



**Miguel Duarte
Henriques**

**Otimização do Processo de Comutação em Redes
de Transporte**



Universidade de Aveiro Departamento de Eletrónica, Telecomunicações
e Informática

2013

**Miguel Duarte
Henriques**

Otimização do Processo de Comutação em Redes de Transporte

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

O júri

Presidente

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

Vogais

Prof. Dra. Maria do Carmo Raposo de Medeiros
Professora Associada, Universidade de Coimbra

Prof. Dr. Professor Doutor Armando Humberto Moreira Nolasco Pinto,
Professor Associado, Universidade de Aveiro (Orientador)

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Armando Nolasco Pinto, pelo seu apoio e disponibilidade, assim como por todos as sugestões e esclarecimentos.

Agradecimentos ao Rui Morais pela sua ajuda e sugestões na realização desta dissertação.

Agradeço também à Universidade de Aveiro pelas condições que me proporcionou ao longo do meu percurso académico, tal como a todos os professores pelos conhecimentos transmitidos.

Aos meus colegas e amigos, pelo apoio e união tanto nos momentos de trabalho como nos de diversão. O meu obrigado por tornarem todo este percurso mais agradável.

À minha família, que fez de mim o que sou hoje, que me apoiou incansavelmente em todos os períodos da minha vida, obrigado.

Palavras-chave

Rede de transporte de informação, Comutação de pacotes (MPLS-TP), Comutação de circuitos (OTN), Comutação de canais óticos (ROADM).

Resumo

No presente trabalho analisam-se os custos de implementação (CAPEX) de um nó inserido numa rede de transporte. São estudadas tecnologias de comutação de pacotes (MPLS-TP), tecnologias de comutação de circuitos (OTN) e tecnologias de comutação de canais óticos (ROADM). Com estas tecnologias são analisadas três arquiteturas para um nó, e, alterando o tráfego, comparam-se os benefícios e as limitações de cada arquitetura

keywords

Transport Networks, Packet Switching (MPLS-TP), Circuit Switching (OTN) and Optical Switching (ROADM).

Abstract

In the present work, the capital expenditure (CAPEX) related with the implementation of a node in a transport network is analyzed. Technologies with different kind of switching are studied, such as MPLS-TP (packet switching), OTN (circuit switching) and ROADM (optical switching). Three different architectures combining these technologies are considered and, by changing the traffic, a comparison is performed in order to identify the limitations and advantages of each one.

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. Motivação	1
1.2. Evolução das redes de Transporte.....	3
1.3. Objetivos.....	5
2. Tecnologias emergentes.....	7
2.1. Transmissão coerente e WDM	7
2.2. ROADM	8
2.3. SDH	11
2.3.1. Virtual Concatenation (VCAT).....	15
2.3.2. Generic Frame Procedure (GFP).....	16
2.3.3. Link Capacity Adjustment Scheme (LCAS)	18
2.3.4. New Generation SDH.....	19
2.4. Optical Transport Network (OTN)	20
2.5. Ethernet.....	25
3. Multiprotocol Label Switching - Transport Profile (MPLS-TP).....	27
3.1. IP/MPLS	28
3.2. MPLS-TP.....	34
3.2.1. Requisitos para uma rede de transporte.....	34
3.2.2. Alterações efetuadas.....	36
4. Análise Tecno-económica de um nó.....	43
4.1. Estrutura de um nó.....	43
4.2. Arquitetura dos nós.....	45
4.2.1. Arquitetura PXC.....	46
4.2.2. Arquitetura PXC+EXC.....	51
4.2.3. Arquitetura PXC+EXC+OXC	57
5. Discussão de Resultados.....	63
5.1. Impacto do Tráfego Total	63
5.2. Impacto do Tráfego Local	67
5.3. Impacto do Grau do Nó	68
6. Conclusão	71

7. Referências73

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - PREVISÃO DO AUMENTO DO TRAFEGO IP.....	2
FIGURA 2.1.1 - WAVE DIVISION MULTIPLEXING.....	8
FIGURA 2.2.1 - WSS 9X1.....	9
FIGURA 2.2.2 - ROADM FIXO (BÁSICO).....	10
FIGURA 2.2.3 - ROADM FLEXIVEL (CDC).....	11
FIGURA 2.3.1 - CONVERGÊNCIA PARA OTN.....	12
FIGURA 2.3.2 - TRAMA STM-1.....	13
FIGURA 2.3.3 - MULTIPLEXAGEM BYTE A BYTE.....	13
FIGURA 2.3.4 - MAPEAMENTO DE SINAIS INFERIORES.....	14
FIGURA 2.3.5 - ESTRUTURA DA TRAMA GFP.....	16
FIGURA 2.3.6 - ENCAPSULAMENTO GFP-F.....	16
FIGURA 2.3.7 - ENCAPSULAMENTO GFP-T.....	17
FIGURA 2.3.8 - PACOTE DE CONTROLO VC/LCAS.....	18
FIGURA 2.3.9 - TROCA DE INFORMAÇÃO DO PACOTE DE CONTROLO.....	19
FIGURA 2.3.10 - VISÃO GERAL DA NG-SDH.....	19
FIGURA 2.3.11 - NEW GENERATION SDH.....	20
FIGURA 2.4.1 - CONVERGÊNCIA PARA TRANSPORTE SOBRE OTN.....	21
FIGURA 2.4.2 - PASSOS PARA O ENCAPSULAMENTO OTN.....	22
FIGURA 2.4.3 - MULTIPLEXAGEM DE CONTENTORES.....	23
FIGURA 2.4.4 - ESTRUTURA DE UMA TRAMA OTN.....	24
FIGURA 2.5.1 - ATRIBUTOS DA CARRIER ETHERENT.....	26
FIGURA 3.1.1 - COMPONENTES DE CONTROLO E TRANSPORTE DO MPLS.....	29
FIGURA 3.1.2 - ESTRUTURA DO CABEÇALHO MPLS.....	30
FIGURA 3.1.3 - ENCAMINHAMENTO DE PACOTES MPLS.....	31
FIGURA 3.2.1 - CONVERGÊNCIA DO IETF E ITU-T PARA O MPLS-TP.....	34
FIGURA 3.2.2.1 - ALGUMAS DIVERGÊNCIAS DO IP/MPLS COM O MPLS-TP.....	36
FIGURA 3.2.2.2 - CONTEÚDO DE UM PACOTE G-ACH.....	38
FIGURA 3.2.2.3 - PTROTEÇÃO 1+1 LINEAR.....	40
FIGURA 3.2.2.4 - LÓGICA DE FUNCIONAMENTO DA GERAÇÃO DE MENSAGENS PSC.....	41
FIGURA 3.2.2.5 - PROTEÇÃO EM ANEL 1:1.....	41
FIGURA 4.1.1 - ESTRUTURA DE UM NÓ.....	44
FIGURA 4.1.2 - GROOMING.....	44
FIGURA 4.2.1 - EXEMPLOS DE PROCESSOS DE COMUTAÇÃO: PXC, EXC E OXC.....	45
FIGURA 4.2.1.1 - ARQUITECTURA 1, PXC.....	46
FIGURA 4.2.2.1 - ARQUITECTURA 2, PXC+EXC.....	52
FIGURA 4.2.3.1 - ARQUITETURA 3, PXC+ECX+OXC.....	58

FIGURA 5.1.1 - P.LOCAL=5%, P.LOCAL 1G=20%, GRAU=2.....	64
FIGURA 5.1.2 - P.LOCAL=30%, P.LOCAL 1G=60%, GRAU=2.....	65
FIGURA 5.1.3 - P.LOCAL=60%, P.LOCAL 1 G=60%, GRAU=2.....	66
FIGURA 5.2.1 - TRÁFEGO TOTAL=1000 G, P.LOCAL 1 G=20%, GRAU=2.....	67
FIGURA 5.2.2 - TRÁFEGO TOTAL=5000 G, P.LOCAL 1 G=20%, GRAU=2.....	68
FIGURA 5.3.1 - TRÁFEGO TOTAL=1000G, P.LOCAL=5%, P.LOCAL 1 G=20%.....	69
FIGURA 5.3.2 - TRÁFEGO TOTAL=4000 G, P.LOCAL=5%, P.LOCAL 1 G=20%.....	69
FIGURA 5.3.3 - TRÁFEGO TOTAL=4000 G, P.LOCAL=5%, P.LOCAL 1 G=20%.....	70

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.3.1 - HIERARQUIA SDH/SONET.....	14
TABELA 2.3.2 - EFICIÊNCIA COM/SEM VCAT.....	15
TABELA 2.3.3 - COMPARAÇÃO ENTRE GFP-F E GFP-T.....	17
TABELA 2.4.1 - DÉBITOS OTN.....	23
TABELA 4.2.1.1 - CUSTOS DAS SHELVES MPLS-TP.....	46
TABELA 4.2.1.2 - CUSTO DAS CARTAS MPLS-TP.....	47
TABELA 4.2.1.3 - CUSTO DOS TRANSCEIVERS.....	47
TABELA 4.2.2.1- SHELVES OTN.....	52
TABELA 4.2.2.2 - CARTAS OTN.....	53
TABELA 4.2.3.1 - COMPONENTES DO ROADM.....	59

LISTA DE SÍMBOLOS

T_{total}	Quantidade de tráfego em Gb/s
P_{local}	Porcentagem do tráfego total com origem ou destino no acesso local
$T_{local10G}$	Quantidade de tráfego local transmitido a 10 Gb/s
$T_{local1G}$	Quantidade de tráfego local transmitido a 1 Gb/s
T_{dir}	Quantidade de tráfego por grau (direção) do nó
$N_{MPLS_{20x1}}$	Número de cartas MPLS-TP 20x1 G
$N_{MPLS_{4x10}}$	Número de cartas MPLS-TP 4x10 G
$N_{MPLS_{2x10}}$	Número de cartas MPLS-TP 2x10 G
$N^i_{MPLS_{1x100}}$	Número de cartas MPLS-TP 1x100 G por grau do nó
$N^i_{MPLS_{1x40}}$	Número de cartas MPLS-TP 1x40 G por grau do nó
$N^i_{MPLS_{2x40}}$	Número de cartas MPLS-TP 2x40 G por grau do nó
$N_{MPLS_{1x100}}$	Número de cartas MPLS-TP 1x100 G
$N_{MPLS_{1x40}}$	Número de cartas MPLS-TP 1x40 G
$N_{MPLS_{2x40}}$	Número de cartas MPLS-TP 2x40 G
$N_{LC_{MPLS}}$	Número total de cartas MPLS-TP
N_{Tx1G}	Número de <i>transceivers</i> 1 Gb/s
N_{Tx10G}	Número de <i>transceivers</i> 10 Gb/s
N_{Tx40G}	Número de <i>transceivers</i> 40 Gb/s
N_{Tx100G}	Número de <i>transceivers</i> 100 Gb/s
$C_{LC_{MPLS}}$	Custo total das cartas MPLS-TP
C_{Tx}	Custo total dos <i>transceivers</i>
$C_{MPLS_{1x100}}$	Custo da carta MPLS-TP 1x100 G
$C_{MPLS_{2x40}}$	Custo da carta MPLS-TP 2x40 G
$C_{MPLS_{1x40}}$	Custo da carta MPLS-TP 1x40 G
$C_{MPLS_{4x10}}$	Custo da carta MPLS-TP 4x10 G
$C_{MPLS_{2x10}}$	Custo da carta MPLS-TP 2x10 G
$C_{MPLS_{20x1}}$	Custo da carta MPLS-TP 20x1 G
C_{Tx1G}	Custo do <i>transceiver</i> 1 Gb/s
C_{Tx10G}	Custo do <i>transceiver</i> 10 Gb/s
C_{Tx40G}	Custo do <i>transceiver</i> 40 Gb/s
C_{Tx100G}	Custo do <i>transceiver</i> 100 Gb/s
$C_{shelf_{MPLS}}$	Custo da <i>shelf</i> MPLS-TP utilizada
C_{PXC}	Custo total do equipamento MPLS-TP (na arquitetura PXC, refere-se ao seu custo total)
$N_{OTN_{10x10}}$	Número de cartas OTN 10x10 G

$N_{OTN_{1x100}}^i$	Número de cartas OTN 1x100 G por grau do nó
$N_{OTN_{1x100}}$	Número de cartas OTN 1x100 G
$N_{OTN_{2x40}}$	Número de cartas OTN 2x40 G
$N_{LC_{OTN}}$	Número total de cartas OTN
$C_{LC_{OTN}}$	Custo total das cartas OTN
$C_{OTN_{1x100}}$	Custo d carta OTN 1x100 G
$C_{OTN_{2x40}}$	Custo d carta OTN 2x40 G
$C_{OTN_{10x10}}$	Custo d carta OTN 10x10 G
C_{EXC}	Custo total do equipamento OTN
$C_{shelf_{OTN}}$	Custo da <i>shelf</i> OTN utilizada
$C_{PXC+EXC}$	Custo da arquitetura PXC+EXC
C_{OXC}	Custo do ROADM (equipamento de comutação ótica)
WSS_{1x20}	Custo de um <i>Wave Selective Switch</i> 1x20
Amp_{boost}	Custo de um amplificador do ROADM
Amp_{pre}	Custo de um amplificador do ROADM
WSS_{9x9}	Custo de um <i>Wave Selective Switch</i> 9x9
$C_{PXC+EXC+OXC}$	Custo da arquitetura PXC+EXC+OXC

LISTA DE SIGLAS E ACRÓNIMOS

Ach	Associated Channel Header
ADM	Add/Drop Multiplexer
ATM	Asynchronous Transfer Mode
AWG	Arrayed Waveguide Grating
BA	Behaviour Aggregate
BFD	Bidirectional Forwarding Detection
BGP	Border Gateway Protocol
CAPEX	Capital Expenditure
CC	Continuity Check
CCC	Circuit Cross Connect
CD	Colorless and Directionless
CDC	Colorless, Directionless and Contentionless
CLIP	Classical IP over ATM
CRC	Cyclic Redundancy Check
CV	Connectivity Verification
DiffServ-TE	Differentiated Services Traffic Engineering
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
ECMP	Equal Cost Multi-Path
EXC	Electrical Cross Connect
FCS	Frame Check Sequence
FEC	Forward Error Correction
FEC	Forwarding Equivalence Class
G-Ach	Generic Associated Channel
GAL	G-ACh Label
GFP	Generic Framing Procedure
GMPLS	Generalized Multi-Protocol Label Switching
Grooming	Agregação
HDLC	High-Level Data Link Control
IETF	Internet Engineering Task Force
IGP	Interior Gateway Protocol
IP	Internet Protocol
IPG	Inter Packet Gaps
ISP	Internet Service Provider
ISDN	Integrated Services Digital Network
ITU-T	International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization
LAN	Local Area Network

LAPS	Link Access Protocol
LCAS	Link Capacity Adjustment
LER	Label Edge Router
L.R.	Long Reach
LSP	Label Switched Path
LSR	Label Switching Router
MPLS-TP	Multiprotocol Label Switching
NG-SDH	New Generation - Synchronous Optical Network
NMS	Network Management System
OAM&P	Operations, Administration, Management and Provisioning
OCh	Optical Channel
ODU	Optical Data Unit
ODUflex	Optical Data Unit Flexible
OMU	Optical Multiplexed Unit
ONU	Optical Network Unit
OPEX	Operational Expenditure
OPU	Optical Payload Unit
OSC	Optical Supervisory Channel
OTM	Optical Transport Module
OTN	Optical Transport Network
OTU	Optical Transport Unit
OXC	Optical Cross Connect
PDH	Plesiochronous Digital Hierarchy
PHB	Per Hop Behaviour
PHP	Penultimate Hop Pop
POTS	Plain Old Telephone Service
PSC	Protection Coordination Protocol
PXC	Packet Cross Connect
Rack	Equipamento com fonte de energia e refrigeração onde se implementam as <i>shelves</i>
RDI	Remote Defect Indication
ROADM	Reconfigurable Optic Add/Drop Multiplexer
RSVP-TE	Resource Reservation Protocol - Traffic Engineering
SAN	Storage Area Network
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SNR	Signal-to-Noise Ratio
Shelf	Equipamento onde se implementam cartas
Slot	Espaço na <i>shelf</i> para implementação de carta
SONET	Synchronous Optical Network

S.R.	Short Reach
STM	Synchronous Transport Module
TDM	Time Division Multiplexing
ToS	Type of Service
TTL	Time To Live
VC	Virtual Container
VCAT	Virtual Concatenation
VCI	Virtual Circuit Identifier
VPI	Virtual Path Identifier
VPN	Virtual Private Network
WAN	Wide Area Network
WDM	Wavelength Division Multiplexing
WSS	Wavelength Selective Switch
WTR	Wait To Restore

1. INTRODUÇÃO

Este primeiro capítulo trata do enquadramento desta dissertação no tema das telecomunicações, mais especificamente nas redes de transporte de informação. Está organizado em três secções distintas. Na secção 1.1 é dado a conhecer um conjunto de fatores de motivação para este estudo, referindo o aumento exponencial do tráfego de dados nas redes e a necessidade da redução do custo por bit. Na secção 1.2 apresenta-se a evolução das redes de transporte ao longo das últimas décadas, que convergem para uma utilização cada vez maior da comutação de pacotes. Segue-se a secção 1.3 referente aos objetivos deste trabalho que corresponde ao estudo detalhado da tecnologia MPLS-TP e o impacto da sua implementação nas redes de transporte.

No segundo capítulo desta dissertação são estudadas várias tecnologias utilizadas nas redes de transporte. O terceiro capítulo consiste no estudo detalhado da tecnologia MPLS-TP. O quarto capítulo consiste na apresentação do trabalho prático em que se baseia esta dissertação. É estudado o custo de implementação de um nó, utilizando três arquiteturas diferentes. Cada arquitetura é composta por um ou pelo conjunto de equipamento de três tecnologias: MPLS-TP, OTN e ROADM. É explicado o algoritmo realizado para o cálculo do custo no nó em função do tráfego e grau do mesmo. Os resultados obtidos e a sua discussão apresentam-se no quinto capítulo. Conclui-se este trabalho no sexto capítulo com a explicação do comportamento das várias arquiteturas, tal como da importância das tecnologias implementadas.

1.1. MOTIVAÇÃO

Nas últimas décadas tem-se assistido a um aumento dramático na capacidade das redes óticas comerciais, o que levou a uma revolução nos serviços de rede. Este crescimento das redes foi possível devido ao aumento da capacidade dos sistemas de transmissão ótica e dos sistemas de comutação e mais recentemente, da implementação de elementos óticos na rede que reconfiguram e redirecionam os diferentes comprimentos de onda [1].

A necessidade e a procura de serviços melhores tem-se notado cada vez mais, e o aparecimento de dispositivos móveis aumentou em grande escala o acesso às redes de telecomunicações. Um exemplo desta adesão massiva às redes, é um dos *sites* mais visitados no mundo da Internet, o Youtube. Informação estatística datada em 2011 mostra que mais de quatro mil milhões de horas de vídeo eram descarregadas por mês, das quais 25% a partir de um dispositivo móvel [2]. Na Figura 1 apresenta-se uma previsão do aumento global da quantidade de tráfego IP transportada. Nota-se uma taxa de crescimento anual de 31%.



FIGURA 1.1 - PREVISÃO DO AUMENTO DO TRAFEGO IP, RETIRADO DE [27]

Segundo estas previsões, este consumo irá continuar a aumentar e para responder às necessidades dos clientes, tem havido um esforço para reduzir o custo por bit transmitido, isto é, aumentar a capacidade das redes sem aumentar proporcionalmente os seus custos totais. Para alcançar este objetivo há uma série de características necessárias às redes: uma grande flexibilidade, facilitando a expansão da rede; a simplificação dos processos OAM; e um aumento da autonomia de forma a reduzir os custos de operação [3].

A tradicional comutação de circuitos limita algumas destas características, principalmente a flexibilidade da rede, o que torna o aumento da capacidade da rede mais lento. Por estas razões, a comutação de circuitos tem perdido espaço para a comutação de pacotes, que tem vindo a demonstrar o seu potencial. Uma particularidade das redes de comutação de circuitos é o facto de funcionarem sincronizadamente, tendo os seus nós a capacidade de transmitir e receber sinais do relógio e sincronizar as operações do *hardware*. Como consequência, os custos dos nós são altos. Já nas redes de comutação de pacotes, esta sincronização não é necessária, pois os nós processam um pacote de cada vez que contém informação de endereço destino [4]. Como resultado, surgem redes mais favoráveis em termos de custo de implementação e interfaces de rede mais rápidas. Outro aspeto que chama a atenção para as redes de comutação de pacotes encontra-se no sistema de telefonia. Por enquanto, esta rede é maioritariamente dominada pela comutação de circuitos, mas a utilização do protocolo IP nesta rede torna possível a implementação de comutação de pacotes [4]. Nestas circunstâncias, sistemas de transporte de pacotes que fazem proveito dos dois processos de comutação tornaram-se um foco de atenção na área das telecomunicações.

Multiprotocol Label Switching (MPLS) é uma tecnologia baseada na comutação de pacotes que cumpre os requisitos das redes de nova geração [5]. Muitos prestadores de serviços estão a implementar esta tecnologia nas suas redes permitindo um número de serviços e aplicações como, por

exemplo, Virtual Private Networks (VPN), Border Gateway Protocol (BGP), Traffic Engineering. O potencial desta tecnologia foi assumido por instituições como International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector (ITU-T) e Internet Engineering Task Force (IETF) que uniram esforços para aplicar esta tecnologia às redes de transporte surgindo, através de uma série de mudanças à tecnologia original, o Multiprotocol Label Switching - Transport Profile (MPLS-TP) [6]. De acordo com RFC 5218 [7], MPLS pode ser considerado um sucesso pois é uma tecnologia implementada a nível global e cumpriu os seus objetivos originais excedendo-se ao ponto de ser implementada em redes onde não era previsto quando foi criado, como as redes de transporte.

A simplicidade e a flexibilidade que caracterizam o MPLS são explicadas pelo seu funcionamento baseado na comutação de uma etiqueta (*label*), como indica o seu nome. Este processo traz algumas vantagens em relação ao tradicional encaminhamento baseado em endereços IP [6] pelo que torna importante a realização de um estudo sobre a implementação desta tecnologia, apresentado nos capítulos seguintes.

1.2. EVOLUÇÃO DAS REDES DE TRANSPORTE

Desde a introdução de ondas de luz nos sistemas de transmissão, o crescimento da capacidade das redes de telecomunicações não tem abrandado. Começando pelos serviços de voz e fax a 64 Kb/s até à Ethernet e outros serviços a muitos Gb/s, os sistemas de transmissão sofreram muitas mudanças, como os comprimentos de onda usados, os tipos de fibra, as fontes de luz e as arquiteturas dos elementos da rede. Para além das características físicas dos sistemas de transmissão, os serviços e protocolos utilizados foram otimizados acompanhando esta evolução da capacidade das redes.

Nas décadas de setenta e oitenta os serviços de telecomunicações eram principalmente transporte de voz e fax utilizando a tecnologia PDH com débitos entre os 1.5 e os 140 Mb/s sobre cabos de cobre ou fibra que suportavam numerosos circuitos a 64 Kb/s combinados com multiplexagem de bits. [8]

No sistema PDH a multiplexagem é assíncrona, ou seja, os relógios dos sinais tributários, embora tendo a mesma frequência nominal, operam a diferentes frequências reais. De modo a compensar estas diferenças nos relógios, são introduzidos nos sinais bits de justificação. Estes bits de justificação dificultavam o acesso aos níveis inferiores da hierarquia, e juntamente com outros fatores como a falta de normalização ao nível físico que dificultava a interligação de equipamentos de diferentes vendedores, os baixos ritmos de transmissão, a falta de gestão, monitoria e segurança da rede, apresentavam grandes limitações à extensão e aumento da capacidade das redes. [9]

Em meados da década de oitenta, com os avanços nas tecnologias de transmissão ótica e na precisão dos relógios, surgiram a SONET e SDH, que divergiam nos ritmos de transmissão dos diferentes níveis da hierarquia.

Estas tecnologias mudaram o mundo das comunicações em fibra ótica definindo com conjunto de sinais óticos, procedimentos operativos e uma hierarquia de multiplexagem. Permitiram a interligação de sistemas de diferentes operadores de rede tiveram a oportunidade de estabelecer e administrar conexões *end-to-end* sobre diferentes domínios. Também a proteção da rede foi otimizada implementando-se arquiteturas em anel que permitiam o restauro automático quase imediato da rede em caso de falha. O aumento dos ritmos de transmissão aumentaram anualmente até chegar aos atuais 40 Gb/s no último nível da hierarquia e a extração de sinais de níveis inferiores tornou-se simples, pois sendo esta uma tecnologia síncrona, não são necessários bits de justificação.

Todos estes fatores tornam a tecnologia SONET/SDH robusta e com alta disponibilidade, permitindo o acesso à internet e a serviços *broadcast* mais simples, rápido e economicamente mais viável. Apesar disso, mudanças tinham de ser feitas, pois com o crescimento do tráfego de pacotes, surgiu a necessidade de converter as redes otimizadas para transporte de circuitos para redes de transporte de pacotes. Assim, foram criados protocolos para melhorar a eficiência das redes mapeando qualquer tipo de pacote num contentor virtual, Generic Framing Procedure (GFP) e posteriormente efetuando uma desmultiplexagem, removendo cada pacote do contentor utilizando protocolos como Virtual Concatenation (VCAT) e mais tarde Link Capacity Adjustment (LCAS). [8]

Combinando estes protocolos, os provedores de serviços conseguiram, de uma maneira mais eficiente, otimizar as suas redes de transporte SONET/SDH para serviços Ethernet. Esta rede otimizada foi chamada de New Generation of SDH (NG-SDH). [10]

Originalmente, as redes SONET/SDH usavam apenas um comprimento de onda por fibra, mas com o avanço da tecnologia tornou-se mais económico a transmissão de múltiplos sinais SONET/SDH por fibra usando Wavelength Division Multiplexing (WDM). Era também necessário mais eficiência nos processos de OAM&P (Operations, Administration, Maintenance & Provisioning) nas redes WDM e um método de correção de erros mais eficiente.

Nesta altura era claro que uma rede baseada no *routing* dos sinais do cliente no domínio ótico até ao seu destino, onde é realmente necessária uma conversão ótico-elétrico, apresentava muitas vantagens. Ou seja, todas as funções de *routing* feitas na camada elétrica, como o WDM, Add/Drop Multiplexing (ADM) e o Optical Cross Connect (OXC), seriam feitas na camada ótica, criando uma rede ótica composta por elementos de rede óticos (ONUs) conectados através de fibra ótica. [8] Isto levou ao aparecimento da OTN, rede ótica de transporte, que respondia às necessidades referidas em cima. O sinal OTN tem incorporado um cabeçalho otimizado para transportar sinais sobre as redes WDM permitindo mais eficiência nas funções OAM&P. Foi integrado nesta rede um mecanismo de correção de erros que permite grande alcance entre nós da rede e elevados débitos na mesma fibra ótica. O mapeamento de pacotes em contentores é similar ao usado na SONET/SDH, mas mais eficiente, pois na rede SDH o cabeçalho ocupava 3% da carga paga, enquanto na rede OTN esta percentagem reduz-se para os 0.4% devido aos seus altos débitos. A expansão das redes tornou-se mais simples pois os sinais de clientes emergentes são transportados sobre a OTN de uma forma transparente através de um método de encapsulamento de informação independente do seu protocolo nativo, criando uma Optical

Data Unit (ODU). Mesmo que estes sinais de clientes não ocupem um comprimento de onda inteiro, é fornecido um mecanismo para multiplexar vários sinais no tempo (TDM) no mesmo comprimento de onda. [8]

Na última década registou-se uma mudança enorme na natureza do tráfego transportado nas redes devido ao crescimento da Internet e à mudança gradual dos serviços de vídeo e voz de TDM para pacotes IP. Sendo o tráfego de pacotes substancial, há mudanças necessárias na arquitetura dos nós. A comutação e multiplexagem estatística de pacotes é tradicionalmente feita por elementos da rede ligados externamente aos elementos de transporte que serviam grandes áreas, mas a evolução das tecnologias de comutação de pacotes tornou esta conexão desnecessária em muitos casos. Assim, reduziu-se o número de nós, portas físicas e parte da largura de banda utilizada levando, naturalmente à diminuição do Capex e Opex. No centro das atenções relativamente a esta evolução, estão as tecnologias Ethernet e MPLS que permitem serviços orientados à conexão incluindo *point-to-point* e *point-to-multipoint*. MPLS tem sido utilizada para transportar pacotes IP e conexões na Layer2 (ex: ATM, Ethernet, Frame Relay, PPP) e Layer1 (ex.: DS1, DS3) [12], apresentando bons resultados e um grande potencial no mundo das telecomunicações. A sua implementação nas redes de transporte foi um dos objetivos da International Telecommunication Union (ITU-T) que mais tarde uniu esforços com a Internet Engineering Task Force (IETF) para protocolar uma nova rede de transporte de pacotes baseada nesta tecnologia. Criaram a MPLS-TP (Transport Profile) com intenção desta servir de base para a nova geração de redes de transporte de pacotes. Foram efetuadas algumas mudanças em relação à tecnologia original para que os requisitos de uma rede de transporte fossem cumpridos, como funções de OAM e segurança, já existentes nas tecnologias de transporte anteriores (SONET/SDH e OTN). [13]

É nesta tecnologia, MPLS-TP, que se baseia esta dissertação e, mais à frente, é dedicado um capítulo para o estudo pormenorizado desta. Na próxima secção são apresentadas as tecnologias referidas neste tema da evolução das redes de transporte.

1.3. OBJETIVOS

Nesta dissertação pretende-se estudar as principais tecnologias associadas a redes de transporte de informação, com especial atenção ao MPLS-TP, e analisar de forma detalhada os custos associados à implementação de um nó neste tipo de redes. Consideram-se três arquiteturas diferentes combinando tecnologias de comutação de pacotes (MPLS-TP), comutação de circuitos elétricos (OTN) e comutação de circuitos óticos (ROADM). Alterando o tráfego no nó, analisam-se as vantagens e desvantagens das tecnologias em cada caso.

2. TECNOLOGIAS EMERGENTES

Neste capítulo são apresentadas algumas tecnologias relevantes nas redes de telecomunicações, mais especificamente no tema das redes de transporte. Na secção 2.1 apresentam-se as tecnologias de transmissão coerente e WDM. Na secção 2.2 é estudada a tecnologia de comutação ótica ROADM. Nas secções 2.3 e 2.4 apresentam-se as tecnologias SDH e OTN, respetivamente. Na última secção deste capítulo, 2.5, é apresentada a tecnologia Ethernet.

2.1. TRANSMISSÃO COERENTE E WDM

O objetivo mais importante dos sistemas óticos de longa distância é a transmissão com o maior débito possível sem necessidade de regeneração de sinal. Devido às restrições na largura de banda impostas pelos amplificadores óticos e mesmo pela fibra ótica, é importante maximizar a eficiência espectral, medida em bit/s/Hz, tal como SNR (*Signal-to-Noise Ratio*). Ou seja, é necessário minimizar a energia necessária por bit transmitido. Os limites da eficiência espectral têm sido estudados para vários métodos de deteção e modulação. [14]

Na atualidade, os sistemas de transmissão assentes na deteção direta suportam a grande maioria das redes óticas. Estes sistemas são caracterizados pela sua simplicidade e reduzido custo de implementação, mas também pelas suas limitações [14,15]. É um facto que a eficiência espectral máxima atingida por formatos de modulação que utilizam deteção direta encontra-se limitada. Estes formatos utilizam o espetro de forma ineficiente, uma vez que codificam a informação apenas na amplitude do sinal. Por exemplo, um sinal a 10 Gbit/s, com espaçamento entre canais de 100 GHz, possui uma eficiência espectral de 0.1 bit/s/Hz. O recetor é sensível apenas à informação codificada na amplitude do sinal, sendo a informação de fase do sinal perdida durante a deteção. Assim, o desempenho do pós-processamento digital torna-se limitado, dificultando a compensação total das distorções do canal. [15,17]

A deteção coerente é a principal escolha para tecnologia de transmissão de altos débitos, 40 e 100 Gb/s [18]. Com a deteção coerente, o oscilador local (laser local) no recetor pode ser sintonizado para seleccionar o canal ótico desejado dentro de um grupo de canais WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) [19]. A tecnologia WDM divide a largura de banda de uma fibra ótica num grande número de comprimentos de onda, cada um dos quais carregando informação a taxas de até 100 Gb/s. Cada comprimento de onda corresponde a um canal ótico separado [8], como se apresenta na Figura 2.1.1.

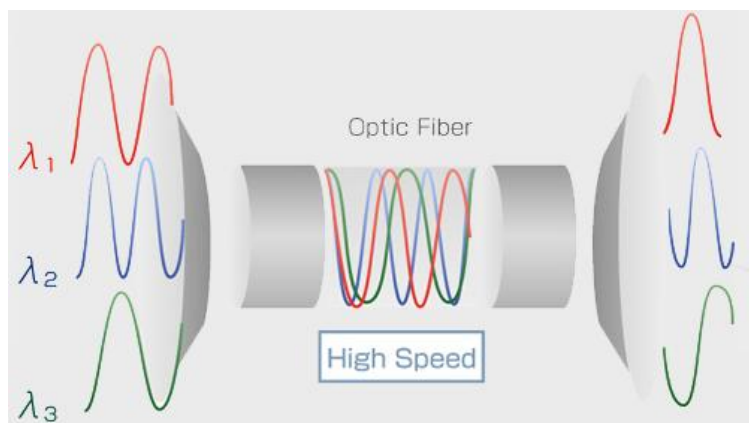


FIGURA 1.1.1 - WAVE DIVISION MULTIPLEXING, RETIRADO DE [35]

Os primeiros sistemas WDM usavam dois comprimentos de onda: 1310 nm e 1550 nm. Os avanços tecnológicos em amplificadores óticos e lasers permitem agora a utilização de comprimentos de onda mais próximos, sendo possível ter mais de 100 comprimentos de onda na mesma fibra. Estes sistemas são conhecidos por sistemas DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing). [1,8]

2.2. ROADM

O ROADM (*Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer*) é um equipamento de comutação e encaminhamento de canais óticos. Tem vindo, cada vez mais, a ser implementado como subsistema dos nós, permitindo flexibilidade e dinâmica nas redes óticas modernas com fibras WDM. Atualmente, já com a tecnologia DWDM (*Dense Wave-length Division Multiplexing*), as fibras chegam ao ter mais de 100 canais óticos simultaneamente. A transmissão ponto-a-ponto entre dois nós da rede não traz qualquer problema, mas quando a rede é maior e é necessário adicionar/remover canais óticos individualmente, a situação torna-se mais complexa [20]. No passado, este processo era feito separando cada canal ótico através de um *demultiplexer* ótico e rearranjando os comprimentos de onda de volta na fibra desejada. Este processo era feito manualmente, pelo que era necessária intervenção técnica para configurar e reconfigurar cada nó. Este processo consome tempo e é vulnerável a erro humano. O surgimento do ROADM veio simplificar estas operações manuais no caso das arquiteturas fixas e até removê-las completamente utilizando arquiteturas flexíveis [20].

Antes de explicar estas arquiteturas, é importante referir a tecnologia chave para o funcionamento de um ROADM: WSS (*Wavelength Selective Switch*). É um módulo controlado por *software* com a função de selecionar, dinamicamente, comprimentos de onda específicos que provêm de múltiplas fibras WDM na sua entrada e comutá-los para a fibra na saída. Existem vários tipos de WSS caracterizados pelo número de entradas e saídas que possuem. Na Figura 2.1.1., é apresentado um WSS 9x1. Este WSS permite selecionar um ou mais comprimentos de onda de cada fibra WDM na entrada e

direcioná-los para a fibra na saída. Este processo de seleção de comprimentos de onda é realizado com a utilização de um filtro óptico, possível de ser sintonizado.

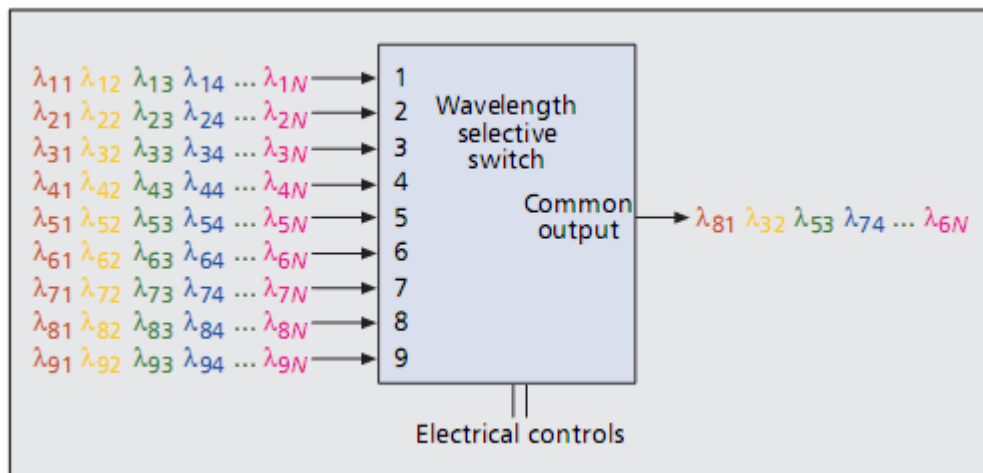


FIGURA 2.2.1 - WSS 9X1, RETIRADO DE [20]

Com a evolução desta tecnologia, surgiram também os WSS NxM, que têm múltiplas entradas e saídas, podendo selecionar um ou mais comprimentos de onda de qualquer entrada e transmiti-lo para qualquer saída [21].

Para além de WSS, um ROADM também pode utilizar AWG (*Arrayed Waveguide Grating*). Tal como o WSS, este equipamento é um multiplexer/demultiplexer de canais óticos. Porém, tem uma limitação em relação ao WSS: as portas de entrada no AWG estão associadas a um comprimento de onda pré-determinado e fixo. Isto implica que sejam necessários tantos AWGs como quantas direções (grau) no nó.[22]

O ROADM pode ser dividido em duas estruturas, *Add/Drop* e *Cross Connection*. A estrutura *Add/Drop* é a interface entre o sinal adicionado/removido no nó com a estrutura *Cross Connection*, que trata de selecionar e transmitir os vários canais óticos para a direção pretendida através de WSS. A arquitetura da estrutura *Add/Drop* vai definir o tipo de ROADM, que pode ser básico, *colorless*, *directionless* e *contentionless* [21].

- Básico - Também é conhecido por *colored*, pois as suas portas *add/drop* são associadas a comprimentos de onda e direções específicas. Geralmente, é utilizado um AWG para cada grau (direção) do nó.
- *Coloreless* - Esta característica indica que o ROADM é transparente aos comprimentos de onda. Cada porta tem acesso a todos os comprimentos de onda numa fibra DWDM mas para cada direção só podem ser transmitidos/recebidos comprimentos de onda diferentes. Aqui já são utilizados WSS na estrutura *add/drop*.

- *Directionless* - Uma estrutura *Add/Drop directionless*, permite a liberdade para direcional um canal ótico para qualquer grau (direção) do nó.
- *Contentionless* - Com a utilização de WSS MxN, é possível receber/transmitir simultaneamente sinais com o mesmo comprimento de onda que transportam informação diferente.

Estas características estão relacionadas com a necessidade de reconfiguração manual do ROADM por parte de um técnico. Um ROADM que necessita de operações manuais de um técnico para ser reconfigurado, denomina-se um ROADM fixo. A reconfiguração pode ser, por exemplo, a alteração da direção que toma determinado comprimento de onda. Se um ROADM for básico, ou só *colorless*, pertence a este grupo. A Figura 2.1.2. representa um ROADM fixo (básico). [22]

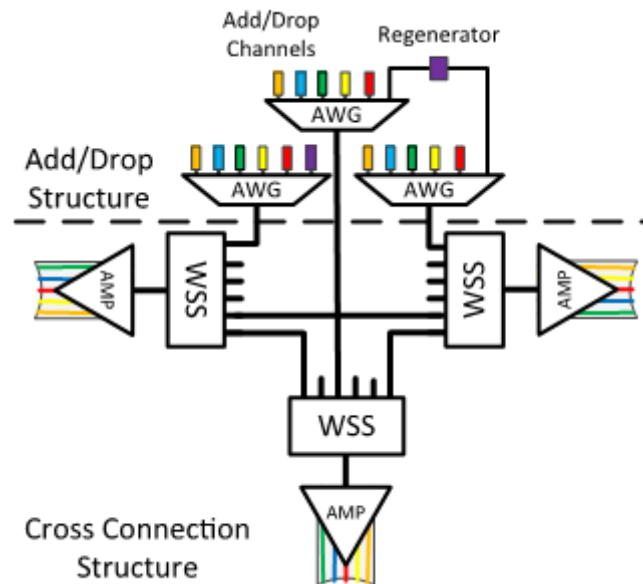


FIGURA 2.2.2 - ROADM FIXO (BÁSICO), RETIRADO DE [22]

Como já foi explicado, um ROADM fixo utiliza um AWG para cada direção do nó. O comprimento de onda associado a cada porta do AWG é pré-determinado, portanto, mesmo que o *transponder* tenha capacidade para transmitir/receber qualquer comprimento de onda, só pode fazê-lo para um comprimento e direção fixos [22]. Neste caso, qualquer comprimento de onda que tenha como destino o cliente, ou seja, da estrutura *Cross Connection* para a estrutura *Add/Drop*, tem já determinado o AWG que o recebe e a porta por onde é enviado. Um comprimento de onda que transporte tráfego de passagem não chega à estrutura *Add/Drop*, a não ser que seja necessária regeneração do sinal. Para a regeneração ser realizada, é necessário haver um regenerador entre o AWG associado à direção origem e o AWG associado à direção destino do comprimento de onda. A alteração de qualquer configuração neste ROADM, só pode ser feita manualmente no local do nó.

Se o ROADM for CD (*colorless e directionless*) ou CDC (*colorless, directionless e contentionless*), o caso é diferente. Um ROADM com estas características denomina-se flexível, ou seja, não há necessidade de reconfiguração no local por parte de um técnico. Com a utilização de WSS, é possível transmitir/receber qualquer comprimento de onda para qualquer direção existente. A reconfiguração deste tipo de ROADM pode ser feita remotamente através de *software*. Naturalmente, o custo de implementação deste tipo de ROADM é maior. Na Figura 2.2.3. é apresentado um ROADM CDC.

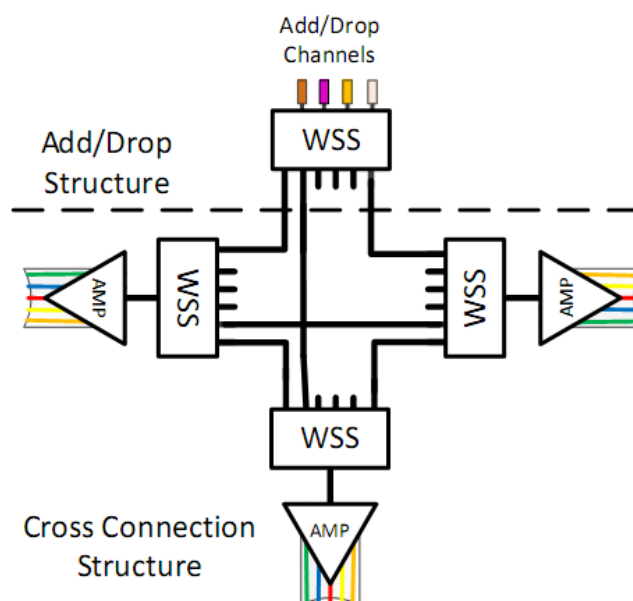


FIGURA 2.2.3 - ROADM FLEXIVEL (CDC), RETIRADO DE [22]

As redes de fibra ótica são atualmente a base das telecomunicações no mundo, e encontram-se em expansão para suportar o crescimento dramático do tráfego de informação. Os ROADMs cumprem a função de comutação de canais óticos nestas fibras, facilitando a adição/remoção de comprimentos de onda que transportam informação até aos nós [20]. São uma tecnologia emergente já implementada a nível global e sujeitos a constante otimização devido à sua importância.

2.3. SDH

Os protocolos de transporte têm sofrido alterações ao longo do tempo e cada nova geração tem inerentes atributos das gerações anteriores. A tecnologia dominante nas redes de transporte nas últimas duas décadas é a SDH. No entanto, recentemente, a tecnologia OTN é a principal escolha para protocolo de transporte. Esta convergência para a OTN é apresentada na Figura 2.3.1.

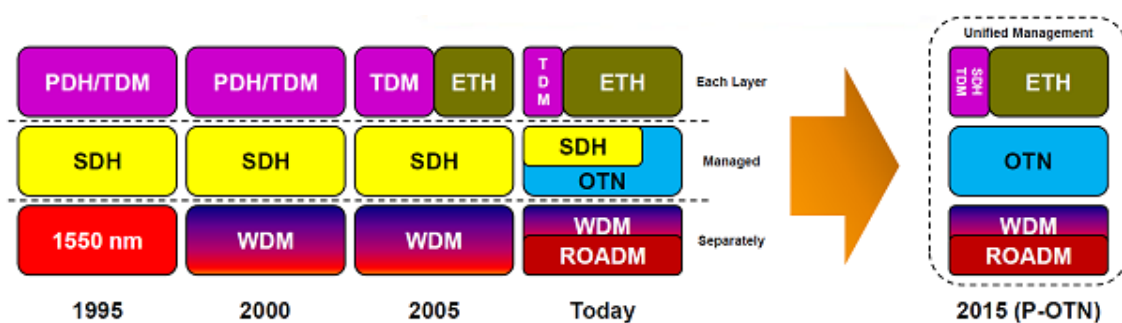


FIGURA 2.3.1 - CONVERGÊNCIA PARA OTN, RETIRADO DE [23].

A tecnologia SDH veio em seguimento da SONET, criada nos Estados Unidos da América. Estas tecnologias resolveram os problemas existentes na tecnologia antecessora, PDH. Nesta análise é dada maior importância à tecnologia SDH. Algumas vantagens [24] que a SDH trouxe às redes de telecomunicações são:

- Maiores taxas de transmissão - a multiplexagem por byte e o mecanismo de ponteiros que identificam o início da carga paga foram uma das causas para o aumento da eficiência na transmissão. O uso de ponteiros permite o início dos tributários em qualquer ponto da trama e acomoda eventuais variações de frequência ou desalinhamentos de fase sem necessitar de *buffers* com grande capacidade.
- Estrutura Add/Drop simples - os sinais podem ser facilmente inseridos e removidos de sinais de maior débito.
- Alta disponibilidade e robustez - para além da rede ser já controlada remotamente com funções OAM, contém também mecanismos automáticos de proteção e restauro capazes de rapidamente resolver os eventuais problemas na ligação.
- Plataforma para novos serviços - POTS, ISDN, Rádio, WAN, LAN e mais recentemente vídeo por demanda e *broadcast* de vídeo digital via ATM.
- Interconexão - facilidade em ligar redes de diferentes provedores de serviços, pois as interfaces da SDH são definidas por *standards* globais que facilitam a conexão de elementos da rede (NE) de diferentes provedores.

O primeiro nível da hierarquia SDH corresponde à trama STM-1 (Synchronous Transport Module - 1), apesar de posteriormente se ter definido o STM-0 para acomodar o sinal inferior da SONET, STS-1, com ritmo de 51.84 Mb/s. Como se pode observar na Figura 2.3.2., a trama compreende 9x270 bytes

que equivalem a 2470 bytes transmitidos em 125 μ s. O ritmo de transmissão é, portanto, 155.52 Mb/s.[24]

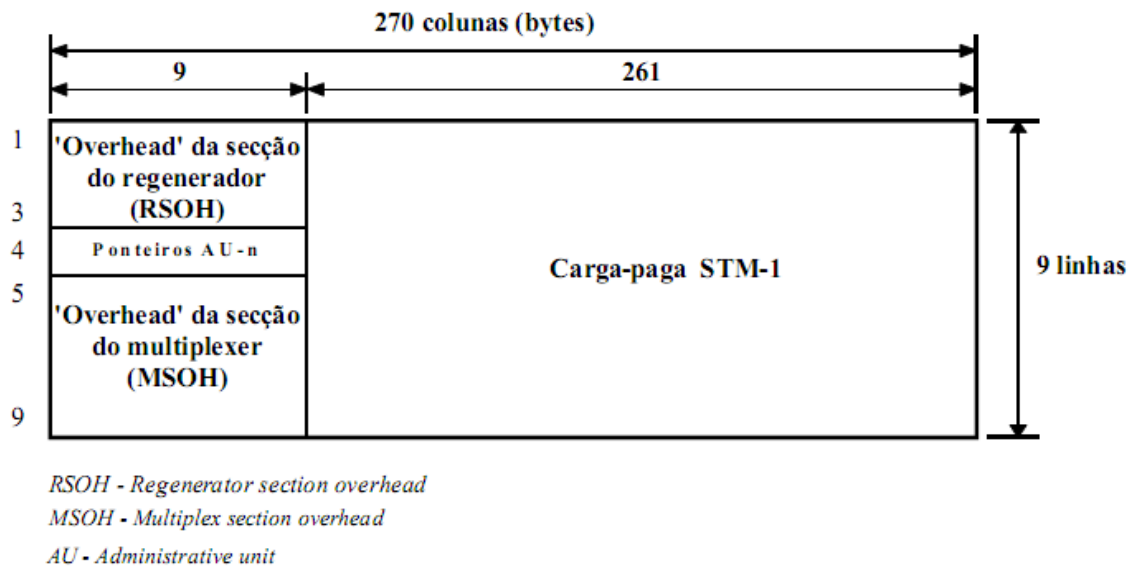


FIGURA 2.3.2 - TRAMA STM-1, RETIRADO DE [24].

Os níveis superiores da hierarquia SDH são o resultado de uma multiplexagem byte a byte de sinais inferiores. Por exemplo, 4 tramas STM-1 multiplexadas dão origem a uma trama STM-4, como indicado na Figura 2.3.3.



FIGURA 2.3.3 - MULTIPLEXAGEM BYTE A BYTE, RETIRADO DE [24].

A tecnologia SDH permite mapear sinais PDH (E1, E2, E3 e E4) e outros, utilizando contentores como *Virtual Containers (VC)*, passando por um processo de multiplexagem e inserção de cabeçalhos. Na figura 2.3.4. pode-se observar o processo de mapeamento de vários sinais inferiores em tramas STM-N. [24]

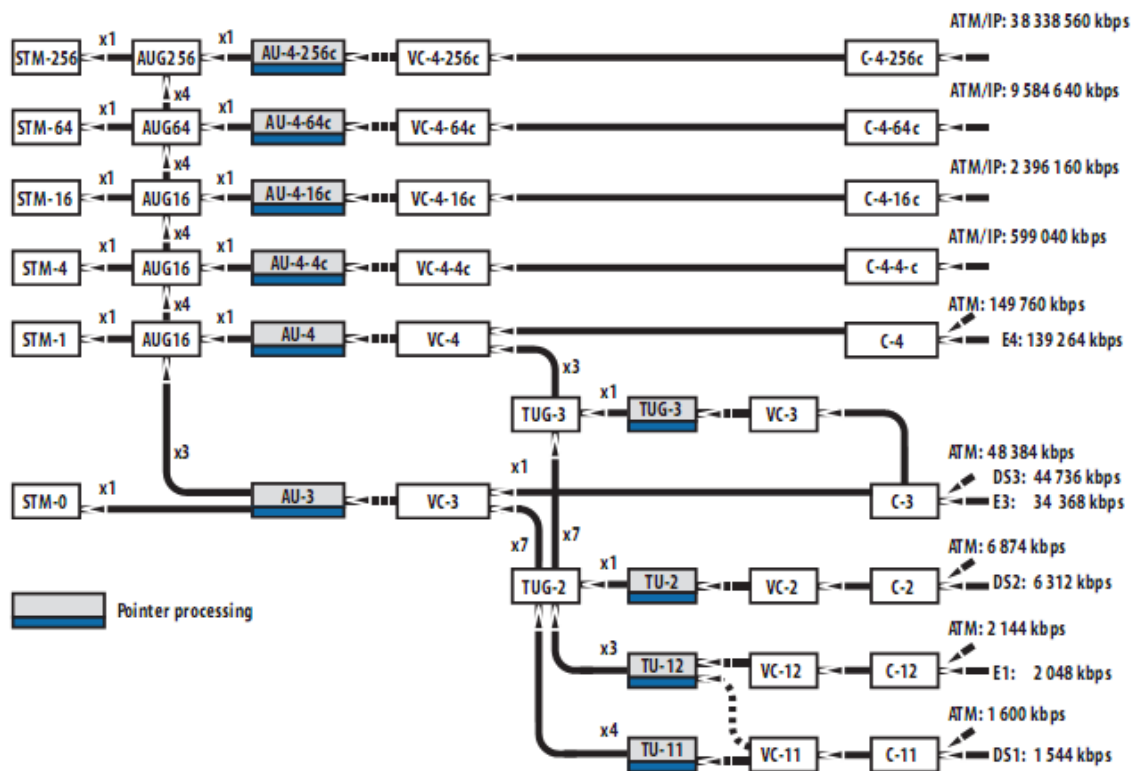


FIGURA 2.3.4 - MAPEAMENTO DE SINAIS INFERIORES, RETIRADO DE [25].

A hierarquia das tecnologias SDH e SONET é apresentada na Tabela 2.2.1. onde se verifica que para o nível N da hierarquia SDH corresponde o nível 3xN da hierarquia SONET (com exceção do primeiro nível).

SONET signal		Bit rates	Equivalent SDH signal
STS-1	OC-1	51.84 Mbps	STM-0
STS-3	OC-3	155.52 Mbps	STM-1
STS-12	OC-12	622.08 Mbps	STM-4
STS-48*	OC-48	2488.32 Mbps	STM-16
STS-192*	OC-192	9953.28 Mbps	STM-64
STS-768	OC-768	39813.12 Mbps	STM-256

TABELA 2.3.1 - HIERARQUIA SDH/SONET, RETIRADO DE [25].

Esta granularidade era bem adaptada às necessidades de banda larga da altura, mas mais tarde veio demonstrar algumas limitações. O tráfego de pacotes atingiu grandes proporções e começaram a surgir vários serviços baseados em IP, Mobile, VPN, Ethernet, Multimédia. [25]

Uma tecnologia otimizada para transporte de circuitos como a SDH, teria de sofrer alterações para se adaptar a este novo tráfego. A implementação global e o investimento feito na SDH levaram à investigação e criação de protocolos que a tornassem mais eficiente.

2.3.1. VIRTUAL CONCATENATION (VCAT)

A tradicional concatenação contígua não era eficiente, então criou-se a concatenação virtual (VCAT) que permitiu um melhor alinhamento dos sinais nativos nos contentores SDH. Assim, qualquer número de contentores poderia ser agrupado num contentor virtual originando uma melhor granularidade da largura de banda. Os operadores de rede começaram a poder ajustar de forma mais eficiente a capacidade de transporte de determinado serviço requerido pelo cliente [26]. Na Tabela 2.3.2. destaca-se a importância da concatenação virtual na eficiência do transporte de diferentes sinais.

Serviço Débito Binário	Sem VCAT		Com VCAT	
	Estrutura Débito Binário	Eficiência	Estrutura Débito Binário	Eficiência
Ethernet 10 Mbps	VC-3 48.38 Mbps	20.67%	VC-12-5v 10.88 Mbps	91.91%
Fast Ethernet 100 Mbps	VC-4 149.76 Mbps	66.77%	VC-3-2v 96.77 Mbps	100%
GbEthernet 1 Gbps	VC-4-16c 2396.16 Mbps	41.73%	VC-3-21v 1016.06 Mbps	98.42%
			VC-4-7v 1048.33 Mbps	95.40%
10 GbEthernet 10 Gbps	VC-4-64c 9584.64 Mbps	100%	VC-4-64v 9584.64 Mbps	100%

TABELA 2.3.2 - EFICIÊNCIA COM/SEM VCAT, RETIRADO DE [10].

O sinal 1 Gb Ethernet sendo transportado por um sinal STM-16 tem apenas uma eficiência de 41,73%. Já o grupo VC-4-7v é um grupo concatenado virtual (VCG), em que VC-4 define a granularidade base e o 7v define o número de membros no grupo, e tem uma eficiência no transporte do sinal 1Gb Ethernet de 95,40%. [10]

2.3.2. GENERIC FRAME PROCEDURE (GFP)

Técnicas de encapsulamento como o GFP têm de ser implementadas para adaptar tráfego assíncrono, em *burst* e com tamanhos variáveis (IP/PPP, Ethernet, Fibre Channel, ESCON, FICON) ao método de transporte da SDH. Utilizando este protocolo, elimina-se o espaço entre os pacotes Ethernet, conhecidos como Inter Packet Gaps (IPGs) [10]. Assim, o tráfego é mapeado numa trama cuja estrutura é apresentada na Figura 2.3.5.

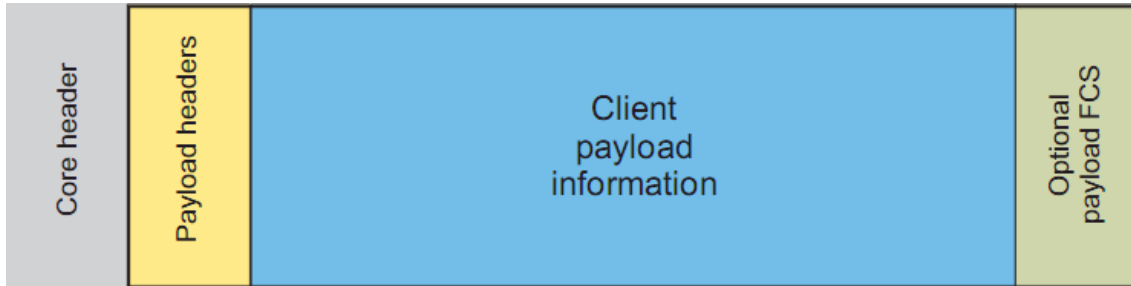


FIGURA 2.3.5 - ESTRUTURA DA TRAMA GFP, RETIRADO DE [26]

O cabeçalho de núcleo (Core Header) define o tamanho da trama e deteta erros CRC (Cyclic Redundancy Check) enquanto o cabeçalho da carga paga (Payload Header) define o tipo de informação transportada na carga paga do cliente (Client Payload Information). Em último, a opcional FCS (Frame Check Sequence), tem a tarefa de detetar erros. Dependendo do serviço a transportar, há dois modos diferentes de mapeamento, o GFP-F (Framed) e o GFP-T (Transparent).

O GFP-F, otimizado para transporte de serviços baseados em pacotes, mapeia os pacotes inteiros numa trama GFP de tamanho variável. Estes sinais cliente como a Ethernet, PPP e DVB passam por uma pilha onde aguardam para serem mapeados, podendo alguns códigos ser removidos para minimizar a quantidade de informação a transmitir. Este protocolo suporta *submultiplexing* num canal único para fontes com baixos débitos. Apesar de resultar num transporte mais eficiente, o processo de encapsulamento aumenta a latência, fazendo o GFP-F inadequado para protocolos sensíveis ao tempo [28]. Na Figura 2.3.6. apresenta-se o processo de encapsulamento do GFP-F.

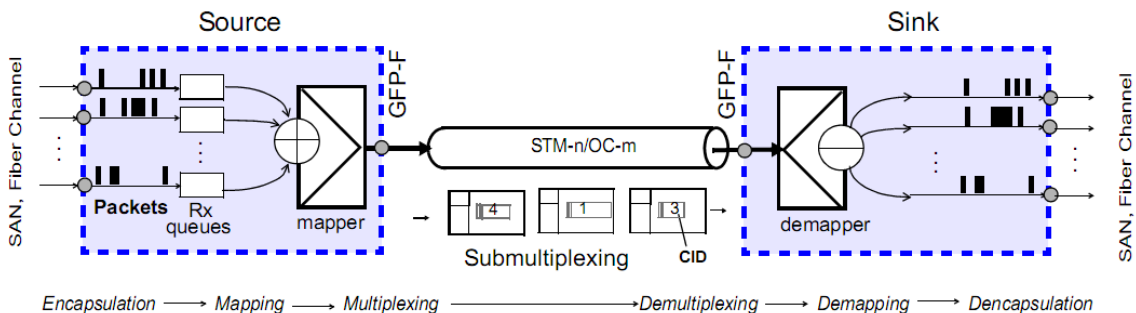


FIGURA 2.3.6 - ENCAPSULAMENTO GFP-F, RETIRADO DE [28]

O GFP-T é otimizado para tráfego baseado no código 8B/10B, como Fibre Channel e ESCON e outros protocolos SAN (Storage Area Network).

O tráfego cliente é mapeado em tramas GFP de tamanho fixo e transmitido imediatamente, sem qualquer remoção de código. Na Figura 2.3.7. apresenta-se o processo de encapsulamento do GFP-T.

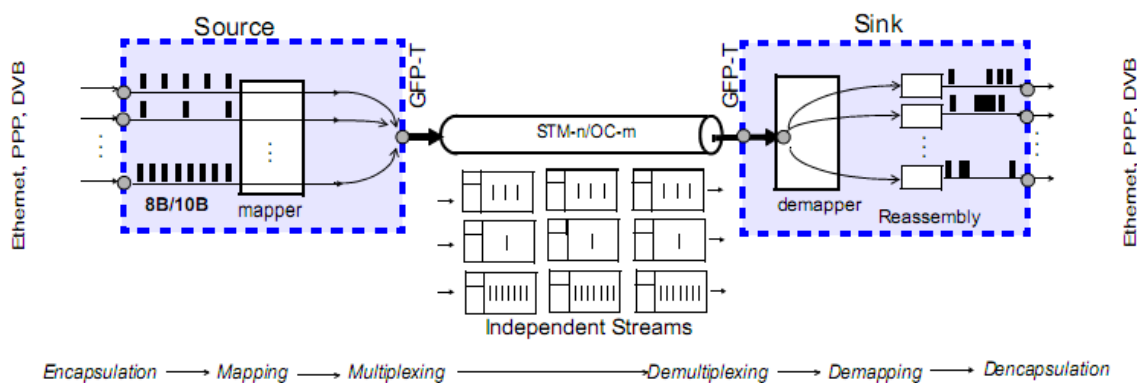


FIGURA 2.3.7 - ENCAPSULAMENTO GFP-T, RETIRADO DE [28]

GFP-T mapeia qualquer sinal cliente, apesar ser otimizado para serviços como Fibre Channel. Já o GFP-F é utilizado para mapear serviços como a Ethernet, e utiliza mais eficientemente a largura de banda, pois retira alguns parâmetros não necessários ao transporte dos pacotes. A Tabela 2.3.3. resume as principais diferenças entre os dois modos de encapsulamento. [28]

Feature	GFP-F	GFP-T
Protocol transparency	low	high
Efficiency	high	low
Isocronic protocols	no	yes
Encapsulation protocol level	Layer 2 (Frames)	Layer 1 (Physical)
Optimized for	Ethernet	SAN, DVB
LCAS protection	likely	poor
Statistical submultiplexing	yes	no
SAN transport	no	yes
Ethernet transport	optimum	possible

TABELA 2.3.3 - COMPARAÇÃO ENTRE GFP-F E GFP-T, RETIRADO DE [28]

Para além do GFP, existem outros mecanismos como Link Access Protocol (LAPS) e High-Level Data Link Control (HDLC). No entanto, o GFP suporta múltiplos serviços e uma maior flexibilidade,

podendo ser usado em combinação com a tecnologia OTN, que oferece a possibilidade de introdução de estruturas de multiplexagem GFP. [26]

2.3.3. LINK CAPACITY ADJUSTMENT SCHEME (LCAS)

O ITU-T definiu o protocolo LCAS que corre entre dois elementos da rede que fazem conexão entre o cliente e a rede tradicional SDH. Consiste num protocolo para gerir a alocação da largura de banda de um caminho VCAT, podendo acrescentar ou remover membros de um VCG. Determina quais os membros do VCG estão ativos e como estão a ser utilizados, permitindo uma alteração dinâmica em tempo real do número de contentores no grupo, dependendo da largura de banda requerida. Assim, sem influenciar negativamente o serviço, o LCAS permite aumentar e reduzir a largura de banda do transporte. [26, 28]

Os parâmetros relevantes ao protocolo LCAS e à concatenação virtual são inseridos num pacote de controlo cuja estrutura se apresenta na Figura 2.3.8.

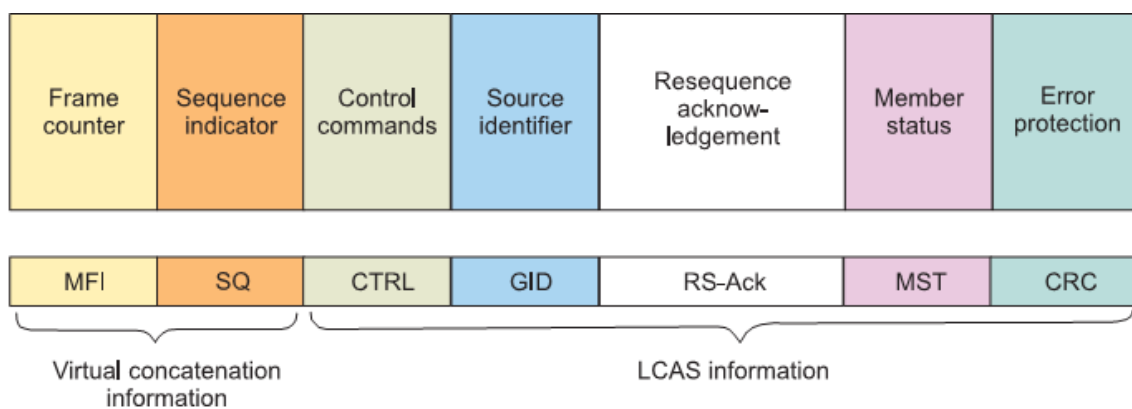


FIGURA 2.3.8 - PACOTE DE CONTROLO VC/LCAS, RETIRADO DE [26]

Os parâmetros referentes ao protocolo LCAS são:

- Control Comands (CTRL) - sincroniza a fonte e o recetor e transporta a informação referente ao estado (fixed, add, norm, eos, idle, dnu) de membros individuais de um VCG.
- Source Identifier (GID) - informa o recetor de qual o VCG a que pertence um determinado membro.
- Resequence Acknowledge (RS-Ack) - notifica a fonte de que o recetor recebeu uma alteração da sequência, iniciando a receção de uma nova.
- Member Status (MST) - por cada membro do VCG, é transferida a informação do estado da conexão (fail e OK) do recetor para a fonte.

- Error Protection (CRC) - deteta erros e descarta pacotes de controlo com erros, por cada membro do VCG.

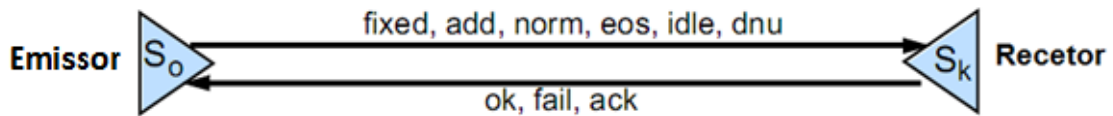


FIGURA 2.3.9 - TROCA DE INFORMAÇÃO DO PACOTE DE CONTROLO, ADAPTADO DE [28]

A informação do recetor para a fonte (MST, RS-Ack) é redundante enquanto a informação da fonte para o recetor e específica para cada membro do VCG. Significa que as mensagens do recetor são repetidas tantas vezes como o número de membros no grupo e a origem do recetor é irrelevante.[28]

O protocolo LCAS permite redefinir o tamanho do canal VCAT em uso quando recebe uma ordem do NMS (Network Management System) para aumentar ou reduzir o tamanho. No caso de haver uma falha parcial na conexão, LCAS faz uma reconfiguração através da informação dos membros já transmitidos e prossegue com a transmissão. É um protocolo unidirecional que permite largura de banda assimétrica entre dois nós MSSP para configurar ligações assimétricas. Como o protocolo é aplicado apenas nos nós *edge* da rede, não é necessário coordenar mais do que um centro de configuração [28].

2.3.4. NEW GENERATION SDH

Os protocolos VCAT, GFP e LCAS implementados na rede SDH resultaram na nova geração da tecnologia, NG-SDH. Esta rede faz face aos problemas da SDH tradicional, nomeadamente, a ineficiência na transmissão de pacotes, a necessidade de maior granularidade e maiores débitos.

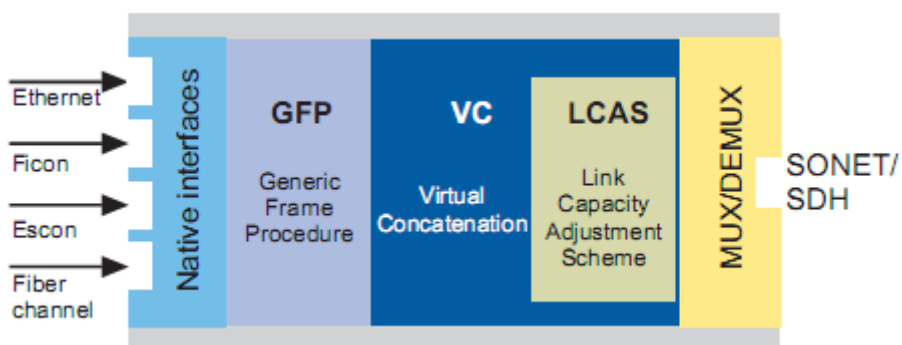


FIGURA 2.3.10 - VISÃO GERAL DA NG-SDH, RETIRADO DE [26]

Uma grande vantagem da NG-SDH é o facto de permitir aos operadores de rede introduzir a nova tecnologia sobre a rede SDH tradicional, substituindo apenas os equipamentos terminais. Assim, ambos os serviços TDM ou por pacotes são oferecidos com eficiência e no mesmo comprimento de onda.

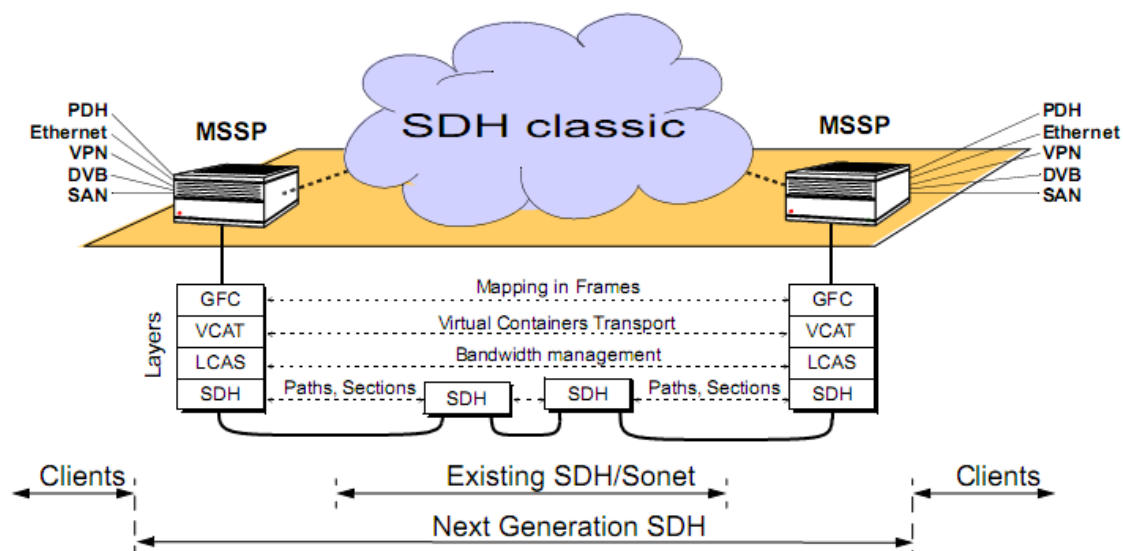


FIGURA 2.3.11 - NEW GENERATION SDH, RETIRADO DE [28]

A Figura 2.3.11 representa o esquema de uma rede NG-SDH na totalidade, onde se pode observar a implementação de novos protocolos e equipamentos sobre a rede clássica SDH, melhorando de forma notável a sua eficiência e capacidade.

2.4. OPTICAL TRANSPORT NETWORK (OTN)

Os protocolos de transporte têm evoluído durante muitos anos, e cada geração tem atributos inerentes à geração que precede. O protocolo dominante nas últimas décadas foi o SDH mas, recentemente, a OTN (*Optical Transport Network*) tomou o seu lugar como escolha principal dos operadores.

Originalmente, as redes SDH utilizavam apenas um comprimento de onda por fibra. Com a evolução da tecnologia ótica, tornou-se mais económico a transmissão de múltiplos sinais SDH por fibra utilizando WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) do que aumentar o débito de um sinal SDH. A tecnologia WDM prometia transmitir outros tipos de sinal no seu formato original sem necessidade de mapeamento em sinais SDH. Porém, é difícil para um operador garantir OAM&P (*Operations, Administration, Maintenance and Provisioning*) para cada sinal no seu formato nativo, já que isso requeria sistemas de administração múltiplos e dependentes do sinal cliente. Para além deste entrave, havia outras limitações que levaram à criação da OTN: a necessidade de um melhor mecanismo de correção de erros (FEC - *Forward Error Correction*); a incorporação de um cabeçalho que permitiria efetuar

OAM&P nas redes WDM; diminuir a granularidade dos envelopes que transportam a carga paga de maneira a poder transportar sinais cliente com elevado débito agregados nas redes de acesso. No fundo, era necessário diminuir a complexidade das redes e otimizá-las para uma nova geração com mais eficiência e capacidade [11]. Assim, foi criada a OTN, resolvendo os problemas da tecnologia SDH. A maior diferença da OTN era o facto de transportar qualquer tipo de formato de sinal de uma maneira transparente, fosse este sinal SDH/SONET, Ethernet, Video, protocolos SAN (*Storage Area Network*) e WAN (*Wide Area Network*), entre outros. Na Figura 2.4.1. apresenta-se esta convergência para o transporte de informação sobre OTN.

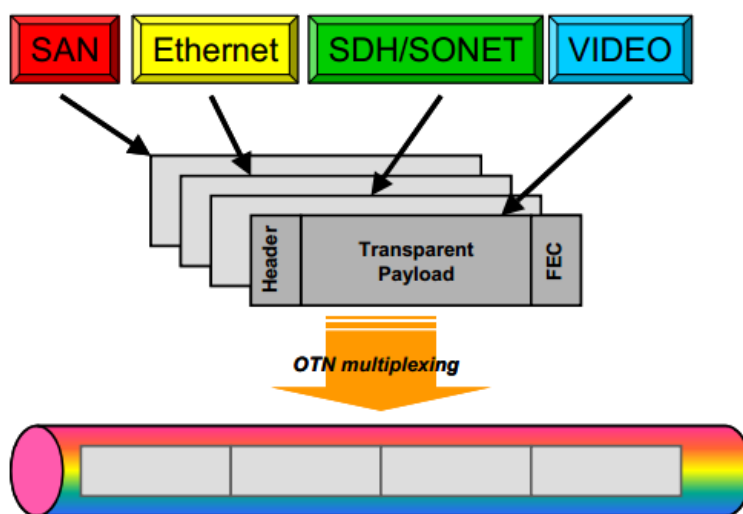


FIGURA 2.4.1 - CONVERGÊNCIA PARA TRANSPORTE SOBRE OTN, RETIRADO DE [29]

Este encapsulamento de vários sinais em contentores OTN segue vários passos. Os sinais cliente são inseridos numa área de carga paga dentro da trama que adicionando um cabeçalho torna-se uma OPU (*Optical Payload Unit*). É adicionado outro cabeçalho com funções OAM&P criando um ODU (*Optical Data Unit*). A esta unidade adiciona-se um cabeçalho de transporte, criando um OTU (*Optical Transport Unit*), que é um sinal de formato digital. Posteriormente, é enviado para o domínio ótico sobre um comprimento de onda, que constitui o canal ótico (OCh - *Optical Channel*). O OMU (*Optical Multiplexed Unit*) consiste num grupo canais óticos WDM que com um comprimento de onda separado que transporta o cabeçalho OSC (*Optical Supervisory Channel*) cria um OTM (*Optical Transport Module*), ou seja, o conjunto de um OMU com um OSC dá origem a um OTM. A Figura 2.4.2. apresenta o esquema deste encapsulamento OTN. [29]

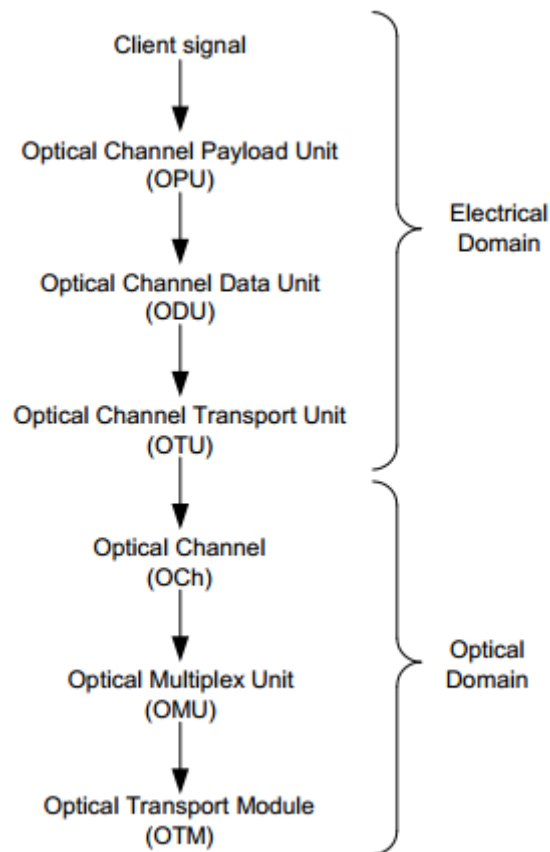


FIGURA 2.4.2 - PASSOS PARA O ENCAPSULAMENTO OTN, RETIRADO DE [29]

OTN é uma tecnologia com débitos constantes. A norma G.709 define cinco débitos diferentes para sinais cliente: 1.25 Gbit/s, 2.5 Gbit/s, 10 Gbit/s, 40 Gbit/s, e 100 Gbit/s. Estes sinais são conhecidos por contentores ODU_k, com $k = 0, 1, 2, 3, 4$, respetivamente [30]. Há ainda três especificações: ODU_{2e}, ODU_{3e} e ODUflex. Os contentores ODU_{2e} e ODU_{3e} foram introduzidos como uma extensão para otimizar o transporte de sinais 10 e 40 Gb Ethernet [31]. ODUflex tem qualquer débito acima do ODU₀, pois, como o nome indica tem um tamanho flexível, transporta qualquer sinal cliente e ocupa o mínimo de janelas de tempo. Este contentor foi criado pois prevê-se que haverá sinais que não encaixam em contentores ODU_k sem ser perdida grande eficiência. [32]

Para sinais de linha, há quatro débitos diferentes: 2.5 Gbit/s, 10 Gbit/s, 40 Gbit/s, e 100 Gbit/s. São referidos como OTU_k, com $k = 1, 2, 3, 4$, respetivamente, e estão apresentados na Tabela 2.4.1.

OTU	Marketing Rate (Gbit/s)	OTU Rate (Gbit/s)	OTU Payload Rate (Gbit/s)
1	2.5	2.666	2.488
2	10	10.709	9.995
2e	10	11.095	10.356
3	40	43.018	40.150
3e	40	44.570	41.611
4	100	111.809	100.376

TABELA 2.4.1 - DÉBITOS OTN, RETIRADO DE [29]

OTN suporta a multiplexagem e transporte de vários sinais com baixos débitos dentro de um sinal com alto débito. O contendor ODU pode ser diretamente mapeado no correspondente OTU ou pode ser multiplexado com outros ODU(L)s formando um ODU(H) maior e mapeado no OTU correspondente [33]. Esta multiplexagem é apresentada na Figura 2.4.3.

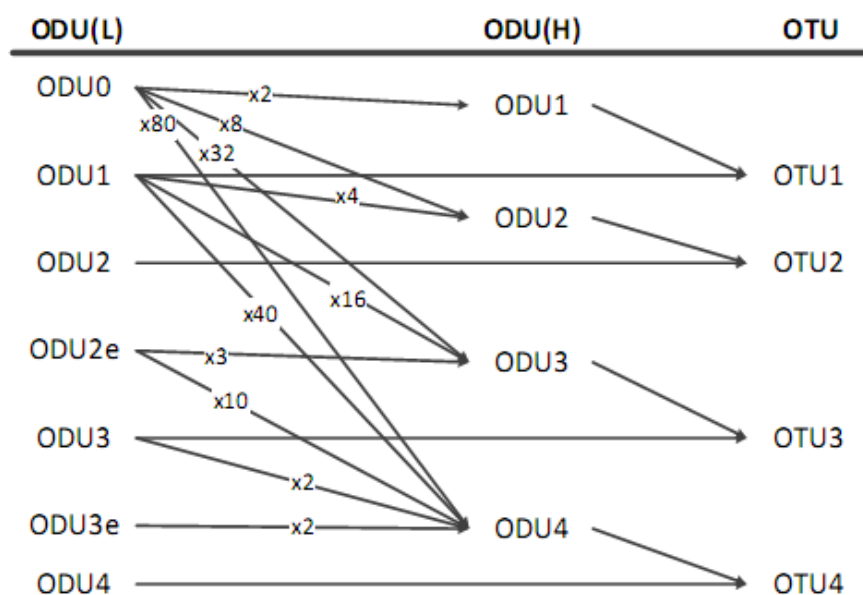


FIGURA 2.4.3 - MULTIPLEXAGEM DE CONTENTORES, RETIRADO DE [33]

Estes sinais ODU(L) de menor ordem são multiplexados em janelas de tempo dentro de uma tributária no ODU(H). O número de ODUj(L) que cabe num ODUk(H) depende da sua ordem j e k. A norma G.709 define que o mapeamento é realizado em tributários aleatórios e é possível multiplexar diferentes sinais ODU(L) num ODU(H).[33]

A estrutura de uma trama OTN, apresentada na Figura 2.4.4., divide-se em três partes principais: o cabeçalho, a carga paga e o campo FEC. No seu total, a trama tem 4 linhas e 4080 colunas. O campo FEC foi introduzido exclusivamente na trama OTN para realizar a correção de erros e ocupa 256 bytes da

trama. A sua importância tem impacto nos custos de implementação de uma rede, pois ajuda a reduzir o número de erros em linhas com ruído, o que possibilita o aumento do comprimento dos troços de linha (spans) [34]. O cabeçalho já era utilizado por tecnologias como SDH, mas foram bastante otimizados na OTN, aumentando a eficiência da rede. É constituído pelas primeiras 16 colunas de cada linha. A carga paga tem reservado 3808 bytes para o transporte de informação.

O tamanho da trama OTN nunca é alterado, como acontece na trama SDH. O que faz alterar o débito é a alteração do período de transmissão da trama

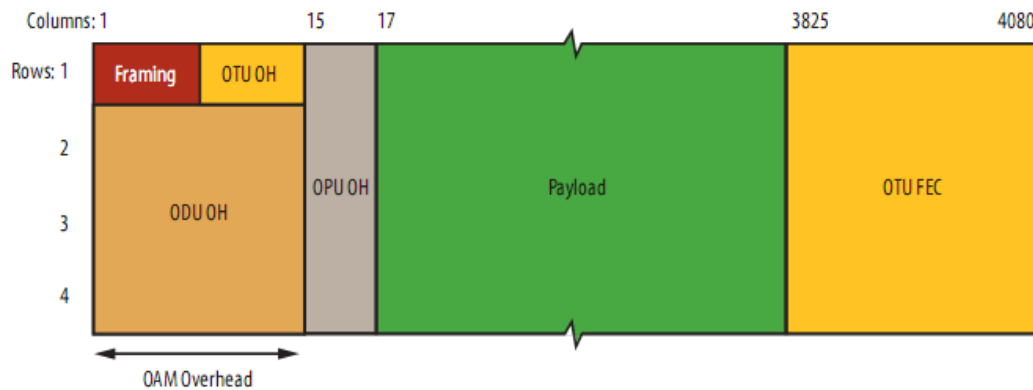


FIGURA 2.4.4 - ESTRUTURA DE UMA TRAMA OTN, RETIRADO DE [34]

Outro aspeto da rede OTN é o seu equipamento. Existem vários tipos de equipamento numa rede OTN, por exemplo: Regeneradores, equipamento terminal OTN, OADMs (*Optical Add/Drop Multiplexers*), OXCs (*Optical Cross Connectors*). O equipamento terminal é usado para conexões ponto-a-ponto sobre redes WDM, mapeando os sinais cliente em OPU. Por vezes multiplexando múltiplos sinais no domínio elétrico e finalmente efetuando multiplexagem e mapeamento no domínio ótico. Os regeneradores têm três funções: reamplificação do sinal ótico, reformulação dos impulsos óticos e resincronização. OADMs e OXCs processam o tráfego no domínio ótico, tendo relevante importância na estrutura da rede. [29]

2.5. ETHERNET

Nas últimas décadas, a Ethernet tem-se tornado dominante nas redes locais (LANs) a nível global. Esta tecnologia foi criada em 1976 com o objetivo de interligar mais de cem máquinas com 1 km de cabo coaxial denominado *ether*. Nesta altura, a taxa de transmissão era 2.94 Mb/s [36]. O seu sucesso chamou a atenção de grandes empresas de telecomunicações e, desde então, a sua evolução não parou. Atualmente, a Ethernet ainda está a evoluir para corresponder às crescentes necessidades dos utilizadores das redes de telecomunicações. Pode-se apontar a popularidade da Ethernet a um conjunto de fatores que a caracterizam [37]:

- Custos baixos;
- Fácil instalação, manutenção, resolução de problemas e de expansão da rede;
- Aceitada globalmente nas suas normas industriais - significa que compatibilidade e acesso a equipamento não são problemas;
- Estruturada de maneira a ser compatível com diversos Sistemas de Operação de Redes;
- Rede fiável.

A evolução da Ethernet trouxe a Fast Ethernet, que permitiu débitos de 100 Mb/s, para além dos 10 Mb/s já existentes. Atualmente, existe a Gigabit Ethernet que, como o nome indica, possibilita débitos na ordem dos Gigabits como 1 GbE, 10 GbE, 40 GbE e 100 GbE. A tendência é para os débitos aumentarem, por isso são estudadas técnicas para aumentar a eficiência da transmissão. Uma dessas técnicas é a codificação 8B/10B. Esta técnica permite converter 8 bits em 10 bits nos serviços Ethernet até 1 Gb/s (em serviços com débitos maiores é utilizada a codificação 64B/66B) [38].

Outra característica da camada física da Ethernet é poder ser *full-duplex* ou *half-duplex*. Um circuito *full-duplex* pode transmitir e receber ao mesmo tempo, enquanto um circuito *half-duplex* só funciona num sentido de cada vez. O serviço Ethernet a 10 Mb/s é geralmente implementado em ambientes *half-duplex*. A Fast Ethernet (100 Mb/s) tanto pode ser implementada em *full-duplex* como *half-duplex*. Já a Gigabit Ethernet é quase sempre implementada num ambiente *full-duplex* [38].

A Ethernet começou por ser uma tecnologia implementada em redes LAN, evoluindo para as redes WAN e MAN atuais. Por ser uma tecnologia com CAPEX/OPEX reduzidos, otimizada para tráfego de pacotes e por ter interfaces já conhecidas globalmente, a Ethernet começou a surgir nas redes metropolitanas. O Metro Ethernet Forum (MEF) definiu a Carrier Ethernet para integrar estes tipos de rede. A Carrier Ethernet, ao contrário da Ethernet utilizada em LANs, tem atributos necessários a uma rede metropolitana ou de grande área, como suportar múltiplos subscritores numa infraestrutura

comum da rede e ser capaz de resolver problemas na rede remotamente [39]. Na Figura 2.5.1. apresentam-se os atributos principais da Carrier Ethernet: Serviços normalizados, Qualidade de Serviço, Escalabilidade, Gestão de Serviços e Fiabilidade da rede.



FIGURA 2.5.1 - ATRIBUTOS DA CARRIER ETHERENT, RETIRADO DE [39]

A Carrier Ethernet permite três tipos de serviços:

- E-Line: Serviços ou ligações Ponto-a-Ponto. Pode ser usada em circuitos privados e virtuais;
- E-LAN: Ligações entre vários pontos (Multiponto), através de uma rede virtual privada que é transparente aos serviços LAN, tendo total interoperabilidade;
- E-Tree: serviço que facilita tráfego de dados destinado a multi-host (Ponto-Multiponto) e onde o tráfego de clientes deve ser mantido invisível para outros clientes.

A adoção 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 [40].

3. MULTIPROTOCOL LABEL SWITCHING - TRANSPORT PROFILE (MPLS-TP)

Neste capítulo é estudada em detalhe a tecnologia MPLS-TP. Para isso, é conveniente apresentar, na secção 3.1, a sua tecnologia original, IP/MPLS. Posteriormente, a secção 3.2 trata de apresentar o MPLS-TP, tecnologia de comutação de pacotes destinada a redes de transporte de informação. De seguida é apresentada informação sobre a origem destas tecnologias.

A tecnologia principal nesta dissertação é o MPLS-TP, que resulta num esforço conjunto de duas instituições, IETF - Internet Engineering Task Force e ITU-T - International Telecommunication Union Telecommunication Standardization, para aplicar a tecnologia MPLS, também conhecida por IP/MPLS, às redes de transporte. Certas mudanças foram efetuadas para cumprir os requisitos de uma rede de transporte, mas a tecnologia original está bem presente no MPLS-TP. Por estas razões, este capítulo começa com uma abordagem à tecnologia original, IP/MPLS, para depois passar à sua norma associada às redes de transporte, MPLS-TP.

Multiprotocol Label Switching (MPLS) foi criado em meados da década de 1990. Na altura tinha apenas dois objetivos: uma melhor integração de ATM com IP criando um plano de controlo baseado em IP que operasse tanto nos *switches* ATM como nos *routers* IP; adicionar funcionalidades ao plano de controlo IP, como Engenharia de Tráfego utilizando *routing* sujeito restrições (*constraint-based routing*), já presente no plano de controlo ATM [41].

Pouco depois de ser criado, a utilização de MPLS já tinha sido estendida. Surgiram aplicações com serviços *Circuit Cross Connect* (CCC), ATM, Frame Relay e redes virtuais privadas a correr sobre infraestruturas MPLS/IP. As funcionalidades de *routing* sujeito a restrições evoluíram para aplicações como *Fast Reroute* e DiffServ-TE (*Differentiated Services Traffic Engineering*). Também a ideia original do plano de controlo único para ATM e IP evoluiu para GMPLS (*Generalized Multi-Protocol Label Switching*), que oferece um plano de controlo único não só para ATM e IP mas também para SONET/SDH e OXC (*Optical Cross Connect*). Mais tarde a utilização de MPLS foi estendida às redes VPLS (*Virtual Private LAN Services*) [41]. Estas funcionalidades da tecnologia MPLS foram-se alterando ao longo do tempo, sendo otimizadas e adaptadas à realidade do presente. Originalmente criada para provedores de serviço, a MPLS penetrou gradualmente no ambiente empresarial, começando a conquistar espaço na comunidade das telecomunicações.

3.1. IP/MPLS

Com o crescimento explosivo da Internet, os fornecedores de serviços IP (ISP –Internet Service Providers) necessitam de dispor de uma infraestrutura de rede (*backbone*) de elevada capacidade e pequena latência, flexível, escalável, e que permita oferecer Qualidade de Serviço diferenciada. A gestão destas redes requer mecanismos poderosos de Engenharia de Tráfego, isto é, a capacidade de mapear fluxos na topologia física, de forma a distribuir o tráfego de forma equilibrada na rede, e assim, conseguir utilização eficiente de recursos, evitar congestionamento e melhorar o desempenho global.

Atualmente, as redes dos fornecedores de serviço são constituídas por um núcleo de alta velocidade que interliga *routers* IP localizados na periferia, onde se situa a inteligência de processamento. A arquitetura CLIP (Classical IP over ATM), do tipo *overlay*, segue este modelo mas apresenta diversas limitações, o que justificou a criação de novas soluções como o MPLS. MPLS, com a sua arquitetura de comutação multi-camada, integra técnicas de comutação de pacotes baseadas em etiquetas, realizadas na camada de ligação de dados, e técnicas de encaminhamento características da camada de rede. [42]

A arquitetura CLIP caracteriza-se por dois tipos de equipamentos – *routers* IP e comutadores ATM – e duas topologias segregadas (topologia física ATM na qual é sobreposta a topologia lógica IP). Os *routers* e os comutadores não partilham informação topológica, o que impede uma otimização conjunta de recursos. Cada rede tem os seus protocolos próprios de encaminhamento e sinalização e o seu espaço de endereçamento, com naturais duplicações e ineficiências. Ao organizar os *routers* IP numa única LIS (*Logical IP Subnetwork*) cada router é adjacente lógico (*logical peer*) de qualquer outro. O número de Circuitos Virtuais cresce com o quadrado do número de *routers*, o que levanta problemas de escalabilidade. O conseqüente aumento do tamanho das tabelas de encaminhamento torna a sua gestão e atualização mais complexa. O tráfego de controlo cresce com o aumento do número de adjacências entre *routers* e com a replicação com efeitos multiplicativos dos avisos que recebem dos vizinhos. Em caso de reconfigurações podem criar-se situações de instabilidade que levam tempo a estabilizar. Ao contrário dos modelos *overlay*, na arquiteturas multi-camada do MPLS, existe uma única topologia e uma família de equipamentos que partilham informação topológica e executam o mesmo conjunto de protocolos, reduzindo-se assim o número de adjacências entre nós, que é da ordem de grandeza do que é habitual em redes de comutação de pacotes parcialmente emalhadas. [42]

Em redes IP, por cada pacote que recebe, um nó (*router*) toma uma decisão independente quanto ao próximo passo do percurso (*hop-by-hop routing*), com base no endereço de destino e no conteúdo atual da tabela de encaminhamento. Este método tem algumas limitações, como a decisão ser tomada exclusivamente com base em informação presente no cabeçalho do pacote, excluindo-se assim critérios baseados noutra tipo de informação para além da explicitamente transportada no pacote. Outra limitação é o facto de o cabeçalho transportar mais informação do que a que é utilizada para seleccionar o percurso (*next hop*), o que significa que nem é explorada a possibilidade de usar outra

informação disponível no cabeçalho (e.g., campo ToS – Type of Service). O processamento do cabeçalho IP é mais complexo do que o processamento de identificação de etiquetas, como acontece no MPLS. No domínio MPLS os pacotes são comutados exclusivamente com base numa etiqueta que transportam num cabeçalho adicional.

As arquiteturas de comutação multi-camada, de que o MPLS se constitui como modelo, têm como ideia base combinar técnicas simples e robustas de encaminhamento na camada de rede (*Layer 3 - Routing / Control*) e técnicas de comutação rápida, eficientes e escaláveis, na camada de ligação de dados (*Layer 2 - Forwarding / Switching*). O funcionamento de MPLS pode ser dividido em componente de transporte de pacotes e componente de controlo, como apresentado na Figura 3.1.1. Estas componentes são abordados nas secções seguintes.

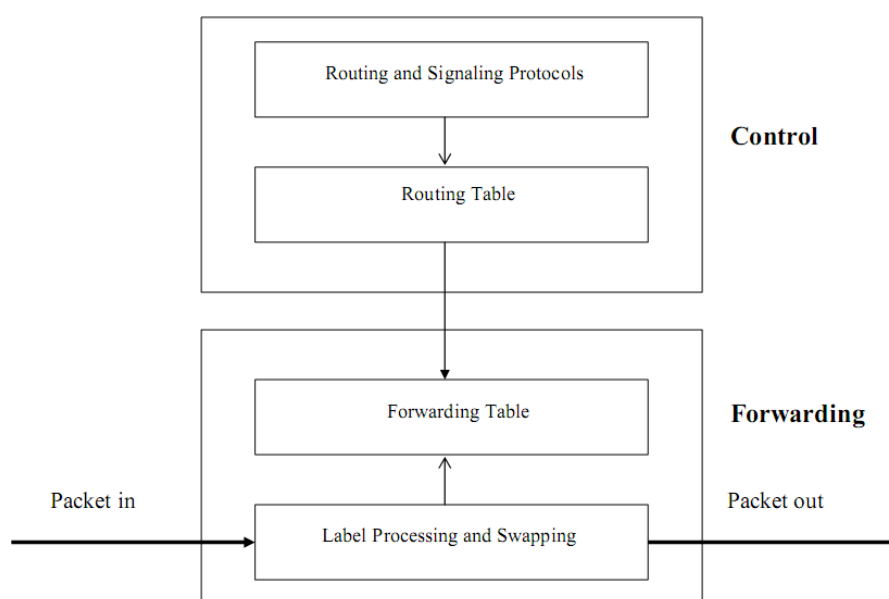


FIGURA 3.1.1 - COMPONENTES DE CONTROLO E TRANSPORTE DO MPLS, RETIRADO DE [42]

A componente de transporte do MPLS é o encaminhamento de pacotes na rede. Isto inclui a consulta das tabelas de encaminhamento, a troca de etiquetas (*labels*) e todo o processo de encaminhamento de um pacote desde que ele entra até que sai da rede.

Uma rede MPLS é composta por dois tipos de *routers*: *routers* da periferia da rede (LER - *Label Edge Router*) e *routers* do núcleo da rede (LSR - *Label Switching Router*). Os nós na periferia, LERs, adicionam a etiqueta ao pacote quando este entra na rede MPLS e tiram-na quando este sai da rede. Nos nós do núcleo, LSRs, a etiqueta é processada e eventualmente atualizada.

A estrutura do cabeçalho MPLS é apresentada na Figura 3.1.2. Tem 32 bits e é constituído por quatro campos [41]:

- Label (20 bits) - Valor da etiqueta do pacote. O encaminhamento do pacote é feito baseado neste valor, pois este serve como *index* na tabela de encaminhamento MPLS;

- Exp (3 bits) - Uso experimental. Pode ser utilizado para *Class of Service* e indica aos *routers* em que fila (*queue*) é que o pacote deve ser colocado. Permite suportar serviços diferenciados (*DiffServ*);
- S (1 bit) - Indicador de fundo da pilha (*bottom of stack*). Os cabeçalhos MPLS podem ser acumulados numa pilha. Este bit é colocado a 1 se o pacote for o último da pilha;
- TTL (8 bits) - Tempo de vida (*Time To Live*). Serve para prevenir ciclos (*loops*) no encaminhamento e pode ter utilizado para definir o caminho do pacote na rede MPLS. É decrementado à medida que o pacote é encaminhado por cada *router* e é descartado quando o seu valor chegar a zero.

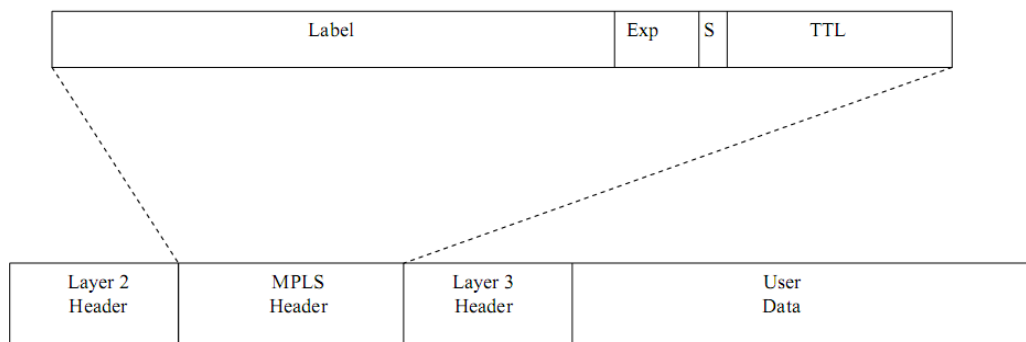


FIGURA 3.1.2 - ESTRUTURA DO CABEÇALHO MPLS, RETIRADO DE [42]

O estabelecimento de túneis MPLS, LSPs (*Label Switched Paths*), é necessário para se poder realizar o transporte de pacotes num domínio MPLS. Exige um conjunto de passos que podem ser realizados de acordo com várias estratégias [42]:

- Descoberta e seleção de rotas;
- Criação de Etiquetas;
- Associação de etiquetas a cada FEC ao longo da rota LSP. O FEC (*Forwarding Equivalence Class*) é o agrupamento de pacotes transportados de forma idêntica, isto é, pelo mesmo percurso e sujeitos ao mesmo tratamento, pelo que podem ser mapeados na mesma etiqueta;
- Distribuição da informação sobre a associação etiqueta / FEC pelos LSR que fazem parte do LSP a estabelecer (LDP - *Label Distribution Protocol*). O LDP permite que os nós

adjacentes partilhem informação presente nas suas tabelas de comutação relativas a um LSP.

Todos os nós participam nos protocolos de encaminhamento, de distribuição de etiquetas e outros protocolos de controlo, mas as funções mais complexas associadas ao transporte de pacotes são realizadas pelo LER de entrada. Estes *routers* fazem a interface com as redes externas (terminação do protocolo IP), classificam os pacotes IP (associação a um FEC e um LSP), associam uma etiqueta a um FEC/LSP e adicionam-na ao pacote, e determinam a porta de saída.

Os nós interiores (LSR) realizam a função de comutação (processamento e troca de etiquetas), consultam a tabela de encaminhamento e determinam a porta de saída. Já os LER de saída, removem a etiqueta e processam o pacote IP, decidindo sobre o respetivo encaminhamento. Na Figura 3.1.3 pode ser observado este processo de encaminhamento.

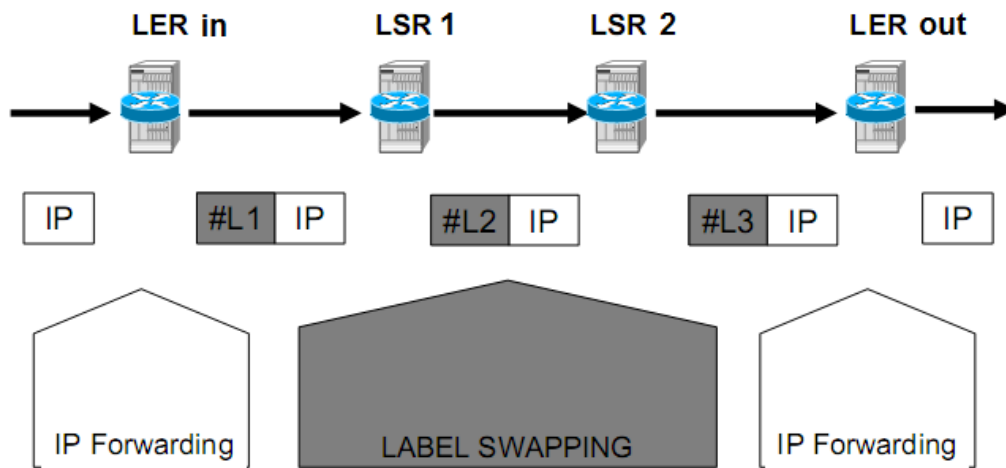


FIGURA 3.1.3 - ENCAMINHAMENTO DE PACOTES MPLS, ADAPTADO DE [42]

Na Figura acima podemos observar que o pacote IP chega à rede MPLS pelo *router* LER in, no qual é adicionada a etiqueta e determinado o FEC e LSP. É encaminhado para o LSR 1 e LSR2 onde a etiqueta é trocada e o pacote encaminhado para o nó de saída, LER out. Este nó retira a etiqueta e envia o pacote IP para fora da rede MPLS.

Uma técnica utilizada em redes MPLS é a *Penultimate Hop Pop* (PHP), que como o nome indica, faz com que o penúltimo nó da rede retire a etiqueta ao pacote. No caso apresentado na Figura 3.1.3, seria o LSR 2 o penúltimo nó (penúltimo salto do pacote na rede MPLS) que removeria a etiqueta do pacote e enviava para o LER out. Isto simplifica o processamento requerido no *router* de saída. Se este esquema não for aplicado, o LER out teria de consultar a tabela de encaminhamento baseada em etiquetas para determinar que é o último salto do pacote e retiraria a etiqueta ao pacote. Posteriormente, teria também de consultar a tabela de encaminhamento IP para determinar qual a porta de saída. A utilização do PHP faz com que o primeiro passo seja realizado pelo LSR adjacente, que

envia o pacote para o LER de saída já sem etiqueta. O PHP exige que haja troca de informação entre estes *routers*, por isso são reservadas etiquetas especiais que informam o LSR da sua condição de penúltimo nó. Como já foi referido, os nós LER têm mais funcionalidades que os LSR e esta técnica tem como objetivo aliviar o processamento no LER de saída. [41]

Para além da componente de Transporte, o MPLS também tem componente de Controlo. Com recurso a protocolos de encaminhamento e sinalização, esta componente mantém a informação topológica necessária para a construção e manutenção das tabelas de encaminhamento e de comutação. As rotas usadas para o transporte de pacotes no interior dum domínio MPLS, entre nós de entrada e de saída, são determinadas com base em protocolos de encaminhamento ou por outros meios (ex.: encaminhamento explícito).

Em cada nó, a informação sobre rotas mantida numa tabela de encaminhamento é usada para construir a tabela de comutação que associa um par <porta, etiqueta> na entrada a um par <porta, etiqueta> na saída, realizando-se deste modo o mapeamento entre rotas e etiquetas (*label binding*). Para manter a consistência das tabelas de comutação dos nós, é necessário um protocolo de distribuição de etiquetas. Alguns protocolos, como RSVP-TE (*Resource Reservation Protocol - Traffic Engineering*), foram estendidos de maneira a poderem ser utilizados no MPLS. Outro protocolo criado propositadamente para distribuição de etiquetas em MPLS é o LDP (*Label Distribution Protocol*). [42]

O LDP configura os LSPs da rede com recurso a um mapeamento das opções de encaminhamento provenientes de protocolos IP (tal como IGP - *Interior Gateway Protocol*). Após o mapeamento, os LSRs adjacentes trocam mensagens com informação sobre a opção de encaminhamento tomada por cada um. Este encaminhamento pode ser feito salto a salto (à semelhança do encaminhamento IP) e o LSP resultante desta troca de mensagens engloba apenas dois LSRs, ou pode ser feito de maneira ao LSP resultante definir um percurso que atravessa toda a rede MPLS. Os dois LSRs que trocam mensagens de controlo chama-se LDP *peers*, e adquirem informação um do outro simultaneamente devido à bidirecionalidade do protocolo LDP [43, 44].

O RSVP-TE resulta da adição de algumas funcionalidades de engenharia de tráfego ao protocolo original, RSVP. Este protocolo é caracterizado por permitir estabelecer ligações nas redes IP baseando-se na reserva de largura de banda. Este processo é iniciado pelo nó de acesso à ligação que envia uma mensagem na direcção do caminho que pretende reservar. Cada nó intermédio desta ligação confirma a disponibilidade de largura de banda requisitada e encaminha a mensagem até ao último nó do LSP. Este último responde com uma mensagem de confirmação e reserva a largura de banda necessária e as etiquetas a serem usadas no LSP. Quando é definido um RSVP no MPLS, é criada uma LSP em que o fluxo de tráfego resultante possui uma elevada flexibilidade e robustez [43, 44]

Num domínio MPLS, fluxos de tráfego que recebem o mesmo tratamento por parte da rede são associados num mesmo FEC, o que permite diferenciar classes de tráfego, que podem ser transportadas em LSPs diferentes, originando serviços diferenciados (*DiffServ*). No modelo *DiffServ*, fluxos de pacotes

com o mesmo comportamento alvo constituem um *Behaviour Aggregate* (BA). Em nós de entrada num domínio *DiffServ*, os pacotes são classificados e marcados com um código correspondente ao respetivo BA, o que permite selecionar um comportamento (PHB – *Per Hop Behaviour*) que determina o tratamento que receberão em cada nó do domínio (escalonamento, precedência de descarte, etc.). MPLS oferece mecanismos apropriados para o suporte de *DiffServ*, existindo várias alternativas para associar BAs a FECs e mapeá-los em LSPs. Uma solução simples consiste em usar um LSP para suportar até oito BAs de um dado FEC. Neste caso, o campo Exp do cabeçalho MPLS é usado para determinar o PHB a aplicar aos pacotes. [42]

Dado o sucesso da tecnologia MPLS, o IETF especificou a arquitetura GMPLS (*Generalized Multiprotocol Label Switching*) que estende o MPLS de modo a incluir múltiplas dimensões de comutação:

- Temporal – comutação de pacotes (IP, ATM) e de circuitos (SONET/SDH, PDH);
- Comprimento de onda – comutação ótica de circuitos;
- Espacial – comutação de fibras ou portas.

Uma arquitetura unificada do plano de controlo permite controlar uma variedade de planos de transporte de dados, independentemente do tipo de meio ou de equipamento, o que exige extensões aos protocolos de sinalização e encaminhamento já existentes. Em GMPLS existe um Plano de Controlo único, comum a vários Planos de Dados. O Plano de Dados é estendido para suportar comutação de pacotes (MPLS), comprimentos de onda (MPLS), *time slots* ou fibras, o que faz com que uma etiqueta possa ter diferentes formas, conforme o ambiente:

- Ethernet – a etiqueta é transportada num *shim header* entre cabeçalhos Ethernet e IP;
- ATM – a etiqueta é um VPI/VCI e viaja com a célula;
- Frame Relay – a etiqueta é um DLCI e viaja com a trama;
- TDM – a etiqueta é um time slot;
- WDM – um comprimento de onda pode ser usado como etiqueta.

Esta arquitetura aumenta a flexibilidade das redes MPLS, tornando possível implementá-las sobre outras tecnologias e otimizar as redes existentes. [42]

3.2. MPLS-TP

A tecnologia MPLS, também conhecida como IP/MPLS, é considerada um sucesso no mundo das telecomunicações, mas não poderia ser implementada em redes de transporte por não cumprir certos requisitos necessários a estas redes. Em 2006, o ITU-T (*International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector*) desenvolveu o T-MPLS (*Transport - MPLS*), uma tecnologia baseada em MPLS que pudesse ser implementada em redes de transporte. Mas esta nova tecnologia não era completamente compatível com a original, o que fez com que o IETF (*Internet Engineering Task Force*) se juntasse ao ITU-T formando uma *Joint Working Team* com o objetivo de desenvolver uma tecnologia para redes de transporte baseada em MPLS. Assim, em 2008, foi criado o MPLS-TP, uma tecnologia de comutação de pacotes para redes de transporte [6].

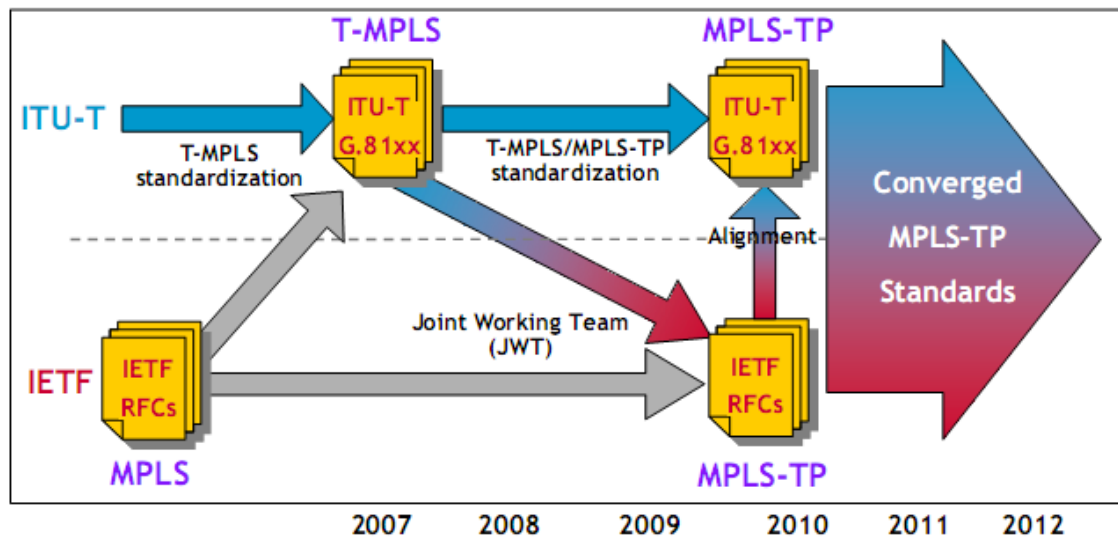


FIGURA 3.2.1 - CONVERGÊNCIA DO IETF E ITU-T PARA O MPLS-TP, RETIRADO DE [13]

3.2.1. REQUISITOS PARA UMA REDE DE TRANSPORTE

Uma rede de transporte é definida pelo conjunto de infraestruturas, seja *hardware* ou *software*, que permitem transportar tráfego de um ponto para o outro dentro do seu domínio. Geralmente, a distância entre pontos é relevante, e é uma das funções da rede de transporte não deixar que a informação se degrade. Para satisfazer os requisitos de uma rede de transporte, a rede implementada por provedores de serviço tem de ter certas características [45]:

- Eficiência de custo - Uma rede de transporte tem um grande impacto económico para o operador, por isso é necessário que a rede tenha características que impeçam o aumento desnecessário do custo total da rede:
 - Escalável - A rede tem de ser fácil de expandir suportando qualquer quantidade de tráfego cliente adicionado.

- Transparente - Tem de ter a habilidade de transmitir qualquer tipo de tráfego cliente, ou seja, suportar múltiplos serviços.
 - Agregação - A rede tem de usar de modo eficiente os seus recursos, agregando mais camadas cliente numa camada servidor e, conseqüentemente, preencher o máximo possível as ligações físicas e lógicas entre os elementos da rede.
- Fiável - O tempo entre falhas na infraestrutura tem de ser grande suficiente para não permitir que possíveis imparidades produzam interrupções do serviço. Frequentemente, a rede de transporte tem de estar a funcionar de modo estável mais de 99.999% do tempo [13].
 - Resiliente - A tecnologia de transporte tem de possuir políticas de proteção apropriadas e dedicadas, de maneira a minimizar o impacto de anomalias que possam ocorrer na rede. Quanto melhor for a proteção e restauro da rede, maior é a sua disponibilidade. Uma rede de transporte tem de ter um tempo máximo de restauro de 50 ms após uma falha.
 - Engenharia de Tráfego - A tecnologia de transporte tem de suportar Engenharia de Tráfego através da rede. Se os recursos necessários ao transporte forem reservados antes da entrega da informação, a rede fica livre de congestionamento de tráfego e o operador pode efetuar um melhor planeamento da rede.
 - Manutenção - A tecnologia de transporte necessita de incluir políticas de OAM eficientes e dedicadas, permitindo o controlo da largura de banda em qualquer ponto da rede. Assim, qualquer anomalia na rede pode ser detetada e notificada ao operador de rede. Isto faz acelerar o processo de resolução de problemas, seja remotamente ou manualmente no local.
 - Gestão - A tecnologia de transporte tem de suportar operações relacionadas com a configuração, controlo e monitorização da rede remotamente.

3.2.2. ALTERAÇÕES EFETUADAS

Para cumprir os requisitos mencionados na secção anterior, a tecnologia MPLS-TP divergiu da tecnologia original em certas características. O IETF e ITU-T trabalharam em novas funcionalidades que adicionaram à tecnologia MPLS-TP de maneira a poder ser implementada em redes de transporte e redes metropolitanas. Foram efetuadas várias alterações a nível de plano de dados, plano de controlo, OAM e sobrevivência da rede. Na Figura 3.2.2.1 observam-se algumas das divergências das duas tecnologias.

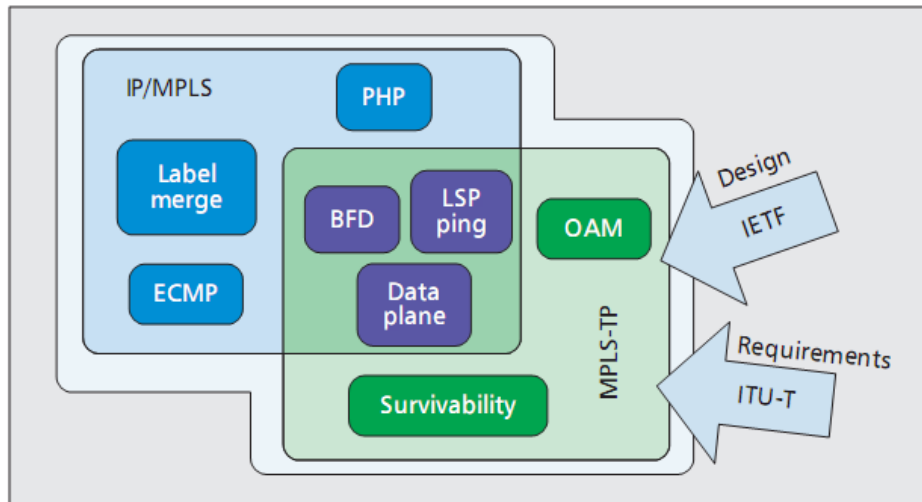


FIGURA 3.2.2.1 - ALGUMAS DIVERGÊNCIAS DO IP/MPLS COM O MPLS-TP, RETIRADO DE [6]

Plano de dados

Algumas alterações foram necessárias em relação ao plano de dados. De seguida são explicadas as funcionalidades que se excluíram e as que foram adicionadas à tecnologia de transporte.

- O MPLS-TP faz uso das anteriores arquiteturas e mecanismos de encaminhamento de pacotes MPLS, contudo, deve operar sem recurso à tecnologia IP. Para tal acontecer, não pode recorrer a mecanismos de encaminhamento de pacotes provenientes de protocolos como o LDP, pelo que deve ser capaz de possuir estas funcionalidades nos seus planos de controlo e OAM [44, 46, 47].
- Na tecnologia original, os LSPs eram unidirecionais. Numa ligação ponto-a-aponto, os pacotes que circulavam em direções diferentes seguiam LSPs distintas. Esta característica dificulta a monitorização e controlo de tráfego. Por estas razões, no MPLS-TP, os LSPs são bidirecionais, obrigando os pacotes em sentidos diferentes a passarem pelos mesmos LSRs [47].
- A funcionalidade de PHP (Penultimate Hop Popping) foi desativada, apesar de a sua utilização ser opcional. Esta função foi largamente discutida já que, apesar de libertar capacidade de processamento nos LERs, remove etiquetas de OAM a pacotes que teriam

como função atuar no último *router* de um LSP. Assim, nestes últimos *routers* seria impossível aplicar as funções normais de OAM. Pelos mesmos motivos, a funcionalidade de agregar vários LSPs também foi desativada [47].

- A funcionalidade de Equal Cost Multi-Path (ECMP) foi removida. Esta permite que o tráfego entre dois *routers* seja dividido entre dois ou mais caminhos, se estes apresentarem o mesmo custo. A utilização desta funcionalidade pode resultar numa separação dos pacotes OAM e os pacotes de dados, quando estes devem seguir juntos no mesmo percurso. Para além disso, é outra funcionalidade que dificulta a monitorização do tráfego na rede [47].
- As ligações multiponto-a-multiponto também foram removidas, pois este tipo de ligação não faz sentido numa rede de transporte. A tecnologia MPLS-TP opera apenas em ligações ponto-a-ponto e ligações ponto-a-multiponto.

Plano de controlo

No plano de controlo foram definidas duas opções, o controlo estático e o controlo dinâmico. O controlo estático recorre a *Network Management System* (NMS) para o estabelecimento de LSPs estáticos. Já o controlo dinâmico usa protocolos de controlo independentes (por ex.: RSVP-TE) para total automação da rede. Note-se que tanto o controlo dinâmico como o controlo estático devem estabelecer uma clara divisão entre os planos de dados e de controlo [48].

Foram também definidas etiquetas próprias para implementar funções de OAM. Como já foi referido, estas etiquetas têm de ser transportadas no mesmo canal de comunicação que os dados de maneira a garantir coerência entre mecanismos de OAM e os LSPs. Aos pacotes OAM foram adicionadas etiquetas especiais que os identificam e acionam os mecanismos de OAM nos *routers* pretendidos.

Na tecnologia IP/MPLS, os mecanismos de OAM dos LSPs são realizados pelo protocolo IP, no entanto, o MPLS-TP tem de ser independente de tecnologias da camada superior. Para manter a transparência em relação a tecnologias da camada superior, os pacotes de OAM do protocolo IP continuam a ser aceites no MPLS-TP, mas o principal meio de gerir e controlar a rede é o *Generic Associated Channel* (G-ACh). Este mecanismo pretende ser a generalização do *Associated Channel Header* (ACh), usado inicialmente para assinalar pacotes com funções de OAM no contexto dos *pseudowires* (emulação de um ligação física dedicada sobre uma rede de comutação de pacotes).

O G-ACh é considerado um conjunto de mensagens adicionais inserido num pacote. Quando está associado a *pseudowires*, funciona da mesma forma que o ACh, mas quando é direcionado aos LSPs, possui uma etiqueta, *G-ACh Label* (GAL), que informa os *routers* desse facto. A GAL é uma etiqueta semelhante às usadas para encaminhamento, contudo possui um valor (13) que está reservado para esta indicar que contém informação OAM, e é por isso interpretada de forma diferente pelos *routers* [44, 49].

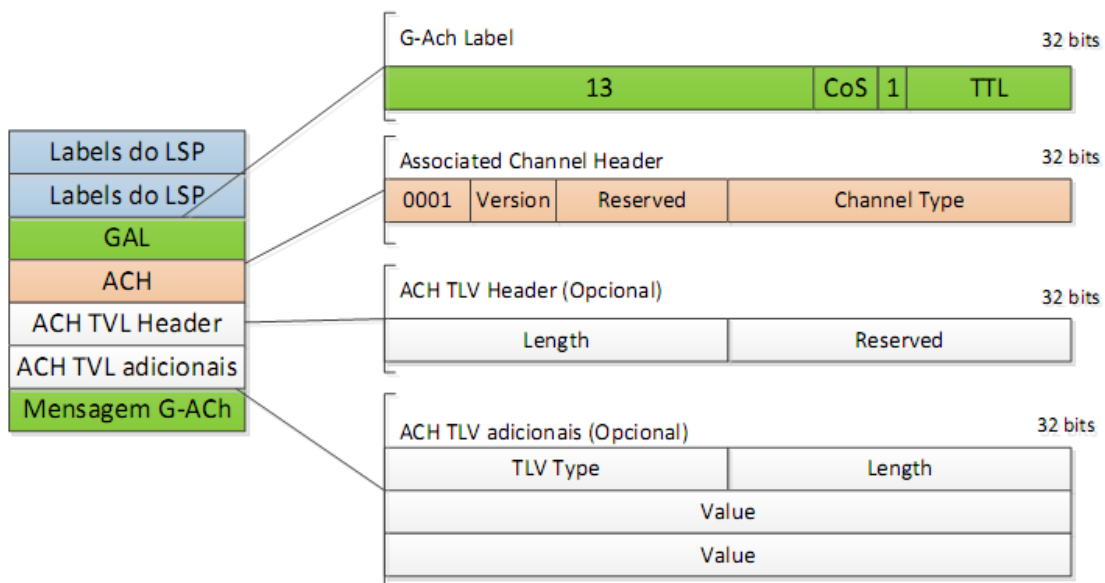


FIGURA 3.2.2.2 - CONTEÚDO DE UM PACOTE G-ACH, RETIRADO DE [44]

Na Figura 3.2.2.2 é apresentado um pacote G-ACh MPLS-TP. Após as etiquetas associadas ao LSP, está a etiqueta GAL, com o número 13, informando que o pacote possui informações de OAM. Seguidamente encontra-se a etiqueta ACH que possui os campos *Version* e *Reserved* com o valor zero, como especificado no RFC 4385, enquanto o campo *Channel Type* contém informação sobre o protocolo que está a ser alvo de controlo. As etiquetas ACH TVL *Header* e ACH TVL são opcionais e têm como função contextualizar as mensagens de G-ACh, podendo possuir informação sobre o destino ou fonte da mensagem. Uma descrição mais detalhada do G-Ach pode ser encontrada no documento RFC 5586 [49]. Quanto à localização desta etiqueta na pilha de etiquetas, em ambientes MPLS-TP, devem encontrar-se sempre no fundo da pilha e assim sendo, o bit S do GAL deve ser sempre 1 (a indicar que está no fundo da pilha) e o GAL deverá ser sempre seguido da etiqueta ACH [49].

OAM

As funcionalidades de OAM adicionadas ao MPLS-TP foram as principais alterações à tecnologia original, pois numa rede de transporte é essencial a gestão, controlo e monitorização da rede. Foram implementados mecanismos pró-ativos de deteção de falhas unidirecionais e bidirecionais, gestão de falhas com mecanismos de recuperação e implementação de gestão de performance com recurso a medições de parâmetros, como perdas e atrasos de pacotes [48].

Ao nível da deteção e localização de falhas, destacam-se cinco funcionalidades implementadas em MPLS-TP [50]:

- *Continuity Check (CC)* - Identifica falhas de modo rápido e pró-ativo. Este mecanismo recorre a outros já usados na tecnologia original, como BFD (*Bidirectional Forwarding Detection*) e LSP Ping.

- *Connectivity Verification (CV)* - Depois de a falha ser detetada, o CV permite, a pedido, verificar a localização da falha. Tal como o CC, recorre ao BFD e LSP Ping.
- *Loopback* - Permite ao operador colocar um LSP em modo *Loopback*, ou seja, os pacotes do LSP retornaram à fonte que os originou. Este mecanismo é útil para testes e medições. Recorre a etiquetas G-ACh e LSP Ping.
- *Lock* - Permite ao operador retirar de serviço um LSP. Após iniciada esta funcionalidade, somente tráfego de OAM poderá ser enviado nesse LSP. Os LSPs necessitam de entrar em modo *Lock* para, posteriormente, serem colocados em modo *Loopback*. Recorre a etiquetas G-ACh ou LSP Ping.
- *Remote Defect Indication (RDI)* - É utilizado nos LERs para comunicar defeitos. Permite ao *end point* de uma ligação reportar ao outro *end point* que detetou um defeito no *pseudowire*, LSP ou secção. Recorre ao BFD.

Sobrevivência

A sobrevivência de uma rede de transporte é de grande importância, pois indica a capacidade que tem de continuar a prestar serviços após a ocorrência de uma falha ou de degradação de recursos. Os mecanismos de proteção da rede MPLS-TP usam caminhos determinísticos e esquemas de proteção 1:1, 1+1, 1:N, tanto em arquiteturas lineares como em anel e devem permitir tempos de restauro inferiores a 50 ms. A rede deve obedecer a mensagens de OAM provenientes do operador e todas as proteções devem poder ser aplicadas a ligações ponto-a-ponto e ponto-multiponto [44, 47]. O RFC 6372 [51] indica os requisitos esperados para a sobrevivência de redes MPLS-TP e o RFC 5317 [47] apresenta alguns mecanismos baseados nas anteriores recomendações do ITU-T para o T-MPLS. De seguida, serão apresentadas algumas soluções baseadas nos requisitos e mecanismos apresentados nestes dois documentos.

Proteção linear

A proteção linear consiste na implementação de ligações adicionais que são utilizadas no caso da ligação em trabalho ser sujeita a uma falha. Pode ser efetuada nos esquemas 1:N (engloba 1:1) e 1+1.

No caso da proteção 1:1, existe um caminho de proteção para um caminho de trabalho. O caminho de proteção deve suportar tanta largura de banda como o caminho de trabalho e está geralmente desativado até ocorrer uma falha no último. No entanto, pode ser utilizado para transmitir pacotes de OAM ou informação com baixa prioridade [51]. A Figura 3.2.2.3 apresenta o esquema de proteção linear 1:1 entre os nós A e B.

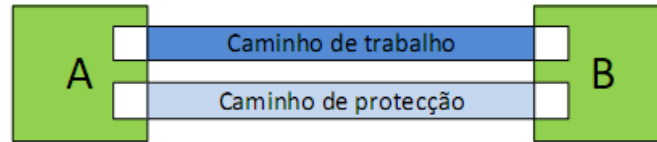


FIGURA 3.2.2.3 - PROTEÇÃO 1+1 LINEAR, RETIRADO DE [44]

No caso da proteção linear 1:N, existe um caminho de proteção para N caminhos de trabalho. O caminho de proteção dificilmente suporta largura de banda suficiente para proteger simultaneamente os N caminhos de trabalho, pelo que são usadas funções de priorização de maneira a proteger o tráfego mais crítico. Após a resolução da falha no caminho de trabalho, o tráfego deve ser automaticamente revertido para este caminho, libertando o caminho de proteção para eventuais falhas futuras [51].

No caso da proteção linear 1+1, existe um caminho de proteção para um caminho de trabalho, tal como no esquema 1:1. A diferença é que neste esquema de proteção, ambos os caminhos transmitem a mesma informação e assim, o nó recetor escolhe qual a informação a processar com base na qualidade do sinal. Esta situação apresenta desperdício de recursos mas tem a vantagem de não necessitar de qualquer protocolo de coordenação de estados entre nós.

Na maior parte dos esquemas de proteção, é necessário um protocolo de coordenação entre os nós para saber quando começa a ser enviada informação pelo caminho de proteção. Uma das propostas para este protocolo é o PSC (Protection Coordination Protocol). Este protocolo considera como domínio de proteção, a distância total de um LSP, isto é, o percurso entre dois LERs. Após um LER ser notificado sobre uma falha, deve alterar de imediato o seu estado para que a transmissão passe para o caminho de proteção. Para isso envia três mensagens PSC consecutivas através do caminho de proteção para que os outros nós do LSP também alterem o seu estado e passem a utilizar o caminho de proteção. Em sequência, deve ser enviada uma mensagem PSC a cada cinco segundos, de modo a verificar que a sessão continua ativa. A frequência destas mensagens pode ser configurada pelo operador [51, 52].

Na Figura 3.2.2.4, é apresentado o esquema lógico da geração de mensagens PSC. As funcionalidades de OAM, deteção e localização de falhas, monitorização, tal como os comandos do operador da rede, constituem as entradas no mecanismo gerador de mensagens PSC. Um plano de controlo dinâmico, pode possuir funcionalidades que lhe permitam acionar mecanismos de proteção e assim deve também ser uma das entradas do gerador de mensagens. Este mecanismo de proteção, quando utilizado em redes instáveis, pode originar uma constante alteração do caminho de trabalho, pelo que foi introduzido um *timer* WTR (Wait To Restore) com a finalidade de impedir este problema [52].

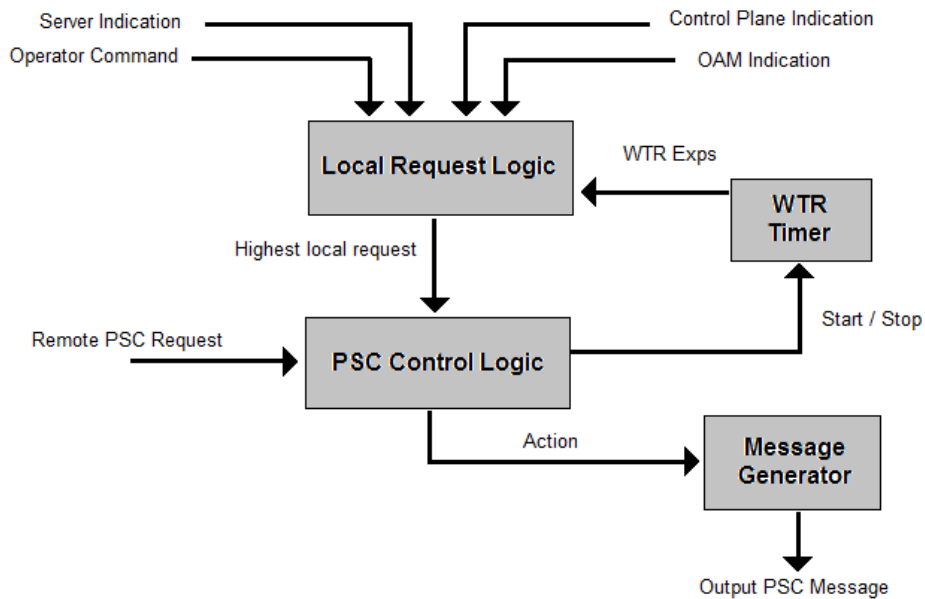


FIGURA 3.2.2.4 - LÓGICA DE FUNCIONAMENTO DA GERAÇÃO DE MENSAGENS PSC, ADAPTADO DE [44]

Proteção em Anel

Outro esquema de proteção é a topologia em anel. Esta topologia, normalmente implementada em redes SDH, é reconhecida pela sua robustez. Muitos operadores mostraram interesse na implementação de MPLS-TP com esta topologia e no documento [53] encontra-se uma lista de requisitos baseados nas expectativas dos operadores para uma rede deste tipo. Na figura 3.2.2.5 são apresentadas duas imagens de uma rede com proteção 1:1 em anel.

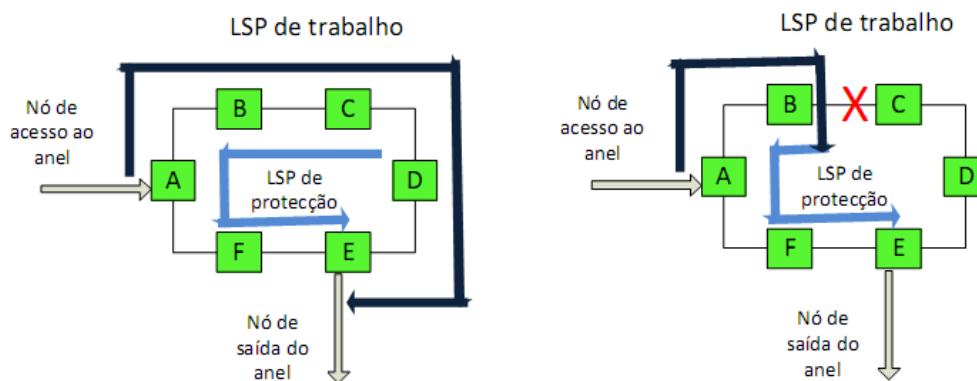


FIGURA 3.2.2.5 - PROTEÇÃO EM ANEL 1:1, RETIRADO DE [44]

Na imagem à esquerda, a rede funciona na sua normalidade, com o tráfego a ser transmitido pelo LSP de trabalho unidirecional. Na imagem à direita, verifica-se uma falha entre os nós B e C, o que obriga o nó B a mudar a transmissão para o LSP de proteção, que funciona no sentido contrário ao LSP de trabalho. No exemplo da figura, o LSP é unidirecional e o seu LSP de proteção foi otimizado. No entanto,

se o LSP de trabalho for bidirecional, a escolha do LSP de proteção não é tao linear. Se numa única direção, a escolha do LSP de proteção minimiza o percurso de restauro, na outra direção irá maximizá-lo. Deste modo, a escolha do LSP de proteção em ligações bidirecionais necessitará de ter em conta outras questões, tal como a geografia da rede, ou os serviços críticos que os LSPs transportam. [44, 53]

A monitorização de falhas no anel é feita através do envio periódico de mensagens CV, já referidas anteriormente. Na ausência desta mensagem por três períodos consecutivos, é assumida uma falha. Os nós adjacentes a esta falha alteram o seu modo de encaminhamento e informam os restantes nós do LSP do sucedido. Estes procedem à alteração do LSP de trabalho para o LSP de proteção [47].

Para os operadores, as proteções entre anéis também são um assunto importante, pois o tráfego atravessa vários anéis e pode ser perdido se ocorrer uma falha na intersecção dos anéis. No documento [53] são descritos alguns requisitos para precaver estas perdas entre anéis e aumentar de forma controlada a escalabilidade das redes MPLS-TP em anel.

4. ANÁLISE TECNO-ECONÓMICA DE UM NÓ

Neste capítulo são estudadas três arquiteturas diferentes para um nó e o seu impacto no CAPEX (despesas de capital), isto é, serão apenas abordados os custos de implementação do equipamento, deixando de fora os custos operacionais que cada arquitetura implica. Na primeira arquitetura será utilizado apenas comutação de pacotes com base na tecnologia MPLS-TP. Na segunda arquitetura acrescenta-se à primeira uma estrutura de comutação de circuitos baseada na tecnologia OTN, enquanto na terceira é acrescentada à segunda arquitetura uma componente ótica, ROADM.

O capítulo é dividido em várias secções. Na secção 4.1, é definida a estrutura genérica de um nó e o seu modo de funcionamento. Posteriormente, na secção 4.2, são caracterizadas em detalhe as três diferentes arquiteturas e o modelo de custos associado a cada uma delas. Com base nessa informação, foi realizado um programa com recurso ao MATLAB que calcula os custos das várias arquiteturas consoante um número de parâmetros. Os parâmetros que fazem variar os custos são: Tráfego Total, Percentagem de Tráfego Local e Grau do nó. Foram construídas três funções que calculam o custo total de cada arquitetura, e neste capítulo é apresentada a lógica e o funcionamento de cada uma.

4.1. ESTRUTURA DE UM NÓ

A estrutura de um nó pode ser vista como uma hierarquia onde vários equipamentos se conectam a um equipamento de tamanho superior. Para facilitar a compreensão do trabalho, são utilizados palavras de origem inglesa para denominar alguns equipamentos, pois o seu nome em português não é amplamente conhecido.

Um nó é constituído por um número de armários onde se implementam vários componentes. Este armário, mais conhecido por *rack*, é a estrutura base do nó que contém o sistema de alimentação e de refrigeração e o espaço onde se implementam os outros componentes. Uma *rack* tem espaço para montar um número de *shelves*, que são equipamentos associados a uma tecnologia e onde é efetuado o devido processamento de informação. Cada *shelf* tem um número limitado de unidades de espaço, denominados *slots*. Os *slots* são espaços vazios que permitem conectar cartas com diferentes características. Uma carta é um componente com funcionalidades bem definidas e constituído por um número de portas bidirecionais. São conectadas aos *slots* disponíveis na *shelf*, que por sua vez permite a comunicação por *backplane* entre as cartas implementadas.

As portas que constituem as cartas representam um conector ótico bidirecional que é utilizado para transmitir e receber informação a uma velocidade determinada pela sua capacidade máxima. Para cumprirem a sua função, necessitam da adaptação de um *transceiver* apropriado. Na Figura 4.1.1 é apresentada a estrutura de uma *rack* com os vários componentes implementados.

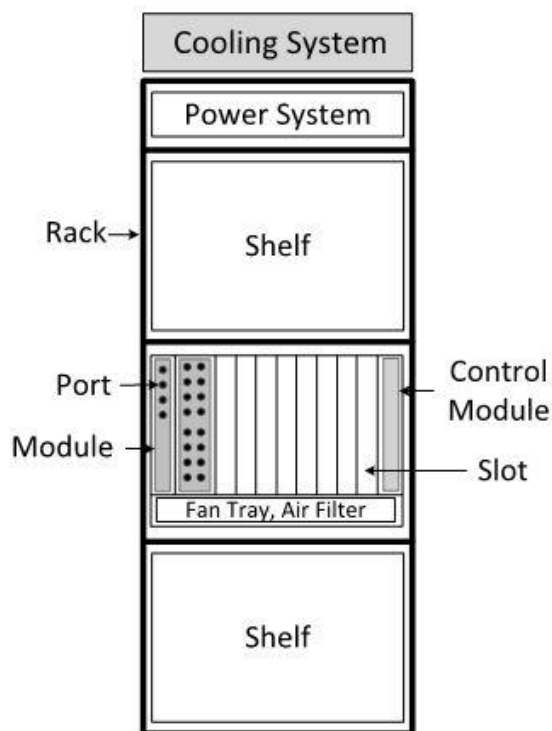


FIGURA 4.1.1 - ESTRUTURA DE UM NÓ, RETIRADO DE [22]

Esta é a estrutura base para a implementação do equipamento de comutação de pacotes, MPLS-TP, e de comutação de circuitos, OTN. O equipamento de comutação ótica, ROADM, também é implementado numa estrutura *rack*, mas a *shelf* utilizada é muito mais simples pois não há necessidade de comunicação por *backplane*. Todas as ligações entre os componentes do ROADM são feitas com cabos de fibra ótica (*patch cords*).

Apesar de a base ser a mesma, o equipamento disponível para as três tecnologias tem diferentes características. Das *shelves* às cartas, as tecnologias têm um conjunto de componentes com capacidade e custo diferentes.

Os sinais recebidos provenientes dos clientes são caracterizados por baixos débitos que, depois de multiplexados, são enviados a altos débitos, geralmente a 40 e 100 Gb/s. Este processo de multiplexagem de sinais é conhecido por *grooming* ou agregação e é apresentado na Figura 4.1.2.

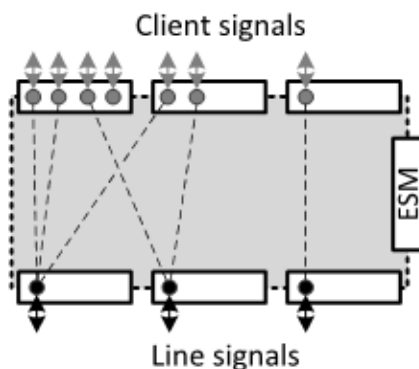


FIGURA 4.1.2 - GROOMING, RETIRADO DE [22]

4.2. ARQUITETURA DOS NÓS

Nesta secção são apresentadas em detalhe as arquiteturas dos três casos diferentes e os custos do equipamento disponível para a sua implementação. O modelo de custos utilizado pode ser encontrado em [54]. Antes de passar ao modelo de custos de cada arquitetura, é importante explicar algumas das suas características e o tráfego com que lidam.

Em relação ao tráfego de linha, assume-se que é distribuído igualmente por todos os graus do nó, isto é, cada direção associada ao nó em estudo suporta a mesma quantidade de tráfego. Para este tráfego definiram-se débitos de 100 Gb/s e, se o tráfego exceder esta capacidade das portas de linha, é enviado por uma porta de 40 G, de maneira a otimizar os custos e não perder muita eficiência na transmissão a 100 Gb/s. Por exemplo, se o tráfego total que atravessa o nó for 1080 Gb/s e o seu grau for 2, cada direção terá associada cinco portas de 100 Gb/s mais uma de 40 Gb/s.

Já para o tráfego local, os débitos são definidos a 1 e 10 Gb/s. Considera-se que o tráfego local tanto pode ser *Add* como *Drop*, ou seja, independentemente da direção que o tráfego local toma, são implementados da mesma forma os equipamentos necessários ao seu processamento. Por outras palavras, todo o tráfego é interpretado como tráfego bidirecional.

Como já foi referido, os sinais locais são agregados em sinais de linha consoante a direção do seu destino. Outro processo que faz parte do encaminhamento do tráfego é a comutação, quer seja de pacotes (PXC), de circuitos (EXC) ou de canais óticos (OXC). A diferença entre estes processos de comutação é que, na comutação de pacotes o encaminhamento é feito individualmente para cada pacote, ou seja, cada pacote que chega ao nó é processado e encaminhado para o seu destino; já na comutação de circuitos, o encaminhamento é efetuado em janelas de tempo em que se transmite uma quantidade de informação que partilha o mesmo destino; e na comutação de canais óticos, o encaminhamento é feito baseado no comprimento de onda do sinal que transporta a informação. A Figura 4.2.1 apresenta, de forma muito simples, um exemplo para cada processo de comutação.

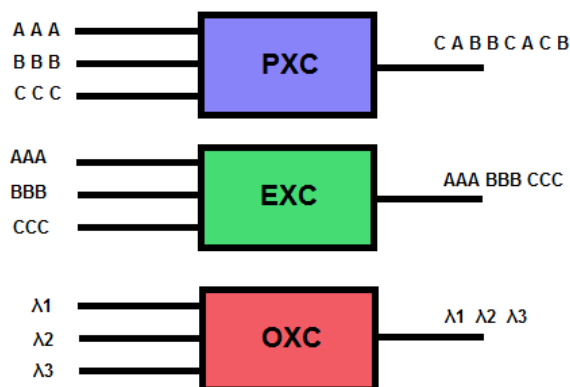


FIGURA 2.2.1 - EXEMPLOS DE PROCESSOS DE COMUTAÇÃO: PXC, EXC E OXC

4.2.1. ARQUITETURA PXC

Esta é a arquitetura mais simples de implementar pois é utilizada apenas uma *shelf* da tecnologia MPLS-TP para processar e encaminhar todo o tipo de tráfego. Apesar da sua simplicidade, esta arquitetura apresenta algumas limitações que serão estudadas mais à frente. Na Figura 4.2.1.1 apresenta-se esta arquitetura.

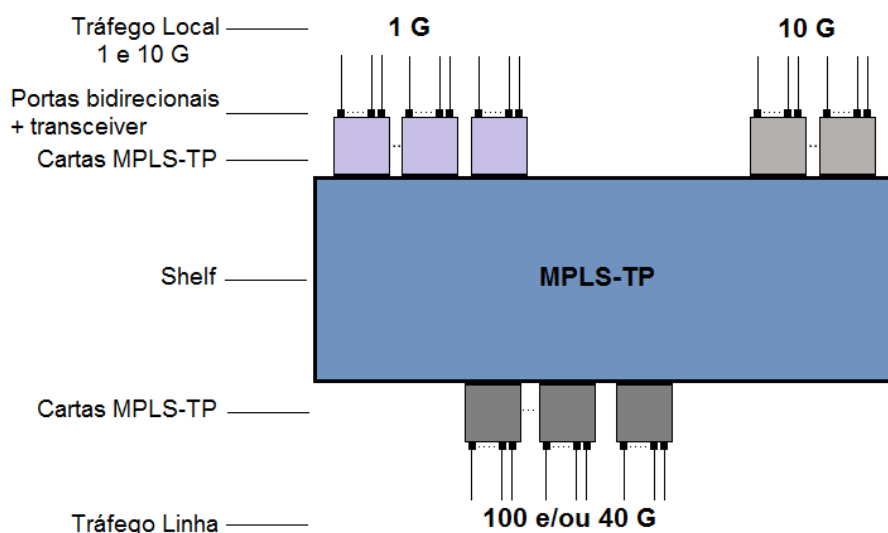


FIGURA 4.2.1.1 - ARQUITECTURA 1, PXC

Com base no modelo representado na Figura 4.2.1.1, foi feito um algoritmo capaz de calcular o custo do nó dependendo de vários parâmetros já mencionados. Para este cálculo é necessário uma tabela de custos do equipamento disponível [54], apresentados na Tabela 4.2.1.1.

SHELF MPLS-TP			
Capacidade da Shelf	#Slots	Capacidade máxima por Slot	Custo da Shelf
320 Gb/s	16	20 Gb/s	2.47
640 Gb/s	16	40 Gb/s	3.40
1.6 Tb/s	16	100 Gb/s	10.00
3.2 Tb/s	32	100 Gb/s	30.00
4.8 Tb/s	48	100 Gb/s	45.00
6.4 Tb/s	64	100 Gb/s	60.00
8 Tb/s	80	100 Gb/s	75.00

TABELA 4.2.1.1 - CUSTOS DAS SHELVES MPLS-TP [54]

Neste trabalho, a transmissão/recepção de tráfego de linha é efetuada a 100 Gb/s e, como já foi mencionado, apenas são usadas portas de 40 Gb/s caso seja necessário enviar informação que não tem espaço para ser transmitida/recebida pelas portas de 100 Gb/s, conseguindo assim uma otimização dos custos e uma maior eficiência.

Assim sendo, as duas primeiras *shelves* com capacidade por *slot* menor que 100 Gb/s, são descartadas nesta arquitetura. Já nos casos seguintes, onde o equipamento MPLS-TP só processa tráfego local a 1 Gb/s, estas *shelves* voltam a ter importância para os cálculos.

Nos *slots*, são implementadas cartas de diferentes capacidades e números de portas, dependendo do tipo de tráfego com que lidam. Na Tabela 4.2.1.2, são apresentadas as várias cartas disponíveis e os seus custos [54]. De notar que nesta arquitetura, todas as cartas são específicas para a tecnologia MPLS-TP e que cada carta ocupa apenas um *slot*.

CARTAS MPLS-TP		
Tipo de Interface	Custo	#Slots ocupadas
20x1 G	0.51	1
2x10 G	0.85	1
4x10 G	1.70	1
10x10 G	3.40	1
1x40 G	2.12	1
2x40 G	4.20	1
1x100 G	4.70	1

TABELA 4.2.1.2 - CUSTO DAS CARTAS MPLS-TP [54]

As primeiras quatro cartas da tabela são implementadas para lidar com tráfego local enquanto as três restantes, com tráfego de linha. As cartas necessitam de *transceivers* adaptados a cada tipo de porta, tendo importância não só o débito de informação mas também o alcance da ligação (*Long Reach* ou *Short Reach*). Na tabela seguinte são apresentados os custos e as características dos *transceivers* utilizados.

TRANSCIVERS		
Capacidade	Tipo	Custo
1 G	S.R.	0.02
10 G	S.R.	0.1
40 G	L.R.	5.6
100 G	L.R.	14

TABELA 4.2.1.3 - CUSTO DOS TRANSCIVERS, RETIRADO DE [54]

Para a compreensão do modelo de custos aplicado, são apresentadas as fórmulas utilizadas na construção do algoritmo. De lembrar que o algoritmo, após calcular as quantidades de cada tipo de

equipamento consoante os parâmetros de entrada definidos (Tráfego Total, Percentagem de Tráfego Local, Percentagem de Tráfego Local a 1G e Grau do nó), retorna o custo total de implementação.

A escolha da *shelf* mais apropriada é feita tendo em conta o tráfego total e o número de *slots* ocupados pelas cartas. Neste caso, cada carta ocupa um *slot*, portanto, o número total de cartas é igual ao número de *slots* ocupados. Começa-se então pelo cálculo do número de cartas necessárias.

As cartas cliente MPLS-TP 20x1 G ($N_{MPLS_{20x1}}$) são calculadas a partir da seguinte fórmula, onde $T_{local_{1G}}$ representa o tráfego local a 1 G e a função $\lceil \cdot \rceil$ (correspondente à função *ceil* no MATLAB) representa o arredondamento para o inteiro acima desse valor. A divisão do tráfego que passa nas cartas pela capacidade das mesmas é o modo de calcular o número de cartas necessário.

$$N_{MPLS_{20x1}} = \left\lceil \frac{T_{local_{1G}}}{20} \right\rceil \quad (1)$$

Para o cálculo do número de cartas cliente MPLS-TP 4x10 G ($N_{MPLS_{4x10}}$) e 2x10 G ($N_{MPLS_{2x10}}$) é usada não só uma fórmula mas também um conjunto de condições que resultam ou não na adição de uma carta 2x10 G. A função $\lfloor \cdot \rfloor$ (correspondente à função *floor* no MATLAB) faz o arredondamento para o inteiro abaixo do valor em causa, que neste caso, é a divisão do tráfego local a 10 G ($T_{local_{10G}}$) por 40 G.

$$N_{MPLS_{4x10}} = \left\lfloor \frac{T_{local_{10G}}}{40} \right\rfloor \quad (2)$$

Com esta fórmula, calcula-se o valor mínimo para $N_{MPLS_{4x10}}$.

O resto da divisão inteira do tráfego local a 10 G por 40 G vai indicar se, para além do valor mínimo já calculado, se acrescenta uma carta 4x10 G ou 2x10 G. Isto é, se o resto da divisão inteira for maior que 20 G, então:

$$N_{MPLS_{4x10}} = N_{MPLS_{4x10}} + 1 \quad (3)$$

Mas se for menor ou igual 20 G, a carta acrescentada será a 2x10 G, reduzindo as perdas de eficiência e otimizando os custos. Neste caso ter-se-á:

$$N_{MPLS_{2x10}} = 1 \quad (4)$$

As cartas que lidam com o tráfego de linha vão depender do grau do nó, isto é, para quantas direções diferentes o tráfego é encaminhado/recebido. Por uma questão de simplificação, o tráfego de linha é considerado igual para cada direção.

Todo o tráfego, seja local ou de linha, passa por estas cartas. Então, o seu número depende de outro parâmetro para além do grau, o tráfego total. Cada porta pode transmitir/receber tráfego

associado a apenas uma ligação ou direção, por isso torna-se mais simples dividir o tráfego total pelo grau do nó, calcular o número de cartas necessárias e, posteriormente, multiplicar esse número pelo grau do nó.

$$T_{dir} = T_{total}/Grau \quad (5)$$

A partir do tráfego direcional, T_{dir} , é possível calcular o valor mínimo de cartas 1x100 G por direção através da seguinte fórmula.

$$N_{MPLS_{1x100}}^i = \left\lceil \frac{T_{dir}}{100} \right\rceil \quad (6)$$

Tal como foi feito anteriormente para as cartas que lidam com o tráfego local a 10 G, também neste caso se procede a uma otimização na eficiência da utilização das cartas. Depois de saber o número mínimo de cartas 1x100 G, verifica-se o resto da divisão inteira do tráfego direcional por 100.

Se o resto desta divisão inteira for menor ou igual a 40 G, o valor de $N_{MPLS_{1x100}}^i$ não se altera e ter-se-á uma carta 1x40 G por direção.

$$N_{MPLS_{1x40}}^i = 1 \quad (7.1)$$

Já se o resultado da divisão inteira for maior que 40 G mas menor ou igual a 80 G, ter-se-á uma carta 2x40 G por direção.

$$N_{MPLS_{2x40}}^i = 1 \quad (7.2)$$

No entanto, se o resultado for maior que 80 G, o número de cartas é incrementado.

$$N_{MPLS_{1x100}}^i = N_{MPLS_{1x100}}^i + 1 \quad (7.3)$$

Como já foi referido, estes são os números de cartas por cada direção que o tráfego de linha toma. Dito de outra maneira, são os números de cartas por unidade de grau do nó, ficando o número total da seguinte forma:

$$N_{MPLS_{1x100}} = N_{MPLS_{1x100}}^i \times Grau \quad (8)$$

$$N_{MPLS_{1x40}} = N_{MPLS_{1x40}}^i \times Grau \quad (9)$$

$$N_{MPLS_{2x40}} = N_{MPLS_{2x40}}^i \times Grau \quad (10)$$

Sabendo o número de cada tipo de carta, calcula-se o seu número total. Como já foi referido, este cálculo resulta também no número de *slots* ocupados, pois cada carta ocupa um *slot*.

$$N_{LC_{MPLS}} = N_{MPLS_{1x100}} + N_{MPLS_{2x40}} + N_{MPLS_{1x40}} + N_{MPLS_{4x10}} + N_{MPLS_{2x10}} + N_{MPLS_{20x1}} \quad (11)$$

Com o número total de cartas, $N_{LC_{MPLS}}$, e com o valor do tráfego total no nó, aplicam-se duas condições para a escolha das *shelves* apresentadas na Tabela 4.2.1.1: a capacidade da *shelf* tem que ser maior ou igual ao tráfego total e o seu número de *slots* disponíveis tem de ser maior do que o número total de *slots* ocupados pelas cartas, escolhendo sempre a *shelf* menos dispendiosa que cumpra estas duas condições.

Para o cálculo dos valores quantitativos do equipamento necessário, falta apenas o número de *transceivers*. Para as interfaces 1 e 10 G, calcula-se o número de *transceivers* S.R. a partir do tráfego associado às respetivas interfaces, pois pode haver algumas portas não utilizadas.

$$N_{Tx_{1G}} = \left\lceil \frac{T_{local_{1G}}}{1} \right\rceil \quad (12)$$

$$N_{Tx_{10G}} = \left\lceil \frac{T_{local_{10G}}}{10} \right\rceil \quad (13)$$

Já para as interfaces 40 e 100 G, o número de *transceivers* L.R. obtém-se multiplicando o número das cartas pelo número de portas das mesmas.

$$N_{Tx_{40G}} = N_{MPLS_{1x40}} \times 1 + N_{MPLS_{2x40}} \times 2 \quad (14)$$

$$N_{Tx_{100G}} = N_{MPLS_{1x100}} \times 1 \quad (15)$$

A diferença no cálculo do número dos *transceivers* reside na falta de eficiência que as cartas do acesso local podem ter em comparação com as de linha. Utilizar cartas 20x1 G, 4x10 G e 2x10 G pode resultar na não utilização de algumas portas destas cartas, e por isso, o cálculo baseia-se no valor do tráfego com que estas lidam. O mesmo não acontece nas cartas de linha MPLS-TP, pois a existência de cartas 1x40 G e 2x40 G permite uma otimização de eficiência na utilização das portas de linha, resultando na utilização de todas as portas.

Sabendo já as quantidades necessárias de cada componente, basta multiplicá-las pelo seu respetivo custo, apresentado nas Tabelas 4.2.1.1, 4.2.1.2 e 4.2.1.3. Assim se calcula o custo total das cartas ($C_{LC_{MPLS}}$) e o custo total dos *transceivers* (C_{Tx}).

$$C_{LC_{MPLS}} = N_{MPLS_{1x100}} \times C_{MPLS_{1x100}} + N_{MPLS_{2x40}} \times C_{MPLS_{2x40}} + N_{MPLS_{1x40}} \times C_{MPLS_{1x40}} + N_{MPLS_{4x10}} \times C_{MPLS_{4x10}} + N_{MPLS_{2x10}} \times C_{MPLS_{2x10}} + N_{MPLS_{20x1}} \times C_{MPLS_{20x1}} \quad (16)$$

$$C_{Tx} = N_{Tx_{1G}} \times C_{Tx_{1G}} + N_{Tx_{10G}} \times C_{Tx_{10G}} + N_{Tx_{40G}} \times C_{Tx_{40G}} + N_{Tx_{100G}} \times C_{Tx_{100G}} \quad (17)$$

O cálculo final dos custos desta arquitetura é o somatório dos custos de todo o equipamento implementado. Sendo $C_{shelf_{MPLS}}$ o custo da *shelf* escolhida, o custo total desta arquitetura, C_{PXC} , calcula-se pela seguinte equação.

$$C_{PXC} = C_{LC_{MPLS}} + C_{shelf_{MPLS}} + C_{Tx} \quad (18)$$

4.2.2. ARQUITETURA PXC+EXC

Nesta arquitetura é acrescentada uma *shelf* da tecnologia OTN com o objetivo de ultrapassar algumas limitações da arquitetura anterior e observar as variações do custo total das arquiteturas.

Assim, a *shelf* MPLS-TP terá apenas de processar o tráfego local a 1 Gb/s e agregar estes sinais em sinais 10 Gb/s. O tráfego local a 10 G e o tráfego proveniente do equipamento MPLS-TP também a 10 Gb/s é multiplexado na *shelf* OTN e encaminhado por comutação de circuitos para as portas de linha onde é transmitido a 100 Gb/s e se necessário, por portas 40 G. Isto para o caso de o tráfego ter como origem o acesso local e destino a linha de transporte. No caso de o tráfego ter a direção contrária (da linha para o acesso local), acontece o contrário: O equipamento OTN recebe o tráfego linha, desmultiplexa os sinais de tráfego local, transmite estes sinais a 10 Gb/s uns para o equipamento MPLS-TP e outros diretamente para o seu destino. Os sinais enviados para a *shelf* MPLS-TP são encaminhados através de comutação de pacotes para o acesso local. Na Figura 4.2.2.1 é apresentada esta arquitetura.

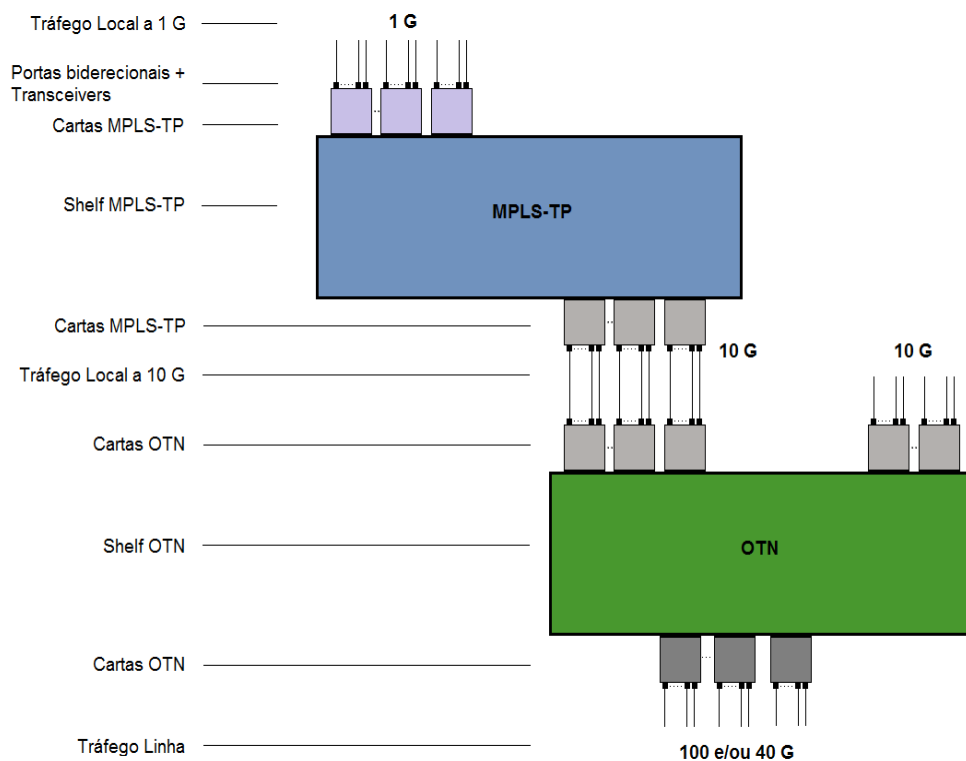


FIGURA 4.2.2.1 - ARQUITECTURA 2, PXC+EXC

Depois da compreensão do funcionamento desta arquitetura, segue-se o modelo de custos e a apresentação das fórmulas mais importantes do algoritmo construído para a obtenção de resultados.

Os custos do equipamento MPLS-TP e dos transceivers já foram apresentados nas Tabelas 4.2.1.1, 4.2.1.2 e 4.2.1.3. Nas seguintes Tabelas, 4.2.2.1 e 4.2.2.2, apresentam-se os custos do equipamento OTN, *shelves* e cartas.

SHELF OTN			
Capacidade da Shelf	#Slots	Capacidade máxima por Slot	Custo da Shelf
1.6 Tb/s	16	100 Gb/s	7.30
3.2 Tb/s	32	100 Gb/s	12.00
6.4 Tb/s	64	100 Gb/s	30.00
12.8 Tb/s	128	100 Gb/s	75.00

TABELA 4.2.2.1 - SHELVES OTN, RETIRADO DE [54]

Para além de uma *shelf* OTN, necessita-se de uma *shelf* MPLS-TP, e ao contrário da arquitetura anterior, onde não se podia utilizar as primeiras (320 e 640 Gb/s), agora essas duas *shelves* são perfeitamente uteis. A não utilização deste equipamento na arquitetura PXC deve-se ao facto de ser

necessário portas de 100 G para transmissão/recepção de tráfego de linha. Já nesta arquitetura, o equipamento responsável pelo encaminhamento e multiplexagem de tráfego de linha vai ser OTN, que tem disponível 100 Gb/s por *slot*, como se pode verificar na Tabela 4.2.2.1.

Podemos verificar que as *shelves* OTN são um pouco mais económicas que as MPLS-TP, mas o mesmo não se passa em relação às cartas. A Tabela 4.2.2.2 diz respeito às cartas OTN, disponíveis em [54].

CARTAS OTN	
Tipo de Interface	Custo
10x10 G	5.00
2x40 G	6.40
1x100 G	12.00

TABELA 4.2.2.2 - CARTAS OTN, RETIRADO DE [54]

Estas são as únicas cartas apropriadas para esta arquitetura, não estando disponíveis mais cartas com portas 10 G ou 40 G. Este facto torna o algoritmo um pouco mais complexo numa das suas secções e pode gerar alguma ineficiência na utilização destes equipamentos.

De seguida, apresentam-se as fórmulas mais importantes do algoritmo construído para o cálculo dos custos desta arquitetura. Primeiro é calculado o custo do equipamento MPLS-TP, depois do OTN, e por fim, somam-se os dois custos para obter os resultados finais.

O número de cartas 20x1 G MPLS-TP é calculado da mesma forma como na arquitetura anterior, equação (1), dividindo o tráfego processado nestas estas cartas pela sua capacidade e escolhendo sempre o número inteiro igual ou superior ao resultado.

$$N_{MPLS_{20x1}} = \left\lceil \frac{T_{local_{1G}}}{20} \right\rceil \quad (1)$$

Assume-se que se o tráfego for menor que 320 Gb/s, a *shelf* implementada será a primeira da Tabela 4.2.1.1, com capacidade de 20 G por *slot*. Neste caso, não podem ser usadas cartas 4x10 G, apenas de 2x10 G.

$$N_{MPLS_{2x10}} = \left\lceil \frac{T_{local_{1G}}}{20} \right\rceil \quad (19.1)$$

Mas se a *shelf* tiver maior capacidade por *slot* (40 ou 100 G), dá-se prioridade ao uso de cartas 4x10 G. Se necessário, é implementada uma carta de 2x10 G para processar o tráfego resultante do resto da divisão inteira do tráfego local a 1 G por 40. Tal como na primeira arquitetura, esta carta 2x10 G é implementada de modo a otimizar os custos e a eficiência dos componentes.

$$N_{MPLS_{4x10}} = \left\lfloor \frac{T_{local_{1G}}}{40} \right\rfloor \quad (19.2)$$

Utilizando a função $\lfloor \cdot \rfloor$ calcula-se o valor mínimo para o número de cartas 4x10 G, e verifica-se se o resto da divisão inteira do tráfego local a 1G por 40. Se este valor for menor ou igual a 20 Gb, é implementada uma carta 2x10 G:

$$N_{MPLS_{2x10}} = 1 \quad (19.3)$$

Mas se o resto da divisão inteira anterior for maior que 20 G, incrementa-se o número de cartas 4x10 G uma vez. Neste caso o número de cartas 2x10 G, $N_{MPLS_{2x10}}$, será nulo.

$$N_{MPLS_{4x10}} = N_{MPLS_{4x10}} + 1 \quad (19.4)$$

Somando $N_{MPLS_{4x10}}$, $N_{MPLS_{2x10}}$ e $N_{MPLS_{20x1}}$, obtém-se o total de cartas MPLS-TP, $N_{LC_{MPLS}}$, e escolhe-se a *shelf* mais apropriada, que é a primeira a cumprir os requisitos de número de *slots* disponível e quantidade tráfego a processar pela *shelf*. Como já foi referido, o equipamento disponível encontra-se na Tabela 4.2.1.1.

$$N_{LC_{MPLS}} = N_{MPLS_{4x10}} + N_{MPLS_{2x10}} + N_{MPLS_{20x1}} \quad (20)$$

Depois de calcular a quantidade de equipamento MPLS-TP, segue-se o equipamento OTN. O número de cartas 10x10 G OTN é calculado somando todo o tráfego local (sinais a 1 e 10 Gb/s), dividi-lo por 100 e aplicando de novo a função $\lceil \cdot \rceil$.

$$N_{OTN_{10x10}} = \left\lceil \frac{T_{local_{1G}} + T_{local_{10G}}}{100} \right\rceil \quad (21)$$

Em relação às cartas de linha, 1x100 G e 2x40 G, o processo de cálculo é um pouco diferente da primeira arquitetura, pois não há disponível a carta 1x40 G.

Para calcular o número mínimo de cartas 1x100 G OTN por direção, $N_{OTN_{1x100}}^i$, é necessário dividir o tráfego total pelo grau do nó, resultando no tráfego direcional, T_{dir} .

$$N_{OTN_{1x100}}^i = \left\lceil \frac{T_{dir}}{100} \right\rceil \quad (22.1)$$

Mais uma vez, o resto da divisão inteira do tráfego direcional por 100 tem grande importância na otimização dos custos. Porque, se por exemplo, o tráfego direcional for 120 Gb/s, é desnecessário implementar duas cartas 1x100 G com uma delas a transmitir/receber apenas 20 Gb. Para isso utiliza-se uma porta de 40 G.

Se o resto desta divisão inteira for maior que 80 Gb, não há outra hipótese senão a implementação de mais uma carta 1x100 G por direção.

$$N_{OTN_{1x100}}^i = N_{OTN_{1x100}}^i + 1 \quad (22.2)$$

Depois de calcular o número de cartas por direção, multiplica-se esse valor pelo grau do nó, obtendo o número total de cartas 1x100 G, $N_{OTN_{1x100}}$.

$$N_{OTN_{1x100}} = N_{OTN_{1x100}}^i \times \text{Grau} \quad (23)$$

Se o resto da divisão inteira anterior for maior que 40 Gb e menor que 80 G, vai ser necessário uma carta 2x40 G OTN para cada direção, ou seja, o seu número é igual ao grau do nó.

$$N_{OTN_{2x40}} = \text{Grau} \quad (24.1)$$

Mas se o resto da divisão inteira for menor que 40 Gb, só é necessário uma carta 2x40 G por cada duas direções, ou seja, uma porta de 40 G para cada direção. Neste caso, o número de cartas 2x40 G OTN fica:

$$N_{OTN_{2x40}} = \left\lfloor \frac{\text{Grau}}{2} \right\rfloor \quad (24.2)$$

De notar que as cartas 2x40 G podem nem chegar a ser implementadas se a utilização das cartas 1x100 G for eficiente, ou seja, estes valores dependem sempre dos parâmetros de entrada no algoritmo (Tráfego total, Percentagem de tráfego local, Percentagem de tráfego local a 1 G e Grau).

Depois de calcular o número total de cartas OTN, $N_{LC_{OTN}}$, procede-se à escolha da *shelf* da mesma forma que anteriormente: tendo em conta o número de *slots* ocupados pelas cartas e a quantidade de tráfego que passa no nó.

$$N_{LC_{OTN}} = N_{OTN_{1x100}} + N_{OTN_{2x40}} + N_{OTN_{10x10}} \quad (25)$$

Para esta arquitetura, fica apenas por calcular o número de *transceivers* de cada tipo, multiplicar o material pelo seu respetivo custo e calcular o seu somatório.

Os *transceivers* 1 G vão ser usados apenas nas cartas MPLS-TP que lidam com tráfego local a 1 Gb/s. O seu número é calculado com a equação (12), utilizada na primeira arquitetura.

$$N_{Tx_{1G}} = \left\lceil \frac{T_{local_{1G}}}{1} \right\rceil \quad (12)$$

Os *transceivers* 10 G são utilizados nos componentes das duas tecnologias: nas cartas MPLS-TP e OTN que conectam as duas *shelves* e nas cartas OTN que recebem/transmitem o tráfego local a 10 Gb/s diretamente para o acesso local.

$$N_{Tx_{10G}} = \left\lceil \frac{T_{local_{1G}}}{10} \right\rceil + \left\lceil \frac{T_{local_{1G}} + T_{local_{10G}}}{10} \right\rceil \quad (26)$$

Para o cálculo do número de *transceivers* 40 G é necessário recorrer a várias condições que causam a variação do seu valor. Tem de se voltar a analisar o resto da divisão inteira do tráfego direcional por 100 para perceber a quantidade de tráfego que resta.

Se o resto da divisão inteira for maior que 40 Gb e menor ou igual a 80 Gb, vai ser necessário uma carta 2x40 G para cada direção. Desta maneira, as duas portas da carta são sempre utilizadas e estão associadas à mesma direção. O número de *transceivers* será o número de portas das cartas 2x40 G, ou seja, duas vezes o número de cartas.

$$N_{Tx_{40G}} = N_{OTN_{2x40}} \times 2 \quad (27.1)$$

Se o resto da divisão inteira for menor ou igual a 40 Gb, só é necessário uma carta 2x40 G por cada duas direções, ou seja, uma porta de 40 G para cada direção. Neste caso, o número de *transceivers* 40 G necessário é igual ao grau do nó.

$$N_{Tx_{40G}} = \text{Grau} \quad (27.2)$$

Obviamente, no caso de não ser necessário implementar cartas 2x40 G OTN, o número de *transceivers* 40 G vai ser nulo. Já o número de *transceivers* 100 G é simplesmente igual ao número de cartas 1x100 G OTN, pois cada carta tem apenas uma porta.

$$N_{Tx_{100G}} = N_{OTN_{1x100}} \quad (28)$$

Já com as quantidades de equipamento calculadas, procede-se à multiplicação pelos seus respetivos custos. O custo do equipamento MPLS-TP é o somatório do custo total das cartas, $C_{LC_{MPLS}}$, com o custo da *shelf*, $C_{shelf_{MPLS}}$.

$$C_{LC_{MPLS}} = N_{MPLS_{4x10}} \times C_{MPLS_{4x10}} + N_{MPLS_{2x10}} \times C_{MPLS_{2x10}} + N_{MPLS_{20x1}} \times C_{MPLS_{20x1}} \quad (29)$$

$$C_{PXC} = C_{LC_{MPLS}} + C_{shelf_{MPLS}} \quad (30)$$

O custo do equipamento OTN calcula-se da mesma forma, somando o custo das cartas OTN, C_{LCOTN} , com o custo da *shelf*, $C_{shelfOTN}$.

$$C_{LCOTN} = N_{OTN_{1x100}} \times C_{OTN_{1x100}} + N_{OTN_{2x40}} \times C_{OTN_{2x40}} + N_{OTN_{10x10}} \times C_{OTN_{10x10}} \quad (31)$$

$$C_{EXC} = C_{LCOTN} + C_{shelfOTN} \quad (32)$$

Finalmente, o custo total do nó para esta arquitetura, $C_{PXC+EXC}$, é igual ao somatório do custo do equipamento das duas tecnologias mais o custo dos *transceivers*, C_{Tx} . O custo dos *transceivers* é, mais uma vez, a multiplicação das suas quantidades pelos seus respetivos custos.

$$C_{Tx} = N_{Tx_{1G}} \times C_{Tx_{1G}} + N_{Tx_{10G}} \times C_{Tx_{10G}} + N_{Tx_{40G}} \times C_{Tx_{40G}} + N_{Tx_{100G}} \times C_{Tx_{100G}} \quad (33)$$

$$C_{PXC+EXC} = C_{PXC} + C_{EXC} + C_{Tx} \quad (34)$$

4.2.3. ARQUITETURA PXC+EXC+OXC

No terceiro e último caso, é acrescentada à arquitetura anterior (PXC+EXC) o equipamento de comutação ótica, conhecido como *Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer* (ROADM). Este equipamento fica responsável pelo encaminhamento de tráfego de linha, poupando a implementação de uma grande quantidade de cartas nas tecnologias OTN e MPLS-TP. O equipamento destas duas tecnologias fica responsável apenas pelo processamento de tráfego local. O ROADM encaminha o tráfego de passagem e transmite/recebe o tráfego local para o equipamento OTN, que por sua vez está conectado ao equipamento MPLS-TP para transmitir/receber tráfego local a 1 Gb/s e transmitir diretamente para o acesso local o tráfego local a 10 Gb/s.

Resumidamente, o tráfego de passagem sofre apenas comutação de canais óticos, o tráfego local a 10 Gb/s sofre comutação de canais óticos e de circuitos elétricos, e o tráfego local a 1 Gb/s sofre comutação de canais óticos, de circuitos elétricos e comutação elétrica de pacotes. Esta arquitetura é apresentada na Figura 4.2.3.1.

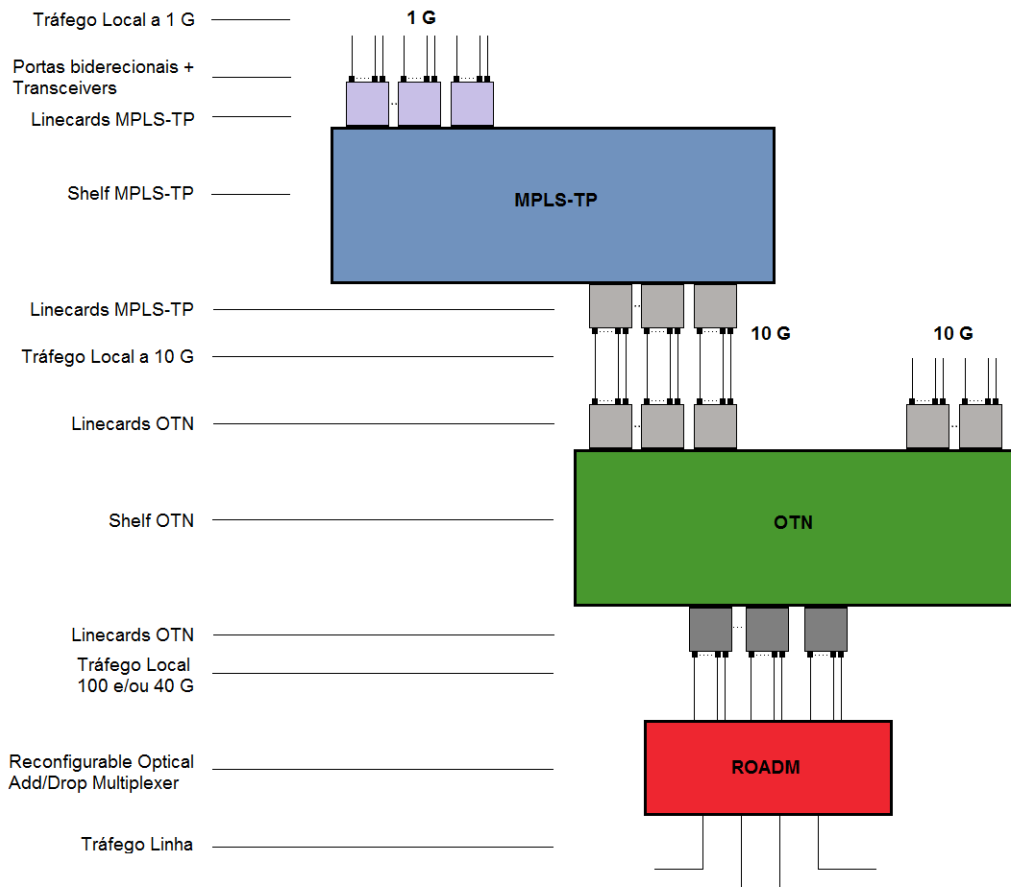


FIGURA 4.2.3.1 - ARQUITETURA 3, PXC+ECX+OXC

É importante mencionar que o ROADM é do tipo CDC (*Colorless, Directionless & Contentionless*), com o grau do nó de 2 até 9 e permite 80, 88 ou 96 canais [54]. Apesar de ser o equipamento OADM mais dispendioso, foi escolhido por ser o mais eficiente e flexível. Este equipamento permite a alteração do comprimento de onda por *software*, evitando deslocamentos de técnicos ao local do nó quando é necessária a sua reconfiguração [22].

Os componentes que constituem o ROADM são diferentes dos componentes das outras tecnologias. Nesta tecnologia não há necessidade de *transceivers*. A *shelf* onde é implementado todo o equipamento do ROADM é muito simples, pois não necessita da componente eletrónica responsável pela comunicação por *backplane* utilizada nas outras duas tecnologias. Por esse motivo e por não estar disponível o custo desta *shelf*, o peso deste equipamento no custo total da arquitetura é considerado nulo. Os outros componentes do ROADM são: Amplificadores, WSS (*Wave Selective Switch*) 1x20 e WSS 9x9. Na Tabela 4.2.3.1, são apresentados os custos destes componentes.

COMPONENTES ROADM	
Tipo de Componente	Custo
Amplicadores (Amp_boost, Amp_pre)	0.80
WSS 1x20	6.00
WSS 9x9	48.00

TABELA 4.2.3.1 - COMPONENTES DO ROADM, RETIRADO DE [54]

O cálculo dos custos desta arquitetura divide-se em três partes, equipamento MPLS-TP, OTN e ROADM. A primeira é igual à arquitetura PXC+EXC, onde a comutação de pacotes só é realizada no tráfego local a 1 Gb/s. Como já foi explicado em detalhe anteriormente, é agora apresentado o cálculo do custo desta parte resumidamente.

$$N_{MPLS_{20 \times 1}} = \left\lceil \frac{T_{local_{1G}}}{20} \right\rceil \quad (1)$$

Se o tráfego for menor que 320Gb/s, assume-se a utilização da primeira *shelf* da Tabela 4.2.1.1, com capacidade de 320 Gb/s e *slots* de 20 Gb, impedindo a utilização de cartas 4x10 G. Neste caso serão implementadas apenas cartas 2x10 G para lidar com sinais a 10 Gb/s.

$$N_{MPLS_{2 \times 10}} = \left\lceil \frac{T_{local_{1G}}}{20} \right\rceil \quad (19.1)$$

Mas se a *shelf* tiver maior capacidade por *slot* (40 ou 100 G), podem-se utilizar cartas 4x10 G. Calcula-se então o valor mínimo de $N_{MPLS_{4 \times 10}}$.

$$N_{MPLS_{4 \times 10}} = \left\lceil \frac{T_{local_{1G}}}{40} \right\rceil \quad (19.2)$$

Verifica-se se o resto da divisão inteira do tráfego local a 1 Gb/s por 40 é menor ou igual a 20 Gb. Se sim, é implementada uma carta 2x10 G.

$$N_{MPLS_{2 \times 10}} = 1 \quad (19.3)$$

Mas se o resto for maior que 20 Gb, incrementa-se o número de cartas 4x10 G uma vez.

$$N_{MPLS_{4 \times 10}} = N_{MPLS_{4 \times 10}} + 1 \quad (19.4)$$

Já calculadas as quantidades de cada tipo de carta MPLS-TP, passa-se ao número total de cartas, $N_{LC_{MPLS}}$. O custo total das cartas MPLS-TP, $C_{LC_{MPLS}}$, resulta da multiplicação do número de cartas pelo seu respetivo custo.

$$N_{LC_{MPLS}} = N_{MPLS_{4x10}} + N_{MPLS_{2x10}} + N_{MPLS_{20x1}} \quad (20)$$

$$C_{LC_{MPLS}} = N_{MPLS_{4x10}} \times C_{MPLS_{4x10}} + N_{MPLS_{2x10}} \times C_{MPLS_{2x10}} + N_{MPLS_{20x1}} \times C_{MPLS_{20x1}} \quad (29)$$

Com este valor calculado e sabendo que cada carta ocupa um *slot*, escolhe-se a *shelf* apropriada e determina-se o custo total desta parte.

$$C_{PXC} = C_{LC_{MPLS}} + C_{shelf_{MPLS}} \quad (30)$$

Para o equipamento OTN, há algumas semelhanças com a arquitetura anterior, como o número de cartas 10x10 G.

$$N_{OTN_{10x10}} = \left\lceil \frac{T_{local_{1G}} + T_{local_{10G}}}{100} \right\rceil \quad (21)$$

A diferença está no número de cartas 1x100 G e 2x40 G pois nesta arquitetura, este equipamento OTN já não lida com tráfego de passagem, apenas com o tráfego local a 1 e 10 Gb/s que depois de agregados em sinais de 100 e 40 Gb/s são recebidos/transmitidos para o ROADM. Assim, as quantidades de componentes OTN não vão depender do grau do nó.

$$N_{OTN_{1x100}} = \left\lceil \frac{T_{local_{1G}} + T_{local_{10G}}}{100} \right\rceil \quad (35)$$

Este é o valor mínimo para estas cartas porque, mais uma vez, é necessário verificar o resto da divisão inteira do tráfego local por 100. Se o resto for maior que 80 Gb, incrementa-se o valor das cartas 1x100 G uma vez.

$$N_{OTN_{1x100}} = N_{OTN_{1x100}} + 1 \quad (35.1)$$

Já se o resto for menor ou igual a 80 Gb, o número de cartas 1x100 G mantém-se no seu valor mínimo e é implementada uma carta 2x40 G.

$$N_{OTN_{2x40}} = 1 \quad (35.2)$$

O número total de cartas OTN, tal como o número de *slots* ocupados, será:

$$N_{LC_{OTN}} = N_{OTN_{1x100}} + N_{OTN_{2x40}} + N_{OTN_{10x10}} \quad (25)$$

Ao multiplicar o número de cada tipo de cartas pelo seu preço associado, chega-se ao custo total das cartas, C_{LCOTN} .

$$C_{LCOTN} = N_{OTN_{1x100}} \times C_{OTN_{1x100}} + N_{OTN_{2x40}} \times C_{OTN_{2x40}} + N_{OTN_{10x10}} \times C_{OTN_{10x10}} \quad (31)$$

Com o número de cartas OTN calcula-se qual a *shelf* apropriada, que terá um custo $C_{shelf_{OTN}}$. O custo total do equipamento OTN é a soma desse custo com o custo das cartas.

$$C_{EXC} = C_{LCOTN} + C_{shelf_{OTN}} \quad (32)$$

O cálculo do número de *transceivers* também é semelhante ao cálculo efetuado na arquitetura anterior, como se pode verificar no número de *transceivers* 1 G e 10 G.

Os *transceivers* 1 G vão ser usados apenas no equipamento MPLS-TP para lidar com tráfego local a 1 Gb/s.

$$N_{Tx_{1G}} = \left\lceil \frac{T_{local_{1G}}}{1} \right\rceil \quad (12)$$

Os *transceivers* 10 G são utilizados no equipamento MPLS-TP que conecta as duas *shelves* e também no equipamento OTN que lida com todo o tráfego local.

$$N_{Tx_{10G}} = \left\lceil \frac{T_{local_{1G}}}{10} \right\rceil + \left\lceil \frac{T_{local_{1G}} + T_{local_{10G}}}{10} \right\rceil \quad (26)$$

O número de *transceivers* 100 G é igual ao número de cartas 1x100 G OTN, pois cada carta tem uma porta apenas.

$$N_{Tx_{100G}} = N_{OTN_{1x100}} \quad (36)$$

Se houver necessidade de implementar cartas 2x40 G, número de *transceivers* 40 G vai depender do resto da divisão inteira do tráfego local por 100.

Isto é, o resto do tráfego, que não passa pelas cartas 1x100 G OTN, vai passar pela carta 2x40 G. Mas pode não ser necessária a utilização das duas portas desta carta. Se o resto da divisão inteira for maior que 40, são implementados dois *transceivers* ficando $N_{Tx_{40G}} = 2$. Mas se o resto for menor ou igual 40, só é necessário um *transceiver*, $N_{Tx_{40G}} = 1$.

O custo total dos *transceivers*, C_{Tx} , resulta do somatório da multiplicação do número de cada tipo de *transceiver* pelo seu custo associado.

$$C_{Tx} = N_{Tx_{1G}} \times C_{Tx_{1G}} + N_{Tx_{10G}} \times C_{Tx_{10G}} + N_{Tx_{40G}} \times C_{Tx_{40G}} + N_{Tx_{100G}} \times C_{Tx_{100G}} \quad (17)$$

Para calcular o custo total desta arquitetura, falta apenas o custo do ROADM que resulta da seguinte fórmula retirada de [54].

$$C_{OXC} = \text{Grau} \times (2 \times WSS_{1x20} + \text{Amp}_{\text{boost}} + \text{Amp}_{\text{pre}}) + (2 \times \text{Grau} \times \left\lceil \frac{P_{\text{local}}}{20} \right\rceil \times WSS_{1x20}) + (2 \times \text{Grau} \times WSS_{9x9}) \quad (37)$$

Onde WSS_{1x20} , $\text{Amp}_{\text{boost}}$, Amp_{pre} , WSS_{9x9} representam os custos desse equipamento (Tabela 4.2.3.1) e P_{local} a percentagem de tráfego local em relação ao tráfego total. Note-se que o custo do ROADM é dependente apenas do grau do nó e da percentagem de tráfego local, sendo transparente ao tráfego total que passa no nó.

Com os custos das várias partes já calculados, basta somá-las para chegar ao custo total desta última arquitetura.

$$C_{PXC+EXC+OXC} = C_{PXC} + C_{EXC} + C_{OXC} + C_{Tx} \quad (38)$$

5. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados deste trabalho, recorrendo a gráficos da variação do custo de cada arquitetura em função de vários parâmetros. Estes parâmetros são: Tráfego Total, Percentagem de Tráfego Local e Grau do nó. Para cada um, é dedicada uma secção onde se explica o respetivo impacto no custo do nó. Há ainda outro parâmetro que tem impacto no custo do nó, mas não necessita propriamente de uma secção a si dedicada: Percentagem de Tráfego Local a 1 Gb/s. Este parâmetro é alterado em diferentes gráficos na secção dedicada ao impacto do tráfego total, onde se explica os seus efeitos no custo do nó.

Na secção 5.1 são apresentados três gráficos do custo do nó em função do tráfego total, correspondentes a três nós com diferentes características numa rede. É feita a análise para um caso em que o tráfego é maioritariamente de passagem (típica rede de transporte), um caso intermédio em que o tráfego local é significativo, e outro em que o tráfego é maioritariamente local (típica rede metropolitana).

Na secção 5.2, onde se apresentam gráficos do custo em função da percentagem de tráfego local, são explicados dois casos: um em que o tráfego total é 1000 Gb/s e outro em que o nó suporta uma maior quantidade de tráfego total, 5000 Gb/s.

Na última secção, 5.3, apresenta-se o impacto do grau do nó no seu custo. São também apresentados dois casos onde se altera o tráfego total.

5.1. IMPACTO DO TRÁFEGO TOTAL

Esta secção contém três gráficos diferentes, mas todos representam os custos das diferentes arquiteturas em função do Tráfego Total, que atinge os 8000 Gb/S no seu máximo. Contudo, existem mais parâmetros de entrada no cálculo dos custos, pelo que têm de ser definidos para cada um dos três casos seguintes.

No primeiro caso, Figura 5.1.1, a percentagem de tráfego local é de 5% do tráfego total. O tráfego local está dividido em tráfego a 10 Gb/s e a 1 Gb/s. O tráfego a 1 Gb/s constitui, para este caso, 20% do tráfego local. Portanto, é avaliado o comportamento dos custos quando o tráfego que passa no nó é maioritariamente de passagem, como sucede numa típica rede de transporte de informação.

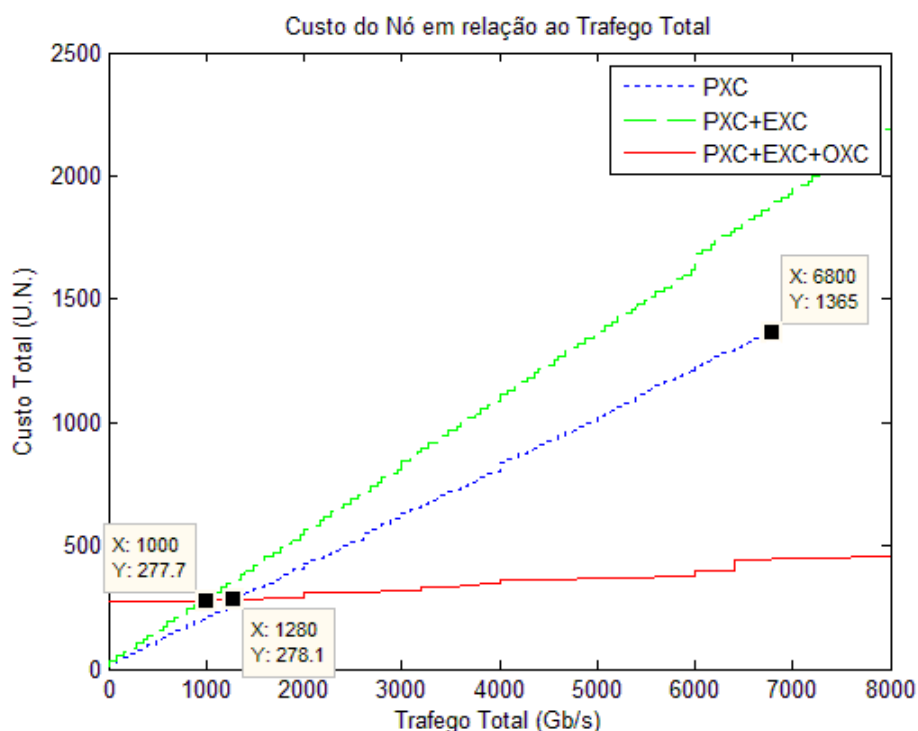


FIGURA 5.1.1 - P.LOCAL=5%, P.LOCAL 1G=20%, GRAU=2

Como esperado, em todas as arquiteturas há um crescimento de custo proporcional ao aumento do tráfego total. Repare-se que há diferentes saltos neste aumento de custo. A grande variedade destes saltos é explicada pela incrementação nas quantidades dos diferentes equipamentos (*transceivers*, *shelves* e cartas com diferentes capacidades e custos). Por haver saltos que representam incrementações simultâneas de vários equipamentos, torna-se complexo e pouco lógico explicar todos os saltos para os vários casos.

A terceira arquitetura, PXC+EXC+OXC, é claramente a mais viável para este caso onde o tráfego é maioritariamente de passagem. Contudo, para um tráfego total na ordem das centenas de Gigabits, apresenta-se como a menos apropriada. Pode-se verificar na Figura 5.1.1 que só a partir dos 1000 Gb/s é que o custo desta arquitetura se torna mais baixo que o da segunda arquitetura (PXC+EXC). O mesmo acontece aos 1280 Gb/s com a arquitetura PXC. Isto deve-se às propriedades do ROADM, que é caracterizado pela sua transparência em relação ao tráfego que processa. O seu custo de implementação é alto mas não cresce muito com o aumento do tráfego, ao contrário do equipamento MPLS-TP e OTN.

A arquitetura PXC+EXC é sempre mais cara do que a arquitetura PXC devido ao custo do equipamento OTN. Apesar das *shelves* OTN serem um pouco mais baratas, as suas cartas são mais caras que as cartas MPLS-TP. Esta diferença de custos torna a arquitetura PXC mais viável até um certo valor de tráfego total, que neste caso são os 6800 Gb/s. A *shelf* com mais capacidade da tecnologia MPLS-TP tem capacidade para processar 8 Tb/s, mas o problema reside do número de *slots* disponíveis. Esta *shelf* tem espaço para 80 *slots* com 100 Gb de capacidade cada, mas a maior parte das cartas não ocupam

estes 100 Gb, o que reduz a eficiência do equipamento. Conclui-se que mais importante que a capacidade de processamento da *shelf*, é o número de *slots* disponíveis, e neste caso, esse número é atingido nos 6800 Gb/s de tráfego total. Este valor tende a diminuir com o aumento do tráfego local, principalmente se for a 1 Gb/s, pois exige um aumento de cartas 20x1 G que, para a maior parte das *shelves* (com *slots* de 40 e 100 Gb), representa grande redução na eficiência.

Aumentando a percentagem de tráfego local para 30%, e também o tráfego a 1G para 60%, fazem-se notar diferenças no comportamento dos custos, como se pode observar na Figura 5.1.2. Este é o caso intermédio em que, apesar de continuar a haver mais tráfego de passagem, o tráfego local aumenta, do qual 60% é tráfego a 1 Gb/s.

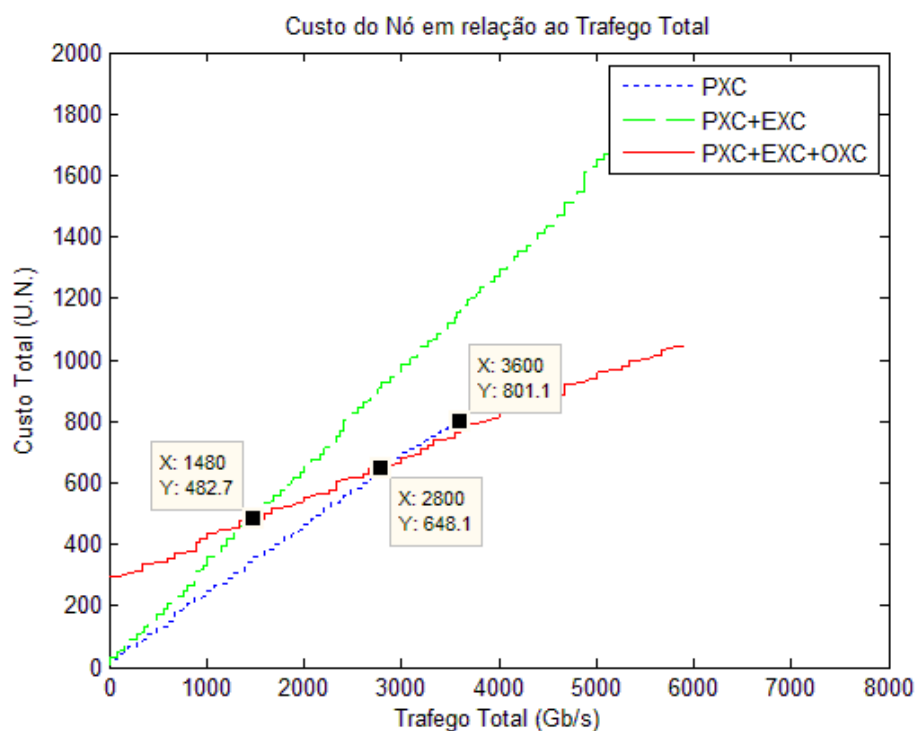


FIGURA 5.1.2 - P.LOCAL=30%, P.LOCAL 1G=60%, GRAU=2

A primeira arquitetura, PXC, atinge o seu limite de cartas quando o tráfego total é 3600 Gb/s. Verificando os valores algoritmo realizado, para 3601 Gb/s, esta arquitetura necessitaria de 82 cartas, valor impossível de implementar (a *shelf* com mais capacidade tem 80 *slots* disponíveis).

Mesmo as arquiteturas seguintes atingem o seu limite nos 5888 Gb/s. Para este valor de tráfego total, o tráfego local a 1 Gb/s chega quase aos 1560 Gb/s. Este tráfego é todo processado pelo equipamento MPLS-TP passando pelas cartas 20x1 G, que teriam de ser 78, e pelas cartas com portas 10 G que se conectam ao equipamento OTN. E quando se atinge o limite de cartas nesta tecnologia, atinge-se também o limite de tráfego suportado pelas arquiteturas.

A arquitetura PXC+EXC apresenta-se como a menos apropriada para este caso, devido ao custo das cartas OTN que aumenta com o tráfego local, pois para além de lidar diretamente com o tráfego local a 10 Gb/s, também processa o tráfego a 1 Gb/s associado ao equipamento MPLS-TP. Já a arquitetura PXC+EXC+OXC, apresenta vantagens em relação à arquitetura PXC+EXC a partir dos 1480 Gb/s, e em relação à PXC a partir dos 2800 Gb/s. Como já foi referido, é uma arquitetura otimizada para altos débitos e para tráfego maioritariamente de passagem.

O mesmo não acontece se a percentagem de tráfego local for maior que a de tráfego de passagem. A Figura 5.1.3 representa o terceiro caso, onde o tráfego local supera o tráfego de passagem. As diferenças agora são substanciais, notando-se um aumento dos custos da arquitetura PXC+EXC+OXC em relação aos outros casos, tornando-a a menos apropriada.

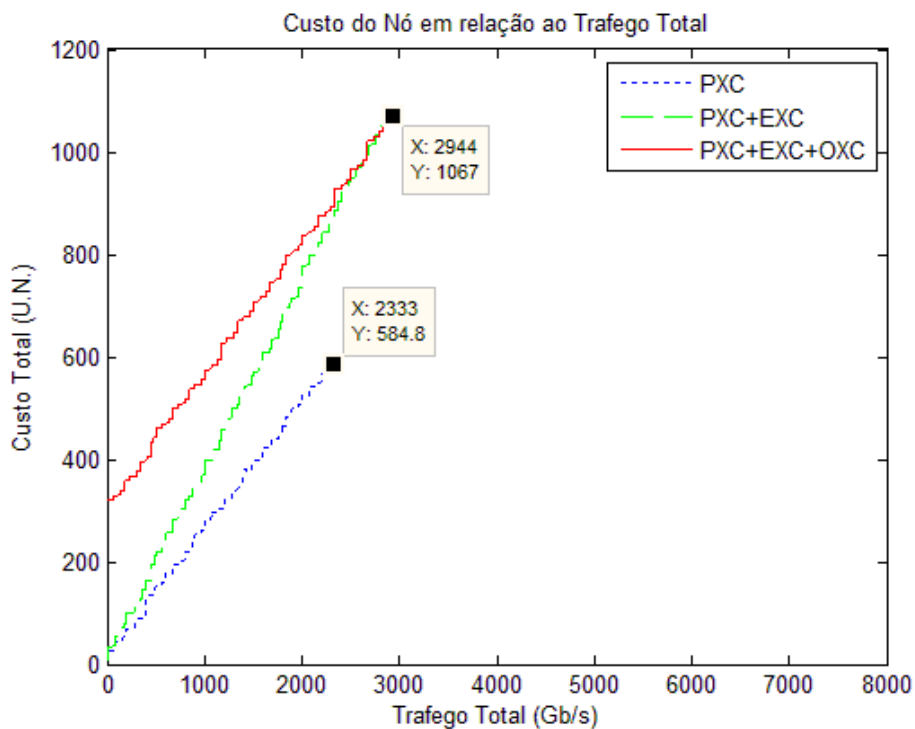


FIGURA 5.1.3 - P.LOCAL=60%, P.LOCAL 1 G=60%, GRAU=2

A arquitetura mais económica continua a ser a PXC, que faz uso do rentável equipamento MPLS-TP. No entanto, continua-se a verificar o mesmo problema. Quanto mais tráfego local a 1 Gb/s, mais cartas 20x1 Gb/s MPLS-TP são necessárias implementar em *slots* com capacidade de 100 Gb, aumentando a ineficiência deste equipamento e atingindo rapidamente o número limite de cartas. Isto provoca uma redução da capacidade máxima de processamento das três arquiteturas.

5.2. IMPACTO DO TRÁFEGO LOCAL

Esta secção é constituída por dois gráficos diferentes dos custos em função da percentagem de tráfego local. Os parâmetros a definir agora são: Tráfego Total, Percentagem de tráfego local a 1 G/s e Grau.

Para um tráfego total de 1000 Gb/s, e sendo 20% do tráfego local transmitido/recebido a 1 Gb/s, o resultado é apresentado na Figura 5.2.1.

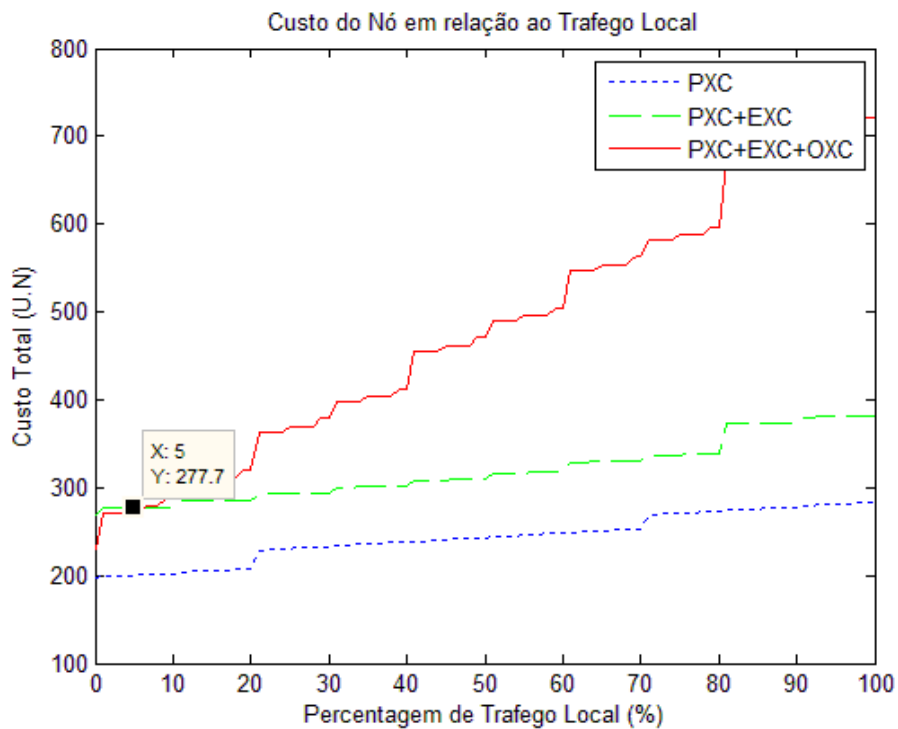


FIGURA 5.2.1 - TRÁFEGO TOTAL=1000 G, P.LOCAL 1 G=20%, GRAU=2

Notam-se claramente as vantagens económicas da implementação da arquitetura PXC. Os reduzidos custos do equipamento MPLS-TP fazem com que o aumento do custo seja muito atenuado em relação às outras arquiteturas. O seu maior salto deve-se à mudança de *shelf*.

A arquitetura PXC+EXC+OXC revela-se a menos apropriada quando surge um aumento de tráfego local. Note-se que só até aos 5% é mais rentável do que a arquitetura PXC+EXC.

Ao aumentar o tráfego para 5000 Gb/s e mantendo o Grau e a Percentagem de tráfego local a 1 Gb/s, como mostra a Figura 5.2.2, a situação inverte-se.

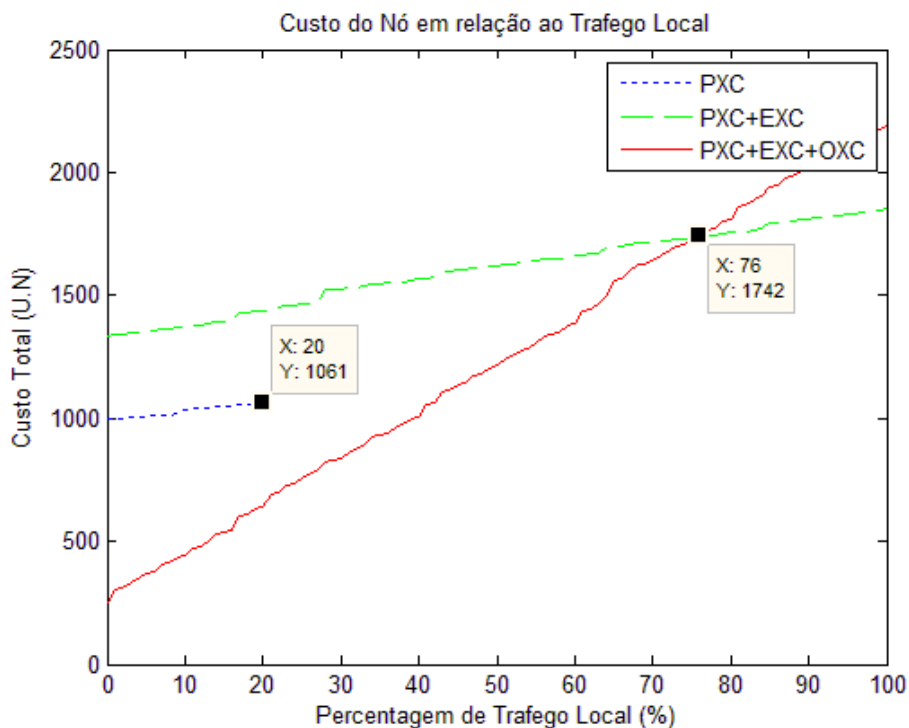


FIGURA 5.2.2 - TRÁFEGO TOTAL=5000 G, P.LOCAL 1 G=20%, GRAU=2

A arquitetura PXC+EXC+OXC é a mais rentável para valores de tráfego total maiores, mas quando a percentagem de tráfego local aumenta significativamente, deixa de o ser. Neste caso é aos 76% de tráfego local que a arquitetura PXC+EXC se torna a mais apropriada economicamente.

A arquitetura PXC não suporta grandes valores de tráfego total, pela sua limitação em número de *slots*, e apesar de ter uma implementação mais económica que a arquitetura PXC+EXC, esta última tem mais capacidade de processamento, pois a tecnologia OTN tem *shelves* com mais capacidade e número de *slots* disponíveis.

5.3. IMPACTO DO GRAU DO NÓ

Nesta última secção do capítulo Discussão de Resultados, analisa-se o comportamento dos custos das arquiteturas em função do grau do nó. O grau varia entre os valores 2 e 9, ou seja, cada nó terá entre 2 e 9 ligações a outros nós da rede.

Para os dois casos apresentados, é alterado o valor do Tráfego Total mas a Percentagem de tráfego local e a Percentagem de tráfego local a 1 Gb/s mantêm-se a 5 e 20%, respetivamente. No primeiro caso, apresentado na Figura 5.3.1, define-se um tráfego total de 1000 Gb/s.

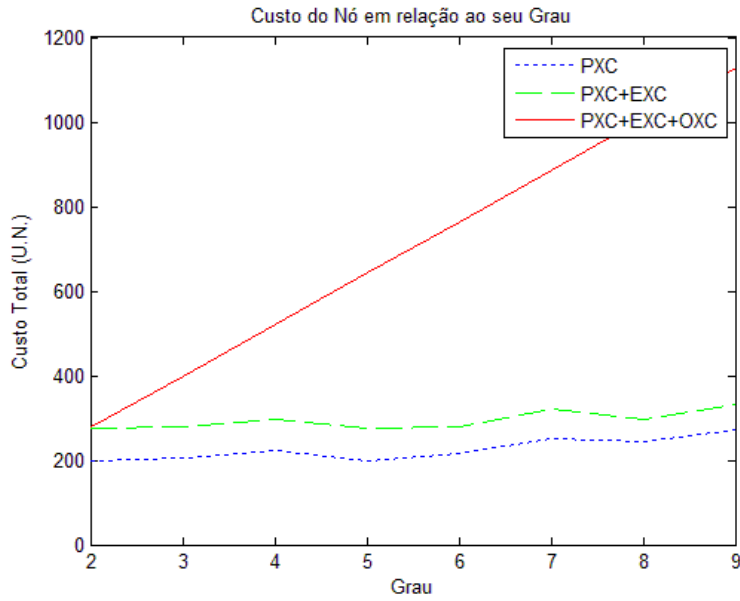


FIGURA 5.3.1 - TRÁFEGO TOTAL=1000G, P.LOCAL=5%, P.LOCAL 1 G=20%

Como seria de esperar, o custo das arquiteturas aumenta com o grau do nó. Para mais ligações que conectam o nó a outros nós, mais portas e, no caso do ROADM, mais WSS terão de ser implementados. A Figura 5.3.1, mostra exatamente esse aumento de custos com o grau, apresentando um aumento muito mais acentuado na arquitetura PXC+EXC+OXC, devido ao custo do equipamento óptico necessário para cada direção. Apesar de se esperar um aumento constante dos custos, isso nem sempre acontece. Neste modelo, há determinados valores de tráfego que fazem o custo oscilar com a mudança de grau. No próximo exemplo, apresentado na 5.3.2, com um tráfego total de 4000 Gb/s, também se verifica tal situação.

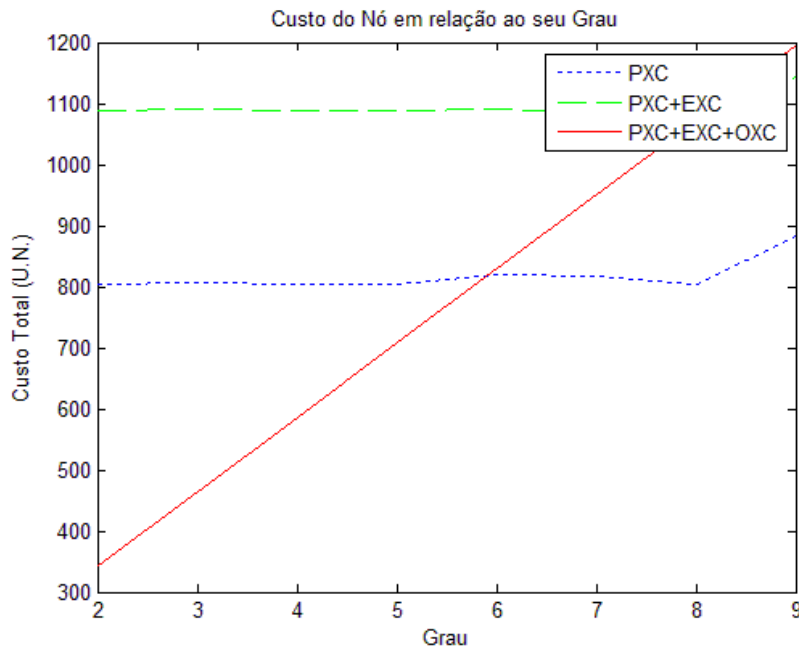


FIGURA 5.3.2 - TRÁFEGO TOTAL=4000 G, P.LOCAL=5%, P.LOCAL 1 G=20%

Neste caso temos um Tráfego total de 4000 Gb/s, divididos pelas ligações existentes. O facto do custo total do nó nas arquiteturas PXC e PXC+EXC diminuir quando o grau do nó passa, por exemplo, de 3 para 4 é explicado por falta de eficiência aquando da divisão do tráfego. A Figura 5.3.3 representa a separação dos gráficos das várias arquiteturas, de forma a analisá-las mais claramente.

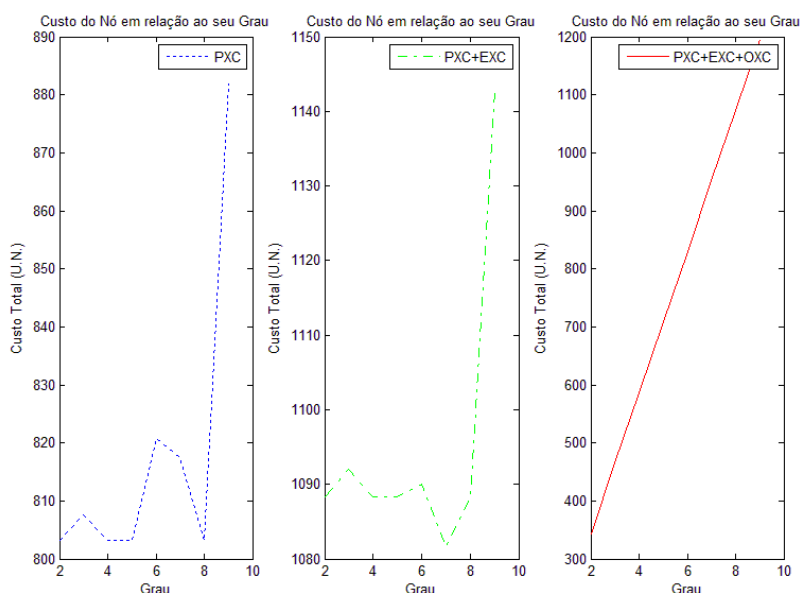


FIGURA 3.3.3 - TRÁFEGO TOTAL=4000 G, P.LOCAL=5%, P.LOCAL 1 G=20%

Para Grau=3, os 4000 Gb/s são divididos por 3 para obter o tráfego direcional que será 1333.33 Gb/s. Ora, para cada direção é necessário implementar 13 cartas 1x100 G e distribuir o resto do tráfego utilizando cartas com portas de 40 G. No final haveria 39 cartas 1x100 G mais 3 cartas 1x40 G, para a arquitetura PXC, e 39 cartas 1x100 G mais 2 cartas 2x40 G com uma das portas a não ser utilizada, para a arquitetura PXC+EXC.

Para Grau=4, a situação é mais simples pois o tráfego direcional é 1000 Gb/s. Necessita de 10 cartas 1x100 G para cada direção, ou seja, 40 cartas 1x100 G no total com uma eficiência ótima. Comparando os custos do total de cartas para cada situação compreende-se a diminuição do custo para uma subida do grau.

Repare-se que não é a implementação de cartas com portas de 40 G a causa deste salto no custo. Se para Grau=3, não fosse efetuada essa otimização na eficiência, ter-se-ia 14 cartas 1x100 G para cada direção, ou seja, 42 no total. O preço seria ainda maior do que na situação discutida.

De qualquer maneira, este acaso não passa de uma causa da distribuição uniforme pelas direções do nó. Normalmente, ao aumentar o grau de um nó, os custos de implementação também aumentam.

6. CONCLUSÃO

Esta dissertação baseia-se no estudo das várias tecnologias utilizadas nas redes de transporte de informação, incidindo principalmente na tecnologia MPLS-TP. Tecnologia que é vista pela comunidade das telecomunicações como um sucesso, seguindo os passos do seu protocolo original, IP/MPLS. Nos primeiros capítulos deste trabalho são abordados temas como a evolução das redes de transporte e o crescimento global do tráfego. O aumento dramático do tráfego, principalmente tráfego de pacotes, forçou a criação de novos protocolos e tecnologias capazes de suportar tal quantidade de informação. Os processos de comutação, seja elétrica, ótica ou de pacotes, têm uma grande importância na eficiência das redes. Saber que tecnologias utilizar numa rede de transporte é essencial para provedores de serviços de telecomunicações, pois o impacto económico de cada tecnologia difere. A redução do CAPEX/OPEX de uma rede, aliada à sua eficiência, resultam na redução do custo por bit transferido. Este é o objetivo principal de toda a comunidade associada às telecomunicações, um melhor serviço e uma redução dos custos de transporte de informação.

São estudadas tecnologias globalmente implementadas, como a SDH/SONET, OTN e Ethernet, e as tecnologias que ainda emergem nos mercados atuais, como IP/MPLS, MPLS-TP e equipamentos de comutação e encaminhamento ótico, ROADMs. Estas duas últimas tecnologias têm um grande impacto na otimização das redes. O MPLS-TP pelo seu método eficaz e simples de comutação de pacotes baseado na adição de uma etiqueta identificadora, a partir do qual o pacote é encaminhado. Os ROADMs trazem flexibilidade às redes, permitindo encaminhar cada canal ótico (comprimento de onda) para o seu destino e, dependendo das características do ROADM, a sua reconfiguração pode ser efetuada remotamente, sem necessidade de operações manuais no local do nó. Em redes WDM e DWDM, a implementação de um ROADM pode trazer grandes vantagens em termos económicos e de eficácia.

O trabalho prático realizado para esta dissertação incide sobre três arquiteturas diferentes de um nó numa rede de transporte. Cada arquitetura tem as suas vantagens e desvantagens, dependendo do cenário onde se encontra. O algoritmo realizado neste trabalho simula o CAPEX do nó consoante o seu grau e o tráfego com que lida. A partir dos resultados obtidos, verifica-se que a arquitetura PXC, que faz uso apenas da tecnologia MPLS-TP, é mais adequada para nós que processam quantidades significativas de tráfego local, desde que o tráfego total no nó não seja muito elevado (dependendo do cenário, atinge o seu limite entre os 2000 e 4000 Gb/s). Esta limitação da arquitetura PXC é devida ao equipamento MPLS-TP disponível não ter capacidade tão elevada como o equipamento OTN. Na arquitetura PXC+EXC, com equipamento MPLS-TP e OTN, o CAPEX é sempre maior que o da arquitetura PXC, no entanto, suporta maiores quantidades de tráfego total devido à capacidade do seu equipamento. Por fim, a arquitetura PXC+EXC+OXC, que utiliza MPLS-TP, OTN e um ROADM, adequa-se a cenários onde o tráfego de passagem é muito superior ao tráfego local, e suporta grandes quantidades de tráfego total. O grau do nó tem um impacto no CAPEX tanto maior quanto o seu número, isto é, quanto mais direções tem um nó, maior o seu custo. No modelo há uma situação particular em que o

custo desce quanto se aumenta o grau uma unidade, mas não é um caso relevante para as conclusões a tirar.

Com base no estudo das três arquiteturas, retiram-se ideias importantes acerca das tecnologias mais adequadas para cada tipo de rede. A partir das características do tráfego de cada nó, um operador de serviços poderá optar pela arquitetura mais adequada, tendo em vista o CAPEX e a eficiência da rede.

7. REFERÊNCIAS

- [1] Joseph Berthold, Adel A.M. Saleh, Loudon Blair, Jane M. Simmons, "Optical Networking: Past, Present, and Future", IEEE Journal of Lightwave Technology, V. 26, N. 9, Maio de 2008
- [2] Youtube Statistics, <http://www.youtube.com/yt/press/pt-PT/statistics.html>, Informação consultada em Abril de 2013.
- [3] Paola Iovanna, Francesco Testa, Roberto Sabella, Alberto Bianchi, Marzio Puleri, Mauro Rudi Casanova, and Angelo Germoni, "Packet–Optical Integration Nodes for Next Generation Transport Networks", IEEE Journal of Optical Communication Network, V. 4, N. 10, Outubro de 2012.
- [4] Takumi Oishi, Masayuki Takase, Kenichi Sakamoto, Hideki Endo, "Implementation of Packet Transport System Using MPLS-TP Technologies", 8th Asia-Pacific Symposium on Information and Telecommunication Technologies (APSITT), 2010.
- [5] Ionescu-Graff, A.M.; Magee, F.; Prakash, S.; Tang, B.; Zhu, A.; "Quantifying the value propositions of MPLS evolution; why and when to migrate to a converged MPLS core?", Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium. NETWORKS 2004, 11th International.
- [6] Rolf Winter, NEC Labs Europe, "The Coming of Age of MPLS", IEEE Communications Magazine, Abril de 2011.
- [7] D. Thaler and B. Aboba, "What Makes for a Successful Protocol?", IETF RFC 5218, Julho de 2008.
- [8] Gastone Bonaventura, Greg Jones, and Steve Trowbridge, "Optical Transport Network Evolution: Hot Standardization Topics in ITU-T Including Standards Coordination Aspects", IEEE Communications Magazine, Outubro de 2008.
- [9] A. Pinto, "A Camada Eléctrica PDH e SDH", Apontamentos de Redes Óticas 2012/13, Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática, Universidade de Aveiro, 2012.
- [10] A. Pinto, "Next Generation of SDH", Apontamentos de Redes Óticas 2012/13, Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática, Universidade de Aveiro, 2012.
- [11] A. Pinto, "Optical Networks", Apontamentos de Redes Óticas 2012/13, Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática, Universidade de Aveiro, 2012

- [12] Nabil Bitar, "Transport Network Evolution: from TDM to Packet", Optical Society of America, 2011.
- [13] Dieter Beller, Rolf Sperber, "MPLS-TP - The New Technology for Packet Transport Networks", Alcatel-Lucent Deutschland, 2nd DFN Forum Munchen, 2009.
- [14] E. Ip, A. Lau, D. Barros e J. M. Kahn, "Coherent detection in optical fiber systems", Optical Express, V. 16, N. 2, 2008.
- [15] F. P. Guiomar, C. Rodrigues, A. N. Pinto, J. Serra e P. Mão-Cheia, "Transmissão e Receção Coerente a 40Gb/s e 100Gb/s", Revista Saber e Fazer Telecomunicações, V. 9, pp. 128-133, 2011.
- [16] K. Kikuchi, "Coherent optical transmission systems", Optoelectronics and Communications Conference (OECC 2010), pp. 120-121, 2010.
- [17] Sofia Amado, "Compensação Digital da Dispersão Cromática", Dissertação de Mestrado, Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática, Universidade de Aveiro, 2012.
- [18] T.J. Xia *et al.*, "End-to-end Native IP Data 100G Single Carrier Real Time DSP Coherent Detection Transport over 1520-km Field Deployed Fiber", Conference of OFC/NFOEC, 2010.
- [19] M. O'Sullivan, "Expanding Network Applications with Coherent Detection", Conference of OFC/NFOEC, NWC3, 2008.
- [20] Jonathan Homa and Krishna Xellus, "ROADM Architectures and Their Enabling WSS Technology", IEEE Communications Magazine, V. 46, Issue 7, Junho de 2008.
- [21] Steven Gringeri, Bert Basch, Vishnu Shukla, Roman Egorov and Tijejun J. Xia, "Flexible Architectures for Optical Transport Nodes and Networks", IEEE Communications Magazine, V. 48, Issue 17, Julho de 2010.
- [22] Rui Manuel Morais, João Pedro, Paulo Monteiro, Armando Nolasco Pinto, "Impact of Node Architecture in the Power Consumption and Footprint Requirements of Optical Transport Networks", Journal of Optical Communication Network, V. 5, N. 5, Maio de 2013.
- [23] M. Orthodoxou, "Enabling OTN Convergence - Solutions of the New Packet Optical Transport Network", White Paper, PMC-Sierra Inc., 2011.

[24] José R. Ferreira da Rocha, "Multiplex por Divisão no Tempo", Apontamentos de Sistemas de Comunicação II 2011/12, Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática, Universidade de Aveiro, 2011.

[25] JDS Uniphase Corporation, "Synchronous Digital Hierarchy", Pocket Guide, 2005.

[26] Werner Habisreiter, "Next Generation SONET/SDH - Technologies and Applications", JDSU White Paper, 2008.

[27] Cisco Global Cloud Index: Forecast and Methodology, http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns1175/Cloud_Index_White_Paper.html, consultado em Junho de 2013.

[28] José M. Caballero, Presentation on "Migration to Next Generation SDH", TrendCommunications, 2005.

[29] Steve Gorshe, "A Tutorial on it-t g.709 Optical Transport Networks (OTN)", PMC-Sierra Inc., Optical Transport Networks Technology White Paper, Document N. PMC-2081250, Issue 1, 2010.

[30] Recommendation G.709/Y.1331: "Interfaces for the Optical Transport Network (OTN)", ITU-T Standard, 2009.

[31] T. O. M. Carroll, J. Roese, "The Operator's View of OTN Evolution", IEEE Communications Magazine, V. 48, Issue 9, pp. 46–52, Setembro de 2010.

[32] "ODU0 and ODUFlex - A Future Proof Solution for OTN Client Mapping", Applied Micro Circuits Corporation, White Paper, Novembro de 2011.

[33] J. Pedro, J. Santos, and J. Pires, "Performance Evaluation of Integrated OTN/DWDM Networks with Single-stage Multiplexing of Optical Channel Data Units", in Transparent Optical Networks (ICTON), 13th International Conference, pp. 1-4, June 2011.

[34] Guylain Barlow, "A G.709 Optical Transport Network Tutorial", JDSU White Paper, Janeiro de 2009.

[35] Thor - Fiber Optic and IP Transport Equipment, Wavelength Division Multiplexers, <http://thorbroadcast.com/sklep-210/produkt-121>, consultado em Setembro de 2013.

[36] Ross McIlroy, "Ethernet", NCT4 Ethernet Exercise, University of Glasgow, 2003/2004.

- [37] Nortel Networks, "NetKnowledge: Internetworking Fundamentals", Module 2 - LAN Configurations, Lesson 2-3 - Ethernet Basics, pp. 177-183, Julho de 2002.
- [38] JDSU, White paper, "Fundamentals of Ethernet", Março de 2010.
- [39] Metro Ethernet Forum, "Carrier Ethernet for Delivery Cloud Services", White Paper, 2012.
- [40] José Jorge, "Redes Óticas de Transporte", Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2012.
- [41] Ina Minei, Julian Lucek, "MPLS-Enabled Applications - Emerging Developments and New Technologies", John Wiley & Sons Ltd, pp. 3-18, 2005.
- [42] José Ruela, "Multiprotocol Label Switching", FEUP/DEEC/RBL, 2005/06.
- [43] Harry G. Perros, "Connection-oriented Networks, Sonet/SDH, ATM, MPLS and OPTICAL NETWORKS", John Wiley & Sons Ltd, pp. 131-179, 2005.
- [44] T. Pisco, "Distribuição eficiente de IPTV", Universidade de Aveiro, 2011.
- [45] Feng Huang, Xiaobo Yi, Hanzheng Zhang, Ping Gong, "Key Requirements of Packet Transport Network Based on MPLS-TP", SPIE-OSA-IEEE Asia Communications and Photonics, V. 7633, 2009.
- [46] E. Rosen, A. Viswanathan, R. Callon, "Multiprotocol Label Switching Architecture", IETF RFC 3031 (Standards Track), 2001.
- [47] Loa Anderson, Stewart Bryant, "Joint Working Team (JWT) Report on MPLS Architectural Considerations for a Transport Profile", IETF RFC 5317, 2009.
- [48] Luyuan Fang, Dan Frost, Nabil Bitar, Raymond Zhang, Masahiro Daikoku, Jian Ping Zhang, Lei Wang, Henry Yu, Mach Chen, Nurit Sprecher, "MPLS-TP Use Cases Studies and Design Considerations", Network Working Group, Internet Draft, Outubro de 2011.
- [49] M. Bocci, M. Vigoureux, S. Bryant, "MPLS Generic Associated Channel", IETF RFC 5586, 2009.
- [50] D. Allan, G. Swallow, J. Drake, "Proactive Connectivity Verification, Continuity Check, and Remote Defect Indication for the MPLS Transport Profile", IETF RFC 6428, Novembro de 2011.
- [51] N. Sprecher, A. Farrel, "MPLS-TP Survivability Framework", IETF RFC 6372, Setembro de 2011.

[52] E. Osborne, Stewart Bryant, N. Sprecher, A. Fulignoli, Y. Weingarten, "MPLS-TP Linear Protection", IETF RFC 6378, Agosto de 2011.

[53] B. Niven-Jenkins, D. Brungard, M. Betts, N. Sprecher, S. Ueno, "Requirements of an MPLS Transport Profile", IETF RFC 5654, Setembro de 2009.

[54] Franz Rambach, Beate Konrad, Lars Dembeck, Ulrich Gebhard, Matthias Gunkel, Marco Quagliotti, Laura Serra, Víctor López, "Multilayer Cost Model for Metro/Core Networks", Journal Optical Communication Network, V. 5, N. 3, Março de 2013.