Segmento” é usado para referenciar os dois tipos [44].

Um caminho primário é dividido em múltiplos segmentos, sendo o caminho de protecção disponibilizado de forma independente para cada segmento. Dividir um caminho em múltiplos segmentos mais pequenos, o tempo de recuperação da falha é reduzido, comparando com a protecção de caminho [3].

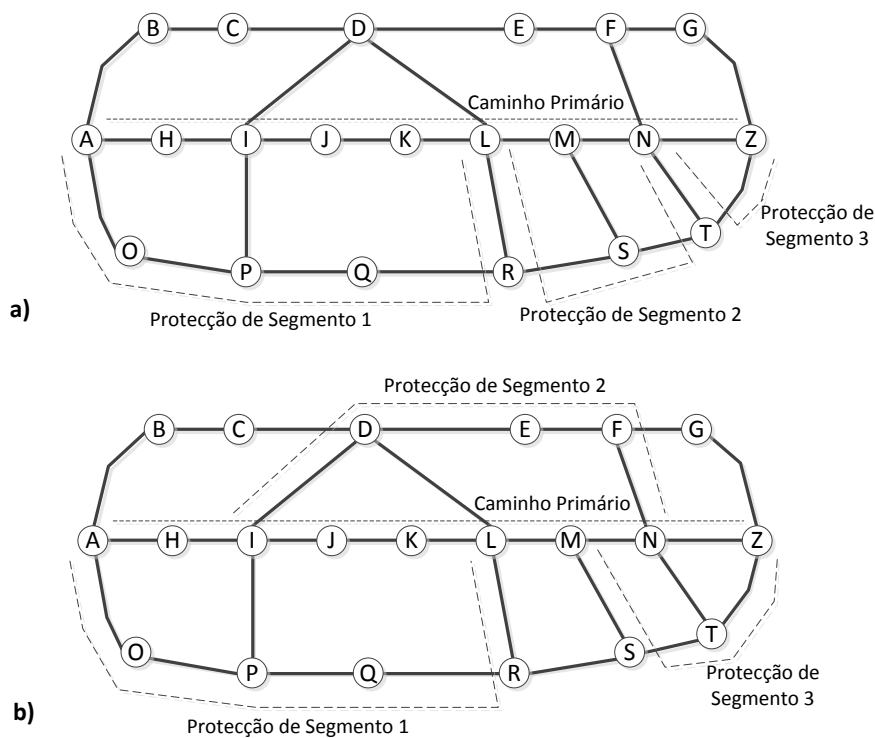


Figura 3.16 – Protecção de segmento. a) Segmentos não sobrepostos. b) Segmentos sobrepostos (adaptado de [3]).

Na Figura 3.16a), é ilustrada uma protecção de segmentos não sobrepostos, onde o caminho primário é dividido em três segmentos  $A-H-I-J-K-L$ ,  $L-M-N$ , e  $N-Z$ . Os caminhos de protecção correspondentes são  $A-O-P-Q-R-L$ ,  $L-R-S-T-N$ , e  $N-T-Z$ . Assumindo que os nós terminais dos segmentos são capazes de detectar uma falha no segmento associado. Por exemplo, se ocorrer uma falha na ligação  $J-K$ , o nó  $L$  detecta que a falha ocorreu e indica ao nó  $A$  para comutar o tráfego para o



segmento de protecção; não é necessário existir comutação nos restantes segmentos. Esta protecção deve ser mais rápida que a protecção de caminho, onde o nó  $Z$  teria de detectar a falha e sinalizar o nó  $A$  para comutar o tráfego para o caminho de protecção. Além disso, os segmentos de protecção têm tipicamente menos saltos que um caminho de protecção. Dependendo do número de segmentos criados, este tipo de protecção pode ser mais eficiente no que diz respeito à capacidade que a protecção de caminho, especialmente quando operado em modo de protecção partilhada. Com a partilha do caminho de protecção, com o objectivo de partilhar o recurso de protecção, o caminho primário associado deve ser disjunto. Numa partilha do segmento de protecção, o segmento primário associado deve ser disjunto. Os segmentos envolvem menos ligações que os caminhos, permitindo uma maior oportunidade de partilha. Além disso, dois segmentos primários pertencentes ao mesmo caminho podem partilhar recursos de protecção, assumindo que os segmentos primários estão completamente separados. No entanto, como o número de segmentos aumenta, o excessivo encaminhamento necessário para providenciar protecção para cada pequeno segmento começa a anular os benefícios de uma melhor partilha. A protecção de segmento também oferece mais protecção contra falhas que a protecção de caminho. Como por exemplo, pode recuperar o tráfego num cenário com múltiplas falhas, se não ocorrer mais que uma falha em cada segmento. A protecção de caminho deixa de surtir efeito se existir uma falha no caminho primário e uma falha no caminho de protecção.

Um inconveniente do esquema da Figura 3.16a) é que não providencia protecção se um nó terminal de um segmento tiver uma falha. Este problema é corrigido na Figura 3.16b), onde os três segmentos ( $A-H-I-J-K-L$ ,  $I-J-K-L-M-N$ , e  $M-N-Z$ ) estão sobrepostos de tal modo que, qualquer falha nos nós intermédios é também recuperada. Considerando uma falha na ligação  $J-K$ , que pertence ao segmento 1 e 2, ambos vão detectar uma falha no segmento, mas a exacta localização do problema não é facilmente determinada. Isto é relativamente simples de implementar numa rede O-E-O onde se supõe que a ligação que falhou pode ser facilmente determinada. No entanto, numa rede de *bypass* óptico, manipular este cenário pode ser bastante exigente. Se ambos os segmentos comutarem para os seus segmentos alternativos, o caminho de protecção resultante seria descontínuo. Assim, a localização de falha, pelo menos até certo ponto, é necessária. Em essência, com segmentos sobrepostos, o mecanismo de protecção pode tornar-se dependente da falha. Dada esta complexidade extra na protecção de segmentos, a protecção de caminho

é mais provável de continuar a ser o mecanismo mais desejável para redes de *bypass* óptico [3].

#### **3.4.2.4 Mecanismos de Restauro**

Os mecanismos de restauro estão projectados para reagirem à falha de forma rápida e usar a largura de banda de forma eficiente. Estes mecanismos tipicamente envolvem o estabelecimento de recursos e cálculo de rotas de forma dinâmica, e dessa forma, levam mais tempo para comutar para um caminho alternativo que as técnicas de protecção. De forma similar às técnicas de protecção descritas anteriormente, as técnicas de restauro podem ser implementadas no nó de origem ou num nó intermédio uma vez que o nó responsável tenha sido notificado. A notificação da falha é feita usando os procedimentos de notificação descritos anteriormente, ou usando mensagens de erro normalizadas [33].

##### **3.4.2.4.1 Restauro de Linha**

Para suportar restauro de linha, onde o tráfego é comutado via rota alternativa em torno da falha, é seleccionado um novo caminho num nó intermédio. Isto envolve a passagem do tráfego através de nós trânsito adicionais. O restauro de linha pode ser benéfico para ligações que atravessem múltiplos saltos e/ou grandes distâncias porque a latência incorrida pela notificação de falha pode ser significativamente reduzida. Neste caso, em vez do caminho inteiro apenas alguns segmentos da ligação é que são reencaminhados. O restauro de linha, no entanto, pode quebrar os requisitos TE se uma rota explícita *strict-hop* é definida para a ligação. Além disso, as restrições usadas para o encaminhamento da ligação devem ser encaminhadas. Isto permite que um nó intermédio que faça restauro de linha seja capaz de calcular uma rota alternativa adequada. Isto é similar ao problema do estabelecimento/manutenção de requisitos TE que abrangem múltiplas áreas [33].

##### **3.4.2.4.2 Restauro de Caminho**

O restauro de caminho comuta o tráfego para uma rota alternativa em torno da falha, onde o novo caminho é seleccionado no nó origem. Podem ser invoca-

das otimizações para apressar o processo de restauro; por exemplo, as rotas alternativas podem ser pré-computadas pelos extremos do caminho e memorizadas para uso futuro. Um caminho de restauro pode reutilizar nós do caminho primário e/ou incluir nós intermédio adicionais. Como representado na Figura 3.17, após a recepção de uma notificação de falha, o nó origem calcula o caminho de forma dinâmica a ser usado e sinaliza para uma nova ligação ser estabelecida. De notar que o sinal original não é enviado em simultâneo sobre os dois caminhos até ao destino. Deve ser salientado também que os recursos nos nós transmissores são reutilizados (partilhados) sempre que possível, e os recursos nos nós intermédios que não são mais necessários são libertos. Esta partilha de recursos aumenta a hipótese das ligações terem os recursos necessários quando o reencaminhamento está em progresso. Se os caminhos forem pré-calculados e os recursos pré-atribuídos, isto permite um rápido reencaminhamento desde que esses recursos estejam garantidos, a não ser que eles falhem ou sejam pedidos por ligações de alta prioridade [33].

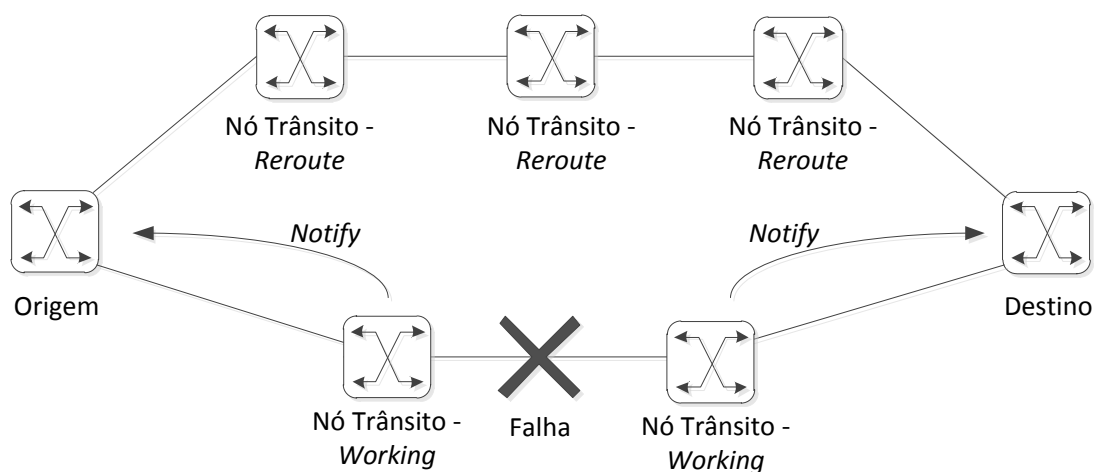


Figura 3.17 - Restauro de Caminho. (adaptado de [33]).

### 3.4.3 Plano de Gestão

Os protocolos de encaminhamento e de sinalização precisam de uma rede de comunicação de dados baseada em IP. Adicionalmente, a mesma rede é necessária para a comunicação entre os componentes de gestão no Plano de Gestão. A recomendação G.7712 define esta rede comum de sinalização como DCN (*Data Communication Network*), a rede no Plano de Controlo como SCN (*Signaling Commu-*

*nication Network*), e a rede no Plano de Gestão como MCN (*Management Communication Network*). As redes SCN e MCN podem partilhar a mesma rede física sendo apenas separadas logicamente. Os canais podem ser separados fisicamente (*out-of-fiber configuration*) ou apenas logicamente (*in-fiber configuration*) da rede de dados. Além disso, a sinalização entre os nós adjacentes pode ser feito usando canais de sinalização entre esses nós (*modo associado*) ou através de nós intermediários (*modo não associado*). Na realidade, enquanto que a rede DCN deve ser uma rede IP, os canais de sinalização individuais podem ser implementados usando várias técnicas de rede, tais como os canais de controlo embebidos (e.g., canal DCC (*Data Communication Channel*) dentro do SDH, ou o canal GCC dentro do OTN), redes WAN (*Wide Area Network*), ou mesmo redes LAN (*Local Area Network*).

Do ponto de vista da fiabilidade existem inúmeras razões para usar a *out-of-fiber configuration* em vez do *in-fiber configuration*. Por exemplo, a primeira, permite usar vários tipos de esquemas de protecção e de restauro, enquanto que a segunda, os esquemas de protecção dependem do mecanismo usado no Plano de Dados associado. Além disso, a *out-of-fiber configuration* suporta naturalmente a separação do Plano de Controlo e o Plano de Dados, que é crucial para manter as ligações mesmo em caso de falha do Plano de Controlo. A topologia da rede de sinalização depende da forma de como os canais individuais estão implementados. Se a topologia de sinalização é idêntica à topologia do Plano de Dados, pode-se chamar de arquitectura *simétrica*, caso contrário, tem de se lidar com a arquitectura *assimétrica* do Plano de Controlo. A Figura 3.1 mostra um exemplo do Plano de Controlo com as particulares arquitecturas *simétrica* e *assimétrica* [31].

# 4

## Simulação de uma rede óptica

Neste capítulo são apresentados os testes a três cenários de falha típicos numa rede core óptica. É analisado o comportamento do algoritmo RWA face à ocorrência de uma falha num *link*, falha em múltiplos *links* e falha num nó.

Para realizar esta análise foi feito um estudo sobre qual a ferramenta de simulação mais adequada para simular uma rede NGN. Existem várias plataformas de simulação de redes, nomeadamente o ns-2 [45], ns-3 [46], J-Sim [47], OMNeT++ [48], OPNET [49] e o GLASS [50]. Este último, foi especialmente desenvolvido para redes GMPLS e contempla componentes ópticos como OXCs, *EdgeRouters*, *links* ópticos, fibras e *lambdas*. Foram feitos alguns testes neste simulador, mas por problemas de instabilidade não foi escolhido para o desenvolvimento do estudo nesta dissertação.

Dos restantes simuladores, o ns-3 foi escolhido por ser *open-source*, por existir muita informação e suporte, e por haver um grande contributo da comunidade

no desenvolvimento da plataforma. O ns-3 não contempla de base os componentes WDM, mas existem algumas distribuições que permitem a sua implementação.

## 4.1 Tecnologias usadas

Nesta secção será feita uma pequena abordagem ao sistema operativo usado como suporte ao ns-3. São descritos os detalhes relativos aos componentes e módulos que constituem o ns-3, com especial foco no módulo WDM.

### 4.1.1 Sistema Operativo

No desenvolvimento da componente prática desta dissertação foi usada a versão do Ubuntu 14.04.2 LTS com o nome de código “Trusty”. Esta versão vem acompanhada com a versão 3.13.0 do Linux-kernel.

O Ubuntu é um sistema operativo de computador baseado na distribuição Debian GNU/Linux. O Linux é um nome genérico dado a sistemas operativos de computador *UNIX-like*. Trata-se de um sistema operativo baseado no Linux-kernel e que reúne livrarias e programas de sistemas desenvolvidos dentro dos limites do projecto GNU. O seu desenvolvimento é um exemplo do contributo de software *open source* e gratuito. Isto significa que todo o código fonte, pode ser visualizado, modificado e redistribuído, quer de forma comercial quer não-comercial, por qualquer pessoa dentro dos termos de licença do GNU GPL (*GNU General Public License*) e outros softwares livres.

O Ubuntu foi escolhido como sistema operativo porque:

1. O ns-3 trata-se de um projecto licenciado pela GNU GPLv2 e é sobretudo suportado pelos sistemas operativos Linux, OS X e FreeBSD [51];
2. Não é necessário adquirir licença. Uma distribuição Ubuntu pode ser descarregada gratuitamente, por exemplo, da internet;
3. É possível ter todas as últimas actualizações para as aplicações necessárias que o *open source* tem para oferecer;
4. É fácil de encontrar e instalar todas as aplicações e ambientes de programação necessários;

### 4.1.2 Network simulator 3 – ns-3

A simulação por computador é um dos métodos eficazes para estudar sistemas complexos. Os modelos de computador são mais simples, e de certa forma mais convenientes para investigação, uma vez que permitem realizar experiências computacionais onde os testes reais são impossíveis devido aos grandes custos associados. Outra grande vantagem em usar modelos de computador é quando existem dificuldades físicas, como por exemplo a exigência de *hardware*, ou devido a experiências que podem dar resultados imprevisíveis [52].

O ns-3 é um simulador de redes de eventos discretos onde o core e os módulos são implementados em *C++*. É construído como uma biblioteca que deve ser estaticamente ou dinamicamente interligada com o programa principal em *C++* que define a topologia de simulação e o início do programa [52]. Embora o ns-3 seja desenvolvido em *C++* existem ligações disponíveis para *Python*.

O ns-3 trata-se de um *software* gratuito e está disponível para investigação, desenvolvimento e utilização.

A Figura 4.1 representa os principais módulos do ns-3. No desenvolvimento da dissertação foi usada a distribuição do ns-3 com a descrição ns-3-dev-wdm baseada na versão ns-3.19 lançada a 20 de Fevereiro de 2014. Esta distribuição inclui o módulo WDM cujos detalhes serão descritos nas secções seguintes.

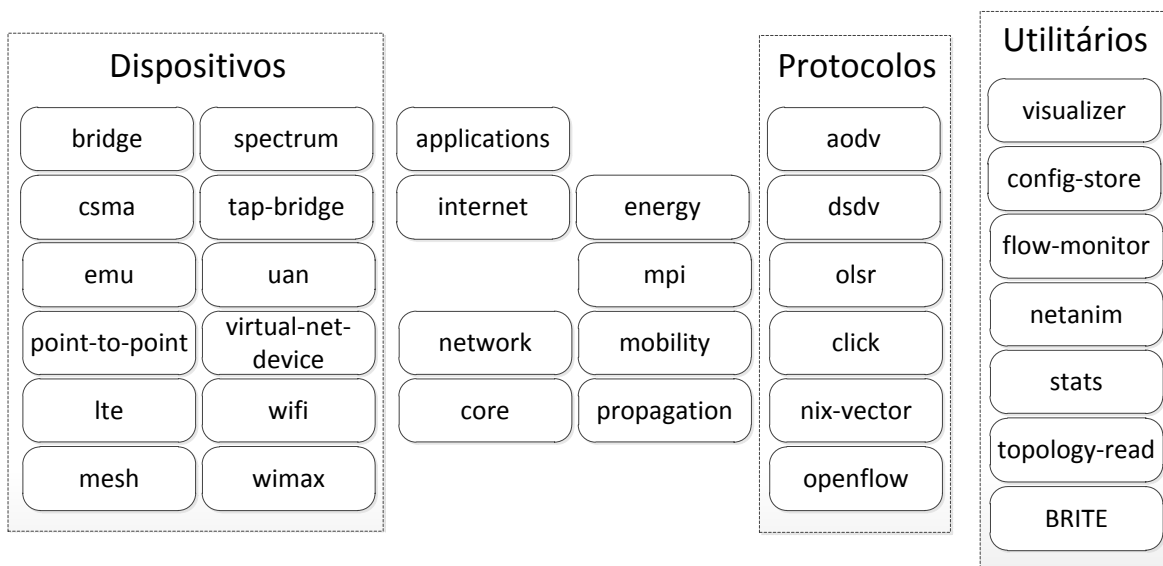


Figura 4.1 - Principais módulos do ns-3. (Adaptado de [51])

### 4.1.3 Instalação do simulador ns-3

Antes da instalação da distribuição do ns-3 é necessário preparar o sistema operativo. O core do ns-3 requer uma instalação do gcc/g++ com a versão igual ou superior à 3.4, e uma instalação do *Python* com a versão igual ou superior à 2.4. Em [53] é possível encontrar os detalhes de todos os pré-requisitos necessários para instalação.

Após terminada a instalação preliminar, através do comando “hg clone https://bitbucket.org/pgawlowicz/ns-3-wdm” foi realizado o clone da distribuição ns-3 que integra o módulo WDM. Após completar a cópia do conteúdo do repositório, é necessário configurar, compilar e instalar através da *framework* ./waf baseada em *Python*. Segue-se a sequência de comandos utilizados neste processo.

```
cd
mkdir repos
cd repos
hg clone https://bitbucket.org/pgawlowicz/ns-3-wdm
cd ns-3-wdm
./waf configure --enable-examples --enable-tests
./waf build
```

Em [54] é possível encontrar a lista dos repositórios de todas as distribuições do ns-3 desenvolvidas e publicadas pelos grupos de desenvolvimento.

## 4.2 Módulo para simulação de redes WDM

O módulo WDM implementa quatro tipos de dispositivos que permitem a criação de uma rede óptica WDM que são: TxRx DWDM (*transponder*), OXC, *Multiplexer* e *Demultiplexer*. De notar que este módulo não contempla componentes de amplificação, como EDFA ou Raman.

O TxRx DWDM é o dispositivo responsável por gerar o canal óptico DWDM e que se encontra localizado nos extremos de um caminho óptico. Este dispositivo está interligado com o *multiplexer/demultiplexer* óptico e o equipamento cliente (*Internet Stack IPv4*). O papel do *multiplexer* óptico é agregar os comprimentos de onda provenientes de diversos TxRx DWDM e entregá-los ao OXC num sinal composto sobre um único par de fibras. O *demultiplexer* óptico por sua vez faz o papel contrário, recebe o sinal composto do OXC e desagrega os canais ópticos para serem entregues aos TxRx DWDM.



Este módulo inclui também um equipamento óptico de medida, o OSA (*Optical Spectrum Analyzer*). Este dispositivo permite medir e visualizar a distribuição de potência de um canal óptico num determinado ponto da topologia de rede.

A descrição e conteúdo da distribuição do ns-3 que inclui este módulo de WDM podem ser encontrados em [55].

Existe também uma outra distribuição do ns-3, que pode ser encontrada em [56], que inclui alguns componentes de WDM. Não foi usada esta distribuição neste estudo devido ao facto desta não estar integrada com o módulo NetAnim (em detalhe na secção 4.4), o que inviabilizaria a análise de resultados.

Nas próximas secções, serão descritos os modos como cada dispositivo é declarado no programa de simulação e como cada um deles é interligado entre si.

### 4.2.1 helper API WDM

Para se poder interagir com os módulos WDM a melhor forma é através das “helper API (*Application Programming Interface*)” e atributos de cada módulo [57].

As “helper API” disponibilizam um conjunto de classes e métodos que realizam operações comuns mais facilmente do que as APIs de baixo nível. Estas “helper API” consistem em *container objects* e *helper classes*, e são implementadas usando APIs de baixo nível [51].

O módulo WDM define três “helper API”, representadas abaixo, que permitem a interacção com os restantes componentes do módulo.

```
wdm-helper.{cc,h}  
wdm-osa-helper.{cc,h}  
wdm-rwa-helper.{cc,h}
```

Nas secções 4.2.2 à 4.2.9 serão descritos os principais métodos usados na implementação do *script* de simulação.

### 4.2.2 Instalar OXC e MUX/DEMUX

As primeiras quatro linhas da sequência de comandos que se seguem, permitem a criação de seis nós OXC e seis nós MUX/DEMUX. Sobre estes nós serão instalados os dispositivos WDM recorrendo aos comandos *InstallOxcDevice*, *InstallMuxDevice* e *InstallDemuxDevice*.

```
//Criar os Nodes
NodeContainer oxcNodes;
NodeContainer muxNodes;
oxcNodes.Create(6);
muxNodes.Create(6);

// Criar os Device e instala-los nos Nodes
wdmHelper->InstallOxcDevice(oxcNodes);
wdmHelper->InstallMuxDevice(muxNodes);
wdmHelper->InstallDemuxDevice(muxNodes);
```

### 4.2.3 Instalar TxRx DWDM com atribuição de canal DWDM

Para instalar os TxRx DWDM o processo é semelhante à instalação dos OXCs e MUX/DEMUX, mas para este caso é necessário definir o canal a que os dispositivos vão ficar sintonizados. O canal assignado a cada TxRx pertence ao grupo de frequências DWDM atribuídas à Banda-C com espaçamento de 100GHz entre canal (para mais detalhes consultar a secção 2.6).

Na sequência de comandos abaixo, destaca-se o parâmetro `channelID`. Este parâmetro corresponde ao canal a ser atribuído a cada par de TxRx DWDM. O `channelID=1` atribuído ao TxRx-6 e TxRx-9, corresponde à frequência 191.00THz. O `channelID=2` corresponde à frequência 191.10THz e assim por diante, com um espaçamento de 100GHz entre canal.

```
//Criar os Nodes
NodeContainer txRxNodes;
txRxNodes.Create(8);

wdmHelper->SetTxRxDataRate("10Gbps");
wdmHelper->SetTxPower(0.01); //10mW //10dBm

// Criar os Device e instala-los nos Nodes
uint16_t channelID = 1;
wdmHelper->InstallTxRxDevice(txRxNodes.Get(0), channelID);
wdmHelper->InstallTxRxDevice(txRxNodes.Get(3), channelID);
```

```

channelID = 2;
wdmHelper->InstallTxRxDevice(txRxNodes.Get(1), channelID);
wdmHelper->InstallTxRxDevice(txRxNodes.Get(4), channelID);
channelID = 3;
wdmHelper->InstallTxRxDevice(txRxNodes.Get(2), channelID);
wdmHelper->InstallTxRxDevice(txRxNodes.Get(5), channelID);
channelID = 5;
wdmHelper->InstallTxRxDevice(txRxNodes.Get(6), channelID);
wdmHelper->InstallTxRxDevice(txRxNodes.Get(7), channelID);

```

#### 4.2.4 Interligação entre TxRx DWDM e a porta MUX IN e DEMUX OUT

A sequência de comando abaixo permite interligar o TxRx DWDM à porta MUX IN e DEMUX OUT com 5 metros de fibra óptica com atenuação de 0.2dB/km. No processo da função “Connect”, vão ser identificados os portos livres em cada dispositivo e registados os mapeamentos das ligações. Este mapeamento irá criar a topologia de rede e permitir a criação dos caminhos ópticos. À frente neste capítulo irão ser mostradas as ligações para o exemplo de um canal óptico.

```

// Interligar TxRxNode e Mux/Demux
wdmHelper->SetFiberAttribute ("Attenuation", DoubleValue(0.2));
wdmHelper->SetFiberLength(5); //5m

wdmHelper->Connect(txRxNodes.Get(0), muxNodes.Get(0));
wdmHelper->Connect(txRxNodes.Get(1), muxNodes.Get(1));
wdmHelper->Connect(txRxNodes.Get(2), muxNodes.Get(2));
wdmHelper->Connect(txRxNodes.Get(3), muxNodes.Get(3));
wdmHelper->Connect(txRxNodes.Get(4), muxNodes.Get(4));
wdmHelper->Connect(txRxNodes.Get(5), muxNodes.Get(5));
wdmHelper->Connect(txRxNodes.Get(6), muxNodes.Get(0));
wdmHelper->Connect(txRxNodes.Get(7), muxNodes.Get(4));

```

#### 4.2.5 Interligação das portas MUX OUT e DEMUX IN com o OXC

A lista de instruções abaixo segue o mesmo propósito que o ponto anterior, interligar as portas MUX OUT e DEMUX IN ao OXC com 5 metros de fibra óptica com atenuação de 0.2dB/km.

```

// Interligar Mux/Demux e OXC
wdmHelper->SetFiberAttribute ("Attenuation", DoubleValue(0.2));
wdmHelper->SetFiberLength(5); //5m

```

```
wdmHelper->Connect(muxNodes.Get(0), oxcNodes.Get(0));
wdmHelper->Connect(muxNodes.Get(1), oxcNodes.Get(1));
wdmHelper->Connect(muxNodes.Get(2), oxcNodes.Get(2));
wdmHelper->Connect(muxNodes.Get(3), oxcNodes.Get(3));
wdmHelper->Connect(muxNodes.Get(4), oxcNodes.Get(4));
wdmHelper->Connect(muxNodes.Get(5), oxcNodes.Get(5));
```

Na Figura 4.2 está representado o diagrama de interligações entre o TxRx e a porta MUX IN e DEMUX OUT, bem como a interligação entre o MUX OUT e o DEMUX IN com o OXC num dos extremos do channelID=1.

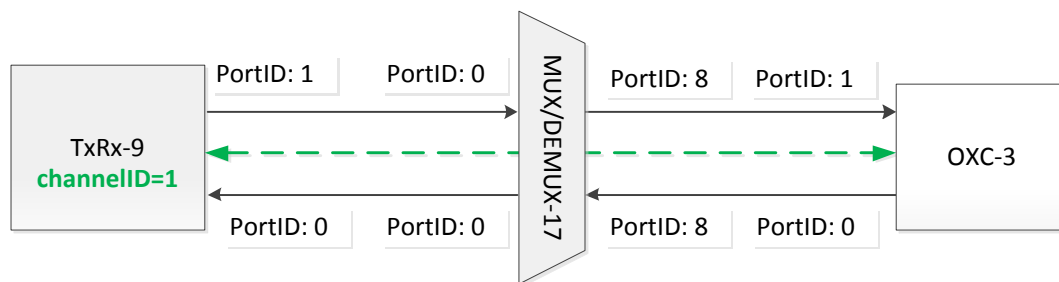


Figura 4.2 - Diagrama de interligações entre TxRx, Mux/Demux e OXC.

#### 4.2.6 Interligação entre OXCs

A lista de comandos que se segue permite interligar os OXC entre si de modo a criar uma topologia de rede. A topologia representada pela Figura 4.3 é composta por seis OXCs distanciados entre si por 20km de fibra óptica com atenuação de 0.2dB/km.

```
// Interligar OxcNode a OxcNode
wdmHelper->SetFiberAttribute ("Attenuation", DoubleValue(0.2));
wdmHelper->SetFiberLength(20000); //20km

wdmHelper->Connect(oxcNodes.Get(0), oxcNodes.Get(1));
wdmHelper->Connect(oxcNodes.Get(1), oxcNodes.Get(2));
wdmHelper->Connect(oxcNodes.Get(2), oxcNodes.Get(3));
wdmHelper->Connect(oxcNodes.Get(3), oxcNodes.Get(4));
wdmHelper->Connect(oxcNodes.Get(4), oxcNodes.Get(5));
wdmHelper->Connect(oxcNodes.Get(5), oxcNodes.Get(0));
wdmHelper->Connect(oxcNodes.Get(1), oxcNodes.Get(5));
wdmHelper->Connect(oxcNodes.Get(2), oxcNodes.Get(4));
```

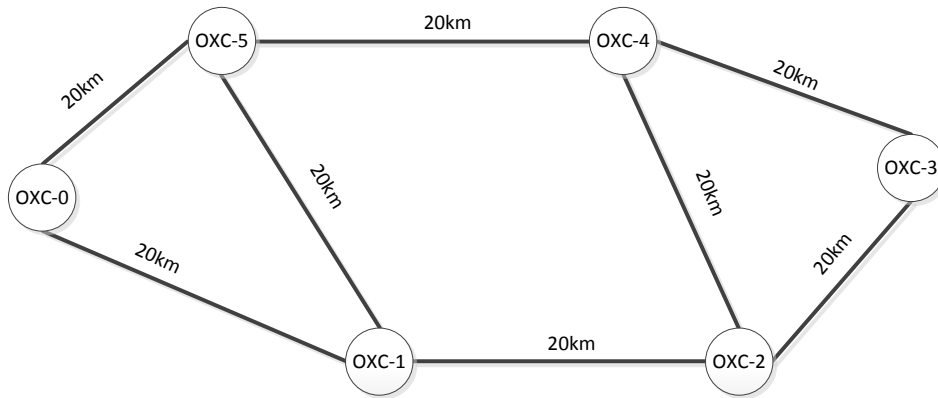


Figura 4.3 - Topologia de rede WDM em estudo.

### 4.2.7 RWA – Cálculo do caminho óptico

O cálculo do caminho óptico dentro da topologia de rede é realizado pelo algoritmo Dijkstra e tem como métrica o número mínimo de saltos entre a origem e o destino. O índice do algoritmo é o nodeID atribuído a cada OXC. Tendo como exemplo a Figura 4.3, existem dois caminhos com o mesmo número de saltos entre o OXC-0 e OXC-3. O caminho preferido pelo algoritmo RWA é o OXC-0 -> OXC-1 -> OXC-2 -> OXC-3 porque os nodeID atribuídos (OXC-0, o nodeID é o 0) são inferiores aos nodeID dos OXCs do caminho alternativo. Isto significa que a distância entre cada OXC não é tomada em consideração para o cálculo do caminho entre dois TxRx. A instrução InstallPaths vai validar a existência do canal a encaminhar em cada OXC e preencher a tabela de comutação óptica. Isto permite que no final, cada OXC saiba como comutar cada comprimento de onda.

```
// Instalar caminho óptico entre TxRx

NetDeviceContainer d0d3 = wdmRwaHelper->InstallPaths(txRxNodes.Get(0),
txRxNodes.Get(3));
NetDeviceContainer d1d4 = wdmRwaHelper->InstallPaths(txRxNodes.Get(1), txRxNodes.Get(4));
NetDeviceContainer d2d5 = wdmRwaHelper->InstallPaths(txRxNodes.Get(2),
txRxNodes.Get(5));
NetDeviceContainer d6d7 = wdmRwaHelper->InstallPaths(txRxNodes.Get(6),
txRxNodes.Get(7));
```

### 4.2.8 Instalação de OSA

O módulo WDM permite também instalar um OSA entre dois dispositivos para analisar os canais DWDM. O código seguinte permite interligar dois OSAs na fibra óptica entre o `oxcNodes.Get(4)` e o `oxcNodes.Get(5)`. O terceiro parâmetro da função `InstallOsaDevice` indica o extremo onde o OSA deve ser instalado.

```
//Instalar Optical Spectrum Analyzer
Ptr<WdmOsaHelper> osaHelper = wdmHelper->GetOsaHelper();
osaHelper->EnableAsciiAll("osa");
osaHelper->SetResolution (Milliseconds (100));
osaHelper->SetNoiseFigure(1e-17); //-170 dBm/Hz
osaHelper->InstallOsaDevice(oxcNodes.Get(4)->GetDevice(0), oxcNodes.Get(5)-
>GetDevice(0), 0);
osaHelper->InstallOsaDevice(oxcNodes.Get(4)->GetDevice(0), oxcNodes.Get(5)-
>GetDevice(0), 1);
```

### 4.2.9 Stack de internet para teste de conectividade

Para testar a conectividade entre cada TxRx DWDM foi instalada uma *stack* de internet para simular um serviço IP sobre WDM. Desta forma foi possível representar um serviço IP usando os canais ópticos implementados no cenário em estudo. Para isso, foi instalado um cliente e um servidor UDP (*User Datagram Protocol*), um em cada extremo do canal, de modo a simular a troca de pacotes entre os dois TxRx.

Na sequência de comandos que se seguem, foram definidos tempos diferentes para a simulação da conectividade IP de cada canal. Isto permite diferenciar de forma mais simples a comunicação dentro de cada canal.

O atributo “MaxPackets” representa o número de pacotes que será permitido enviar durante a simulação. O atributo “Interval” indica quanto tempo tem de esperar entre pacotes, e o atributo “PacketSize” diz respeito ao tamanho do *payload* que o pacote deve ter.

```
//Instalar InternetStack
InternetStackHelper stack;
stack.Install(txRxNodes);

//Assignar IP addresses
Ipv4AddressHelper address;
address.SetBase("10.1.1.0", "255.255.255.0");
Ipv4InterfaceContainer i0i3 = address.Assign(d0d3);
```

```

address.NewNetwork();
Ipv4InterfaceContainer i1i4 = address.Assign(d1d4);
address.NewNetwork();
Ipv4InterfaceContainer i2i5 = address.Assign(d2d5);
address.NewNetwork();
Ipv4InterfaceContainer i6i7 = address.Assign(d6d7);

//Application-1
UdpEchoServerHelper echoServer (9);
ApplicationContainer serverApps = echoServer.Install (txRxNodes);
serverApps.Start (Seconds (1.0));
serverApps.Stop (Seconds (1.046));

UdpEchoClientHelper echoClient (i0i3.GetAddress (1), 9);
echoClient.SetAttribute ("MaxPackets", UIntegerValue (1));
echoClient.SetAttribute ("Interval", TimeValue (Seconds (1.0)));
echoClient.SetAttribute ("PacketSize", UIntegerValue (1024));

ApplicationContainer clientApps = echoClient.Install (txRxNodes.Get (0));
clientApps.Start (Seconds (1.002));

echoClient.SetAttribute ("RemoteAddress", AddressValue (i1i4.GetAddress
(1)));
echoClient.SetAttribute ("RemotePort", UIntegerValue (9));
echoClient.SetAttribute ("MaxPackets", UIntegerValue (1));
echoClient.SetAttribute ("Interval", TimeValue (Seconds (1.0)));
Ptr<Application> app = echoClient.Install (txRxNodes.Get (1)).Get(0);
app->SetStartTime(Seconds (1.004));
clientApps.Add(app);

echoClient.SetAttribute ("RemoteAddress", AddressValue (i2i5.GetAddress
(1)));
echoClient.SetAttribute ("RemotePort", UIntegerValue (9));
echoClient.SetAttribute ("MaxPackets", UIntegerValue (1));
echoClient.SetAttribute ("Interval", TimeValue (Seconds (1.0)));
Ptr<Application> app2 = echoClient.Install (txRxNodes.Get (2)).Get(0);
app2->SetStartTime(Seconds (1.006));
clientApps.Add(app2);

echoClient.SetAttribute ("RemoteAddress", AddressValue (i6i7.GetAddress
(1)));
echoClient.SetAttribute ("RemotePort", UIntegerValue (9));
echoClient.SetAttribute ("MaxPackets", UIntegerValue (1));
echoClient.SetAttribute ("Interval", TimeValue (Seconds (1.0)));
Ptr<Application> app3 = echoClient.Install (txRxNodes.Get (6)).Get(0);
app3->SetStartTime(Seconds (1.008));
clientApps.Add(app3);

clientApps.Stop (Seconds (1.046));
Ipv4GlobalRoutingHelper::PopulateRoutingTables();

```

## 4.3 *Script* de Simulação

Com base nos métodos disponibilizados pelo módulo WDM, foi criado o *script* de simulação para testar uma rede de core óptica WDM em três ambientes de falha. Desta forma, foi possível estudar o comportamento do algoritmo RWA no reenaminhamento dos canais afectados para um caminho alternativo.

### 4.3.1 *Boilerplate*

O *script* de simulação começa com os seguintes comandos: a primeira linha permite aos editores emacs<sup>1</sup> identificarem o formato do código correctamente. As linhas seguintes garantem que o código está licenciado pela GPLv2.

```
/* -*- Mode:C++; c-file-style:"gnu"; indent-tabs-mode:nil;-*- */
/*
 * Copyright (c) YEAR COPYRIGHTHOLDER
 *
 * This program is free software; you can redistribute it and/or modify
 * it under the terms of the GNU General Public License version 2 as
 * published by the Free Software Foundation;
 *
 * This program is distributed in the hope that it will be useful,
 * but WITHOUT ANY WARRANTY; without even the implied warranty of
 * MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. See the
 * GNU General Public License for more details.
 *
 * You should have received a copy of the GNU General Public License
 * along with this program; if not, write to the Free Software
 * Foundation, Inc., 59 Temple Place, Suite 330, Boston, MA 02111-1307 USA
 */
```

### 4.3.2 Módulos incluídos e *namespace*

No *script* de simulação devem ser incluídos todos os módulos bem como a declaração do *namespace*. O projecto ns-3 está implementado num *namespace* C++ denominado de *ns3*.

---

<sup>1</sup> Editores emacs são editores de texto customizáveis e extensíveis [60].



```
#include "ns3/core-module.h"
#include "ns3/network-module.h"
#include "ns3/mobility-module.h"
#include "ns3/wdm-module.h"
#include "ns3/ipv4-global-routing-helper.h"
#include "ns3/internet-module.h"
#include "ns3/applications-module.h"
#include "ns3/config-store.h"
#include "ns3/netanim-module.h"
#include "ns3/point-to-point-helper.h"
#include <ns3/log.h>

using namespace ns3;
```

### 4.3.3 Função principal

A estrutura da função principal do *script* é composta pelas seguintes premissas:

```
int main (int argc, char *argv[])
{
// Definir o valor de default dos atributos
// Componente de Log
// Configurar a topologia; nodes, canais, devices e mobilidade
// Adicionar a Internet stack aos nodes
// Configurar os endereços IP
// Adicionar e configurar as aplicações
// Objecto de animação (NetAnim)
// Correr a simulação
}
```

#### 4.3.3.1 Componente de log

Dentro da função principal e a seguir à definição dos valores de *default* dos atributos, deve ser definida a componente de log. Durante a execução do *script* de simulação o *output* dos logs é enviado para a *prompt*, permitindo com isso recolher toda a informação relevante para análise.

```
LogLevel logLevel = (LogLevel)(LOG_PREFIX_ALL | LOG_ALL);
LogComponentEnable ("UdpEchoClientApplication", logLevel);
LogComponentEnable ("UdpEchoServerApplication", logLevel);
LogComponentEnable ("WdmTxRxSpectrumPhy", logLevel);
LogComponentEnable ("WdmFiberChannel", logLevel);
LogComponentEnable ("WdmSpectrumPhy", logLevel);
LogComponentEnable ("WdmHelper", logLevel);
LogComponentEnable ("WdmOsaHelper", logLevel);
LogComponentEnable ("SpectrumValue", logLevel);
LogComponentEnable ("WdmRwaAlgorithmSpf", logLevel);
```

### 4.3.3.2 Topologia

A topologia do cenário em estudo deve ser criada com base nos métodos disponibilizados pelo módulo WDM, que se encontram descritos na secção 4.2. Outros métodos devem ser também usados para completar o cenário topológico, nomeadamente o `MobilityModel` que irá definir a posição dos nós com base em posições cartesianas.

```
// Instalar a mobilidade
Ptr<ListPositionAllocator> positionAlloc =
CreateObject<ListPositionAllocator>();

//Posição dos nodes OXC
positionAlloc->Add(Vector(50, 25, 0));
positionAlloc->Add(Vector(135, 50, 0));
positionAlloc->Add(Vector(220, 50, 0));
positionAlloc->Add(Vector(275, 25, 0));
positionAlloc->Add(Vector(185, 00, 0));
positionAlloc->Add(Vector(100, 00, 0));

//Posição dos nodes TXRX
positionAlloc->Add(Vector(35, 125, 0));
positionAlloc->Add(Vector(135, 150, 0));
positionAlloc->Add(Vector(220, 150, 0));
positionAlloc->Add(Vector(275, 125, 0));
positionAlloc->Add(Vector(175, 100, 0));
positionAlloc->Add(Vector(100, 100, 0));
positionAlloc->Add(Vector(65, 125, 0));
positionAlloc->Add(Vector(200, 100, 0));

// Posição dos nodes Mux/DeMux
positionAlloc->Add(Vector(50, 75, 0));
positionAlloc->Add(Vector(135, 100, 0));
positionAlloc->Add(Vector(220, 100, 0));
positionAlloc->Add(Vector(275, 75, 0));
positionAlloc->Add(Vector(185, 60, 0));
positionAlloc->Add(Vector(100, 60, 0));

MobilityHelper mobility;
mobility.SetMobilityModel("ns3::ConstantPositionMobilityModel");
mobility.SetPositionAllocator(positionAlloc);
mobility.Install(oxcNodes);
mobility.Install(txRxNodes);
mobility.Install(muxNodes);
```

### 4.3.3.3 Objecto animação

A sequência de código abaixo representado diz respeito à implementação do objecto de animação. Os *traces* da simulação são guardados num XML *trace files*

com o nome `animation.xml`, que posteriormente irá ser usado pela aplicação `NetAnim`.

```
// Nome do ficheiro do output da animação
std::string animFile = "animation.xml" ;

// Criar o animation object e configurar para o output específico
pAnim = new AnimationInterface (animFile);
```

#### 4.3.3.4 Simulação

Para correr a simulação deve ser usada a função global `Simulator::Run()`. Quando esta função é invocada, o sistema vai identificar e executar a lista de eventos programados. Na secção 4.2.9, quando se invocou os métodos representados abaixo, o que se estava a fazer na realidade era programar os eventos de simulação.

```
serverApps.Start (Seconds (1.0));
serverApps.Stop (Seconds (1.046));
...
clientApps.Start (Seconds (1.002));
clientApps.Stop (Seconds (1.046));
```

O envio de um pacote do cliente UDP para o servidor UDP, irá desencadear uma lista de eventos que serão automaticamente programados e que irão executar a mecânica do pacote de *echo* de acordo com os vários parâmetros temporais que foram definidos no *script*. Uma vez que, no cenário definido na secção 4.2.9, o atributo “MaxPackets” está definido como 1, a cadeia de eventos desencadeada após este único *client echo request* será um único *server echo replay*.

Na secção 4.4 estão representadas as sequências de eventos UDP geradas pela aplicação `UdpEchoServer` e `UdpEchoClient` para o exemplo do canal com o `ID=1`.

#### 4.3.4 Compilar e correr o *script* de simulação

O comando que se segue permite compilar e correr o *script* de simulação. O *output* gerado pela componente de log será armazenado no ficheiro “`DEBUG.out`” para análise de resultados. Estes resultados serão analisados e explicados em detalhe na secção 4.5.

```
./waf --run scratch/simulation/simulation > DEBUG.out 2>&1
```

## 4.4 NetAnim

O módulo WDM está integrado com o NetAnim. O NetAnim é um programa *standalone* que usa *XML trace files* gerados pela interface de animação para representar a topologia e o fluxo de pacotes entre os nós. Este programa é baseado em multi-plataforma Qt4 GUI *toolkit* [57]. A versão usada na dissertação foi a 3.105, que vem integrada na distribuição ns-3.22 publicada a 23 de Fevereiro de 2015.

O resultado da leitura do ficheiro *animation.xml* gerado pelo *script* de simulação no NetAnim encontra-se representado na Figura 4.4, Figura 4.5 e Figura 4.6.

Na *tab Animation*, como representado pela Figura 4.4, é possível visualizar a topologia e correr a simulação. Neste ambiente é possível ver de forma animada a o fluxo de pacotes entre os pares de internet *devices* instalados por canal.

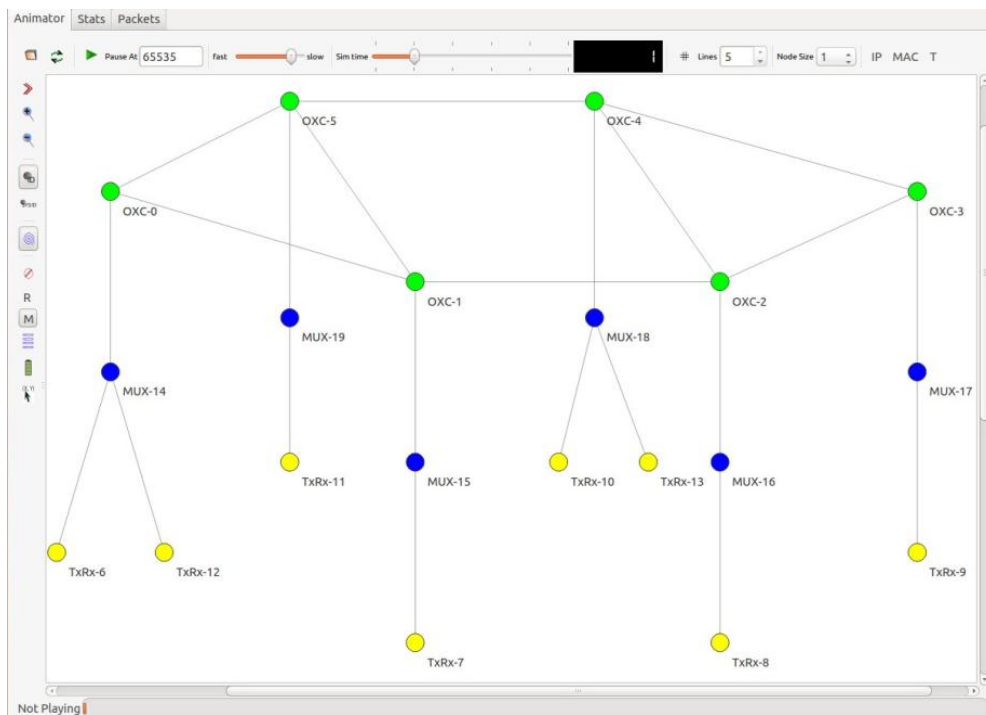


Figura 4.4 - Topologia em estudo representada no NetAnim.

Na *tab Stats*, é possível verificar o endereço MAC (*Medium Access Control*) e IP atribuído a cada internet *device*. Como na topologia em estudo existem quatro canais ópticos, na Figura 4.5 é possível identificar o par de endereços MAC e IP atribuídos a cada um dos canais.

9	6	Node:7	Node:8	Node:9
10	1.1.1	IP:10.1.2.1	IP:10.1.3.1	IP:10.1.1.2
11	00:00:00:00:00:01	MAC:00:00:00:00:00:03	MAC:00:00:00:00:00:05	MAC:00:00:00:00:00:02
12	10	Node:11	Node:12	Node:13
13	1.2.2	IP:10.1.3.2	IP:10.1.4.1	IP:10.1.4.2
14	00:00:00:00:00:04	MAC:00:00:00:00:00:06	MAC:00:00:00:00:00:07	MAC:00:00:00:00:00:08

Figura 4.5 - Endereços IP e MAC atribuídos a cada *device* de internet instalado nos TxRx DWDM.

Na Figura 4.7 está representado o fluxo de pacotes `UdpEchoClient` e `UdpEchoServer` entre o cliente e o servidor UDP recolhido no *output* da componente de log do UDP. O cliente e servidor UDP estão instalados no TxRx-6 (NodeID-6) e no TxRx-9 (NodeId-9), respectivamente. O mesmo fluxo de pacotes é também possível ser visualizado no *tab Packets* do NetAnim, como representado na Figura 4.6.

```

1.002s 6 UdpEchoClientApplication:Send(): [INFO ] At time 1.002s client sent 1024 bytes to 10.1.1.2 port 9
1.0023s 9 UdpEchoServerApplication:HandleRead(): [INFO ] At time 1.0023s server received 1024 bytes from 10.1.1.1 port 49153
1.0023s 9 UdpEchoServerApplication:HandleRead(): [LOGIC ] Echoing packet
1.0023s 9 UdpEchoServerApplication:HandleRead(): [LOGIC ] Echoing packet
1.0023s 9 UdpEchoServerApplication:HandleRead(): [INFO ] At time 1.0023s server sent 1024 bytes to 10.1.1.1 port 49153
1.0026s 6 UdpEchoClientApplication:HandleRead(): [INFO ] At time 1.0026s client received 1024 bytes from 10.1.1.2 port 9
    
```

Figura 4.7 - Fluxo de pacotes `UdpEchoClient` e `UdpEchoServer` entre o internet device instalado no TxRx-6 e TxRx-9 recolhidos nos logs de output.

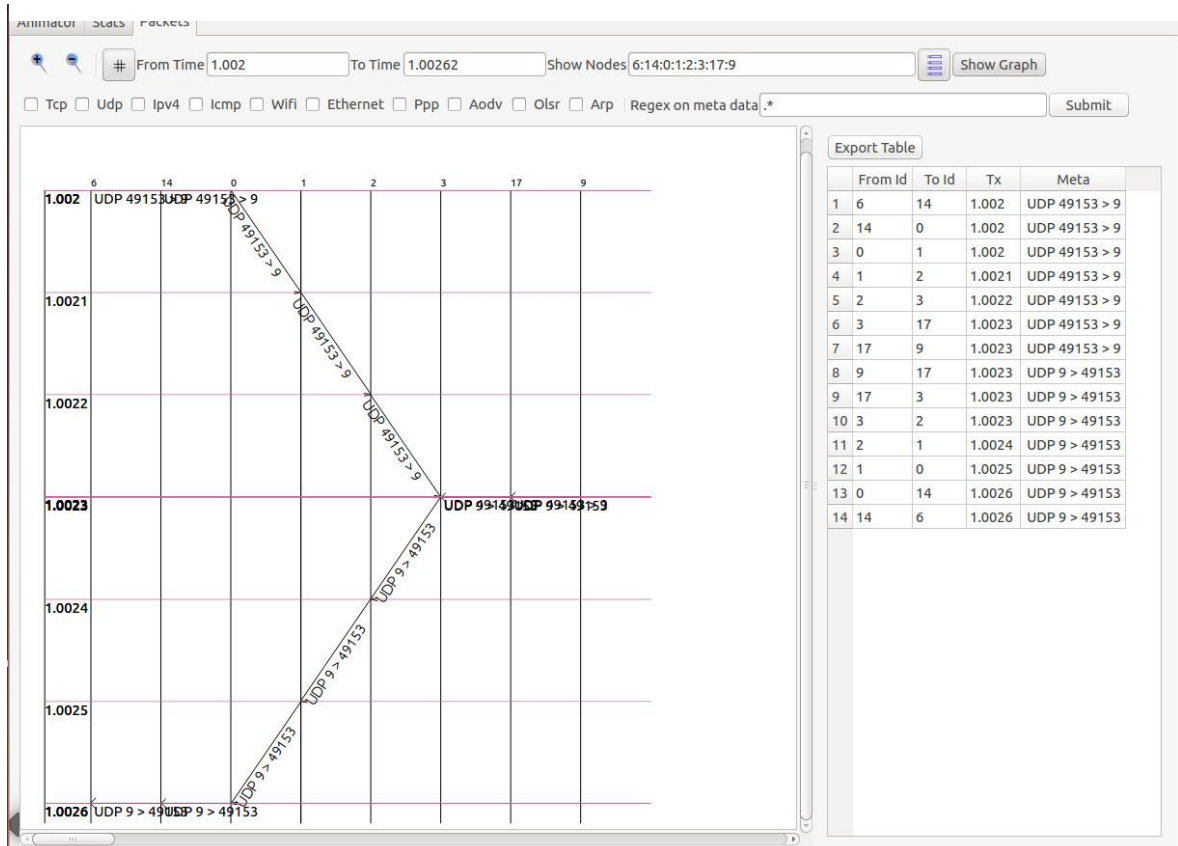


Figura 4.6 - Fluxo de pacotes `UdpEchoClient` e `UdpEchoServer` entre o internet device instalado no TxRx-6 e TxRx-9 representados no NetAnim.

## 4.5 Resultados

As secções subjacentes têm como finalidade apresentar os resultados práticos em estudo nesta dissertação. Numa primeira fase, com base na análise dos *outputs* da componente de log, é feita a representação topológica de ligações de fibra óptica entre os dispositivos WDM.

De seguida, na secção 4.5.2, é feita uma representação detalhada das ligações físicas de cada equipamento WDM por onde é encaminhado o canal DWDM ID-1.

São também apresentadas as tabelas de cálculo do canal bem como a tabela de comutação de comprimentos de onda para todos os OXCs numa topologia sem falha.

Foram feitas medidas de PSD (*Power Spectral Density*) em alguns *links* para confirmar a existências dos canais. O equipamento de medida usado para o efeito foi o OSA, com uma largura de banda de resolução de 2GHz.

São estudados e analisados os mesmos tipo de resultados para três cenários de falha: Falha no *link* entre o OXC-1 e OXC-2; Falha nos *links*, entre o OXC-0 e OXC-5, OXC-2 e OXC-3 e OXC-4 e OXC-5; e Falha no OXC-2, que se encontram respectivamente nas secções 4.5.3, 4.5.4, e 4.5.5.

### 4.5.1 Ligações de fibra óptica entre dispositivos WDM

A Figura 4.8 representa o mapeamento topológico das ligações de fibra óptica entre todos os dispositivos WDM. Estão identificados os dispositivos com o respectivo *nodeID* e os portos de interligação entre eles. Esta representação permite ter uma visão global da topologia em estudo bem como o encaminhamento dos quatro canais num ambiente sem falhas.

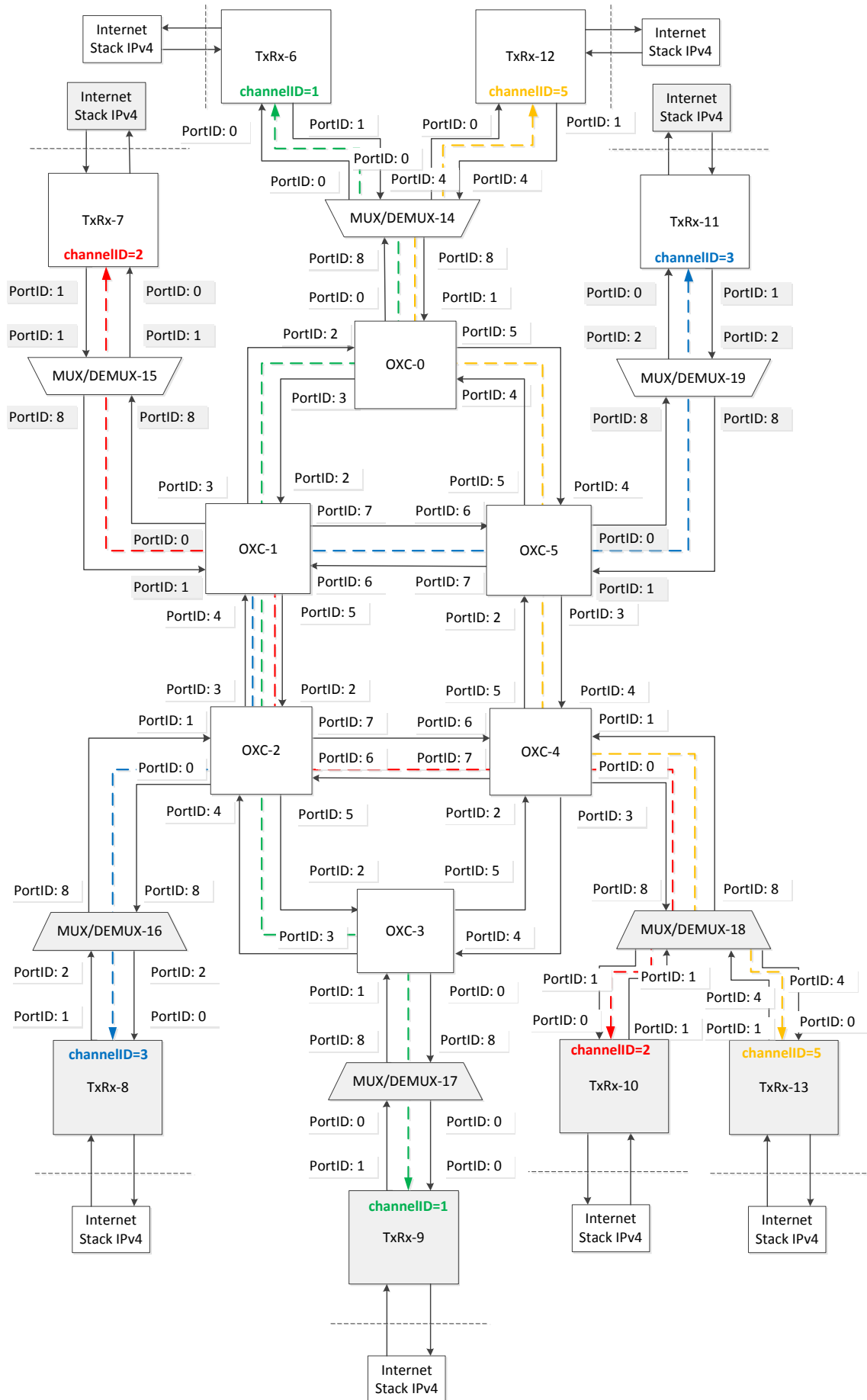


Figura 4.8 - Representação do mapeamento topológico das ligações de fibra óptica entre todos os dispositivos WDM da topologia e canais DWDM.

### 4.5.2 Simulação sem falhas na topologia de rede

A Figura 4.9 representa a topologia de rede sem falhas. Nas secções subjacentes serão mostradas em detalhe o conjunto de ligações de fibra óptica entre os equipamentos WDM por onde é encaminhado o canal DWDM ID-1. São apresentados também os resultados do cálculo do canal óptico, incluindo os *pathloss*, e as tabelas de comutação de comprimentos de onda de todos os OXC da rede. Foram realizadas medidas ópticas nos *links* entre o OXC-1 e o OXC-2, e o OXC-5 e o OXC-0, para confirmar a existências dos canais.

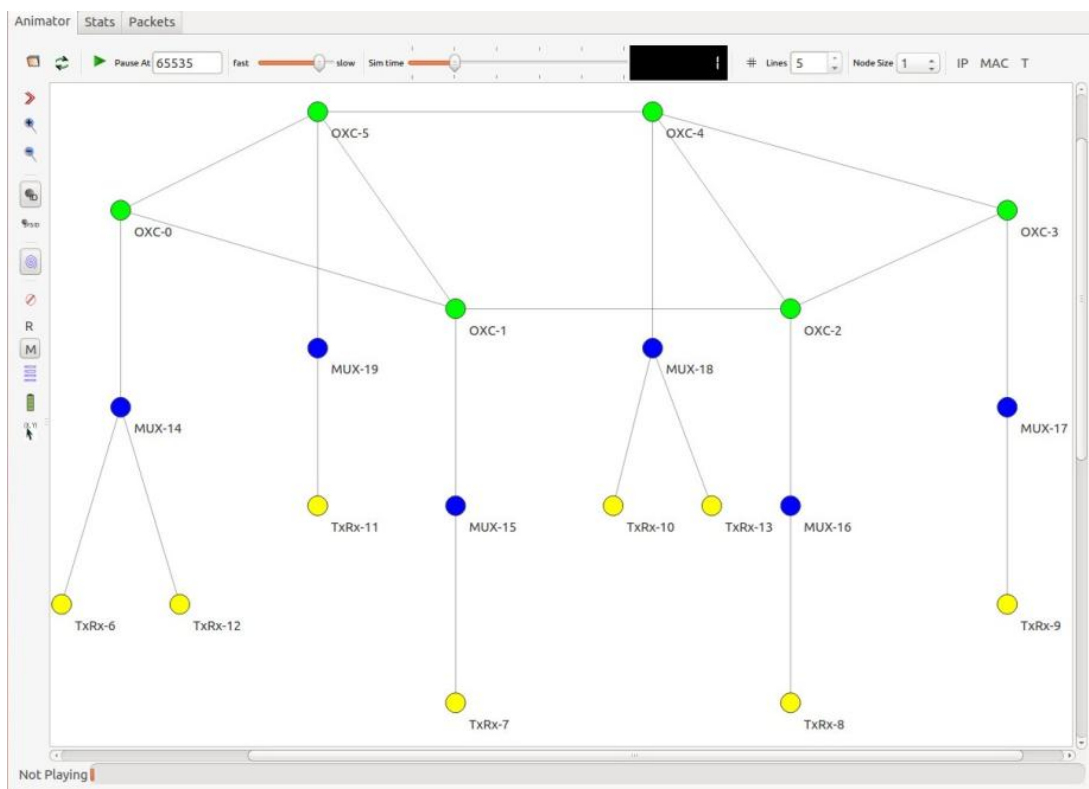


Figura 4.9 - Simulação sem falhas na topologia de rede.

#### 4.5.2.1 Interligações entre dispositivos WDM para o exemplo do canal DWDM com o ID-1

Figura 4.10 e Figura 4.11 representam os detalhes das ligações entre os dispositivos WDM por onde é encaminhado o canal DWDM com o ID-1, num ambiente sem falhas na topologia de rede.



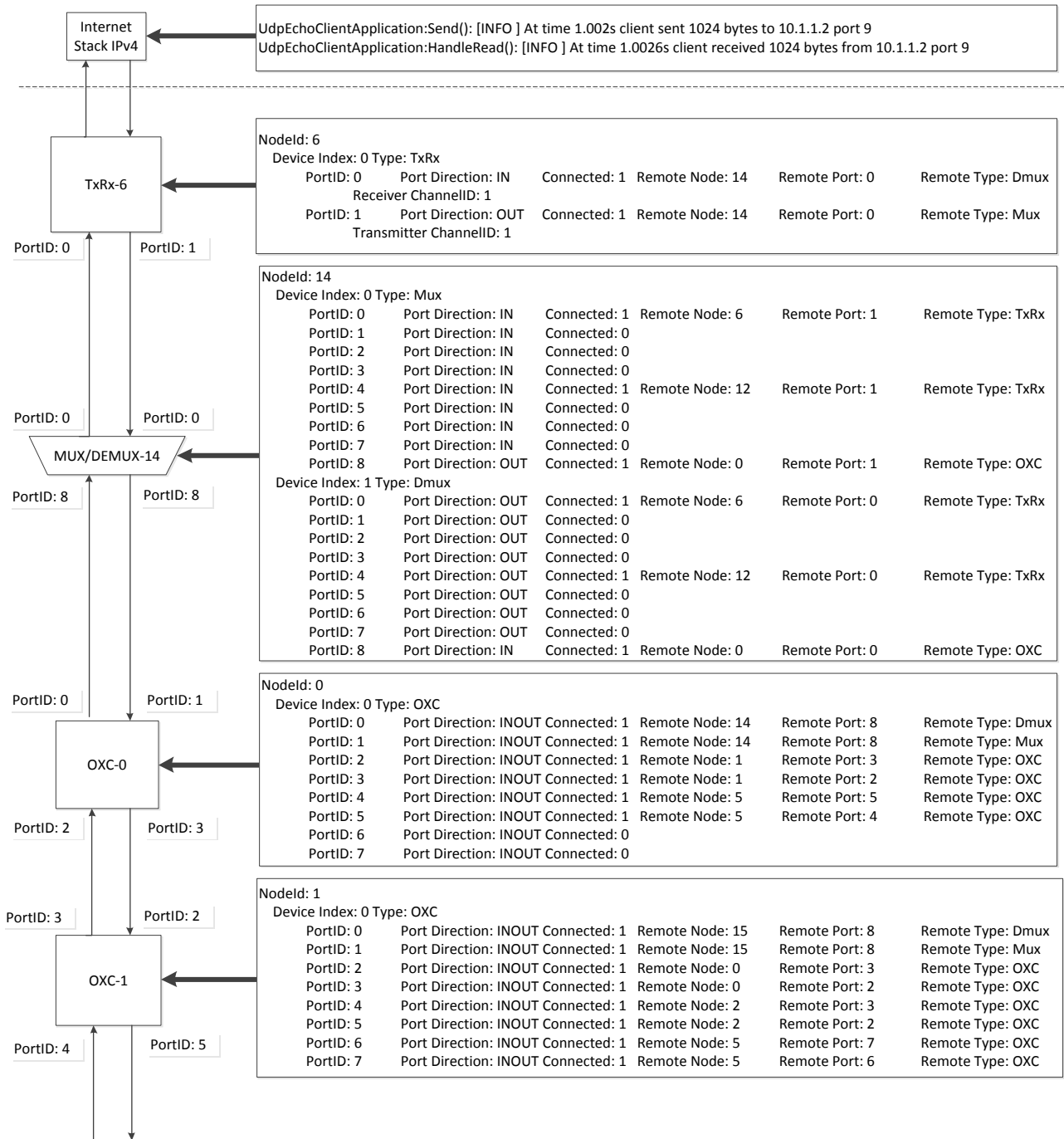


Figura 4.10 - Diagrama de fluxo para o canal DWDM com o ID-1.

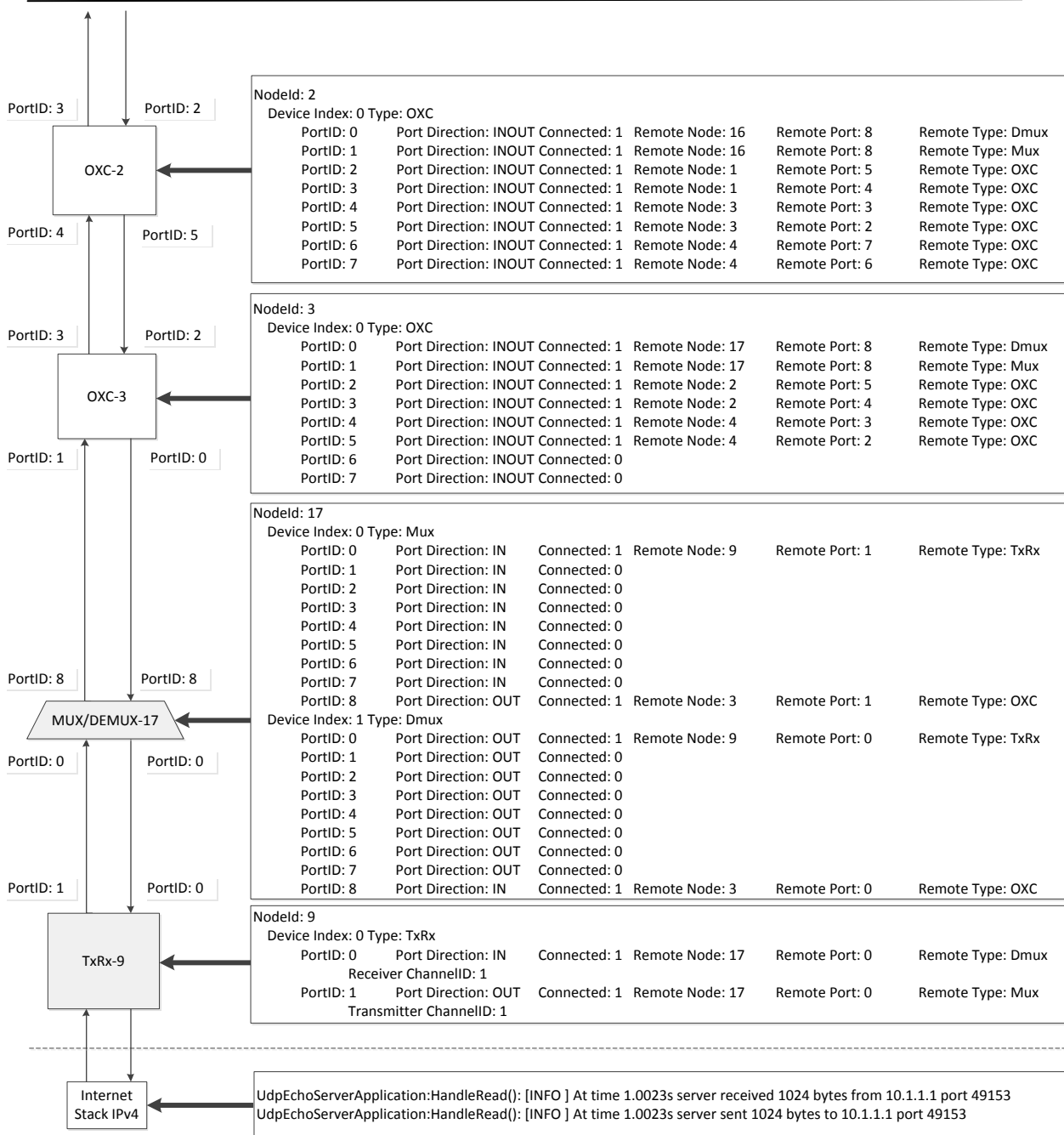


Figura 4.11 – Continuação do diagrama de fluxo para o canal DWDM com o ID-1.

#### 4.5.2.2 Cálculo de canal

Como referido anteriormente na secção 4.2.7, o algoritmo RWA usado no simulador calcula o caminho dos canais com base no algoritmo Dijkstra. Este algoritmo é usado para calcular o canal com o caminho mais curto, tendo como métrica o número de saltos. A Tabela 4.1 e Tabela 4.2 resumizam as ligações de fibra óptica usadas pelo canal DWDM ID-1 no sentido TxRx-6 > TxRx-9 e TxRx-9 >

TxRx-6, respectivamente. É possível identificar todos os elementos WDM e todos os portos usados pelo canal ao longo do caminho óptico.

```
Optical Path Src: 6:0--->9:0
Fibers Num: 7 Node Configuration Num: 8
Used Fibers :
  NodeID: 6 Type: TxRx DevID: 0 PortID: 1 Dir: OUT --> NodeID: 14 Type: Mux DevID: 0 PortID: 0 Dir: IN Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
  NodeID: 14 Type: Mux DevID: 0 PortID: 8 Dir: OUT --> NodeID: 0 Type: OXC DevID: 0 PortID: 1 Dir: INOUT Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
  NodeID: 0 Type: OXC DevID: 0 PortID: 3 Dir: INOUT --> NodeID: 1 Type: OXC DevID: 0 PortID: 2 Dir: INOUT Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
  NodeID: 1 Type: OXC DevID: 0 PortID: 5 Dir: INOUT --> NodeID: 2 Type: OXC DevID: 0 PortID: 2 Dir: INOUT Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
  NodeID: 2 Type: OXC DevID: 0 PortID: 5 Dir: INOUT --> NodeID: 3 Type: OXC DevID: 0 PortID: 2 Dir: INOUT Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
  NodeID: 3 Type: OXC DevID: 0 PortID: 0 Dir: INOUT --> NodeID: 17 Type: Dmux DevID: 1 PortID: 8 Dir: IN Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
  NodeID: 17 Type: Dmux DevID: 1 PortID: 0 Dir: OUT --> NodeID: 9 Type: TxRx DevID: 0 PortID: 0 Dir: IN Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

Node Configuration:
Node: 6 DevType: TxRx Operation: TX OutPort: 1 OutChannelID: 1
Node: 14 DevType: Mux Operation: U InPort: 0 InChannelID: 1 OutPort: 8 OutChannelID: 1
Node: 0 DevType: OXC Operation: SW InPort: 1 InChannelID: 1 OutPort: 3 OutChannelID: 1
Node: 1 DevType: OXC Operation: SW InPort: 2 InChannelID: 1 OutPort: 5 OutChannelID: 1
Node: 2 DevType: OXC Operation: SW InPort: 2 InChannelID: 1 OutPort: 5 OutChannelID: 1
Node: 3 DevType: OXC Operation: SW InPort: 2 InChannelID: 1 OutPort: 0 OutChannelID: 1
Node: 17 DevType: Mux Operation: U InPort: 8 InChannelID: 1 OutPort: 0 OutChannelID: 1
Node: 9 DevType: TxRx Operation: RX InPort: 0 InChannelID: 1
```

Tabela 4.1 - Cálculo do canal DWDM ID-1 no sentido TxRx-6 >TxRx-9 num ambiente sem falhas.

```
Optical Path Src: 9:0--->6:0
Fibers Num: 7 Node Configuration Num: 8
Used Fibers :
  NodeID: 9 Type: TxRx DevID: 0 PortID: 1 Dir: OUT --> NodeID: 17 Type: Mux DevID: 0 PortID: 0 Dir: IN Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
  NodeID: 17 Type: Mux DevID: 0 PortID: 8 Dir: OUT --> NodeID: 3 Type: OXC DevID: 0 PortID: 1 Dir: INOUT Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
  NodeID: 3 Type: OXC DevID: 0 PortID: 3 Dir: INOUT --> NodeID: 2 Type: OXC DevID: 0 PortID: 4 Dir: INOUT Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
  NodeID: 2 Type: OXC DevID: 0 PortID: 3 Dir: INOUT --> NodeID: 1 Type: OXC DevID: 0 PortID: 4 Dir: INOUT Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
  NodeID: 1 Type: OXC DevID: 0 PortID: 3 Dir: INOUT --> NodeID: 0 Type: OXC DevID: 0 PortID: 2 Dir: INOUT Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
  NodeID: 0 Type: OXC DevID: 0 PortID: 0 Dir: INOUT --> NodeID: 14 Type: Dmux DevID: 1 PortID: 8 Dir: IN Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
  NodeID: 14 Type: Dmux DevID: 1 PortID: 0 Dir: OUT --> NodeID: 6 Type: TxRx DevID: 0 PortID: 0 Dir: IN Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

Node Configuration:
Node: 9 DevType: TxRx Operation: TX OutPort: 1 OutChannelID: 1
Node: 17 DevType: Mux Operation: U InPort: 0 InChannelID: 1 OutPort: 8 OutChannelID: 1
Node: 3 DevType: OXC Operation: SW InPort: 1 InChannelID: 1 OutPort: 3 OutChannelID: 1
Node: 2 DevType: OXC Operation: SW InPort: 4 InChannelID: 1 OutPort: 3 OutChannelID: 1
Node: 1 DevType: OXC Operation: SW InPort: 4 InChannelID: 1 OutPort: 3 OutChannelID: 1
Node: 0 DevType: OXC Operation: SW InPort: 2 InChannelID: 1 OutPort: 0 OutChannelID: 1
Node: 14 DevType: Mux Operation: U InPort: 8 InChannelID: 1 OutPort: 0 OutChannelID: 1
Node: 6 DevType: TxRx Operation: RX InPort: 0 InChannelID: 1
```

Tabela 4.2 - Cálculo do canal DWDM ID-1 no sentido TxRx-9 >TxRx-6 num ambiente sem falhas.

### 4.5.2.3 Pathloss do canal DWDM ID-1

A Tabela 4.3 representa a potência de transmissão, *pathloss* e a potência de recepção para o exemplo do canal DWDM ID-1. O *pathloss* de cada troço de fibra óptica é calculado com base na multiplicação do valor do comprimento da fibra em km, com o valor das perdas (db/km) da fibra óptica. Os valores de potência de transmissão e recepção são calculados com base no valor da densidade espectral de potência do canal DWDM.

<p>Potência de transmissão do TxRx-6 1.002s 6 WdmTxRxSpectrumPhy:StartTx(): [LOGIC] 0x90972a0 tx power: 17.9703 dBm</p> <p>Pathloss e entre o TxRx-6 e o Mux-14 (5m) 1.002s 6 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] propagationGainDb = 0.001 dB 1.002s 6 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] total pathLoss = 0.001 dB 1.002s 6 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] pathGainLinear: 0.99977</p> <p>Pathloss e entre o Mux-14 e o OXC-0 (5m) 1.002s 14 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] propagationGainDb = 0.001 dB 1.002s 14 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] total pathLoss = 0.001 dB 1.002s 14 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] pathGainLinear: 0.99977</p> <p>Pathloss e entre o OXC-0 e o OXC-1 (20km) 1.002s 0 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] propagationGainDb = 4 dB 1.002s 0 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] total pathLoss = 4 dB 1.002s 0 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] pathGainLinear: 0.398107</p> <p>Pathloss e entre o OXC-1 e o OXC-2 (20km) 1.0021s 1 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] propagationGainDb = 4 dB 1.0021s 1 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] total pathLoss = 4 dB 1.0021s 1 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] pathGainLinear: 0.398107</p>	<p>Pathloss e entre o OXC-2 e o OXC-3 (20km) 1.0022s 2 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] propagationGainDb = 4 dB 1.0022s 2 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] total pathLoss = 4 dB 1.0022s 2 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] pathGainLinear: 0.398107</p> <p>Pathloss e entre o OXC-3 e o Demux (5m) 1.0023s 3 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] propagationGainDb = 0.001 dB 1.0023s 3 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] total pathLoss = 0.001 dB 1.0023s 3 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] pathGainLinear: 0.99977</p> <p>Pathloss e entre o Demux-17 e o TxRx-9 (5m) 1.0023s 17 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] propagationGainDb = 0.001 dB 1.0023s 17 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] total pathLoss = 0.001 dB 1.0023s 17 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] pathGainLinear: 0.99977</p> <p>Potência de recepção do TxRx-9 1.0023s 9 WdmTxRxSpectrumPhy:StartRx(): [LOGIC] 0x90a0f48 rx power: 5.879 dBm</p>
--	---

Tabela 4.3 - Pathloss do canal DWDM ID-1.

#### 4.5.2.4 Tabelas de comutação de comprimento de onda

As tabelas de comutação de comprimentos de onda de cada OXC da topologia estão representadas na Tabela 4.4. Com base na sua informação e conteúdo do mapeamento topológico de ligações de fibra óptica, representado pela Figura 4.8, é possível identificar facilmente o encaminhamento usado por todos os canais neste cenário. Por exemplo, o encaminhamento do canal DWDM ID-5 passa pelos OXC-0, OXC-5 e OXC-4.

Nos cenários de falha descritos nas secções mais à frente, será possível observar que estas tabelas vão sofrer alterações devido ao recálculo dos caminhos de luz.

<p>OXC Switching Table NodeId: 0 Switching Table Size: 4 InPort: 1 InChannel: 1 OutPort: 3 OutChannel: 1 InPort: 1 InChannel: 5 OutPort: 5 OutChannel: 5 InPort: 2 InChannel: 1 OutPort: 0 OutChannel: 1 InPort: 4 InChannel: 5 OutPort: 0 OutChannel: 5</p> <p>OXC Switching Table NodeId: 1 Switching Table Size: 6 InPort: 1 InChannel: 2 OutPort: 5 OutChannel: 2 InPort: 2 InChannel: 1 OutPort: 5 OutChannel: 1 InPort: 4 InChannel: 1 OutPort: 3 OutChannel: 1 InPort: 4 InChannel: 2 OutPort: 0 OutChannel: 2 InPort: 4 InChannel: 3 OutPort: 7 OutChannel: 3 InPort: 6 InChannel: 3 OutPort: 5 OutChannel: 3</p> <p>OXC Switching Table NodeId: 2 Switching Table Size: 6 InPort: 1 InChannel: 3 OutPort: 3 OutChannel: 3 InPort: 2 InChannel: 1 OutPort: 5 OutChannel: 1 InPort: 2 InChannel: 2 OutPort: 7 OutChannel: 2 InPort: 2 InChannel: 3 OutPort: 0 OutChannel: 3 InPort: 4 InChannel: 1 OutPort: 3 OutChannel: 1 InPort: 6 InChannel: 2 OutPort: 3 OutChannel: 2</p>	<p>OXC Switching Table NodeId: 3 Switching Table Size: 2 InPort: 1 InChannel: 1 OutPort: 3 OutChannel: 1 InPort: 2 InChannel: 1 OutPort: 0 OutChannel: 1</p> <p>OXC Switching Table NodeId: 4 Switching Table Size: 4 InPort: 1 InChannel: 2 OutPort: 7 OutChannel: 2 InPort: 1 InChannel: 5 OutPort: 5 OutChannel: 5 InPort: 4 InChannel: 5 OutPort: 0 OutChannel: 5 InPort: 6 InChannel: 2 OutPort: 0 OutChannel: 2</p> <p>OXC Switching Table NodeId: 5 Switching Table Size: 4 InPort: 1 InChannel: 3 OutPort: 7 OutChannel: 3 InPort: 2 InChannel: 5 OutPort: 5 OutChannel: 5 InPort: 4 InChannel: 5 OutPort: 3 OutChannel: 5 InPort: 6 InChannel: 3 OutPort: 0 OutChannel: 3</p>
--	--

Tabela 4.4 - Tabela de comutação de comprimentos de onda de todos os OXCs da rede num ambiente sem falhas.

#### 4.5.2.5 Medida de potência óptica com OSA

Para confirmar a presença dos canais DWDM nos *links* entre os OXCs, foram feitas duas medidas em dois pontos distintos na rede. A Figura 4.12 representa a medida feita entre o OXC-1 e OXC-2 com o OSA instalado na transmissão do primeiro. É possível observar a existência de três canais ópticos, o canal DWDM ID-1, ID-2 e ID-3. Com o auxílio da Tabela 4.4, pode-se confirmar que os três canais são comuns aos dois OXCs. Para o caso particular do canal ID-1, a Tabela 4.1 e Tabela 4.2 permitem ter uma percepção mais detalhada do encaminhamento do canal. A potência do canal ID-2 destaca-se da potência dos outros dois porque o canal está instalado num *transponder* pertencente ao OXC-1, e os canais ID-1 e ID-3 têm a mesma potência porque ambos sofrem atenuação de apenas um salto até chegar ao OXC-1.

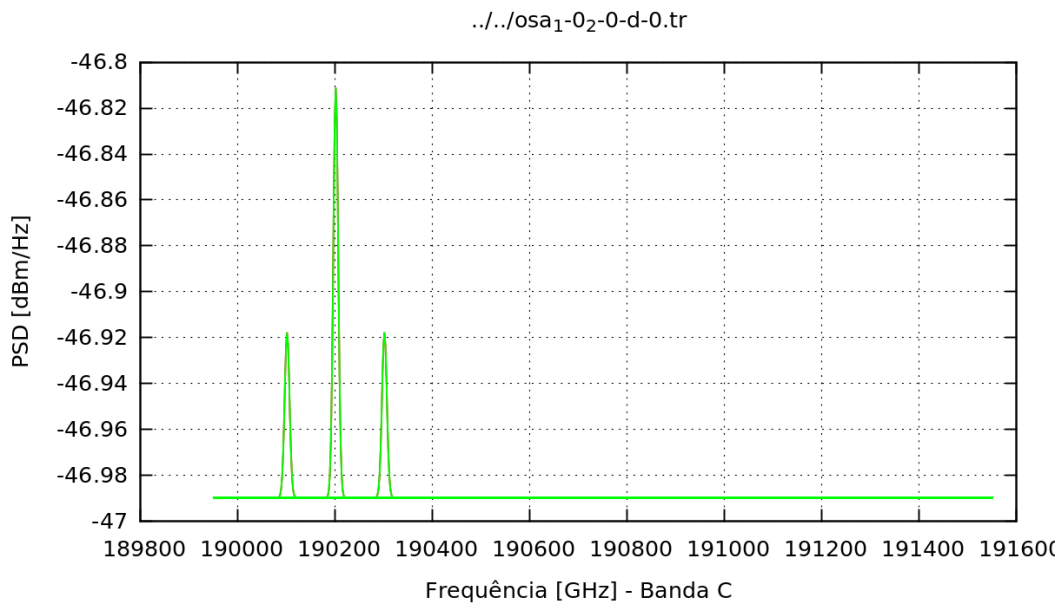


Figura 4.12 - Medida de potência óptica para o canal DWDM ID-1, ID-2 e ID-3, entre o OXC-1 e OXC-2.

A Figura 4.13 diz respeito à medida de potência óptica do canal DWDM ID-5 entre o OXC-5 e OXC-0. Da mesma forma, é possível confirmar pela tabela de comutação óptica que o único canal em comum entre os dois OXCs é o canal ID-5.

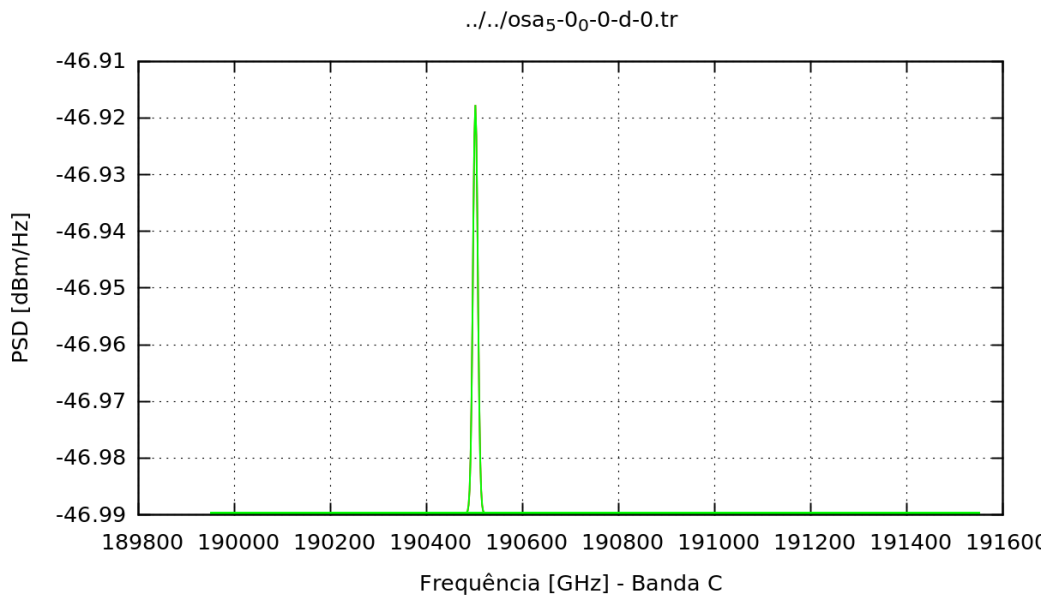


Figura 4.13 - Medida de potência óptica para o canal DWDM ID-5, entre o OXC-5 e OXC-0.

### 4.5.3 Falha no *link* entre o OXC-1 e OXC-2

A Figura 4.14 representa a topologia de rede com falha no *link* entre o OXC-1 e OXC-2. Nas secções que se seguem serão mostrados em detalhes o conjunto de ligações de fibra óptica entre os equipamentos WDM por onde é encaminhado o canal DWDM ID-1.

São apresentados também os resultados do cálculo do canal óptico, incluindo os *pathloss*, e as tabelas de comutação de comprimentos de onda de todos os OXC da rede.

São mostradas também as medidas ópticas realizadas nos *links* entre o OXC-5 e OXC-0, e OXC-5 e OXC-4, bem como comparar o resultado com a tabela de comutação de comprimentos de onda dos OXC envolvidos.

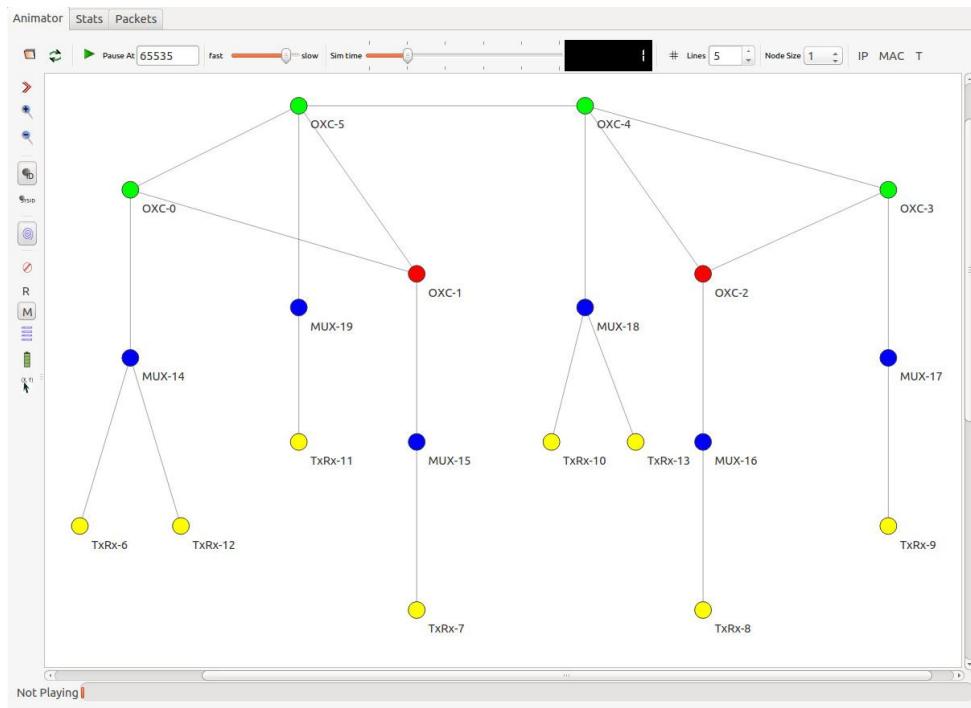


Figura 4.14 - Falha no *link* entre o OXC-1 e OXC-2.

### 4.5.3.1 Cálculo de canal

A Tabela 4.5 e Tabela 4.6 resumizam as ligações de fibra óptica usadas pelo canal DWDM ID-1 no sentido TxRx-6 > TxRx-9 e TxRx-9 > TxRx-6, respectivamente. É possível verificar que o encaminhamento do canal sofreu alteração após a falha. Uma vez que o simulador não incorpora uma componente de Plano de Controlo que permita detectar e restaurar um canal em caso de falha, para simular este cenário foi removido do *script* a ligação entre o OXC-1 e OXC-2. Neste sentido, como a ligação deixa de fazer parte da topologia física, o algoritmo RWA não a considera para o cálculo do caminho, escolhendo assim um caminho alternativo.

```

Optical Path Src: 6:0-->9:0
Fibers Num: 7 Node Configuration Num: 8
Used Fibers :
  NodeID: 6 Type: TxRx DevID: 0 PortID: 1 Dir: OUT --> NodeID: 14 Type: Mux DevID: 0 PortID: 0 Dir: IN      Channel usage: 0100000000000000
  NodeID: 14 Type: Mux DevID: 0 PortID: 8 Dir: OUT --> NodeID: 0 Type: OXC DevID: 0 PortID: 1 Dir: INOUT    Channel usage: 0100000000000000
  NodeID: 0 Type: OXC DevID: 0 PortID: 5 Dir: INOUT --> NodeID: 5 Type: OXC DevID: 0 PortID: 4 Dir: INOUT    Channel usage: 0100000000000000
  NodeID: 5 Type: OXC DevID: 0 PortID: 3 Dir: INOUT --> NodeID: 4 Type: OXC DevID: 0 PortID: 4 Dir: INOUT    Channel usage: 0100000000000000
  NodeID: 4 Type: OXC DevID: 0 PortID: 3 Dir: INOUT --> NodeID: 3 Type: OXC DevID: 0 PortID: 4 Dir: INOUT    Channel usage: 0100000000000000
  NodeID: 3 Type: OXC DevID: 0 PortID: 0 Dir: INOUT --> NodeID: 17 Type: Dmux DevID: 1 PortID: 8 Dir: IN     Channel usage: 0100000000000000
  NodeID: 17 Type: Dmux DevID: 1 PortID: 0 Dir: OUT --> NodeID: 9 Type: TxRx DevID: 0 PortID: 0 Dir: IN     Channel usage: 0100000000000000
Node Configuration:
  Node: 6 DevType: TxRx Operation: TX OutPort: 1 OutChannelID: 1
  Node: 14 DevType: Mux Operation: U InPort: 0 InChannelID: 1 OutPort: 8 OutChannelID: 1
  Node: 0 DevType: OXC Operation: SW InPort: 1 InChannelID: 1 OutPort: 5 OutChannelID: 1
  Node: 5 DevType: OXC Operation: SW InPort: 4 InChannelID: 1 OutPort: 3 OutChannelID: 1
  Node: 4 DevType: OXC Operation: SW InPort: 4 InChannelID: 1 OutPort: 3 OutChannelID: 1
  Node: 3 DevType: OXC Operation: SW InPort: 4 InChannelID: 1 OutPort: 0 OutChannelID: 1
  Node: 17 DevType: Mux Operation: U InPort: 8 InChannelID: 1 OutPort: 0 OutChannelID: 1
  Node: 9 DevType: TxRx Operation: RX InPort: 0 InChannelID: 1
    
```

Tabela 4.5 - Cálculo do canal DWDM ID-1 no sentido TxRx-6 >TxRx-9 com falha no link entre o OXC-1 e OXC-2.

```

Optical Path Src: 9:0--->6:0
Fibers Num: 7 Node Configuration Num: 8
Used Fibers :
  NodeID: 9 Type: TxRx DevID: 0 PortID: 1 Dir: OUT --> NodeID: 17 Type: Mux DevID: 0 PortID: 0 Dir: IN      Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
  NodeID: 17 Type: Mux DevID: 0 PortID: 8 Dir: OUT --> NodeID: 3 Type: OXC DevID: 0 PortID: 1 Dir: INOUT    Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
  NodeID: 3 Type: OXC DevID: 0 PortID: 5 Dir: INOUT --> NodeID: 4 Type: OXC DevID: 0 PortID: 2 Dir: INOUT    Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
  NodeID: 4 Type: OXC DevID: 0 PortID: 5 Dir: INOUT --> NodeID: 5 Type: OXC DevID: 0 PortID: 2 Dir: INOUT    Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
  NodeID: 5 Type: OXC DevID: 0 PortID: 5 Dir: INOUT --> NodeID: 0 Type: OXC DevID: 0 PortID: 4 Dir: INOUT    Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
  NodeID: 0 Type: OXC DevID: 0 PortID: 0 Dir: INOUT --> NodeID: 14 Type: Dmux DevID: 1 PortID: 8 Dir: IN     Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
  NodeID: 14 Type: Dmux DevID: 1 PortID: 0 Dir: OUT --> NodeID: 6 Type: TxRx DevID: 0 PortID: 0 Dir: IN     Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
Node Configuration:
  Node: 9 DevType: TxRx Operation: TX OutPort: 1 OutChannelID: 1
  Node: 17 DevType: Mux Operation: U InPort: 0 InChannelID: 1 OutPort: 8 OutChannelID: 1
  Node: 3 DevType: OXC Operation: SW InPort: 1 InChannelID: 1 OutPort: 5 OutChannelID: 1
  Node: 4 DevType: OXC Operation: SW InPort: 2 InChannelID: 1 OutPort: 5 OutChannelID: 1
  Node: 5 DevType: OXC Operation: SW InPort: 2 InChannelID: 1 OutPort: 5 OutChannelID: 1
  Node: 0 DevType: OXC Operation: SW InPort: 4 InChannelID: 1 OutPort: 0 OutChannelID: 1
  Node: 14 DevType: Mux Operation: U InPort: 8 InChannelID: 1 OutPort: 0 OutChannelID: 1
  Node: 6 DevType: TxRx Operation: RX InPort: 0 InChannelID: 1
    
```

Tabela 4.6 - Cálculo do canal DWDM ID-1 no sentido TxRx-9 >TxRx-6 com falha no link entre o OXC-1 e OXC-2.

### 4.5.3.2 Pathloss do canal DWDM ID-1

A Tabela 4.7 representa a potência de transmissão, *pathloss* e a potência de recepção para o exemplo do canal DWDM ID-1. Embora o canal tenha sido reenquadrado, a rota alternativa mantém o mesmo número de saltos. Desta forma a potência de recepção mantém-se inalterada.

<p>Potência de transmissão do TxRx-6 2.002s 6 WdmTxRxSpectrumPhy:StartTx(): [LOGIC] 0x8d002a0 tx power: 17.9703 dBm</p> <p><i>Pathloss</i> e entre o TxRx-6 e o Mux-14 (5m) 2.002s 6 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] propagationGainDb = 0.001 dB 2.002s 6 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] total pathLoss = 0.001 dB 2.002s 6 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] pathGainLinear: 0.99977</p> <p><i>Pathloss</i> e entre o Mux-14 e o OXC-0 (5m) 2.002s 14 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] propagationGainDb = 0.001 dB 2.002s 14 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] total pathLoss = 0.001 dB 2.002s 14 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] pathGainLinear: 0.99977</p> <p><i>Pathloss</i> e entre o OXC-0 e o OXC-5 (20km) 2.002s 0 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] propagationGainDb = 4 dB 2.002s 0 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] total pathLoss = 4 dB 2.002s 0 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] pathGainLinear: 0.398107</p> <p><i>Pathloss</i> e entre o OXC-5 e o OXC-4 (20km) 2.0021s 5 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] propagationGainDb = 4 dB 2.0021s 5 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] total pathLoss = 4 dB 2.0021s 5 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] pathGainLinear: 0.398107</p>	<p><i>Pathloss</i> e entre o OXC-4 e o OXC-3 (20km) 2.0022s 5 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] propagationGainDb = 4 dB 2.0022s 5 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] total pathLoss = 4 dB 2.0022s 5 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] pathGainLinear: 0.398107</p> <p><i>Pathloss</i> e entre o OXC-3 e o Demux (5m) 2.0023s 3 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] propagationGainDb = 0.001 dB 2.0023s 3 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] total pathLoss = 0.001 dB 2.0023s 3 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] pathGainLinear: 0.99977</p> <p><i>Pathloss</i> e entre o Demux-17 e o TxRx-9 (5m) 2.0023s 17 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] propagationGainDb = 0.001 dB 2.0023s 17 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] total pathLoss = 0.001 dB 2.0023s 17 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] pathGainLinear: 0.99977</p> <p>Potência de recepção do TxRx-9 2.0023s 9 WdmTxRxSpectrumPhy:StartRx(): [LOGIC] 0x8d09f48 rx power: 5.879 dBm</p>
--	--

Tabela 4.7 - *Pathloss* do canal DWDM ID-1.



### 4.5.3.3 Tabelas de comutação de comprimento de onda

As tabelas de comutação de comprimentos de onda para cada OXC da topologia estão representadas na Tabela 4.8. Estas dão-nos uma percepção global da alteração que existiu na rede após a falha. Para além do canal DWDM ID-1, o canal com o ID-2 e ID-3 também sofreram alterações no seu encaminhamento. Com base neste resultado é possível identificar que a ligação entre o OXC-4 e OXC-5 transporta todos os canais da rede tornando-se num *single point of failure*.

<p>OXC Switching Table NodId: 0                      Swithing Table Size: 4                      InPort: 1 InChannel: 1 OutPort: 5 OutChannel: 1                      InPort: 1 InChannel: 5 OutPort: 5 OutChannel: 5                      InPort: 4 InChannel: 1 OutPort: 0 OutChannel: 1                      InPort: 4 InChannel: 5 OutPort: 0 OutChannel: 5</p>	<p>OXC Switching Table NodId: 4                      Swithing Table Size: 8                      InPort: 1 InChannel: 2 OutPort: 5 OutChannel: 2                      InPort: 1 InChannel: 5 OutPort: 5 OutChannel: 5                      InPort: 2 InChannel: 1 OutPort: 5 OutChannel: 1                      InPort: 4 InChannel: 1 OutPort: 3 OutChannel: 1                      InPort: 4 InChannel: 2 OutPort: 0 OutChannel: 2                      InPort: 4 InChannel: 3 OutPort: 7 OutChannel: 3                      InPort: 4 InChannel: 5 OutPort: 0 OutChannel: 5                      InPort: 6 InChannel: 3 OutPort: 5 OutChannel: 3</p>
<p>OXC Switching Table NodId: 1                      Swithing Table Size: 2                      InPort: 1 InChannel: 2 OutPort: 5 OutChannel: 2                      InPort: 4 InChannel: 2 OutPort: 0 OutChannel: 2</p>	<p>OXC Switching Table NodId: 5                      Swithing Table Size: 8                      InPort: 1 InChannel: 3 OutPort: 3 OutChannel: 3                      InPort: 2 InChannel: 1 OutPort: 5 OutChannel: 1                      InPort: 2 InChannel: 2 OutPort: 7 OutChannel: 2                      InPort: 2 InChannel: 3 OutPort: 0 OutChannel: 3                      InPort: 2 InChannel: 5 OutPort: 5 OutChannel: 5                      InPort: 4 InChannel: 1 OutPort: 3 OutChannel: 1                      InPort: 4 InChannel: 5 OutPort: 3 OutChannel: 5                      InPort: 6 InChannel: 2 OutPort: 3 OutChannel: 2</p>
<p>OXC Switching Table NodId: 2                      Swithing Table Size: 2                      InPort: 1 InChannel: 3 OutPort: 5 OutChannel: 3                      InPort: 4 InChannel: 3 OutPort: 0 OutChannel: 3</p>	
<p>OXC Switching Table NodId: 3                      Swithing Table Size: 2                      InPort: 1 InChannel: 1 OutPort: 5 OutChannel: 1                      InPort: 4 InChannel: 1 OutPort: 0 OutChannel: 1</p>	

Tabela 4.8 - Tabela de comutação de comprimentos de onda de todos os OXCs da rede com falha no *link* entre o OXC-1 e OXC-2.

### 4.5.3.4 Medida de potência óptica com OSA

A Figura 4.15 representa a medida de potência dos canais ópticos entre o OXC-5 e OXC-0. É possível observar a existência de dois canais ópticos, o canal DWDM ID-1 e ID-5. Com o auxílio da Tabela 4.8, pode-se confirmar que os dois canais são comuns aos dois OXCs.

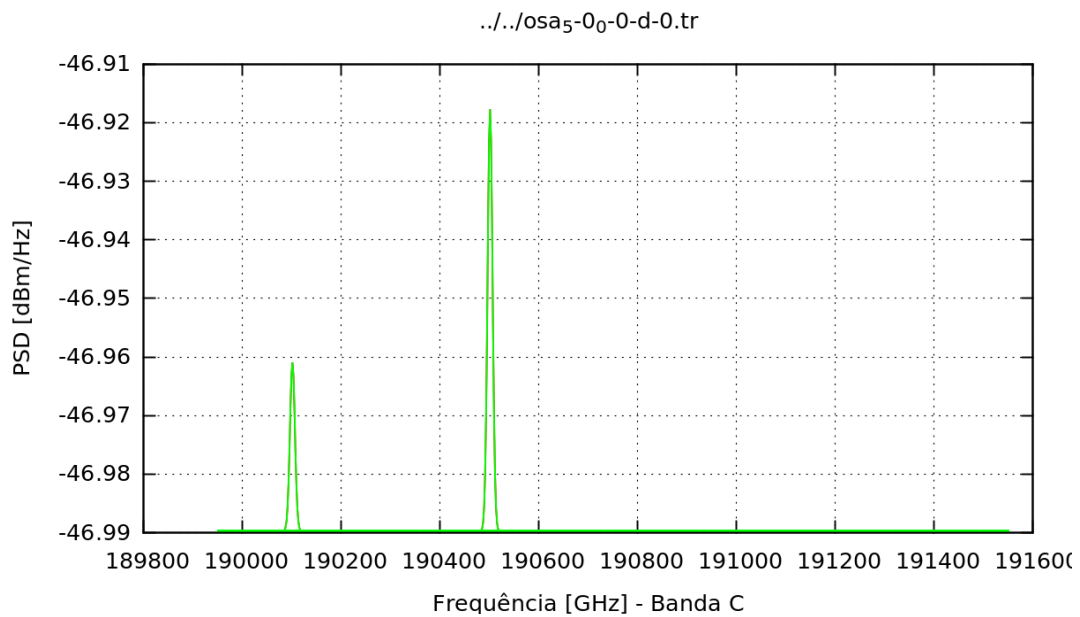


Figura 4.15 - Medida de potência óptica para o canal DWDM ID-1 e ID-5, entre o OXC-5 e OXC-0.

A Figura 4.16 diz respeito à medida de potência óptica do canal DWDM ID-1, ID-2, ID-3 e ID-5 entre o OXC-5 e OXC-4. Da mesma forma, é possível confirmar pela tabela de comutação óptica que todos os canais da rede partilham os dois OXCs.

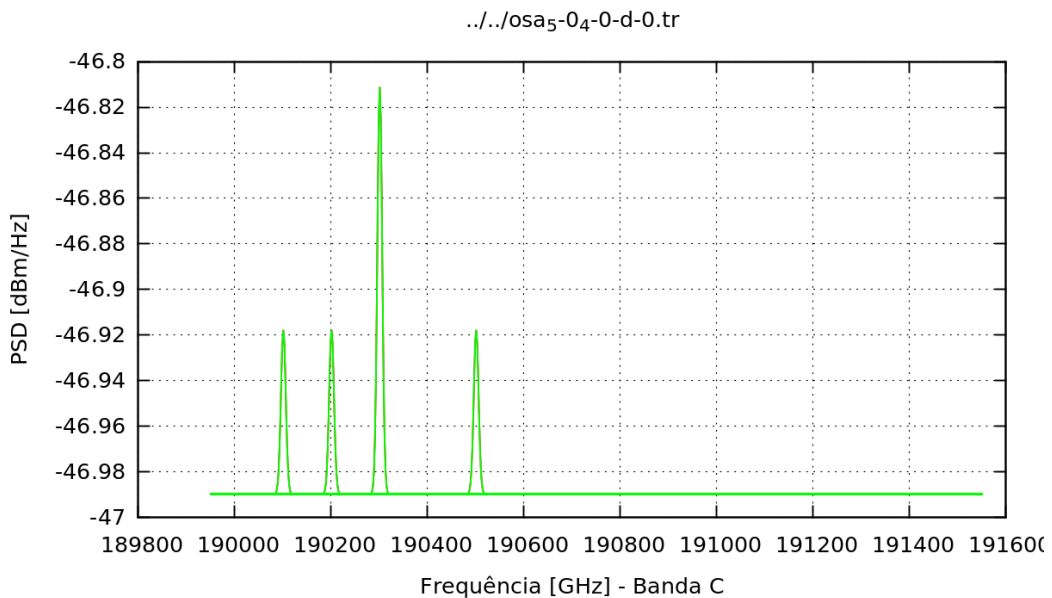


Figura 4.16 - Medida de potência óptica para o canal DWDM ID-1, ID-2, ID-3 e ID-5, entre o OXC-5 e OXC-4.

#### 4.5.4 Falha nos *links*, entre o OXC-0 e OXC-5, OXC-2 e OXC-3, e OXC-4 e OXC-5

A Figura 4.17 representa a topologia de rede com falha nos *links* entre o OXC-0 e OXC-5, OXC-2 e OXC-3 e OXC-4 e OXC-5. Nas secções que se seguem serão mostrados em detalhes o conjunto de ligações de fibra óptica entre os equipamentos WDM por onde é encaminhado o canal DWDM ID-1.

São apresentados também os resultados do cálculo do canal óptico, incluindo os *pathloss*, e tabela de comutação de comprimentos de onda de todos os OXC da rede.

São mostradas as medidas ópticas realizadas nos *links* entre o OXC-1 e OXC-2, e OXC-2 e OXC-4, bem como comparar o resultado com a tabela de comutação de comprimentos de onda dos OXC envolvidos.

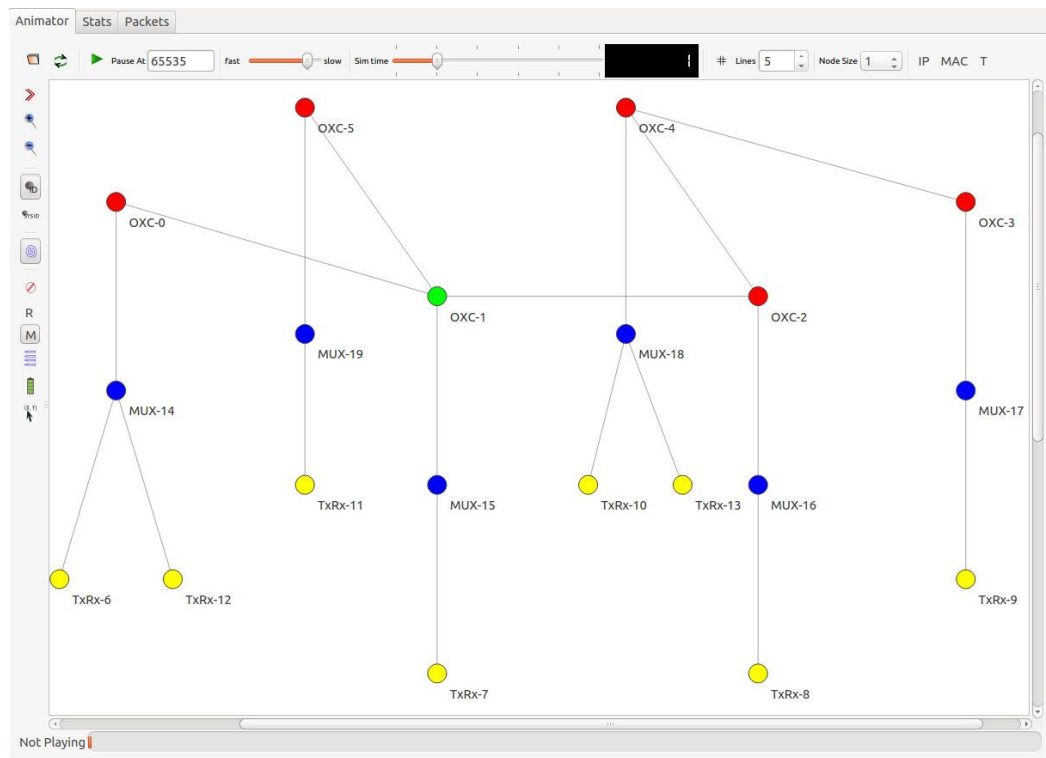


Figura 4.17 - Falha nos *links*, entre o OXC-0 e OXC-5, OXC-2 e OXC-3 e OXC-4 e OXC-5.

#### 4.5.4.1 Cálculo de canal

A Tabela 4.9 e Tabela 4.10 resumizam as ligações de fibra óptica usadas pelo canal DWDM ID-1 no sentido TxRx-6 > TxRx-9 e TxRx-9 > TxRx-6, respectivamente. É possível identificar todos os elementos WDM e todos os portos usados pelo canal ao longo do caminho óptico.

```

Optical Path Src: 6:0--->9:0
Fibers Num: 8 Node Configuration Num: 9
Used Fibers :
  NodeID: 6 Type: TxRx DevID: 0 PortID: 1 Dir: OUT --> NodeID: 14 Type: Mux DevID: 0 PortID: 0 Dir: IN Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
  NodeID: 14 Type: Mux DevID: 0 PortID: 8 Dir: OUT --> NodeID: 0 Type: OXC DevID: 0 PortID: 1 Dir: INOUT Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
  NodeID: 0 Type: OXC DevID: 0 PortID: 3 Dir: INOUT --> NodeID: 1 Type: OXC DevID: 0 PortID: 2 Dir: INOUT Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
  NodeID: 1 Type: OXC DevID: 0 PortID: 5 Dir: INOUT --> NodeID: 2 Type: OXC DevID: 0 PortID: 2 Dir: INOUT Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
  NodeID: 2 Type: OXC DevID: 0 PortID: 5 Dir: INOUT --> NodeID: 4 Type: OXC DevID: 0 PortID: 4 Dir: INOUT Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
  NodeID: 4 Type: OXC DevID: 0 PortID: 3 Dir: INOUT --> NodeID: 3 Type: OXC DevID: 0 PortID: 2 Dir: INOUT Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
  NodeID: 3 Type: OXC DevID: 0 PortID: 0 Dir: INOUT --> NodeID: 17 Type: Dmux DevID: 1 PortID: 8 Dir: IN Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
  NodeID: 17 Type: Dmux DevID: 1 PortID: 0 Dir: OUT --> NodeID: 9 Type: TxRx DevID: 0 PortID: 0 Dir: IN Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
Node Configuration:
  Node: 6 DevType: TxRx Operation: TX OutPort: 1 OutChannelID: 1
  Node: 14 DevType: Mux Operation: U InPort: 0 InChannelID: 1 OutPort: 8 OutChannelID: 1
  Node: 0 DevType: OXC Operation: SW InPort: 1 InChannelID: 1 OutPort: 3 OutChannelID: 1
  Node: 1 DevType: OXC Operation: SW InPort: 2 InChannelID: 1 OutPort: 5 OutChannelID: 1
  Node: 2 DevType: OXC Operation: SW InPort: 2 InChannelID: 1 OutPort: 5 OutChannelID: 1
  Node: 4 DevType: OXC Operation: SW InPort: 4 InChannelID: 1 OutPort: 3 OutChannelID: 1
  Node: 3 DevType: OXC Operation: SW InPort: 2 InChannelID: 1 OutPort: 0 OutChannelID: 1
  Node: 17 DevType: Mux Operation: U InPort: 8 InChannelID: 1 OutPort: 0 OutChannelID: 1
  Node: 9 DevType: TxRx Operation: RX InPort: 0 InChannelID: 1
    
```

Tabela 4.9 - Cálculo do canal DWDM ID-1 no sentido TxRx-6 > TxRx-9 com falha nos *links* entre o OXC-0 e OXC-5, OXC-2 e OXC-3 e OXC-4 e OXC-5.

```

Optical Path Src: 9:0--->6:0
Fibers Num: 8 Node Configuration Num: 9
Used Fibers :
  NodeID: 9 Type: TxRx DevID: 0 PortID: 1 Dir: OUT --> NodeID: 17 Type: Mux DevID: 0 PortID: 0 Dir: IN Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
  NodeID: 17 Type: Mux DevID: 0 PortID: 8 Dir: OUT --> NodeID: 3 Type: OXC DevID: 0 PortID: 1 Dir: INOUT Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
  NodeID: 3 Type: OXC DevID: 0 PortID: 3 Dir: INOUT --> NodeID: 4 Type: OXC DevID: 0 PortID: 2 Dir: INOUT Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
  NodeID: 4 Type: OXC DevID: 0 PortID: 5 Dir: INOUT --> NodeID: 2 Type: OXC DevID: 0 PortID: 4 Dir: INOUT Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
  NodeID: 2 Type: OXC DevID: 0 PortID: 3 Dir: INOUT --> NodeID: 1 Type: OXC DevID: 0 PortID: 4 Dir: INOUT Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
  NodeID: 1 Type: OXC DevID: 0 PortID: 3 Dir: INOUT --> NodeID: 0 Type: OXC DevID: 0 PortID: 2 Dir: INOUT Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
  NodeID: 0 Type: OXC DevID: 0 PortID: 0 Dir: INOUT --> NodeID: 14 Type: Dmux DevID: 1 PortID: 8 Dir: IN Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
  NodeID: 14 Type: Dmux DevID: 1 PortID: 0 Dir: OUT --> NodeID: 6 Type: TxRx DevID: 0 PortID: 0 Dir: IN Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
Node Configuration:
  Node: 9 DevType: TxRx Operation: TX OutPort: 1 OutChannelID: 1
  Node: 17 DevType: Mux Operation: U InPort: 0 InChannelID: 1 OutPort: 8 OutChannelID: 1
  Node: 3 DevType: OXC Operation: SW InPort: 1 InChannelID: 1 OutPort: 3 OutChannelID: 1
  Node: 4 DevType: OXC Operation: SW InPort: 2 InChannelID: 1 OutPort: 5 OutChannelID: 1
  Node: 2 DevType: OXC Operation: SW InPort: 4 InChannelID: 1 OutPort: 3 OutChannelID: 1
  Node: 1 DevType: OXC Operation: SW InPort: 4 InChannelID: 1 OutPort: 3 OutChannelID: 1
  Node: 0 DevType: OXC Operation: SW InPort: 2 InChannelID: 1 OutPort: 0 OutChannelID: 1
  Node: 14 DevType: Mux Operation: U InPort: 8 InChannelID: 1 OutPort: 0 OutChannelID: 1
  Node: 6 DevType: TxRx Operation: RX InPort: 0 InChannelID: 1
    
```

Tabela 4.10 - Cálculo do canal DWDM ID-1 no sentido TxRx-9 > TxRx-6 com falha nos *links* entre o OXC-0 e OXC-5, OXC-2 e OXC-3 e OXC-4 e OXC-5.

#### 4.5.4.2 Pathloss do canal DWDM ID-1

A Tabela 4.11 representa a potência de transmissão, *pathloss* e a potência de recepção para o exemplo do canal DWDM ID-1. Com base na informação da tabela, é possível verificar que a potência de recepção sofreu alterações devido ao reencaminhamento do caminho de luz. Como o canal tem mais um salto, a potên-

cia de recepção é menor 4 dB (valor da atenuação em 20 km) comparando com o valor obtido num cenário sem falha (secção 4.5.2.3).

Potência de transmissão do TxRx-6 3.002s 6 WdmTxRxSpectrumPhy:StartTx(): [LOGIC] 0x93432a0 tx power: 17.9703 dBm  Pathloss e entre o TxRx-6 e o Mux-14 (5m) 3.002s 6 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO ] propagationGainDb = 0.001 dB 3.002s 6 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO ] total pathLoss = 0.001 dB 3.002s 6 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO ] pathGainLinear: 0.99977  Pathloss e entre o Mux-14 e o OXC-0 (5m) 3.002s 14 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO ] propagationGainDb = 0.001 dB 3.002s 14 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO ] total pathLoss = 0.001 dB 3.002s 14 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO ] pathGainLinear: 0.99977  Pathloss e entre o OXC-0 e o OXC-1 (20km) 3.002s 0 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO ] propagationGainDb = 4 dB 3.002s 0 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO ] total pathLoss = 4 dB 3.002s 0 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO ] pathGainLinear: 0.398107  Pathloss e entre o OXC-1 e o OXC-2 (20km) 3.0021s 1 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO ] propagationGainDb = 4 dB 3.0021s 1 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO ] total pathLoss = 4 dB 3.0021s 1 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO ] pathGainLinear: 0.398107	Pathloss e entre o OXC-2 e o OXC-4 (20km) 3.0022s 2 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO ] propagationGainDb = 4 dB 3.0022s 2 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO ] total pathLoss = 4 dB 3.0022s 2 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO ] pathGainLinear: 0.398107  Pathloss e entre o OXC-4 e o OXC-3 (20km) 3.0023s 4 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO ] propagationGainDb = 4 dB 3.0023s 4 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO ] total pathLoss = 4 dB 3.0023s 4 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO ] pathGainLinear: 0.398107  Pathloss e entre o OXC-3 e o Demux (5m) 3.0024s 3 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO ] propagationGainDb = 0.001 dB 3.0024s 3 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO ] total pathLoss = 0.001 dB 3.0024s 3 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO ] pathGainLinear: 0.99977  Pathloss e entre o Demux-17 e o TxRx-9 (5m) 3.0024s 17 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO ] propagationGainDb = 0.001 dB 3.0024s 17 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO ] total pathLoss = 0.001 dB 3.0024s 17 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO ] pathGainLinear: 0.99977  Potência de recepção do TxRx-9 3.0024s 9 WdmTxRxSpectrumPhy:StartRx(): [LOGIC] 0x934cf48 rx power: 1.79171 dBm
--	--

Tabela 4.11 - Pathloss do canal DWDM ID-1.

#### 4.5.4.3 Tabelas de comutação de comprimento de onda

As tabelas de comutação de comprimentos de onda para cada OXC da topologia estão representadas na Tabela 4.12. É possível verificar que o encamiamento do canal com o ID-5 sofreu alterações devido à falha no *link* entre o OXC-0 e OXC-5. Neste sentido e com base na informação das tabelas de comutação, a ligação entre o OXC-1 e OXC-2 transporta todos os canais da rede.

OXC Switching Table Nodeld: 0 Swithing Table Size: 4 InPort: 1 InChannel: 1 OutPort: 3 OutChannel: 1 InPort: 1 InChannel: 5 OutPort: 3 OutChannel: 5 InPort: 2 InChannel: 1 OutPort: 0 OutChannel: 1 InPort: 2 InChannel: 5 OutPort: 0 OutChannel: 5 OXC Switching Table Nodeld: 1 Swithing Table Size: 8 InPort: 1 InChannel: 2 OutPort: 5 OutChannel: 2 InPort: 2 InChannel: 1 OutPort: 5 OutChannel: 1 InPort: 2 InChannel: 5 OutPort: 5 OutChannel: 5 InPort: 4 InChannel: 1 OutPort: 3 OutChannel: 1 InPort: 4 InChannel: 2 OutPort: 0 OutChannel: 2 InPort: 4 InChannel: 3 OutPort: 7 OutChannel: 3 InPort: 4 InChannel: 5 OutPort: 3 OutChannel: 5 InPort: 6 InChannel: 3 OutPort: 5 OutChannel: 3 OXC Switching Table Nodeld: 2 Swithing Table Size: 8 InPort: 1 InChannel: 3 OutPort: 3 OutChannel: 3 InPort: 2 InChannel: 1 OutPort: 5 OutChannel: 1 InPort: 2 InChannel: 2 OutPort: 5 OutChannel: 2 InPort: 2 InChannel: 3 OutPort: 0 OutChannel: 3 InPort: 2 InChannel: 5 OutPort: 5 OutChannel: 5 InPort: 4 InChannel: 1 OutPort: 3 OutChannel: 1 InPort: 4 InChannel: 2 OutPort: 3 OutChannel: 2 InPort: 4 InChannel: 5 OutPort: 3 OutChannel: 5	OXC Switching Table Nodeld: 3 Swithing Table Size: 2 InPort: 1 InChannel: 1 OutPort: 3 OutChannel: 1 InPort: 2 InChannel: 1 OutPort: 0 OutChannel: 1 OXC Switching Table Nodeld: 4 Swithing Table Size: 6 InPort: 1 InChannel: 2 OutPort: 5 OutChannel: 2 InPort: 1 InChannel: 5 OutPort: 5 OutChannel: 5 InPort: 2 InChannel: 1 OutPort: 5 OutChannel: 1 InPort: 4 InChannel: 1 OutPort: 3 OutChannel: 1 InPort: 4 InChannel: 2 OutPort: 0 OutChannel: 2 InPort: 4 InChannel: 5 OutPort: 0 OutChannel: 5 OXC Switching Table Nodeld: 5 Swithing Table Size: 2 InPort: 1 InChannel: 3 OutPort: 3 OutChannel: 3 InPort: 2 InChannel: 3 OutPort: 0 OutChannel: 3
---	---

Tabela 4.12 - Tabela de comutação de comprimentos de onda de todos os OXCs da rede com falha nos *links* entre o OXC-0 e OXC-5, OXC-2 e OXC-3 e OXC-4 e OXC-5.

#### 4.5.4.4 Medida de potência óptica com OSA

Para confirmar a presença dos canais DWDM nos *links* entre os OXCs, foram feitas duas medidas em dois pontos distintos na rede. A Figura 4.18 representa a medida feita entre o OXC-1 e OXC-2. É possível identificar a existência de quatro canais ópticos, o canal DWDM ID-1, ID-2, ID-3 e ID-5. Com o auxílio da Tabela 4.12, pode-se confirmar que os quatro canais são comuns aos dois OXCs.

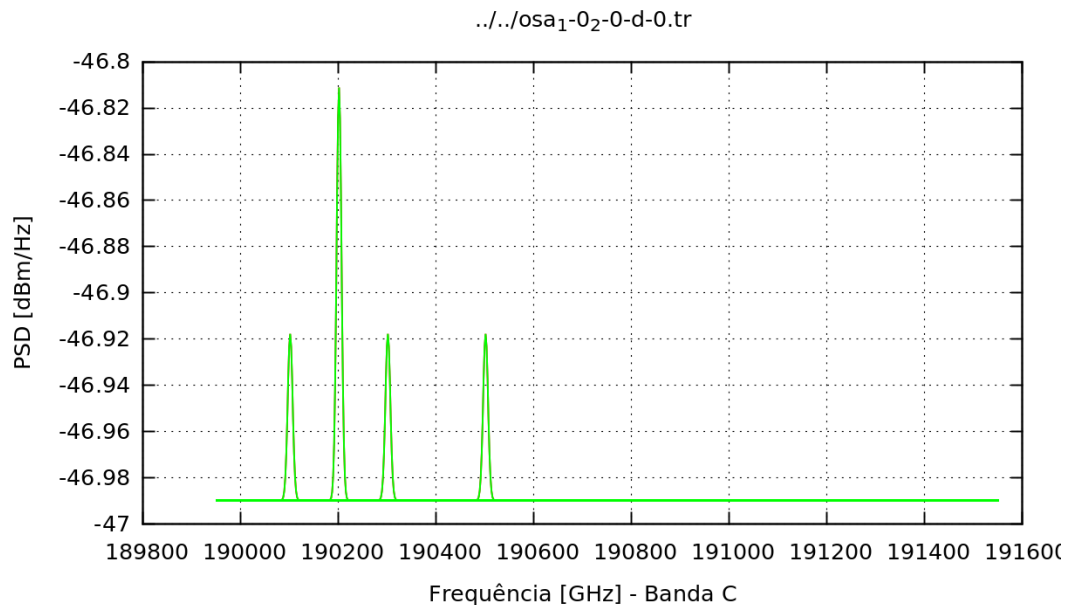


Figura 4.18 - Medida de potência óptica para o canal DWDM ID-1, ID-2, ID-3 e ID-5, entre o OXC-1 e OXC-2.

A Figura 4.19 diz respeito à medida de potência óptica do canal DWDM ID-1, ID-2 e ID-5 entre o OXC-2 e OXC-4. Da mesma forma, é possível confirmar pela tabela de comutação óptica que os únicos canais em comum entre os dois OXCs são os canais ID-1, ID-2 e ID-5.

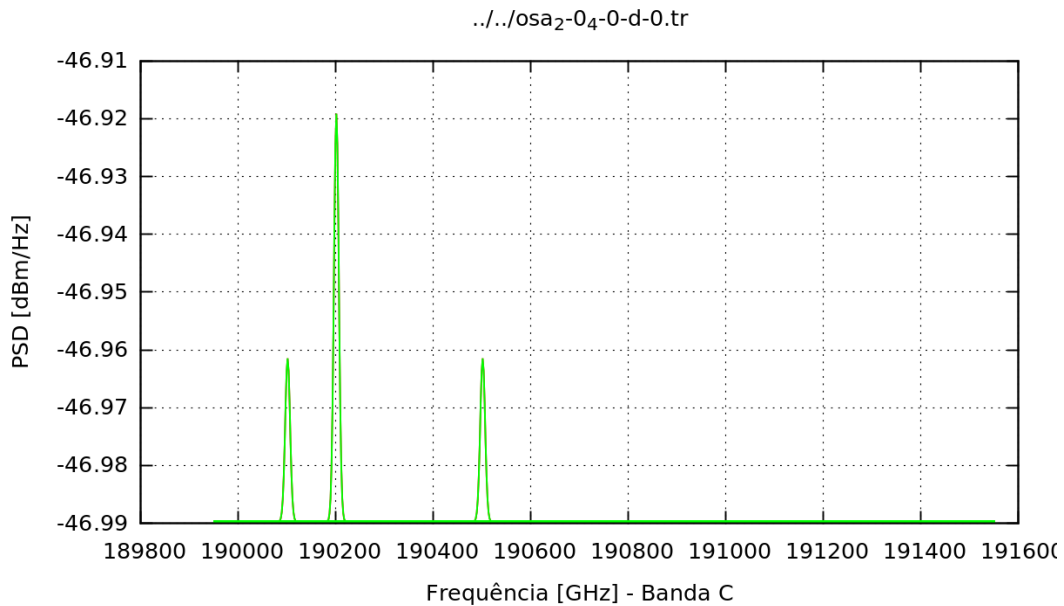


Figura 4.19 - Medida de potência óptica para o canal DWDM ID-1, ID-2 e ID-5, entre o OXC-2 e OXC-4.

### 4.5.5 Falha no OXC-2

A Figura 4.20 representa a topologia de rede com falha no OXC-2. Nas seções que se seguem serão mostrados em detalhes o conjunto de ligações de fibra óptica entre os equipamentos WDM por onde é encaminhado o canal DWDM ID-1.

São apresentados também os resultados do cálculo do canal óptico, incluindo os *pathloss*, e tabela de comutação de comprimentos de onda de todos os OXC da rede.

São mostradas também as medidas ópticas realizadas nos *links* entre o OXC-5 e OXC-0, e OXC-4 e OXC-5, bem como comparar o resultado com a tabela de comutação de comprimentos de onda dos OXC envolvidos.

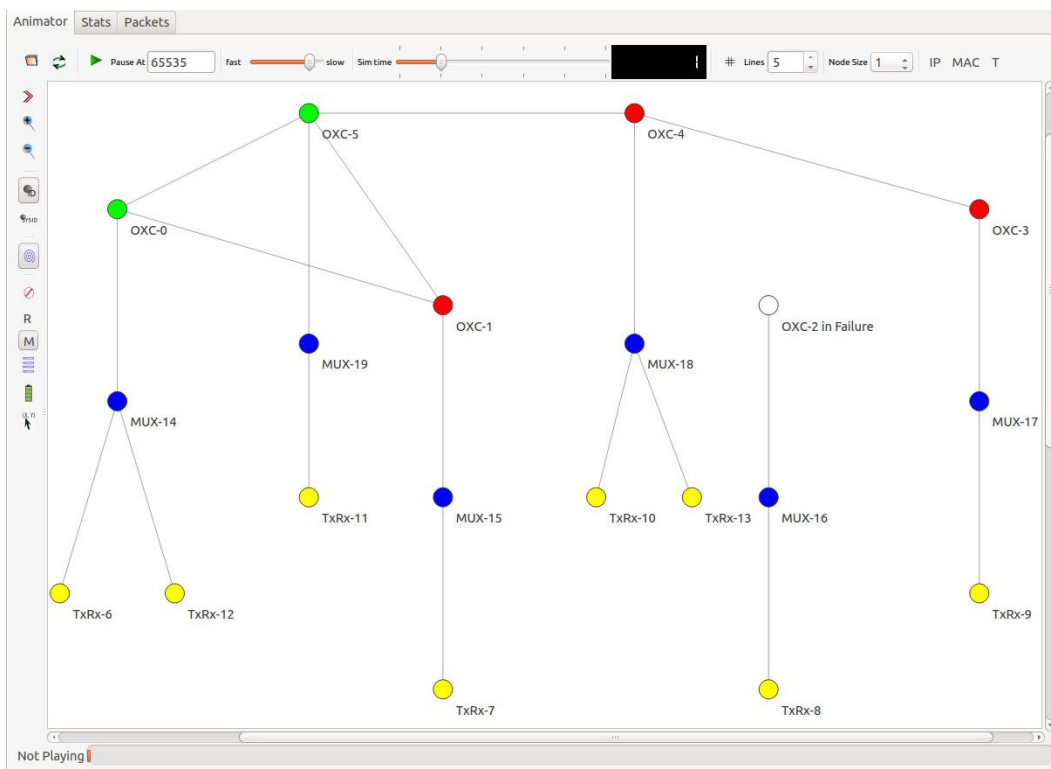


Figura 4.20 - Falha no OXC-2.

#### 4.5.5.1 Cálculo de canal

A Tabela 4.13 e Tabela 4.14 resumam as ligações de fibra óptica usadas pelo canal DWDM ID-1 no sentido TxRx-6 > TxRx-9 e TxRx-9 > TxRx-6, respectivamente. É possível identificar todos os elementos WDM e todos os portos usados pelo canal ao longo do caminho óptico.

```

Optical Path Src: 6:0-->9:0
Fibers Num: 7 Node Configuration Num: 8
Used Fibers :
NodeID: 6 Type: TxRx DevID: 0 PortID: 1 Dir: OUT --> NodeID: 14 Type: Mux DevID: 0 PortID: 0 Dir: IN Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
NodeID: 14 Type: Mux DevID: 0 PortID: 8 Dir: OUT --> NodeID: 0 Type: OXC DevID: 0 PortID: 1 Dir: INOUT Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
NodeID: 0 Type: OXC DevID: 0 PortID: 5 Dir: INOUT --> NodeID: 5 Type: OXC DevID: 0 PortID: 4 Dir: INOUT Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
NodeID: 5 Type: OXC DevID: 0 PortID: 3 Dir: INOUT --> NodeID: 4 Type: OXC DevID: 0 PortID: 4 Dir: INOUT Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
NodeID: 4 Type: OXC DevID: 0 PortID: 3 Dir: INOUT --> NodeID: 3 Type: OXC DevID: 0 PortID: 2 Dir: INOUT Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
NodeID: 3 Type: OXC DevID: 0 PortID: 0 Dir: INOUT --> NodeID: 17 Type: Dmux DevID: 1 PortID: 8 Dir: IN Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
NodeID: 17 Type: Dmux DevID: 1 PortID: 0 Dir: OUT --> NodeID: 9 Type: TxRx DevID: 0 PortID: 0 Dir: IN Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
Node Configuration:
Node: 6 DevType: TxRx Operation: TX OutPort: 1 OutChannelID: 1
Node: 14 DevType: Mux Operation: U InPort: 0 InChannelID: 1 OutPort: 8 OutChannelID: 1
Node: 0 DevType: OXC Operation: SW InPort: 1 InChannelID: 1 OutPort: 5 OutChannelID: 1
Node: 5 DevType: OXC Operation: SW InPort: 4 InChannelID: 1 OutPort: 3 OutChannelID: 1
Node: 4 DevType: OXC Operation: SW InPort: 4 InChannelID: 1 OutPort: 3 OutChannelID: 1
Node: 3 DevType: OXC Operation: SW InPort: 2 InChannelID: 1 OutPort: 0 OutChannelID: 1
Node: 17 DevType: Mux Operation: U InPort: 8 InChannelID: 1 OutPort: 0 OutChannelID: 1
Node: 9 DevType: TxRx Operation: RX InPort: 0 InChannelID: 1
    
```

Tabela 4.13 - Cálculo do canal DWDM ID-1 no sentido TxRx-6 >TxRx-9 com falha no OXC-2.



<pre> Optical Path Src: 9:0--&gt;6:0 Fibers Num: 7 Node Configuration Num: 8 Used Fibers : NodeID: 9 Type: TxRx DevID: 0 PortID: 1 Dir: OUT --&gt; NodeID: 17 Type: Mux DevID: 0 PortID: 0 Dir: IN Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 NodeID: 17 Type: Mux DevID: 0 PortID: 8 Dir: OUT --&gt; NodeID: 3 Type: OXC DevID: 0 PortID: 1 Dir: INOUT Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 NodeID: 3 Type: OXC DevID: 0 PortID: 3 Dir: INOUT --&gt; NodeID: 4 Type: OXC DevID: 0 PortID: 2 Dir: INOUT Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 NodeID: 4 Type: OXC DevID: 0 PortID: 5 Dir: INOUT --&gt; NodeID: 5 Type: OXC DevID: 0 PortID: 2 Dir: INOUT Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 NodeID: 5 Type: OXC DevID: 0 PortID: 5 Dir: INOUT --&gt; NodeID: 0 Type: OXC DevID: 0 PortID: 4 Dir: INOUT Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 NodeID: 0 Type: OXC DevID: 0 PortID: 0 Dir: INOUT --&gt; NodeID: 14 Type: Dmux DevID: 1 PortID: 8 Dir: IN Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 NodeID: 14 Type: Dmux DevID: 1 PortID: 0 Dir: OUT --&gt; NodeID: 6 Type: TxRx DevID: 0 PortID: 0 Dir: IN Channel usage: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 Node Configuration: Node: 9 DevType: TxRx Operation: TX OutPort: 1 OutChannelID: 1 Node: 17 DevType: Mux Operation: U InPort: 0 InChannelID: 1 OutPort: 8 OutChannelID: 1 Node: 3 DevType: OXC Operation: SW InPort: 1 InChannelID: 1 OutPort: 3 OutChannelID: 1 Node: 4 DevType: OXC Operation: SW InPort: 2 InChannelID: 1 OutPort: 5 OutChannelID: 1 Node: 5 DevType: OXC Operation: SW InPort: 2 InChannelID: 1 OutPort: 5 OutChannelID: 1 Node: 0 DevType: OXC Operation: SW InPort: 4 InChannelID: 1 OutPort: 0 OutChannelID: 1 Node: 14 DevType: Mux Operation: U InPort: 8 InChannelID: 1 OutPort: 0 OutChannelID: 1 Node: 6 DevType: TxRx Operation: RX InPort: 0 InChannelID: 1 </pre>
--

Tabela 4.14 - Cálculo do canal DWDM ID-1 no sentido TxRx-9 >TxRx-6 com falha no OXC-2.

### 4.5.5.2 Pathloss do canal DWDM ID-1

A Tabela 4.15 representa a potência de transmissão, *pathloss* e a potência de recepção para o exemplo do canal DWDM ID-1.

<pre> Potência de transmissão do TxRx-6 4.002s 6 WdmTxRxSpectrumPhy:StartTx(): [LOGIC] 0x88592a0 tx power: 17.9703 dBm  Pathloss e entre o TxRx-6 e o Mux-14 (5m) 4.002s 6 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] propagationGainDb = 0.001 dB 4.002s 6 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] total pathLoss = 0.001 dB 4.002s 6 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] pathGainLinear: 0.99977  Pathloss e entre o Mux-14 e o OXC-0 (5m) 4.002s 14 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] propagationGainDb = 0.001 dB 4.002s 14 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] total pathLoss = 0.001 dB 4.002s 14 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] pathGainLinear: 0.99977  Pathloss e entre o OXC-0 e o OXC-5 (20km) 4.002s 0 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] propagationGainDb = 4 dB 4.002s 0 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] total pathLoss = 4 dB 4.002s 0 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] pathGainLinear: 0.398107  Pathloss e entre o OXC-5 e o OXC-4 (20km) 4.0021s 5 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] propagationGainDb = 4 dB 4.0021s 5 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] total pathLoss = 4 dB 4.0021s 5 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] pathGainLinear: 0.398107 </pre>	<pre> Pathloss e entre o OXC-4 e o OXC-3 (20km) 4.0022s 4 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] propagationGainDb = 4 dB 4.0022s 4 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] total pathLoss = 4 dB 4.0022s 4 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] pathGainLinear: 0.398107  Pathloss e entre o OXC-3 e o Demux (5m) 4.0023s 3 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] propagationGainDb = 0.001 dB 4.0023s 3 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] total pathLoss = 0.001 dB 4.0023s 3 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] pathGainLinear: 0.99977  Pathloss e entre o Demux-17 e o TxRx-9 (5m) 4.0023s 17 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] propagationGainDb = 0.001 dB 4.0023s 17 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] total pathLoss = 0.001 dB 4.0023s 17 WdmFiberChannel:StartTx(): [INFO] pathGainLinear: 0.99977  Potência de recepção do TxRx-9 4.0023s 9 WdmTxRxSpectrumPhy:StartRx(): [LOGIC] 0x8862f48 rx power: 5.9663 dBm </pre>
--	--

Tabela 4.15 - *Pathloss* do canal DWDM ID-1.

### 4.5.5.3 Tabelas de comutação de comprimento de onda

As tabelas de comutação de comprimentos de onda para cada OXC da topologia estão representadas na Tabela 4.16. Com base na informação da tabela, é possível verificar que o OXC-2 não comuta qualquer comprimento de onda. Para simular esta avaria foram retiradas do *script* as interligações do OXC-2 ao OXC-1, OXC-3 e OXC-4. O canal ID-3 entre o OXC-2 e OXC-5 também foi retirado do *script*. Uma vez que não existe caminho alternativo para este canal, o algoritmo

RWA do simulador dá erro no cálculo do canal. O que é natural uma vez que não existe alternativas de ligação entre o OXC-2 e OXC-5 devido à falha no OXC-2.

OXC Switching Table Nodeld: 0 Switching Table Size: 4 InPort: 1 InChannel: 1 OutPort: 5 OutChannel: 1 InPort: 1 InChannel: 5 OutPort: 5 OutChannel: 5 InPort: 4 InChannel: 1 OutPort: 0 OutChannel: 1 InPort: 4 InChannel: 5 OutPort: 0 OutChannel: 5	OXC Switching Table Nodeld: 4 Switching Table Size: 6 InPort: 1 InChannel: 2 OutPort: 5 OutChannel: 2 InPort: 1 InChannel: 5 OutPort: 5 OutChannel: 5 InPort: 2 InChannel: 1 OutPort: 5 OutChannel: 1 InPort: 4 InChannel: 1 OutPort: 3 OutChannel: 1 InPort: 4 InChannel: 2 OutPort: 0 OutChannel: 2 InPort: 4 InChannel: 5 OutPort: 0 OutChannel: 5
OXC Switching Table Nodeld: 1 Switching Table Size: 2 InPort: 1 InChannel: 2 OutPort: 5 OutChannel: 2 InPort: 4 InChannel: 2 OutPort: 0 OutChannel: 2	OXC Switching Table Nodeld: 5 Switching Table Size: 6 InPort: 2 InChannel: 1 OutPort: 5 OutChannel: 1 InPort: 2 InChannel: 2 OutPort: 7 OutChannel: 2 InPort: 2 InChannel: 5 OutPort: 5 OutChannel: 5 InPort: 4 InChannel: 1 OutPort: 3 OutChannel: 1 InPort: 4 InChannel: 5 OutPort: 3 OutChannel: 5 InPort: 6 InChannel: 2 OutPort: 3 OutChannel: 2
OXC Switching Table Nodeld: 2 Switching Table Size: 0	
OXC Switching Table Nodeld: 3 Switching Table Size: 2 InPort: 1 InChannel: 1 OutPort: 3 OutChannel: 1 InPort: 2 InChannel: 1 OutPort: 0 OutChannel: 1	

Tabela 4.16 - Tabela de comutação de comprimentos de onda de todos os OXCs da rede com falha no OXC-2.

#### 4.5.5.4 Medida de potência óptica com OSA

A Figura 4.21 representa a medida feita entre o OXC-5 e OXC-0. É possível observar a existência de dois canais ópticos, o canal DWDM ID-1 e ID-5. Com o auxílio da Tabela 4.16, pode-se confirmar que os dois canais são comuns aos dois OXCs.

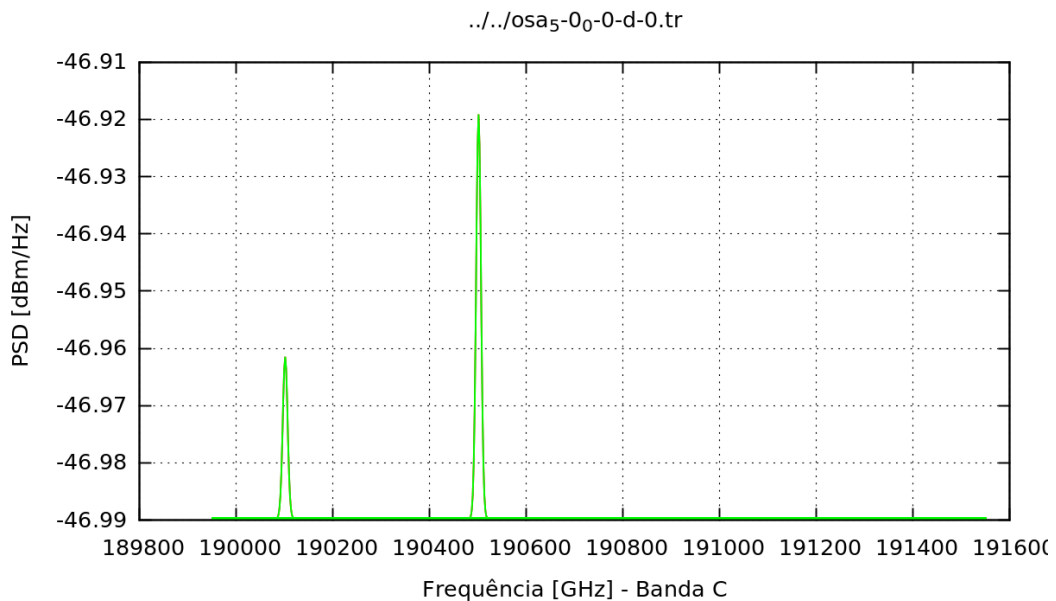


Figura 4.21 - Medida de potência óptica para o canal DWDM ID-1 e ID-5, entre o OXC-5 e OXC-0.

A Figura 4.22 diz respeito à medida de potência óptica do canal DWDM ID-1, ID-2 e ID-5 entre o OXC-4 e OXC-5. Da mesma forma, é possível confirmar pela tabela de comutação óptica que os canais referidos são os únicos em comum entre os dois OXCs.

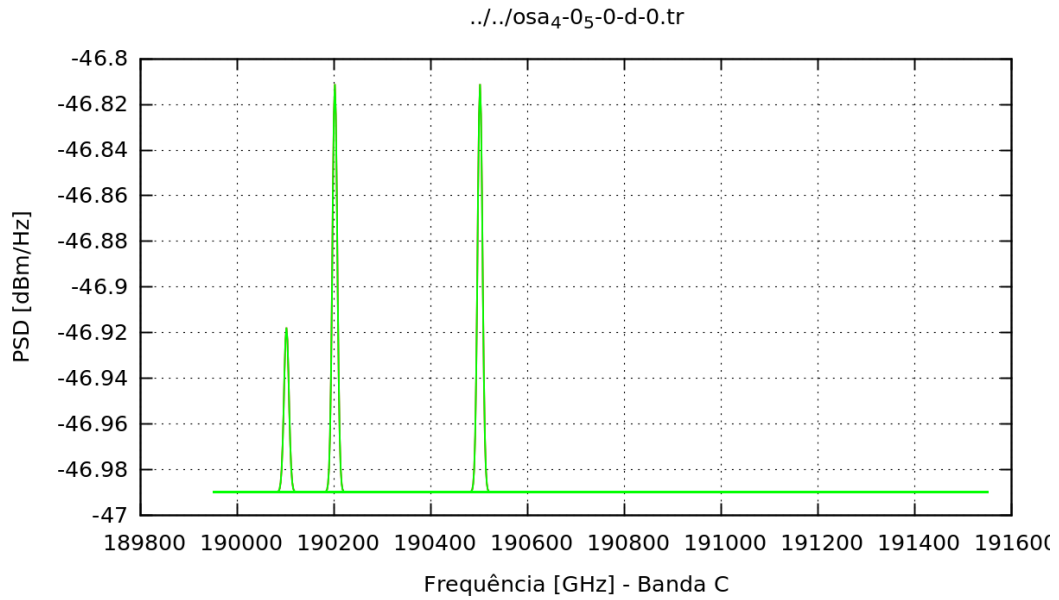


Figura 4.22 - Medida de potência óptica para o canal DWDM ID-1, ID-2 e ID-5, entre o OXC-4 e OXC-5.



# 5

## Conclusões e Trabalho Futuro

Neste capítulo são apresentadas as considerações finais sobre o desenvolvimento desta dissertação. Estão descritas as principais conclusões do trabalho, apresentadas as limitações observadas, bem como a sugestão de trabalhos futuros.

### 5.1 Conclusões

As redes ópticas baseadas na tecnologia WDM permitem o transporte de uma enorme quantidade de *gigabytes* por segundo de dados em cada *link* numa rede de transmissão óptica. No entanto, a grande capacidade de um *link* tem um inconveniente que é, em caso de uma avaria, as perdas de grandes quantidades de tráfego (e de receita) são inevitáveis. Desta forma, estas falhas devem ser tratadas com rapidez e eficiência de modo a minimizarem o impacto que têm nos SLAs entre os prestadores de serviços e os seus clientes.

Nesta dissertação foram apresentadas as principais características dos protocolos de encaminhamento e de sinalização do GMPLS. Foram apresentados diferentes tipos de falha em NGNs, quer ao nível do Plano de Dados quer ao nível do Plano de Controlo do GMPLS bem como identificados os principais passos na gestão de falha de uma ligação: Detecção, Localização, Notificação e Mitigação.

Foram exploradas as arquitecturas de sobrevivência das NGN baseadas em mecanismos de protecção e de restauro bem como a sua aplicação ao nível do *span*, segmento ou caminho. Foram destacadas as características dos mecanismos de protecção que são tipicamente mais rápidos mas menos eficientes que os esquemas de restauro no que diz respeito à utilização dos recursos de rede.

Foram estudados os conceitos do algoritmo RWA no que respeita ao estabelecimento do caminho de luz. O SLE é usado na fase de planeamento de capacidade e desenho da arquitectura de uma rede óptica, sendo designado também de RWA estático. O DLE, designado de RWA dinâmico, tem como objectivo escolher uma rota e um comprimento de onda que maximize a probabilidade de estabelecer uma determinada ligação.

Foi apresentado o algoritmo Dijkstra como estratégia para determinar o caminho que minimiza uma métrica em particular, em especial, a métrica do caminho com o menor número de saltos.

Com recurso a um modelo de simulação de redes WDM, baseado no simulador de redes ns-3, foram analisados três cenários de falha. São eles, falha num *link*, falha em múltiplos *links* e falha num nó. Assim, foi possível verificar o comportamento do algoritmo RWA, na ocorrência de uma falha.

O algoritmo RWA permitiu, nos três cenários de falha, recalculer os canais para um caminho alternativo, e desta forma assegurar a continuidade da transmissão.

## **5.2 Limitações da Investigação**

A principal limitação evidenciada no desenvolvimento desta dissertação prendeu-se com a utilização de um simulador de redes WDM que não implementava a componente de falha e de restauro bem como a componente de Plano de Controlo do GMPLS.

Uma outra limitação do sistema diz respeito à componente de animação. Por funcionar de forma *offline*, não permite executar alterações ao sistema de forma interactiva.

### **5.3 Trabalho Futuro**

Com a finalidade de contribuir para o estudo das NGN, em especial, no que diz respeito à análise de falhas em redes ópticas, seguem algumas sugestões para melhoria da plataforma de simulação:

- Implementar o GMPLS com todos os seus componentes e criar os mecanismos de interacção entre os dois planos;
- Aplicar o conceito SRLG de modo a permitir a recuperação de falha na existência de recursos partilhados;
- Incluir no algoritmo RWA a possibilidade de se escolher o tipo de esquema de atribuição de comprimento de onda;

É com satisfação que se dá por concluída a presente dissertação, desejando que todo o esforço e empenho colocado neste estudo permitam uma maior consciencialização da importância da sobrevivência das redes de transporte da nova geração.





# Bibliografia

- [1] R. Ramaswami, K. N. Sivarajan, and G. H. Sasaki, *Optical Networks: A Practical Perspective*, 3rd ed. Burlington: Morgan Kaufmann, 2010.
- [2] J. Xiao, B. Wu, X. Jiang, A. Pattavina, H. Wen, and L. Zhang, “Scalable Data Center Network Architecture With Distributed Placement of Optical Switches and Racks,” *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 6, no. 3, p. 270, Feb. 2014.
- [3] J. M. Simmons, *Optical Network Design and Planning*, 2nd ed. New Jersey: Springer Science & Business Media, 2014.
- [4] A. Haider and R. Harris, “Recovery techniques in next generation networks,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 9, no. 3, pp. 2–17, 2007.
- [5] A. Somani, *Survivability and Traffic Grooming in WDM Optical Networks*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [6] G. Ellinas, D. Papadimitriou, J. Rak, D. Staessens, J. P. G. Sterbenz, and K. Walkowiak, “Practical issues for the implementation of survivability and recovery techniques in optical networks,” *Opt. Switch. Netw.*, vol. 14, pp. 179–193, Aug. 2014.
- [7] S. Ramamurthy, L. Sahasrabudde, and B. Mukherjee, “Survivable WDM mesh networks,” *J. Light. Technol.*, vol. 21, no. 4, pp. 870–883, Apr. 2003.
- [8] G. Ellinas, A. G. Hailemariam, and T. E. Stern, “Protection cycles in mesh WDM networks,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 18, no. 10, pp. 1924–1937, Oct. 2000.

- [9] I. Tomkos, B. Mukherjee, S. K. Korotky, R. S. Tucker, and L. Lunardi, "The Evolution of Optical Networking [Scanning the Issue]," *Proc. IEEE*, vol. 100, no. 5, pp. 1017–1022, May 2012.
- [10] P. Wright, A. Lord, and L. Velasco, "The Network Capacity Benefits of Flexgrid," *Opt. Netw. Des. Model. (ONDM), 2013 17th Int. Conf.*, pp. 7–12, 2013.
- [11] A. Stavdas, *Core and Metro Networks*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2010.
- [12] Y. Zhang, P. Chowdhury, M. Tornatore, and B. Mukherjee, "Energy Efficiency in Telecom Optical Networks," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 12, no. 4, pp. 441–458, 2010.
- [13] C. S. Ou and B. Mukherjee, *Survivable Optical WDM Networks*. New York: Springer Science & Business Media, 2005.
- [14] R. Santitoro, "Vision and Strategy - Based on Network as a Service Principles," no. November, pp. 1–17, 2014.
- [15] C. Lam, *Passive Optical Networks: Principles and Practice*. Burlington: Academic Press, 2007.
- [16] C. Lin, *Broadband Optical Access Networks and Fiber-to-the-Home: Systems Technologies and Deployment Strategies*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2006.
- [17] A. Shami, M. Maier, and C. Assi, *Broadband Access Networks: Technologies and Deployments*. Springer Science & Business Media, 2009.
- [18] A. Gladisch, R.-P. Braun, D. Breuer, A. Ehrhardt, H.-M. Foisel, M. Jaeger, R. Leppla, M. Schneiders, S. Vorbeck, W. Weiershausen, and F.-J. Westphal, "Evolution of Terrestrial Optical System and Core Network Architecture," *Proc. IEEE*, vol. 94, no. 5, pp. 869–891, May 2006.

- [19] Á. Barradas, “Quality of Service in Optical Burst Switching Networks,” Universidade do Algarve, 2009.
- [20] K. H. Liu, *IP over WDM*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2002.
- [21] K. C. Chua, M. Gurusamy, Y. Liu, and M. H. Phung, *Quality of Service in Optical Burst Switched Networks*. New York: Springer Science & Business Media, 2007.
- [22] “G.694.1 : Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid,” 2012. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1/en>. [Accessed: 05-Sep-2015].
- [23] R. Horak, *Webster’s New World Telecom Dictionary*. Indianapolis: Wiley Publishing, Inc., 2008.
- [24] G. I. Papadimitriou, C. Papazoglou, and A. S. Pomportsis, “Optical switching: switch fabrics, techniques, and architectures,” *J. Light. Technol.*, vol. 21, no. 2, pp. 384–405, Feb. 2003.
- [25] B. Mukherjee, *Optical WDM Networks*. Springe, 2006.
- [26] T. Venkatesh and C. S. R. Murthy, *An Analytical Approach to Optical Burst Switched Networks*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [27] ITU-T, “G.Sup43 - Transport of IEEE 10GBASE-R in optical transport networks (OTN),” 2011.
- [28] T. Ohara and O. Ishida, “Standardization Activities for the Optical Transport Network | NTT Technical Review,” *NTT Technical Review*, Yokosuka-shi, 239-0847 Japan, 2009.
- [29] D.-Z. Ruan, Lu; Du, *Optical Networks — Recent Advances: Recent Advances*. Published by Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [30] L. N. BINH, “Routing and Wavelength Assignment in GMPLS-based 10 Gb/s Ethernet Long Haul Optical Networks with and without Linear

- Dispersion Constraints,” *Int. J. Commun. Netw. Syst. Sci.*, vol. 01, no. 02, pp. 154–167, Jun. 2008.
- [31] A. Jajszczyk and P. Rozycki, “Recovery of the control plane after failures in ASON/GMPLS networks,” *IEEE Netw.*, vol. 20, no. 1, pp. 4–10, Jan. 2006.
- [32] A. Farrel and I. Bryskin, *GMPLS: Architecture and Applications*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2006.
- [33] A. Banerjee, L. Drake, L. Lang, B. Turner, D. Awduche, L. Berger, K. Kompella, and Y. Rekhter, “Generalized multiprotocol label switching: an overview of signaling enhancements and recovery techniques,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 39, no. 7, pp. 144–151, Jul. 2001.
- [34] S.-C. Hwang, I-Shyan; Huang, I-Feng; Yu, “Dynamic Fuzzy Controlled RWA Algorithm for IP/GMPLS over WDM Networks,” *J. Comput. Sci. Technol.*, 2005.
- [35] A. Banerjee, J. Drake, J. P. Lang, B. Turner, K. Kompella, and Y. Rekhter, “Generalized multiprotocol label switching: an overview of routing and management enhancements,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 39, no. 1, pp. 144–150, 2001.
- [36] E. Yamanaka, Naoaki; Shiimoto, Kohei; Oki, *GMPLS Technologies - Broadband Backbone Network and Systems*. CRC Press Taylor & Francis Group, 2003.
- [37] J. Yates and C. Kalmanek, “Control plane design for reliable optical networks,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 40, no. 2, pp. 90–96, 2002.
- [38] J. P. Lang and J. Drake, “Mesh network resiliency using GMPLS,” *Proc. IEEE*, vol. 90, no. 9, pp. 1559–1564, Sep. 2002.
- [39] N. Larkin, “ASON and GMPLS - The Battle of the Optical Control Plane,” *Data Connect. Ltd.*, no. August, 2002.

- [40] W. D. Grover, *Mesh-Based Survivable Networks Options and Strategies for Optical, MPLS, SONET and ATM Networking*. New Jersey: Prentice Hall PTR, 2004.
- [41] J. Rak, “Fast Service Recovery Under Shared Protection in WDM Networks,” *J. Light. Technol.*, vol. 30, no. 1, pp. 84–95, Jan. 2012.
- [42] J.-P. Vasseur, M. Pickavet, and P. Demeester, *Network Recovery: Protection and Restoration of Optical, SONET-SDH, IP, and MPLS*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2004.
- [43] R. R. Iraschko, M. H. MacGregor, and W. D. Grover, “Optimal capacity placement for path restoration in STM or ATM mesh-survivable networks,” *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 6, no. 3, pp. 325–336, Jun. 1998.
- [44] L. Berger, I. Bryskin, A. Farrel, and D. Papadimitriou, “GMPLS Segment Recovery-RFC4873,” *IETF*, 2007.
- [45] “The Network Simulator - ns-2,” 1989. [Online]. Available: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>. [Accessed: 29-Mar-2015].
- [46] “Network Simulator-3.” [Online]. Available: <https://www.nsnam.org/>. [Accessed: 17-Apr-2015].
- [47] “J-Sim Official.” [Online]. Available: <https://sites.google.com/site/jsimofficial/>. [Accessed: 17-Sep-2015].
- [48] “OMNeT++ - Discrete Event Simulator.” [Online]. Available: <https://omnetpp.org/>. [Accessed: 21-May-2015].
- [49] “OPNET.” [Online]. Available: <http://www.riverbed.com/products/steelcentral/opnet.html?redirect=opnet>. [Accessed: 17-Apr-2015].
- [50] “GLASS - GMPLS Lightwave Agile Switching Simulator.” [Online]. Available: <http://www-x.antd.nist.gov/glass/>. [Accessed: 20-May-2015].
- [51] K. Katsaros, “Introduction to NS-3,” 2013.

- [52] D. Kachan, “Integration of NS-3 with MATLAB/Simulink.” Luleå tekniska universitet, 26-Oct-2010.
- [53] “Installation - ns3.” [Online]. Available: <https://www.nsnam.org/wiki/Installation>. [Accessed: 01-May-2015].
- [54] “Mercurial repositories index.” [Online]. Available: <http://code.nsnam.org/>. [Accessed: 13-Jun-2015].
- [55] P. Gawlowicz, “pgawlowicz / ns-3-wdm — Bitbucket.” [Online]. Available: <https://bitbucket.org/pgawlowicz/ns-3-wdm>. [Accessed: 17-Sep-2015].
- [56] V. Mileti, “pwms / ns-3-dev-pwms — Bitbucket,” 2014. [Online]. Available: <https://bitbucket.org/pwms/ns-3-dev-pwms/>. [Accessed: 17-Sep-2015].
- [57] N.-3 Project, “ns-3 Model Library,” 2015. [Online]. Available: <https://www.nsnam.org/docs/models/ns-3-model-library.pdf>. [Accessed: 20-Jul-2015].
- [58] O. B. (Editors) Hamed Haddadi, “Recent Advances in Networking,” *ACM SIGCOMM*, p. 465, 2013.
- [59] P. W. Shumate and R. K. Snelling, “Evolution of fiber in the residential loop plant,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 29, no. 3, pp. 68–74, Mar. 1991.
- [60] “GNU Emacs.” [Online]. Available: <https://www.gnu.org/software/emacs/emacs.html>. [Accessed: 22-Jul-2015].
- [61] T. link International, “OTN Fundamental-3 | Thunder-Link.com, a Leading Professional Huawei Optical Network Supplier.” [Online]. Available: <http://www.thunder-link.com/blog/otn-fundamental-3/>. [Accessed: 05-Sep-2015].
- [62] ITU-T, “G.709/Y.1331,” 2012. [Online]. Available: [https://www.itu.int/rec/dologin\\_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.709-201202-I!!PDF-E&type=items](https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.709-201202-I!!PDF-E&type=items). [Accessed: 09-Aug-2015].