



**José Miguel de
Almeida Goucha
Jorge**

Redes Ópticas de Transporte





**José Miguel de
Almeida Goucha
Jorge**

Redes Ópticas de Transporte

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Armando Nolasco Pinto, Professor do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

O júri

Presidente

Prof. Doutor José Rodrigues Ferreira da Rocha
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

Vogais

Prof. Doutor Henrique José Almeida Silva
Professor Associado da Universidade de Coimbra, Faculdade de Ciências e Tecnologia

Prof. Doutor Armando Humberto Moreira Nolasco Pinto
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (orientador)

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Armando Nolasco Pinto, pelo seu apoio e disponibilidade, assim como por todos os esclarecimentos e sugestões realizadas ao longo desta dissertação de mestrado. Sem a sua contribuição não seria possível.

Gostaria ainda de agradecer à Universidade de Aveiro pelas condições que me proporcionou ao longo destes 5 anos, tal como a todos os meus professores, pelos conhecimentos transmitidos ao longo do curso.

Aos meus colegas e amigos, tanto pelos momentos de trabalho, como pelos momentos de diversão, por tornarem todo este percurso mais agradável.

À minha namorada, por estar sempre presente e pela força e incentivo que continuamente me deu e que sei que continuará a dar.

Finalmente, gostaria de agradecer à minha família, por todo o apoio, em especial à minha mãe, que sempre foi incansável na ajuda que me prestou em todos os aspectos da minha vida.

Palavras-chave

Comunicações ópticas, rede de transporte óptica (OTN), modelo de custos

Resumo

Neste trabalho foram estudadas as principais tecnologias que suportam as actuais redes de transporte.

Identificaram-se um conjunto de desafios que lhe são colocados pelo aumento do tráfego de pacotes e pela necessidade de reduzir o custo por bit transportado.

Estudou-se em detalhe a tecnologia de transporte OTN (Optical Transport Network).

Foi desenvolvido um modelo de custos para um nó da rede, considerando simultaneamente tecnologias baseadas em comutação de circuitos e comutação de pacotes.

Com base nos estudos efectuados concluiu-se que a redução do custo por bit transportado pode ser efectuada optimizando a quantidade de tráfego comutado ao nível dos circuitos e a quantidade de tráfego comutado com base em tecnologias de comutação de pacotes.

Keywords

Optical communications, Optical Transport Network (OTN), cost model

Abstract

In this work we studied the key technologies that support the current transport networks.

We identified a set of challenges that are posed by the increasing of packet data traffic and the need to reduce the cost per bit transported.

We studied in detail the transport technology OTN (Optical Transport Network).

We developed a cost model for a network node while considering technologies based on circuit switching and packet switching.

Based on the studies it was concluded that lowering the cost per bit transported can be performed by optimizing the amount of traffic switched at circuits level and the amount of traffic switched based on packet switching technologies.

Índice

Índice	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	v
Lista de Símbolos	vii
Lista de Siglas e Acrónimos	ix
1 Introdução.....	1
1.1 Introdução	1
1.2 Redes de Transporte	1
1.3 Objectivos do Trabalho.....	3
1.4 Organização do Trabalho	4
1.5 Principais Resultados Obtidos.....	5
2 Tecnologias Emergentes.....	7
2.1 Introdução	7
2.2 Evolução Tecnológica.....	7
2.3 Camada Física.....	8
2.4 OTN.....	10
2.5 Ethernet.....	12
2.6 Comutação de Pacotes ao Nível do transporte (MPLS-TP)	14
3 Rede óptica de transporte	17
3.1 Introdução	17
3.2 PDH.....	17
3.3 SDH.....	19
3.3.1 Estrutura da Trama.....	21
3.3.2 Cabeçalho da Trama	22
3.3.3 Hierarquia de Camadas	23
3.3.4 Estrutura de Multiplexagem.....	24

3.3.5	Elementos de Rede.....	25
3.4	NG-SDH.....	27
3.4.1	VCAT.....	27
3.4.2	LCAS.....	29
3.4.3	GFP.....	33
3.4.4	Elementos de Rede.....	36
3.5	OTN.....	37
3.5.1	Taxas de Transmissão.....	38
3.5.2	Hierarquia OTN.....	39
3.5.3	Estrutura da Trama.....	41
3.5.4	Cabeçalho da trama OTN.....	42
3.5.5	Transmissão de Cabeçalhos das Camadas Ópticas.....	45
3.5.6	Monitorização das Ligações em Cascata.....	46
3.5.7	Correcção de Erros.....	47
3.5.8	Elementos de Rede.....	49
4	Estudo de Cenários Realistas.....	53
4.1	Introdução.....	53
4.2	Arquitectura dos Nós.....	53
4.3	Modelo de Custos.....	55
4.4	Estudo Comparativo.....	58
4.5	Análise de Cenários.....	63
4.6	Discussão de Resultados.....	78
5	Conclusões Finais.....	81
6	Referências.....	83

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Gastos do orçamento familiar em vários países, em 2005, retirado de [2].....	2
Figura 1.2 - Tráfego de dados ultrapassa tráfego de voz, retirado de [7].....	3
Figura 2.1 – Sistema óptico simples, retirado de [9]	8
Figura 2.2 – Multiplexagem por divisão de comprimento de onda, adaptado de [8].....	9
Figura 2.3 – Evolução das tecnologias e standards da rede de transporte, retirado de [18]	11
Figura 2.4 – Convergência para a OTN, retirado de [19].....	12
Figura 2.5 – Atributos da Carrier Ethernet.....	13
Figura 2.6 – Convergência ITU-T/IETF para a criação da norma MPLS-TP consistente, retirado de [22].....	15
Figura 3.1 – Construção dos canais com as várias taxas de transmissão no PDH	19
Figura 3.2 – Estrutura da trama SDH, retirado de [24].....	21
Figura 3.3 – Disposição dos bytes do cabeçalho STM-1, adaptado de [16].....	22
Figura 3.4 – Estrutura de multiplexagem SDH, retirado de [1].....	24
Figura 3.5 – LTM, retirado de [1].....	25
Figura 3.6 – ADM, retirado de [1].....	26
Figura 3.7 – DXC, retirado de [1]	26
Figura 3.8 – REG, retirado de [1].....	26
Figura 3.9 – Comparação entre concatenação contínua e concatenação virtual, retirado de [28].....	28
Figura 3.10 – Protocolo de transmissão LCAS, retirado de [17].....	33
Figura 3.11 – Trama GFP, retirado de [32].....	34
Figura 3.12 – Transparent GFP, retirado de [28].....	35
Figura 3.13 – Frame Mapped GFP, retirado de [28]	36
Figura 3.14 – Migração das redes SDH convencionais para as redes NG-SDH, retirado de [17].....	36
Figura 3.15 – Elementos de rede NG-SDH, retirado de [28].....	37
Figura 3.16 – Hierarquia OTN conceptual, adaptado de [16].....	39
Figura 3.17 – Classes de interface e camadas OTN do ponto de vista da rede de transporte, retirado de [36].....	40
Figura 3.18 – Estrutura da trama OTN, retirado de [16].....	42
Figura 3.19 – Estrutura do cabeçalho da Trama OTN, retirado de [16].....	42
Figura 3.20 – Transmissão de cabeçalhos das camadas ópticas, retirado de [3].....	45

Figura 3.21 – Monitorização das ligações em cascata na OTN, retirado de [3].....	46
Figura 3.22 – Sub-linhas do FEC, retirado de [34].....	48
Figura 3.23 – Palavra de código FEC, retirado de [34].....	48
Figura 3.24 – OA, retirado de [3]	49
Figura 3.25 – OTM, retirado de [3].....	50
Figura 3.26 – OADM fixo e OADM reconfigurável, retirado de [3].....	50
Figura 3.27 – OXC com comutação óptica e OXC com comutação eléctrica, retirado de [3].....	51
Figura 4.1 – Arquitectura IP sobre WDM, adaptado de [42]	54
Figura 4.2 – Arquitectura IP sobre OTN, adaptado de [42].....	54
Figura 4.3 – Arquitectura IP sobre WDM utilizada no estudo	55
Figura 4.4 – Arquitectura IP sobre OTN utilizada no estudo.....	55
Figura 4.5 – Vários tipos de portas na arquitectura IP sobre WDM.....	59
Figura 4.6 - Vários tipos de portas na arquitectura IP sobre OTN.....	61
Figura 4.7 – Dependência do custo dos equipamentos base com o tráfego	66
Figura 4.8 – Custo do nó em função do tráfego de passagem, para $T=1000$ Gb/s	67
Figura 4.9 – Vista aproximada de parte da Figura 4.8.....	68
Figura 4.10 - Custo do nó em função do tráfego de passagem, para: a) $T=400$ Gb/s b) $T=800$ GB/s.....	71
Figura 4.11 - Custo do nó em função do tráfego de passagem, para: c) $T=1200$ Gb/s d) $T=1600$ GB/s.....	72
Figura 4.12 - Custo do nó em função do tráfego de passagem, para: c) $T=2000$ Gb/s d) $T=2400$ GB/s.....	73
Figura 4.13 – Custo do nó em função do tráfego total, para $\beta = 0.85$	74
Figura 4.14 – Vista aproximada de parte da Figura 4.13.....	75
Figura 4.15 - Custo do nó em função do tráfego total, para: a) $\beta = 0.5$ b) $\beta = 0.7$	76
Figura 4.16 - Custo do nó em função do tráfego total, para: c) $\beta = 0.75$ d) $\beta = 0.8$ e) $\beta = 0.9$ f) $\beta = 0.95$	77

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Taxas de transmissão PDH	18
Tabela 3.2 – Comparação do número de canais com o número de bits de overhead, no PDH	18
Tabela 3.3 – Taxas de transmissão SDH	20
Tabela 3.4 – Hierarquia de camadas SDH	23
Tabela 3.5 – Palavras de controlo LCAS	31
Tabela 3.6 – Estados do membro LCAS	32
Tabela 3.7 – Taxas de transmissão OTN	38
Tabela 4.1 – Interfaces Ethernet.....	64
Tabela 4.2 – Interfaces OTN.....	64
Tabela 4.3 – Portas utilizadas.....	64
Tabela 4.4 – Custo de cada equipamento, em função da capacidade.....	65
Tabela 4.5 – Tráfego para $\beta = 0.188$ e $\beta = 0.192$ (T=1000 Gb/s).....	69
Tabela 4.6 – Número de portas necessárias para $\beta = 0.188$ e $\beta = 0.192$ (T=1000 Gb/s).....	69
Tabela 4.7 – Tráfego para $\beta = 0.198$, $\beta = 0.200$ e $\beta = 0.202$ (T=1000 Gb/s).....	70
Tabela 4.8 – Número de portas necessárias para $\beta = 0.198$, $\beta = 0.200$ e $\beta = 0.202$ (T=1000 Gb/s)	70

Lista de Símbolos

br	bit rate
C_n	Custo do nó
C_{pxc}	Custo do packet cross connect
C_{exc}	Custo do electrical cross connect
$C_{0,pxc}$	Custo “fixo” do router
$C_{1,pxc}$	Custo variável do router
$C_{0,exc}$	Custo “fixo” do EXC
$C_{1,exc}$	Custo variável do EXC
$\gamma_{0,pxc}$	Custo do equipamento base (router)
$\gamma_{0,exc}$	Custo do equipamento base (EXC)
$C_{1,SR}$	Custo das portas short reach
$C_{1,LR}$	Custo das portas long reach
$P_{SR,br}$	Número de portas necessárias do tipo short reach, de um dado bit rate
$C_{SR,br}$	Custo das portas do tipo short reach, de um dado bit rate
$P_{LR,br}$	Número de portas necessárias do tipo long reach, de um dado bit rate
$C_{LR,br}$	Custo das portas do tipo long reach, de um dado bit rate
T	Tráfego total processado no nó
$T_{add/drop}$	Tráfego local no nó
T_{thru}	Tráfego de passagem no nó
β	Porcentagem de tráfego de passagem relativamente ao tráfego total
F_e	Factor de expansão do router

Lista de Siglas e Acrónimos

ADM Add/Drop Multiplexer

APS/PCC Automatic Protection Switching and Protection Communication Channel

ATM Asynchronous Transfer Mode

AU Administrative Unit

AUG Administrative Unit Group

BER Bit Error Rate

BIP Bit-Interleaved Parity

C Container

CAPEX Capital Expenditure

cHEC core Header Error Check

CRC Cyclic Redundancy Check

CTRL Control

DEMUX Demultiplexer

DWDM Dense Wavelength Division Multiplexing

DXC Digital cross Connect

EDFA Erbium Doped Fiber Amplifier

EXC Electrical cross Connect

FA Frame Alignment

FAS Frame Alignment Signal

FAW Frame Alignment Word

FCS Frame Check Sequence

FEC Forward Error Correction

FTFL Fault Type and Fault Location

GCC General Communication Channel

GFP Generic Framing Procedure

GFP-F Frame-mapped Generic Framing Procedure

GFP-T Transparent Generic Framing Procedure

GID Group Identification

GbE Gigabit Ethernet

IaDI Intra-Domain Interface

IETF Internet Engineering Task Force

IP Internet Protocol

IrDI Inter-Domain Interface

ITU-T International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector

JC Justification Control

JWT Joint Working Team

LAN Local Area Network

LCAS Link Capacity Adjustment Scheme

LR Long Reach

LTM Line Terminal Multiplexer

MEF Metro Ethernet Forum

MFAS MultiFrame Alignment Signal

MFI Multi-Frame Indicator

MPLS Multi-Protocol Label Switching

MPLS-TP Multi-Protocol Label Switching – Transport Profile

MSOH Multiplex Section Overhead

MSPP Multi-Service Provisioning Platform

MSSP Multi-Service Switching Platform

MST Member Status

MSTP Multi-Service Transport Platform

MUX Multiplexer

NG-SDH New Generation – Synchronous Digital Hierarchy

NJO Negative Justification Opportunity

OA Optical Amplifier

OADM Optical Add/Drop Multiplexer

OAM Operational, Administration and Maintenance

OCC Optical Channel Carrier

OCh Optical Channel

ODU Optical channel Data Unit

OH Overhead

OMS Optical Multiplex Section

OPEX Operational Expenditure

OPU Optical channel Payload Unit

OSC Optical Supervisory Channel

OSI Open Systems Interconnection

OTM Optical Terminal Multiplexer

OTN Optical Transport Network

OTS Optical Transmission Section

OTU Optical channel Transport Unit

OXC Optical cross Connect

PCM Pulse Code Modulation

PDH Plesiochronous Digital Hierarchy

PJO Positive Justification Opportunity

PM Path Monitoring

POH Path Overhead

PPP Point-to-Point Protocol

PSI Payload Structure Identifier

PTI Payload Type Identifier

REG Regenerator

RS Reed-Solomon

RS-Ack Re-Sequence Acknowledge

RSOH Regenerator Section Overhead

SDH Synchronous Digital Hierarchy

SLA Service Level Agreement

SM Section Monitoring

SQ Sequence

SR Short Reach

STM Synchronous Transport Module

T-MPLS Transport – Multi Protocol Label Switching

TCM Tandem Connection Monitoring

TCO Total Cost of Ownership

TDM Time Division Multiplexing

tHEC type Header Error Check

TTI Trail Trace Identifier

TU Tributary Unit

TUG Tributary Unit Group

VC Virtual Container

VCAT Virtual Concatenation

VCG Virtual Concatenation Group

WDM Wavelength Division Multiplexing

1 Introdução

1.1 Introdução

O objectivo deste capítulo é dar a conhecer a motivação que levou à realização desta dissertação. Assim, é destacado o problema que suporta o estudo efectuado, assim como os principais objectivos a atingir. É também já destacada a estrutura do trabalho e quais as contribuições do mesmo.

Na secção 1.2 é então realizada uma introdução à rede de transporte de informação, onde serão identificadas algumas limitações actuais, tornando-se patentes as principais preocupações e problemas dos prestadores de serviços. Na secção 1.3 são definidos os principais objectivos a atingir na realização do trabalho. Toda organização da dissertação é já definida na secção 1.4, tendo esta descrição sido feita capítulo a capítulo como forma de tornar claro, quer o conteúdo de cada um em si, quer o encadeamento das ideias. Por último, são apresentados na secção 1.5 os principais resultados obtidos.

1.2 Redes de Transporte

As telecomunicações apresentam um impacto muito forte a nível social, cultural e económico na sociedade moderna, tendo sido a sua evolução até ao presente marcada pela sucessiva introdução de novas tecnologias [1]. Uma parte substancial do orçamento das famílias é, neste momento, direccionada para este sector, tal como se pode observar na Figura 1.1. Verifica-se que, já em 2005, a percentagem do orçamento familiar destinado às comunicações ultrapassava os 5 % em vários países, sendo na maior parte deles superior à percentagem gasta na saúde [2].

Os serviços de telecomunicações são suportados pelas redes de telecomunicações. Estas são usualmente descritas por um modelo de camadas, podendo assim ser divididas em camada de rede de serviço e camada de rede de transporte [3]. Se por um lado a primeira é responsável por disponibilizar serviços específicos entre os utilizadores e da qual fazem parte por exemplo as redes de dados e as redes telefónicas, vai ser a rede de transporte a garantir à rede de serviço uma plataforma otimizada para a transferência de informação [4]. As redes de transporte são responsáveis por agregar o tráfego proveniente das redes metro e de acesso transportando-o entre as maiores cidades, representando o principal suporte de transmissão a média e longa distância.

Estas redes são projectadas com o objectivo de transportar eficientemente grandes quantidades de tráfego, tentando obter a relação custo por bit o menor possível [5].

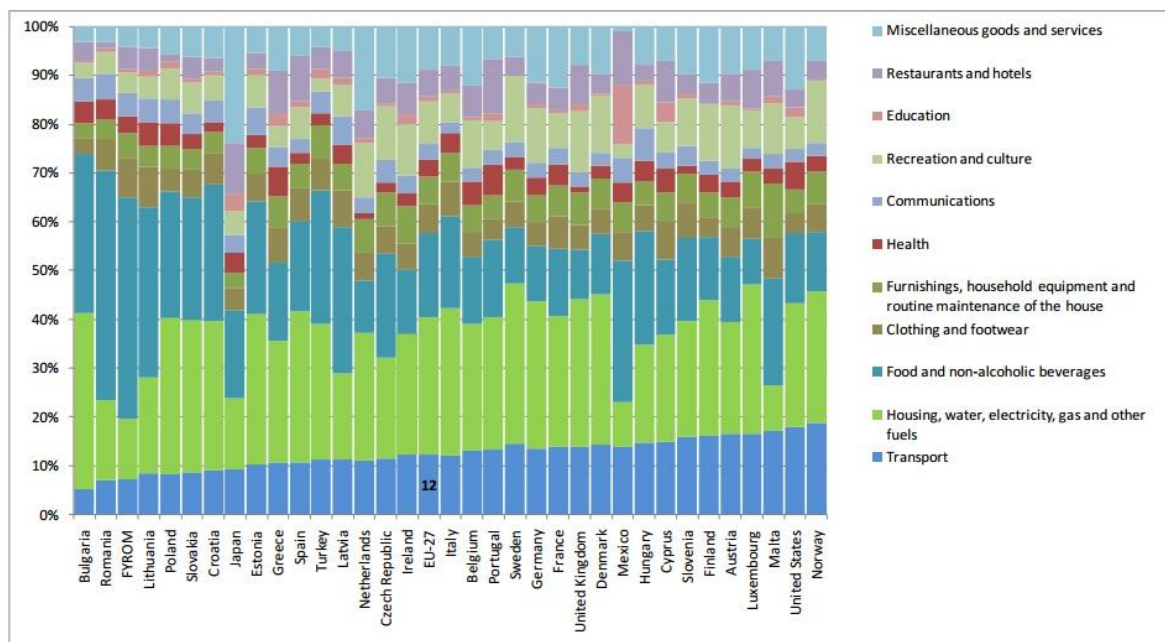


Figura 1.1 – Gastos do orçamento familiar em vários países, em 2005, retirado de [2]

Antes do surgimento dos serviços na web e do conseqüentemente aumento do tráfego da Internet, causado por novos utilizadores e aplicações que requerem grande largura de banda, a maior parte do tráfego era gerado pelas chamadas de voz, tendo sido desenvolvidas hierarquias digitais baseadas neste tipo de tráfego [6]. Deste modo as hierarquias digitais PDH e SDH foram desenvolvidas e normalizadas, tendo sido durante algum tempo as hierarquias dominantes no panorama das redes de transporte [5].

No entanto, nos anos 90, os serviços de dados começaram a ganhar força, o que levou a que começassem a ser desenvolvidas várias tecnologias baseadas em redes de transporte de comutação de pacotes ao invés de comutação de circuitos. Na primeira década deste século o volume de tráfego de dados ultrapassou largamente o volume de tráfego de voz [7], tal como se pode verificar através da Figura 1.2, na qual é representada e comparada a evolução do tráfego de dados e do tráfego de voz nos Estados Unidos. Os principais fornecedores de serviços reportavam duplicações do tráfego a cada período entre seis e nove meses [8]. Isto deveu-se em grande parte ao crescimento de 300 % por ano no tráfego da Internet [8]. Perante este cenário as operadoras de telecomunicações perceberam que não seria possível fornecer de forma

eficiente serviços baseados predominantemente em comutação de pacotes, quando as infra-estruturas estavam optimizadas para comutação de circuitos.

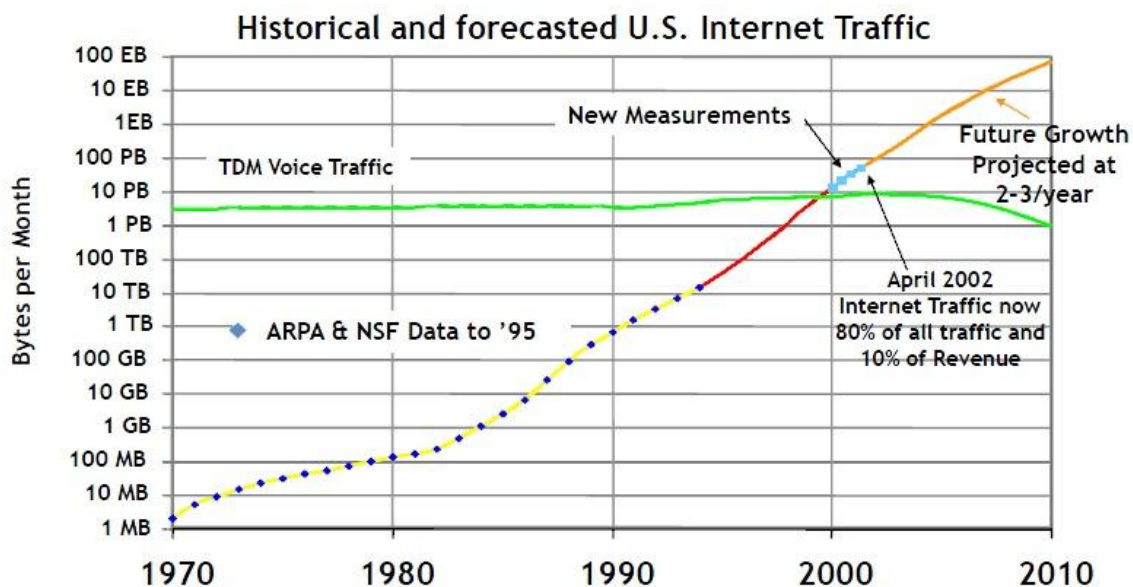


Figura 1.2 - Tráfego de dados ultrapassa tráfego de voz, retirado de [7]

Assim, devido ao aumento exponencial do tráfego que se tem verificado, sendo este predominantemente de dados e também ao facto de se observar que os utilizadores estão disponíveis para consumirem mais bits, esperando no entanto pagar menos por bit, fica clara a necessidade de diminuir o CAPEX e o OPEX das redes, a fim de as operadoras conseguirem reduzir o custo por bit a transportar.

Desde então várias tecnologias têm vindo a ser desenvolvidas por forma a converter as redes de transporte em redes optimizadas para as exigências actuais. Destas destacam-se os sistemas de transmissão coerentes, a Ethernet, a comutação de pacotes ao nível do transporte (em particular a tecnologia MPLS-TP) e a OTN. Esta última será o principal objecto de estudo ao longo deste trabalho.

1.3 Objectivos do Trabalho

O trabalho realizado, no âmbito da presente dissertação, possui como principais objectivos os seguintes pontos:

- Identificação das tecnologias emergentes na área de transporte, e compreensão da sua função para a redução do custo por bit transportado.

- Estudo detalhado da tecnologia OTN como uma solução emergente para o problema de reduzir o custo por bit associado ao transporte de grandes quantidades de informação.
- Desenvolvimento de um modelo de custo para a área de transporte, usando a OTN, com o objectivo de estudar cenários realistas.
- Estudo de cenários realistas.

1.4 Organização do Trabalho

Este trabalho estará organizado em cinco capítulos, onde no início de cada um está apresentada a sua organização.

Neste primeiro capítulo foi realizada uma introdução ao tema, tendo sido feita uma breve descrição dos serviços de transporte de informação ao longo do tempo, culminando na situação actual, por forma a realçar a necessidade e a motivação que levou a esta investigação. São também referidos os objectivos a alcançar, assim como os principais resultados obtidos no âmbito deste trabalho.

No próximo capítulo, o segundo capítulo desta dissertação, são identificadas as principais tecnologias emergentes. Desta forma, tornar-se-á mais clara toda a envolvente ao problema em estudo nesta dissertação. São focados os sistemas de transmissão coerentes, sendo explicado sucintamente o seu modo de funcionamento e algumas das razões que levaram ao seu desenvolvimento. A OTN é abordada de forma breve, uma vez que será o principal tema do capítulo três, optando-se por descrever um pouco da sua evolução. No caso da Ethernet foi abordada mais pormenorizadamente uma das suas vertentes, a Carrier Ethernet, que surgiu mais recentemente e a nível global. É também estudado o MPLS-TP, o que é e a forma como surgiu.

O terceiro capítulo foca-se numa análise detalhada da tecnologia em estudo neste trabalho, a tecnologia OTN. É iniciado o estudo no PDH, passando pelo SDH e NG-SDH e toda a sua evolução até atingirmos a OTN. Em relação ao PDH é apenas efectuada uma breve abordagem, sendo que no SDH o estudo será mais aprofundado, analisando-se a estrutura e o cabeçalho da sua trama, a sua hierarquia de camadas assim como a sua estrutura de multiplexagem. Passando para o NG-SDH são analisadas as novas tecnologias neste introduzidas, o VCAT, o LCAS e o GFP, sendo também referidos alguns elementos da rede. Finalmente em relação à OTN, será realizado um estudo detalhado, abordando as suas taxas de transmissão, a sua hierarquia de camadas, quer do ponto de vista da hierarquia OTN conceptual, quer do ponto de vista da rede de

transporte. Será também analisada a estrutura da sua trama, assim como os cabeçalhos usados. Também a monitorização das ligações em cascata e o FEC (Forward Error Correction) serão alvos de estudo.

No capítulo quatro será estudado o papel que a OTN tem a desempenhar em cenários realistas. Assim, foi analisada a arquitectura dos nós da rede de transporte tendo em conta duas vertentes: o caso em que existe comutação de circuitos eléctrica (IP sobre OTN) e o caso em que existe comutação de pacotes (IP sobre WDM). Foi ainda desenvolvido um modelo de custos por forma a serem efectuadas análises de cenários realistas.

O último capítulo, o capítulo cinco, estará reservado para as conclusões e considerações finais.

1.5 Principais Resultados Obtidos

Na opinião do autor, os principais resultados obtidos no âmbito do presente trabalho são:

- Desenvolvimento de um modelo de custo para redes baseadas na arquitectura IP sobre WDM.
- Desenvolvimento de um modelo de custo para redes baseadas na arquitectura IP sobre OTN.
- Comparação das tecnologias IP sobre WDM e IP sobre OTN em cenários realistas.

2 Tecnologias Emergentes

2.1 Introdução

O capítulo 2 tem como objectivo dar a conhecer as principais tecnologias que têm vindo a ser desenvolvidas no sentido de transportar o tráfego de dados de uma forma mais eficiente, em termos de custos. Desta forma é feita uma análise geral sobre cada uma delas, na qual são destacadas as suas principais vantagens e benefícios para superar o problema referido.

Assim, este capítulo encontra-se dividido em 6 secções. Na secção seguinte é dada a conhecer a evolução das redes de transporte, no sentido de se conhecer cada uma das tecnologias emergentes. Na secção 2.3 é estudada a camada física, na qual serão analisados os sistemas coerentes, o WDM e os OXC. A secção 2.4 estará reservada para a OTN, que sendo o principal tema em estudo nesta dissertação será apenas fruto de uma breve abordagem neste capítulo, na qual é descrita a sua evolução. Na secção 2.5 e 2.6 serão analisados a Ethernet e o MPLS-TP, respectivamente.

2.2 Evolução Tecnológica

A tecnologia predominante nas redes de transporte tradicionais é o SDH. Esta tecnologia consiste na multiplexagem de canais com baixa taxa de transmissão (tipicamente sinais PDH) em canais com uma taxa de transmissão superior, compatíveis com os débitos dos sistemas de transmissão ópticos. Estas taxas de transmissão dos canais são fixas e estão organizadas hierarquicamente por forma a ser possível escalabilidade na agregação dos vários canais. Além disso possui também um forte mecanismo de OAM e funções de protecção.

As redes de transporte estão a evoluir de forma constante a partir destas infra-estruturas do SDH para atingir uma solução que suporte melhor o aumento do tráfego IP (tráfego de pacotes) e para fazer face à pressão existente para reduzir o custo por bit da informação transportada.

- Na camada 0, a evolução aponta na direcção da tecnologia de transmissão coerente e WDM reconfigurável para uma utilização mais optimizada da capacidade de transmissão da fibra óptica.

- Na camada 1, a OTN está a emergir, para um transporte transparente numa camada óptica com múltiplos comprimentos de onda e com taxas de erros da ordem de 10^{-3} .
- Na camada 2, a Ethernet está a aparecer como a tecnologia dominante, sendo uma interface bastante popular e que possui um custo bastante reduzido.
- Na camada 2.5, o MPLS está a surgir como a tecnologia de comutação de pacotes dominante [5].

2.3 Camada Física

Nas redes de transporte a fibra óptica vai estabelecer a comunicação entre um transmissor e um receptor. Se por um lado os transmissores são os responsáveis por converter o sinal eléctrico no sinal óptico que será transportado na fibra, os receptores têm a função inversa, convertendo o sinal óptico num sinal eléctrico que vai corresponder ao enviado originalmente.

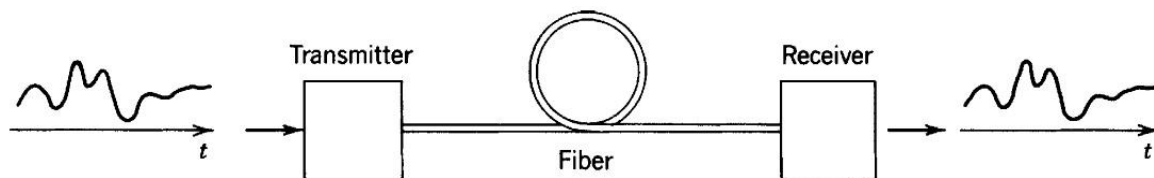


Figura 2.1 – Sistema óptico simples, retirado de [9]

Estes transmissores, também denominados fontes de luz ou fontes ópticas são semicondutores cuja intensidade luminosa vai ser modulada através da intensidade do sinal eléctrico a transmitir. Isto é feito controlando a corrente eléctrica injectada no semiconductor. Os receptores são detectores de luz que também se podem designar fotodetectores [10].

As redes ópticas actuais, na sua maioria, são suportadas por sistemas de transmissão assentes na detecção directa e na modulação em intensidade [11]. Embora estes sejam bastante simples e as suas infra-estruturas tenham um custo reduzido, o seu desempenho é bastante limitado. Isto deve-se ao facto dos formatos de modulação que utilizam a detecção directa possuírem uma eficiência espectral limitada, uma vez que não utilizam o espectro de uma forma eficiente. Ao codificarem apenas a informação presente na amplitude do sinal vai ser perdida, durante a detecção, a informação de fase do sinal,

visto que o receptor apenas será sensível à informação codificada na amplitude. Uma vez que o sinal vai ser afectado por distorções lineares, nomeadamente a dispersão, devido a estas ineficiências será difícil compensá-las totalmente [11] [12].

Para fazer face a estas limitações surgiram os sistemas ópticos coerentes, aliando formatos de modulação mais avançados com técnicas de detecção coerentes têm permitido aumentar a capacidade do canal óptico pois permitem um aumento da eficiência espectral. A possibilidade do transmissor utilizar modulação óptica avançada, juntamente com a detecção coerente e o processamento digital do lado do receptor viabilizam o uso de vários formatos de modulação mais eficientes do ponto de vista espectral. Uma vez que os receptores possuem agora a capacidade de recuperar informação em vários graus de liberdade (em amplitude e em fase), consegue-se aumentar a distância entre símbolos transmitidos [13] [14] [15].

O ponto negativo deste progresso é o facto dos receptores coerentes serem mais complexos, embora as evoluções ao nível do processamento de sinal têm vindo a tornar mais fácil a implementação dos sistemas coerentes. [14]

Uma outra tecnologia que permite otimizar a utilização da fibra óptica é a multiplexagem por divisão de comprimento de onda ou Wavelength Division Multiplexing (WDM). Esta é uma tecnologia que permite a agregação de múltiplos sinais com diferentes tipos de comprimento de onda num mesmo canal, tal como ilustrado na Figura 2.2.

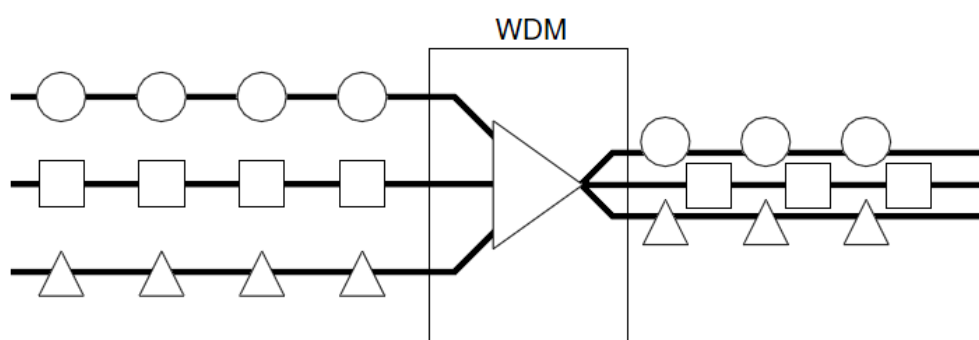


Figura 2.2 – Multiplexagem por divisão de comprimento de onda, adaptado de [8]

São os multiplexadores (MUX) os elementos fundamentais num sistema de multiplexagem por divisão de comprimento de onda, uma vez que são eles que têm a função de agregar os vários canais ópticos num único sinal. Os demultiplexadores (DEMUX) realizam a função inversa [3].

Assim, a utilização desta tecnologia tornou-se mais rentável que utilizar sinais SDH a taxas de transmissão mais elevadas, levando ao desenvolvimento da OTN, uma vez que a rede SDH foi projectada para apenas um comprimento de onda. Com a tecnologia WDM surgiram os Comutadores de Circuitos Ópticos ou Optical cross Connects (OXC), que ao possibilitarem o encaminhamento de comprimentos de onda permitiram aliviar o processamento eléctrico. Estes elementos de rede serão abordados na secção 3.5.8 do capítulo 3.

2.4 OTN

As redes de telecomunicações foram desenvolvidas tendo como plataforma de transporte a hierarquia digital plesiócrona (PDH), especialmente para tráfego que provinha das centrais telefónicas [6]. A designação de plesiócrona advém do facto dos relógios dos vários elementos da rede não estarem perfeitamente sincronizados, sendo considerados vários níveis intermédios de multiplexagem.

No entanto, devido às ineficiências desta hierarquia, no final da década de 80 foram desenvolvidas as redes SDH, hierarquia digital síncrona, tendo sido introduzidas ao longo das duas décadas seguintes [16]. Estas redes permitiam uma maior facilidade na flexibilidade das redes de transporte sobre um meio de alta capacidade. Ainda assim, devido ao contínuo aumento do tráfego e à natureza deste, passando a ser predominantemente tráfego de dados, tornou-se notório que estas redes teriam de evoluir por forma a incluir de forma nativa o suporte a este tipo de tráfego (uma vez que a utilização da estrutura de contentores é pouco eficiente para o transporte de dados) tendo também de possuir uma maior granularidade conseguindo fornecer ligações com a capacidade mais adequada a cada uma delas (a fragmentação dos contentores virtuais vai levar a uma maior ineficiência) [17].

Desta forma foi desenvolvido o NG-SDH, SDH de nova geração. Estas redes envolvem a utilização de três novas tecnologias:

- GFP (procedimento de encapsulamento genérico), um protocolo que possibilita o transporte de tráfego de débito binário variável em estruturas com débito binário fixo, o caso das estruturas de transporte SDH.
- VCAT (concatenação virtual), um mecanismo que oferece estruturas de transporte com maior granularidade para acomodação do tráfego, permitindo assim uma maior eficiência na utilização da capacidade das várias ligações.

- LCAS (ajuste dinâmico de capacidade), que permite o ajuste da capacidade de uma ligação lógica, possibilitando o acompanhamento das variações do tráfego durante o tempo em que a ligação lógica está activa.

Contudo, devido ao aumento exponencial do tráfego de dados e ao crescimento dos serviços na Internet, a gestão dos serviços de comprimento de onda tornou-se uma necessidade, uma vez que as tecnologias WDM estavam já bastante bem desenvolvidas. Tal como já referido, tornou-se mais rentável transmitir múltiplos sinais SDH sobre a mesma fibra, usando WDM, em vez de sinais SDH de taxas mais altas. Assim, iniciaram-se estudos nas redes de transporte ópticas para identificar os seus requisitos e identificar métodos para melhorar e maximizar a eficiência nos sistemas de transmissão ópticos, tendo sido criados, no final da década de 90, os padrões para a rede óptica de transporte OTN, para redes WDM, que abrangiam a camada física, taxas de sinal e especificações de formato [18]. Deste esforço nasceu a OTN. A Figura 2.3 mostra a evolução cronológica das tecnologias e normas da rede de transporte.

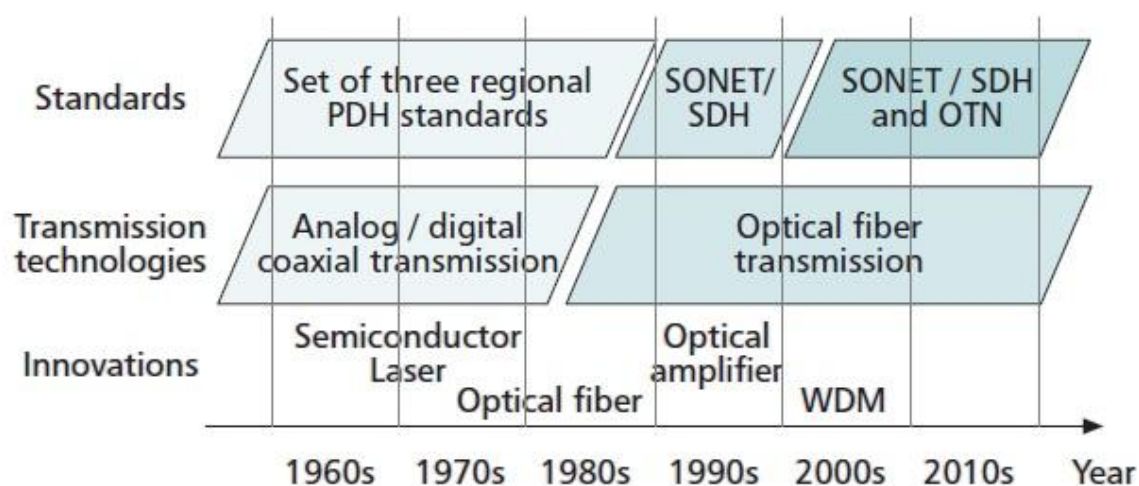


Figura 2.3 – Evolução das tecnologias e standards da rede de transporte, retirado de [18]

A OTN tem como alvo o transporte a longa distância e é conceptualmente similar à SDH, mas oferece diversas vantagens, uma vez que é um protocolo transparente que possui também compatibilidade com os protocolos já existentes. Vai também possibilitar uma redução de equipamento, que é conseguida utilizando uma poderosa técnica de correcção de erros (FEC) que introduz um ganho extra ao sistema, permitindo que os regeneradores possam estar mais espaçados [16]. Esta minimização da complexidade da rede leva a uma importante redução de custos. Na Figura 2.4 é possível observar a

evolução que tem ocorrido ao nível da camada 1, confirmando-se a tendência para a afirmação da OTN, estando o SDH a tornar-se uma camada cliente das redes OTN.

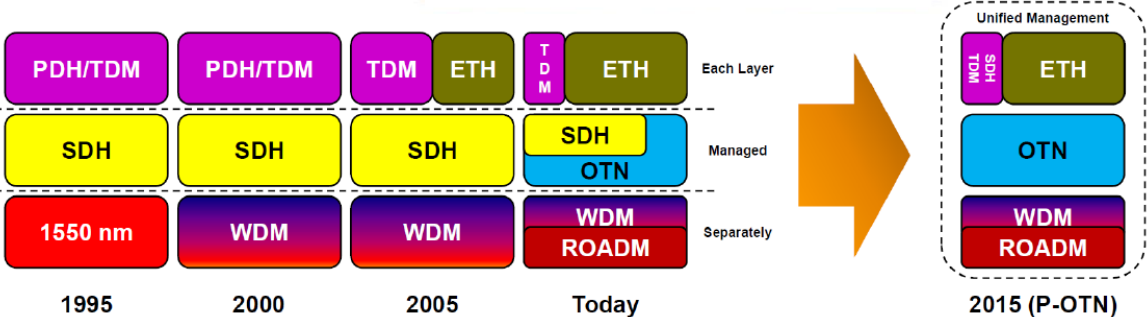


Figura 2.4 – Convergência para a OTN, retirado de [19]

2.5 Ethernet

A Ethernet é uma tecnologia que foi inventada em 1973 e que tinha como objectivo interligar distintos equipamentos numa rede local (LAN – Local Area Network), baseada no envio de pacotes [3]. É uma tecnologia que se tornou bastante popular devido ao seu custo bastante reduzido, sendo que actualmente a maior parte do tráfego de dados é gerado por interfaces Ethernet [3]. Embora tenha sido desenvolvida para redes locais, actualmente existem entidades que trabalham no sentido de a alargar globalmente, sendo uma delas o Metro Ethernet Forum.

O Metro Ethernet Forum é uma organização sem fins lucrativos que desde que foi fundado, em 2001, se tem dedicado a promover e acelerar a adopção de redes e serviços Ethernet, tentando para isso unir tanto os prestadores de serviços como os fornecedores de equipamentos e também os clientes em relação à definição, às especificações técnicas e à interoperabilidade de serviços Ethernet, por forma a construir consensos. Tenta também definir procedimentos e especificações técnicas de forma a facilitar a implementação de normas novas mas também das já existentes, além de tentar aumentar a consciência mundial sobre os benefícios dos serviços Ethernet.

Carrier Ethernet não é mais do que uma expansão global dos serviços Ethernet assente nas ideias iniciais do Metro Ethernet Forum, podendo ser definida como uma rede de transporte baseada em comutação de pacotes que está assente em 5 atributos, ilustrados na Figura 2.5 que a distinguem das LANs tradicionais baseadas em Ethernet [20].

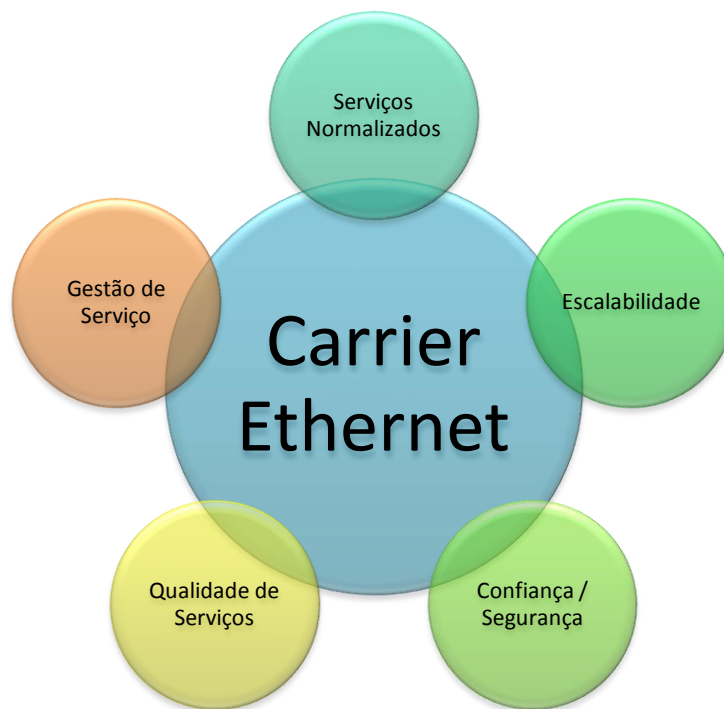


Figura 2.5 – Atributos da Carrier Ethernet

- **Serviços Normalizados** – Fornecedor de serviços únicos localmente e globalmente através de equipamentos normalizados. Não requer alterações no equipamento ou na rede LAN do cliente e acomoda conectividade com redes existentes.
- **Escalabilidade** – Capacidade para milhões usarem um serviço de rede para uma ampla variedade de negócios, informações, comunicações e aplicações de entretenimento com voz, vídeo e dados, possuindo larguras de banda de 1 Mb/s a 10 Gb/s.
- **Confiança/Segurança** – Capacidade da rede para detectar e recuperar de incidentes sem causar impacto a quem a usa, com tempos rápidos de recuperação.
- **Qualidade de Serviços** – Grande variedade e granularidade de largura de banda, como já foi referido, e qualidade de serviço com Acordos de Nível de Serviço (SLAs) que garantem o desempenho e requisitos necessários para os vários tipos de serviço.
- **Gestão de Serviço** – Capacidade de monitorizar, diagnosticar e gerir centralmente a rede.

A Carrier Ethernet possibilita três tipos de serviços:

- E-Line (Ponto a Ponto): são serviços ou ligações ponto a ponto para comunicação e são usadas para facultar circuitos privados, virtuais ou não.
- E-LAN (Multiponto): possibilita ligações entre vários pontos, através de uma rede virtual privada que é transparente aos serviços LAN, tendo total interoperabilidade.
- E-Tree (Ponto-Multiponto): serviço que faculta tráfego de dados destinado a multi-host e onde o tráfego de clientes deve ser mantido invisível para outros clientes.

O programa de certificação MEF tem sido um dos grandes responsáveis por esta normalização global da Carrier Ethernet, que, através de uma validação independente dos serviços, equipamentos e profissionais, permite também agilizar as operações da indústria. Este programa certifica equipamentos (nos quais os prestadores de serviços confiam para construir os seus serviços Carrier Ethernet), serviços (que ganham a confiança dos compradores por estarem em conformidade com os padrões de qualidade e desempenho do MEF) e profissionais (que são treinados com o conhecimento e habilidades comprovadas para apoiar o crescimento da Carrier Ethernet).

A adopção e aceitação por parte dos clientes, dos prestadores de serviços e dos fornecedores de equipamentos, em conjunto com o trabalho desenvolvido pelo Metro Ethernet Forum contribuíram muito fortemente para a consolidação mundial e grande expansão dos serviços Ethernet.

2.6 Comutação de Pacotes ao Nível do transporte (MPLS-TP)

Como forma de tornar possível a implementação de redes de transporte baseadas em comutação de pacotes várias pilhas protocolares têm despontado. É neste sentido que surge o MPLS-TP, uma tecnologia da camada de transporte que é actualmente a solução mais promissora para as redes de transporte ópticas deste tipo. Esta é uma tecnologia que fornece funções de alta confiança e de fácil gestão com capacidades orientadas para a ligação, requeridas para as redes de transporte de pacotes [21]. Estas funções são essenciais para o controlo determinístico da performance do tráfego.

Esta tecnologia nasceu dos esforços conjuntos entre o ITU-T e o IETF. A Transport-MPLS (T-MPLS) foi uma tentativa de normalização levada a cabo pelo ITU-T, sendo esta uma rede de transporte de pacotes que forneceria o caminho base para a evolução das redes de nova-geração. Esta reutilizou a tecnologia do já existente MPLS,

Multi Protocol Label Switching, definido pelo IETF e que opera tradicionalmente entre a camada 2 e a camada 3 do modelo OSI, sendo por este motivo referida por vezes como uma tecnologia de camada 2.5. A T-MPLS complementou o MPLS com as capacidades de protecção e OAM orientadas para o transporte. Ao mesmo tempo que o ITU-T trabalhava no T-MPLS, o IETF trabalhava num novo mecanismo (PWE3) que emulava os atributos essenciais de um serviço sobre uma rede de comutação de pacotes. Deste modo foi criado um grupo de trabalho conjunto, ou Joint Working Team (JWT), entre os dois organismos por forma a atingir um alinhamento mútuo de requerimentos e protocolos, tendo sido criado o MPLS-TP [22]. A Figura 2.6 ilustra o modo como isto foi conseguido.

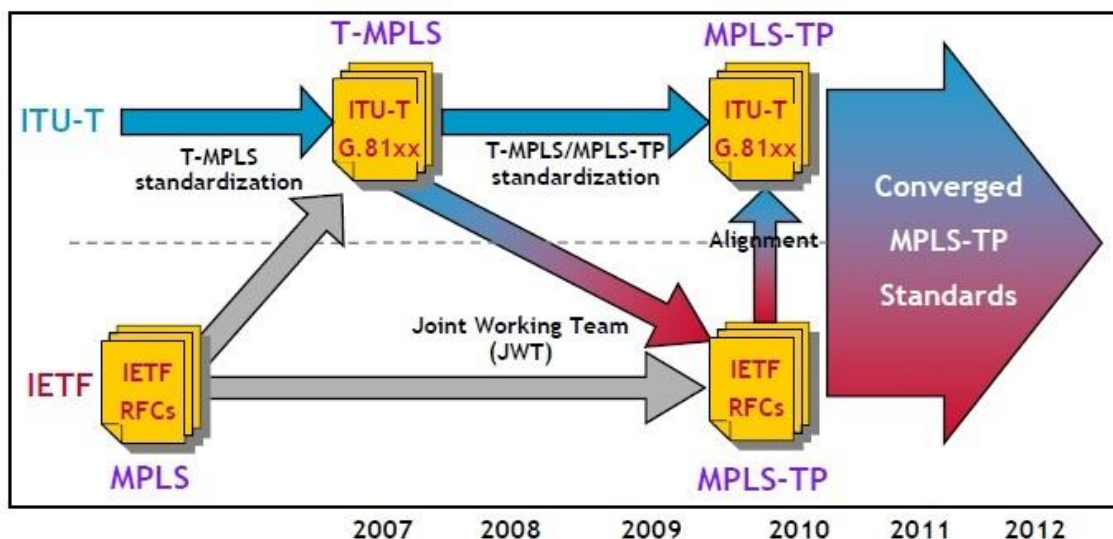


Figura 2.6 – Convergência ITU-T/IETF para a criação da norma MPLS-TP consistente, retirado de [22]

Assim, o MPLS-TP permite às redes um melhor atendimento das necessidades do transporte de pacotes e fornece a habilidade para fazer convergir e transportar Ethernet, IP e multi-serviços com a flexibilidade e eficiência de largura de banda do MPLS e a confiabilidade e facilidade de gestão do SDH tradicional [21]. Desta forma esta tecnologia permite às operadoras melhorar a eficiência das redes de pacotes, podendo continuar a aproveitar as vantagens das infra-estruturas já existentes.

3 Rede óptica de transporte

3.1 Introdução

Este terceiro capítulo tem como objectivo analisar de forma mais aprofundada a principal tecnologia estudada neste trabalho, a OTN. Desta forma, e para se perceberem melhor todas as suas características e modo de funcionamento, serão também estudadas as suas tecnologias antecessoras.

Este estudo será feito começando por descrever brevemente o PDH na secção 3.2. Avançando no tempo tendo em conta a altura em que surgiram, será analisado na secção 3.3 o SDH, de uma forma geral, sendo analisada a sua estrutura da trama, tal como o cabeçalho da mesma, a sua hierarquia de camadas e a sua estrutura de multiplexagem. Na secção 3.4 é estudo o NG-SDH, o recaindo esta análise nas novas tecnologias introduzidas, o VCAT, o LCAS e o GFP, além de alguns dos elementos de rede usados. Por fim na secção 3.5, a OTN será alvo de um estudo mais detalhado e aprofundado, iniciando-se com o estudo das suas taxas de transmissão. A sua hierarquia de camadas será analisada quer do ponto de vista da hierarquia OTN conceptual, quer do ponto de vista da rede de transporte. Também a estrutura da sua trama, os cabeçalhos usados, a monitorização das ligações em cascata e o FEC serão também focados nesta secção.

3.2 PDH

A Hierarquia Digital Plesiócrona (PDH) foi desenvolvida nos anos 50, tendo como objectivo o encaminhamento de tráfego de chamadas telefónicas utilizando multiplexagem Time Division Multiplexing (TDM) [6].

Devido ao facto do tráfego predominante ser tráfego de voz, cada canal individual tinha uma taxa de transmissão de 64 kb/s, uma vez que cada chamada telefónica ocupa essa largura de banda. Este valor resulta da digitalização de um circuito analógico de largura de banda inferior a 4 kHz [6]. Como, devido ao teorema da amostragem de Shannon-Nyquist, cada canal terá de ser amostrado ao dobro da frequência máxima, teremos 8000 amostras por segundo. É então realizada uma codificação PCM (Pulse Code Modulation) em 8 bits com a frequência de amostragem mencionada, resultando daí o valor de 64 kb/s. A duração de cada trama será de 125 μ s (1/8000) [16].

Cada 30 chamadas telefónicas são agregadas num mesmo canal PDH, o canal E1, de 2048 Mb/s. Agrupando vários canais E1 é possível obter canais de capacidade

mais elevada. A Tabela 3.1 mostra os canais correspondentes aos ritmos de transmissão mais baixos usados no PDH. Todo este modo de construção dos vários canais está também representado na Figura 3.1

PDH	Taxa de transmissão
E1	2048 Mb/s
E2	8448 Mb/s
E3	34368 Mb/s
E4	139264 Mb/s

Tabela 3.1 – Taxas de transmissão PDH

A taxa de transmissão de cada canal é aproximadamente igual a quatro vezes a taxa de transmissão do canal imediatamente inferior. O valor não será exactamente igual devido aos bits de justificação e de controlo. Sem estes bits o valor da taxa de transmissão de cada canal seria o representado na Tabela 3.2, obtido pela multiplicação dos 30 canais pelo valor da taxa de transmissão de cada canal (64 kb/s), no caso do E1 sendo os restantes casos múltiplos de quatro exactos deste valor [3].

A quantidade destes bits, também denominados bits de overhead vai ser tanto maior quanto maior for a taxa de transmissão [23], conforme é possível observar na Tabela 3.2 que mostra a percentagem de bits usados para controlo em relação ao número total de bits.

A percentagem de bits de overhead pode ser calculada por

$$Overhead = \frac{Taxa\ de\ transmissão - Taxa\ de\ transmissão(sem\ bits\ de\ controlo)}{Taxa\ de\ Transmissão} \quad (3.1)$$

PDH	Número de canais	Taxa de Transmissão (sem bits de controlo)	Overhead
E1	30	1920 Mb/s	6,25 %
E2	120	7680 Mb/s	9,09 %
E3	480	30720 Mb/s	10,61 %
E4	1920	122880 Mb/s	11,76 %

Tabela 3.2 – Comparação do número de canais com o número de bits de overhead, no PDH

Um desmultiplexador de ordem superior vai necessitar de identificar o início da trama, para conseguir encaminhar correctamente os bits recebidos para o tributário de destino. Deste modo, é inserido em bloco no princípio da trama uma sequência de bits predeterminada chamada Padrão de Enquadramento de Trama (PET) ou inglês Frame Alignment Word (FAW) [1]. Além disso, é também necessário garantir a justificação, para o caso em que a taxa de transmissão dos diferentes tributários flutua relativamente ao valor nominal, garantindo assim uma operação correcta dos multiplexadores e desmultiplexadores.

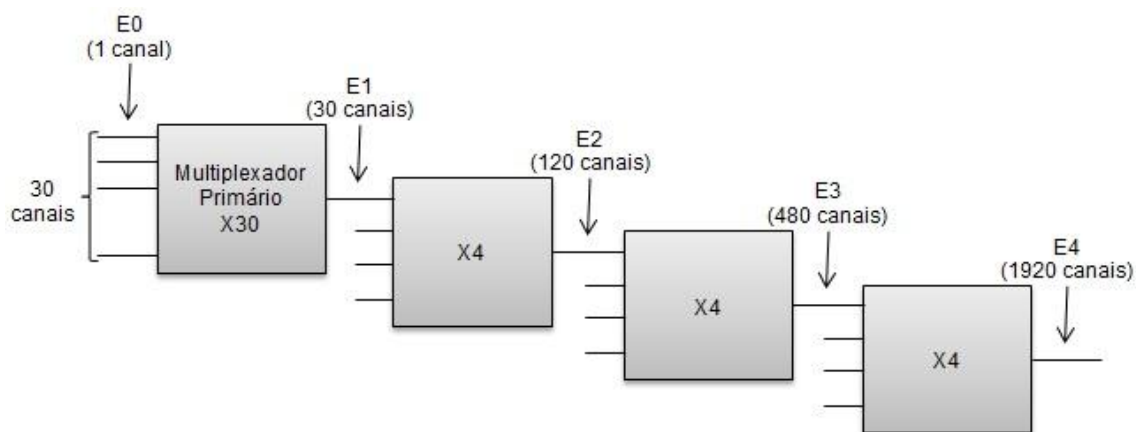


Figura 3.1 – Construção dos canais com as várias taxas de transmissão no PDH

Esta tecnologia, apesar de relativamente eficiente para ritmos de transmissão baixos, revela limitações bastantes grandes para ritmos de transmissão mais altos, razão pela qual acabou por ser abandonada progressivamente [16]. O facto de existirem problemas como as limitações das taxas de transmissão, a falta de compatibilidade entre equipamentos de diferentes fornecedores, a dificuldade em extrair canais com baixa taxa de transmissão de canais com taxa de transmissão superiores e também a debilidade nas funções OAM (Operational, Administration and Maintenance), levou ao aparecimento do SDH [3] [6].

3.3 SDH

A Hierarquia Digital Síncrona, SDH, faz parte da primeira geração de redes ópticas, tendo como objectivo, tal como o PDH, o encaminhamento de tráfego de voz. Esta tecnologia actua nas duas camadas mais baixas do modelo OSI (Open Systems

Interconnection), proporcionando ligações do tipo comutação de circuitos extremo a extremo [6].

Foi criado como forma de ser complementar ao PDH e tal como acontece neste, também o SDH utiliza um mecanismo no qual canais com taxas de transmissão mais baixas são multiplexados em canais com taxas de transmissão mais elevadas. O sinal fundamental deste tipo de hierarquia é designado por STM-1, que significa Synchronous Transport Module level-1, e tem uma taxa de transmissão de 155,520 Mb/s. Os níveis de multiplexagem mais elevados (sendo STM-N o nível de multiplexagem de ordem N) são alcançados através do entrelaçamento, realizado byte a byte, de N tramas fundamentais [24].

Tal como no PDH, a duração de cada trama é de 125 μ s, ou seja, cada byte de informação continua a ser um canal de 64 kb/s, uma vez que são transmitidas 8000 tramas por segundo [3] [16] [25] [24].

A Tabela 3.3 mostra os canais correspondentes aos ritmos de transmissão usados no SDH, sendo possível observar que as taxas de transmissão são bastante superiores às dos canais PDH.

SDH	Taxa de transmissão
STM-1	155,520 Mb/s
STM-4	622,080 Mb/s
STM-16	2488,320 Mb/s
STM-64	9953,280 Mb/s
STM-256	39813,120 Mb/s

Tabela 3.3 – Taxas de transmissão SDH

Nesta hierarquia, é utilizada uma técnica de multiplexagem diferente da utilizada no PDH, baseada em ponteiros [16]. Como o SDH se baseia nos princípios da multiplexação síncrona os tributários individuais podem ser multiplexados em canais com taxas de transmissão superiores sem ser necessário passarem por estágios intermédios de multiplexação. Assim, através da utilização deste método é também possível extrair mais facilmente os canais tributários.

3.3.1 Estrutura da Trama

O canal base do SDH é o STM-1 e, do ponto de vista lógico, pode ser representado por uma estrutura formada por uma matriz de 9 linhas e 270 colunas, conforme representado na Figura 3.2.

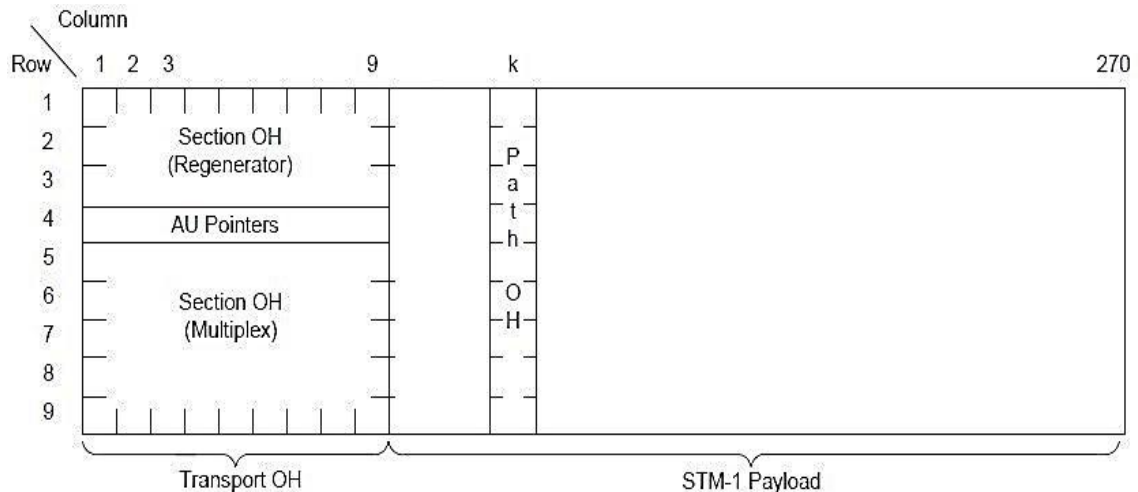


Figura 3.2 – Estrutura da trama SDH, retirado de [24]

Cada uma das 9 linhas vai conter 9 bytes de cabeçalho, ou overhead (OH) e 261 bytes de informação (Payload), sendo que a trama é transmitida da esquerda para a direita e de cima para baixo [16] [24]. O valor da taxa de transmissão do STM-1 é facilmente obtido através da equação 3.2:

$$\begin{aligned}
 \text{Taxa de Transmissão (STM - 1)} &= \frac{\text{Número de bytes da trama} * 8 \text{ bits}}{\text{duração da trama}} \\
 &= \frac{9 \text{ linhas} * 270 \text{ colunas} * 8 \text{ bits}}{125 \mu\text{s}} = 155,520 \text{ Mb/s}
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

Num canal STM-N o número de colunas, quer do overhead, quer da payload vai ser multiplicado por N, aumentando em função do produto do valor que corresponde ao nível de multiplexagem [1].

No SDH a carga paga é transportada em Contentores Virtuais (VC). Cada um destes é formado pelo Contentor (C) e pelo Overhead de Caminho.

3.3.2 Cabeçalho da Trama

Tal como se observa na Figura 3.2, o cabeçalho da trama do STM-1 está dividido em três campos, o Overhead de Secção Regeneradora (RSOH), os Ponteiros (AU Pointers) e o Overhead de Secção de Caminho (MSOH).

O RSOH é um campo que desempenha a função de monitorização de erros, de alinhamento da trama e de supervisão do sistema. Os Ponteiros indicam o início dos contentores virtuais, como forma de permitir que a informação não tenha uma posição fixa nas tramas, podendo “flutuar” sobre estas. Finalmente o MSOH é responsável por adicionar e inserir tributários e fazer o controlo dos erros do sistema [26].

Além destas três estruturas contidas no cabeçalho, existe ainda uma outra já referida, contida na parte da informação, o Overhead de Caminho (POH), que é utilizado para gerir o ponto de construção e recepção da trama e gerir também a informação entre os diversos campos de tramas distintas [26].

Na Figura 3.3 é possível observar mais pormenorizadamente a disposição dos bytes do cabeçalho.

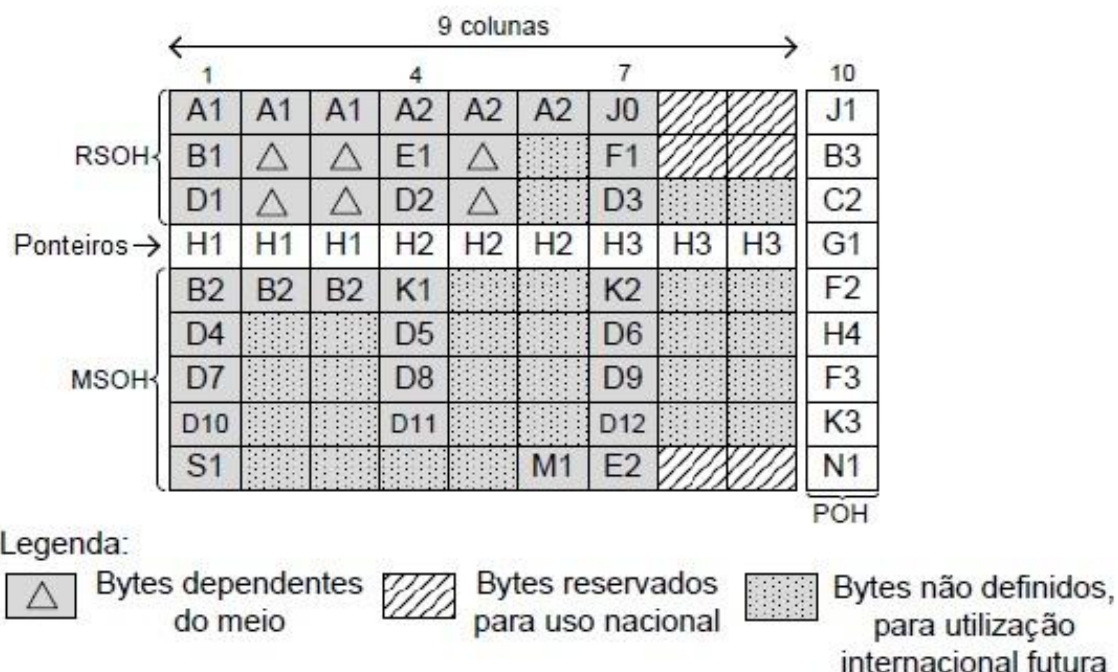


Figura 3.3 – Disposição dos bytes do cabeçalho STM-1, adaptado de [16]

Os bytes mais importantes são os bytes A1 e A2 e são usados para identificar o início das tramas, tendo sempre o mesmo padrão. Também os bytes B1 e B2 são

bastante importantes, uma vez que são utilizados para detectar erros na trama [1]. Excluindo a primeira linha, todos os bytes vão sofrer uma codificação que evitará a ocorrência de longas sequências de zeros ou uns, para que o sinal de relógio possa sempre ser recuperado correctamente no receptor. Na norma G.707 [27] estão descritas todas as funções dos restantes bytes.

3.3.3 Hierarquia de Camadas

A Hierarquia Digital Síncrona utiliza uma abordagem entre o cliente e o servidor, definindo uma hierarquia de camadas funcionais da rede de transporte. A estrutura em camadas da norma SDH está dividida em duas camadas principais, a camada de circuito, (a camada mais elevada da hierarquia da estrutura e é responsável pela retirada de informação útil do equipamento) e a camada de transporte, que se divide em camada de caminho e camada de transmissão [1] [26].

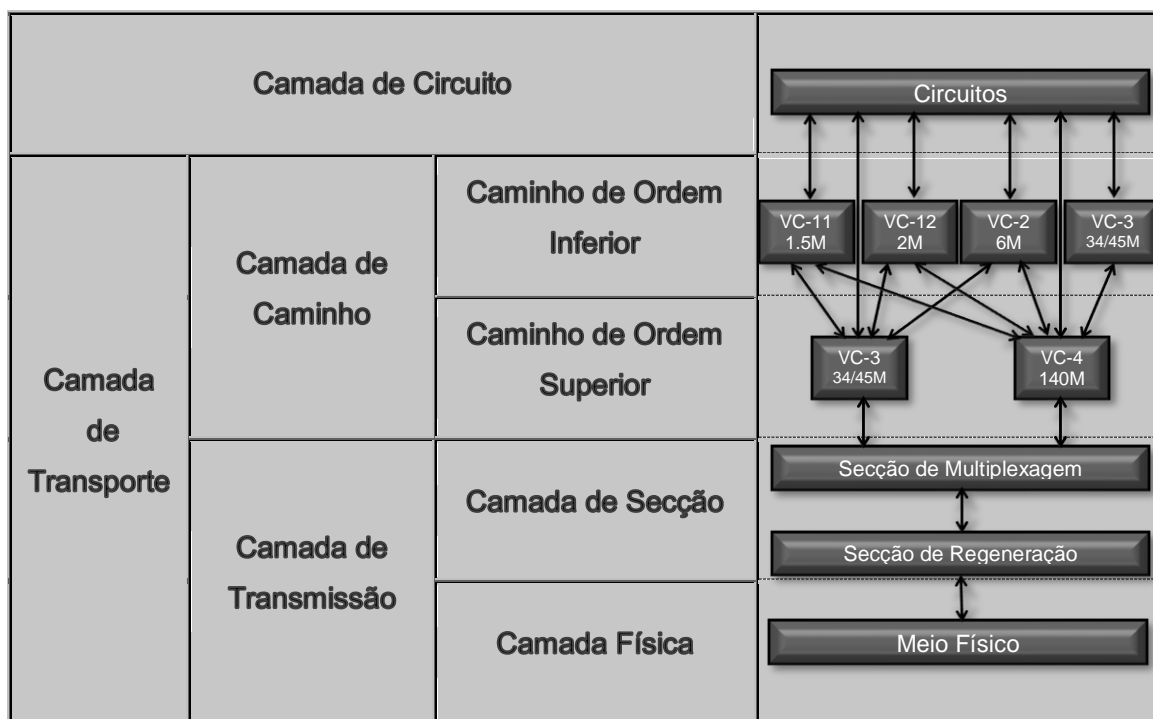


Tabela 3.4 – Hierarquia de camadas SDH

A camada de transmissão vai estar dependente do meio físico de propagação do sinal transmitido e vai conter as secções de regeneração e de multiplexagem. Por sua vez, a camada de caminho vai estar dividida em função dos tributários a transmitir, sendo estes definidos como Contentores Virtuais (VC) que serão utilizados na estrutura de

multiplexagem do SDH. Estes Contentores Virtuais serão as unidades de informação do utilizador e são constituídos pelos Contentores (C) juntamente com o cabeçalho de caminho POH, como já mencionado [25]. Tanto os Contentores Virtuais como os Contentores têm um número associado que indica a sua capacidade de taxa de transmissão. Na Tabela 3.4 está representada a hierarquia de camadas da Hierarquia Digital Síncrona.

3.3.4 Estrutura de Multiplexagem

A multiplexagem na Hierarquia Digital Síncrona reside em transportar tributários de ordem inferior em tributários de ordem superior, tendo sido criado por forma a poder agregar tanto o tráfego plesiócrono como o tráfego síncrono, sendo desta forma compatível com as tecnologias existentes [1]. Embora sendo uma hierarquia bastante flexível, tornou-se também muito mais complexa, na medida em que, tal como já foi analisado, as suas tramas se tornaram mais complicadas, tal como o seu processo de formação, que é possível analisar na Figura 3.4.

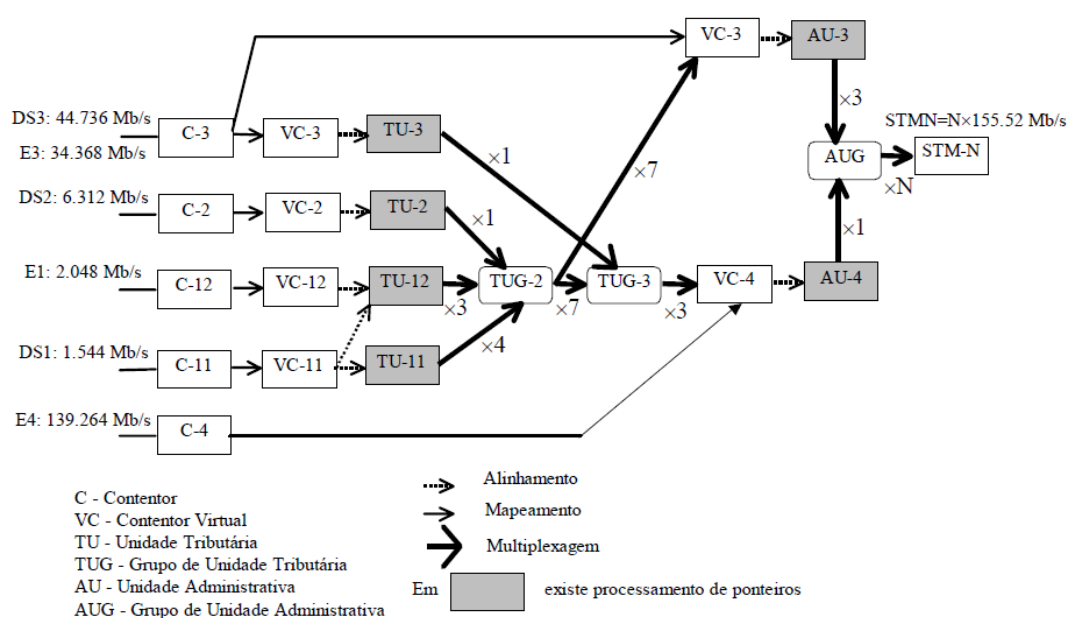


Figura 3.4 – Estrutura de multiplexagem SDH, retirado de [1]

Desse processo vão fazer parte várias subestruturas modulares. Os já referidos Contentores, de nível N (com N entre 1 e 4), são a unidade básica da estrutura SDH e transportam a informação dos tributários correspondentes às hierarquias plesiócronas, sendo as suas taxas as equivalentes. O processo da multiplexagem vai ser iniciado ao

adicionar um cabeçalho de caminho ao Contentor, formando-se um Contentor Virtual, de nível N (N entre 1 e 4). Depois de este ser alinhado vai-lhe ser adicionado um ponteiro de unidade tributário que indica o início de cada Contentor Virtual, obtendo-se uma Unidade Tributária (TU), de nível N (N entre 1 e 3). Depois da estrutura da Unidade Tributária ser alinhada vai ser efectuada a primeira multiplexagem, formando-se o Grupo de Unidade Tributária, de nível N (N igual a 2 ou 3) que resulta da combinação de várias Unidades Tributárias idênticas através de interposição de octecto e neste processo não ocorre a adição de nenhum cabeçalho adicional. Estes grupos vão sofrer uma nova multiplexagem para formar novos Contentores Virtuais, e juntamente com um ponteiro de unidade administrativa vão formar uma Unidade Administrativa de nível N (N igual a 3 ou 4). Este ponteiro tem uma localização fixa no STM-1 e indica o início do Contentor Virtual dentro do STM-1. O passo seguinte consiste na multiplexagem de várias Unidades Administrativas, combinando-as por interposição de octeto, obtendo-se um Grupo de Unidade Administrativa. A este é adicionado um cabeçalho de secção para conseguir o Módulo de Transporte Síncrono (STM) de nível 1. Combinando N Grupos de Unidades Administrativas e N cabeçalhos de secção, através de interposição de octeto obtém-se o STM-N. As várias etapas podem variar consoante o tributário inicial, sendo que o procedimento para vários tributários está também demonstrado na Figura 3.4

Uma vantagem do SDH é a sua capacidade de sobrevivência, conseguindo recuperar rapidamente de cortes e falhas nas suas ligações ou nos seus nós. Isto é possível graças à sua redundância, conseguida devido à arquitectura usada, em anel ou malha, que possibilita o estabelecimento de ligações de protecção. O tempo de recuperação de falhas desta tecnologia é inferior a 50ms e espera-se que, devido aos seus mecanismos de sobrevivência, uma rede SDH tenha uma disponibilidade entre 99.99 % e 99.999 %.

3.3.5 Elementos de Rede

Na tecnologia SDH são utilizados vários elementos de rede:

- Multiplexadores Terminais de Linha ou Line Terminal Multiplexer (LTM).

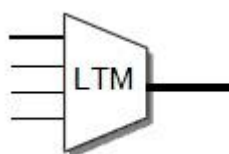


Figura 3.5 – LTM, retirado de [1]

Permitem combinar sinais PDH ou SDH para formar sinais STM-N de débito mais elevado, sendo estes a principal adaptação entre o PDH e o SDH.

- Multiplexadores de Inserção/Extracção ou Add/Drop Multiplexer (ADM).

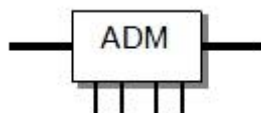


Figura 3.6 – ADM, retirado de [1]

Possibilitam a inserção ou extracção de sinais plesiócronicos ou síncronicos de baixo débito em sinais STM-N que passem mas não terminem neste equipamento. Deste modo, não é necessário desmultiplexar um sinal hierárquico superior para que seja possível adicionar ou extrair tributários, sendo esta uma grande vantagem do SDH.

- Comutadores de Circuitos Digitais ou Digital cross Connect System (DXC).

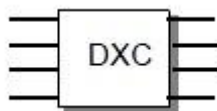


Figura 3.7 – DXC, retirado de [1]

Possibilitam o estabelecimento e modificação das ligações entre vários canais de entrada e saída, podendo actuar desde o nível E1 até ao nível STM-1.

- Regenerador SDH ou Regenerator (REG).

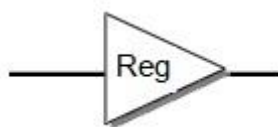


Figura 3.8 – REG, retirado de [1]

Este elemento de rede é usado para reconstruir o sinal quando o espaçamento entre elementos de rede ultrapassa os 60 km, possuindo ainda capacidades de monitorização de desempenho e de alarme e vigilância.

3.4 NG-SDH

Apesar de todas as vantagens que o SDH introduziu, devido ao facto de serem desenhadas para o transporte de tráfego de voz, deixaram de conseguir fazer face às necessidades que existiam, uma vez que o tráfego predominante passou a ser tráfego de dados [3]. Além disso, houve também a necessidade de uma maior granularidade para possibilitar o fornecimento de ligações com capacidades mais adequadas a cada interligação.

Desta forma, para poderem incluir este tipo de tráfego de forma nativa, as redes SDH tiveram de sofrer uma evolução, tendo sido criado assim, em 2002, o SDH de nova geração, NG-SDH. Estas redes, tornaram-se mais adequadas às exigências através da utilização de três novas tecnologias, já referidas no capítulo 2, o VCAT (Concatenação Virtual), o LCAS (Ajuste Dinâmico de Capacidade) e o GFP (Procedimento de Encapsulamento Genérico).

3.4.1 VCAT

A Concatenação Virtual foi definida pelo ITU-T, na recomendação G.707 [27]. É um mecanismo que oferece estruturas de transporte com uma maior granularidade para acomodação de tráfego, permitindo a obtenção de uma maior flexibilidade em relação aos débitos binários possíveis de serem transmitidos, encaminhamento do tráfego e implementação na rede. Desta forma vai possibilitar uma maior eficiência na utilização da capacidade das várias ligações.

Neste tipo de concatenação a informação dos tributários é colocada num VCG (Grupo de Concatenação Virtual). Cada VCG é estabelecido pelo sistema de gestão de rede e é constituído por X contentores virtuais que vão estar concatenados com VCAT, sendo cada um destes contentores virtuais um membro do Grupo de Concatenação Virtual [17].

Existem dois tipos de concatenação virtual, a concatenação virtual de ordem superior, na qual são utilizados contentores virtuais de ordem superior e que se representa por VC-n-Xv (sendo $n=3,4$) e a concatenação virtual de ordem inferior, na qual são utilizados contentores virtuais de ordem inferior e que se representa por VC-m-Xv

(sendo $m=2,11,12$) [17] [27]. Ao contrário do que acontecia na concatenação contínua o X pode assumir qualquer valor positivo (sendo que $X \leq 64$ na concatenação virtual de ordem inferior e $X \leq 256$ na concatenação virtual de ordem superior) e os membros do VCG são encaminhados independentemente, permitindo assim aumentar a granularidade em relação à concatenação contínua [17].

Como forma de comparar a concatenação contínua com a concatenação virtual será o usado o exemplo da Figura 3.9 no qual se pretende realizar o transporte de sinais Fibre Channel com um débito binário de 425 Mb/s.

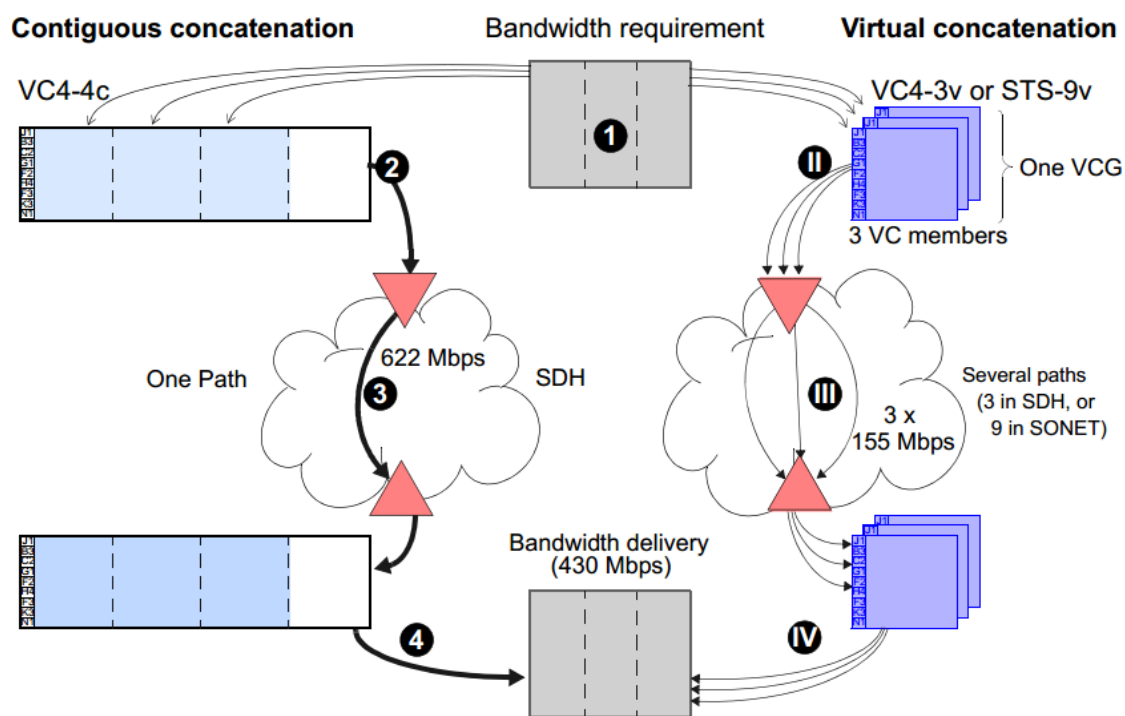


Figura 3.9 – Comparação entre concatenação contínua e concatenação virtual, retirado de [28]

É possível observar que utilizando concatenação contínua é necessário que o número de contêineres virtuais VC-4 concatenados seja uma potência de quatro (levando a um desperdício da largura de banda, uma vez que podem existir contêineres virtuais que não são utilizados mas são transmitidos), além de que todos os contêineres virtuais têm de ser encaminhados pelo mesmo caminho. Por outro lado, utilizando concatenação virtual é possível concatenar um número arbitrário de contêineres virtuais e cada um deles é encaminhado independentemente, podendo assim cada membro do VCG percorrer distâncias extremo-a-extremo diferentes.

Devido a este último aspecto vai estar associado a cada membro do VCG um atraso de propagação que vai depender da distância percorrida pelo mesmo. Dá-se o nome de atraso diferencial à diferença temporal entre o atraso do membro que percorre o caminho mais longo e o atraso do membro que percorre o caminho mais curto. Caso os dois membros sejam encaminhados pelo mesmo caminho o atraso diferencial será nulo, no entanto, caso exista, este atraso diferencial tem de ser compensado para que o VCG seja correctamente reconstruído no nó destino. Uma vez que o atraso diferencial pode ser causado pelas alterações na rede (como por exemplo devido ao corte de uma fibra numa secção de um caminho fazendo que a rede encaminhe o tráfego por outra secção), a sua compensação tem de ser feita de forma dinâmica, pois pode variar no tempo para os mesmos membros [17].

Assim, para existir possibilidade de reconstruir os dados originais é preciso compensar o atraso diferencial e determinar qual a posição dos membros recebidos no VCG. Para este efeito, cada membro do VCG possui um cabeçalho de caminho individual com a informação necessária para reconstruir a sequência original, estando esta informação colocada em octetos disponíveis no cabeçalho de caminho.

Para que seja possível identificar a posição dos vários membros no VCG, é então atribuído a cada um deles um número de sequência (SQ: SeQuence Indicator) que é incrementado de membro para membro. Assim, num VCG com X membros, o primeiro vai ter o número de sequência $SQ=0$ e o último terá o número de sequência $SQ=X-1$ [17].

Além deste existe ainda uma numeração comum a todos os membros do mesmo VCG, que permite determinar quais os contentores virtuais que pertencem ao mesmo grupo e compensar assim o atraso diferencial. Esta numeração é denominada de indicador de multitrama (MFI: Multi-Frame Indicator) e opera como um contador que é incrementado cada vez que é transmitida uma nova trama e é reiniciado quando atinge o fim da contagem que suporta, levando à formação de uma estrutura em multitrama numerada.

3.4.2 LCAS

A VCAT traz todas as vantagens referidas, mas ainda assim possui algumas limitações, não permitindo o ajuste dinâmico da capacidade da ligação a nível de caminho. Desta forma, para alterar o número de contentores virtuais pelos quais um VCG é constituído o sistema de gestão de rede teria de terminar a ligação em curso e voltar a estabelecer uma nova ligação a nível de caminho, entre o nó fonte e o nó destino, com capacidade diferente [17]. Este é um obstáculo que convém evitar, uma vez que o débito

dos serviços de dados pode variar no tempo. Além disso, caso se verificasse a existência de uma falha na rede que afectasse um dos membros do VCG, todo o VCG teria de voltar a ser estabelecido, levando a uma interrupção do tráfego. Foi para superar estas limitações que foi normalizado o Link Capacity Adjustment Scheme (LCAS), tendo sido implementado no NG-SDH, e que fornece a possibilidade de fazer um ajuste dinâmico da capacidade das ligações tendo em conta as diferentes necessidades de cada serviço. Desta forma consegue-se uma maior robustez e uma maior flexibilidade no transporte de tráfego de dados. O LCAS foi definido pelo ITU-T na recomendação G.7042 [29].

O LCAS, sendo um protocolo de sinalização bidireccional, construído de forma a tirar partido de todas as vantagens do VCAT, permite então a realização de três acções distintas, possibilitando

- A adição de membros ao VCG.
- A remoção definitiva ou permanente de membros do VCG.
- A remoção automática ou temporária de membros do VCG.

A adição de membros reside em aumentar o número de membros do VCG, aumentando assim a capacidade transmitida entre o nó fonte e o nó destino. Esta acção é iniciada pelo sistema de gestão de rede. A remoção definitiva ou permanente de membros reside em diminuir o número de membros do VCG, diminuindo assim a capacidade transmitida entre o nó fonte e o nó destino. Esta acção é também iniciada pelo sistema de gestão de rede. Finalmente, a remoção automática ou temporária de membros reside em eliminar os membros do VCG que tenham sido afectados por uma falha ou por uma taxa de erros binários que esteja situada acima de um valor limite, até essa mesma falha ser reparada e o débito binário ter sido repostado. Esta acção é realizada automaticamente pelo LCAS e comunicada ao sistema de gestão de rede.

Todas estas acções vão ser apenas válidas num sentido da transmissão, ou seja, se um nó pedir a adição ou a remoção de um membro, esse membro apenas vai ser adicionado ou removido nesse sentido [29]. Pretendendo que o número de membros do VCG seja alterado nos dois sentidos será necessário que ambos os nós iniciem a acção. Desta forma é possível concluir que a capacidade que vai ser transmitida em cada um dos sentidos é independente, sendo isto bastante útil para o caso do tráfego ser assimétrico.

O modo de funcionamento do LCAS baseia-se na utilização de bits utilizados pelo VCAT como forma de estabelecer um protocolo de comunicação que vai permitir fazer os tais ajustes da capacidade da ligação, conseguindo, tal como referido, acompanhar as flutuações do tráfego e as necessidades dos serviços enquanto esta ligação estiver

activa, assim como responder a alterações na rede, como falhas. Isto é feito assumindo que o sistema de gestão da rede controla todas as alterações das ligações ao nível de caminho e também que todas elas são devidamente validadas, por forma a não existirem perdas de informação.

A troca de informação de controlo, transmitida em pacotes de controlo, entre os nós fontes e os nós destinos vai permitir o ajuste dinâmico da capacidade, o LCAS. O nó que realiza alterações ao número de membros do VCG é considerado o nó fonte, enquanto o nó que as recebe e as valida é considerado o nó destino. A informação existente nos pacotes de controlo pode ser de três tipos, tendo em conta o sentido de transmissão da trama, e são então a informação sobre os membros transmitidos do nó fonte para o nó destino, a informação sobre os membros transmitidos do nó destino para o nó fonte e a informação sobre tramas transmitidas em ambos os sentidos [29].

No caso do sentido nó fonte - nó destino iremos ter os seguintes campos:

- MFI (Multi-Frame Indicator) - campo indicador de multitrama.
- SQ (SeQuence indicator) - campo indicador do número de sequência.
- CTRL (Control field) – campo palavra de controlo, que será responsável

por transmitir mensagens de controlo pré-determinadas em relação ao membro transmitido no pacote de controlo seguinte. Desta forma o nó destino fica antecipadamente a saber as acções pedidas e pode assim efectuá-las [17]. Este campo de 4 bits é muito importante para que seja possível reconstruir o VCG e também para sincronizar os dois nós. As palavras de controlo, tal como o seu significado e a sua codificação são as que a seguir se apresentam na Tabela 3.5.

Código	Descrição	Bits de Controlo
FIXED	Indica que o número de membros do VCG é fixo, não suportando protocolo LCAS	'0000'
ADD	Indica ao nó destino que se pretende adicionar este membro ao VCG, assim como a transição de IDLE para NORM	'0001'
NORM	Indica uma transmissão normal do membro	'0010'
EOS	Indica o fim de sequência, último membro do VCG	'0011'
IDLE	Indica que o membro não faz parte do VCG ou vai ser removido do VCG	'1111'
DNU	Indica que não se deve utilizar os dados deste membro pois o nó destinatário indicou a ocorrência de uma falha com este	'0101'

Tabela 3.5 – Palavras de controlo LCAS

- GID (Group Identification bit) – bit de identificação do grupo, campo usado para verificar os membros que pertencem ao mesmo VCG, através deste código pseudo-aleatório igual em todos os membros do VCG com o mesmo MFI.

No caso do sentido nó destino - nó fonte iremos ter os seguintes campos:

- MST (Member Status field) – campo de estado do membro, responsável por informar se cada um dos membros do VCG é recebido correctamente. Os estados do membro, tal como o seu significado e a sua codificação são os que se apresentam na Tabela 3.6.

Código	Descrição	Bit de Controlo
OK	Indica que o membro foi recebido correctamente e faz parte do VCG	'0'
FAIL	Indica que o membro foi recebido com falhas ou não faz parte do VCG	'1'

Tabela 3.6 – Estados do membro LCAS

- RS-Ack (Re-Sequence Acknowledge) – bit de notificação de alteração da sequência, campo usado para o nó destino informar o nó fonte que foi detectada uma alteração nos números de sequência e que os MST transmitidos são já relativos à nova sequência.

No caso de informação sobre tramas transmitidas em ambos os sentidos iremos ter os seguintes campos:

- CRC (Cyclic Redundancy Check field) – campo do código de redundância cíclico, cuja função é detectar erros no pacote de controlo.

Na Figura 3.10 é possível observar como são feitas as transmissões bidireccionais de pacotes de controlo.

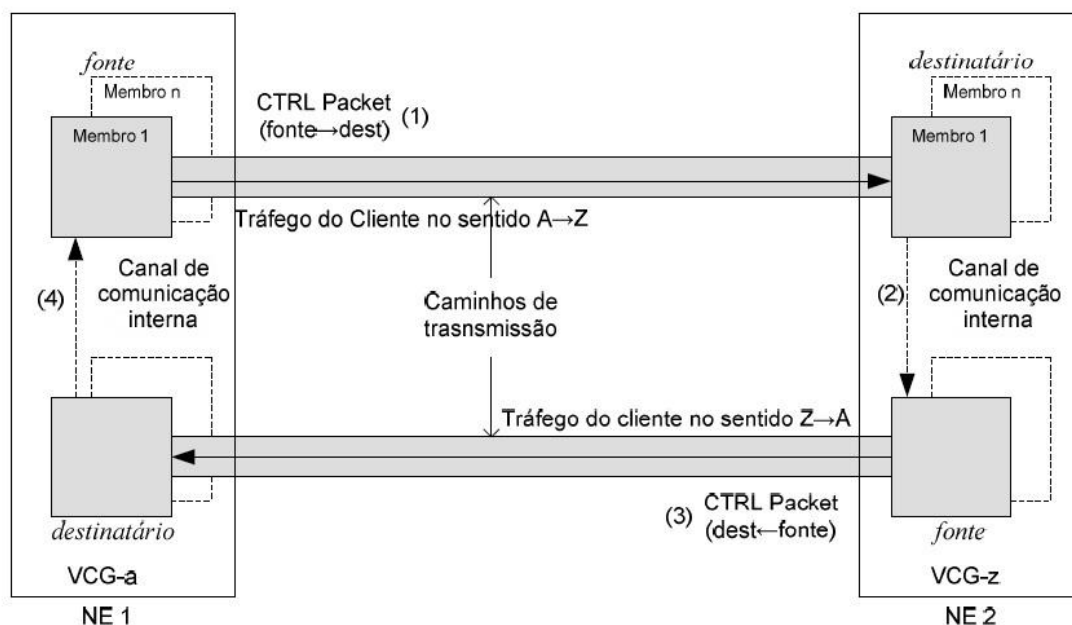


Figura 3.10 – Protocolo de transmissão LCAS, retirado de [17]

Mesmo não existindo alterações na informação que transportam, os pacotes de controlo vão ser transmitidos de forma contínua, sendo que cada um dos nós (NE-1 e NE-2) pode actuar, dependendo do caso, como nó fonte ou nó destinatário. Através da figura, podemos observar que o nó 1-fonte vai enviar pacotes de controlo para o nó 2-destinatário (processo representado por (1) na figura). O nó-2 destinatário, depois de receber o pacote de controlo vai processar as informações que podem afectar o bit RS-Ack e o bit MST, enviando posteriormente esta informação ao nó 2-fonte, através do canal de comunicação interna do nó (processo representado por (2) na figura). Por sua vez o nó 2-fonte vai enviar o pacote de controlo ao nó 1-destinatário (processo representado por (3) na figura) que finalmente entrega a informação ao nó 1-fonte (processo representado por (4) na figura).

3.4.3 GFP

O procedimento de encapsulamento genérico foi criado para ser um mecanismo capaz de encapsular eficientemente diversos tipos de serviços e diferentes sinais em redes SDH ou OTN [30] [31] [32]. Esta tecnologia está padronizada na norma G.7041 [32] do ITU-T. O GFP tem a capacidade de mapear o tráfego de pacotes, utilizando para esse efeito um algoritmo bastante simples e estável. Torna-se bastante eficiente para baixas e

altas taxas de transmissão e gera um overhead mínimo, sendo até nalguns casos igual ao do protocolo que está a ser encapsulado.

A trama GFP está representada na Figura 3.11 e é constituída pelo cabeçalho principal (core header) e pela área do campo de informação. Por sua vez, esta última, inclui o cabeçalho do campo de informação (payload header), o próprio campo de informação em si (payload) e um FCS (CR-32), responsável por detectar e corrigir erros, protegendo desta forma a integridade do campo de informação. Por sua vez, o cabeçalho principal e o cabeçalho do campo de informação possuem mecanismos de protecção independentes (CRC-16, um código que permite a correcção de erro de 1 bit e a detecção de erro em vários bits) [3] [31] [32].

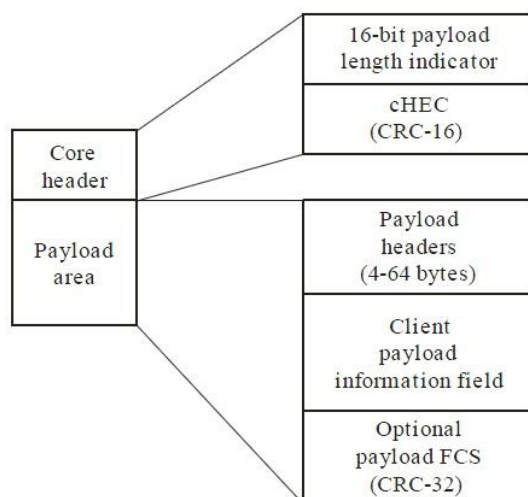


Figura 3.11 – Trama GFP, retirado de [32]

Conforme se verifica na Figura 3.11 o cabeçalho principal está dividido em dois campos:

- O indicador de comprimento do campo, composto por 2 bytes (16-bit payload length indicator) e responsável por indicar o tamanho do campo de informação.
- O cHEC (core Header Error Control), cuja função é proteger a integridade do cabeçalho principal, usando para isso como mecanismo de protecção baseado no código CRC-16, tal como já referido.

Além das duas acima citadas, o cabeçalho principal também tem como função delimitar a trama. Por sua vez o cabeçalho do campo de informação, cuja dimensão pode variar entre 4 e 64 bytes, está também dividido em dois campos obrigatórios:

- O PTI (Payload Type Identifier), cuja função é informar qual o tipo de informação transportada no campo de informação, além de qual o modo como a informação é mapeada (Frame Mapped ou Transparent Mapped, modos abordados de seguida).
- O tHEC (Type Header Error Control), cuja função é proteger a integridade do cabeçalho do campo de informação, usando também um mecanismo de protecção baseado no código CRC-16).

O GFP pode ser usado em dois modos diferentes, o GFP-F (Frame Mapped) e o GFP-T (Transparent). No modo GFP-T, que corresponde a um encapsulamento de nível 1, um número fixo de bits do cliente vai ser mapeado num quadro GFP com um comprimento pré-determinado, gerando tramas de comprimento constante [28] [31]. Esta solução é otimizada para tráfego que usa o código de blocos 8B/10B, tal como a Gigabit Ethernet e o Fibre Channel e o seu procedimento está ilustrado na Figura 3.12.

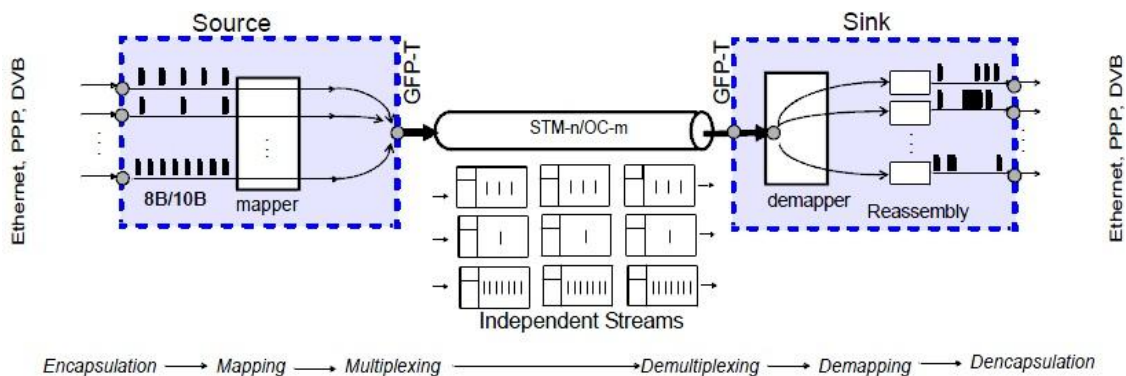


Figura 3.12 – Transparent GFP, retirado de [28]

Pelo contrário, o modo GFP-F corresponde a um encapsulamento de nível 2 no qual um quadro simples é encapsulado num único quadro GFP, o que vai levar a que a trama neste modo seja variável [31]. Este modo está otimizado para, por exemplo, tráfego Ethernet ou IP/PPP. Além disso, neste caso o pacote do cliente deve ser extraído na sua totalidade antes da trama GFP ser gerada, levando a um aumento da latência do processo [28], algo que não se verifica na solução GFP-T uma vez que o processamento é feito a nível de blocos. Na Figura 3.13 está representado o modo de funcionamento do GFP-F.

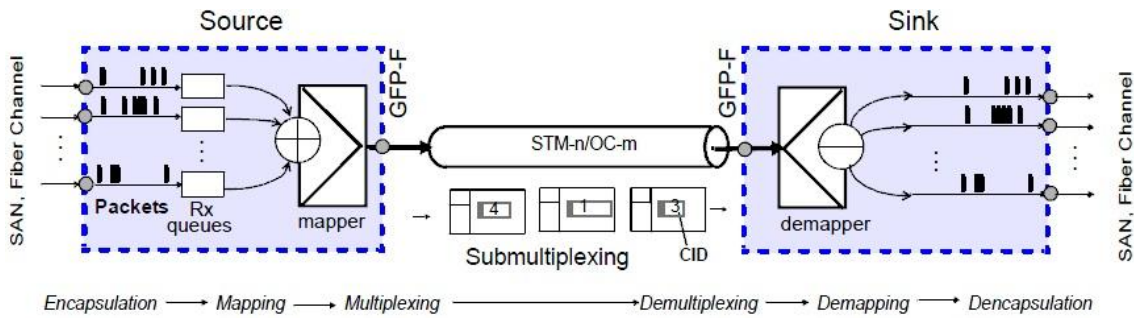


Figura 3.13 – Frame Mapped GFP, retirado de [28]

3.4.4 Elementos de Rede

Um dos aspectos positivos do NG-SDH é o facto destas novas funções, o VCAT, o LCAS e o GFP serem implementadas nos nós que ficam localizados nas extremidades da rede. Deste modo tudo o resto continua inalterado na estrutura de rede já existente, podendo a informação ser transportada de forma transparente entre os nós intermédios [28]. A Figura 3.14, representativa da migração das redes SDH convencionais para as redes NG-SDH, demonstra isso mesmo.

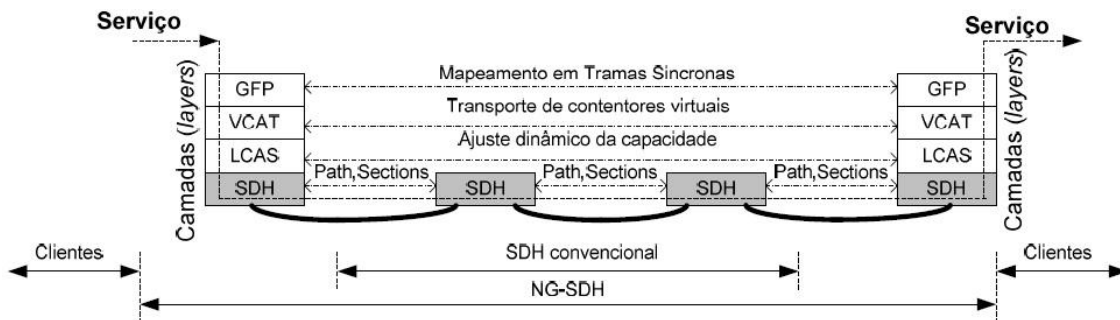


Figura 3.14 – Migração das redes SDH convencionais para as redes NG-SDH, retirado de [17]

Para tal ser possível foram desenvolvidos novos elementos de rede, entre os quais:

- Multi-Service Provisioning Platform (MSPP), que resulta da adaptação das interfaces ADM e TDM e das interfaces ópticas, para um tipo de nó de acesso que inclui as interfaces TDM herdadas, interfaces de dados (como por exemplo Ethernet, GbE, Fibre Channel), interfaces ópticas desde o STM-1 ao STM-64 e possui também as novas funcionalidades do NG-SDH, como os estudados VCAT, o LCAS e o GFP.

- Multi-Service Transport Platform (MSTP), que é basicamente um MSPP mas com funções de DWDM e que permite integrar os serviços de dados, SDH e TDM com comutação de comprimentos de onda e transporte WDM de forma bastante eficiente. Estes elementos estão tipicamente instalados nas redes metro e core.

- Multi-Service Switching Platform (MSSP) que é o equivalente a um cross connect de nova geração, conseguindo realizar o grooming e o switching do tráfego bastante eficientemente quer ao nível dos sinais STM-N quer ao nível dos contentores virtuais. Este elemento está ainda a surgir enquanto os dois anteriores estão já bastante consolidados.

Na Figura 3.15 estão representados estes novos elementos de rede.

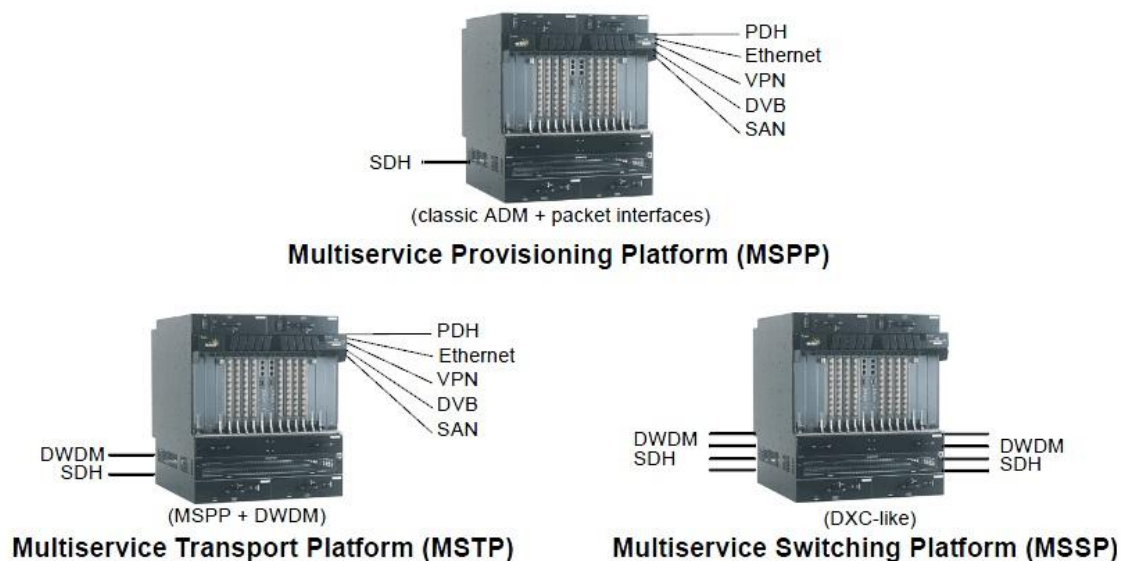


Figura 3.15 – Elementos de rede NG-SDH, retirado de [28]

3.5 OTN

Como forma de responder ao verificado aumento exponencial do tráfego, sendo este predominantemente de dados e à necessidade das operadoras de reduzir o custo por bit a transportar, melhorando o desempenho da rede, foi desenvolvido OTN (Optical Transport Network), combinando os benefícios do SDH com a tecnologia DWDM [33].

Os estudos do ITU-T sobre quais os requisitos essenciais para a evolução culminaram com a publicação das recomendações associadas ao OTN, sendo a principal destas a G.709 [34]. Este organismo refere-se a esta nova tecnologia como sendo

composta por um conjunto de elementos ópticos, que estão interligados entre si por fibra óptica e que no seu todo tem a capacidade de transportar sinais provenientes do cliente fornecendo funções de transporte, multiplexagem, routing, gestão e supervisão dos canais ópticos [35].

Este novo protocolo para comunicações ópticas possui a capacidade de transportar vários tipos de sinais encapsulados na mesma trama. Além disso, ainda tentando responder às exigências actuais, possui uma grande flexibilidade, o que torna este tipo de redes especialmente eficientes para o transporte de tráfego de dados, contrariando a vocação das tecnologias anteriores, particularmente do SDH, para o transporte de voz. A OTN possui ainda mais uma vantagem, uma vez que foi introduzido um poderoso código de correcção de erros, conferindo-lhe assim uma maior qualidade de serviço e também uma diminuição de custos (uma vez que os regeneradores podem estar mais espaçados), algo fundamental para as exigências actuais.

3.5.1 Taxas de Transmissão

Também em relação às taxas de transmissão a diferença entre o SDH e a OTN é bastante visível. Se no caso do SDH o tamanho da trama aumentava quando a taxa de transmissão aumentava, por forma a manter período da mesma inalterado (125µs), na OTN acontece o contrário. Neste caso, a taxa de transmissão vai ser aumentada mantendo sempre a mesma estrutura da sua trama, o que obviamente só é possível diminuindo a duração da mesma, levando a que taxas de transmissão mais elevadas tenham menor período.

Na Tabela 3.7 estão representadas as taxas de transmissão definidas para a OTN, tal como a sua duração e onde é possível observar também que as velocidades são derivadas das taxas já existentes no SDH, embora sejam aproximadamente cerca de 7 % a 8 % superiores, o que acontece devido aos bytes extra usados para efectuar a correcção de erros.

OTN	Taxa de transmissão	Duração da Trama	Equivalente SDH
OTU-1	2666Mb/s	48,971µs	STM-16 (2488Mb/s)
OTU-2	10709Mb/s	12,191µs	STM-64 (9953Mb/s)
OTU-3	43018Mb/s	3,034µs	STM-256 (39813Mb/s)
OTU-4	111809MB/s	1,167µs	Não existe equivalente

Tabela 3.7 – Taxas de transmissão OTN

3.5.2 Hierarquia OTN

Através da OTN é possível efectuar o transporte de múltiplos canais ópticos pela mesma fibra de forma simultânea, sendo cada um destes canais ópticos formado por uma estrutura composta pela carga paga, os cabeçalhos e o código de correcção de erros. Esta estrutura é dividida em diversas camadas formando a hierarquia de camadas da OTN, representada na Figura 3.16.

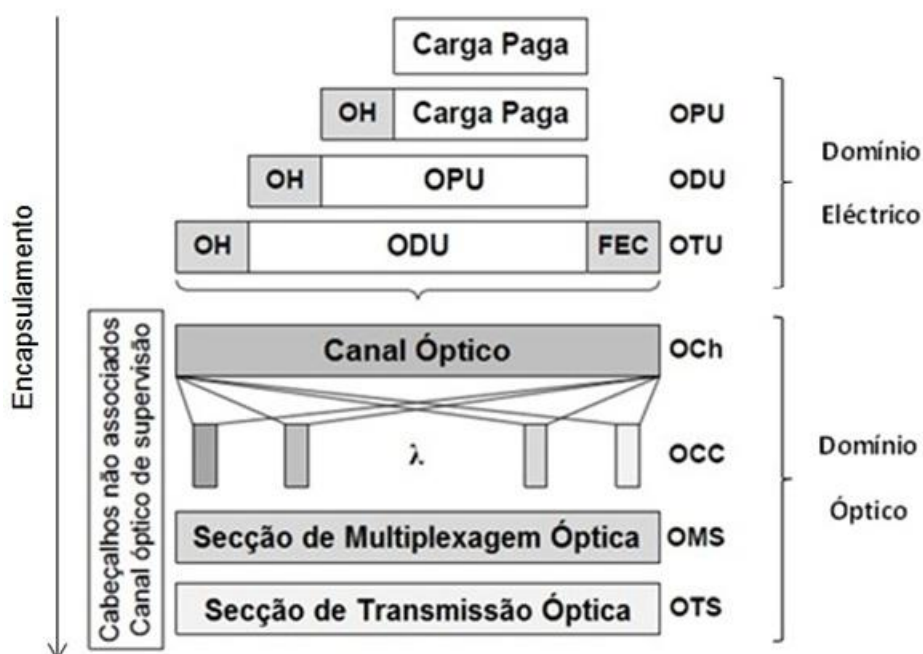


Figura 3.16 – Hierarquia OTN conceptual, adaptado de [16]

A hierarquia do OTN é formada por seis camadas principais, sendo que as camadas OPU (Optical channel Payload Unit), ODU (Optical channel Data Unit) e OTU (Optical channel Transport Unit) são processadas no domínio eléctrico e as camadas OCh (Optical Channel), OMS (Optical Multiplex Section) e OTS (Optical Transmission Section) são processadas no domínio óptico [3] [36]. Inicialmente o sinal proveniente do cliente (que poderá ser um sinal SDH, GbE, IP, etc...) vai ser mapeado na camada OPU, que lhe vai adicionar o seu cabeçalho e também octetos que não contêm informação, como forma de adaptar os débitos. Seguidamente a OPU vai ser convertida em ODU ao ser-lhe adicionado o seu cabeçalho, que permitirá monitorizar os dados ao longo da rede. A ODU é então convertida em OTU através da adição do cabeçalho e também do campo FEC, para correcção de erros [36]. Na fase seguinte cada OTU modula uma fonte óptica,

obtendo-se um sinal óptico que é convertido na camada OCh ao ser-lhe introduzido o cabeçalho correspondente. Cada um destes canais ópticos vai ser transportando por um comprimento de onda, o OCC (Optical Channel Carrier). A camada OMS vai ser responsável pela multiplexagem WDM e também por adicionar o seu cabeçalho.

É importante referir que, se por um lado os cabeçalhos das camadas OPU, ODU e OTU vão ser adicionados no domínio eléctrico, por outro lado os cabeçalhos das camadas ópticas vão ser enviados em modo não associado no canal de supervisão óptica [3]. O modo como isto é feito será abordado na secção 3.5.5.

Outra das normas relativas ao OTN é a G.872 [37], onde são definidas duas classes de interfaces para as redes ópticas de transporte. Temos a IrDI (Inter-Domain Interface), que inclui o processamento 3R (Retiming, Reshaping and Reamplification) entre terminais de diferentes operadores e o IaDI (Intra-Domain Interface), relativo ao interface dentro do operador [16]. A Figura 3.17 ilustra tanto estas duas classes de interfaces, como também a divisão das camadas OTN mas do ponto de vista da rede de transporte.

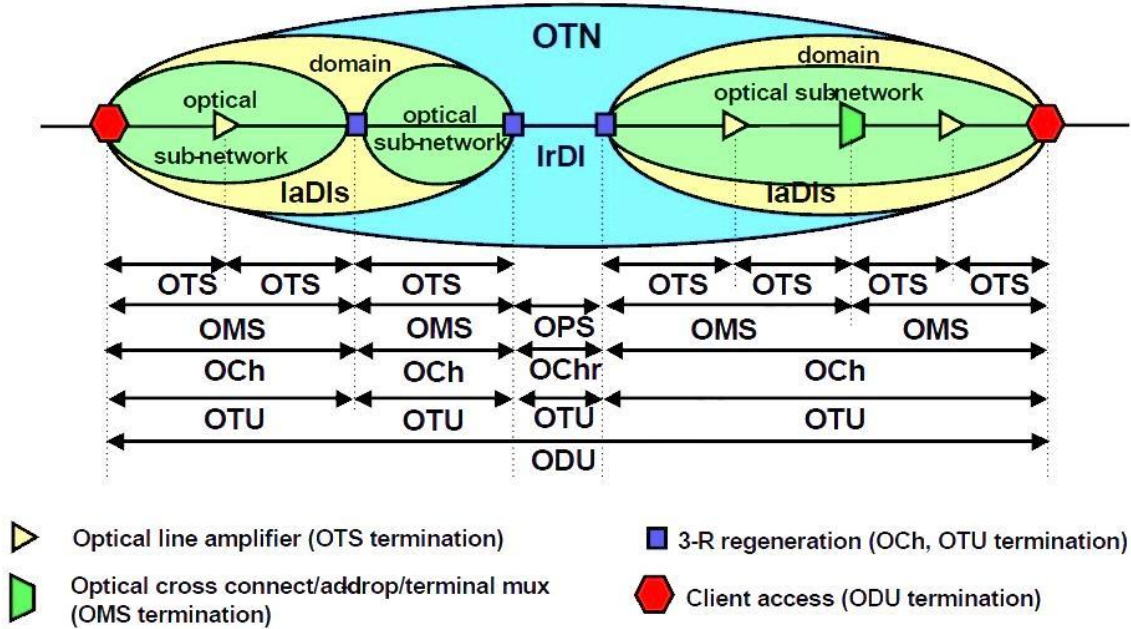


Figura 3.17 – Classes de interface e camadas OTN do ponto de vista da rede de transporte, retirado de [36]

Dentro do domínio eléctrico, a camada OPU tem como funcionalidades, como já referido, a adaptação do débito binário do sinal do cliente ao débito binário desta mesma estrutura. A camada ODU, que à semelhança do que acontece com a OPU, é criada

quando o sinal do cliente entra na rede óptica, corresponde à camada entre clientes, sendo mapeada na fonte e desmapeada no destino, não sendo alterada pela rede. A camada OTU é uma unidade terminal que pode ser criada ou terminada em cada ponto de regeneração e cuja função é processar o código correcto de erros.

No domínio óptico, camada OCh, que tem como funções acomodar a dispersão por canal, identificar o canal e também comutar a protecção de canal, corresponde então a uma ligação extremo a extremo dentro de uma rede totalmente óptica (representada na Figura 3.17 pela parte a verde). A camada OMS, cujas funções são a multiplexagem óptica, a atribuição, identificação e conversão de comprimento de onda e a comutação de protecção de multiplexagem, corresponde a cada uma das vias situadas entre um OTM e um OADM ou OXC. Finalmente, a camada OTS, responsável por fazer a amplificação óptica e a compensação de dispersão através dos amplificadores de linha, sendo que cada via OMS é constituída por vários segmentos OTS, que estão delimitados pelos estágios de amplificação (amplificadores de linha) [3].

3.5.3 Estrutura da Trama

A trama OTN, como definida na norma do ITU-T G.709, é composta por três partes, os cabeçalhos, a carga paga e o campo FEC. É de notar que embora as duas primeiras partes já fizessem parte do protocolo SDH, na OTN foi introduzido um campo exclusivo para FEC para realizar a correcção de erros, algo que no protocolo anterior era feito através de apenas alguns bytes do cabeçalho, o que limitava bastante o seu objectivo final.

Esta trama é constituída por 4 linhas e 4080 colunas, sendo que os primeiros 16 bytes de cada linha contêm os cabeçalhos, estando os seguintes 3808 bytes reservados para a carga paga e os últimos 256 bytes para o FEC. Os dados são transmitidos linha a linha, de cima para baixo e da esquerda para a direita.

$$\text{Tamanho total da trama OTN} = 4 \text{ linhas} \times 4080 \text{ colunas} = 16320 \text{ bytes} \quad (3.3)$$

Tal como já referido, e ao contrário do que acontecia no SDH, o tamanho total da trama, referido na expressão 3.3, permanece inalterado para qualquer que seja a taxa de transmissão, sendo a duração da mesma a sofrer alterações [38]. Na Figura 3.18 está representada toda a estrutura da trama OTN.

representado na Figura 3.18 a branco e denominado FA OH (cabeçalho de alinhamento de trama) o responsável por esta capacidade de detectar o início e o final de cada trama na norma OTN. Tal como se observa na Figura 3.19 este campo é composto por um sinal de alinhamento de 6 bytes denominado FAS (sinal de alinhamento de trama) e ainda por um byte que indica o alinhamento de multi-trama denominado MFAS (sinal de alinhamento de multi-trama).

O campo FAS possui um valor fixo (0xF6F6F6282828), sendo que os primeiros 3 bytes são OA1 e possuem o valor 1111 0110 e os últimos 3 são OA2 e possuem o valor 0010 1000, sendo que este é o único campo da trama que é enviado sem passar por uma técnica de embaralhamento ou scrambling [16]. Esta técnica é utilizada em todos os restantes bits como forma de impedir que ocorram longos períodos de pulsos de 0's ou 1's, facilitando assim a extracção do sinal de relógio no receptor, garantindo ainda uma menor probabilidade de repetição da sequência FAS ao longo da trama.

O campo MFAS, composto por um byte cujo valor poderá ir de 0 a 255, irá ser continuamente incrementado a cada nova trama que componha uma sequência multi-trama, permitindo assim realizar o alinhamento de até 256 tramas consecutivas de uma multi-trama. Alguns campos do cabeçalho terão diferentes definições tendo em conta o valor do MFAS, sendo útil por exemplo na estrutura PSI (Payload Structure Identifier), cuja informação se espalha por várias tramas [16].

Para ser possível um funcionamento correcto é necessário que o receptor consiga encontrar o início da trama antes de começar a processar os dados de controlo, necessitando ainda de conseguir identificar ausência de sinal e ausência ou perda de trama. Além disto, e tal como já referido, o cabeçalho da trama OTN é ainda constituído pelo cabeçalho OPU, pelo cabeçalho OTU e pelo cabeçalho ODU, que serão analisados seguidamente.

Cabeçalho OPU

Este cabeçalho é utilizado como forma de realizar a adaptação entre a carga paga (informação do cliente) e o transporte da mesma no canal óptico. Para isso, é adicionado à carga paga da trama contendo informações que são responsáveis por adaptar os dados de diferentes protocolos por forma a ser possível transportá-los na trama OTN. A norma OTN prevê já actualmente o transporte de vários protocolos, entre os quais o SDH, ATM e GFP, sendo o campo PSI (Payload Structure Identifier), que se espalha por 256 tramas, o campo responsável por identificar o conteúdo da carga paga.

Uma vez que existe a possibilidade de serem transportados na trama OTN protocolos assíncronos, nos quais podem existir deslocações na carga paga, o cabeçalho OPU possui também campos para o mapeamento da informação do cliente dentro da estrutura da carga paga, sendo estes o JC (Justification Control), o PJO (Positive Justification Opportunity) e o NJO (Negative Justification Opportunity). Os três bytes denominados JC, têm assim como função o controlo de justificação, como forma de garantir que a informação é recebida sem erros ou alterações. Estes bytes irão indicar se os bytes PJO e NJO estão a ser usados para justificação de dados. No caso da não existência de erros os três bytes JC deverão ter o mesmo valor, sendo que no caso de isto não acontecer a decisão sobre a função dos bytes de justificação será tomada por maioria, neste caso 2 em 3.

Cabeçalho OTU

O cabeçalho OTU é formado por três partes, sendo que três bytes são utilizados para o campo SM (Section Monitoring), responsável por monitorizar a sessão, 2 bytes são utilizados para o campo GCC0 (General Communication Channel 0) responsável pela troca de mensagens entre duas terminações OTU, existindo ainda outro campo com dois bytes que está reservado para uso futuro. O SM possui vários sub-campos, entre os quais o TTI (Trail Trace Identifier), cuja função é indicar a origem e destino da trama e o BIP-8, um código de detecção de erros que utiliza paridade par. Estes sub-campos não se encontram unicamente no cabeçalho OTU, estando também presentes em outras partes do cabeçalho. Além dos sub-campos já citados, existem ainda vários bits do alarme presentes no SM.

Cabeçalho ODU

O cabeçalho ODU tem como funções a gestão de rede e a supervisão end-to-end de canais ópticos, sendo que os seus campos mais importantes são o PM (Path Monitoring) e o TCM (Tandem Connection Monitoring). A estrutura destes é bastante semelhante à estrutura do campo SM referido no cabeçalho OTU, mas a principal diferença é a existência de um campo suplementar, o campo STATUS, cuja função é indicar a presença de um sinal de manutenção na trama.

A maioria dos campos contidos neste cabeçalho são campos TCM. O SDH foi modificado por forma a permitir a existência de uma ligação TCM, porém na OTN existem seis destes campos para serem usados para gestão da rede, tornando assim possível

aos administradores da rede monitorizar as taxas de erros em várias ligações dessa mesma rede. Desta forma e através da monitorização dos campos TCM torna-se possível identificar em que pontos da rede o sinal é mais fraco ou mais forte. Tanto o campo APS/PCC (Automatic Protection Switching and Protection Communication Channel) como o campo FTFL (Fault Type and Fault Location) estão também relacionados com funções de monitorização da rede, sendo que o primeiro utiliza estas mesmas informações para proteger a rede de routing em caminhos onde o sinal se encontra degradado.

O campo PM, composto por três bytes, embora bastante semelhante ao campo SM do cabeçalho OTU, é responsável por monitorizar a ligação de caminhos que podem conter diversos switchings de canais ópticos, enquanto o SM apenas monitoriza ligações entre dois pontos interligados por uma fibra óptica apenas.

3.5.5 Transmissão de Cabeçalhos das Camadas Ópticas

Tal como referido anteriormente, as várias camadas ópticas (OCh, OMS e OTS) vão possuir cabeçalhos associados que não vão ser adicionados no domínio eléctrico. Estes cabeçalhos serão transmitidos pelo canal de supervisão óptica ou Optical Supervisory Channel (OSC) que se encontra normalizado pelo ITU-T para ser transmitido no comprimento de onda de 1510 nm [3]. Este canal será extraído, processado e inserido em cada um dos elementos da rede.

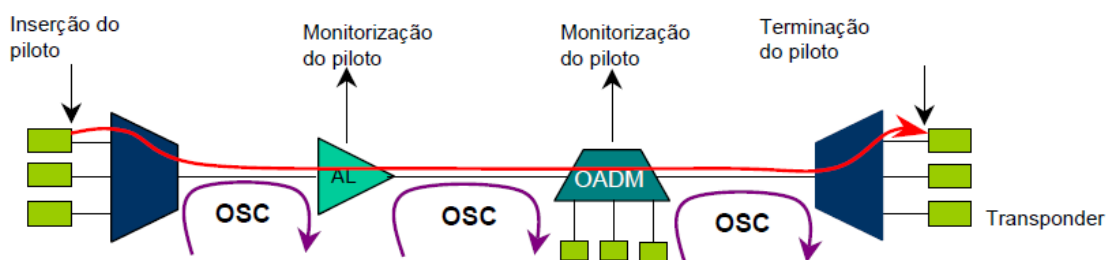


Figura 3.20 – Transmissão de cabeçalhos das camadas ópticas, retirado de [3]

Assim, para ser possível identificar, averiguar a integridade e também gerir cada um dos caminhos ópticos existe um identificador de canal óptico, que representa cada um destes. Ao sinal que modula o laser é adicionada uma sub-portadora, denominada piloto e cuja frequência será na banda entre 1 MHz e 2 MHz, normalmente [3]. Será o piloto que permitirá transmitir o identificador de canal óptico e ainda monitorizar a potência.

Se cada caminho óptico for caracterizado por um piloto com uma frequência única, esta poderá funcionar como identificador de canal. Alternativamente, poderá existir uma frequência piloto por cada comprimento de onda, de modo que o identificador de canal será um sinal digital que modula o piloto.

3.5.6 Monitorização das Ligações em Cascata

A monitorização das ligações em cascata, ou TCM (Tandem Connection Monitoring), é uma funcionalidade através da qual um operador poderá monitorizar a qualidade de ligações cujo início e o fim se encontram na sua rede, ainda que estas atravessem redes de outros operadores [3]. Desta forma, facilmente se verifica em que pontos da rede o sinal é mais forte ou mais fraco e, no caso de ocorrer alguma falha na ligação, rapidamente será identificada a sua localização.

Assim, tomando como exemplo a Figura 3.21, o operador A vai necessitar que o operador B transporte o seu sinal mas, devido à funcionalidade de TCM, consegue monitorizar a qualidade do mesmo em toda a rede, mesmo quando este passa na rede do operador B. Para tal ser conseguido serão usados um ou mais dos seis campos TCM do cabeçalho ODU, tal como já abordado.

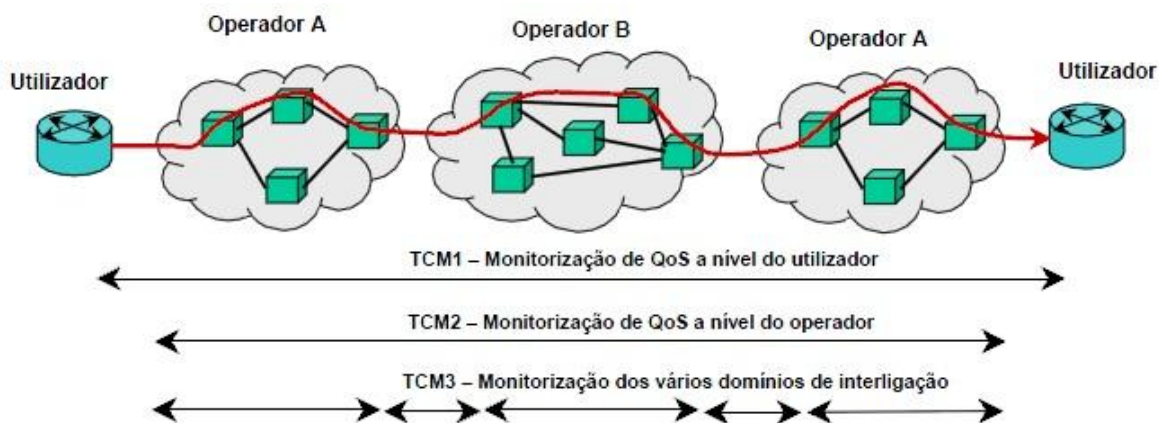


Figura 3.21 – Monitorização das ligações em cascata na OTN, retirado de [3]

Também no exemplo da Figura 3.21 podemos observar vários tipos de monitorização de ligações em cascata. Deste modo, o TCM1 permite supervisionar a qualidade de serviço a nível de utilizador, entre os utilizadores. O TCM2 possibilitará a supervisão da qualidade de serviço do operador e finalmente o TCM3 permitirá

monitorizar a qualidade de serviço do tráfego dentro da rede, em cada um dos vários domínios de interligação

3.5.7 Correção de Erros

Os mecanismos de correção de erros foram criados como forma de combater o problema criado pelo aumento das taxas de transmissão, que ao ultrapassarem a barreira dos 10Gb/s, levam a uma degradação do sinal produzida pelo meio de transmissão e que leva a um impacto bastante significativo na taxa de erro de um canal [39].

Assim, os algoritmos de correção de erros, através da utilização de informações redundantes codificadas, conseguem realizar uma verificação e até correção de erros no receptor, garantindo uma correcta transmissão dos dados, mesmo a taxas de transmissão mais elevadas, tornando a transmissão bastante mais eficaz. Uma das principais vantagens da norma OTN é o facto de fornecer um código FEC significativamente mais forte do que os existentes no SDH. Os códigos FEC que são utilizados nesta norma são os códigos Reed-Solomon, que fazem parte dos códigos de blocos cíclicos e lineares cujo objectivo é a detecção e a correção de erros [3] [39].

Partindo de k símbolos de informação são gerados n símbolos, sendo assim introduzidos r símbolos redundantes, dando origem a um código denominado RS(n,k), com capacidade para corrigir $\frac{r}{2}$ símbolos errados.

$$r = n - k \quad (3.4)$$

O valor de n vai depender do número de bits de cada símbolo. Assim, se admitirmos que cada símbolo tem m bits, teremos:

$$n = 2^m - 1 \quad (3.5)$$

Normalmente para as aplicações nas redes ópticas, uma vez que o símbolo será o byte, teremos $m=8$, donde resulta que $n=255$. São utilizados 16 símbolos redundantes, resultando no código utilizado na OTN, o código RS(255,239).

No processamento FEC cada linha da OTU (equivalente à trama OTN sem o campo FEC) vai ser dividida em 16 sub-linhas com o entrelaçamento de bytes mostrado na Figura 3.22. Através desta utilização de interposição de byte são assim geradas 16

A distância de Hamming deste código é 17, conseguindo-se assim corrigir até 8 símbolos na palavra de código FEC quando usado para correção de erros. Se usado unicamente para detecção de erros, consegue detectar até 16 símbolos errados na palavra de código FEC [40]. Assim, utilizando este código RS(255,239), obtém-se um ganho de codificação da ordem dos 6.2 dB, possibilitando reduzir bastante o valor do BER [41]. A título de exemplo, no caso de um BER na ordem dos 10^{-4} consegue-se uma melhoria para um valor da ordem dos 2×10^{-13} através da utilização do FEC.

3.5.8 Elementos de Rede

Existem vários tipos de equipamentos da rede de transporte óptica. Os diversos elementos de uma rede óptica vão estar interligados entre si através da fibra óptica e de acordo com uma determinada topologia física, que pode ser, por exemplo, uma topologia em anel, ou uma topologia em malha. Assim, os mais comuns equipamentos incluem:

- Amplificadores Ópticos ou Optical Amplifiers (OA).

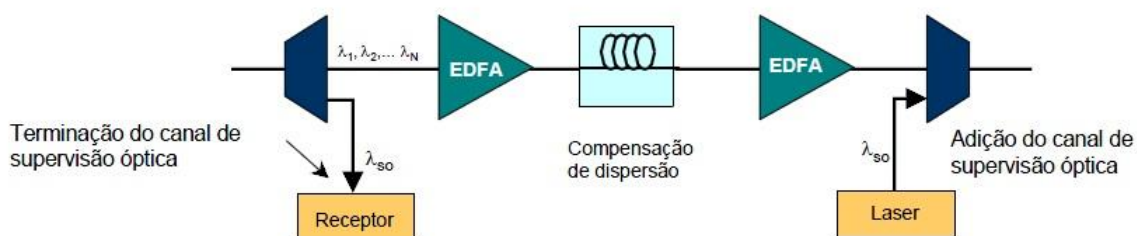


Figura 3.24 – OA, retirado de [3]

Vão estar colocados no meio das vias ópticas a cada intervalo entre 80 a 120 km. Normalmente são compostos por um bloco de amplificação EDFA, seguido de um compensador de dispersão e de um novo bloco de amplificação EDFA. Existe um canal de supervisão óptica que vai controlar e monitorizar o desempenho dos amplificadores ópticos, canal este que é extraído e terminado na entrada do amplificador, sendo depois adicionado na saída [3].

- Multiplexadores Ópticos Terminais ou Optical Terminal Multiplexer (OTM).

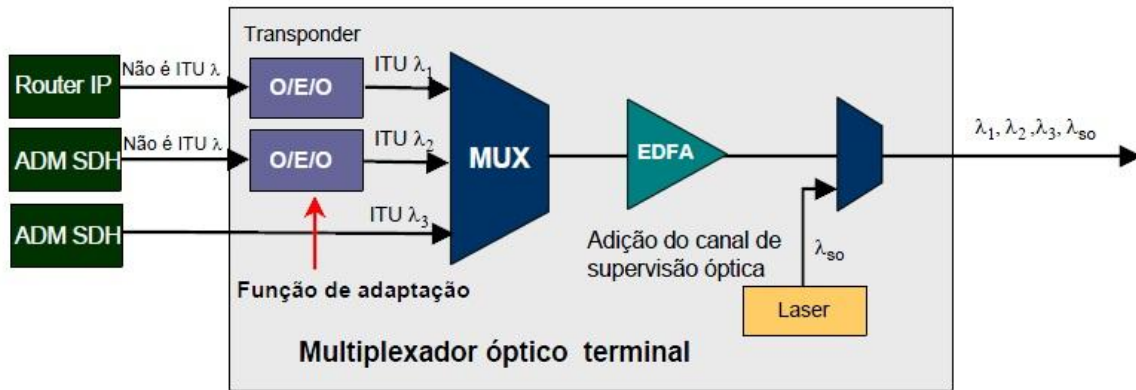


Figura 3.25 – OTM, retirado de [3]

Equipamentos utilizados nas extremidades das ligações ponto-a-ponto e que multiplexam e demultiplexam diferentes comprimentos de onda. Estes equipamentos são constituídos por três elementos, sendo eles o transponder, o multiplexador WDM e o amplificador óptico. Os transponder possuem as funcionalidades de alteração dos comprimentos de onda por forma a ter na saída comprimentos de onda de acordo com as recomendações do ITU-T, adicionam cabeçalhos para funções de gestão, adicionam o código FEC e monitorizam o BER [3].

- Multiplexadores Ópticos de Inserção/Extracção ou Optical Add/Drop Multiplexers (OADM).

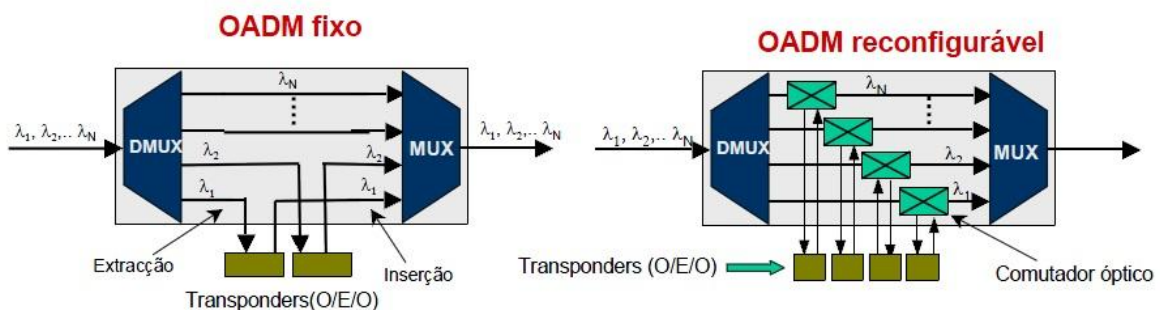


Figura 3.26 – OADM fixo e OADM reconfigurável, retirado de [3]

Demultiplexam o sinal com vários comprimentos de onda em comprimentos de ondas individuais, permitindo a extracção de comprimentos de onda que requerem processamento local sendo estes posteriormente inseridos. Existem dois tipos de OADM,

o OADM fixo, no qual o conjunto de comprimentos de onda extraídos e inseridos não se altera e o OADM reconfigurável, onde podem existir alterações como forma de responder a mudanças nos padrões de tráfego [3].

- Comutadores de Circuitos Eléctricos ou Electrical cross Connects (EXC), que são idênticos aos DXC utilizados no SDH, mas utilizados na OTN.
- Comutadores de Circuitos Ópticos ou Optical cross Connects (OXC).

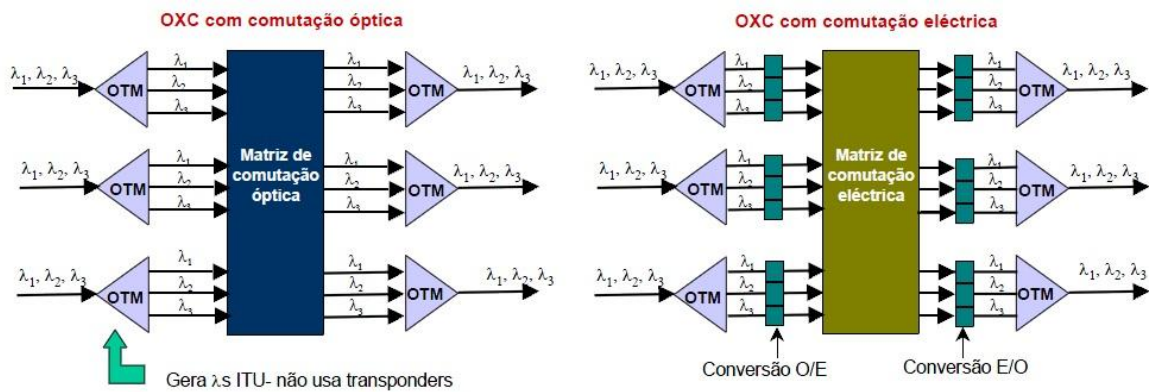


Figura 3.27 – OXC com comutação óptica e OXC com comutação eléctrica, retirado de [3]

Permitem a comutação de comprimentos de onda de uma fibra para outra fibra, podendo a configuração deste equipamento ser de dois tipos. Existindo uma configuração transparente esta será totalmente óptica, enquanto que existindo uma configuração opaca haverá conversões óptico para eléctrico e vice-versa dentro do OXC. Os OXC são constituídos por OTM's, responsáveis pelas operações de multiplexagem e demultiplexagem e por uma matriz de comutação, que poderá ser óptica ou eléctrica [3].

4 Estudo de Cenários Realistas

4.1 Introdução

Neste capítulo serão estudados cenários realistas considerando a arquitectura IP sobre WDM e a arquitectura IP sobre OTN. Para alcançar este objectivo é estudada a arquitectura dos nós de forma a que, após compreender o seu funcionamento, seja possível desenvolver um modelo de custos. Feito isto, conseguir-se-á analisar e avaliar o desempenho da OTN em cenários realistas. Depois de avaliados os resultados obtidos serão discutidos os prós e os contras da utilização desta tecnologia.

Assim, este capítulo 4 será dividido em 6 secções. Na secção 4.2 é estudada a arquitectura dos nós para que seja possível compreender todo o trabalho efectuado a partir deste ponto, uma vez que ficarão evidentes as diferenças entre as duas arquitecturas analisadas. Na secção 4.3 será desenvolvido o modelo de custos, que servirá de base para na secção 4.4 se realizar um estudo comparativo entre a arquitectura IP sobre WDM e a arquitectura IP sobre OTN. Esta informação será utilizada na secção 4.5 para estudar cenários realistas. Finalmente a secção 4.6 estará reservada para a discussão dos resultados obtidos.

4.2 Arquitectura dos Nós

Com o aparecimento do WDM as operadoras optaram por fazer as ligações entre os routers de núcleo directamente utilizando ligações WDM [42] [43]. A este tipo de arquitectura dá-se o nome de IP sobre WDM, sendo que as redes baseadas neste princípio funcionarão com comutação de pacotes. Este é uma rede de duas camadas, sendo composta por uma camada de tráfego (IP) sobre uma camada de transporte (WDM).

A alternativa estudada neste trabalho, é uma arquitectura denominada IP sobre OTN, na qual os routers estão ligados através de uma rede com comutação de circuitos composta por EXC's, que por sua vez estão interligados entre si por ligações WDM.

Esta diferença entre as duas arquitecturas torna-se mais perceptível através da análise da Figura 4.1 e Figura 4.2, nas quais são apresentadas duas redes. Nestes exemplos as redes são compostas por quatro nós e cada uma das figuras corresponde a uma das arquitecturas. Para cada nó existem quatro routers.

Na Figura 4.1 está representada a arquitectura IP sobre WDM. Fica claro que os routers estão ligados directamente aos canais WDM, que os ligam aos nós vizinhos. É

possível verificar que, caso se queira transmitir tráfego (representado a vermelho na figura) entre o nó 1 e o nó 4, por exemplo, este terá de fluir do router do nó 1 para o router do nó 2 e finalmente para o router do nó 4.

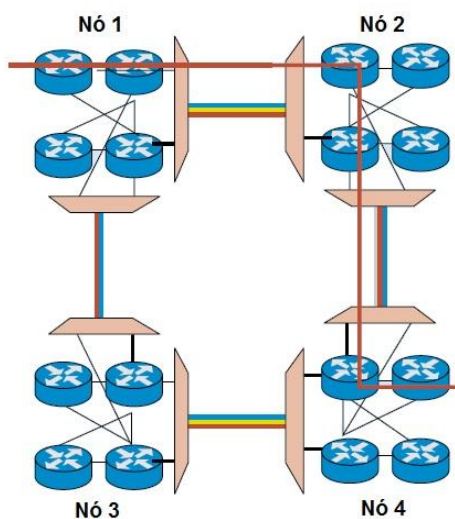


Figura 4.1 – Arquitectura IP sobre WDM, adaptado de [42]

Na Figura 4.2 está representada a arquitectura IP sobre OTN. Nesta arquitectura existe um elemento intermediário responsável por ligar os routers aos nós vizinhos, o EXC. Observa-se que caso se pretenda realizar uma transmissão entre os mesmos nós do exemplo anterior, o tráfego (representado a azul na figura) não terá de ser processado pelo router do nó 2 uma vez que o EXC tratará do reencaminhamento do mesmo.

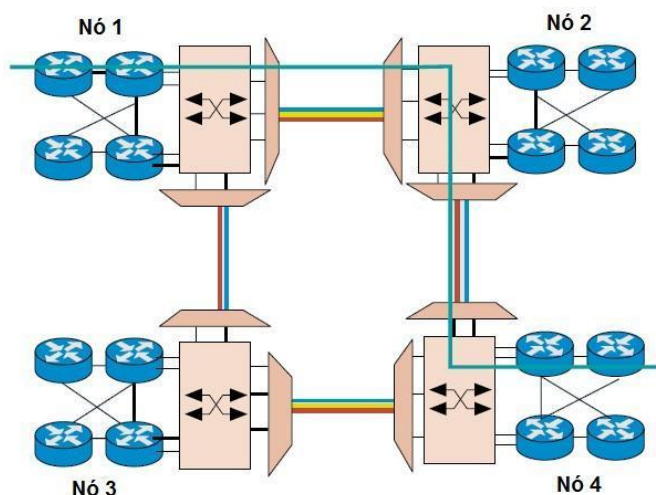


Figura 4.2 – Arquitectura IP sobre OTN, adaptado de [42]

4.3 Modelo de Custos

Na Figura 4.3 e Figura 4.4 estão representadas as mesmas arquitecturas dos exemplos anteriores, mas simplificadas por forma a ajudar na análise. Assim, o estudo aqui realizado é efectuado do ponto de vista de um dos nós da rede, sendo este nó em estudo representado nas figuras em tamanho maior e na parte superior da imagem, destacado dos outros. Além disso será considerado que cada nó é composto por apenas um router, ao invés dos quatro dos exemplos anteriores.

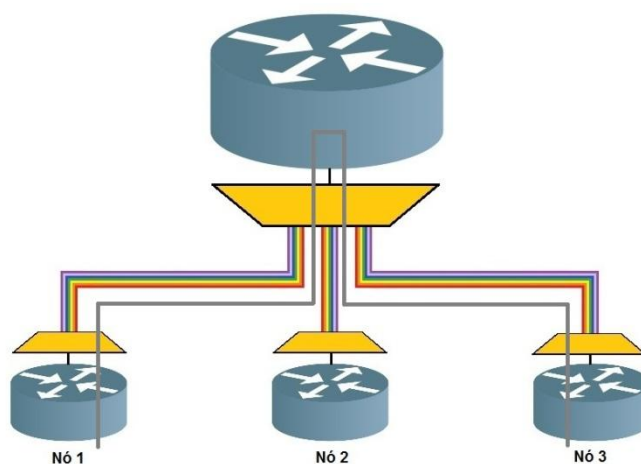


Figura 4.3 – Arquitectura IP sobre WDM utilizada no estudo

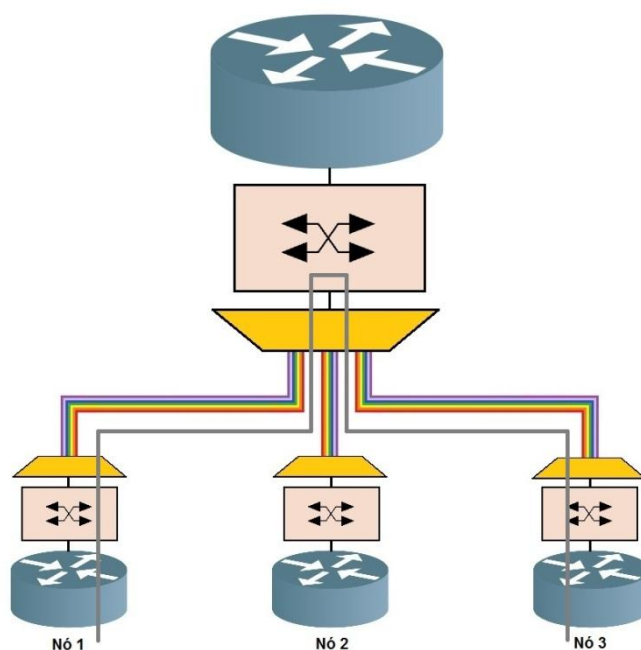


Figura 4.4 – Arquitectura IP sobre OTN utilizada no estudo

O objectivo deste estudo será então calcular o custo de um dos nós de cada uma das redes, em diferentes cenários. Para isso, foi desenvolvido um modelo de custos assente no custo do nó em estudo para a situação da arquitectura IP sobre WDM e também para a situação da arquitectura IP sobre OTN. Pretende-se assim tornar possível a comparação de valores (custos) entre as duas arquitecturas.

Existem dois equipamentos cujo custo é variável e afecta o custo do nó (C_n), o router, aqui designado packet cross connect, que terá um custo C_{pxc} e o EXC, que terá um custo C_{exc} ,

$$C_n = C_{pxc} + C_{exc}. \quad (4.1)$$

Em ambos os casos existe um custo “fixo” (C_0), que vai corresponder ao custo do equipamento base e um custo variável (C_1), que corresponderá ao custo de todas as portas utilizadas nesse mesmo equipamento. Então o custo do router será

$$C_{pxc} = C_{0,pxc} + C_{1,pxc}. \quad (4.2)$$

O custo base do router ($C_{0,pxc}$) será função do tráfego que este pode processar e assim, sendo x o tráfego total processado neste equipamento, temos

$$C_{0,pxc} = \gamma_{0,pxc}(x). \quad (4.3)$$

Existirão dois tipos de portas diferentes para cada equipamento, dependendo das distâncias para as quais poderão transmitir ou receber tráfego. Assim, para pequenas distâncias as portas serão do tipo Short Reach (SR) e para grandes distâncias as portas serão do tipo Long Reach (LR). Assim, para as portas do router teremos

$$C_{1,pxc} = C_{1,SR} + C_{1,LR}. \quad (4.4)$$

O custo das portas será dependente do seu bit rate (br) e da quantidade de portas necessárias (P) com esse mesmo bit rate. O bit rate poderá assumir os valores dos vários níveis da hierarquia de multiplexagem considerada. Desta forma podemos afirmar que o custo das portas do tipo SR será obtido multiplicando o número de portas necessárias pelo custo de cada uma, para cada um dos bit rates considerados,

$$C_{1,SR} = \sum_{br} P_{SR,br} C_{SR,br}. \quad (4.5)$$

Da mesma forma, o custo das portas do tipo LR será obtido por

$$C_{1,LR} = \sum_{br} P_{LR,br} C_{LR,br} . \quad (4.6)$$

Ficará assim calculado o custo total do router. O caso do EXC será análogo a este, pelo que, iremos também ter um custo “fixo”, relativo ao custo base e um custo variável, relativo às portas utilizadas neste mesmo equipamento. Sendo assim

$$C_{exc} = C_{0,exc} + C_{1,exc} . \quad (4.7)$$

O tráfego processado pelo EXC será, tal como no caso do router, variável e o custo deste equipamento será também dependente do tráfego total que este consegue processar. Desta forma, para um EXC com capacidade de processar um tráfego x temos que

$$C_{0,exc} = \gamma_{0,exc}(x) . \quad (4.8)$$

Tal como no caso anterior poderemos ter dois tipos de portas que irão afectar o custo variável do equipamento e assim, o custo total das portas será também obtido pela soma dos custos das portas do tipo SR e das portas do tipo LR,

$$C_{1,exc} = C_{1,SR} + C_{1,LR} . \quad (4.9)$$

O cálculo de cada um destes custos será semelhante ao efectuado no caso do router e portanto temos que

$$C_{1,SR} = \sum_{br} P_{SR,br} C_{SR,br} . \quad (4.10)$$

e

$$C_{1,LR} = \sum_{br} P_{LR,br} C_{LR,br} . \quad (4.11)$$

4.4 Estudo Comparativo

Admitimos que todo o tráfego processado pelo nó é tráfego bidireccional e é representado por T . Pode ter duas origens, podendo ser tráfego inserido directamente no nó em estudo ($T_{add/drop}$) ou tráfego de passagem, que provém já de outro nó da rede (T_{thru}),

$$T = T_{add/drop} + T_{thru}. \quad (4.12)$$

Para este efeito foi criado o parâmetro β , que representa a percentagem de tráfego T_{thru} em relação ao tráfego T . Desta forma

$$T_{thru} = \beta T \quad (4.13)$$

tal como

$$T_{add/drop} = (1 - \beta)T. \quad (4.14)$$

Caso da arquitectura IP sobre WDM

Relativamente ao router, o seu custo “fixo” vai depender, tal como já referido, do tráfego total que processar, uma vez que o valor do seu custo aumenta em função da sua capacidade máxima de processamento. Como neste caso o tráfego total processado pelo nó vai corresponder também ao tráfego total processado pelo router temos então o valor de $C_{0,pxc}$ dependendo de T . Assim ficará já definido que

$$C_{pxc} = \gamma_{0,pxc}(T) + C_{1,pxc} \quad (4.15)$$

O custo variável vai depender de uma forma mais acentuada do tráfego processado pelo nó, uma vez que o número de portas necessárias no router vai depender fortemente do tráfego processado por este. Como forma de facilitar a análise, classificaram-se as portas em 3 tipos, conforme ilustrado na Figura 4.5. A fim de simplificar o estudo vamos assumir que as portas do mesmo tipo têm todas o mesmo bit rate.

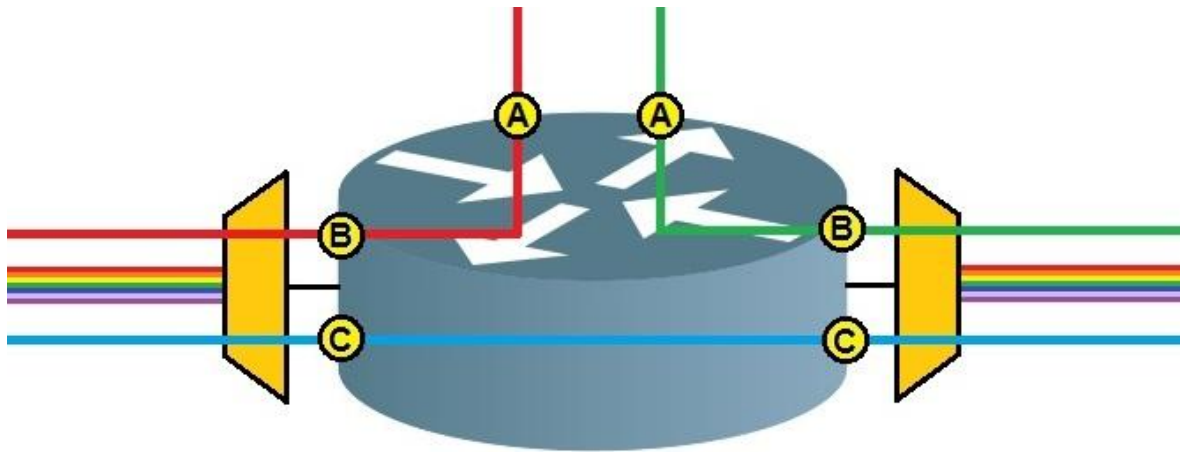


Figura 4.5 – Vários tipos de portas na arquitectura IP sobre WDM

Para esta arquitectura teremos as portas do tipo A, que serão as que recebem o tráfego do cliente e nas quais será então transmitido $T_{add/drop}$. Serão portas para pequenas distâncias e portanto do tipo Short Range (SR). As portas do tipo B são as responsáveis pela transmissão do tráfego até ao nó destino, sendo então também transmitido nestas $T_{add/drop}$. Finalmente temos as portas do tipo C, responsáveis por receber tráfego de outros nós e o enviar para os nós destino. Estas últimas são neste caso responsáveis pelo tráfego T_{thru} . Tanto as portas do tipo B como as portas do tipo C serão portas Long Range (LR), pois recebem e transmitem tráfego para longas distâncias.

Tal como referido no modelo de custos, para cada porta existem 3 parâmetros que necessitam de ser considerados:

- a capacidade da porta - br ;
- o custo de cada porta – $C_{SR/LR,br}$;
- o número de portas necessárias – $P_{SR/LR,br}$.

Tanto a capacidade como o custo da porta são parâmetros introduzidos pelo utilizador e que poderão variar tendo em conta o cenário em estudo. Sendo assim, no modelo de custos apenas será desenvolvido o método através do qual é calculado o número de portas necessário. Assim, e como cada tipo de porta é diferente, serão analisados caso a caso.

Portas do tipo A:

Tal como já referido o tráfego que as atravessa será tráfego $T_{add/drop}$. Considera-se que este tráfego é medido na saída do router. Assim, e uma vez que o tráfego é bidireccional, para calcularmos o número de portas do tipo A necessárias este terá de ser multiplicado por um factor de expansão (F_e). Isto deve-se ao facto de existir no router uma multiplexagem estatística do tráfego entre B e A.

Desta forma e sabendo a sua capacidade, o número de portas necessárias é traduzido por

$$P_{SR,br} = \left\lceil \frac{T_{add/drop} F_e}{br} \right\rceil. \quad (4.16)$$

Portas do tipo B:

Também neste caso o tráfego que atravessa estas portas será tráfego $T_{add/drop}$. Uma vez que este é medido em B não será afectado pela multiplexagem estatística, pelo que o número de portas necessárias será então

$$P_{LR,br} = \left\lceil \frac{T_{add/drop}}{br} \right\rceil. \quad (4.17)$$

Portas do tipo C:

O tráfego que atravessa as portas do tipo C será tráfego T_{thru} . É necessário ter em consideração que neste caso, para cada ligação, teremos portas de entrada e portas de saída pelo que o número de portas necessárias será o dobro,

$$P_{LR,br} = 2 \left\lceil \frac{T_{thru}}{br} \right\rceil. \quad (4.18)$$

Relativamente ao EXC, e uma vez que no caso da arquitectura IP sobre WDM não será utilizado este equipamento, podemos afirmar que

$$C_{exc} = 0. \quad (4.19)$$

Assim, o custo do nó ficará totalmente definido pelo custo do router.

Caso da arquitectura IP sobre OTN

Na arquitectura IP sobre OTN a parte do custo “fixo” do router vai também ser definida pelo seu valor base sem as portas. No entanto este custo ($C_{0,pxc}$) já não irá depender do tráfego total processado pelo nó visto que o router apenas processa o tráfego $T_{add/drop}$. Assim temos que

$$C_{pxc} = \gamma_{0,pxc}(T_{add/drop}) + C_{1,pxc} \quad (4.20)$$

Para o cálculo do custo variável do router, tal como no caso da arquitectura anterior, é necessário classificar as portas existentes em vários tipos, como forma de facilitar todo o processo de cálculo. No caso da arquitectura IP sobre OTN classificam-se as portas em 5 tipos, dos quais dois pertencem ao router e três ao EXC, tal como ilustrado na Figura 4.6.

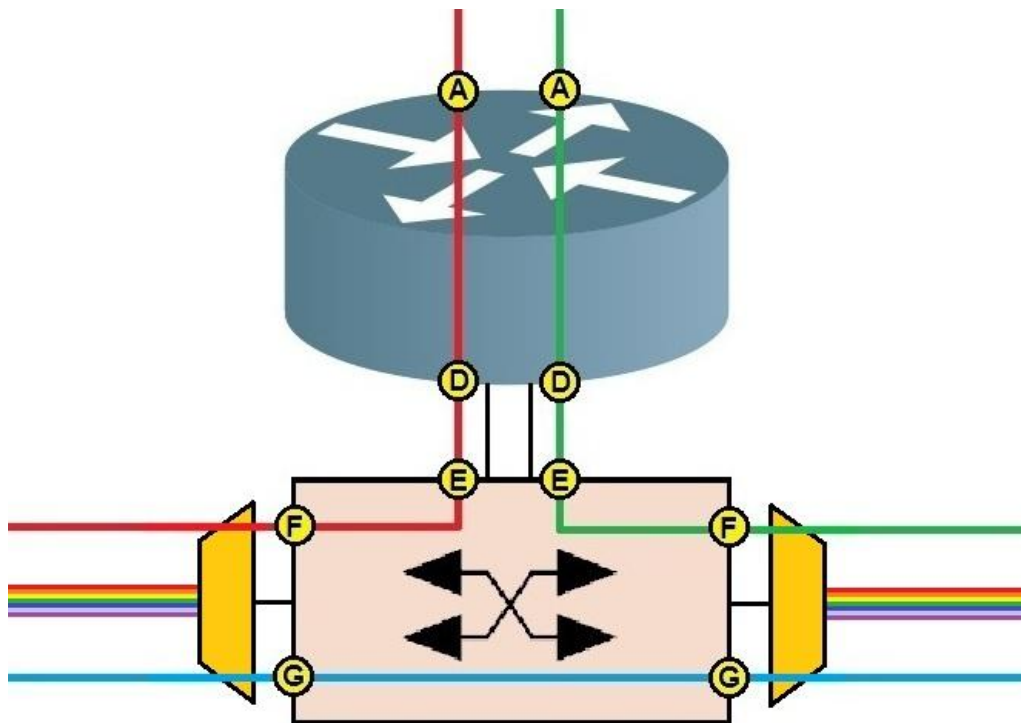


Figura 4.6 - Vários tipos de portas na arquitectura IP sobre OTN

Optou-se por utilizar a mesma nomenclatura em portas que são coincidentes às duas hierarquias, as portas do tipo A. Estas são iguais na hierarquia IP sobre WDM e na hierarquia IP sobre OTN.

As portas dos tipos D e E são portas semelhantes, uma vez que ambas são responsáveis pela transmissão de tráfego $T_{add/drop}$ e ambas são portas SR. Optou-se pela sua separação em dois tipos como forma de facilitar a compreensão do esquema, uma vez que umas são portas do router e outras são portas do EXC.

Por sua vez as portas do tipo F transportam o tráfego proveniente do router, $T_{add/drop}$, e as portas do tipo G são portas responsáveis pela transmissão do tráfego T_{thru} . Tanto as portas do tipo F como as portas do tipo G são portas LR.

As condições introduzidas para a arquitectura anterior mantêm-se, sendo considerados os mesmos três parâmetros para cada uma das portas, a capacidade, o custo e o número de portas necessárias para cada nó destino.

Assim, para as portas do router temos:

Portas do tipo A:

Como neste caso as portas serão iguais às portas do tipo A da arquitectura IP sobre WDM teremos

$$P_{SR,br} = \left\lceil \frac{T_{add/drop} F_e}{br} \right\rceil. \quad (4.21)$$

Portas do tipo D:

São bastante semelhantes às portas do tipo B da arquitectura IP sobre WDM. Apenas as distingue o facto de as primeiras serem portas SR e as segundas serem portas LR. Este facto não influenciará o cálculo do número de portas necessárias, pelo que a expressão será semelhante à expressão (4.17),

$$P_{SR,br} = \left\lceil \frac{T_{add/drop}}{br} \right\rceil. \quad (4.22)$$

Assim ficam calculados os custos para as portas do router na arquitectura IP sobre OTN.

Em relação ao EXC e, como acontece no router, o custo do equipamento base irá depender do tráfego processado pelo mesmo. Uma vez que o EXC é responsável por processar todo o tráfego do nó temos que o custo total do EXC será

$$C_{exc} = \gamma_{0,exc}(T) + C_{1,exc}. \quad (4.23)$$

Seguidamente são efectuados os cálculos para as portas do EXC, previamente abordadas, onde foram separadas por tipos e referidas as suas características.

Portas do tipo E:

Sendo estas portas iguais às do tipo D, temos que

$$P_{SR,br} = \left\lceil \frac{T_{add/drop}}{br} \right\rceil. \quad (4.24)$$

Portas do tipo F:

Estas portas são responsáveis por transmitir o tráfego proveniente do router pelo que

$$P_{SR,br} = \left\lceil \frac{T_{add/drop}}{br} \right\rceil. \quad (4.25)$$

Portas do tipo G:

As portas do tipo G são semelhantes às portas do tipo C, sendo portanto o número de portas necessárias calculado da mesma forma,

$$P_{SR,br} = 2 \left\lceil \frac{T_{thru}}{br} \right\rceil. \quad (4.26)$$

Ficam desta forma concluídos os cálculos necessários para cada uma das duas arquitecturas estudadas.

4.5 Análise de Cenários

Todos os valores de custos aqui apresentados e utilizados nesta dissertação foram retirados de [44] e são custos relativos.

As portas encontram-se agrupadas em cartas que ocupam N slots. Cada router ou EXC possui um número máximo de slots que podem ser utilizadas. Como forma de simplificar os cálculos optou-se por considerar como limitativas em cada router ou EXC a capacidade total processada e não o número de slots. Deste modo, o custo de cada porta será dado por:

$$\text{Custo de uma porta} = \frac{\text{Custo de uma carta}}{\text{Número de portas da carta}} \quad (4.27)$$

Tanto para as portas do tipo SR como para as portas do tipo LR poderemos ter interfaces de dois tipos, Ethernet ou OTN. Para cada um dos casos existem diferentes bit rates que podem ser utilizados, representados nas tabelas seguintes.

Interface Ethernet	Capacidade
Ethernet	10 Mb/s
Fast Ethernet	100 Mb/s
Gigabit Ethernet	1 Gb/s
10 Gigabit Ethernet	10 Gb/s

Tabela 4.1 – Interfaces Ethernet

Interface OTN	Capacidade
OTU-1	2.5 Gb/s
OTU-2	10 Gb/s
OTU-3	40 Gb/s
OTU-4	100 Gb/s

Tabela 4.2 – Interfaces OTN

Tal como já referido todos os valores de custos utilizados nesta análise são custos relativos e vão depender da capacidade dos equipamentos [44]. Neste estudo optou-se por utilizar portas com um bit rate fixo, para cada tipo. Assim, as portas que recebem o sinal do cliente, as portas do tipo A, vão ser portas Gigabit Ethernet, cujo bit rate é 1 Gb/s. As portas que vão fazer a ligação entre o router e o EXC, portas do tipo D e portas do tipo E (apenas existentes no caso da arquitectura IP sobre OTN), vão ser portas OTU-2, cujo bit rate é 10Gb/s. Finalmente, as portas que fazem a ligação com outros nós, portas do tipo B, do tipo C, do tipo F e do tipo G, vão ser portas OTU-3, com um bit rate de 40 Gb/s. Toda esta informação está resumida na Tabela 4.3.

Portas	Interface	Capacidade
Tipo A	Gigabit Ethernet	1 Gb/s
Tipo B	OTU-3	40 Gb/s
Tipo C	OTU-3	40 Gb/s
Tipo D	OTU-2	10 Gb/s
Tipo E	OTU-2	10 Gb/s
Tipo F	OTU-3	40 Gb/s
Tipo G	OTU-3	40 Gb/s

Tabela 4.3 – Portas utilizadas

De acordo com o supracitado, tanto o router como o EXC são também equipamentos cujo custo vai variar conforme a sua capacidade. Assim, o valor do seu custo foi sempre adaptado ao tráfego máximo que cada um deles terá de processar em determinado momento.

Na Tabela 4.4 estão especificados os custos de cada equipamento em função da sua capacidade.

Equipamento	Capacidade	Custo
Router	640 Gb/s	16.67
	1280 Gb/s	111.67
	2560 Gb/s	170.00
EXC	640 Gb/s	13.33
	1280 Gb/s	26.67
	2560 Gb/s	69.33
Portas do tipo A	1 Gb/s	$\frac{1.67}{10} = 0.167$
Portas do tipo B	40 Gb/s	5.00
Portas do tipo C	40 Gb/s	5.00
Portas do tipo D	10 Gb/s	0.67
Portas do tipo E	10 Gb/s	0.67
Portas do tipo F	40 Gb/s	5.00
Portas do tipo G	40 Gb/s	5.00

Tabela 4.4 – Custo de cada equipamento, em função da capacidade

A Figura 4.7 mostra a forma como o preço dos dois equipamentos base, o router e o EXC, varia com o tráfego por eles processado. É possível verificar que é uma função em escada, cujos valores de capacidades e de custos foram expressos na Tabela 4.4.

Em relação ao router assumiu-se em todos os cenários que

$$F_e = 2. \quad (4.28)$$

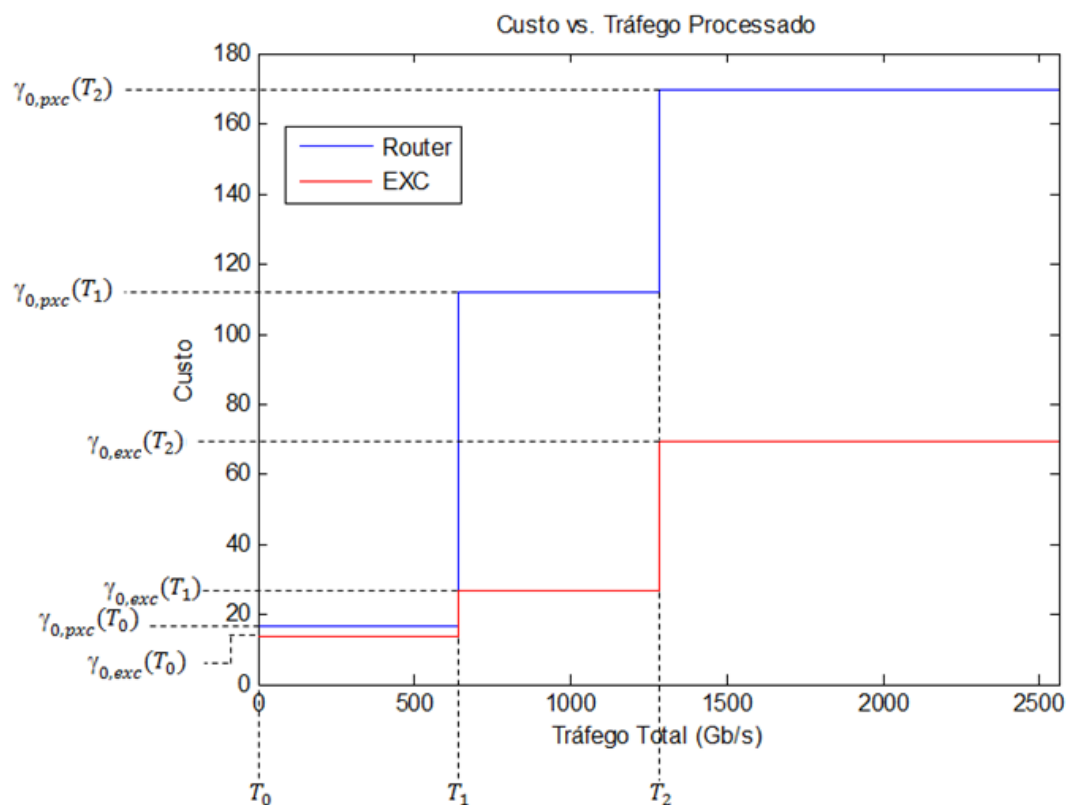


Figura 4.7 – Dependência do custo dos equipamentos base com o tráfego

Inicialmente, e uma vez que os equipamentos base considerados possuem a capacidade de processar tráfego que pode ir desde os 0 Gb/s até aos 2560 Gb/s, assumiu-se que, num primeiro cenário, o tráfego total presente no nó seria

$$T = 1000 \text{ Gb/s.} \quad (4.29)$$

Atendendo a que o tráfego total é composto pelo tráfego $T_{\text{add/drop}}$ e pelo tráfego T_{thru} , será necessário analisar como a variação de cada um deles afecta o custo do nó.

Para alcançar este objectivo fez-se variar o valor de β , ou seja a percentagem de tráfego de passagem (T_{thru}), relativamente ao tráfego total. Assim, se

$$\beta = 0 \quad (4.30)$$

temos que a totalidade do tráfego é tráfego $T_{\text{add/drop}}$. Se

$$\beta = 1 \quad (4.31)$$

o tráfego será apenas composto por tráfego T_{thru} .

O gráfico do custo do nó em função de β para um tráfego total de 1000 Gb/s, obtido para a arquitectura IP sobre WDM e para a arquitectura IP sobre OTN, foi o ilustrado na Figura 4.8.

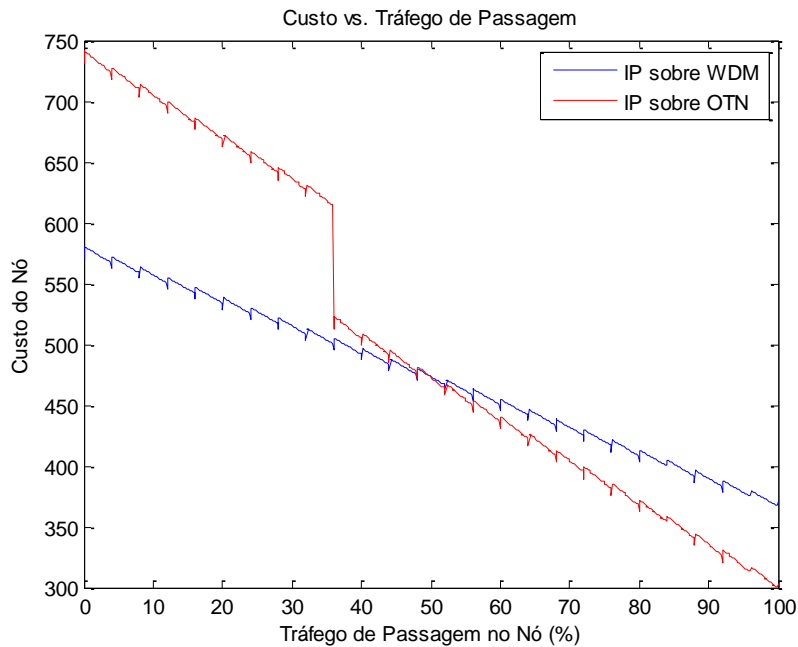


Figura 4.8 – Custo do nó em função do tráfego de passagem, para $T=1000$ Gb/s

Pela observação do gráfico verifica-se que num nó que processe cerca de 1000 Gb/s, a hierarquia IP sobre OTN tornar-se-á mais rentável a partir do momento em que pelo menos cerca de 50 % do tráfego presente no nó seja tráfego de passagem. Como forma de perceber o comportamento do custo do nó em função do tráfego de passagem foi realizada uma abordagem mais atenta ao gráfico.

Verifica-se que o valor do custo vai sempre diminuindo à medida que aumenta a percentagem de tráfego de passagem, em ambas as arquitecturas.

Constatou-se que uma parte desta descida deve-se ao facto de ir diminuindo o número de portas do tipo A necessárias. Isto acontece porque o tráfego local ($T_{\text{add/drop}}$) é cada vez menor. Este facto é comum aos dois tipos de arquitecturas.

Além desta diminuição linear é também possível observar vários “saltos” no custo do nó. Para ser possível analisar estes “saltos” com mais facilidade procedeu-se à ampliação de uma parte do gráfico, conforme a Figura 4.9.

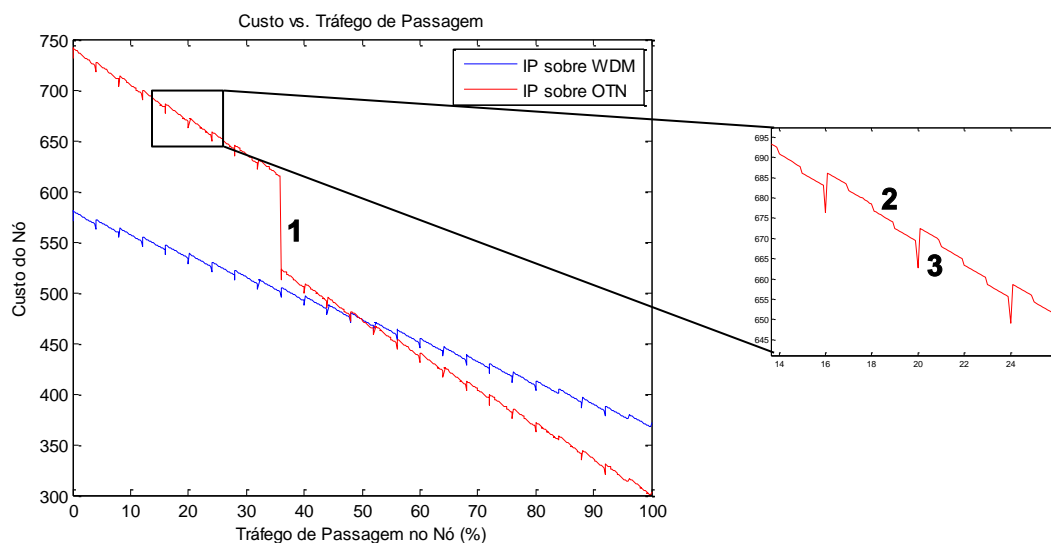


Figura 4.9 – Vista aproximada de parte da Figura 4.8

Na imagem é possível verificar a existência de três tipos de “saltos”. Para se perceber o porquê de cada um será feita uma análise mais cuidada do que acontece por volta de alguns pontos.

- **“Saltos” do tipo 1:**

Estes são os “saltos” mais abruptos observáveis no custo do nó. Acontecem sempre que um dos equipamentos base (router ou EXC) é substituído por outro:

- Quando o tráfego por eles processado ultrapassa o valor máximo da sua capacidade, levando a que o equipamento tenha de ser substituído por outro com uma capacidade de processamento mais alta e conseqüentemente um custo mais elevado.

- Quando o tráfego por eles processado é suportado por um equipamento de menor custo e com capacidade para o processar. É o caso representado por “1” na Figura 4.9. Aqui o router utilizado na arquitectura IP sobre OTN foi substituído por um router com menor capacidade de processamento, uma vez que o tráfego local passou a ser inferior a 640 Gb/s, a capacidade de processamento do router de menor custo. O “salto” deu-se por volta dos 36 % de tráfego de passagem, ou seja, 64 % de tráfego local.

Neste ponto o tráfego local é 640 Gb/s, correspondente à capacidade de processamento do router seleccionado.

- **“Saltos” do tipo 2:**

Um dos momentos em que se verifica a existência de um “salto” deste tipo é por volta dos 19 % de tráfego de passagem. Foi estudado então o que acontece para $\beta = 0.188$ (18.8 %) e para $\beta = 0.192$ (19.2 %). Os resultados obtidos são apresentam-se nas tabelas seguintes:

Tráfego	18.8 %	19.2 %
T	1000 Gb/s	
$T_{add/drop}$	812	808
T_{thru}	188	192

Tabela 4.5 – Tráfego para $\beta = 0.188$ e $\beta = 0.192$ (T=1000 Gb/s)

Portas	18.8 %	19.2 %
Tipo A	1624	1616
Tipo B	21	21
Tipo C	10	10
Tipo D	82	81
Tipo E	82	81
Tipo F	21	21
Tipo G	10	10

Tabela 4.6 – Número de portas necessárias para $\beta = 0.188$ e $\beta = 0.192$ (T=1000 Gb/s)

É possível verificar que, devido à diminuição do tráfego $T_{add/drop}$ o número de portas do tipo D e do tipo F diminuiu. Constatou-se que isto acontece sempre que o valor deste tipo de tráfego passar por um múltiplo de 10 (uma vez que a capacidade das portas é de 10 Gb/s). O número de portas do tipo A também diminuiu, mas tal como já referido isto irá acontecer sempre, de forma linear, não originando “saltos”.

Uma vez que estes “saltos” se devem a portas do tipo D e do tipo F conclui-se que só acontecem no caso da arquitectura IP sobre OTN. São assim responsáveis pelo maior declive na descida do custo do nó nesta arquitectura, em comparação com a arquitectura IP sobre WDM.

- **“Saltos” do tipo 3:**

Uma vez que se verifica uma descida seguida de uma subida, neste caso, ao contrário do que foi feito para os “saltos” anteriores, vai ser estudado o que acontece para três pontos em torno de um “salto” deste tipo. Um dos momentos em que ocorre um “salto” do tipo 3 é por volta dos 20 % de tráfego de passagem. Os valores obtidos para $\beta = 0.198$ (19.8 %), para $\beta = 0.200$ (20.0 %) e para $\beta = 0.202$ (20.2 %) são os seguintes:

Tráfego	18.8 %	20.0 %	19.2 %
T	1000 Gb/s		
$T_{add/drop}$	802	800	798
T_{thru}	198	200	202

Tabela 4.7 – Tráfego para $\beta = 0.198$, $\beta = 0.200$ e $\beta = 0.202$ (T=1000 Gb/s)

Portas	18.8 %	20.0 %	19.2 %
Tipo A	1604	1600	1596
Tipo B	21	20	20
Tipo C	10	10	12
Tipo D	81	80	80
Tipo E	81	80	80
Tipo F	21	20	20
Tipo G	10	10	12

Tabela 4.8 – Número de portas necessárias para $\beta = 0.198$, $\beta = 0.200$ e $\beta = 0.202$ (T=1000 Gb/s)

As portas do tipo A não serão novamente alvo de análise uma vez que já se concluiu que diminuem de forma linear com o aumento do tráfego de passagem. Observa-se que num primeiro momento o número de portas do tipo B, D, E e F diminuiu. Isto acontece pois estas são portas afectadas pelo tráfego local.

As portas do tipo D e F apresentam o mesmo comportamento referido nos “saltos” do tipo 2.

O número de portas do tipo B e do tipo E, sendo portas com uma capacidade de 40 Gb/s varia sempre que o $T_{add/drop}$ passa por um múltiplo de 40. Nesses momentos, e atendendo a que a diminuição do tráfego local será igual ao aumento do tráfego de passagem, teremos um aumento do número de portas do tipo C e G. Concluiu-se ainda

que esse aumento é igual à diminuição do número de portas do tipo B e do tipo F, mas afectado de um factor de 2 (uma vez que neste tipo de portas necessitamos de uma para a entrada e outra para a saída do tráfego).

Para um tráfego total de 1000 Gb/s a frequência com que ocorrem “saltos” deste tipo é a cada 4 % do tráfego de passagem, uma vez que

$$4 \% * 1000\text{Gb/s} = 40\text{Gb/s}. \quad (4.32)$$

No gráfico ilustra-se este comportamento. Por exemplo, no valor de 20 % do tráfego de passagem teremos o quinto “salto” de tipo 3.

Analisado este cenário é importante estudar o que aconteceria caso o tráfego processado no nó tivesse outro valor. Para este efeito foram estudados vários casos, para diferentes valores de tráfego. Assim, foram analisados seis casos dentro das capacidades de processamento possíveis (até 2560 Gb/s). Elaboraram-se gráficos do custo do nó em função da percentagem de tráfego de passagem para valores do tráfego total de 400 Gb/s, 800 Gb/s, 1200 Gb/s, 1600 Gb/s, 2000 G/s e 2400 Gb/s.

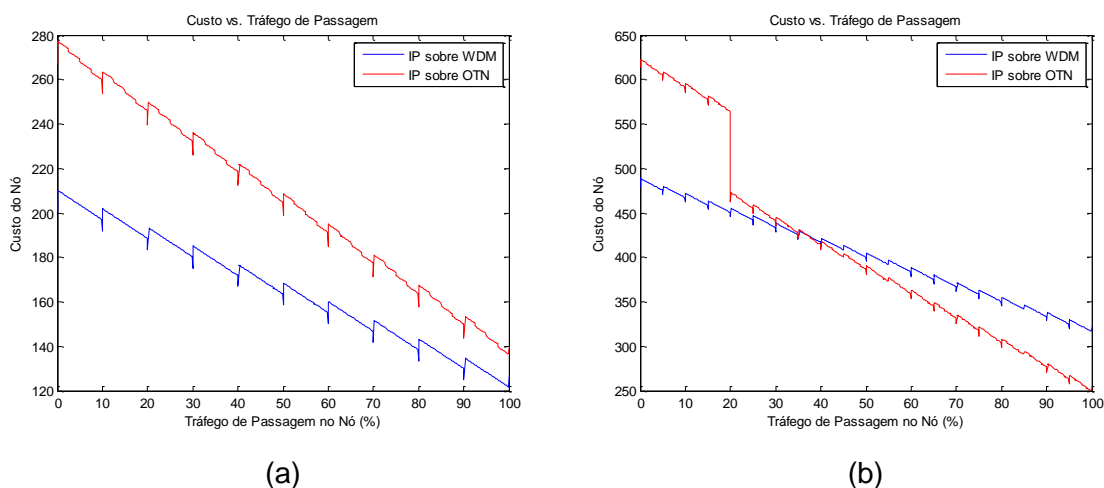


Figura 4.10 - Custo do nó em função do tráfego de passagem, para: a) T=400 Gb/s
b) T=800 GB/s

Na Figura 4.10, quando o tráfego processado pelo nó é igual a 400 Gb/s, observa-se que a arquitectura IP sobre OTN nunca vai conduzir a custos menores do que a arquitectura IP sobre WDM, seja qual for a percentagem de tráfego de passagem. Verifica-se que à medida que o β aumenta a diferença do custo do nó entre as duas arquitecturas vai diminuir, sendo que a arquitectura IP sobre OTN nunca é mais rentável.

Esta constatação, como se poderá verificar adiante, é válida para tráfegos inferiores a 640 Gb/s, uma vez que ambas as arquitecturas usarão o mesmo router, independentemente da percentagem de tráfego de passagem, pois será o router de menor custo.

A vantagem desta arquitectura ocorre quando a percentagem do tráfego de passagem for elevado. Isto porque, poder-se-á poupar no valor do custo do router, pois poderá ser usado um router com menor capacidade relativamente ao da arquitectura IP sobre WDM.

Na situação b) verifica-se que a partir de cerca de 36 % de tráfego de passagem a hierarquia IP sobre OTN se torna mais rentável, aumentando progressivamente a rentabilidade até à situação em que todo o tráfego é de passagem. Isto deve-se ao facto de inicialmente ambas as arquitecturas necessitarem de um router de 1280 Gb/s mas muito rapidamente se poder passar a usar um router mais barato na hierarquia IP sobre OTN. Uma vez que os 800 Gb/s são um valor bastante próximo dos 640 Gb/s da capacidade do router mais barato, é possível logo aos 20 % de percentagem de tráfego de passagem (640 Gb/s de tráfego local) substituir o router. Daqui decorre que este é um dos cenários em que esta arquitectura é mais vantajosa.

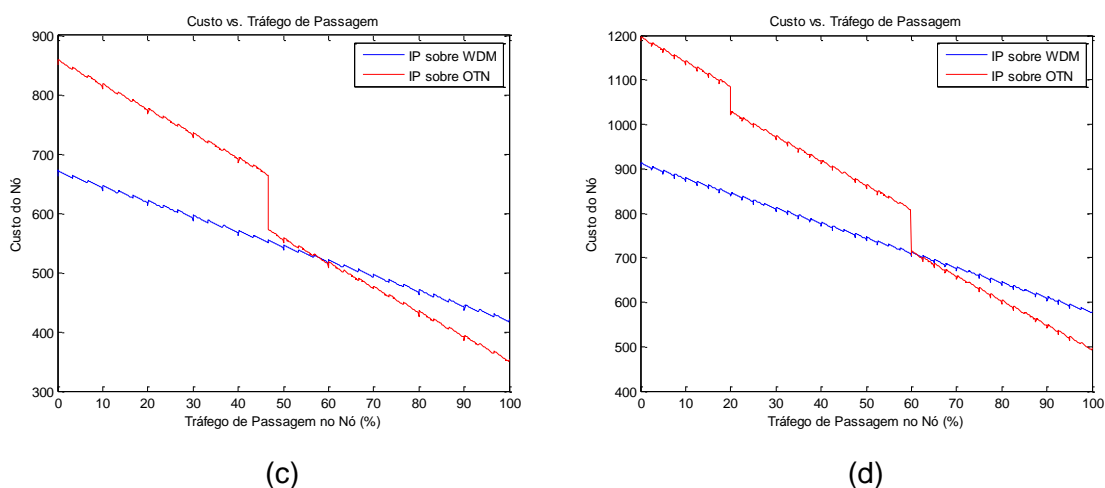


Figura 4.11 - Custo do nó em função do tráfego de passagem, para: c) T=1200 Gb/s
d) T=1600 GB/s

A Figura 4.11 mostra a evolução do custo do nó em função do tráfego de passagem nos casos em que o tráfego total processado no nó é 1200 Gb/s e 1600 Gb/s, em c) e d), respectivamente. Verifica-se que c) é bastante semelhante à situação observada anteriormente, situação b). Isto acontece porque ambas as arquitecturas

necessitarão igualmente no início de um router de 1280 Gb/s, mas na arquitectura IP sobre OTN, este será posteriormente substituído por um de 640 Gb/s, mais rentável. Neste cenário essa substituição ocorrerá por volta dos 46 % de tráfego de passagem, o que faz com que a vantagem da arquitectura IP sobre OTN só surja mais tarde, já perto dos 58 por cento.

No cenário d) o tráfego total processado pelo nó é 1600 Gb/s, portanto, superior aos 1280 Gb/s de capacidade máxima dos routers usados anteriormente. Devido a este facto, neste cenário, inicialmente os routers de ambas as hierarquias serão routers com capacidade máxima de 2560 Gb/s. Assim, uma vez que no caso da hierarquia IP sobre OTN o tráfego processado pelos routers é cada vez menor, vão ocorrer 2 “saltos” do tipo 1 no custo do nó. O primeiro corresponde à substituição do router de 2560 Gb/s pelo router de 1280 Gb/s e o segundo correspondente à substituição do router de 1280 Gb/s pelo router de 640 Gb/s. Assim, por volta dos 61 % de tráfego de passagem, a arquitectura IP sobre OTN torna-se mais vantajosa do ponto de vista financeiro.

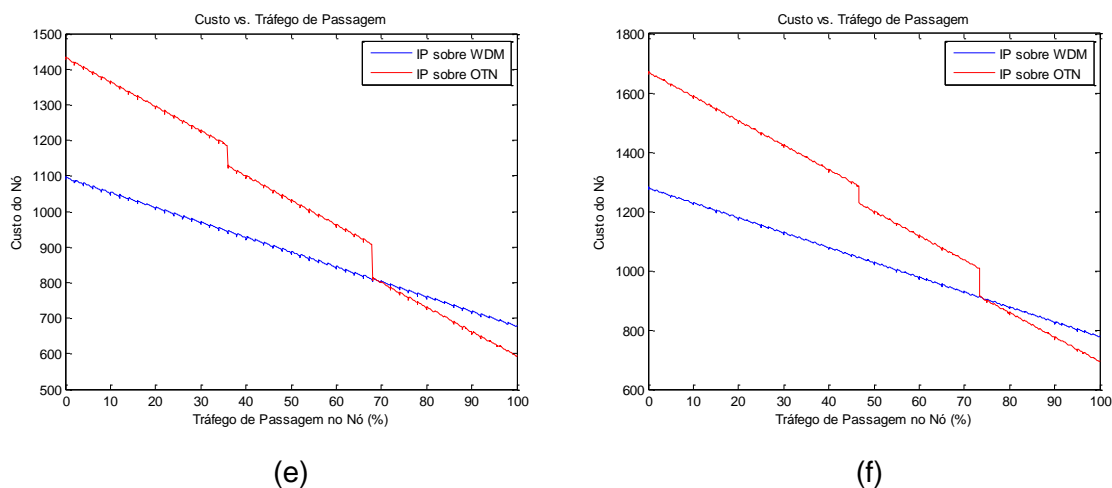


Figura 4.12 - Custo do nó em função do tráfego de passagem, para: c) T=2000 Gb/s
d) T=2400 GB/s

Finalmente, na Figura 4.12 temos o mesmo tipo de gráficos mas para os casos em que o tráfego processado no nó é 2000 Gb/s e 2400 Gb/s. Estes dois casos serão bastante semelhantes ao caso em que o tráfego do nó era 1600 Gb/s. Esta diferença justifica-se pelo facto de o tráfego total ser maior. Logo, a possibilidade de substituição dos routers acontece para percentagens de tráfego de passagem mais elevadas. Assim, a arquitectura IP sobre OTN apenas ser torna rentável para valores β mais elevados (cerca 69 e 74 %, para o caso e) e f) respectivamente).

Desta forma, fica demonstrado como evolui o custo do nó em função do tráfego de passagem.

Embora seja possível retirar já algumas conclusões através destes cenários, é importante analisar como evolui o custo do nó, mas em função do tráfego total que processa. Para este objectivo, foi definido inicialmente um valor β para o qual se esperava que a arquitectura IP sobre OTN apresentasse resultados favoráveis, tendo em conta os cenários anteriores. Assim, para

$$\beta = 0.85, \quad (4.32)$$

foram calculados os valores do custo do nó, fazendo variar o tráfego total processado pelo nó entre 0 Gb/s e 2560 Gb/s (valores limite impostos pelos equipamentos considerados). O gráfico obtido está representado na Figura 4.13.

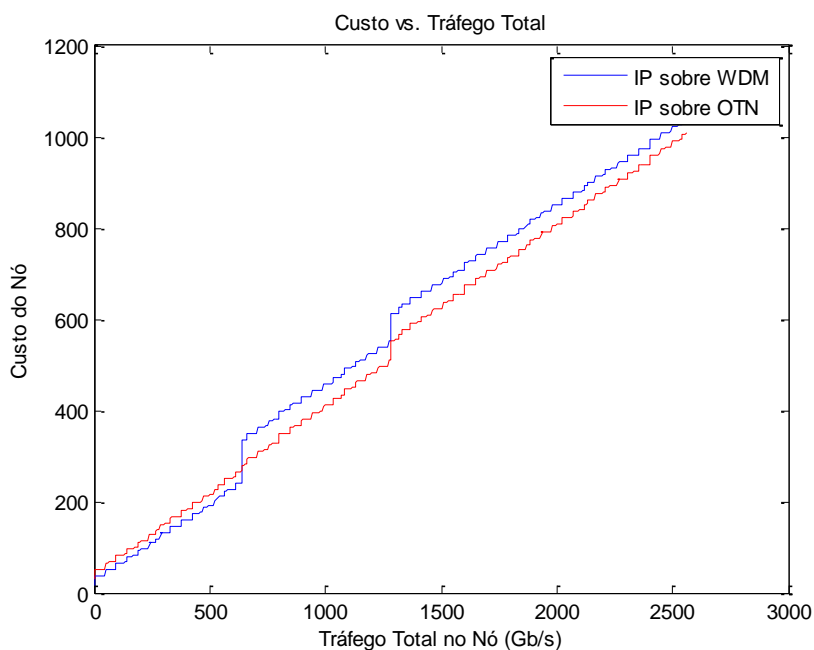


Figura 4.13 – Custo do nó em função do tráfego total, para $\beta = 0.85$

Pela observação do gráfico verifica-se que num nó cuja percentagem de tráfego de passagem é 85 %, a hierarquia IP sobre OTN tornar-se-á mais rentável a partir do momento em que o tráfego total no nó atinja 640 Gb/s (por não haver necessidade de proceder à substituição do router nesta arquitectura). Casos semelhantes serão apresentados e analisados adiante.

Novamente, e como forma de ser mais perceptível o comportamento do gráfico, foi ampliada uma secção, obtendo-se a imagem apresentada na Figura 4.14.

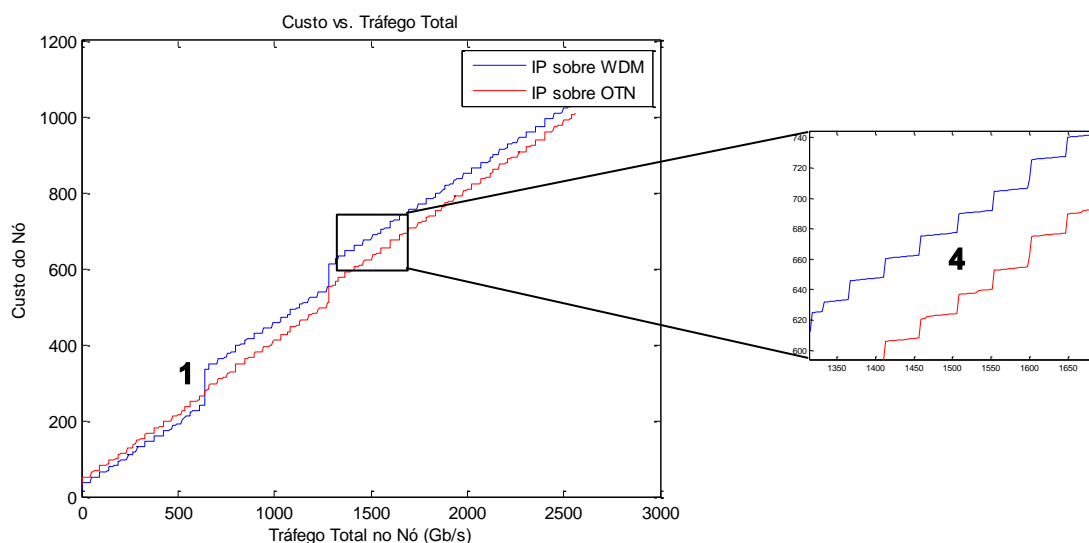


Figura 4.14 – Vista aproximada de parte da Figura 4.13

É possível verificar que os “saltos” de maior amplitude (tipo 1) continuam presentes e traduzem as variações no custo em função dos equipamentos base requeridos (router e EXC). No entanto, uma vez que, tanto o tráfego local como o tráfego de passagem vão aumentar linearmente, os “saltos” mais pequenos (representados pelo número 4 na imagem) vão acontecer gradualmente, pois o número de portas de cada tipo aumenta também gradualmente. Este aumento ocorre em valores de tráfego (de passagem ou local, dependendo do tipo da porta) múltiplos da capacidade da porta. É visível também que o declive da linha que representa a arquitectura IP sobre OTN é mais acentuado do que o declive da linha que representa a arquitectura IP sobre WDM, à semelhança do que se verificou nos cenários anteriores.

Para se ter uma melhor percepção do modo como evolui o custo do nó em função do tráfego total serão seguidamente analisados diferentes casos, semelhantes ao da Figura 4.13, mas agora para cenários em que a percentagem do tráfego de passagem relativamente ao tráfego total é de 50, 70, 75, 80, 90 e 95 %.

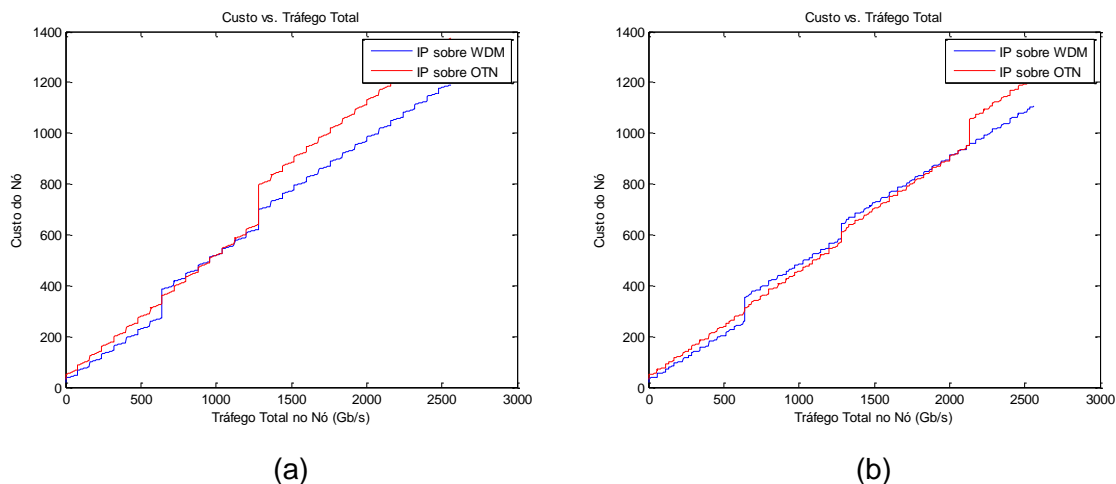
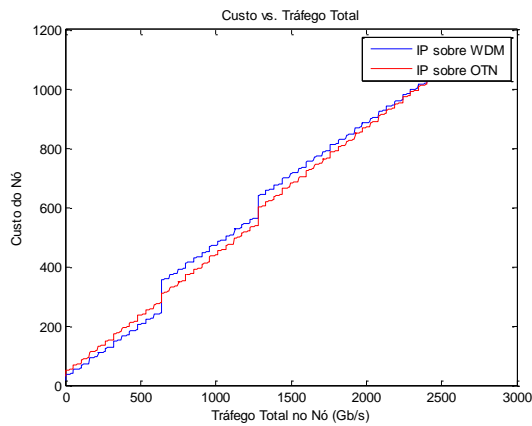


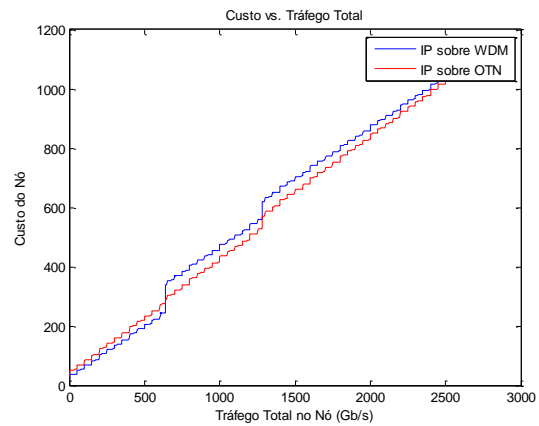
Figura 4.15 - Custo do nó em função do tráfego total, para: a) $\beta = 0.5$ b) $\beta = 0.7$

No cenário a) a quantidade de tráfego de passagem é igual à quantidade de tráfego local. Verifica-se que neste cenário a arquitectura IP sobre OTN não é aconselhável, em termos de custos, face à arquitectura IP sobre WDM, uma vez que o custo do nó apenas será menor para uma gama de quantidade de tráfego total bastante reduzida. É possível observar claramente os momentos em que, na arquitectura IP sobre WDM se substitui o router por um de maior capacidade, em 640 Gb/s e 1280 Gb/s. No caso da arquitectura IP sobre OTN, em 640 Gb/s o EXC será substituído por um de maior capacidade, mas o aumento no custo é tão pouco significativo que se confunde com o das portas. Quando o tráfego total processado no nó atinge os 1280 Gb/s verifica-se um aumento bastante acentuado no custo do nó, para esta arquitectura, uma vez que será um ponto em que será substituído o router e o EXC simultaneamente, levando a um “salto” considerável, conforme se observa. Esta situação torna o caso da arquitectura IP sobre OTN bastante mais desvantajosa, principalmente a partir deste ponto.

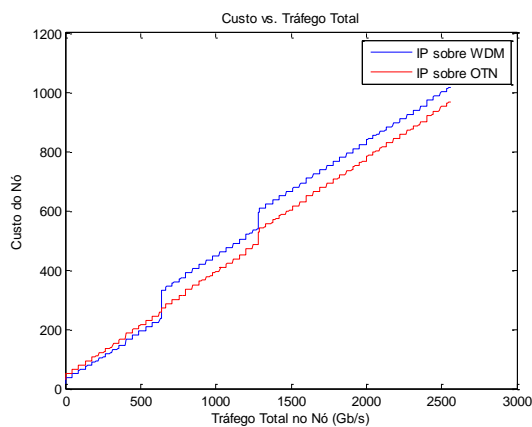
No cenário b), quando o tráfego de passagem corresponde a 70 % do tráfego total processado no nó, não existem grandes diferenças no custo do nó entre as duas arquitecturas. Excepção feita a partir do momento em que o router da arquitectura IP sobre OTN tem de ser substituído (tráfego total a cerca de 2130 Gb/s), tornando-se esta arquitectura bastante mais dispendiosa.



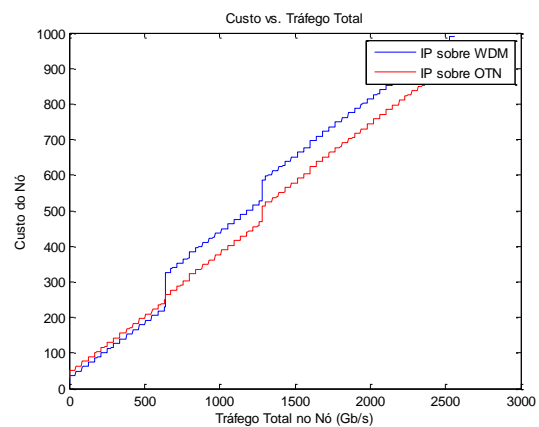
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.16 - Custo do nó em função do tráfego total, para: c) $\beta = 0.75$ d) $\beta = 0.8$
e) $\beta = 0.9$ f) $\beta = 0.95$

Os quatro cenários apresentados na Figura 4.16 são bastante semelhantes entre si. A diferença reside no facto de que, à medida que β aumenta, a distância entre a linha que representa o custo do nó no caso da arquitectura IP sobre WDM e a linha que representa o custo do nó no caso da arquitectura IP sobre OTN aumenta também. A arquitectura IP sobre OTN é a que apresenta um custo mais baixo em todos os casos. A excepção a este resultado verifica-se quando o tráfego total é inferior a 640 Gb/s, caso em que a arquitectura IP sobre WDM é sempre mais económica, tal como já tinha sido verificado em todos os outros cenários.

Aqui, a vantagem da arquitectura IP sobre OTN deve-se ao facto de que, para qualquer que seja o tráfego total processado no nó, o router utilizado será sempre o mais económico, uma vez que o tráfego de passagem nunca ultrapassa os 640 Gb/s, a sua capacidade máxima.

A substituição do router no caso da arquitectura IP sobre WDM é acompanhada pela substituição do EXC no caso da arquitectura IP sobre OTN. Todavia, o custo do EXC é substancialmente menor que o custo do router, para todas as capacidades. Assim, nem o facto de o declive da linha do custo no caso da arquitectura IP sobre OTN ser mais elevado lhe retira a vantagem sobre a arquitectura IP sobre WDM, em termos de custos.

4.6 *Discussão de Resultados*

Depois de terem sido estudadas as arquitecturas dos nós das redes de transporte, de terem sido construídos modelos de custo, foram analisados vários cenários. Da análise destes cenários foi possível verificar que o uso da arquitectura IP sobre OTN possui vantagens e desvantagens em comparação com o uso da arquitectura IP sobre WDM, em termos de custos.

Observou-se que a diferença nos custos do nó entre as duas arquitecturas vai depender da relação entre o custo dos equipamentos base e o custo das portas necessárias. Se, o custo dos equipamentos base é, na maior parte dos casos maior na arquitectura IP sobre WDM, já o custo das portas é mais elevado no caso da arquitectura IP sobre OTN. Todos os factores que podem fazer variar estes aspectos têm de ser cuidadosamente tidos em conta.

Assim, após o estudo de vários cenários foi possível observar os benefícios que se podem retirar da arquitectura IP sobre OTN, quando o tráfego de passagem no nó é bastante superior ao tráfego local. Verificou-se também, que o custo do nó proveniente das portas utilizadas aumenta mais rapidamente (em função do tráfego total processado no nó) do que no caso da arquitectura IP sobre WDM. Devido a este facto, a arquitectura IP sobre OTN será também mais vantajosa em situações nas quais a capacidade máxima do router esteja ainda longe de ser atingida.

Pelo contrário, em nós com baixa percentagem tráfego de passagem, a arquitectura IP sobre OTN torna-se menos vantajosa do que a arquitectura IP sobre WDM. Isto verifica-se também em casos cujo tráfego total no nó seja bastante baixo, nos quais o router a utilizar poderá ser o de menor custo.

Conclui-se assim que os resultados demonstram que, como forma de otimizar o CAPEX de uma rede, a arquitectura de cada nó deverá ser seleccionada tendo em conta a quantidade e a origem do tráfego (tráfego de passagem ou tráfego local).

Convém realçar o facto de este estudo apenas ter em consideração o CAPEX das redes, sendo que, para poder efectuar uma comparação mais exacta entre as duas

arquitecturas será preciso conjugar esta análise com uma análise do consumo de energia das mesmas, como forma de determinar também o seu OPEX. Perspectiva-se, que pelo facto de um EXC e um router de menor capacidade terem um consumo de energia menor que um router de grande capacidade estes resultados se acentuem ainda mais quando tendo também esses factores em consideração.

5 Conclusões Finais

A presente dissertação incidiu no estudo detalhado da tecnologia OTN como solução emergente para o problema de reduzir o custo por bit da informação a transportar. Foram desenvolvidos modelos de custo para a área de transporte usando esta mesma tecnologia, como forma de serem estudados cenários realistas.

No capítulo 1 foi realizada uma introdução ao tema, ficando clara a importância das redes de telecomunicações e descrevendo-se brevemente os serviços de transporte de informação ao longo do tempo, até à situação presente. Actualmente verifica-se um aumento exponencial do tráfego, sendo este predominantemente tráfego de dados. Aliando-se a isso, o facto de os consumidores estarem disponíveis para consumirem mais bits, pagando menos por bit. Todas essas considerações levam as operadoras a verem-se confrontadas com a necessidade imediata de reduzir o CAPEX e o OPEX das redes, como forma de reduzir o TCO (Total Cost of Ownership). Assim, têm vindo a ser desenvolvidas várias tecnologias, com o objectivo de converter as redes de transporte em redes optimizadas para as exigências actuais, destacando-se os sistemas de transmissão coerentes, a OTN, a Ethernet e a comutação de pacotes ao nível do transporte.

No capítulo 2 foram apresentadas as principais tecnologias emergentes. Desta forma foi realizada uma análise geral sobre cada uma delas, onde foram destacadas as suas principais vantagens e benefícios como forma de transportar tráfego mais eficientemente, em termos de custos. Ficou claro que, ao nível da camada física a tecnologia de sistemas ópticos coerentes aliando formatos de modulação mais avançados com técnicas de detecção coerentes pode representar uma importante contribuição. Esta tecnologia permite aumentar a capacidade do canal óptico, pois possibilita um aumento da eficiência espectral. Ainda na camada física, a tecnologia de multiplexagem por comprimento de onda (WDM) permite também optimizar a utilização da fibra óptica. Isto é conseguido graças à agregação de múltiplos sinais com diferentes comprimentos de onda num mesmo canal. O WDM possibilitou também a criação de OXC's, que possibilitam o encaminhamento de comprimentos de onda, aliviando assim o processamento eléctrico. Outra destas tecnologias emergentes, a OTN, permite um transporte transparente numa camada óptica com múltiplos comprimentos de onda, possuindo também compatibilidade com os protocolos já existentes. Aliado a isso, possui ainda uma poderosa técnica de correcção de erros. A Ethernet é uma tecnologia que se tornou bastante popular uma vez que o seu custo é bastante reduzido, levando a que actualmente a maior parte do tráfego de dados seja gerado por interfaces deste tipo.

Apesar de ter sido desenvolvida para redes locais têm sido efectuadas tentativas de alargar totalmente, a Carrier Ethernet. A solução mais promissora para as redes de transporte ópticas baseadas em comutação de pacotes é o MPLS-TP. Esta tecnologia fornece funções de elevada confiança e de fácil gestão, com capacidades orientadas para a ligação, necessárias para as redes de transporte de pacotes.

No capítulo 3 foi estudada em detalhe a tecnologia OTN, bem como as tecnologias que a antecederam. Assim, foram estudadas várias tecnologias, o PDH, o SDH, o NG-SDH e finalmente a OTN. Foi referido e analisado o modo de funcionamento de cada uma delas bem como as suas características mais importantes. Percebeu-se assim a sua evolução e as razões que levaram a que ocorresse. A OTN, criada com o objectivo de combinar os benefícios da tecnologia SDH com as capacidades oferecidas pelo WDM trouxe várias vantagens para as redes de transporte. Sendo um protocolo transparente e com grande flexibilidade, tendo compatibilidade com os protocolos existentes, possuindo fortes funções OAM e um poderoso código corrector de erros, é uma tecnologia que traz grandes possibilidades.

No capítulo 4 foi analisado qual o papel que a OTN tem a desempenhar em cenários realistas. Com base em todos os conhecimentos teóricos abordados, foi possível desenvolver um modelo de custos adequado ao estudo de cenários realistas, como forma de avaliar o impacto da OTN nestes mesmos. Desta forma, através do estudo da arquitectura dos nós foi possível perceber o seu funcionamento e a forma como a análise poderia ser conduzida. Comparando a arquitectura IP sobre OTN com a arquitectura IP sobre WDM, ficaram visíveis os cenários em que cada uma delas poderá ser mais ou menos vantajosa. Os resultados dos trabalhos de simulação e de análise dos resultados obtidos demonstraram que, tendo em consideração a rede em estudo, ficaram claros os benefícios que se podem alcançar em termos de custos recorrendo a esta tecnologia. Estes são mais notórios em redes com grande percentagem de tráfego de passagem relativamente ao tráfego total processado pelo nó.

Esta dissertação constitui um contributo para o estudo da arquitectura IP sobre OTN e a sua comparação com a arquitectura IP sobre WDM. Permitiu verificar os cenários em que cada uma delas pode trazer vantagens e a necessidade da arquitectura de cada nó ser seleccionada tendo em conta o tráfego. Assim será possível otimizar o custo de uma rede.

6 Referências

- [1] J. Pires, "Sistemas e Redes de Telecomunicações," Instituto Superior Técnico, 2006.
- [2] J. Kauppila, *Ten stylised facts about household spending on transport*, Statistical Paper, Joint Transport Research Centre of the OECD and the International Transport Forum, 2011.
- [3] J. Pires, *Redes de Telecomunicações*, Apontamentos, ISUTC/IST, 2009.
- [4] A. Carvalho, "Dimensionamento e análise de desempenho de redes NG-SDH para suporte de tráfego IP," Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, 2007.
- [5] A. Pinto, "Packet Transport Networks - Optical Networks," Apontamentos, Universidade de Aveiro, 2011.
- [6] T. Pisco, "Distribuição eficiente de IPTV," Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2011.
- [7] M. Dècina, *Future Networks*, Bruxelles: Politecnico di Milano/CEFRIEL, 2002.
- [8] Cisco Systems, *Introduction to DWDM Technology*, 2001.
- [9] B. E. A. Saleh e M. C. Teich, *FIBER-OPTIC COMMUNICATIONS*, John Wiley & Sons, Inc., 1991.
- [10] N. J. d. M. Pinto, *Implementação de Algoritmos em FPGA para Estimação de Sinal em Sistemas Ópticos Coerentes*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.
- [11] F. P. Guiomar, C. Rodrigues, A. N. Pinto, J. Serra e P. Mão-Cheia, "Transmissão e recepção coerente a 40Gb/s e 100Gb/s," *Revista Saber e Fazer Telecomunicações*, vol. 9, pp. 128-133, 2011.
- [12] E. Ip, A. Lau, D. Barros e J. M. Kahn, "Coherent detection in optical fiber systems," *Opt. Express*, vol. 16, n.º 2, pp. 753-791, 2008.
- [13] S. Gringeri, E. B. Basch e T. J. Xia, "Technical considerations for supporting data rates beyond 100 Gb/s," *IEEE Commun*, vol. 50, n.º 2, 2012.
- [14] F. P. Guiomar, *Pós-compensação digital do canal ótico*, Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2009.
- [15] K. Kikuchi, "Coherent optical transmission systems," em *OptoElectronics and Communications Conference (OECC 2010)*, 2010, pp. 120-121.
- [16] J. Santos, *Implementação em hardware de receptor para redes ópticas de transporte*, Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2009.

- [17] G. C. Sebastião, *Comparação de desempenho de redes SDH convencionais e de redes NG-SDH/WDM para o transporte de tráfego IP*, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, 2008.
- [18] M. Carroll, J. Roese e T. Ohara, "The Operator's View of OTN Evolution," *IEEE Communications Magazine*, pp. 46-52, September 2010.
- [19] M. Orthodoxou, *PMC-Sierra Webinar: Enabling OTN Convergence - Solutions of the New Packet Optical Transport Network*, White Paper, PMC-Sierra, 2011.
- [20] J. Davim, *Ethernet para a Rede de Transporte*, Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2010.
- [21] Alcatel-Lucent, *MPLS-TP The Key Enabler of Converged Packet Transport Networks*, Technology White Paper, 2010.
- [22] R. S. Dieter Beller, "MPLS-TP - The New Technology for Packet Transport Networks," em 2. *DFN-Forum Kommunikationstechnologien*, München, 2009, pp. 81-91.
- [23] Y. J. Stein, *SONET/SDH*, Presentation, RAD Data Communications, 2001.
- [24] S. Gorshe, *A tutorial on SONET/SDH*, Technology White Paper, PMC-Sierra, 2005.
- [25] B. d. O. Monteiro, *Estudo e Análise Experimental do Mapeamento de Tráfego Ethernet sobre SDH*, Dissertação de Mestrado, Inatel - Instituto Nacional de Telecomunicações, 2006.
- [26] G. T. Laskoski, *Padrão SONET/SDH - Sistemas Ópticos*, Curitiba: Trabalho referente à disciplina de Sistemas Ópticos do Curso Superior de Tecnologia em Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento Acadêmico de Eletrônica, 2006.
- [27] ITU-T, *G.707 - Network node interface for the synchronous digital hierarchy (SDH)*, 2007.
- [28] J. Caballero, *Migration to Next Generation SDH*, Presentation, Trend Communications, 2005.
- [29] ITU-T, *G.7042/Y.1305 - Link capacity adjustment scheme (LCAS) for virtual concatenated signals*, 2006.
- [30] J. R. d. S. Júnior e L. D. d. Oliveira, *Generic Framing Procedure*, Documento de Tópicos Especiais em Redes, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2007.
- [31] S. Gorshe, *Generic Framing Procedure (GFP)*, Technology White Paper, PMC-Sierra, 2005.
- [32] ITU-T, *G.7041/Y.1303 - Generic framing procedure*, 2011.
- [33] M. T. d. A. Torres, *Uma Proposta de Framework para Simulação de Redes OTN*, Dissertação de Mestrado, Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo, 2010.

- [34] ITU-T, *G.709/Y.1331 - Interfaces for the optical transport network*, 2012.
- [35] ITU-T, "Definitions and Descriptions (OTNT, OTN, MON)," ITU, 21 10 2004. [Online]. Available: <http://www.itu.int/ITU-T/2001-2004/com15/otn/definitions.html>. [Acedido em 22 Maio 2012].
- [36] S. Gorshe, *A Tutorial on ITU-T G.709 Optical Transport Networks (OTN)*, White Paper, PMC-Sierra, 2011.
- [37] ITU-T, *G.872 - Architecture of optical transport networks*, 2001.
- [38] C. L. Amar, *Estudo experimental do tempo de recuperação de falhas em comutadores de caminhos óticos*, Dissertação de Mestrado, Santo André, SP: Universidade Federal do ABC - UFABC, 2012.
- [39] A. H. L. d. Silva e T. A. Rodolfo, *Implementação de um Arquitectura Reed-Solomon para uso em Redes OTN 10.7 Gbps*, Trabalho de Conclusão, Porto Alegre: Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2007.
- [40] H. B. Graciosa, *A Transformação das Redes Ópticas no Acesso e no Anel Backbone Metropolitano: Alternativas Tecnológicas, Econômicas e Novos Serviços*, Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2012.
- [41] P. H. Knudsen-Baas, *OTN switching*, Dissertação de Mestrado, Norwegian University of Science and Technology, 2011.
- [42] S. Sengupta, V. Kumar e D. Saha, "Switched Optical Backbone for Cost-Effective Scalable Core IP Networks," *IEEE Communications Magazine*, pp. 60-70, June 2003.
- [43] I. Tsirilakis, C. Mas e I. Tomkos, "Cost Comparison of IP/WDM vs. IP/OTN for European Backbone Networks," *ICTON, IEEE*, vol. We.B1.6, pp. 46-49, 2005.
- [44] R. Huelsermann, M. Gunkel, C. Meusburger e D. A. Schupke, "Cost modeling and evaluation of capital expenditures in optical multilayer networks," *JOURNAL OF OPTICAL NETWORKING*, vol. 7, n.º 9, pp. 814-833, 2008.