



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

ÁREA DEPARTAMENTAL DE ENGENHARIA DE ELECTRÓNICA E
TELECOMUNICAÇÕES E DE COMPUTADORES

**ATRIBUIÇÃO E ENCAMINHAMENTO DE
COMPRIMENTO DE ONDA EM REDES IP SOBRE
WDM ENERGÉTICAMENTE EFICIENTE**

MIGUEL ALVES HENRIQUES

(Licenciado em Engenharia de Electrónica e Telecomunicações e de
Computadores)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica e
Telecomunicações

Orientador:

Prof. Doutor Pedro Pinho

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Mário Véstias

Vogal - Orientador: Prof. Doutor Pedro Pinho

Vogal - Arguente: Prof. Doutor António Teixeira

Fevereiro de 2014

Abstract

The present dissertation aims to study the energy consumption of IP (Internet Protocol) over WDM networks (Wavelength Division Multiplexing) and IP over OTN (Optical Transport Network) over WDM , with focus on energy aware routing techniques, such as optical bypass. In this work several optimization models were evaluated using a topology of 12 nodes network of a Portuguese telecommunications operator. Network models were considered with SLR (Single Line Rate) channels, other models with MLR (Mixed Line Rate) channels, and also models with different wavelength routing criteria such as, by the shortest path, the lowest energy consumption and both criteria simultaneously. It was also considered a aggregation channels model. Comparisons between different models were done and allowed us to conclude the advantage by using MLR configuration together with IP over WDM architecture, and without channels aggregation at layers above IP.

Keywords: IP, OTN, WDM, optimization, efficiency, energy, routing, wavelength

Resumo

O presente trabalho de dissertação tem como objectivo principal o estudo do consumo energético de redes IP (*Internet Protocol*) sobre WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) e IP sobre OTN (*Optical Transport Network*) sobre WDM, com foco em métodos de encaminhamento que sejam eficientes do ponto de vista energético, como o *bypass* óptico. Neste trabalho são formalizados vários modelos de optimização que foram avaliados usando uma topologia de rede de 12 nós de um operador de telecomunicações Português. Foram considerados modelos de rede com canais de uma única capacidade de transmissão (SLR) e outros modelos que possibilitavam a utilização de canais na rede de variadas capacidades de transmissão (MLR), foram considerados também modelos com diferentes critérios encaminhamento de comprimentos de onda tais como, pelo caminho mais curto, o menor consumo energético e ambos os critérios simultaneamente. Foi também considerado um modelo que permite a agregação de canais a transmitir. Foram efectuadas comparações entre os vários modelos onde se pôde concluir a vantagem associada ao menor consumo energético de uma forma global no uso da arquitectura de rede IP sobre WDM e com uso de canais de várias capacidades de transmissão sem agregação de tráfego a baixo da camada IP.

Palavras: IP, OTN, WDM, optimização, eficiência, energia, encaminhamento, comprimento de onda

Agradecimentos

A realização deste trabalho não seria possível sem o apoio, colaboração e compreensão das pessoas que são dispostas de seguida. A todos eles gostaria de exprimir a minha enorme gratidão e reconhecer-lhes o elevado contributo que deram à concretização deste trabalho.

À minha mãe pela compreensão e apoio no momentos que mais me ausentava, por dedicação a este trabalho. Assim como em tudo o que me apoiou e me permitiu que eu chega-se até aqui e crescer enquanto pessoa.

Ao Eng. Pedro Pinho, pela grande disponibilidade com que se dispôs para apoiar neste trabalho desde o início até ao fim e pela compreensão e apoio nos momentos mais difíceis.

À Coriant através de Eng. João Pedro pelo fornecimento dos dados da topologia de rede e respectiva tabela de tráfego e ao Eng. Rui Morais pelas várias dicas que foi dando, fundamentalmente no início da implementação dos modelos.

Ao Eng. António Teixeira pelos comentários aos resultados iniciais e dicas para algumas implementações entretanto aplicadas.

Ao Nuno Varela pela voluntária disponibilização de computador para efectuar simulações de elevada complexidade, que permitiu reduzir o tempo total de simulação.

Índice

ABSTRACT	III
RESUMO	V
AGRADECIMENTOS	VII
ÍNDICE	IX
LISTA DE FIGURAS	XIII
LISTA DE TABELAS	XV
LISTA DE ACRÓNIMOS	XVII
CAPITULO 1: INTRODUÇÃO	1
1.1 ENQUADRAMENTO.....	3
1.2 MOTIVAÇÃO	9
1.3 OBJECTIVOS.....	9
1.4 ESTRUTURA DO DOCUMENTO	10
CAPITULO 2: ESTADO DA ARTE	11
2.1 ESTUDOS CIENTÍFICOS.....	12
2.1.1 <i>Desligar seletivamente elementos de rede</i>	12
2.1.2 <i>Desenho de rede energeticamente eficiente</i>	12
2.1.2.1 <i>Traffic Grooming</i>	12
2.1.2.2 <i>Bypass óptico</i>	13
2.1.2.3 <i>MLO (Multi Layer Optimization)</i>	14
2.1.2.4 <i>Comparação entre técnicas de desenho</i>	15
2.1.2.4.1 <i>Link switch-off versus optical bypass</i>	15
2.1.3 <i>Encaminhamento energeticamente eficiente</i>	16
2.2 NORMAS E RECOMENDAÇÕES.....	16
2.2.1 <i>ITU-T</i>	16
2.2.2 <i>IEEE</i>	17
2.2.3 <i>ETSI</i>	18
2.2.4 <i>ATIS</i>	18
2.2.5 <i>TIA</i>	19
CAPITULO 3: REDE ÓPTICA DE TRANSPORTE IP.....	21
3.1 <i>WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING</i>	22
3.1.1 <i>Atenuação em fibras ópticas</i>	26

3.1.2	<i>Dispersão em fibras ópticas</i>	27
3.1.3	<i>Efeitos não lineares em fibras ópticas</i>	28
3.1.4	<i>Equipamentos de rede WDM</i>	29
3.1.4.1	<i>Amplificadores ópticos</i>	30
3.1.4.2	<i>Comutadores ópticos (OXC)</i>	31
3.1.4.3	<i>Reconfigurable Optical Add / Drop Multiplexer (ROADM/OADM)</i>	32
3.2	<i>OPTICAL TRANSPORT NETWORK</i>	33
3.3	<i>CAMADA LÓGICA</i>	34
3.3.1	<i>Camada de internet do modelo TCP / IP</i>	36
3.3.1.1	<i>Router IP</i>	38
3.3.1.2	<i>Encaminhamento IP</i>	40
3.3.1.3	<i>Encaminhamento na rede global de internet</i>	42
3.3.1.3.1	<i>Encaminhamento inter-domínio</i>	43
3.3.1.3.2	<i>Encaminhamento intra-domínio</i>	44
3.4	<i>MODELO INTEGRADO DE TRANSPORTE IP</i>	46
3.4.1	<i>Modelo de transporte IP sobre WDM</i>	48
3.4.2	<i>Modelo de transporte IP sobre OTN sobre WDM</i>	49
3.4.3	<i>Modelo de transporte IP sobre OTN sobre WDM com agregação</i>	50
CAPITULO 4: MODELO DE OPTIMIZAÇÃO E RESULTADOS		51
4.1	<i>DESCRIÇÃO DO MODELO DE OPTIMIZAÇÃO MILP</i>	52
4.1.1	<i>Pré-processamento de parâmetros</i>	54
4.1.2	<i>Objectivo e restrições do modelo</i>	54
4.2	<i>AVALIAÇÃO DO MODELO</i>	57
4.3	<i>CENÁRIO DE OPTIMIZAÇÃO</i>	57
4.3.1	<i>Rede a otimizar</i>	57
4.3.2	<i>Equipamentos e consumos energéticos</i>	62
4.4	<i>MODELOS DE OPTIMIZAÇÃO</i>	65
4.4.1	<i>Modelo 1: Menor caminho sem bypass, SLR</i>	68
4.4.1.1	<i>Arquitectura IPoOTNoWDM</i>	68
4.4.1.2	<i>Arquitectura IPoWDM</i>	71
4.4.2	<i>Modelo 2: Menor consumo energético com bypass, SLR, IPoOTNoWDM</i>	74
4.4.3	<i>Modelo 3: Menor consumo energético com bypass, SLR, IPoWDM</i>	76
4.4.4	<i>Modelo 4: Menor consumo energético com bypass, MLR, IPoOTNoWDM</i>	79
4.4.5	<i>Modelo 5: Menor consumo energético com bypass, MLR, IPoWDM</i>	82
4.4.6	<i>Modelo 6: Menor caminho com bypass, SLR, IPoOTNoWDM</i>	83
4.4.7	<i>Modelo 7: Menor caminho com bypass, SLR, IPoWDM</i>	85
4.4.8	<i>Modelo 8: Menor caminho e menor consumo energético com bypass, MLR, IPoOTNoWDM</i>	88
4.4.9	<i>Modelo 9: Menor caminho e menor consumo energético com bypass, MLR, IPoWDM</i>	89

4.4.10 Modelo 10: Menor consumo energético com bypass, MLR, IPoOTNoWDM com agregação	90
4.5 RESULTADOS COMPARATIVOS ENTRE MODELOS.....	96
CAPITULO 5: CONCLUSÕES	99
5.1 CONCLUSÕES	99
5.2 TRABALHO FUTURO.....	101
BIBLIOGRAFIA	103

Lista de Figuras

Figura 1.1: Previsão de crescimento de emissões de CO ₂ até 2035 , para vários tipos de combustíveis e regiões[2].....	3
Figura 1.2: Emissões cumulativas de CO ₂ por região nos períodos de 1991-2005, 2006-2020, e 2021-2035 [2].....	4
Figura 1.3: Previsão de geração mundial de eletricidade por tipo de combustível, no período 2008-2035 [2].....	5
Figura 1.4: Previsão de tráfego global IP entre 2011 e 2016 por tipo em PB (10 ¹⁵ B), [5].....	6
Figura 1.5: Previsão de tráfego global IP entre 2011 e 2016 por subsegmento em PB (10 ¹⁵ B), [5].....	7
Figura 3.1 – Arquitectura de redes de telecomunicações.....	22
Figura 3.2 – Espectro electromagnético [35].....	23
Figura 3.3 – Bandas de transmissão em comunicações ópticas, na gama do infra-vermelho.....	23
Figura 3.4 – Modelo geométrico de propagação em fibra óptica, com núcleo e bainha. (a) Secção transversal da fibra óptica. (b) Secção longitudinal da fibra óptica. [1].....	25
Figura 3.5 – Exemplo de rede WDM em malha.....	29
Figura 3.6 – Exemplo de amplificador óptico EDFA. [1].....	30
Figura 3.7 – Arquitetura simplificada de OXC. [1].....	31
Figura 3.8 – Arquitectura simplificada de OADM. [1].....	32
Figura 3.9 – Hierarquia de rede OTN [38].....	33
Figura 3.10 – Estrutura de camadas do modelo OSI, TCP / IP e unidade de transporte de dados por camada.....	35
Figura 3.11 - Estrutura de cabeçalho de datagrama IPv4. [45].....	36
Figura 3.12 – Estrutura de cabeçalho de datagrama IPv6. [45].....	37
Figura 3.13 – Camadas do modelo OSI usadas na transmissão entre duas máquinas, com <i>router</i> entre máquinas.....	39
Figura 3.14 – Arquitetura genérica de router IP [37].....	40
Figura 3.15 – Modelo hierárquico simplista da rede internet.....	43
Figura 3.16 – Várias possibilidades de mapeamento de IP sobre WDM. [1].....	46
Figura 3.17 – Constituição de ROADM <i>directionless</i>	48
Figura 3.18 – Modelo de rede de transporte IP sobre WDM.....	49
Figura 3.19 – Modelo de rede de transporte IP sobre OTN sobre WDM.....	49
Figura 3.20 – Modelo de rede de transporte IP sobre OTN sobre WDM com agregação.....	50
Figura 4.1 – Diagrama de rede de transporte IP, baseado em [7].....	58
Figura 4.2 – Consumo energético total da rede por camada para SLR 10Gbps.....	69
Figura 4.3 - Consumo energético total da rede por camada para SLR 40Gbps.....	69
Figura 4.4 - Consumo energético total da rede por camada para SLR 100Gbps.....	70
Figura 4.5 - Consumo energético total da rede para SLR de 10Gbps, 40Gbps e 100Gbps.....	71
Figura 4.6 - Consumo energético total da rede por camada para SLR 10Gbps.....	72
Figura 4.7 - Consumo energético total da rede por camada para SLR 40Gbps.....	72
Figura 4.8 - Consumo energético total da rede por camada para SLR 100Gbps.....	73
Figura 4.9 - Consumo energético total da rede para SLR de 10Gbps, 40Gbps e 100Gbps.....	73
Figura 4.10 - Consumo energético total da rede por camada para SLR 10Gbps.....	74
Figura 4.11 - Consumo energético total da rede por camada para SLR 40Gbps.....	75

Figura 4.12 - Consumo energético total da rede por camada para SLR 100Gbps.....	75
Figura 4.13 - Consumo energético total da rede para SLR de 10Gbps, 40Gbps e 100Gbps.....	76
Figura 4.14 - Consumo energético total da rede por camada para SLR 10Gbps	77
Figura 4.15 - Consumo energético total da rede por camada para SLR 40Gbps	77
Figura 4.16 - Consumo energético total da rede por camada para SLR 100Gbps	78
Figura 4.17 - Consumo energético total da rede para SLR de 10Gbps, 40Gbps e 100Gbps.....	78
Figura 4.18 - Consumo energético total da rede por camada e capacidade transmissão para MLR	81
Figura 4.19 - Consumo energético total da rede por camada e capacidade transmissão para MLR.....	82
Figura 4.20 – Consumo energético total da rede por camada para SLR 10Gbps	83
Figura 4.21 - Consumo energético total da rede por camada para SLR 40Gbps	84
Figura 4.22 - Consumo energético total da rede por camada para SLR 100Gbps	84
Figura 4.23 - Consumo energético total da rede para SLR de 10Gbps, 40Gbps e 100Gbps.....	85
Figura 4.24 - Consumo energético total da rede por camada para SLR 10Gbps	86
Figura 4.25 - Consumo energético total da rede por camada para SLR 40Gbps	86
Figura 4.26 - Consumo energético total da rede por camada para SLR 100Gbps	87
Figura 4.27 - Consumo energético total da rede para SLR de 10Gbps, 40Gbps e 100Gbps.....	87
Figura 4.28 - Consumo energético total da rede por camada e capacidade transmissão para MLR.....	89
Figura 4.29 - Consumo energético total da rede por camada e capacidade transmissão para MLR.....	90
Figura 4.30 – <i>Muxponders</i> usados no modelo 10 como cenário de agregação. (a) <i>Muxponder</i> 10Gbps; (b) <i>Muxponder</i> 40Gbps; (c) – <i>Muxponder</i> 100Gbps	91
Figura 4.31 - Consumo energético total da rede por camada WDM e OTN e capacidade transmissão com <i>muxponders</i>	95
Figura 4.32 - Consumo energético total da rede com e sem <i>bypass</i> , para IPoWDM e IPoOTNoWDM	96
Figura 4.33 – Comparação de consumo total da rede para modelos 2 a 10, modelos de SLR com 10 Gbps	97
Figura 4.34 - Comparação de consumo total da rede para modelos 2 a 10, modelos de SLR com 40 Gbps	98
Figura 4.35 - Comparação de consumo total da rede para modelos 2 a 10, modelos de SLR com 100 Gbps	98

Lista de Tabelas

Tabela 1: Previsão de crescimento de tráfego global IP entre 2011 e 2016 por tipo em %, [5]	7
Tabela 2: Previsão de crescimento de tráfego global IP por subsegmento em %, [4].....	8
Tabela 3 – Lista de interfaces com tecnologia LPI na norma 802.3az.....	17
Tabela 4 - Conjunto de canais clientes ODU e respectivos canais servidores ODU [37]	34
Tabela 5 – Informação de nós da rede, baseado em [7].....	59
Tabela 6 – Distância das ligações físicas da rede, baseado em [7].....	60
Tabela 7 – Requisitos de tráfego entre nós da rede (Mbps), no 4º trimestre de 2004. [7]	61
Tabela 8 – Previsão de crescimento de crescimento de tráfego global IP na Europa ocidental, baseado em Cisco VNI, [40] e [41].	62
Tabela 9 – Componentes da camada WDM	63
Tabela 10 – Componentes de camada OTN	63
Tabela 11 – Componentes de router IP da camada internet (bidirecionais)	64
Tabela 12 – Parâmetros determinados para a simulação do modelo.....	64
Tabela 13 – Resumo de modelos de optimização	65
Tabela 14 – Componentes de rede incluídos por camada de rede.....	67
Tabela 15 – Ocupação de cada um dos canais cc em canais cl.....	91

Lista de Acrónimos

Acrónimo	Designação
ADM	<i>Add/ Drop Multiplexer</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
AS	<i>Autonomous System</i>
ATIS	<i>Alliance for Telecommunications Industry Solutions</i>
BGP	<i>Border Gateway Protocol</i>
CAGR	<i>Compound Annual Growth Rate</i>
CD	<i>Chromatic Dispersion</i>
CEN	<i>European Committee for Standardization</i>
CENELEC	<i>European Committee for Electrotechnical Standardization</i>
CO ₂	<i>Carbon Dioxide</i>
CP-QPSK	<i>Coherent Polarized - Quadrature Phase Shift Keying</i>
CPM	<i>Cross-Phase Modulation</i>
CWDM	<i>Coarse Wavelength Division Multiplexing</i>
DARPA	<i>Defense Advanced Research Projects Agency</i>
DOCSIS	<i>Data Over Cable Service Interface Specification</i>
DSL	<i>Digital Subscriber Line</i>
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>
EDFA	<i>Erbium-Doped Fiber Amplifier</i>
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
FDM	<i>Frequency Division Multiplexing</i>
FWM	<i>Four-Wave Mixing</i>
GFP	<i>Generic Framing Procedure</i>
HDLC	<i>High-level Data Link Control</i>
ICT	<i>Information and Communications Technology</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IPoWDM	<i>Internet Protocol over Wavelength Division Multiplexing</i>
IPoOTNoWDM	<i>Internet Protocol over Optical Transport Network over Wavelength Division Multiplexing</i>
IPTV	<i>Internet Protocol Television</i>
ISP	<i>Internet Service Provider</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
ITU-T	<i>International Telecommunication Union, Telecommunication Standardization Sector</i>
EUI	<i>Extended Unique Identifier</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LC	<i>Liquid Crystal</i>
LPI	<i>Low Power Idle</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
MEMS	<i>Micro-Electro-Mechanical Systems</i>
MILP	<i>Mixed Integer Linear Programming</i>
MLO	<i>Multi Layer Optimization</i>
MLR	<i>Mixed Line Rate</i>
MOSPF	<i>Multicast Open Shortest Path First</i>
MPLS	<i>Multiprotocol Label Switching</i>

NAT	<i>Network Address Translation</i>
OADM	<i>Optical Add-Drop Multiplexer</i>
OECD	<i>Organisation for Economic Co-operation and Development</i>
OLA	<i>Optical Line Amplifier</i>
OLT	<i>Optical Line Termination</i>
OSPF	<i>Open Shortest Path First</i>
OTN	<i>Optical Transport Network</i>
OXC	<i>Optical Cross-Connect</i>
PDH	<i>Plesiochronous Digital Hierarchy</i>
PMD	<i>Polarization Division Multiplexing</i>
PPP	<i>Point-to-Point Protocol</i>
PSTN	<i>Public-Switched Telephone Network</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RIP	<i>Routing Information Protocol</i>
ROADM	<i>Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer</i>
SBS	<i>Stimulated Brillouin Scattering</i>
SDH	<i>Synchronous Digital Hierarchy</i>
SLR	<i>Single Line Rate</i>
SONET	<i>Synchronous Optical Networking</i>
SPM	<i>Self-Phase Modulation</i>
SRS	<i>Stimulated Raman Scattering</i>
STEP	<i>Sustainability in Telecom: Energy and Protection</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TDM	<i>Time Division Multiplexing</i>
TIA	<i>Telecommunications Industry Association</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
WAN	<i>Wide Area Network</i>
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>
WSON	<i>Wavelength Switched Optical Networks</i>
WSS	<i>Wavelength Selective Switch</i>
WXC	<i>Wavelength Cross Connect</i>

Capítulo 1: Introdução

Com o início do novo milénio, têm-se vindo a registar elevadas mudanças nas indústrias de telecomunicações que acabam por ter impacto na vida das pessoas. A necessidade de garantir uma maior capacidade nas redes telecomunicações, assim como um maior peso que a transmissão com base no protocolo IP (*Internet Protocol*), passará a ter nas redes de telecomunicações, tem estado na base destas mudanças.

Até á uns anos atrás, eram usadas em larga escala tecnologias de transmissão com base em par de cobre que tinha como infra-estrutura a rede de comutação por circuitos, PSTN (*Public-Switched Telephone Network*), que foi projectada essencialmente para o transporte de tráfego de voz. Para além desta, existiam redes projectadas para a comutação por pacotes que eram suportadas por cabo coaxial, como era o caso de DOCSIS (*Data Over Cable Service Interface Specification*), o qual foi desenhado para o suporte de tráfego de dados.

A operação de ambas as tecnologias em infra-estruturas paralelas, tornou-se ao longo do tempo muito dispendioso para os operadores [1], os quais pretendiam fazer a migração para uma única infra-estrutura de rede que permitisse a entrega de múltiplos tipos de serviços, adaptando

também o uso da tecnologia VoIP (*Voice over IP*), como substituta da rede de comutação por circuitos.

As redes ópticas são vistas como uma tecnologia promissora para resolver os problemas atrás descritos, adicionando uma elevada capacidade transmissão suportada, numa rede de infraestrutura única. Estas redes têm também cada vez mais capacidade de alocar largura de banda de uma maneira flexível, mediante as necessidades que poderão oscilar em função do tempo, como é o caso da tecnologia, SDN (*Software-Defined Networking*) que se encontra em fase de investigação e/ou desenvolvimento por vários fabricantes.

A fibra óptica oferece uma largura de banda muito maior face aos cabos de pares de cobre e cabo coaxial, sendo menos susceptível aos vários tipos de interferência electromagnética e outros efeitos indesejados [1]. Como resultado, este é o meio de transmissão preferido para transmissão desde várias dezenas de Mbps até vários Gbps de dados ao longo vários metros e até várias centenas de km. Como tal a fibra óptica tem sido massivamente implementada em diversas redes de telecomunicações.

As redes ópticas podem ser divididas em três gerações. Na primeira geração, a camada óptica está limitada apenas à transmissão, sendo que todas as funções mais inteligentes eram efectuadas no domínio electrónico. Como exemplo de uso desta tecnologia podem-se considerar as redes PDH (*Plesiochronous Digital Hierarchy*), SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) e SONET (*Synchronous Optical Networking*). A segunda geração para além da técnica de multiplexagem TDM (*Time Division Multiplexing*) já usada na geração anterior, acrescenta a funcionalidade de WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) usando vários comprimentos de onda/canais numa única fibra. Neste tipo de redes algumas funções como a comutação/adição e remoção de comprimentos de onda são efectuadas no domínio óptico reduzindo o processamento no domínio eléctrico. Finalmente a terceira geração começa a dar os primeiros passos, sendo de esperar que no futuro todas as funções sejam efectuadas no domínio óptico (seja comutação óptica no domínio do tempo ou até comutação óptica de pacotes).

Neste capítulo pretende-se fazer uma introdução ao estudo a ser realizado, começando por um enquadramento, motivação e apresentação dos objectivos.

1.1 Enquadramento

As emissões de dióxido de carbono (CO₂) estão no centro do debate das mudanças climáticas e resultam essencialmente da combustão de combustíveis fósseis, sejam eles o carvão, gás natural ou combustíveis líquidos (baseados essencialmente em petróleo). Com base nos dados publicados em [2], resultam as duas figuras subsequentes que mostram o crescimento acentuado de emissões de CO₂ até 2035, especialmente em países como a China e a Índia que não são membros da OECD (*Organisation for Economic Co-operation and Development*). Estes países continuam a utilizar os combustíveis fósseis em massa, para responder à crescente necessidade de energia que o rápido crescimento exige.

A Figura 1.1, com base nos dados da OECD apresenta a previsão de crescimento de emissões de CO₂ em valores absolutos associado ao tipo de combustível para as regiões com maior crescimento absoluto de emissões até 2035. Na Figura 1.2, com base na mesma organização, são apresentadas as emissões cumulativas de CO₂ por região e divididas nos períodos de 1991-2005, 2006-2020, e 2021-2035.

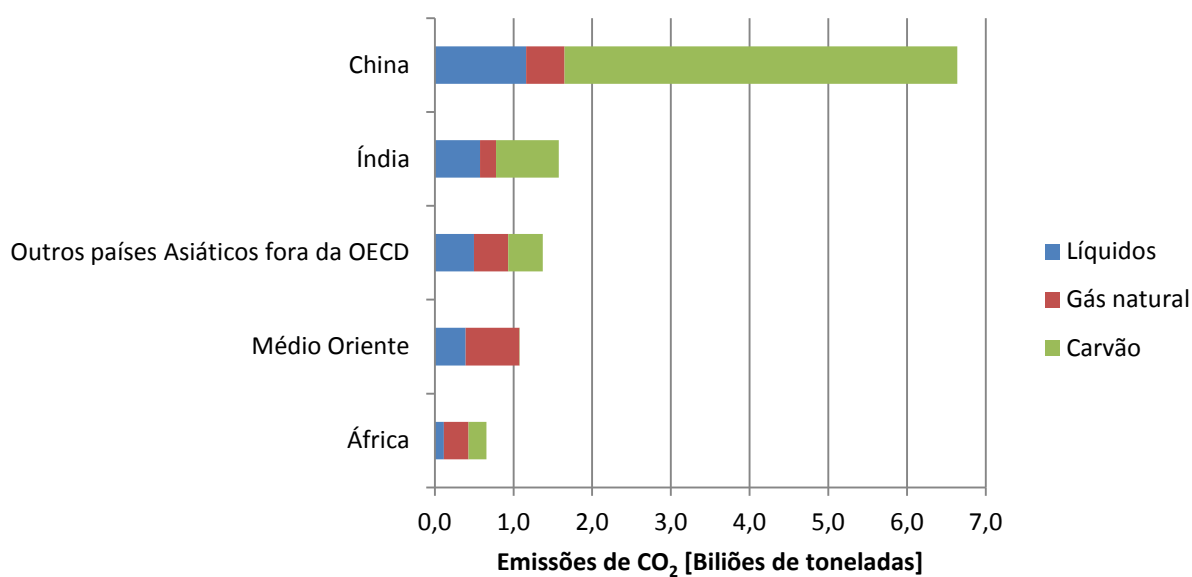


Figura 1.1: Previsão de crescimento de emissões de CO₂ até 2035 , para vários tipos de combustíveis e regiões[2]

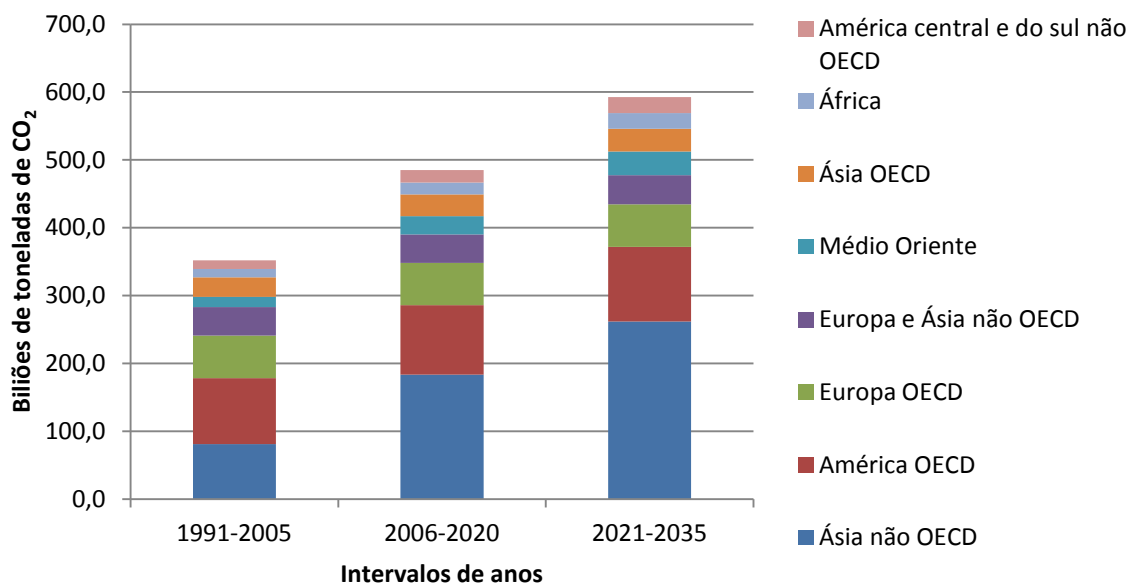


Figura 1.2: Emissões cumulativas de CO₂ por região nos períodos de 1991-2005, 2006-2020, e 2021-2035 [2]

Na sequência do protocolo de Quioto que expirou em 2012, surgiu o acordo de Copenhaga que foi celebrado em 2009, e apesar de não ter originado nenhum acordo legalmente vinculativo, vários países comprometeram-se a reduzir as emissões de CO₂ até 2020. Por exemplo, a China pretende reduzir as emissões de CO₂ entre 40% a 45% comparativamente ao valor registado em 2005, e a Índia entre 20% a 25% durante o mesmo período [3]. No ano de 2010, no âmbito da COP-16 (*Sixteenth Conference of the Parties*) e CMP-6 (*Sixth Meeting of the Parties*) em Cancun, México, para reafirmar e contribuir para o Acordo de Copenhaga foram adoptados vários acordos, entre os quais, estava incluído, o estabelecimento de mecanismos tecnológicos para apoiar países em desenvolvimento com a identificação, transferência e aplicação de tecnologias apropriadas para reduzir as emissões de CO₂ [2].

Com base na Figura 1.3 é possível obter informação pertinente, relacionando a produção de energia eléctrica com as emissões de CO₂, em que para além do elevado peso que os combustíveis fósseis têm na produção a nível mundial, estes apresentam um comportamento crescente até 2035, e que se deve fundamentalmente ao crescimento económico da Índia e da China, e que leva a reforçar a necessidade do uso de tecnologias com baixa emissão de CO₂.

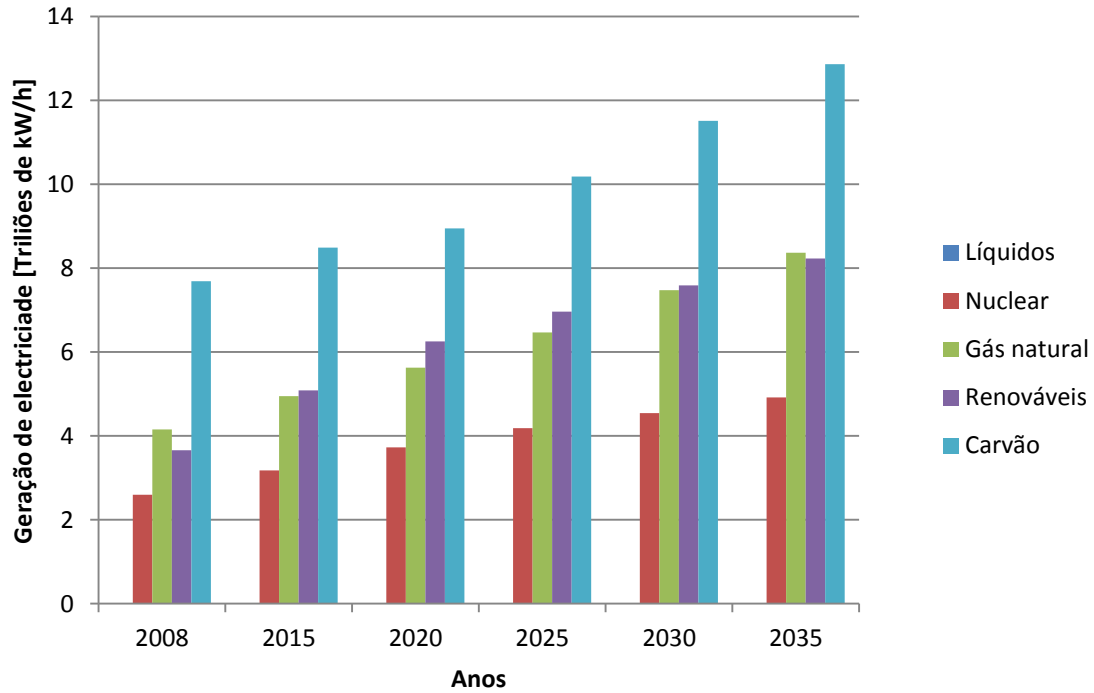


Figura 1.3: Previsão de geração mundial de eletricidade por tipo de combustível, no período 2008-2035 [2]

Em [4] foram apontados vários fatores que contribuíam para a ineficiência energética na rede de internet. Por exemplo, na Índia no ano de 2000 verificava-se que 4.75% da energia total consumida era associada à rede de internet, face a 0.07% nos Estados Unidos; assim como também se verifica a baixa eficiência no encaminhamento de tráfego IP quando comparado com a utilização de feixes hertzianos. Acrescentando aos factos anteriores as previsões de aumento de consumo energético, é deste modo reforçada a importância de tomar medidas para evitar um indesejável aumento de emissões de CO₂.

Com base na Figura 1.4 é possível verificar a previsão de crescimento de tráfego até 2016 nos vários tipos de rede. É de referir que o tráfego de tipo IPTV (*Internet Protocol Television*) apresentado está limitado apenas à rede dos fornecedores do serviço, não sendo considerado como tráfego de internet.

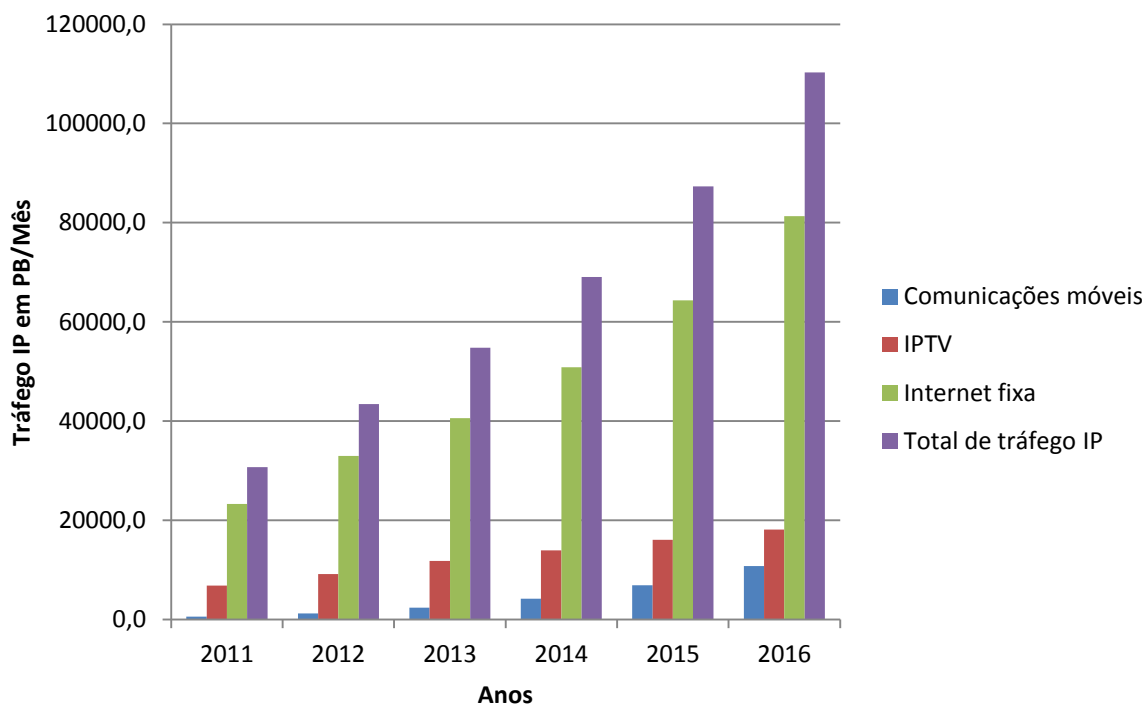


Figura 1.4: Previsão de tráfego global IP entre 2011 e 2016 por tipo em PB (10^{15} B), [5]

Sendo os dados da figura anterior apresentados em termos absolutos, não traduz de forma precisa o crescimento anual por tipo em termos relativos. Assim a Tabela 1 apresenta o crescimento relativo de tráfego ao ano. De referir que o crescimento de tráfego global entra em conta com o volume de tráfego com que cada tipo de rede contribui para o total, e que se traduz num crescimento médio anual (CAGR) de 29%. É de notar o elevado crescimento no tráfego IP associado a comunicações móveis que apesar de em 2011 representar 1,9% do total, em 2016 representará 9,8%, com um crescimento médio anual de 78%, que terá como uma das principais causas a grande adesão ao mercado dos *smartphones* e *tablets*.

Tabela 1: Previsão de crescimento de tráfego global IP entre 2011 e 2016 por tipo em %, [5]

	2011	2012	2013	2014	2015	CAGR
	– 2012	– 2013	– 2014	– 2015	– 2016	2011 – 2016
Com. Móveis	109,7	90	77,2	63,6	56,7	78
IPTV	38,4	28,8	17,6	15,5	12,7	21
Internet Fixa	41,7	23	25,4	26,5	26,4	28
Total	41,3	26,2	25,9	26,5	26,3	29

Apesar, de pelos dados anteriores, ser notável o impacto que cada tipo de rede terá no crescimento de tráfego IP, resta saber que tipo de serviços são transportados e qual o respectivo peso no tráfego total. Na Figura 1.5 são apresentados esses resultados, onde se pode verificar o elevado peso que o transporte de vídeo tem sobre o protocolo IP, levando a um aumento vertiginoso do tráfego IP.

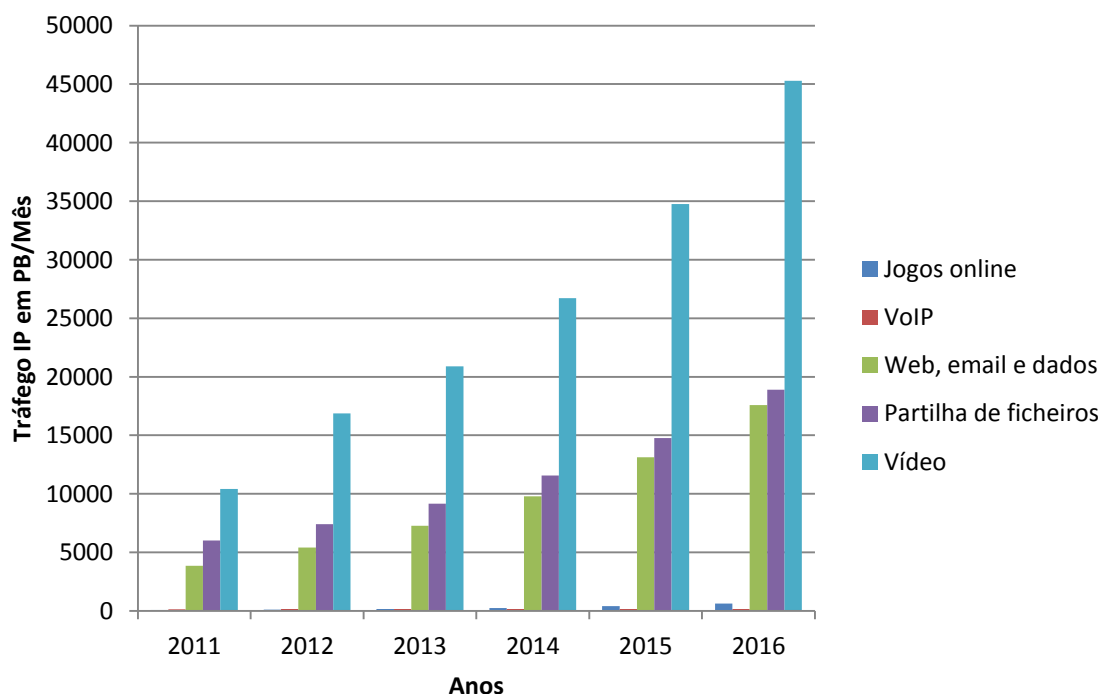


Figura 1.5: Previsão de tráfego global IP entre 2011 e 2016 por subsegmento em PB (10^{15} B), [5]

Na Tabela 2 é apresentada a previsão de crescimento relativo de tráfego ao ano para cada um dos subsegmentos indicados na Figura 1.5. Com base nessa informação e na contribuição de cada subsegmento para o tráfego total, é possível concluir que o vídeo, Web, email e dados, são os que terão o maior impacto no crescimento de tráfego no futuro próximo.

Tabela 2: Previsão de crescimento de tráfego global IP por subsegmento em %, [4]

	2011	2012	2013	2014	2015	CAGR 2011 – 2016
	–	–	–	–	–	–
	2012	2013	2014	2015	2016	2016
Jogos online	49,4	47,8	47,6	61	55,9	52
VoIP	4,8	3,2	2,5	3,7	3,0	3
Web, email e dados	40,4	34,2	34,5	34,1	34	35
Partilha de ficheiros	23,1	23,6	26,4	27,6	28	26
Vídeo	61,9	23,8	27,8	30,1	30,3	34
Total de tráfego na internet	46,1	25,6	28,8	30,3	30,6	32

Sintetizando as previsões de tráfego IP apresentadas anteriormente, considera-se importante ter especial atenção ao crescimento de tráfego proveniente das redes móveis tal como dos serviços de vídeo sobre IP, deste modo em conjunto com os restantes serviços e redes que também são responsáveis por transportar algum deste tráfego, irá reflectir-se na necessidade de uma maior capacidade necessária da rede IP global.

Com esta previsão de crescimento tráfego, e lembrando as já referidas previsões de aumento de produção de energia eléctrica com base em combustíveis fósseis, torna-se ainda mais relevante a utilização de tecnologias amigas do ambiente que limitem o crescimento de emissões de CO₂.

Como tal o presente trabalho, com base nestas previsões pretende apresentar soluções mais eficientes de distribuição de tráfego IP que minimizem o aumento de emissões de dióxido de carbono, associado à produção de energia eléctrica.

1.2 Motivação

Como resposta ao crescente tráfego IP em redes de telecomunicações, existe a necessidade de aumentar a capacidade das infra-estruturas actuais quer seja aumentando o número de canais ou fibras ópticas, ou até adoptar o uso de tecnologias de redes de transporte ópticas mais avançadas, com técnicas de modulação mais avançadas com uma eficiência espectral superior.

A adição de mais fibras e/ou canais, resultará num maior consumo energético, na infra-estrutura do operador, levando ao aumento de emissões de CO₂, quando na realidade, com base no acordo de Copenhaga se deveria diminuir face aos valores de 2009.

Para além do crescimento de tráfego é também importante ter em conta o perfil de tráfego diário [6], que atinge o valor máximo ao fim da tarde quando muitas pessoas encontram-se já em casa, depois de um dia de trabalho, e o mínimo ao início da manhã, que corresponde a cerca de 25% do pico máximo, quando muitas pessoas ainda se encontram a dormir.

No âmbito da rede de transmissão nuclear ou *core* das redes de telecomunicações, que é o foco desta dissertação, existem várias possibilidades que têm vindo a ser estudadas para a redução do consumo energético. Entre estas pode-se apontar as seguintes:

1. Desligar selectivamente alguns elementos de rede;
2. Desenho de rede energeticamente eficiente;
3. Encaminhamento energeticamente eficiente;

Apesar de esta dissertação não abranger todos estes tópicos, eles são abordados no 2º capítulo onde se descreve o estado da arte.

1.3 Objectivos

A presente dissertação baseia-se no uso da tecnologia IP sobre WDM em redes core, como tecnologia futura e promissora para responder ao crescimento de tráfego nas redes de telecomunicações, tendo como objectivo final a minimização do consumo energético associado a estas redes, aumentando a eficiência das mesmas, pela redução de equipamento activo na rede e consequentemente o ajustamento no encaminhamento do tráfego. Para além da redução de emissões de CO₂, prevê-se também um menor investimento inicial e redução de custos de operação da rede.

Importa também avaliar e garantir que esta optimização não colocará em risco a qualidade de serviço.

Como meio para se atingir a optimização energética da rede, vai recorrer-se a programação linear inteira, MILP (*Mixed Integer Linear Programming*), com o algoritmo de optimização *simplex*, que terá como base numa fase inicial uma rede portuguesa [7], em anel do operador Cabovisão, num total de 12 nós, com a matriz de tráfego, informação esta recolhida em finais do ano de 2005, que necessitará de um ajuste ao crescente volume de tráfego que até ao momento surgiu, assim como tornar este mais próximo da ordem de grandeza de capacidade de transmissão da tecnologia a usar.

1.4 Estrutura do documento

- **Capítulo 1: Introdução** – Neste capítulo é apresentado o enquadramento e a motivação para o tema desta dissertação, tal como os objectivos em que a mesma se baseia;
- **Capítulo 2: Estado da arte** – Neste capítulo são referidos os vários artigos científicos associados ao tema desta dissertação, entretanto publicados, assim como são apresentados alguns dos trabalhos que têm vindo a ser desenvolvidos por várias entidades de normalização no sector das telecomunicações;
- **Capítulo 3: Rede óptica de transporte IP** – Neste capítulo é introduzida a tecnologia usada para o transporte IP sobre WDM, desde a camada física até à lógica, assim como as arquitecturas consideradas para efectuar a integração das várias camadas de rede a considerar;
- **Capítulo 4: Modelo de optimização e resultados** – Neste capítulo é anunciado o modelo matemático de optimização a considerar, a topologia de rede, requisitos de tráfego e elementos de rede a usar. Aqui são também apresentados os vários modelos de rede e optimização e considerar assim como os respectivos resultados provenientes da optimização;
- **Capítulo 5: Conclusões** – Neste capítulo são apresentadas as conclusões e algumas propostas de trabalho futuro, partindo do trabalho desenvolvido.

Capítulo 2: Estado da arte

Neste capítulo são dados a conhecer os desenvolvimentos que têm vindo a surgir, associados à eficiência energética em redes ópticas de transporte de tráfego IP (*Internet Protocol*), possibilitando a averiguação das principais técnicas que têm vindo a ser seguidas, para tornar o transporte de tráfego IP mais “amigo do ambiente”.

Numa primeira parte são apresentados vários estudos científicos que têm vindo a ser seguidos, em conjunto com as várias técnicas envolvidas para a eficiência energética, e os resultados daí provenientes.

Na segunda fase são dadas a conhecer as várias normas e recomendações, que foram já lançadas, ou têm vindo a ser alvo de estudo, por várias entidades que contribuem para a normalização no sector das telecomunicações, tal como o ITU-T (*International Telecommunication Union, Telecommunication Standardization Sector*), IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*), ATIS (*Alliance for Telecommunications Industry Solutions*) e TIA (*Telecommunications Industry Association*), que serão apresentados mais detalhadamente na respectiva secção 2.2.

2.1 Estudos científicos

Os vários avanços que se têm verificado nos últimos anos com o objectivo de optimização de eficiência energética em redes de transporte IP, teve fundamentalmente a sua origem em 2003 com a publicação do artigo [4]. No mesmo são apresentadas algumas motivações para a necessidade de aumentar a eficiência energética, assim como direcções a ser seguidas na investigação aplicada para um menor consumo energético em redes de internet.

De referir que a eficiência energética em redes de internet pode ser considerada uma tarefa complexa, pois existem variadas soluções possíveis, daí várias abordagens têm vindo a ser seguidas, criando diferentes vertentes passíveis de redução do consumo energético, tais como referidos nos pontos seguintes.

2.1.1 Desligar seletivamente elementos de rede

Uma das aproximações que tem vindo a ser estudada, consiste em desligar de uma forma controlada cartas de linha, que correspondem à interface de interligação entre outros *routers* da rede *core* através de fibra óptica e os chassis dos próprios *routers core* [8] que demonstrou ser possível de reduzir o consumo em cerca de 30%. Em [9] abordou-se a possibilidade de desligar os próprios nós da rede assim como as suas ligações, garantindo mesmo assim a conectividade e utilização da capacidade dos canais ao máximo, com esta solução foi possível reduzir o número de ligações e nós da rede até 25% e 10% respectivamente, garantindo-se a mesma qualidade de serviço.

2.1.2 Desenho de rede energeticamente eficiente

Associado ao desenho das redes, fundamentalmente três possibilidades têm vindo a ser estudadas, sendo elas, o *Traffic Grooming*, *Bypass* óptico e MLO (*Multi layer Optimization*), descritas de seguida.

2.1.2.1 *Traffic Grooming*

A optimização da agregação de tráfego (*traffic grooming*) de canais de baixo débito binário em canais de capacidade superior, quer seja por multiplexagem no tempo (TDM), no comprimento de onda (WDM) ou em ambos, nos elementos de rede para permitir a agregação de várias

interfaces IP de baixo débito num único canal de maior débito de uma forma mais amigável ao ambiente, também tem sido um dos tópicos estudados. Como exemplo em [10] e [11], com base em *grooming* dinâmico (aplicável a casos em que os canais a agregar têm diferentes granularidades de tráfego e variáveis em função do tempo) os resultados obtidos demonstraram que o uso de *multi-hop hybrid grooming* (fazendo ligações ao longo de múltiplas camadas de comprimento de onda e para várias granularidades de débito de canais IP) em vez de *single-hop* (sem alteração de canal ao longo do percurso), permite obter uma maior eficiência energética. Em [12] para além de se comprovar a vantagem de *multi-hop grooming*, em redes IP sobre WDM dinâmicas, demonstrou-se também a protecção dedicada a comprimento de onda como sendo mais efectiva face ao *single-hop*, apesar de ser mais exigente a nível de tempo. Estas conclusões são também aplicáveis a redes ópticas multi-domínio, na comunicação intra-domínio e inter-domínio, [13]. Com base em [14] demonstrou-se que é possível obter uma maior eficiência energética pelo transporte de tráfego específico para um serviço em vez da agregação de tráfego de vários tipos de serviços. É de referir ainda que com base em [15], que depois de se ter desenvolvido um modelo matemático e aplicado a uma rede realística consegue-se obter uma eficiência energética superior pelo uso de canais de débitos diferenciados (10Gbps, 40Gbps e 100Gbps) como canais de linha de redes ópticas, em vez de se usar canais de um único débito binário.

2.1.2.2 Bypass óptico

Numa rede tradicional WDM, todo o tráfego precisa de ser terminado, em nós de comutação, onde o encaminhamento/comutação é feito electronicamente, por exemplo através de um *router* IP ou ópticamente um ADM (*Add and Drop Multiplexer*). Com o surgimento da tecnologia de comutação totalmente óptica, a comutação de tráfego no domínio óptico é cada vez mais praticável e rentável, evitando desta forma a conversão óptica/eléctrica e vice-versa. Este mecanismo é denominado por *Bypass* óptico. Quando o *bypass* óptico é aplicado na rede, a quantidade total de comutadores/*routers* electrónicos é menor e assim os custos tanto de investimento como de operação, podem ser mais reduzidos.

Segundo [16] pode-se também denominar esta técnica por comutação híbrida, uma vez que nos pontos terminais a comutação é sempre feita no domínio electrónico e em alguns nós intermédios esta é feita no domínio óptico. Um dos maiores incentivos, para o estudo desta técnica, foi motivado por [17], onde se demonstrou a possibilidade de redução do consumo entre 25% a 45%.

A crescente adesão a serviços de telecomunicações baseados na mobilidade com uma maior exigência de tráfego por utilizador associado a grandes eventos sociais, pode requerer da rede a sua capacidade de reconfiguração em função do tempo. Acrescentando a este requisito o modelo de optimização energética através do *bypass* óptico, resulta assim o modelo de *bypass* óptico dinâmico [18]. Este modelo baseia-se em multicamadas, pelo uso de IP/MPLS (*Internet Protocol / Multi Protocol Label Switching*) sobre WSON (*Wavelength Switched Optical Networks*), em que cada camada oferece possibilidades para reconfiguração de tráfego de forma dinâmica. Em primeiro lugar, as mudanças no encaminhamento na camada IP / MPLS, leva a uma alteração de circuitos ópticos existentes na camada WDM. Por outro lado os operadores de rede podem estabelecer e desligar circuitos ópticos de acordo com as necessidades do tráfego na camada IP/MPLS. O *bypass* óptico dinâmico adapta os circuitos na camada WSON, criando circuitos ópticos, como objectivo de diminuir a carga eléctrica por processamento ao nível de IP/MPLS em alguns nós da redes. De entre 4 variantes (multi-salto e um-salto), o multi-salto/um salto sucessivo, permitiu obter os melhores resultados de entre os restantes [18].

2.1.2.3 MLO (*Multi Layer Optimization*)

Existem variadas metodologias para o transporte IP sobre redes ópticas, como exemplo tem-se IP sobre WDM, em que os *routers core* estão ligados directamente entre si através de comprimentos de onda dedicados, e que é adoptado em muitos estudos associados ao *bypass* óptico. Para além desta técnica têm surgido cada vez mais estudos na literatura de alguns anos para cá associados ao transporte de IP sobre OTN e posteriormente sobre WDM, em que foi basicamente introduzida a camada intermédia OTN onde os *routers core* se ligam e que torna a rede óptica reconfigurável tendo o OXC (*Optical Cross-Connect*) e ROADM (*Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer*) como equipamentos de interface. Associado a esta metodologia tem surgido variados estudos no sentido da sua optimização, seja a nível de investimento ou de operação, passando a designar-se na literatura como MLO (*Multi Layer Optimization*).

O objectivo do estudo em [19] consistiu em comparar estas duas arquitecturas de rede (IP sobre WDM (sem *bypass*) e IP sobre OTN (*bypass* com recurso a OXC)) em termos das implicações nos custos, em que a principal conclusão que se retirou da análise efectuada é o menor custo que se consegue tirar da solução IP sobre OTN, reduzindo o tráfego nos *routers* IP através do *bypass* óptico, assim como também um número maior de nós permite aumentar a poupança de energia. Para além disto existem outros factores como a escalabilidade,

disponibilidade e protecção, que ficam acima na solução IP sobre OTN sobre WDM. O resultado deste estudo serve como auxílio, na etapa de definição da metodologia a adoptar na presente dissertação para a optimização da eficiência energética.

Em [20] foi apresentada uma nova arquitectura para uma rede IP/MPLS sobre OTN sobre DWDM, onde é de notar que para se conseguir a redução de custos total da rede multicamada, é necessário que a capacidade dos canais de transporte seja superior ao débito dos canais cliente a transportar.

Em [21] foi proposto uma técnica de *re-grooming* repetitivo, também denominado como *in-service re-grooming*, e funciona com base em ODU (*Optical Data Unit*) / comprimento de onda, como objectivo da optimização da rede óptica multicamada, sendo capaz de reduzir os requisitos da rede em 15% a 20%. Para tornar possível o uso deste método, é necessário que na arquitectura da rede esteja incluído o ROADM multinível e incolor assim como *cross-connections* no domínio ODU com a funcionalidade de realocação.

De referir que ainda existem poucos estudos publicados com o objectivo de obtenção de uma maior eficiência energética com o uso desta arquitectura de rede, pois trata-se de um tema de estudo actual.

2.1.2.4 Comparação entre técnicas de desenho

2.1.2.4.1 Link switch-off versus optical bypass

Os vários estudos apresentados anteriormente apresentam já resultados positivos no sentido da eficiência energética, no entanto estes não passam apenas de estudos focados em apenas uma técnica. Para se poder escolher umas ou várias técnicas a aplicar no terreno, será benéfico a comparação e estudo das várias possibilidades existentes.

É também neste sentido que o estudo apresentado em [22] compara a aproximação já estabelecida de desligar recursos subutilizados da camada IP, com o modelo de *bypass* óptico. Ao contrário do modelo de desligar recursos subutilizados, o *bypass* óptico não afecta a redundância de caminhos e a estabilidade no encaminhamento IP, reduzindo o consumo energético total, a capacidade total instalada, assim como o número de reconfigurações na rede enquanto esta estiver ajustada à necessidades de tráfego. O mesmo estudo conclui que o uso do modelo de *bypass* óptico não dinâmico, requer o uso de um número elevado de interfaces de baixa capacidade, que pode não ser adequado da perspectiva de planeamento da rede, pois tendo em

conta a previsões de crescimento de tráfego apresentadas no capítulo anterior, poderá exigir actualizações em campo frequentes na capacidade da rede.

2.1.3 Encaminhamento energeticamente eficiente

Tendo em consideração as previsões do aumento de tráfego, o aumento em eficiência energética não vai ser suficiente para evitar o aumento do consumo energético [23], limitando a redução de emissões de CO₂. Para se ultrapassar esta limitação têm vindo a ser seguidas aproximações no sentido de se usar energias renováveis, instalando os elementos de rede em zonas onde seja possível o uso de energias renováveis para fornecer energia [24].

É importante ter em conta que cada uma das possíveis soluções pode ter diferentes impactos na rede, e que poderão até afectar a qualidade de serviço (QoS). Assim, para além do estudo associado aos resultados de eficiência energética que se poderão obter, é também importante “balancear” os mesmos com as possíveis consequências indesejadas, que poderão advir da solução adoptada.

2.2 Normas e recomendações

Os variados estudos apresentados anteriormente, não estão directamente associados a uma entidade de standardização de telecomunicações, no entanto, as principais entidades estão já envolvidas em programas de incentivo à eficiência energética em redes de telecomunicações.

Nos seguintes subcapítulos, encontra-se as várias normas/recomendações para a eficiência energética, organizados por cada uma das entidades responsáveis.

2.2.1 ITU-T

O ITU-T (*International Telecommunication Union, Telecommunication Standardization Sector*), adicionou às suas áreas de actuação a área de “Mudança climática”, criando o grupo de trabalho *study group 5*, através da qual já foram lançadas 9 recomendações, sendo de destacar a ITU-T L.1300 [25] que inclui um conjunto de boas práticas a aplicar em *data centers*. De igual forma, da série de recomendações ITU-T L.1400, o primeiro da série [26], apresenta os princípios gerais das metodologias de avaliação do impacto ambiental das ICT assim como também descreve as diferentes metodologias que têm vindo a ser desenvolvidas:

- Avaliação do impacto ambiental de bens das ICT, redes e serviços;
- Avaliação do impacto ambiental de projectos de ICT;
- Avaliação do impacto ambiental das ICT em organizações;
- Avaliação do impacto ambiental das ICT em cidades;
- Avaliação do impacto ambiental das ICT em países e grupos de países;

2.2.2 IEEE

IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), associação sem fins lucrativos, tem como um dos papéis mais relevantes, a elaboração de normas, na área eléctrica, electrónica, comunicações e computadores. Lançou em 2010 a norma 802.3az (*Energy Efficient Ethernet*) como aperfeiçoamento da norma 802.3 (*Ethernet*) para uma maior eficiência energética em redes *Ethernet*, definindo mecanismos e protocolos para reduzir o consumo energético das ligações de rede durante os períodos de em que não existe fluxo de dados, colocando as interfaces em estado de baixo consumo [27] através do uso da tecnologia LPI (*Low Power Idle*), pois cerca de 50% da energia consumida pelos equipamentos quando ligados, estava associada ao modo de inactividade [27]. Nesta norma estão incluídas as interfaces apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Lista de interfaces com tecnologia LPI na norma 802.3az

	Interface	Meio	Máximo alcance
100BASE-TX (Full Duplex)	RJ45	Cat. 5, 5e, 6, ou 7 (cobre)	100 m
1000BASE-T (Full Duplex)	RJ45	Cat. 5, 5e, 6, ou 7 (cobre)	100 m
10GBASE-T	RJ45	Cat. 5e, 6, 6a ou 7 (cobre)	55 m (Cat. 5e ou 6) 100 m (Cat. 6a ou 7)
10GBASE-KR		PCB (cobre)	1 m
10GBASE-KX4		PCB (cobre)	1 m

2.2.3 ETSI

O ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*), é uma das organizações líder a nível mundial no desenvolvimento de normas para as tecnologias de informação e comunicação, e na área da eficiência energética foca-se em três áreas interrelacionadas:

- Contribuição para a definição de uma metodologia comum para a medição dos impactos ambientais globais;
- Elaboração de soluções técnicas para melhorar a eficiência energética na área das tecnologias de informação e comunicação;
- Impulsionar a redução de impactos ambientais noutros sectores como os transportes inteligentes e as comunicações terminal-terminal [28];

Baseando-se nestas três áreas, e por incumbimento pela Comissão Europeia para responsabilidade de executar vários mandatos, é de destacar o mandato 462, [29]. Em conjunto com a CEN (Comité Europeu de Normalização) e a CENELEC (*European Committee for Electrotechnical Standardization*) foram já lançadas variadas normas, sendo de referir no contexto desta dissertação:

- i) DES/EE-00023 (*Environmental Engineering (EE); Measurement Methods for Power Consumption in Transport Telecommunication Networks Equipment*) [30];
- ii) DES/EE-00024 (*Measurement Methods for Power Consumption of Router and switching Networks Equipment*) [28] que também se encontra na lista de normas a lançar;

2.2.4 ATIS

ATIS (*Alliance for Telecommunications Industry Solutions*), é uma das maiores organizações que contribui para o ITU [31], pelo desenvolvimento de padrões e soluções para o futuro da indústria das ICT. É através do seu comité STEP (*Sustainability in Telecom: Energy and Protection*) que envolve a indústria para desenvolver padrões e relatórios técnicos de equipamentos de telecomunicações e ambientes nas áreas de eficiência energética, impactos ambientais, energia e protecção [32]. Os requisitos técnicos, técnicas de medição, métricas e práticas operacionais documentadas no âmbito do trabalho do STEP, seja para equipamentos de telecomunicações de cliente, rede de acesso, transporte ou *Core*, são ainda elaborados de forma mais particularizada pelos seguintes subcomités:

- STEP-NPS (*Network Power Systems*): Desenvolve normas e relatórios técnicos relativos a sistemas de potência e interfaces de sistemas de energia com equipamento de carga de telecomunicações;
- STEP-NEP (*Network Electrical Protection*): Desenvolve padrões ao nível de sistema e relatórios técnicos relacionados com a protecção eléctrica das redes de telecomunicações;
- STEP-NPP (*Network Physical Protection*): Propõe, desenvolve e recomenda normas e relatórios técnicos relacionados com a protecção física e projecto físico de equipamentos de rede de telecomunicações e as instalações em que são alojados;
- STEP-TEE (*Telecommunications Energy Efficiency*): Desenvolve e recomenda normas e relatórios técnicos relacionados com a eficiência energética dos equipamentos de telecomunicações. Este é o grupo de trabalho que poderá desenvolver soluções mais adequadas ao contexto desta dissertação;

2.2.5 TIA

A TIA (*Telecommunications Industry Association*), é uma associação creditada pela ANSI (*American National Standards Institute*) para voluntariamente desenvolver normas para as indústrias das tecnologias de informação e comunicação. Esta incluiu também no seu programa a temática de políticas de energia e ambiente, em que dirige uma campanha de advocacia sustentada com os principais governos oficiais para afirmar o papel da indústria de ICT na melhoria da eficiência energética e redução das emissões de CO₂ [33]. No âmbito da mesma foi também já publicado o *white paper* [34], proporcionando à indústria de ICT perspectivas de como maximizar os benefícios das redes inteligentes, através do aumento da eficiência e redução do consumo energético.

Capítulo 3: Rede óptica de transporte IP

Este capítulo apresenta a arquitectura de redes ópticas para suporte ao transporte de tráfego IP, assim como a tecnologia envolvida, que foi adotada no âmbito desta dissertação para o estudo de atribuição e encaminhamento de comprimentos de onda energeticamente eficiente.

Tratando-se de uma arquitectura rede de duas camadas, começa-se por apresentar cada uma das camadas de rede, a camada física e camada lógica de rede, seguindo-se depois para a arquitectura da rede.

A rede óptica a abordar no âmbito desta dissertação insere-se no âmbito das redes ópticas de segunda geração, lembrando o que foi descrito no capítulo de introdução, estas redes têm a capacidade de multiplexagem no domínio do tempo (TDM) tal como a geração anterior, acrescentando a multiplexagem no domínio do comprimento de onda (WDM) na camada física como forma de aumentar a capacidade de transmissão, para além disto são acrescentadas também algumas capacidades ao domínio óptico que eram previamente efetuadas no domínio eléctrico, tal como a comutação, neste caso de comprimentos de onda.

A nível global a arquitectura de redes de telecomunicações pode ser comparada às infra-estruturas de meios de transporte, existindo as redes de acesso que fornecem acesso às habitações

e empresas, as redes de metro que estabelecem ligações entre localidades tipicamente do mesmo país, e as redes de núcleo ou *Core* que estabelecem ligações intercontinentais, entre países e até em países com uma área e volume de tráfego considerável. Como exemplo é apresentada a Figura 3.1.

É sobre as redes *Core*, representado como *Long Haul* que usam tecnologia WDM que esta dissertação se vai focar.

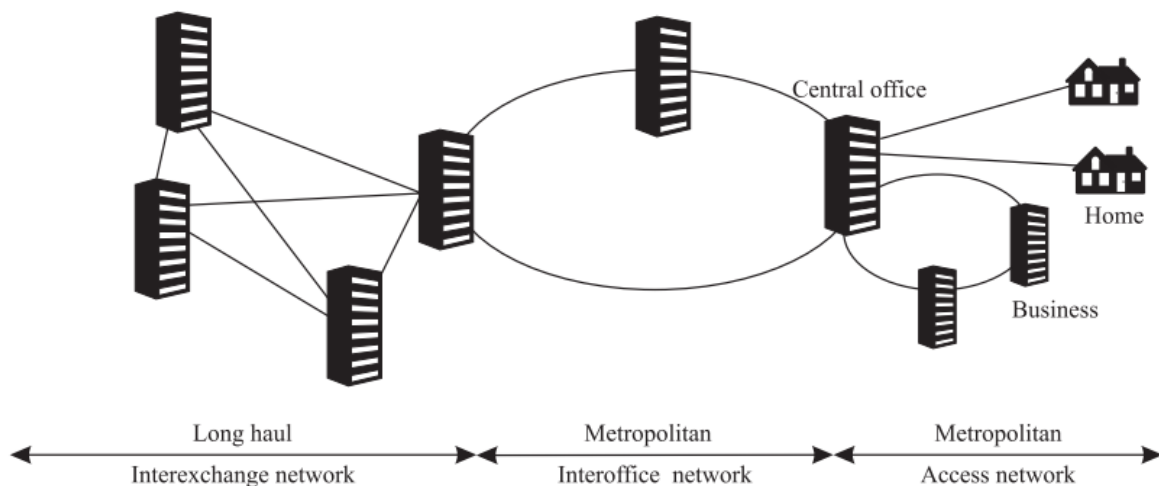


Figura 3.1 – Arquitectura de redes de telecomunicações

3.1 Wavelength Division Multiplexing

A técnica de multiplexagem no domínio do comprimento de onda referida ao longo da dissertação por WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), surgiu como solução para aumentar a capacidade de transmissão, face a redes ópticas que efectuavam a comutação puramente no domínio do tempo.

A técnica usada por WDM é essencialmente o mesmo que a multiplexagem no domínio da frequência designado por FDM (*Frequency Division Multiplexing*), usado desde à muitas décadas nas comunicações radio, onde é usado o espectro electromagnético na banda das ondas rádio. No entanto com o WDM são usadas portadoras, designadas por comprimentos de onda, frequências ou cores, na gama de infra vermelho do espectro electromagnético que é apresentado na Figura 3.2. Para a emissão de comprimentos de onda na gama do infravermelho, os componentes usados são os díodos emissores de luz ou lasers, na recepção são usados também componentes

semicondutores, tal como fotodíodos ou fotodíodos de avalanche, para converter o sinal óptico em eléctrico.

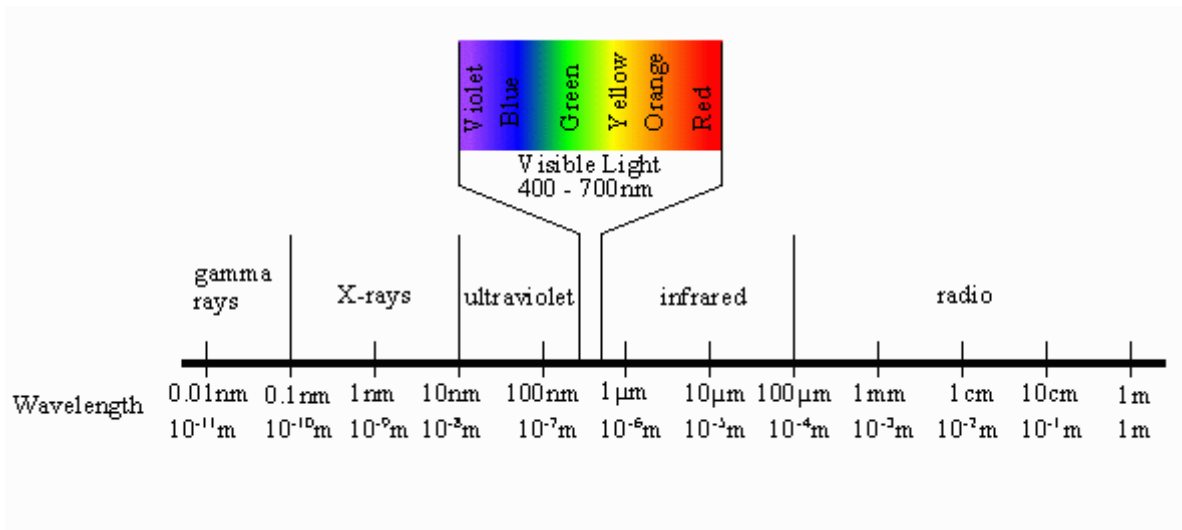


Figura 3.2 – Espectro electromagnético [35]

Dentro da banda do infravermelho, existe uma outra divisão do espectro em sub-bandas, estas são apresentadas na Figura 3.3.

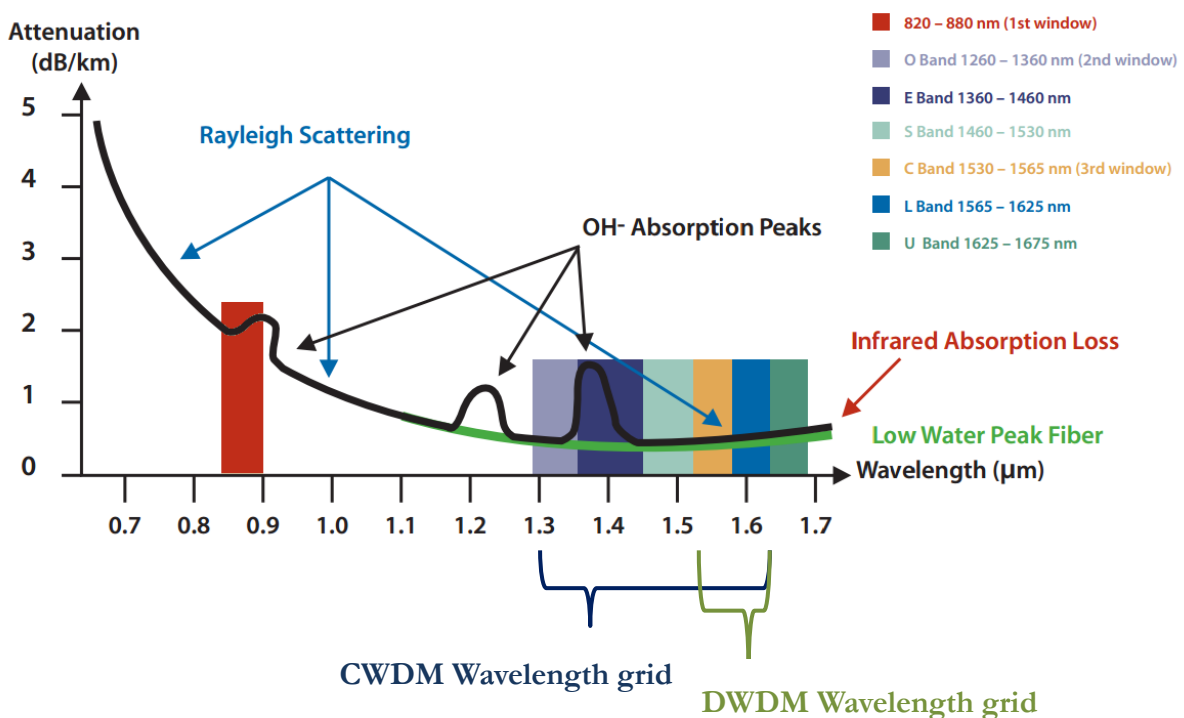


Figura 3.3 – Bandas de transmissão em comunicações ópticas, na gama do infra-vermelho

A frequência f do sinal propagado numa fibra óptica, pode-se facilmente relacionar com o comprimento de onda (λ), pela equação (3.1):

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (3.1)$$

Em que v é a velocidade de propagação do sinal na fibra óptica, que é inferior a velocidade de propagação no espaço livre ($c=3 \times 10^8$ m/s), e depende essencialmente do índice de refração do materiais da fibra óptica, n , onde circula o sinal óptico, dado pela equação (3.2):

$$v = \frac{c}{n} \quad (3.2)$$

A sigla WDM caracteriza a tecnologia de multiplexagem usado, no domínio do comprimento de onda/frequência, no entanto esta encontra-se regulada pelo ITU-T, fundamentalmente através de duas normas:

- CWDM (*Conventional/Course Wavelength Division Multiplexing*), definido na norma G.694.2, está definido da janela O a L da banda infravermelho, e pode ir de 1271nm ate 1611nm, em que o espaçamento entre portadoras deverá de ser de 20nm.
- DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*), definido na norma G.694.1, usa fundamentalmente espectro nas janelas C e L (ver Figura 3.3). Podem ser usados vários espaçamentos entre portadoras que depende essencialmente da largura de banda de cada canal e que pode ir desde 12.5GHz a 100GHz, neste ultimo caso resulta num espaçamento entre portadoras de 0.8nm, muito inferior aos 20nm da tecnologia CWDM.

Associado à dinâmica permitida pelas normas WDM, tem surgido, no mercado vários equipamentos de comunicação ópticos a usar 40 canais (x40), 80 canais (x80) e 96 canais (x96).

É de referir as várias vantagens que levaram a adoptar a transmissão nesta gama de frequências e com esta tecnologia de multiplexagem:

- Um dos maiores incentivos ao uso desta tecnologia foi sem duvida a elevada capacidade transmissão que suporta, pois quanto maior a frequência, neste caso na ordem dos THz, maior a largura de banda disponível, logo maior a quantidade de informação que se pode transmitir;

- Sendo que nesta camada de transmissão, são apenas definidas características de transmissão físicas, não sendo definindo o protocolo de transmissão a usar, no limite define a largura da banda dos canais a transmitir que pode ir de 12.5GHz até 100GHz. Com isto é permitido ao operador usar vários protocolos num único meio de transmissão, desde que sejam cumpridos os requisitos de largura de banda;
- Apresenta baixa atenuação, imposta pela sílica (material constituinte do núcleo e bainha da fibra), podendo chegar até aos 0.2dB/km perto de 1,55 μ m, tal como se pode verificar no gráfico da Figura 3.3, de atenuação em função do comprimento de onda;
- Apresenta elevada imunidade a interferência electromagnética, não sendo susceptível a interferência de sinais rádio eléctricos. Tal como as características do material isolante, dificulta o acoplamento de sinais ópticos exteriores na mesma banda de transmissão;
- Dimensão, peso e custo reduzido, o diâmetro do núcleo da fibra monomodo (onde se propaga apenas um modo na fibra) onde se propaga o sinal óptico é da ordem das poucas unidades micrómetros, e a bainha geralmente não ultrapassa os 150 μ m, ambos constituídos por sílica. O exterior é composto tipicamente por materiais de plástico como reforço e protecção. Na Figura 3.4 é apresentada a estrutura da uma fibra óptica.

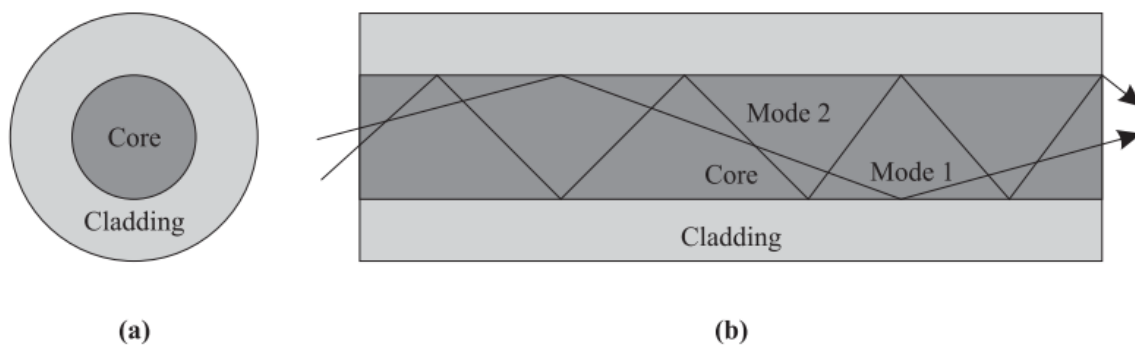


Figura 3.4 – Modelo geométrico de propagação em fibra óptica, com núcleo e bainha. (a) Secção transversal da fibra óptica. (b) Secção longitudinal da fibra óptica. [1]

De referir no âmbito desta dissertação é tido em conta fibras monomodo para a propagação do sinal, propagando-se desta forma apenas o modo fundamental, LP_{01}/HE_{11} .

Apesar das vantagens descritas para a utilização de WDM, existem também limitações que são fundamentais ter em conta no dimensionamento de redes mais complexas, como por exemplo na transmissão a longas distâncias e utilizando potências mais elevadas.

As limitações existentes podem-se dividir em três categorias, sendo elas a atenuação, dispersão e os efeitos não lineares. É apresentado de seguida as limitações que podem ocorrer na transmissão de sinais ópticos.

3.1.1 Atenuação em fibras ópticas

A atenuação em fibras ópticas deve-se a vários factores, tal como a atenuação no próprio material, este pode ser analisado pela Figura 3.3 como “*Rayleigh Scattering*”, e depende da dispersão de *Rayleigh* que é causado por impurezas na sílica que constitui o núcleo da fibra, levando a dispersão de alguma porção de potência da onda transmitida. Outra grande influência na atenuação tem a ver com os picos de água, representados também na Figura 3.3 por “*HO-Absorption Peaks*”, mas com maior impacto em comprimentos de onda específicos.

A absorção do material é outra causa para a atenuação, embora muitas vezes desprezável. No caso de haver curvaturas significantes na fibra pode ocorrer também atenuação, pelo facto de onda poder ser refractada para fora da fibra em vez de ser reflectida para dentro do núcleo da mesma. Podem ocorrer também perdas por existirem micro-curvaturas no limite do núcleo e bainha que impeçam a reflexão total da onda no núcleo.

Nestas circunstâncias será necessário recorrer a amplificadores ópticos, que contudo estão limitados na banda que são capazes de amplificar, e que pode limitar o número de canais disponíveis a usar, assim sendo existem amplificadores ópticos que trabalham nas seguintes bandas:

- Banda C: Amplificador dopado com érbio (EDFA).
- Banda L: Amplificador dopado com érbio (EDFA) com ganho deslocado no espectro.
- Banda S: Amplificador de Raman.

3.1.2 Dispersão em fibras ópticas

Existem vários factores que contribuem para dispersão temporal dos sinais transmitidos em fibras ópticas, que passam a ser descritos de seguida:

- CD (*Chromatic Dispersion*). A dispersão cromática é originada por dois factores, um deles é a dispersão material sendo causado essencialmente pelas diferentes componentes espectrais do pulso que viajam a diferentes velocidades, pois o índice de refração da sílica depende do comprimento de onda do sinal óptico aplicado. A dispersão de guia de onda é outro factor que contribui para a dispersão cromática, normalmente parte de energia propaga-se no núcleo e a restante na bainha, que leva à adopção do valor do índice de refração efectivo que varia entre o valor do núcleo e da bainha. A diferente distribuição da potencia entre núcleo e bainha em função do comprimento de onda como é o caso, causa a dispersão de guia de onda. Pode-se assim dizer que o índice de refração efectivo depende adicionalmente do comprimento de onda. Sendo uma dispersão cujo seu valor depende não só da distância percorrida pela onda mas também do comprimento de onda usado, as suas unidades são em ps/nm.km. Esta pode ser reduzida pela utilização de fontes ópticas com largura espectral pequena.
- PMD (*Polarization Mode Dispersion*). A Dispersão de polarização é causada pela assimetria do diâmetro do núcleo e da bainha em relação ao centro da fibra, que existe ao longo da fibra, designando-se por birrefringência da fibra. Ainda que em regime monomodo o campo eléctrico com sentido de propagação ao longo do eixo zz tem dois modos de polarização (um segundo o eixo xx e outro segundo eixo yy) pelos quais a energia divide-se de igual forma, ao fim de uma certa distância, ou mesmo algumas zonas da fibras com maiores defeitos, poderão causar com que os dois modos de polarização cheguem ao receptor em diferentes instantes. Com isto, o valor de dispersão corresponde precisamente à diferença de tempo na recepção entre os dois modos de polarização tipicamente dado em ps/ $\sqrt{\text{km}}$.

Tendo a dispersão material, em situações normais, a partir de cerca de 1300nm, um valor positivo, e a dispersão de guia de onda um valor negativo, consegue-se assim anular uma à outra e obter-se a dispersão cromática nula perto do 1300 nm na banda O. Contudo este ponto de dispersão zero é passível de ser deslocado para outros comprimentos de onda, possibilitando a obtenção de dispersão cromática nula noutras janelas de transmissão como a C e L, onde são

usados comprimentos de onda DWDM, embora este deslocamento possa trazer algumas consequências.

3.1.3 Efeitos não lineares em fibras ópticas

Em certas condições, tais como o uso de velocidades de transmissão acima de 2.5Gb/s, e potências de transmissão acima de cerca de 10mW [1], em sistemas WDM são originados alguns efeitos não lineares que se tornam importantes ter em conta.

Existem duas categorias de efeitos não lineares, a primeira resulta essencialmente da interação entre a onda óptica e os fótons na sílica (material onde se propaga o sinal), e divide-se em dois efeitos:

- SBS (*Stimulated Brillouin Scattering*). A difusão estimulada de Brillouin ocorre numa banda relativamente pequena entre 20MHz a 100MHz, não causando deste modo interação com outros comprimentos de onda. No entanto na mesma banda é originada uma onda em sentido contrário à do sinal transmitido que pode levar à necessidade de uso de isoladores, que impeçam a propagação da onda em sentido contrário.
- SRS (*Stimulated Raman Scattering*). A difusão estimulada de Raman estimula a transferência potencia de canais WDM para canais WDM de comprimento de onda superior, apesar disso, apresenta um ganho máximo perto de 1,55 μ m, que é inferior ao de SBS. Este efeito pode também ser útil em amplificadores.

A segunda categoria de efeitos não lineares, deve-se fundamentalmente à não linearidade do índice de refração da sílica, levando este a depender da potência do sinal óptico aplicado, face a isto são originados mais três tipos de efeitos não lineares:

- SPM (*Self-phase Modulation*). Com a auto-modulação de fase o sinal sofre *chirping*, que leva a que a frequência transmitida pelo sinal varia em função do tempo pela variação da intensidade do sinal, originando a variação do índice de refração. A existência de *chirp*, causa dispersão cromática que leva ao alargamento temporal dos pulsos recebidos.
- CPM (*Cross-phase Modulation*). A modulação de fase cruzada é causada em sistemas WDM com vários canais a transmitir, pois o *chirping* induzido no próprio canal depende não só do próprio canal, mas de todos os outros canais, cuja variação da intensidade de sinal de cada um deles, contribui para a alteração do índice de refração do meio a que são submetidos todos os canais transmitidos.

- FWM (*Four-wave Mixing*). A mistura de 4 ondas ocorre com três frequências, f_1 , f_2 e f_3 a transmitir que geram uma quarta frequência ($f_1 + f_2 - f_3$), esta directamente proporcional à potência transmitida pelos canais, mas inversamente proporcional ao espaçamento entre frequências. Uma alternativa para ultrapassar esta limitação pode passar por usar canais DWDM mais espaçados a transmitir na mesma fibra.

3.1.4 Equipamentos de rede WDM

As redes WDM são equivalentes a redes de circuitos comutados no que respeita ao encaminhamento, mas neste caso são comutados canais ópticos ou caminhos de luz. Estes que correspondem a canais ópticos ou comprimentos de onda entre dois nós de rede que podem passar por vários nós intermédios, com capacidade de comutar o respectivo comprimento de onda para diferentes direcções. Na Figura 3.5 é apresentado um exemplo de uma rede WDM em malha.

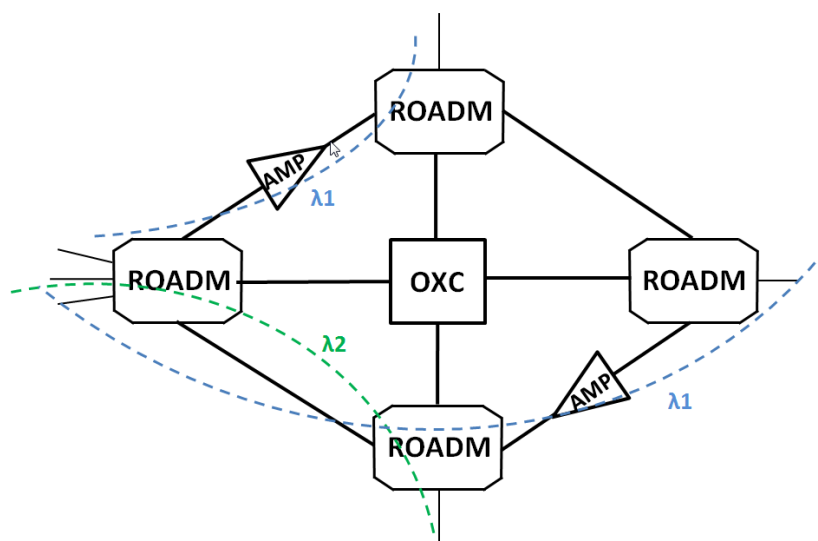


Figura 3.5 – Exemplo de rede WDM em malha.

Neste capítulo são explorados alguns equipamentos de rede WDM com capacidade de executar as funcionalidades descritas, e relevantes no âmbito desta dissertação. A Figura 3.5 apresenta o exemplo de uma rede WDM, com ROADMs (*Optical Add/Drop Multiplexer*), OXC (*Optical Cross Connect*) e AMP (*Optical Amplifier*), que podem ser dispostos de tal forma que suportem várias topologias de rede, tal como em anel e malha.

3.1.4.1 Amplificadores ópticos

Amplificadores ópticos são dispostos ao longo das fibras ópticas que transportam sinais WDM, de uma forma a amplificar os sinais, e são tipicamente dispostos a cada 80-120 km [1]. Apesar de existirem vários tipos de amplificadores ópticos, este capítulo vai-se focar em dois tipos que são mais usados em redes WDM, um deles é o EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*), e o outro é o amplificador de *Raman*.

O amplificador de fibra EDFA é composto por uma típica fibra óptica de sílica dopada em iões de érbio, a esta fibra onde passa o sinal WDM é aplicado um *multiplexer* à entrada que adiciona sinal de um laser bombeador tipicamente a 980 nm ou 1480 nm [1]. Deste modo é possível amplificar simultaneamente diferentes comprimentos na banda C mas também na banda L com EDFAs de ganho deslocado no espectro. Pelo facto de ser necessário adicionar um sinal de comprimento de onda bombeador, de forma a não interferir com sistemas a jusante este também necessita de ser posteriormente retirado da fibra através de um isolador logo após o amplificador, tal como ilustra a Figura 3.6. De forma a obter-se amplificação simultaneamente na banda C e L é necessário usar dois amplificadores EDFA fisicamente separados um do outro para amplificar cada banda separadamente.

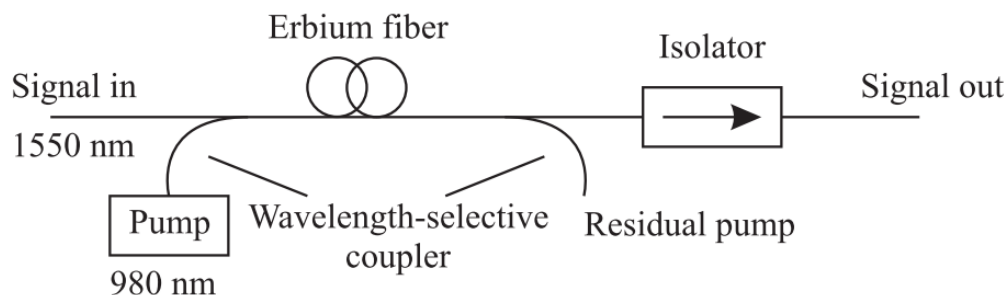


Figura 3.6 – Exemplo de amplificador óptico EDFA. [1]

Os amplificadores de Raman tiram partido do efeito não linear de propagação de sinais em fibras ópticas SRS (*Stimulated Raman Scattering*) que foi já descrito no capítulo 3.1.3, para tal é necessário aplicar um sinal óptico na fibra puramente de sílica em sentido contrário ao sinal WDM propagado, sinal este que necessita de ter um nível de potência elevado para causar o efeito não linear. Este tipo de amplificador apesar de ter a vantagem de poder amplificar em outras bandas WDM tal como na banda de 1310 nm, não tem a capacidade face a EDFA de amplificar toda a banda ao mesmo tempo com um sinal de pequena largura espectral aplicado. O

pico de ganho é centrado perto de 13 THz [1], em que com a aplicação de um sinal a um comprimento de onda específico, obtém-se o ganho no espectro a cerca de 100 nm acima. Da mesma forma que o EDFA, é necessário o uso de isoladores.

Os amplificadores de Raman são tipicamente usados no complemento do amplificadores de EDFA para proporcionar ganho adicional de uma maneira distribuída em sistemas de longo alcance, *ultra-long-haul*. [1]

3.1.4.2 Computadores ópticos (OXC)

OXC (*Optical CrossConnect*) tem a capacidade de comutar comprimentos de onda entre diferentes direcções de transmissão de uma forma puramente óptica no mesmo comprimento de onda, sendo independente do débito do canal. No caso de ser necessário a conversão de comprimento de onda para além da comutação será necessário recorrer a módulos que o executem a conversão no domínio eléctrico como é o caso de *transponders*. Tipicamente os portos do OXC encontram-se ligados a outros equipamentos WDM do lado de transmissão ou linha, e do lado da terminação ou de cliente os portos podem ligar a outros equipamentos de tecnologias como SONET/SDH, IP, ATM e *fiber channel*. Tem-se com exemplo a Figura 3.7.

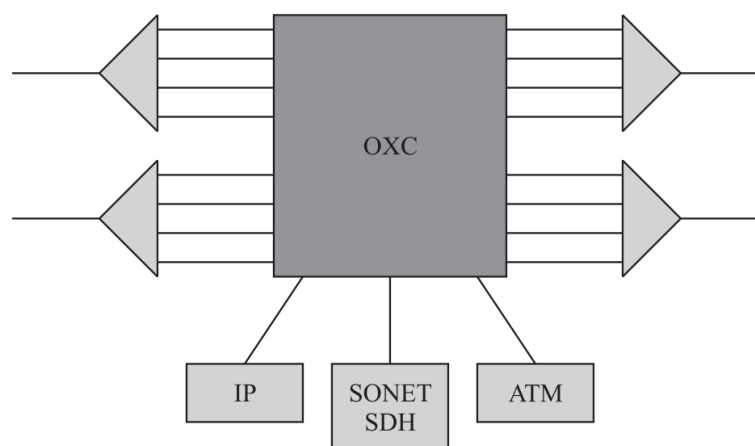


Figura 3.7 – Arquitetura simplificada de OXC. [1]

O OXC tem a vantagem de possibilitar a reconfiguração das redes ópticas, em que os comprimentos de onda / serviços podem ser adicionados e removidos sempre que seja necessário, sem estar limitado a uma configuração estática.

Apesar de no mercado existirem várias configurações possíveis para os OXCs, neste capítulo é descrita a arquitetura genérica, sendo dado mais detalhe, à arquitetura adotada nesta dissertação no capítulo 4.

3.1.4.3 Reconfigurable Optical Add / Drop Multiplexer (ROADM/OADM)

A principal utilidade do OADM é adicionar e/ou remover comprimentos de onda / canais à linha de transmissão WDM. Derivado à sua arquitetura, trata-se de um equipamento útil para topologias de rede em anel. A configuração do OADM é normalmente estática, tal como representado na Figura 3.8, em que alterações à sua configuração de comprimentos de onda requer um esforço elevado.

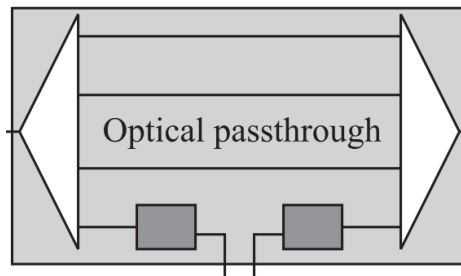


Figura 3.8 – Arquitectura simplificada de OADM. [1]

Entretanto ROADM (*Reconfigurable Optical Add / Drop Multiplexer*) tem vindo a ter cada vez mais adesão, pois veio acabar com uma grande limitação do OADM onde era necessário planejar previamente os comprimentos de onda a usar e adquirir pelos respectivos *transponders*. Pois com ROADM é possível o controlo dinâmico de comprimentos de onda a sair e a entrar.

Uma grande alavanca para possibilitar esta flexibilidade foi a introdução de *transponders* reconfiguráveis que usam lasers com comprimento de onda sintonizável, e receptores de banda larga capazes de receber sinal em qualquer comprimento de onda, assim como equipamentos comutadores de comprimento de onda de forma dinâmica como WSS (*Wavelength Selective Switch*). O equipamento ROADM não apresenta uma arquitectura universal que seja usada por todos os fabricantes, no entanto baseiam-se sobretudo num pequeno conjunto de tecnologias, tal como MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*) e LC (*Liquid Crystal*) para fazer a comutação de comprimentos de onda específicos. Vários fabricantes como a *Cisco Systems, Inc* usam equipamentos como WXC (*Wavelength Cross Connect*) integrados em nós ROADM, constituídos internamente por comutadores ópticos que permitem seleccionar os comprimentos de onda a transmitir numa determinada direcção.

3.2 Optical Transport Network

OTN (*Optical Transport Network*) e OTH (*Optical Transport Hierarchy*), baseiam-se num conjunto de recomendações ITU-T, tal como ITU G.709/Y.1331 [36] e G.872 [37], que não sendo as únicas, descrevem em grande parte, e é fundamentalmente com base nestas que este capítulo é apresentado. A camada OTH funciona fundamentalmente no domínio eléctrico, desde o nível OPU (*Optical Channel Payload Unit*) até ao OTU (*Optical Channel Transport Unit*), e tem a capacidade para efectuar o mapeamento de sinais de cliente do mesmo ou de protocolos diferentes de OTN tal como de *Ethernet* para ODU (*Optical Channel Data Unit*), possibilita também a agregação através da multiplexagem no domínio do tempo, tal como a monitorização e gestão através de canais de gestão dedicados.

Na Figura 3.9 é apresentada a visão global da hierarquia OTN, na camada digital (OTH) entre OPU e OTU é feito todo o processamento electrónico, como por exemplo o mapeamento e multiplexagem. De Och (*Optical Channel*) até OTS (*Optical Transmission Section*) é considerado o domínio óptico. Os canais de cliente como por exemplo *Ethernet* são mapeados numa *frame* OPU, com recurso à técnica GFP (*Generic Frame Procedure*).

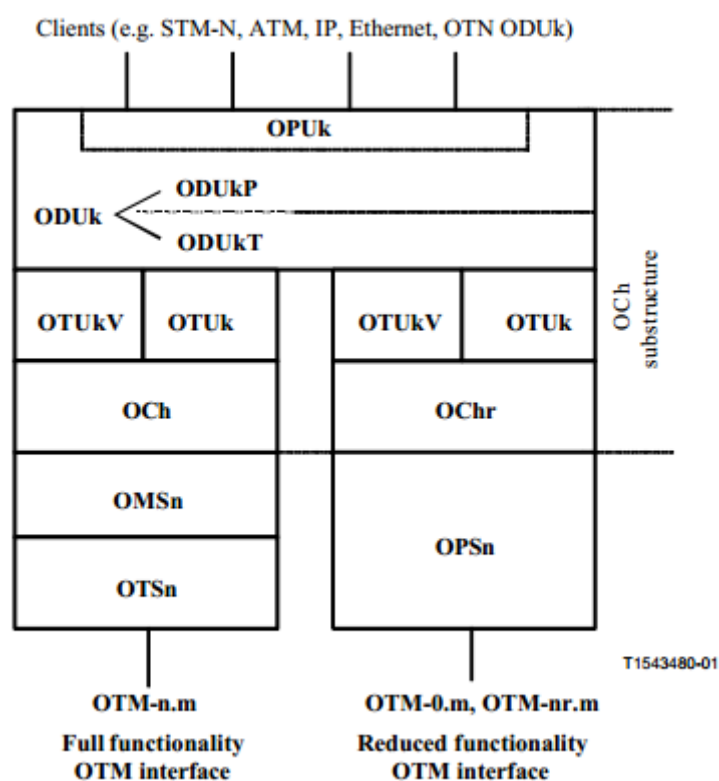


Figura 3.9 – Hierarquia de rede OTN [38]

Pela Tabela 4 é possível verificar as várias possibilidades de multiplexagem de canais ODU clientes em canais servidores ODU. Como exemplo, suportando o canal ODU2 servidor 10 Gbps, é capaz de suportar 4 canais cliente de ODU1 ou então 3 canais cliente ODU1 e dois ODU0, sendo assim tanto maior as possíveis combinações de multiplexagem quanto maior a ordem do canal ODU servidor. Pela mesma tabela verifica-se a possibilidade de mapear canais de 10Gbps *Ethernet* em ODU2 pela compatibilidade a nível de capacidade de transmissão.

Tabela 4 - Conjunto de canais clientes ODU e respectivos canais servidores ODU [37]

ODU Clients	ODU Server
1.25 Gbit/s bit rate area	ODU0
-	
2.5 Gbit/s bit rate area	ODU1
ODU0	
10 Gbit/s bit rate area	ODU2
ODU0, ODU1, ODUflex	
10.3125 Gbit/s bit rate area	ODU2e
-	
40 Gbit/s bit rate area	ODU3
ODU0, ODU1, ODU2, ODU2e, ODUflex	
100 Gbit/s bit rate area	ODU4
ODU0, ODU1, ODU2, ODU2e, ODU3, ODUflex,	
CBR clients from greater than 2.5 Gbit/s to 100 Gbit/s, or GFP-F mapped packet clients from 1.25 Gbit/s to 100 Gbit/s.	ODUflex
-	

3.3 Camada lógica

A rede de internet teve a sua origem na década de 60, durante pesquisas militares na guerra fria, e teve os primeiros desenvolvimentos na década de 70 pela Agência de Projectos de Pesquisa Avançada de Defesa (DARPA) com o interesse de estabelecer uma rede comutada por pacotes que facilite a comunicação entre diferentes sistemas em instituições de investigação. A *DARPA* em conjunto com outras instituições de investigação, terminou em finais de 1970 a definição do protocolo de internet.

O *Internet Protocol* (IP) que serve de suporte à rede de internet é actualmente o mais popular e não proprietário protocolo, que é usado para comunicar ao longo de um vasto conjunto de redes interligadas que não necessitam de estar restritas a apenas um meio de transmissão, sendo capaz de suportar uma ampla variedade de serviços. É também adequado tanto para *Local Area*

Networks (LAN), que caracteriza redes de carácter local que cobrem normalmente escritórios ou empresas, tal como para como para WAN (*Wide Area Networks*) que abrange uma vasta área geográfica e são geridas tipicamente por operadores de telecomunicações.

Da definição do protocolo de internet, resultou o modelo OSI que estabelece regras para permitir a comunicação entre máquinas heterogéneas, e define regras genéricas para a construção de redes computadores, este modelo divide a arquitectura de redes em 7 camadas, permitindo a abstracção de certas camadas, pois a cada uma é atribuída uma determinada função e interage apenas com as camadas adjacentes.

A estrutura de camadas do modelo OSI assim como TCP / IP (que se deriva do OSI) e a respectiva unidade de transporte de dados em cada camada são apresentados na Figura 3.10.

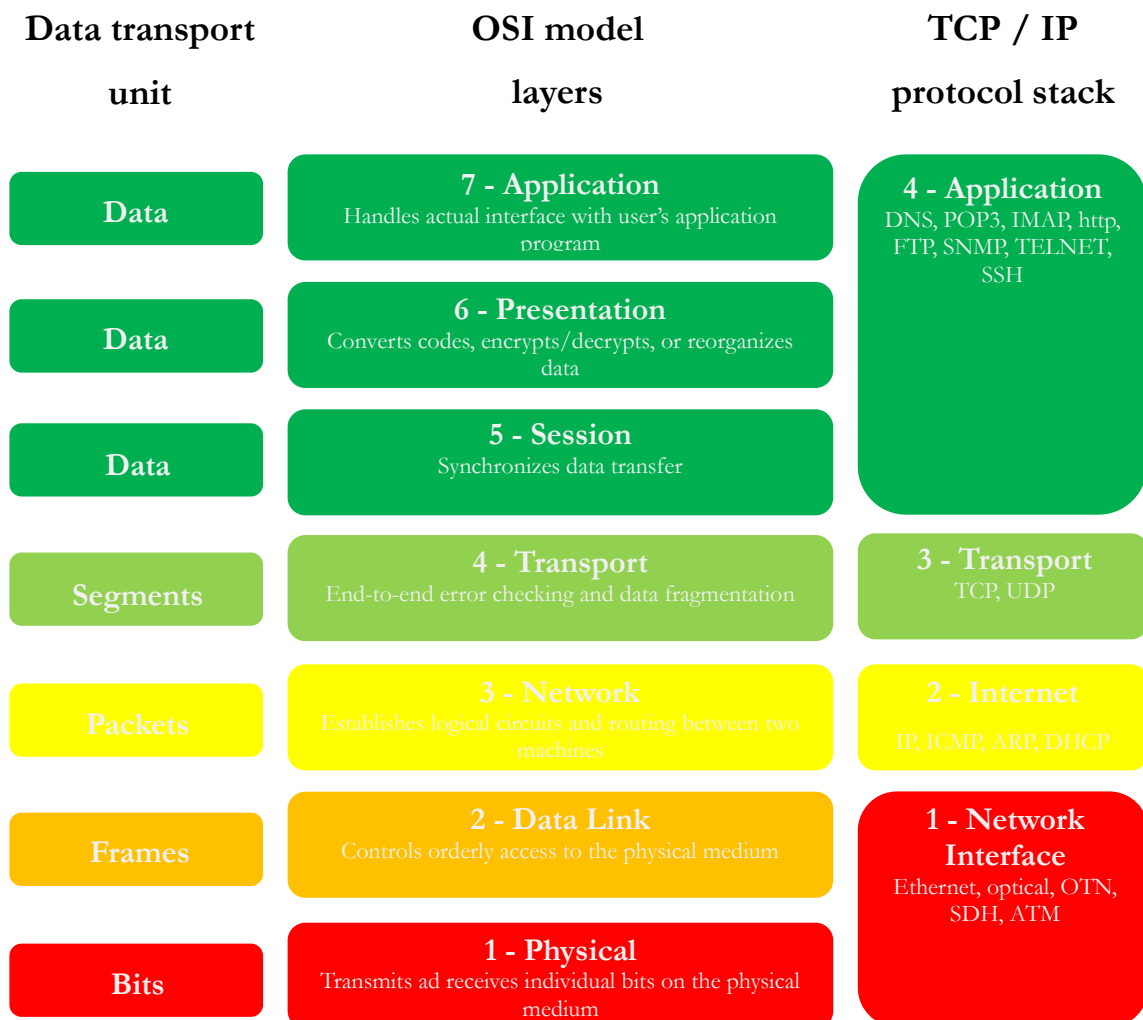


Figura 3.10 – Estrutura de camadas do modelo OSI, TCP / IP e unidade de transporte de dados por camada

No âmbito da presente dissertação tem-se apenas em conta as camadas 1 e 2 do modelo TCP / IP, pois é feita a definição do meio de transporte físico ate ao encaminhamento (*routing*) ao nível da camada IP.

No seguinte secção 3.3.1, é descrito com mais detalhe as funções da camada 2 (TCP/IP) de internet. No que se refere à camada 1 de interface de rede, foi já descrito em 3.1, sendo esta a tecnologia de suporte a estas camadas, não obstante é apresentado na secção 3.4 a forma como são integradas as camadas 1 e 2.

3.3.1 Camada de internet do modelo TCP / IP

Com funções muito semelhantes à camada 3 de rede do modelo OSI, é nesta camada que é definida a função de interligação de redes / equipamentos IP, entre as suas responsabilidades encontra-se o encaminhamento de dados para a rede ou equipamento correto na rede de destino. Apesar de na Figura 3.10 ser representado como a unidade de transporte de dados nesta camada o pacote, tratando-se neste caso de pacotes gerados pela camada de internet a estes dá-se o nome de datagramas IP, que são encapsulados na unidade de transporte da camada a baixo.

De forma a ser possível executar as varias funcionalidades deste protocolo, é necessário adicionar alguma informação adicional para além dos próprios dados a transportar, é neste sentido que o datagrama IP é constituído pelo cabeçalho designado por *header* que contem informação de controlo para este protocolo e os dados a transportar designados por *data* ou *payload*, a estrutura dos cabeçalhos das duas versões mais populares do protocolo de internet, IPv4 e IPv6, são apresentados na Figura 3.11 e Figura 3.12 respectivamente.

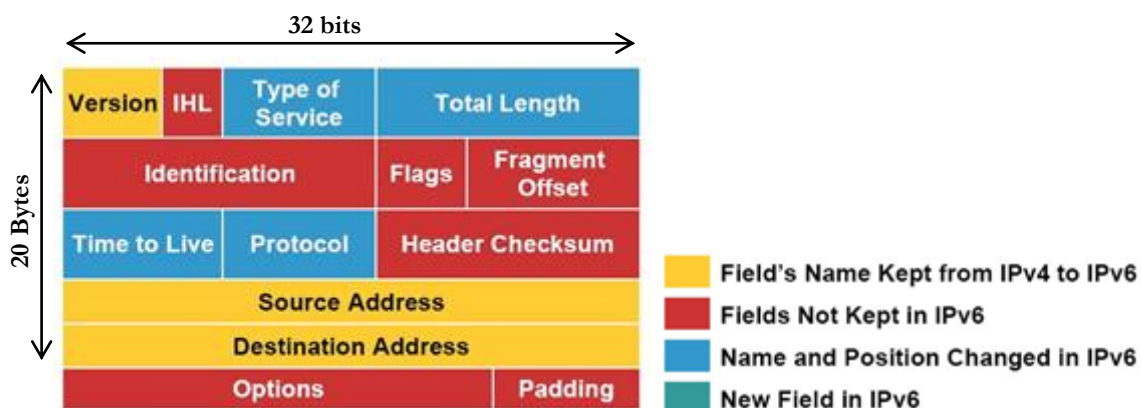


Figura 3.11 - Estrutura de cabeçalho de datagrama IPv4. [45]

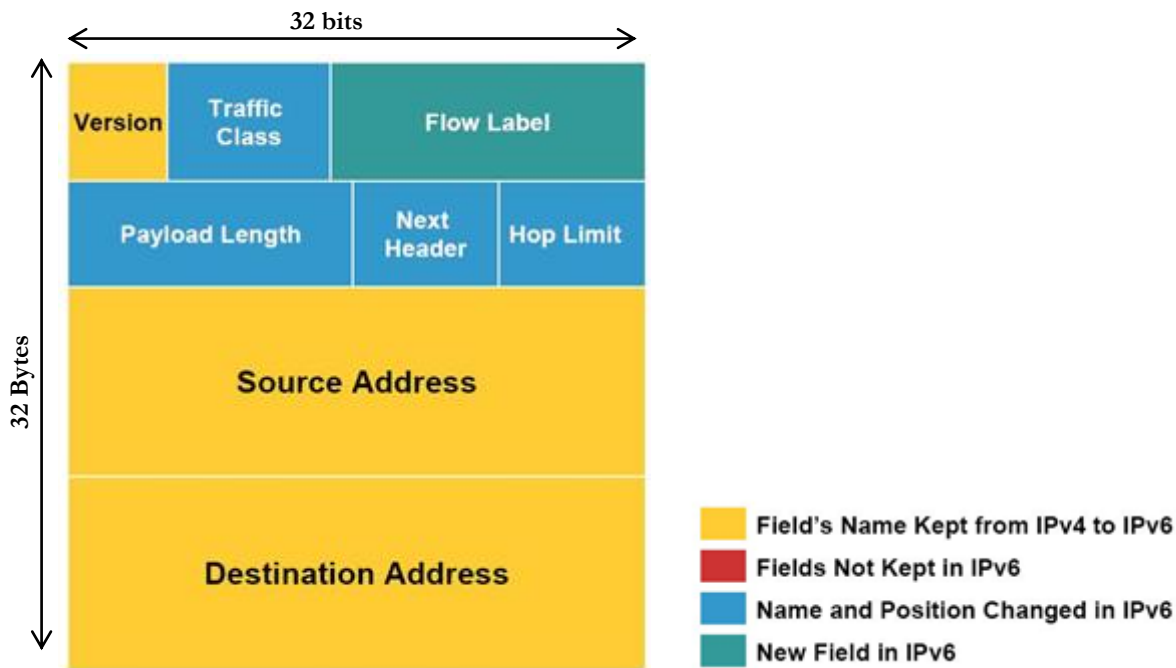


Figura 3.12 – Estrutura de cabeçalho de datagrama IPv6. [45]

A primeira grande versão do protocolo de internet foi o IPv4, que teve uma grande adesão na internet continuando ainda a ser muito usado, no entanto, este protocolo requer que cada um dos pontos terminais do protocolo seja uma rede ou equipamento com um endereço único dentro da mesma rede de internet.

Com o elevado crescimento da internet nos últimos anos notou-se que a capacidade de endereçamento de 32 bits de IPv4 não seria suficiente para os equipamentos ou redes, com necessidade de ligação à rede global de internet. Neste sentido surgiu uma nova versão do protocolo de internet, o IPv6, que veio resolver algumas limitações do protocolo IPv4 tal como a capacidade endereçamento mas também trazer algumas vantagens adicionais, entre as quais se pode referir [36]:

- **Encaminhamento mais eficiente.** Pois permite agregar todos os endereços de uma rede de um provedor de serviço de internet em apenas um endereço que represente uma rede de um provedor de internet, e este último é o endereço utilizado na rede global IPv6. Com isto as tabelas de encaminhamento tornam-se menores;
- **Maior eficiência no processamento de pacotes.** Devido à redução do número de campos do cabeçalho do datagrama, deixando também de possuir o *checksum* que era usado para detectar erros no datagrama, pois uma grande parte dos

protocolos da camadas superior fazem já o controlo de erros, evitando assim redundância;

- **Encaminhamento em formato *multicast*.** Esta funcionalidade foi possibilitada pela adição do campo *Flow label* ao cabeçalho, e permite num nó a identificação de datagramas recebidos pertencentes ao mesmo fluxo de dados, e que possam ser integrados num único datagrama até este mesmo nó;
- **Simplificação do processo de configuração da rede.** Pela capacidade de um terminal poder gerar o seu próprio endereço de rede através do seu endereço físico (MAC) convertido no identificador universal estendido de 64 bits (EUI), que é anexado ao endereço de ligação local também de 64 bits fornecido pelo *router* a que se encontra ligado, originando o endereço de IPv6 de 128 bits, face aos 32 bits de IPv4;
- **Suporte de novos serviços.** Com a eliminação do mecanismo *Network Address Translation* (NAT), é permitido a ligação directa ponto a ponto, sem tradução intermédia de endereços;

3.3.1.1 Router IP

Numa rede IP os principais elementos de rede estão associados aos *routers*, pois estes são os equipamentos com mais inteligência ao longo da rede de transmissão. As principais funcionalidades suportadas são:

- **Encapsulamento e conversão.** É necessário para interligar duas redes com tecnologias de camada 2 diferentes como o ATM, *frame relay* e *Ethernet*;
- **Processamento e classificação.** Servem essencialmente para a análise de cabeçalho dos pacotes que passam no *router*, classificando-os com a informação aí existente, nomeadamente os endereços de origem e destino;
- **Encaminhamento.** Com base na tabela de encaminhamento, serve para indicar qual o próximo destino do pacote;
- **Mecanismos de encaminhamento.** São responsáveis pelo sincronismo entre *routers* por forma a manter constantemente actualizada a tabela de encaminhamento.

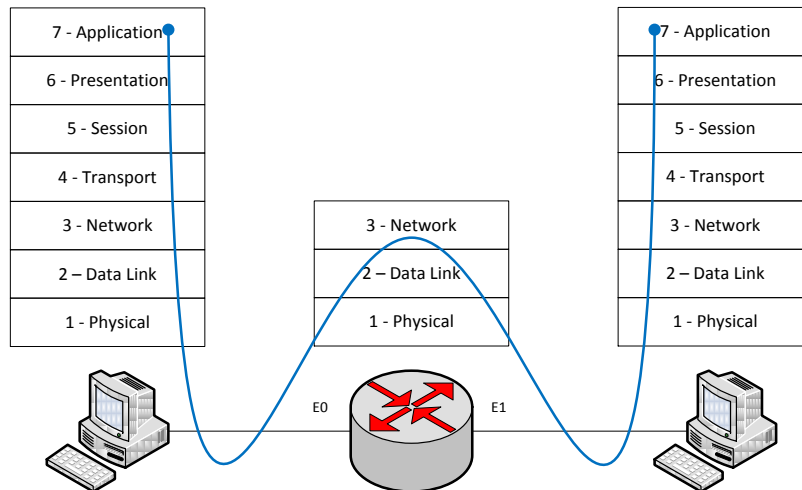


Figura 3.13 – Camadas do modelo OSI usadas na transmissão entre duas máquinas, com *router* entre máquinas.

O router executa funcionalidades até à camada 3 de rede, onde são executadas as suas funcionalidades descritas. Na Figura 3.12 são ilustradas as camadas usadas na comunicação entre duas aplicações de máquinas distintas, com um router entre as mesmas. Este separa diferentes redes, mas tem a tarefa de permitir a comunicação entre todas elas. Face à sua arquitectura é permitido ligar diferentes tipos de interfaces, ópticas ou eléctricas e de diferentes capacidades.

Do ponto de vista de alto nível a arquitectura genérica de um router IP, tal como ilustrado na Figura 3.14, é composto por 4 componentes: [37]

- **Portos de entrada.** Executam várias funções tal como a terminação da ligação física que chega ao router e que está associado à caixa mais à esquerda de *Input port* na Figura 3.14. Um porto de entrada também executa tarefas ao nível da camada 2 de *Data Link*, para poder interagir com outro equipamento noutra extremidade da ligação na mesma camada, e corresponde à caixa do meio dos portos de entrada e saída. A caixa mais à direita do porto de entrada, é talvez a mais crucial, pois é aqui que na camada 3 é analisado o cabeçalho do pacote e a tabela de encaminhamento para determinar para que porto de saída vai ser encaminhado o pacote através da comutação feita em *switching fabric*. Os pacotes de protocolos de sinalização, são directamente encaminhados para o *Routing processor*;
- **Switching fabric.** Encontra-se totalmente integrado dentro do próprio router, e tem funcionalidade de interligar os portos de entrada com os portos de saída para onde devem ser encaminhados cada um dos pacotes;

- **Portos de saída.** Alojamos os pacotes recebidos de *switching fabric* e encaminhamos pela ligação física do porto, efectuando as funcionalidades necessárias da camada de ligação e física. No caso dos portos serem bidireccionais, o porto de saída está directamente associado a um porto de entrada, e encontra-se ambos na mesma carta de linha (placa de circuito impresso que contém um ou mais portos de entrada, que está ligada à *switching fabric*);
- **Processador de encaminhamento.** Executa os protocolos de encaminhamento, calcula e mantém as tabelas de encaminhamento e o estado das ligações. É também responsável pelas funcionalidades de gestão de rede;

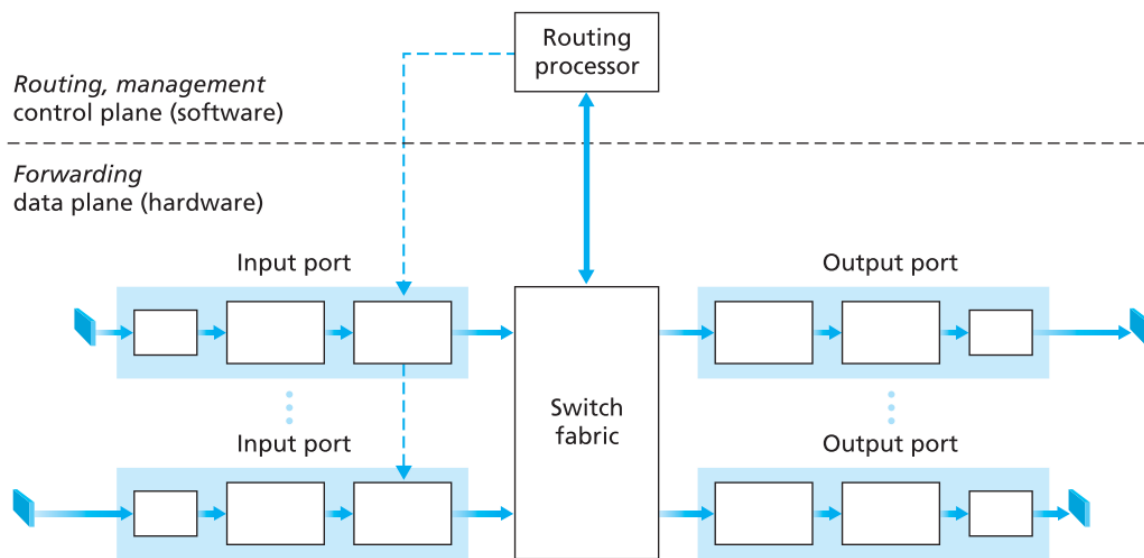


Figura 3.14 – Arquitetura genérica de router IP [37]

3.3.1.2 Encaminhamento IP

Na camada de transmissão de internet, assim que um pacote chega a um *router*, uma das tarefas a fazer nos portos de entrada é a indexação da tabela de encaminhamento por forma a determinar o porto de saída para encaminhar o pacote. Com base na troca de informação entre *routers* vizinhos, são também actualizadas as tabelas de encaminhamento de cada *router*. De forma a ser possível executar estas tarefas, em todos os *routers* da rede, proporcionando a comunicação na rede entre dois equipamentos terminais usando o melhor caminho, é necessário o uso de

algoritmos de encaminhamento. Tipicamente o melhor caminho é dado pelo que apresenta o menor custo, onde podem entrar factores que dependem do algoritmo de encaminhamento usado. Nos algoritmos de encaminhamento na internet usados actualmente (tal como RIP (*Routing Information Protocol*), OSPF (*Open Shortest Path First*) e BGP (*Border Gateway protocol*) não entra em conta para o cálculo do caminho de menor custo, o nível de congestionamento da rede [37].

Os algoritmos de encaminhamento podem ser classificados como globais, que são normalmente referidos como algoritmos do tipo *link-state*, ou descentralizados caracterizados por algoritmos do tipo *distance-vector*.

Nenhum deles é vencedor em relação ao outro, pois ambos são usados na rede de internet.

Com algoritmos de encaminhamento do tipo *distance-vector*, o cálculo do caminho de menor custo é feito de forma iterativa e distribuída. Nenhum nó tem previamente conhecimento do custo de todas as ligações da rede. Em vez disto, cada nó começa por ter o conhecimento das ligações directas ao mesmo, e por forma a calcular o custo de uma ligação até um destino, os vários nós envolvidos comunicam entre si iterativamente, com isto o nó de origem calcula gradualmente o caminho de menor custo para o destino. Este algoritmo permite que cada nó contenha vectores com custos estimados para todos os outros nós da rede. Trata-se também de um algoritmo assíncrono, pois cada nó envia periodicamente aos seus vizinhos uma cópia da sua informação de *distance-vector*, não tratando-se de uma informação que é actualizada ao mesmo tempo em todos os nós. Algoritmos do tipo *distance-vector* são usados em vários protocolos de encaminhamento na internet, como é o caso dos protocolos, RIP e BGP.

Pelo facto de com o algoritmo de *distance-vector* a comunicação ser feita apenas com os vizinhos do router em cada iteração, até que toda a rede seja actualizada com a informação alterada/adicionada, leva a que o tempo de convergência do algoritmo dependa de vários factores, podendo em certos casos requerer um maior numero de iterações e conseqüentemente um tempo superior de convergência, durante o qual podem haver ainda alguns ciclos de actualização dos mesmos *routers*. Por outro lado a alteração no custo de uma ligação entre dois nós leva a que esta nova informação seja transmitida aos routers que contenham caminhos de menor custo que incluam a ligação com custo alterado.

Algoritmos do tipo *link-state*, calculam o caminho de menor custo com base no conhecimento de toda a rede a nível dos custos das ligações, e que requer o conhecimento prévio

de toda a rede. Este baseia-se no algoritmo de *link-state broadcast* que é usado na rede de internet pelo protocolo OSPF, com isto cada *router* difunde para todos os *routers* da rede a sua própria informação das ligações associadas às interfaces do mesmo, passando todos os *routers* da rede a ficarem actualizados com a mesma informação e uma visão completa de toda a rede. A partir daqui cada *router* pode executar o próprio algoritmo *link-state*. Uma das vantagens deste algoritmo face ao *distance-vector* é facto de conseguir geralmente tempos de convergência inferiores.

O algoritmo de encaminhamento do tipo *link-state* usado na internet é conhecido por algoritmo *Dijkstra*. Este calcula o caminho de menor custo desde um *router* para todos os outros *routers* da rede. Trata-se de um algoritmo iterativo que após k iterações os caminhos de menor custo para os k *routers* de destino são conhecidos, os k caminhos descobertos são os k caminhos de menor custo.

3.3.1.3 Encaminhamento na rede global de internet

Tendo hoje em dia a rede global de internet pelo menos centenas de milhões de equipamentos interligados, com o uso dos algoritmos encaminhamento descritos, como o *link-state*, o tráfego gerado pelo algoritmo não deixaria capacidade disponível para o transporte de dados, da mesma forma que o algoritmo *distance-vector* nunca convergiria. O uso de um algoritmo de encaminhamento em toda a rede, levava a que fornecedores do serviço de internet (ISP – *Internet Service Providers*) responsáveis por uma parte de rede, não tivessem total autonomia na administração da rede pela qual são responsáveis.

As limitações descritas, foram resolvidas pela organização de *routers* em sistemas autónomos (AS - *Autonomous systems*), também designado de domínio, em que cada AS consiste num conjunto de *routers* ligados entre si que são normalmente controlados pelo mesmo ISP. Tipicamente um AS está associado a um ISP, contudo um ISP pode ser também responsável por vários AS. Com esta solução, todos os *routers* dentro do mesmo AS utilizam o mesmo protocolo de encaminhamento, denominado de protocolo de encaminhamento intra-domínio. Para comunicação entre AS diferentes, é usado o protocolo de encaminhamento inter-domínio e que requer que seja o mesmo entre domínios adjacentes.

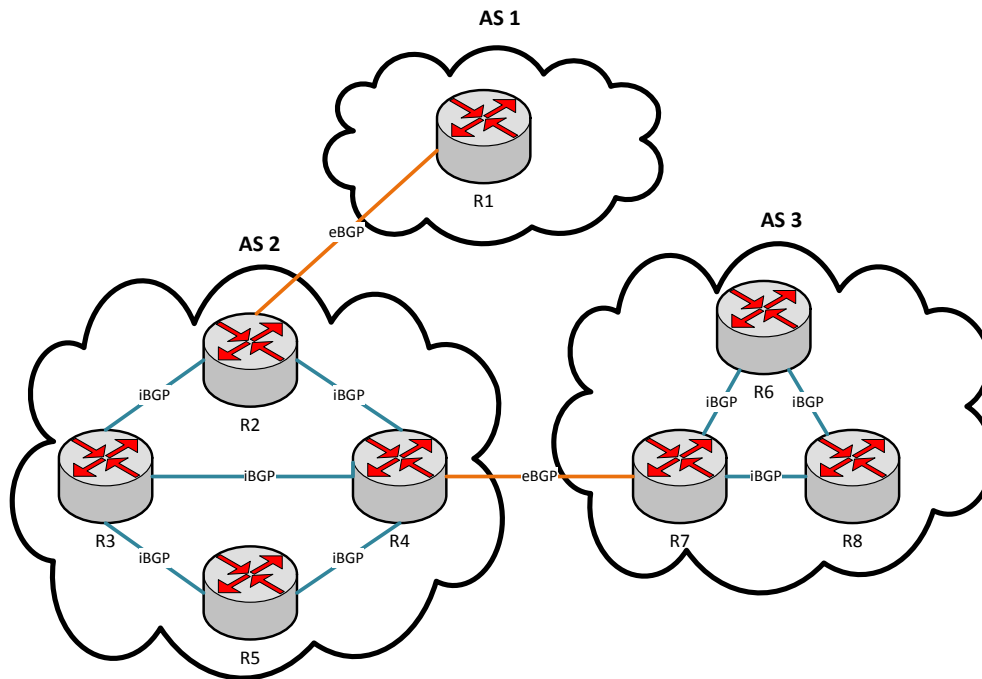


Figura 3.15 – Modelo hierárquico simplista da rede internet

A Figura 3.15 apresenta um exemplo simplista da rede de internet dividida por domínios. Os routers R1, R2, R4 e R7 são os routers de fronteira ou *Gateway routers*.

3.3.1.3.1 Encaminhamento inter-domínio

Na rede global de internet é usado apenas o protocolo BGP (*Border Gateway Protocol*) para encaminhamento de tráfego entre domínios [37], este deve ser capaz de calcular o melhor caminho a seguir entre origem e destino que tenha necessidade de passar por vários domínios. Este protocolo é também responsável por anunciar a existência de sub redes num domínio ao resto da rede internet.

Com o protocolo BGP, os routers com ligação directa, estabelecem uma ligação TCP no porto 179 semi-permanente entre ambos que passam a ser também denominados de BGP *peers*. A ligação ou sessão BGP entre dois *routers* tanto é feita entre *gateways* de dominios diferentes, como entre *routers* dentro do mesmo domínio, no primeiro caso passa a ser designado de *external* BGP (eBGP), e no segundo caso de *internal* BGP (iBGP).

O protocolo BGP, em vez de terminais utiliza como destino endereços de sub-redes ou de conjuntos de sub-redes, que estejam associados a um domínio. Os endereços de sub-redes de um domínio começam por ser enviados por eBGP ao Gateway do domínio vizinho a que se

encontra ligado, que por sua vez distribui via iBGP a todos os routers do seu domínio, inclusive outros *routers Gateway* do domínio, em que efectuam o mesmo processo com toda a informação de todas as sub-redes de todos os domínios recebido até ao momento, fornecendo desta forma informação de todas as sub-redes da internet a todos os domínios. Os novos endereços de sub-rede recebidos num router, fazem com que seja criada uma nova entrada na tabela de encaminhamento.

3.3.1.3.2 Encaminhamento intra-domínio

Na rede de internet os protocolos de encaminhamento intra-domínio usados são o *Routing Information Protocol* (RIP) e *Open Shortest Path First* (OSPF), um outro protocolo relacionado com o OSPF é IS-IS [37].

RIP foi um dos primeiros a ser desenvolvido, e utiliza um algoritmo do tipo *distance-vector* muito semelhante ao idealizado teoricamente. Este utiliza como métrica de custo, o número de saltos, em que cada ligação entre dois routers é contabilizada como um salto. Em RIP tal como OSPF, o numero de saltos é contabilizado desde o router de origem até à sub-rede de destino. O custo máximo de um caminho está limitado a 15 saltos. Routers que usem o protocolo RIP guardam a tabela de encaminhamento para todas a sub-redes conhecidas, que contém o endereço da sub-rede de destino com a interface de saída associada, mas também o custo traduzido em numero de saltos até chegar à rede de destino. O RIP é implementado na camada de aplicação sobre a camada de rede usando um socket UDP [37].

OSPF é outro protocolo de encaminhamento utilizado na rede internet, e é usado tipicamente por ISPs que operam redes de larga escala tal como redes núcleo, já o protocolo RIP é mais usado por redes ISPs que operam redes a uma escala menor, tal como redes metropolitanas. O protocolo OSPF foi elaborado como sucessor ao RIP com algumas funcionalidades mais avançadas. É um protocolo do tipo *link-state*, e como tal cada router difunde a sua informação de encaminhamento para todo o domínio, que permite aos routers do domínio criar um mapa topológico ou grafo de todo o domínio, esta troca de informação ocorre sempre que haja alterações no custo de uma ligação, e periodicamente em períodos não superiores a 30 minutos mesmo sem alterações.

No protocolo OSPF o algoritmo para calculo do caminho de menor custo é *Dijkstra* que usa como referência o grafo do domínio para o cálculo da árvore de caminhos de menor custo

para todas as sub-redes do domínio. O definição do custo de uma ligação individual entre dois *routers* OSPF não se encontra restrito a apenas uma solução, havendo duas possibilidades de configuração:

- **Capacidade de transmissão da ligação.** É com base nesta informação que é calculado o custo da ligação, sendo o custo inversamente proporcional à capacidade transmissão da ligação, sendo calculado pela expressão $Cost = \frac{10^8}{BW [b/s]}$, onde BW representa a capacidade de transmissão da ligação. Por defeito, o custo das ligações é calculado automaticamente utilizando esta metodologia.
- **Alteração manual do custo.** Esta é uma possibilidade do protocolo OSPF, que pode ser vantajoso no controlo de carga na rede internet.

As mensagens de sinalização OSPF, são transportadas directamente por IP com um protocolo de camada superior para OSPF, que deve garantir a coerência das mensagens OSPF.

Com a introdução do algoritmo OSPF foram adicionadas as seguintes vantagens:

- **Segurança.** A troca de mensagens entre routers OSPF pode ser feita com dois tipos de autenticação, sendo um deles a autenticação simples onde a mesma password é configurada em cada *router* e é trocada em formato de texto entre routers, deste modo esta não é claramente muito segura. O outro tipo de autenticação passível de se usar é o MD5 que usa chaves secretas partilhadas em todos os routers e não transmite informação de segurança de forma volátil.
- **Múltiplos caminhos com o mesmo factor de custo.** Quando esta situação acontece entre dois routers, o tráfego não necessita de ser todo transmitido por apenas um caminho, podendo ser repartido por vários.
- **Suporte integrado para encaminhamento *unicast* e *multicast*.** Suporte adicional do protocolo MOSPF (*Multicast OSPF*), pois este usa a base de dados de ligações de OSPF, adicionando um novo tipo de informação de *link-state*.
- **Suporte de hierarquia dentro de um único domínio de encaminhamento.** Com esta funcionalidade torna-se possível estruturar hierarquias dentro de domínios de encaminhamento por áreas, em que cada uma executa o seu próprio algoritmo de encaminhamento OSPF, e os routers *area border* são responsáveis por encaminhar pacotes para fora da área. Esta é talvez a funcionalidade mais importante do protocolo OSPF.

3.4 Modelo integrado de transporte IP

Introduzidos alguns dos conceitos por detrás do IP, com destaque no encaminhamento, e das redes ópticas de transporte WDM, esta secção aborda a combinação das duas, e quais os modelos usados no âmbito desta dissertação.

Existem fundamentalmente duas arquitecturas de rede que têm vindo a ser usadas pelos operadores. A primeira consiste em ligações estáticas ponto a ponto de routers IP, não sendo uma arquitectura muito flexível, devido à configuração estática da rede de transporte, requerendo assim um considerável esforço de mão de obra com a deslocação de técnicos ao terreno para efectuar alterações de encaminhamento na rede de transporte. Esta arquitectura não é considerada no âmbito desta dissertação.

A segunda arquitectura de rede de transporte IP sobre WDM já é reconfigurável, ao contrário da anterior, não tem os routers IP interligados por canais com caminho estático. Assim nesta arquitectura a topologia física é diferente da topologia virtual. A topologia física WDM é composta por equipamento de rede interligado por fibra óptica, tais como o OXC e o ROADM, onde é efectuada a comutação de comprimentos associados a canais ópticos. A topologia virtual é composta pelos caminhos virtuais e pelos routers IP onde é efectuada a comutação do tráfego IP.

Sobre as duas arquitecturas de rede apresentadas, os pacotes IP podem ser ainda mapeados de diferentes formas sobre WDM, tal como é apresentado na Figura 3.16, em vez do protocolo SONET apresentado pode ser usado o protocolo SDH.

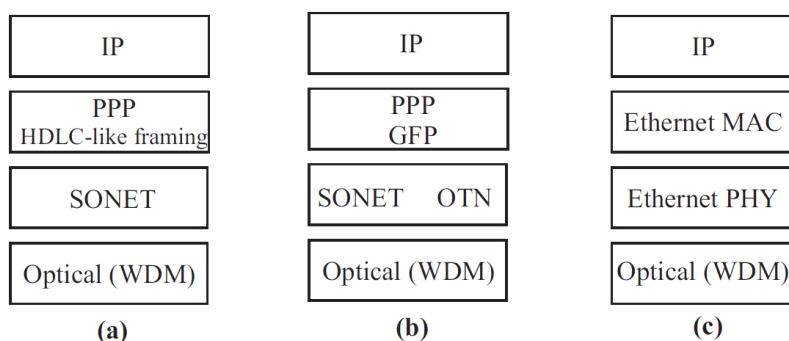


Figura 3.16 – Várias possibilidades de mapeamento de IP sobre WDM. [1]

Das três possibilidades de mapeamento de IP sobre WDM apresentadas na Figura 3.16, em (a) é apresentada a variante conhecida como POS (*Packet-Over-SONET/SDH*), onde os pacotes IP são mapeados em PPP (*frames Point-to-Point Protocol*), sobre as quais é feito mapeamento e codificação do tipo HDLC (*High-Level Data Link Control*), para ser finalmente adicionado a *frames* SONET ou SDH. Com a implementação de (b) os pacotes IP são mapeados em *frames* PPP, para ser posteriormente serem mapeadas sobre SONET, SDH ou OTN usando a técnica de multiplexagem GFP (*Generic Framing Procedure*). Usando a vertente (c) as interfaces de *Ethernet* tais como 1/10/40/100Gbps na camada IP usam a camada de MAC (*Media Access Control*) como camada de ligação, e as interfaces físicas das mesmas para codificar as *frames* sobre WDM.

No âmbito desta dissertação optou-se por usar uma arquitectura de rede reconfigurável pelo uso de ROADM *directionless* na rede de transporte WDM, a constituição do ROADM é apresentada na Figura 3.17, o facto de ser *directionless* possibilita que um encaminhamento comprimento de onda a ser adicionado e/ou retirado num nó possa ser feito dinamicamente para cada uma das direcções do nó. Por cada direcção de transmissão bidirecional (par de fibras) é usado um WXC (*Wavelength Cross Connect*) que escolhe os comprimentos de onda a serem transmitidos na respectiva direcção, sendo também usado um BST (*Booster amplifier*) e um PRE (*Pre-amplifier*) por forma a aumentar a potência do sinal a transmitir e melhorar a qualidade de sinal na recepção compensando perdas na transmissão respectivamente. Por cada nó, por forma a retirar e/ou adicionar comprimentos de onda na rede de transmissão é igualmente usado um WXC, que selecciona os comprimentos de onda a retirar da rede de transmissão assim como PRE e BST, como interface de saída/entrada são usados MUX (*Multiplexer*) e DMX (*Demultiplexer*), que disponibilizam interfaces para cada um dos comprimento de onda.

Para cada nó ROADM, é usado um *Splitter* e *Combiner*, componente passivo, ligado a cada um dos WXCs, por forma a que o sinal proveniente de cada WXC seja transmitido para todos os outros WXCs, da mesma forma que cada WXC receba sinal de todos os restantes WXCs do ROADM. No exemplo da Figura 3.17 é apresentado um nó ROADM com duas direcções de transmissão e a direcção para retirar e adicionar comprimento de onda.

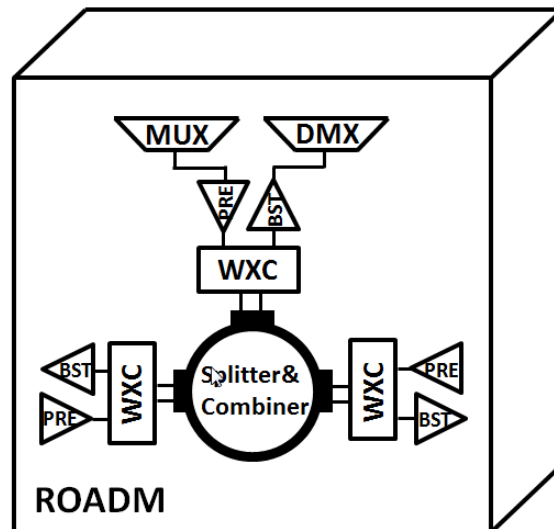


Figura 3.17 – Constituição de ROADM *directionless*

Sobre esta arquitectura de nó WDM foram considerados 3 modelos de rede diferentes para o transporte de tráfego IP, sendo eles apresentados nas seguintes secções 3.4.1, 3.4.2 e 3.4.3.

3.4.1 Modelo de transporte IP sobre WDM

O modelo de rede considerado para transporte de IP sobre WDM é apresentado pelo exemplo da Figura 3.18 com três nós, em que cada interface de *multiplexer* e *demultiplexer* liga directamente ao porto do *router* IP, para tal, o router IP possui interfaces compatíveis com WDM (*coloured interfaces*), que são assinaladas na figura por uma interface colorida em formato gradiente.

Entre cada nó adjacente podem ser usadas uma ou mais fibras ópticas, no mesmo sentido, cada uma associada a um WXC (*Wavelength Cross Connect*), PRE (*Optical Pre-Amplifier*) e BST (*Optical Booster*) com consumos E_{wxc} , E_{pre} e E_{bst} respectivamente que contribuem para o consumo total na rede, aplicando-se a mesma regra em sentido oposto. Cada fibra óptica suporta a transmissão de um valor máximo de comprimentos de onda W , sendo que cada comprimento de onda está associado a uma capacidade de transmissão. Ao longo de cada fibra óptica são usados AMP (amplificadores ópticos ou *In-Line Amplifiers*) que são aplicados a cada distancia S , com um consumo E_s . O *Splitter* e *Combiner*, MUX (*Multiplexer*) e DMX (*Demultiplexer*), não são considerados para o consumo total na rede por de tratarem de componentes passivos.

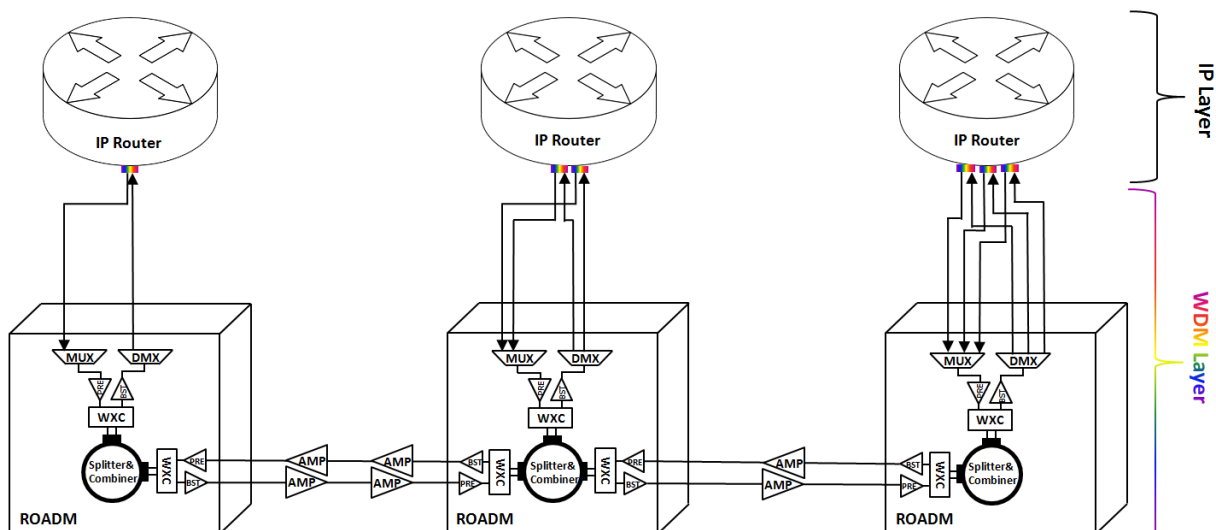


Figura 3.18 – Modelo de rede de transporte IP sobre WDM

3.4.2 Modelo de transporte IP sobre OTN sobre WDM

No modelo de transporte IP sobre OTN sobre WDM (Figura 3.19) a diferença face ao modelo anterior consiste no uso *transponders* para cada um dos canais virtuais, entre o ROADM (camada WDM) e *router* IP (camada IP) no mesmo nó, estes *transponders* para além de regenerarem o sinal, convertem o sinal entre diferentes protocolos tal como *Ethernet* não WDM (*grey interfaces*) para OTN sobre interfaces WDM (*coloured interfaces*). A interface do transponder que liga ao *router* IP é também designada de interface cliente e a interface WDM que interliga com o ROADM designa-se de interface linha.

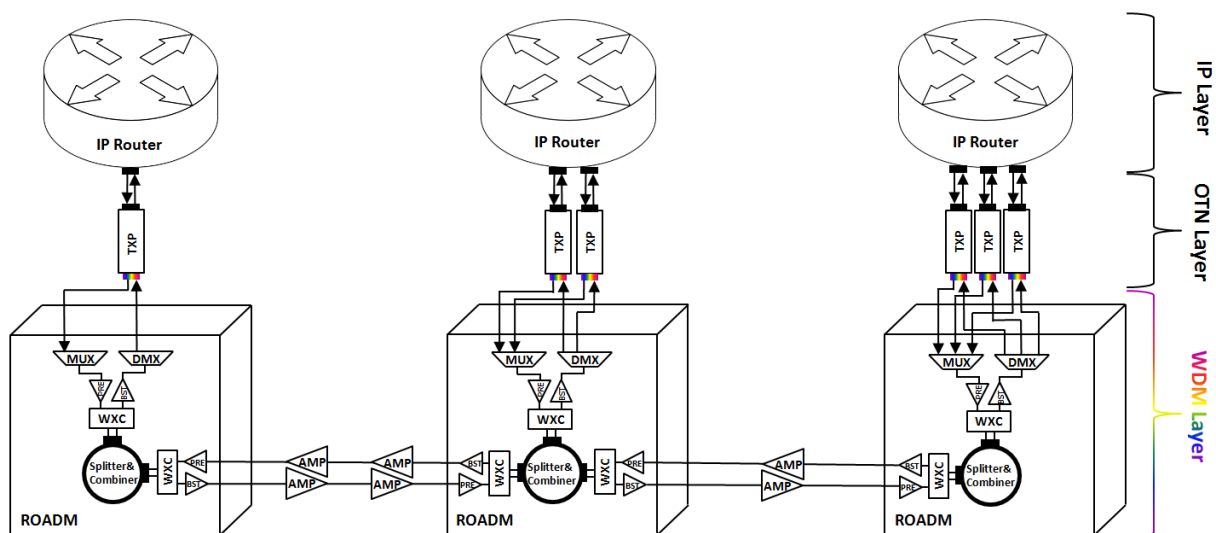


Figura 3.19 – Modelo de rede de transporte IP sobre OTN sobre WDM

3.4.3 Modelo de transporte IP sobre OTN sobre WDM com agregação

Este modelo (Figura 3.20) apresenta uma alteração face ao modelo apresentado em 3.4.2, que corresponde à substituição de *transponders* por *muxponders* na camada OTN. Os *muxponders* têm a capacidade de agregar vários canais da camada IP num só que será transmitido sobre a camada WDM, este modelo também usado pelos operadores possibilita a agregação de vários canais de *routers* diferentes ou até do mesmo *router*, tal como usar canais de *routers* IP de menor capacidade do que na transmissão e reduzir o número de canais na camada WDM. Como os *muxponders* não efectuam o reencaminhamento, o canais agregados em cada *muxponder* terão todos a mesma origem e mesmo destino, o que impossibilita que vários canais agregados tenham destinos diferentes sem terem de passar previamente pela camada IP em nós intermédios. Neste caso haverá distinção entre canais a transmitir na camada WDM pela interface de linha do *muxponder* e canais de cliente que ligam a interfaces de *routers* IP.

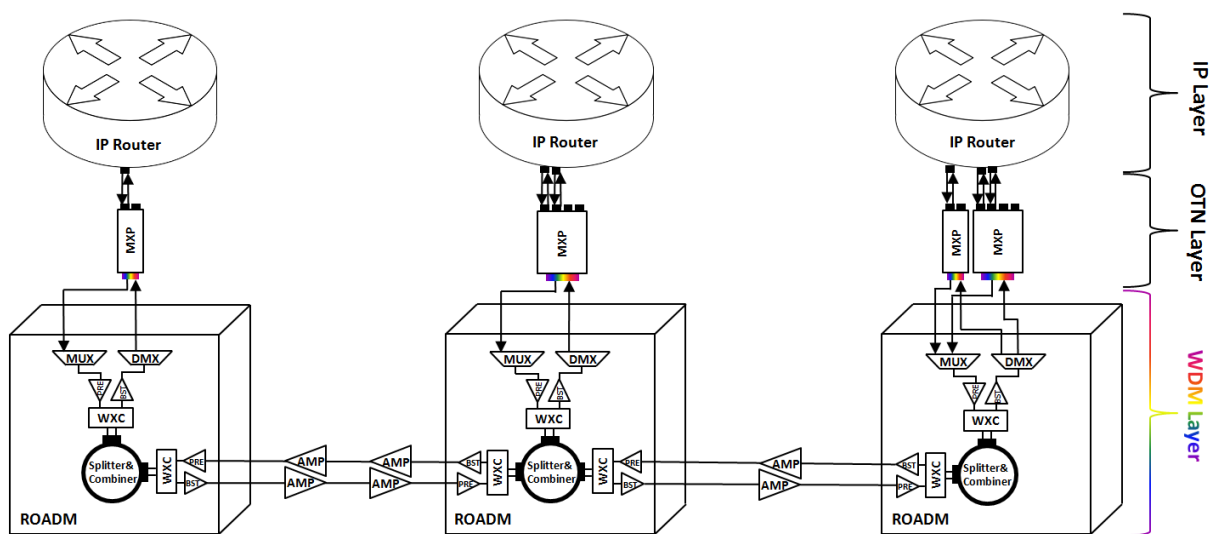


Figura 3.20 – Modelo de rede de transporte IP sobre OTN sobre WDM com agregação

Capítulo 4: Modelo de otimização e resultados

Tem-se como objetivo nesta dissertação, minimizar o consumo energético das redes IP sobre WDM mas também IP sobre OTN sobre WDM, com base no consumo dos seus componentes, ao invés do objetivo mais comum que é a minimização do atraso médio de pacote ou do custo total da rede.

Com referência ao modelo proposto em [17], desenvolveu-se um modelo MILP a ser otimizado, pela plataforma *IBM ILOG CPLEX*.

As arquiteturas de rede de transporte IP apresentadas no capítulo anterior, através uso de equipamentos reconfiguráveis como ROADMs, proporciona a capacidade de adicionar e retirar, apenas os comprimentos de onda que contenham tráfego que necessita de ser processado pelos routers IP. Desta forma, o tráfego transportado em comprimentos de onda que não necessitam de ser processados eletronicamente nesse nó, é comutado de uma forma puramente óptica para outra direção do nó, sem ter de passar pelo router IP. Deste modo é possível minimizar o processamento na camada lógica IP, o número de interfaces no router IP e o número de conversões O-E-O, que se traduz numa redução do consumo energético. Esta técnica é denominada de *optical bypass* sendo a técnica fundamental utilizada neste trabalho de otimização energética.

4.1 Descrição do modelo de otimização MILP

Nesta secção é apresentado em detalhe o modelo MILP para o caso de uma rede IP sobre OTN sobre WDM com o uso canais de transmissão / comprimentos de onda de uma única capacidade de transmissão, ou SLR (*Single Line Rate*). Em pontos posteriores são apresentados outros modelos com menor detalhe, dando destaque às alterações relativamente a este primeiro modelo.

O modelo MILP para resolver este problema requer que sejam definidos alguns índices, constantes, parâmetros e variáveis de decisão do modelo.

Os índices servem fundamentalmente para identificar a origem e o destino nas várias camadas da rede. Os dados de entrada são caracterizados neste modelo como constantes. Com base nas constantes de entrada e na arquitetura definida para a rede são calculados os parâmetros de rede. Por último as variáveis de decisão podem variar dentro de um intervalo definido, para serem utilizadas pelo modelo para que o objetivo de otimização seja atingido.

Índices:

- $m, n \in N$: Índice dos nós de origem m e de destino n na topologia física, na camada óptica;
- $i, j \in N$: Índice dos nós de origem i e de destino j na topologia lógica, na camada IP;
- $s, d \in N$: Índice dos nós de origem s e de destino d do tráfego ponto-a-ponto, na camada IP.

N corresponde ao número de nós da topologia física.

Constantes:

- $T = (N, E)$: Topologia física da rede composta por N nós e E ligações físicas. Os nós N são constituídos por comutadores ópticos e routers IP, em que as ligações físicas E são estabelecidas por fibra óptica entre comutadores ópticos.
- N Número de nós na rede;
- L_{mn} : Distância física entre os nós m e n (metros);

- λ^{sd} : A matriz de previsão do consumo de tráfego entre cada nó s, d (bps);
- W : Número de comprimentos de onda a transmitir suportados por fibra;
- B : Capacidade de transmissão de cada comprimento de onda (bps);
- S : Distância máxima entre dois amplificadores ópticos numa ligação física (metros);
- E_r : Consumo médio da cada porta dos routers IP (W);
- E_{gt} : Consumo médio de cada *transponder* de conversão O-E-O por canal WDM (W). Considerando o consumo por par de canal, está-se a ter diretamente em conta o transponder do nó de origem e de destino;
- E_e : Consumo médio de cada amplificador óptico em linha (W);
- E_{pre} : Consumo de pré amplificador ou *pre-amplifier* por fibra óptica à entrada de cada nó óptico na transmissão e por cada nó para adicionar e retirar canais (W);
- E_{bst} : Consumo de amplificador de potência ou *booster* por fibra óptica à saída de cada nó óptico na transmissão e por cada nó para adicionar e retirar canais (W);
- E_{wxc} : Consumo de cada comutador de comprimento de onda ou *Wavelength Cross Connect*, por cada fibra óptica de transmissão à saída do nó óptico para seleccionar comprimentos de onda a transmitir e por cada nó para seleccionar comprimentos de onda a retirar (W);

Parâmetros:

- $A_{mn} \in \mathbb{N}$: Número de amplificadores ópticos em cada ligação física entre m e n . Este é obtido através de pré-processamento, antes de se executar a optimização, consoante a distância envolvida;

Variáveis de decisão:

- $C_{ij} \in \mathbb{N}$: Número de canais de capacidade B na ligação virtual entre i e j ;
- $\lambda_{ij}^{sd} \in \mathbb{N}$: Quantidade de tráfego de s para d que atravessa a ligação virtual entre i e j (Mbps);
- $w_{mn}^{ij} \in \mathbb{N}$: Número de canais de comprimento de onda entre i e j que atravessa a ligação física entre m e n ;
- $w_{mn} \in \mathbb{N}$: Número de canais de comprimento de onda na ligação física entre m e n ;
- $f_{mn} \in \mathbb{N}$: Número de fibras ópticas na ligação física entre m e n .

4.1.1 Pré-processamento de parâmetros

Com base nos dados de entrada, definidos como constantes na descrição do modelo MILP, é possível obter diretamente os parâmetros do modelo, mesmo antes de ser aplicado o modelo.

- A_{mn} : Calculado como o maior número inteiro inferior ou igual a $\left(\frac{L_{mn}}{S}\right)$. A cada distância S é colocado um amplificador óptico em linha.

4.1.2 Objectivo e restrições do modelo

O objetivo do problema foi neste caso formulado matematicamente da seguinte maneira:

- **Objectivo:** minimizar

$$\sum_{i \in N} (E_{pre} + E_{bst} + E_{wxc}) \quad (1)$$

$$+ \sum_{i \in N} \sum_{j \in N: i \neq j} C_{ij} \cdot (E_{gt} + E_r) \quad (2)$$

$$+ \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} (E_{pre} + E_{bst} + E_{wxc}) \cdot f_{mn} \quad (3)$$

$$+ \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} E_e \cdot A_{mn} \cdot f_{mn} \quad (4)$$

(4.1)

Analisando o objetivo verifica-se que este está formulado em 4 partes, representados na equação como (1), (2), (3) e (4).

A expressão (1) representa o consumo que é considerado em cada nó para adicionar e/ou remover comprimentos de onda de/para o mesmo. A expressão (2) considera o consumo nas camadas IP e OTN em que cada canal C_{ij} está associado a um *transponder* bidireccional para considerar o consumo do *transponder* de transmissão e o de recepção, estando cada um destes *transponders* ligados a um porto de router. Na expressão (3) é considerado o consumo por cada direcção que está associado a uma fibra óptica em que para além do pré-amplificador e amplificador de potência é usado um WXC para poder seleccionar os comprimentos de onda a transmitir na mesma direcção. A expressão (4) caracteriza o consumo dos amplificadores ópticos, ao longo da ligação física por fibra óptica.

Apresentada a função objectivo, são descritas de seguida as restrições associadas ao modelo, por forma a cumprir um conjunto de regras necessárias, tais como:

- Garantir que a rede suporta o tráfego exigido;
- Garantir a conservação de tráfego na camada IP;
- Garantir a conservação de comprimentos de onda na camada óptica;
- Respeitar o limite máximo de comprimentos de onda que podem ser alocados em cada fibra;
- Respeitar a capacidade máxima de transmissão de cada canal WDM;

É necessário estabelecer um conjunto de restrições no modelo. Estas são definidas matematicamente da seguinte forma:

- **1ª restrição:**

$$\sum_{j \in N: i \neq j} \lambda_{ij}^{sd} - \sum_{j \in N: i \neq j} \lambda_{ji}^{sd} = \begin{cases} \lambda^{sd} & i = s \\ -\lambda^{sd} & i = d \\ 0 & \text{outros} \end{cases} \quad \forall s, d, i \in N: s \neq d \quad (4.2)$$

A primeira restrição representa a conservação do fluxo de tráfego na camada IP. De uma forma simplista, a equação indica que do nó s , para o nó d são transmitidos λ^{sd} bit/s para o nó de destino, d . O resultado $-\lambda^{sd}$ indica que no nó d são recebidos λ^{sd} bit/s com origem no nó s . Para os restantes nós intermédios de uma ligação, todo o tráfego de s para d que chega a cada

router por onde passa tem que partir, daí que a expressão seja igual a zero. Esta restrição adiciona possibilidade da divisão do tráfego por múltiplos caminhos.

- **2ª restrição:**

$$\sum_{s \in N} \sum_{d \in N: s \neq d} \lambda_{ij}^{sd} \leq C_{ij} \cdot B \quad \forall i, j \in N: i \neq j \quad (4.3)$$

A segunda restrição, define que todos canais de capacidade B na ligação virtual entre i e j têm de ter capacidade para alocar todo o tráfego entre todos os pares s e d que tenham tráfego a passar pela ligação virtual entre i e j .

- **3ª restrição:**

$$\sum_{n \in N: i \neq j} w_{mn}^{ij} - \sum_{n \in N: i \neq j} w_{nm}^{ij} = \begin{cases} C_{ij} & m = i \\ -C_{ij} & m = j \\ 0 & \text{outros} \end{cases} \quad \forall i, j, m \in N: i \neq j \quad (4.4)$$

A terceira restrição é semelhante à primeira, pois trata-se de mais uma conservação de fluxo, mas ao invés de ser a conservação do fluxo de tráfego, é a conservação do fluxo de canais ópticos de capacidade B de i para j . Todos os canais que chegam a um nó intermédio têm sair desse nó intermédio. Neste caso todos os canais a transmitir entre i e j também não necessitam de usar as mesmas ligações físicas entre i e j , podendo ser divididos ao longo do caminho por múltiplas ligações físicas m e n alternativas.

- **4ª restrição:**

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N: i \neq j} w_{mn}^{ij} \leq W \cdot f_{mn} \quad \forall m, n \in N: m \neq n \quad (4.5)$$

A quarta restrição tem o intuito de garantir que todas as fibras ópticas entre dois nós m e n têm capacidade para suportar todos os canais ópticos que circula entre esses dois nós, com origem i e destino j .

- 5ª restrição:

$$w_{mn} = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N: i \neq j} w_{mn}^{ij} \quad \forall m, n \in N: m \neq n \quad (4.6)$$

A quinta restrição define que o número de comprimentos de onda entre o par (m, n) , deve ser igual à soma de todos os canais entre todos os pares (i, j) que passam por (m, n) .

4.2 Avaliação do modelo

Neste capítulo 4 são apresentados e avaliados os resultados provenientes da simulação do modelo MILP com base num conjunto de constantes ou variáveis de entrada, o modelo foi implementado sobre a plataforma *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio V12.5* que utiliza o algoritmo de optimização *simplex*, no sistema operativo *Windows 7*. Por forma a se poder ter uma maior sensibilidade dos resultados obtidos e avaliar a mais-valia a nível energético, optou-se também por utilizar um modelo cujo objectivo não era a redução do consumo, mas sim encaminhar e atribuir canais ópticos segundo o caminho de menor custo sem qualquer recurso à técnica de *by-pass*, utilizando para tal o algoritmo *Dijkstra*. Este algoritmo foi implementado com a linguagem de programação *JAVA™* com base no algoritmo disponível em [38].

4.3 Cenário de optimização

4.3.1 Rede a otimizar

A topologia de rede adotada é baseada em [7], onde foi definida uma topologia de rede para Portugal, com base na informação pública disponível de todos os operadores do mesmo país, no ano de 2005. Contudo no âmbito desta dissertação foi apenas considerada a topologia de rede do operador Cabovisão, uma rede nacional em anel bidirecional, em que sobre a sua estrutura original foram feitas algumas adaptações com vista a obter uma maior flexibilidade da sua arquitetura e simplificar a estimação de tráfego. Nas alterações efetuadas inclui-se: a deslocação do nó de Estarreja para Aveiro, deslocação do nó de Santo André para Sines, deslocação do nó de

Vila Franca de Xira para Lisboa, adição de ligação física bidirecional entre os nós de Lisboa e Castelo Branco. O diagrama resultante da rede é apresentado na Figura 4.1.

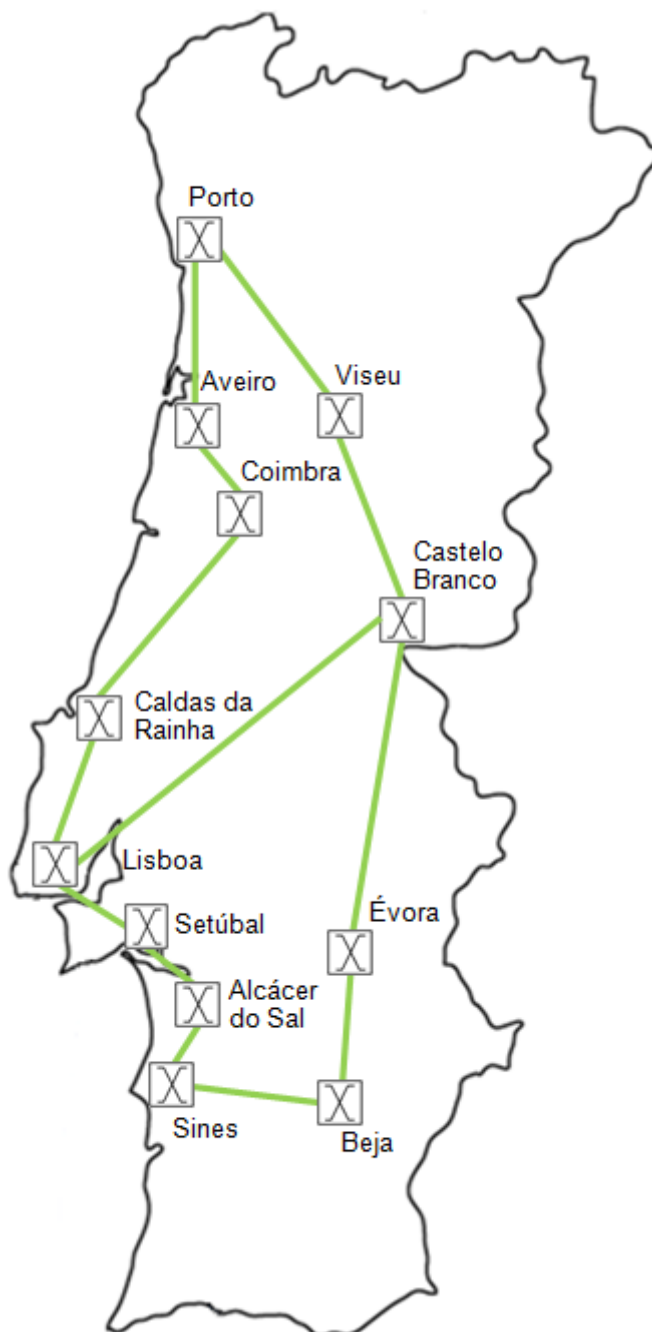


Figura 4.1 – Diagrama de rede de transporte IP, baseado em [7]

A informação mais detalhada do total dos 12 nós da rede, com base em [7], é apresentada na Tabela 5, em que os dados de população e Penetração ADSL, são tidos em conta para a estimação da matriz de tráfego da rede.

Tabela 5 – Informação de nós da rede, baseado em [7]

Nó	Localização do nó	População	Penetração ADSL (%)
1	Alcácer do Sal	29 188	6.0
2	Aveiro	385 724	7.5
3	Beja	135 105	5.8
4	Caldas da Rainha	338 711	10.0
5	Castelo Branco	216 505	10.5
6	Coimbra	478 844	8.9
7	Évora	173 646	7.2
8	Lisboa	1 947 261	42.6
9	Porto	1 650 761	20.5
10	Setúbal	714 589	23.0
11	Sines	70 788	7.0
12	Viseu	286 313	2.4

Na Tabela 6 é sintetizada a informação das 13 ligações físicas bidirecionais da rede, em que o número de fibras ópticas a usar, é um parâmetro calculado pelo modelo, em função dos requisitos de tráfego.

Tabela 6 – Distância das ligações físicas da rede, baseado em [7]

ID da ligação	Nós terminais		Distância (km)
1	Alcácer do Sal	Setúbal	52
2	Alcácer do Sal	Sines	67
3	Aveiro	Coimbra	64
4	Aveiro	Porto	80
5	Beja	Évora	82
6	Beja	Sines	98
7	Caldas da Rainha	Coimbra	122
8	Caldas da Rainha	Lisboa	93
9	Castelo Branco	Viseu	170
10	Castelo Branco	Évora	178
11	Lisboa	Setúbal	47
12	Porto	Viseu	130
13	Lisboa	Castelo Branco	223

No que diz respeito aos requisitos de tráfego entre nós, ou seja a matriz de tráfego de rede, usou-se como referência a informação estatística da ANACOM, referente ao 4º trimestre de 2004, associada ao tráfego de voz na rede fixa, tráfego de voz e SMS na rede móvel e tráfego associado ao serviço ADSL. Com base nos mesmos dados, na informação de população e penetração de ADSL da Tabela 5, segundo [7], obteve-se a matriz de tráfego da Tabela 7.

Tabela 7 – Requisitos de tráfego entre nós da rede (Mbps), no 4º trimestre de 2004. [7]

	Alcácer do Sal	Aveiro	Beja	Caldas da Rainha	Castelo Branco	Coimbra	Évora	Lisboa	Porto	Setúbal	Sines	Viseu
Alcácer do Sal	0	2	1	2	2	3	2	38	15	10	1	1
Aveiro	2	0	7	28	19	49	10	558	287	114	4	16
Beja	1	7	0	8	5	10	5	158	64	35	2	3
Caldas da Rainha	2	28	8	0	21	42	13	681	274	140	5	9
Castelo Branco	2	19	5	21	0	29	8	436	185	89	3	8
Coimbra	3	49	10	42	29	0	15	822	368	168	6	20
Évora	2	10	5	13	8	15	0	252	101	55	3	4
Lisboa	38	558	158	681	436	822	252	0	6353	3310	102	145
Porto	15	287	64	274	185	368	101	6353	0	1270	40	89
Setúbal	10	114	35	140	89	168	55	3310	1270	0	24	31
Sines	1	4	2	5	3	6	3	102	40	24	0	2
Viseu	1	16	3	9	8	20	4	145	89	31	2	0

Por forma a poder analisar-se a evolução do consumo energético ao longos anos com o aumento do volume de tráfego na rede, recorreu-se ao reajustamento da matriz de tráfego com uma periodicidade anual, com base na previsão de crescimento de tráfego disponibilizada por *Cisco VNI* em [40] e [41]. A previsão de crescimento de tráfego de 2007 a 2012 foi baseada em [40] e a previsão de 2012 a 2017 em [41], para a área da Europa ocidental que é onde se enquadra Portugal. O crescimento 2005 a 2007 foi baseado na média de 2007 a 2012. O factor de crescimento foi aplicado como factor multiplicativo, e de igual forma sobre todos os elementos da matriz de tráfego. Na Tabela 8 é apresentado de uma forma sucinta o crescimento de tráfego de 2005 a 2017 e que será considerado nas simulações a efectuar.

Tabela 8 – Previsão de crescimento de crescimento de tráfego global IP na Europa ocidental, baseado em Cisco VNI, [40] e [41].

Ano	Crescimento ao ano	Factor de crescimento de tráfego relativamente ao tráfego base de 2005	Crescimento médio ao ano
2005	-	1,00	-
2006	52%	1,52	52%
2007	53%	2,33	
2008	67%	3,88	
2009	58%	6,14	
2010	53%	9,39	
2011	39%	13,05	
2012	42%	18,53	17%
2013	17%	21,68	
2014	16%	25,15	
2015	16%	29,17	
2016	17%	34,13	
2017	17%	39,94	

4.3.2 Equipamentos e consumos energéticos

Os equipamentos de rede e respectivos consumos foram baseados em [39] que apresenta valores de referência para o consumo energético mas também em valores de equipamentos *Cisco Systems, Inc.* Na camada WDM foi considerado e amplificadores ópticos ou OLA (*Optical Line Amplifier*), pré-amplificador ou *Optical Pre-Amplifier*, amplificador de potência ou *Optical Booster* e WXC (*Wavelength Cross Connect*). Os seus valores e detalhes adicionais encontram-se na Tabela 9. Na camada OTN são considerados *transponders* e *muxponders* que fazem a conversão de sinal entre os portos Ethernet dos *routers* IP e a camada de transporte WDM, para cenários sem agregação e com agregação respectivamente, os seus valores de consumo são apresentados na Tabela 10. Ao nível da camada de IP foi considerado apenas os portos *Ethernet* dos *routers* IP de curto alcance e portos de *routers* com interface WDM de longo alcance, passível de se usar directamente sobre a camada WDM, cujas particularidades se encontram descritas na Tabela 11.

Tabela 9 – Componentes da camada WDM

Tipo	Notas	Consumo energético	Referência
OLA (<i>Optical Line Amplifier</i>)	Por par de fibra, com alcance de 80 km	$E_c = 110$ W	[39]
<i>Optical Pre-Amplifier</i>	Valor típico,	$E_{pre} = 30$ W	Cisco [40]
<i>Optical Booster</i>	suportam 64 canais na banda C Valor típico	$E_{bst} = 30$ W	Cisco [40]
WXC (<i>Wavelength Cross Connect</i>)	Por fibra, à saída do nó de transmissão	$E_{wxc} = 25$ W	Cisco [41]

Tabela 10 – Componentes de camada OTN

Tipo	Notas	Consumo energético	Eficiência	Referência
<i>Transponder/Muxponder 10 Gbps</i>	Não coerente, e por par de canais (bidirecional)	$E_t = 50$ W	0,2 Gbps/W	[39]
<i>Transponder/Muxponder 40 Gbps</i>		$E_t = 100$ W	0,4 Gbps/W	[39]
<i>Transponder/Muxponder 100 Gbps</i>		$E_t = 150$ W	0,67 Gbps/W	[39]

Tabela 11 – Componentes de router IP da camada internet (bidirecionais)

Tipo	Consumo energético	Eficiência	Referência
Porto Ethernet 1 Gbps	$E_r = 7$ W	0,14 Gbps/W	[39]
Porto Ethernet 10 Gbps	$E_r = 38$ W	0,26 Gbps/W	[39]
Porto Ethernet 40 Gbps	$E_r = 105$ W	0,38 Gbps/W	[39]
Porto Ethernet 100 Gbps	$E_r = 205$ W	0,49 Gbps/W	[39]
Porto Ethernet WDM 10 Gbps	$E_{cr} = 38$ W	0,26 Gbps/W	Cisco [42]
Porto Ethernet WDM 40 Gbps	$E_{cr} = 150$ W	0,27 Gbps/W	Cisco [43]
Porto Ethernet WDM 100 Gbps	$E_{cr} = 180$ W	0,56 Gbps/W	Cisco [44]

Os restantes parâmetros de entrada do modelo, são valores típicos dos fabricantes de equipamentos em redes ópticas, para o número máximo de comprimentos de onda suportados por fibra óptica W é considerado 80 que corresponde à tecnologia DWDM já usado por muitos operadores. Cada um dos canais ópticos de transporte B associado a um comprimento de onda é capaz de suportar 10Gbps, 40Gbps ou 100Gbps. Estes valores foram considerados por serem as capacidades mais elevadas compatíveis com a camada OTN e utilizados actualmente pelos operadores para o transporte de tráfego. Para a distancia entre amplificadores ópticos em linha S foi considerado um valor típico de 80 km. Estes mesmos parâmetros são apresentados de uma forma resumida na Tabela 12.

Tabela 12 – Parâmetros determinados para a simulação do modelo

Parâmetro	Definição	Valor
W	Número máximo de comprimentos de onda por fibra óptica	80
B	Capacidade de transmissão dos canais ópticos, por cada comprimento de onda	10Gbps, 40Gbps ou 100Gbps
S	Máxima distância a que é colocado cada amplificador óptico	80 km

4.4 Modelos de optimização

Ao longo desta secção são apresentados vários modelos de optimização adoptados, que diferem entre si na própria arquitectura de rede, tipo de encaminhamento óptico, constituição da camada OTN, tipo e capacidade de transmissão de canais a usar na rede, multiplexagem e critério de encaminhamento.

Na Figura 4.2 é apresentado um esquema resumo de todos os modelos considerados, em que modelos se basearam, indicado pelas setas. Com o bordo a azul são indicados os modelos com critério de encaminhamento segundo o menor consumo energético, com o bordo a vermelho com encaminhamento segundo o caminho mais curto, e a amarelo segundo o caminho mais curto e consumo energético.

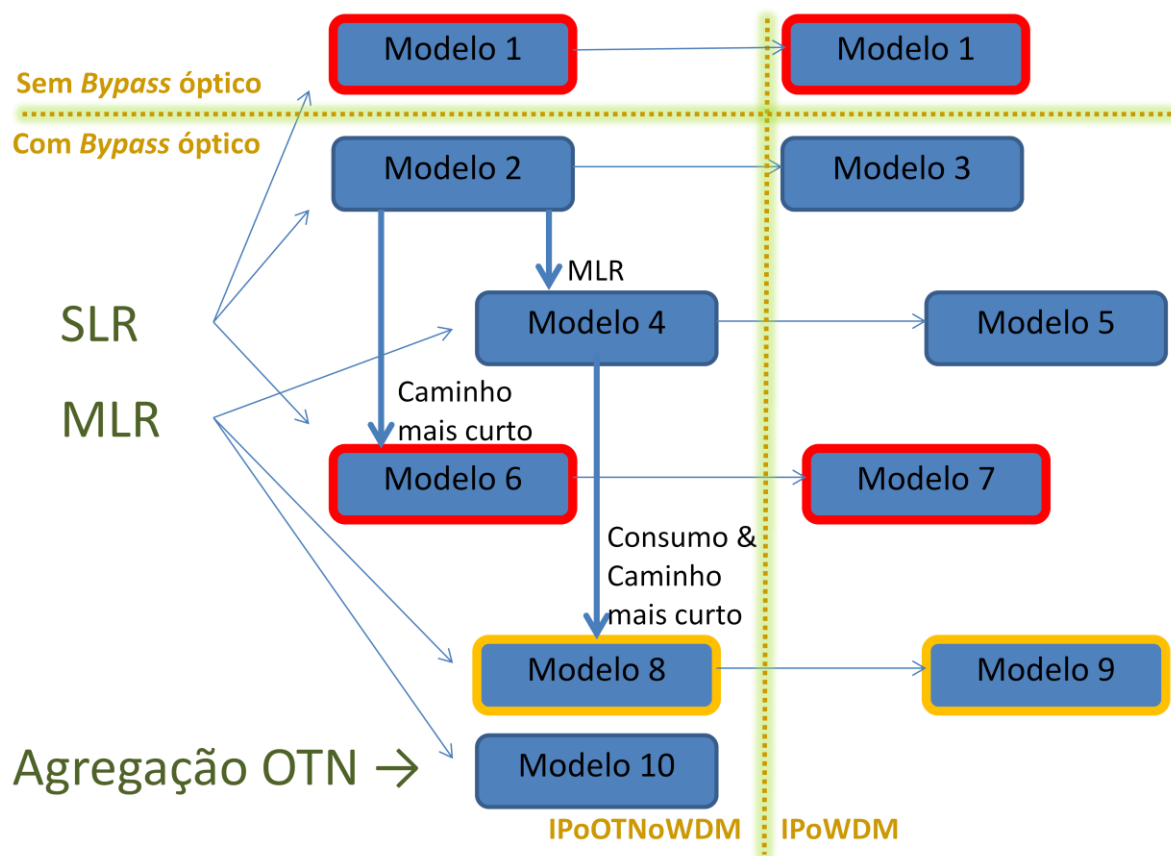


Figura 4.2 – Esquema resumo de modelos de optimização

Na **Error! Not a valid bookmark self-reference.** é apresentado de uma forma resumida e detalhada todas as diferenças entre os diversos modelos.

Tabela 13 – Resumo de modelos de optimização

ID	Arquitectura	Encaminhamento óptico	Camada OTN	Capacidade de canais WDM (10, 40 ou 100Gbps)	Capacidade de canais IP	Multiplexagem OTN	Critério para encaminhamento
01	IPoOTNoWDM / IPoWDM	Sem <i>bypass</i>	<i>Transponder</i> /-	SLR	SLR (10, 40 ou 100Gbps)	1:1/-	Caminho mais curto
02	IPoOTNoWDM	Com <i>bypass</i>	<i>Transponder</i>	SLR	SLR (10, 40 ou 100Gbps)	1:1	Menor consumo energético
03	IPoWDM	Com <i>bypass</i>	-	SLR	SLR (10, 40 ou 100Gbps)	-	Menor consumo energético
04	IPoOTNoWDM	Com <i>bypass</i>	<i>Transponder</i>	MLR	MLR (10, 40 ou 100Gbps)	1:1	Menor consumo energético
05	IPoWDM	Com <i>bypass</i>	-	MLR	MLR (10, 40 ou 100Gbps)	-	Menor consumo energético
06	IPoOTNoWDM	Com <i>bypass</i>	<i>Transponder</i>	SLR	SLR (10, 40 ou 100Gbps)	1:1	Caminho mais curto
07	IPoWDM	Com <i>bypass</i>	-	SLR	SLR (10, 40 ou 100Gbps)	-	Caminho mais curto
08	IPoOTNoWDM	Com <i>bypass</i>	<i>Transponder</i>	MLR	MLR (10, 40 ou 100Gbps)	1:1	Caminho mais curto e consumo energético
09	IPoWDM	Com <i>bypass</i>	-	MLR	MLR (10, 40 ou 100Gbps)	-	Caminho mais curto e consumo energético
10	IPoOTNoWDM	Com <i>bypass</i>	<i>Muxponder</i>	MLR	MLR (1, 10, 40 ou 100Gbps)	10:1 - 1Gbps:10Gbps 4:1 - 10Gbps:40Gbps 2:1 - 40Gbps:100Gbps	Menor consumo energético

Ao longo das secções seguintes são apresentados resultados de simulações onde é anunciado o consumo energético na rede para a gama de anos 2005 a 2017, separadamente para canais de 10Gbps, 40Gbps e 100Gbps nas redes de SLR onde é possível verificar em maior detalhe os consumos por camadas, mas também gráficos comparativos. Para redes MLR (*Mixed Line Rate*) e com agregação de tráfego são apresentados os consumos igualmente por camada num só gráfico detalhado com as várias capacidades de transmissão. As camadas de 1Gbps IP/10Gbps IP/40Gbps IP/100Gbps IP estão associadas ao consumo dos portos dos *routers* de

curto alcance *Ethernet* em redes IPoOTNoWDM e portos *Ethernet* WDM de longo alcance em redes IPoWDM dos routers de 1Gbps/10Gbps/40Gbps/100Gbps respectivamente, as camadas 10Gbps OTN/40Gbps OTN/100Gbps OTN representam o consumo dos *transponders* (cenário sem agregação de tráfego) e *muxponders* (cenário com de agregação de tráfego) de conversão O-E-O com interface *Ethernet* para interligar com os *routers* IP e outra interface WDM para se poder fazer o transporte na rede WDM. A relação entre as camadas apresentadas e respectivos componentes associados é apresentado na Tabela 14.

Tabela 14 – Componentes de rede incluídos por camada de rede

Camada de rede	Componentes incluídos
1Gbps IP	Porto <i>Ethernet</i> 1 Gbps
10Gbps IP	Porto <i>Ethernet</i> 10 Gbps (IPoOTNoWDM), Porto <i>Ethernet</i> WDM 10 Gbps (IPoWDM)
40Gbps IP	Porto <i>Ethernet</i> 40 Gbps (IPoOTNoWDM), Porto <i>Ethernet</i> WDM 40 Gbps (IPoWDM)
100Gbps IP	Porto <i>Ethernet</i> 100 Gbps (IPoOTNoWDM), Porto <i>Ethernet</i> WDM 100 Gbps (IPoWDM)
10Gbps OTN	<i>Transponder</i> 10 Gbps, <i>Muxponder</i> 10 Gbps
40Gbps OTN	<i>Transponder</i> 40Gbps, <i>Muxponder</i> 40 Gbps
100Gbps OTN	<i>Transponder</i> 100Gbps, <i>Muxponder</i> 100 Gbps
WDM, 10Gbps WDM, 40Gbps WDM, 100Gbps WDM	OLA (<i>Optical Line Amplifier</i>), <i>Optical Pre-Amplifier</i> , <i>Optical Booster</i> e WXC (<i>Wavelength Cross Connect</i>)

4.4.1 Modelo 1: Menor caminho sem *bypass*, SLR

A principal característica deste modelo está no facto de não se usar encaminhamento com *bypass*, como exemplo, cada canal entre dois nós que passe por nós intermédios o tráfego do mesmo irá ser processado e reencaminhado pelos routers IP desses mesmos nós intermédios, levando a um consumo energético mais elevado como vamos observar. O encaminhamento é feito segundo o caminho mais curto pelo algoritmo de encaminhamento *Dijkstra*, e toda a rede usa canais de um único débito binário ou SLR (*Single Line Rate*), podendo ser canais de 10Gbps, 40Gbps ou 100Gbps.

Para este modelo a simulação foi efectuada em linguagem de programação JAVATM, com recurso ao algoritmo de encaminhamento *Dijkstra* [38], não tendo sido usado o modelo descrito em 4.1 e 4.2. No entanto foi considerada a mesma rede, componentes e respectivos consumos tal como descrito em 4.3.

Com este modelo foram efectuadas simulações sobre as duas arquitecturas, IPoOTNoWDM e IPoWDM, cujos resultados são apresentados nas secções 4.4.1.1 e 4.4.1.2 respectivamente.

4.4.1.1 Arquitectura IPoOTNoWDM

Da análise da Figura 4.3, Figura 4.4 e Figura 4.5, é de destacar a diferença substancial de consumo da camada WDM para as restantes camadas IP e OTN, para além de esta apresentar um valor praticamente constante, e que deve-se essencialmente ao facto de o número de componentes desta camada aumentar apenas em função do número de direcções e assim que o número de canais ópticos numa fibra óptica ultrapassar o número máximo suportado W que foi definido neste caso como 80.

A diferença de consumo entre as camadas IP e OTN nos mesmos anos para as mesmas capacidades de transmissão derivam directamente da eficiência energética de cada uma das interfaces tal como apresentado na Tabela 10 para interfaces OTN e na Tabela 11 para interfaces IP.

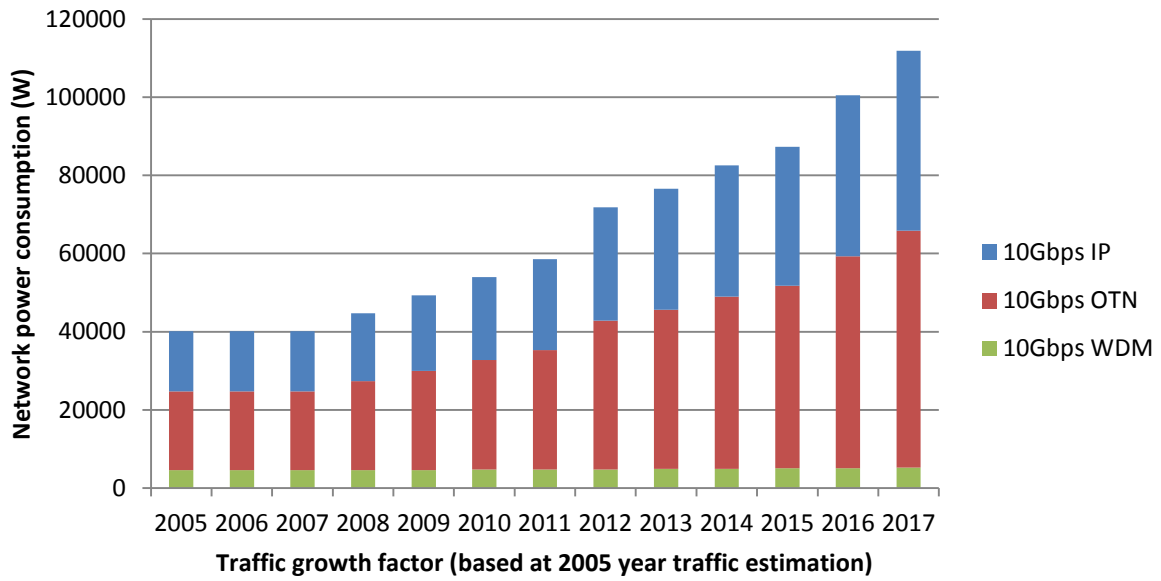


Figura 4.3 – Consumo energético total da rede por camada para SLR 10Gbps

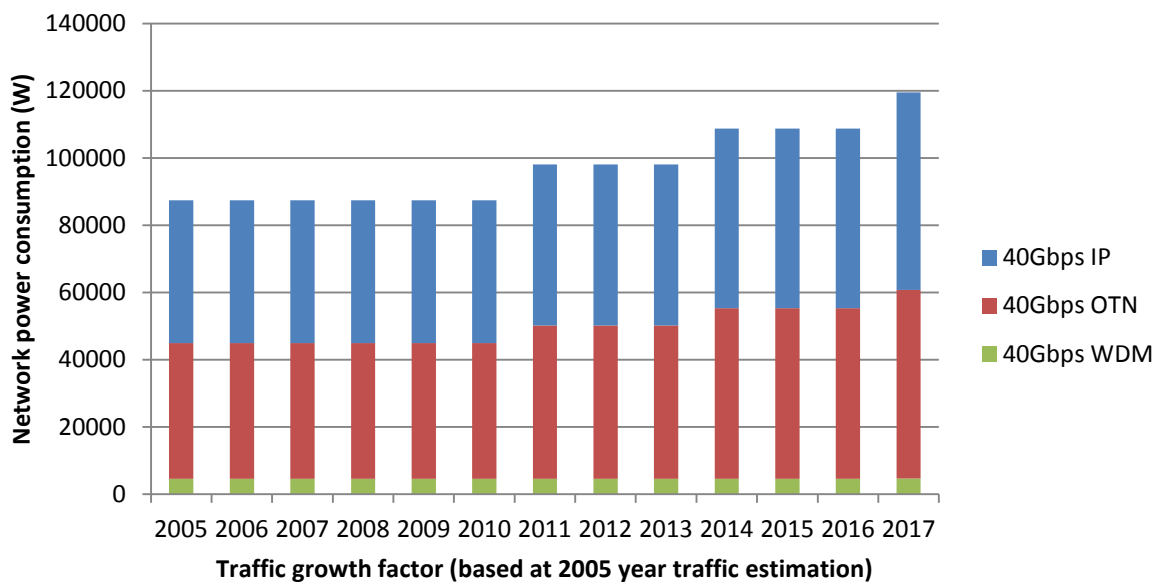


Figura 4.4 - Consumo energético total da rede por camada para SLR 40Gbps

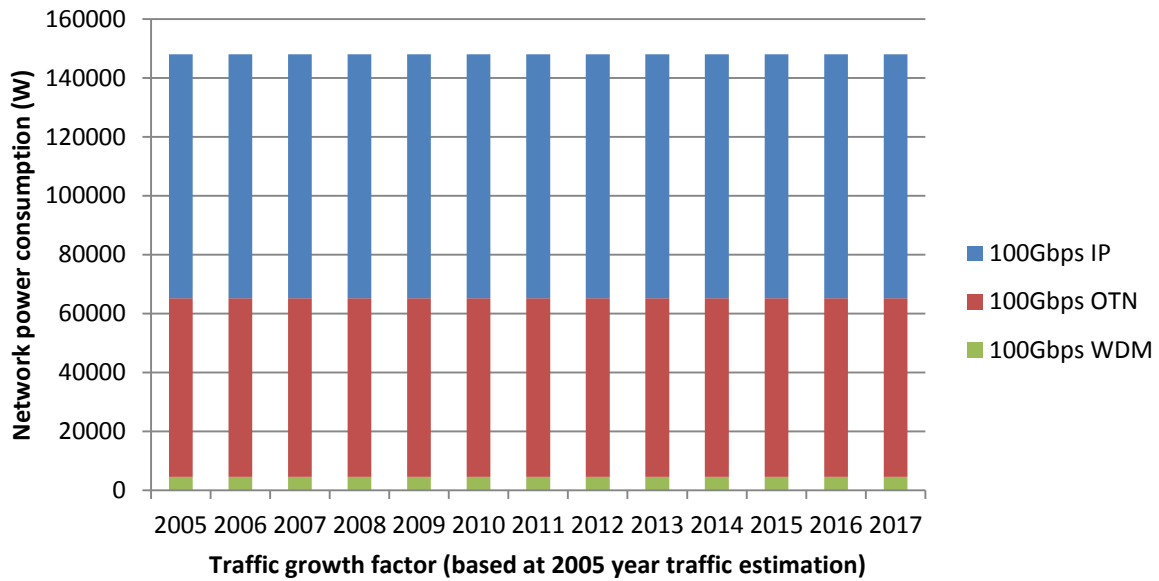


Figura 4.5 - Consumo energético total da rede por camada para SLR 100Gbps

De acordo com os resultados da Figura 4.6 nesta rede em particular é de destacar a vantagem no uso de interfaces de 10Gbps, pela maior capacidade de se ajustar e alterar a configuração da rede para responder aos requisitos de tráfego, demonstrando-se também que não existe qualquer vantagem a nível energético no uso de interfaces de 100Gbps, pois a rede dimensionada para 2005 é suficiente para acomodar todo o tráfego até 2017, havendo assim sobre-dimensionamento da rede desde 2005 e conseqüentemente um consumo energético exagerado durante vários anos.

O uso de interfaces de 10Gbps revela-se mais uma vez vantajoso assim que se compara com as restantes capacidades de 40Gbps e 100Gbps por apresentar de uma forma global um consumo menor. Contudo a taxa de crescimento no consumo com 10Gbps é mais abrupto, que poderá levar ao fim de alguns anos a ultrapassar o consumo de redes de 40Gbps e/ou até 100Gbps.

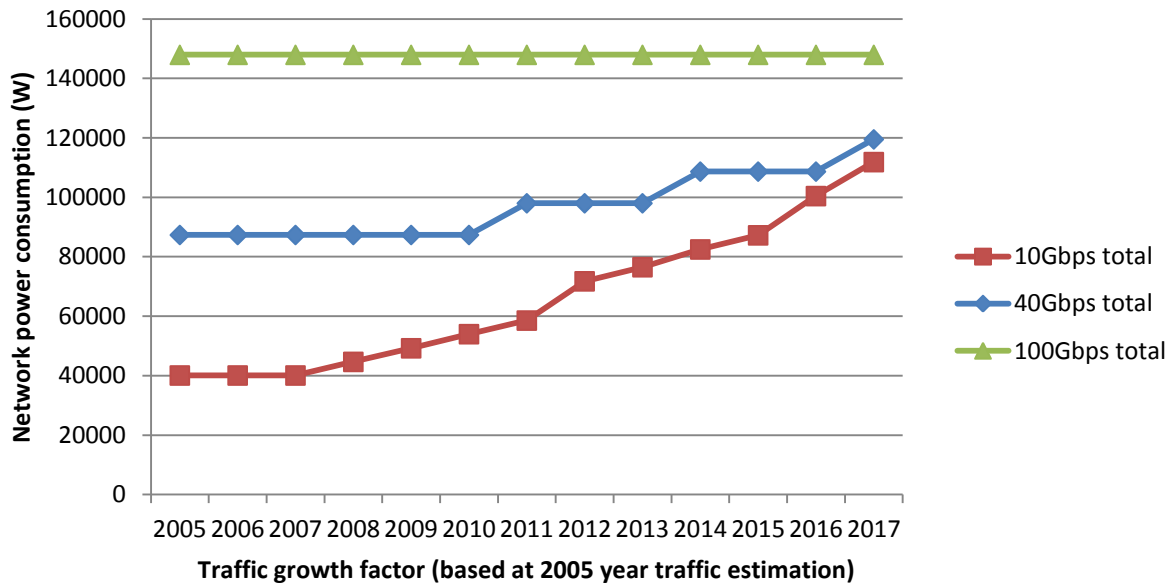


Figura 4.6 - Consumo energético total da rede para SLR de 10Gbps, 40Gbps e 100Gbps

4.4.1.2 Arquitectura IPoWDM

Face à arquitectura IPoOTNoWDM apresentada na secção precedente, a arquitectura IPoWDM apresentada neste capítulo destaca-se fundamentalmente por duas modificações à rede. Uma das alterações prende-se com a não utilização de *transponders* na camada OTN, e outra por passar-se a usar *routers* com interfaces WDM descritas como Porto *Ethernet* WDM (longo alcance) em vez de Porto *Ethernet* (curto alcance) com diferentes valores de consumo.

Comparativamente com o modelo IPoOTNoWDM, e de acordo com a Figura 4.7, Figura 4.8 e Figura 4.9 não existem diferenças significativas na taxa de aumento de consumo energético neste modelo.

É sobretudo de destacar pela Figura 4.10 que não existe grande vantagem no uso de canais de 40Gbps, sobretudo pela baixa eficiência energética da interface *Ethernet* WDM, levando a um consumo na rede próximo do valor pelo uso de interfaces de 100Gbps, ultrapassando mesmo a partir de 2014, enquanto a rede 100Gbps com o dimensionamento inicial tem capacidade de suportar o tráfego até 2017. Esta é mais uma situação em que compensa o uso de canais de 10Gbps.

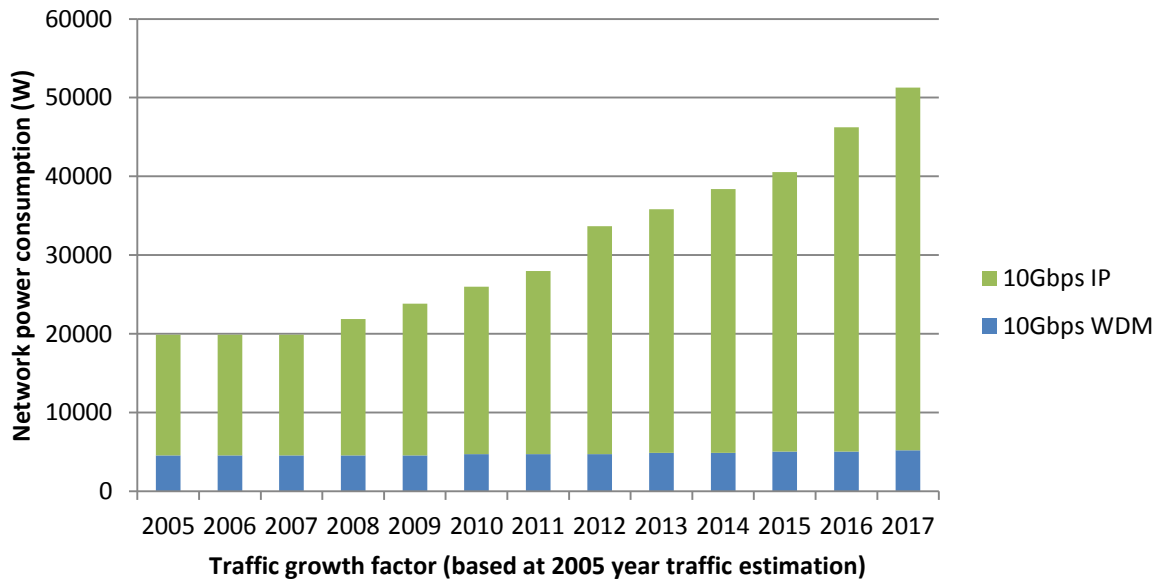


Figura 4.7 - Consumo energético total da rede por camada para SLR 10Gbps

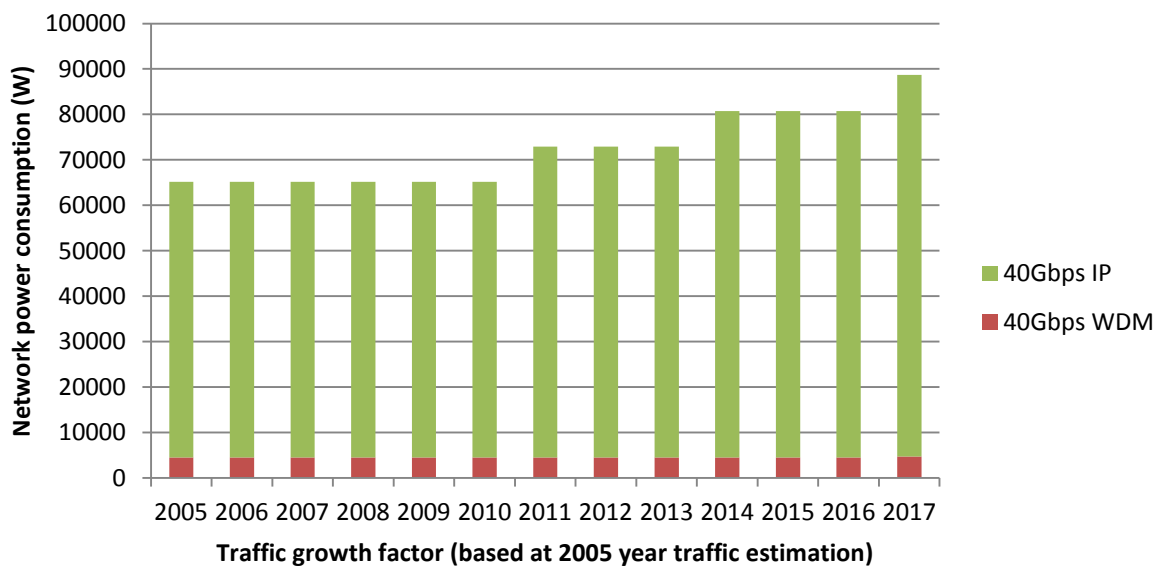


Figura 4.8 - Consumo energético total da rede por camada para SLR 40Gbps

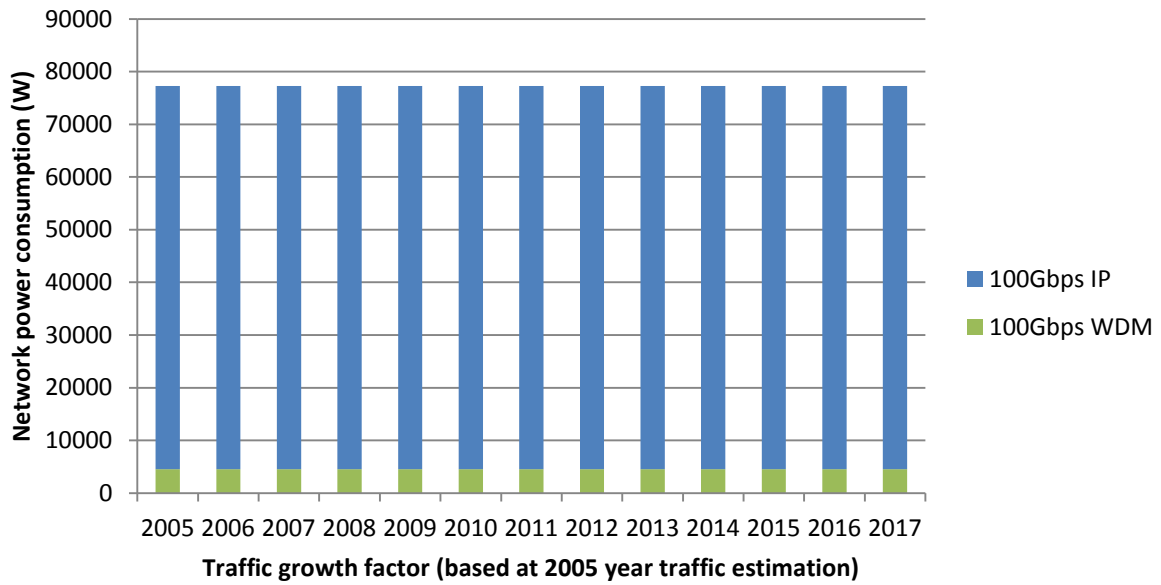


Figura 4.9 - Consumo energético total da rede por camada para SLR 100Gbps

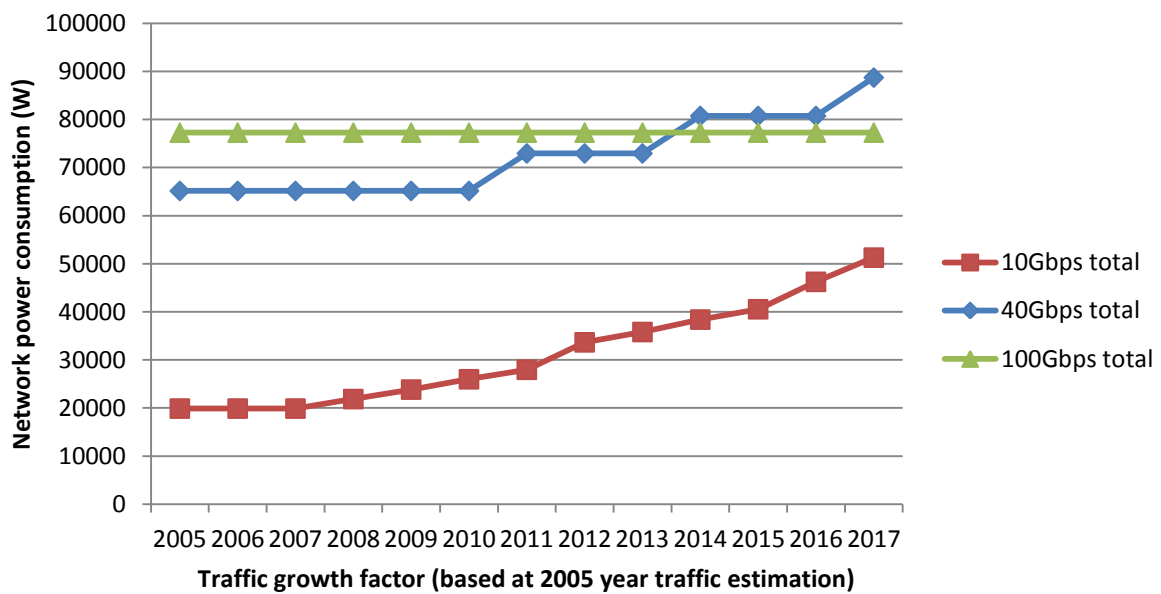


Figura 4.10 - Consumo energético total da rede para SLR de 10Gbps, 40Gbps e 100Gbps

4.4.2 Modelo 2: Menor consumo energético com *bypass*, SLR, IPoOTNoWDM

O modelo apresentado nesta secção e os restantes até ao modelo 10 foram implementados com base no modelo de optimização MILP apresentado em 4.1 e 4.2, e em que é considerado o *bypass* no encaminhamento óptico.

Este modelo 2 em específico, duas diferenças relativamente ao modelo 1 com rede IPoOTNoWDM pelo facto de se fazer encaminhamento com *bypass*, e efectuar um encaminhamento com menor consumo. Este usa exactamente as mesmas configurações e expressões apresentadas em 4.1.

Da análise da Figura 4.11, Figura 4.12 e Figura 4.13, é de salientar a maior proporção que a camada WDM contribui para o consumo total na rede face ao cenário sem *bypass* como foi destacado no modelo 1, isto deve-se fundamentalmente pela redução do número de interfaces na camada IP e OTN e consequente redução de consumo nas mesmas camadas.

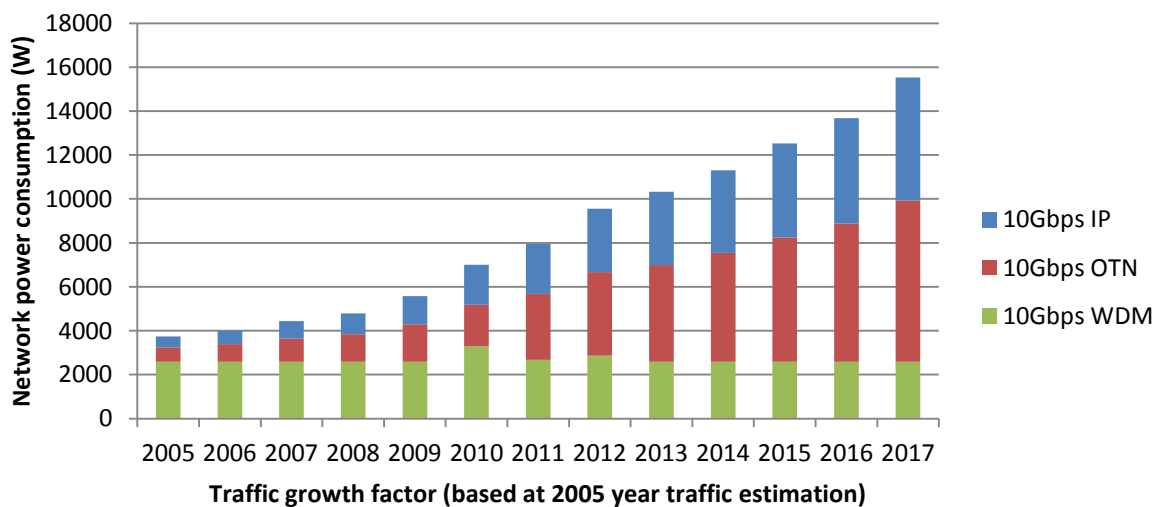


Figura 4.11 - Consumo energético total da rede por camada para SLR 10Gbps

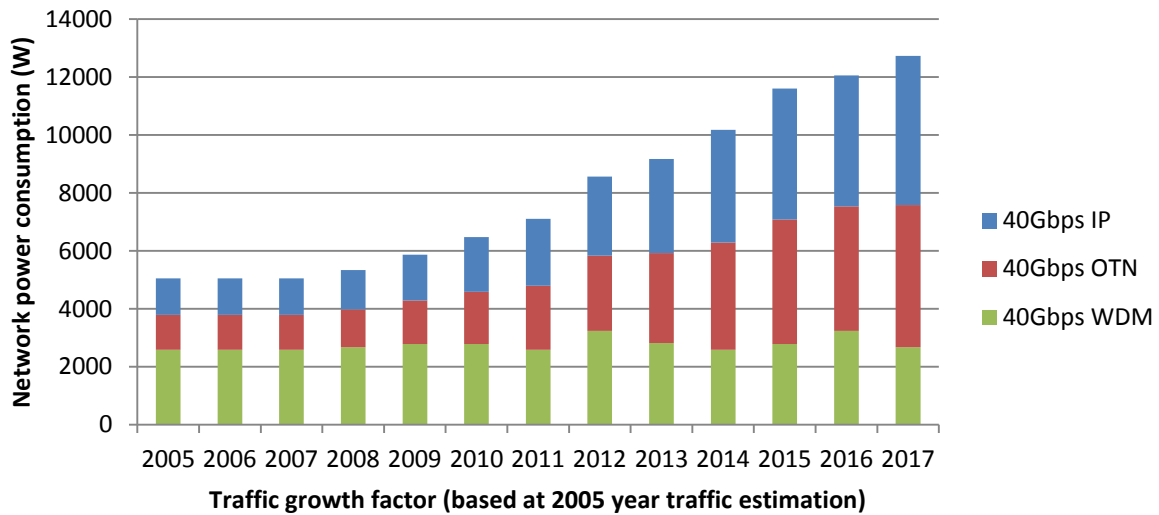


Figura 4.12 - Consumo energético total da rede por camada para SLR 40Gbps

De acordo com os resultados para a interface de 100Gbps, apresentados na Figura 4.13, nota-se desde já a capacidade de optimização da plataforma CPLEX pelo facto de conseguir ajustar o consumo ao longo dos anos, pois a simulação no modelo 1 em JAVA™ apresentava um consumo elevado e constante já desde 2005 deixando a rede sobre-dimensionada.

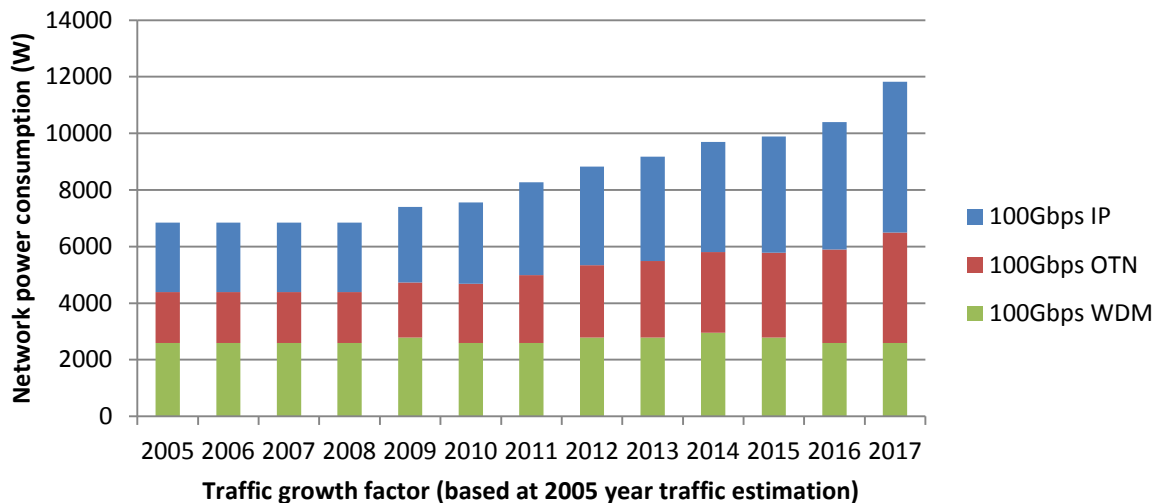


Figura 4.13 - Consumo energético total da rede por camada para SLR 100Gbps

De acordo com a Figura 4.14 comparativa, não existe nenhum tipo de interface que se destaque desde 2005 a 2017, contudo verifica-se que existe vantagem no uso de interfaces cada vez com mais capacidade ao longo dos anos, sobretudo pela sua maior eficiência energética.

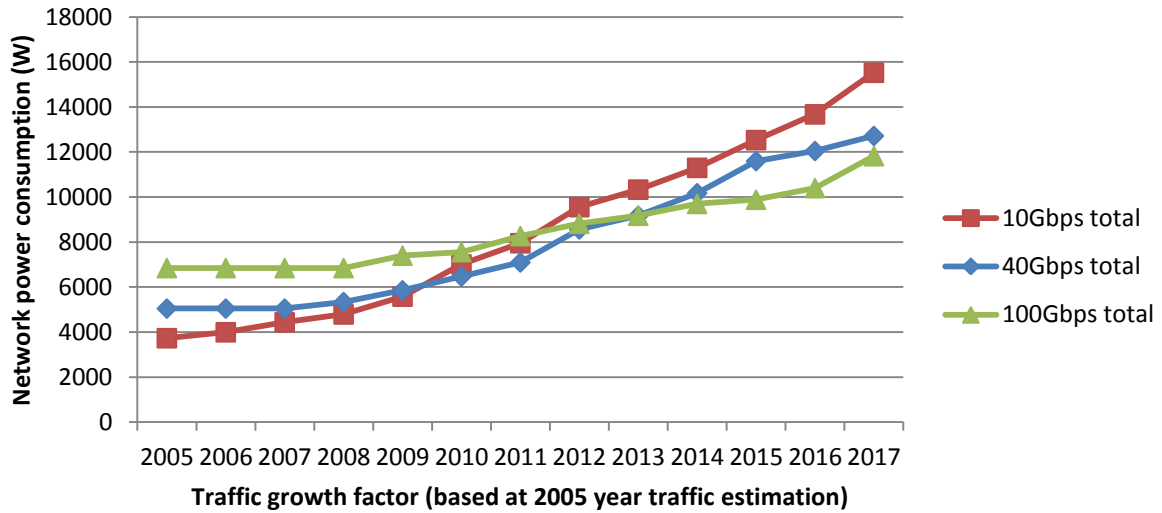


Figura 4.14 - Consumo energético total da rede para SLR de 10Gbps, 40Gbps e 100Gbps

É de referir que neste caso de acordo com a Figura 4.14, o consumo total de uma forma global encontra-se entre cerca de 4 kW e 16 kW, já o modelo 1 com arquitectura similar mas onde não é considerado o *bypass* óptico e o encaminhamento é feito pelo menor caminho, apresenta também um consumo global na ordem entre cerca de 40 kW e 150 kW (Figura 4.6), ou seja uma ordem de grandeza superior. Este resultado reforça a vantagem no uso de *bypass* óptico.

4.4.3 Modelo 3: Menor consumo energético com *bypass*, SLR, IPoWDM

O modelo 3 resulta essencialmente da remoção da camada OTN face ao modelo 2, que tem impacto na função objectivo, mais especificamente na parcela (2), em que para cada canal óptico C_{ij} é associado uma interface bidireccional WDM de router IP de consumo E_{cr} , cujo valor é baseado na Tabela 11 nos parâmetros Porto Ethernet WDM 10Gbps/40Gbps/100Gbps. A nova função objectivo é apresentada na expressão (4.7).

$$\sum_{i \in N} (E_{pre} + E_{bst} + E_{wxc}) \quad (1)$$

$$+ \sum_{i \in N} \sum_{j \in N: i \neq j} C_{ij} \cdot (E_{cr}) \quad (2)$$

$$+ \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} (E_{pre} + E_{bst} + E_{wxc}) \cdot f_{mn} \quad (3)$$

$$+ \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} E_e \cdot A_{mn} \cdot f_{mn} \quad (4)$$

(4.7)

Após análise da Figura 4.15 é de salientar o facto da camada WDM ter um peso maior no consumo total que as interfaces IP de 10Gbps, no período de 2005 a 2011, que salienta a capacidade de minimização do consumo do modelo, pois dificilmente é possível reduzir mais o consumo na camada WDM pelo facto de esta ter de cumprir os requisitos mínimos para suporte aos canais ópticos. Por outro lado devido ao inferior requisito de tráfego nestes primeiros anos e baixo consumo de portos de 10Gbps, leva que o consumo associado tenha um valor tão baixo nestes primeiros anos.

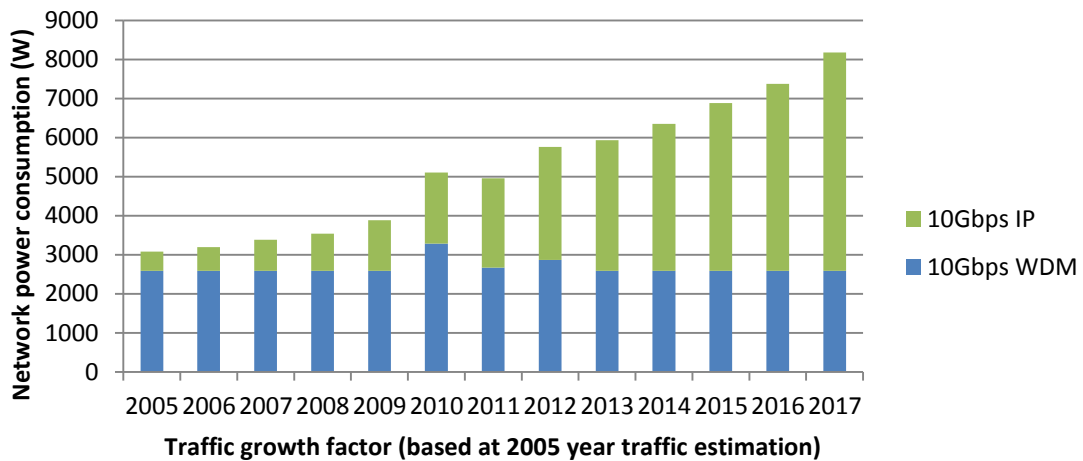


Figura 4.15 - Consumo energético total da rede por camada para SLR 10Gbps

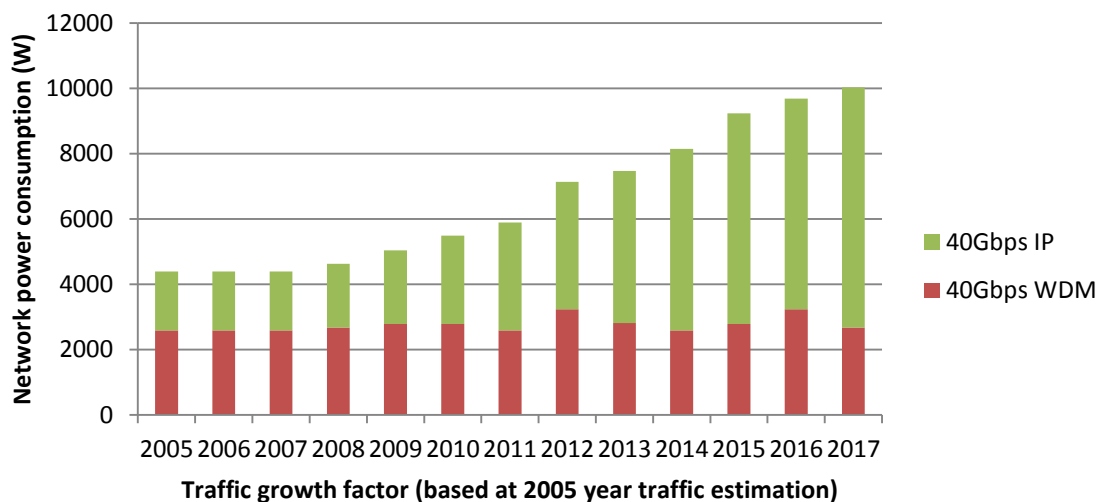


Figura 4.16 - Consumo energético total da rede por camada para SLR 40Gbps

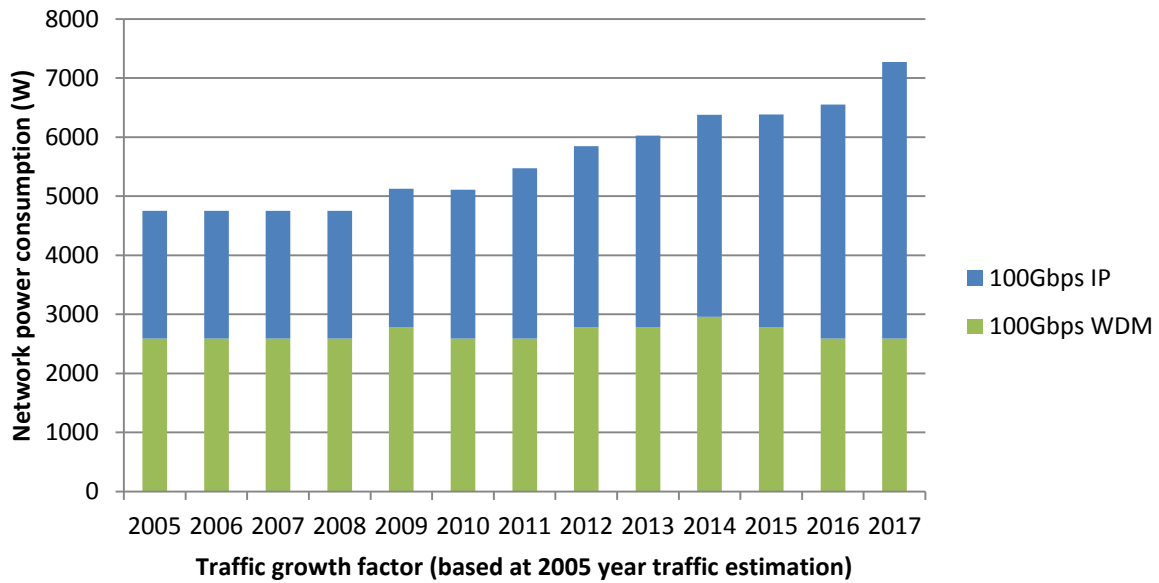


Figura 4.17 - Consumo energético total da rede por camada para SLR 100Gbps

Com base na Figura 4.18 verifica-se que o uso de canais de 10Gbps permite de uma forma global um menor consumo energético. Já o uso de canais de 40Gbps apresenta globalmente o pior resultado, pois estas interfaces apresentam uma baixa eficiência energética.

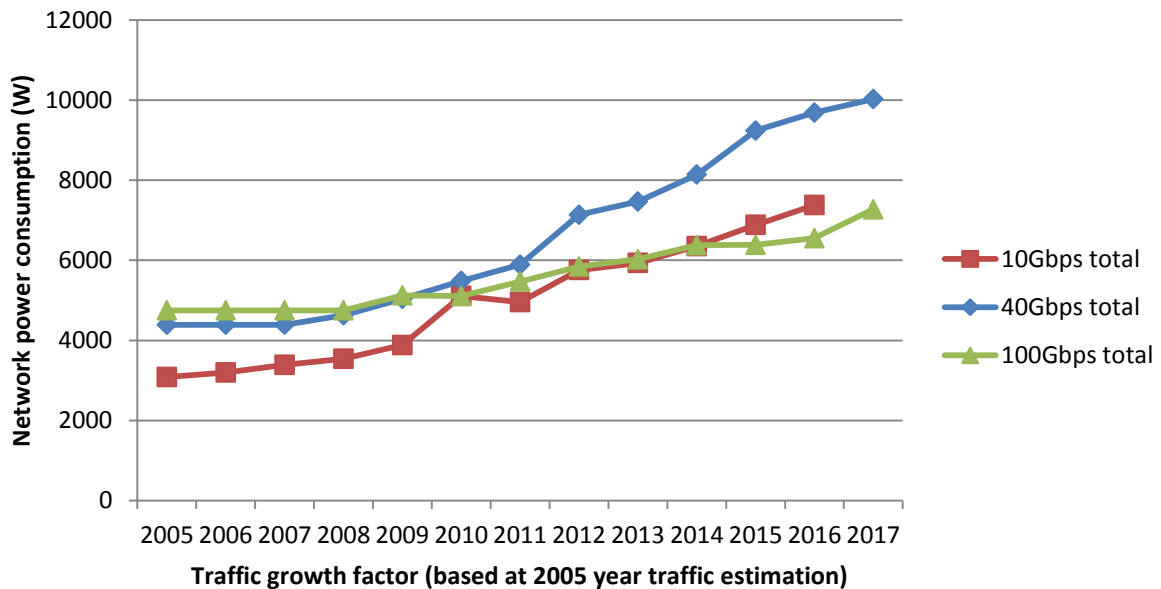


Figura 4.18 - Consumo energético total da rede para SLR de 10Gbps, 40Gbps e 100Gbps

4.4.4 Modelo 4: Menor consumo energético com bypass, MLR, IPoOTNoWDM

Neste modelo foi adicionado fundamentalmente mais um parâmetro que permite a optimização com maior margem de manobra pela liberdade da escolha do tipo de canal (capacidade de transmissão) de que achar mais adequado, e não como uma constante como no caso de redes SLR.

Face ao modelo MILP apresentado em 4.1 foi adicionado o seguinte índice e constante respectivamente:

- C : Índice associado a cada um dos canais de capacidade de transmissão diferente, na gama de NR;
- NR : Número de capacidades de transmissão de canais ópticos disponíveis para usar na rede MLR. Definida com o valor 3 (10Gbps, 40Gbps e 100Gbps);

Relativamente ao mesmo modelo foram alteradas as seguintes constantes, variáveis:

- B_c : Valores de capacidade de transmissão para cada um dos tipos de canais de transmissão na gama de NR. Definido como [10000, 40000, 100000] (Mbps);
- E_r^c : Consumo médio da cada porta dos routers IP bidireccional, para cada uma das capacidades de transmissão c na gama de NR (W). Valores definidos com base na Tabela 11, nos parâmetros: Porto Ethernet 10Gbps/40Gbps/100Gbps;
- E_{gt}^c : Consumo médio de cada *transponder* conversão O-E-O por canal WDM, para cada uma das capacidades de transmissão c na gama de NR (W). Valores definidos com base na Tabela 10, nos parâmetros *Transponder/Muxponder* 10Gbps/40Gbps/100Gbps;
- $C_{ij}^c \in \mathbb{N}$: Número de canais de capacidade B^c na ligação virtual entre i e j .
- $w_{mn}^{ij,c} \in \mathbb{N}$: Número de canais de comprimento de onda de capacidade B^c entre i e j

que atravessa a ligação física entre m e n .

- $W_{mn}^C \in \mathbb{N}$: Número de canais de comprimento de onda de capacidade B^C na ligação física entre m e n .

Foram alteradas igualmente as seguintes restrições, assim como a função objectivo:

- **Objectivo:** minimizar

$$\sum_{i \in N} (E_{pre} + E_{bst} + E_{wxc}) \quad (1)$$

$$+ \sum_{i \in N} \sum_{j \in N: i \neq j} \sum_{c \in NR} C_{ij}^c \cdot (E_{gt}^c + E_r^c) \quad (2)$$

(4.8)

$$+ \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} (E_{pre} + E_{bst} + E_{wxc}) \cdot f_{mn} \quad (3)$$

$$+ \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} E_e \cdot A_{mn} \cdot f_{mn} \quad (4)$$

- **2ª restrição:**

$$\sum_{s \in N} \sum_{d \in N: s \neq d} \lambda_{ij}^{sd} \leq \sum_{c \in N} C_{ij}^c \cdot B_C \quad \forall i, j \in N: i \neq j \quad (4.9)$$

- **3ª restrição:**

$$\sum_{n \in N: i \neq j} w_{mn}^{ij,C} - \sum_{n \in N: i \neq j} w_{nm}^{ij,C} = \begin{cases} C_{ij}^c & m = i \\ -C_{ij}^c & m = j \\ 0 & \text{outros} \end{cases} \quad \forall i, j, m \in N: i \neq j; C \in NR \quad (4.10)$$

- **4ª restrição:**

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N: i \neq j} \sum_{c \in NR} w_{nm}^{ij,C} \leq W \cdot f_{mn} \quad \forall m, n \in N: m \neq n \quad (4.11)$$

- **5ª restrição:**

$$W_{mn}^C = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N: i \neq j} w_{mn}^{ij,C} \quad \forall m, n \in N: m \neq n; C \in NR \quad (4.12)$$

Neste caso, as restrições foram alteradas para aplicarem restrições especificamente a cada um dos canais c e possibilitar no momento de optimização a escolha dos canais mais adequados.

A função objectivo foi alterada no sentido de se considerar os diferentes consumos dos diferentes tipos de interface (10Gbps, 40Gbps e 100Gbps).

Os resultados de simulação deste modelo foram compilados na Figura 4.19, onde se verifica que através do consumo de cada uma das camadas e para cada um dos tipos de canais ópticos (10Gbps, 40Gbps e 100Gbps), se confirma mais uma vez o que foi referido nos resultados das redes SLR, no que se refere à vantagem no uso de canais com capacidade de transmissão mais elevado à medida que o volume de tráfego na rede aumenta.

Apesar do aumento do impacto das interfaces de 100Gbps, as interfaces de 10Gbps continuam a ser úteis ao longo dos anos sem um decréscimo considerável no número de interfaces deste tipo até 2016. Já no que respeita ao uso de interfaces de 40Gbps foi mais contido.

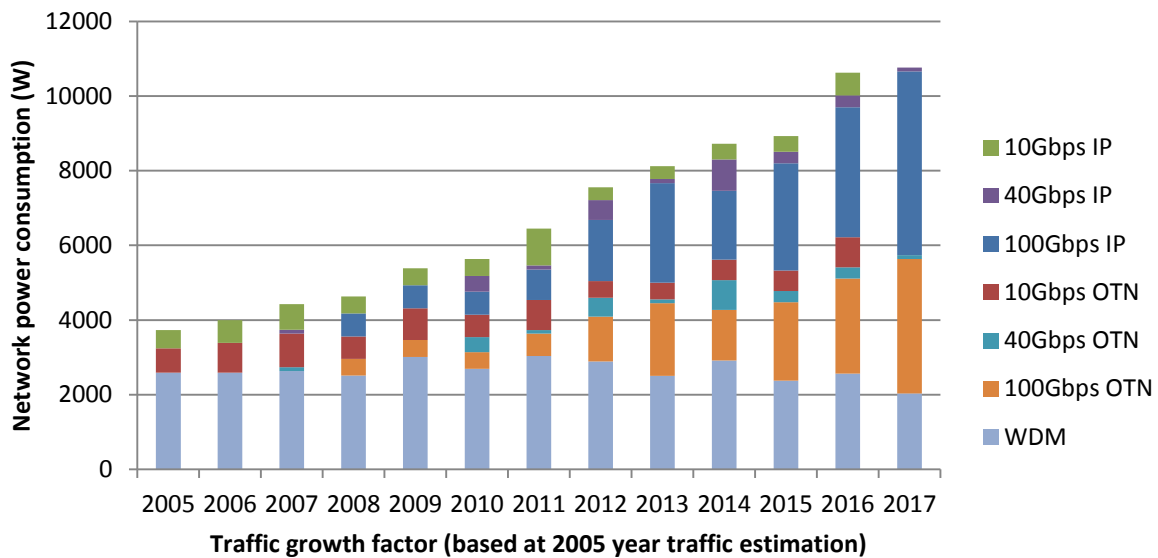


Figura 4.19 - Consumo energético total da rede por camada e capacidade transmissão para MLR

Este modelo de rede apresenta a particularidade de poder adicionar canais de capacidades mais elevadas com eficiência energética mais elevada, em redes que usem fundamentalmente canais de capacidade mais baixa como 10Gbps, reduzindo deste modo a taxa de crescimento de consumo energético como foi visto por exemplo nos modelos de SLR 10Gbps no modelo 2.

4.4.5 Modelo 5: Menor consumo energético com *bypass*, MLR, IPoWDM

O modelo 5 resulta essencialmente da remoção da camada OTN do modelo 4 e passar a usar portos *Ethernet* de *router* com interface WDM, que tem impacto na função objectivo, mais especificamente na parcela (2), em que para cada canal óptico C_{ij}^C é associado uma interface bidireccional WDM de router IP de consumo E_{cr}^C , o seu valor é baseado na Tabela 11 nos parâmetros Porto Ethernet WDM 10Gbps/40Gbps/100Gbps. A nova função objectivo é apresentada na expressão (4.13).

$$\sum_{i \in N} (E_{pre} + E_{bst} + E_{wxc}) \quad (1)$$

$$+ \sum_{i \in N} \sum_{j \in N: i \neq j} \sum_{c \in NR} C_{ij}^C \cdot (E_{cr}^C) \quad (2)$$

$$+ \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} (E_{pre} + E_{bst} + E_{wxc}) \cdot f_{mn} \quad (3)$$

$$+ \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} E_e \cdot A_{mn} \cdot f_{mn} \quad (4)$$

(4.13)

Com base nos resultados apresentados em Figura 4.20, é de salientar a vantagem no uso de interfaces de 100Gbps à medida que se avança nos anos. É também de realçar a diminuição do consumo na camada WDM nos últimos anos que tem como base a diminuição no número de direcções de transmissão ou fibras ópticas a transportar tráfego.

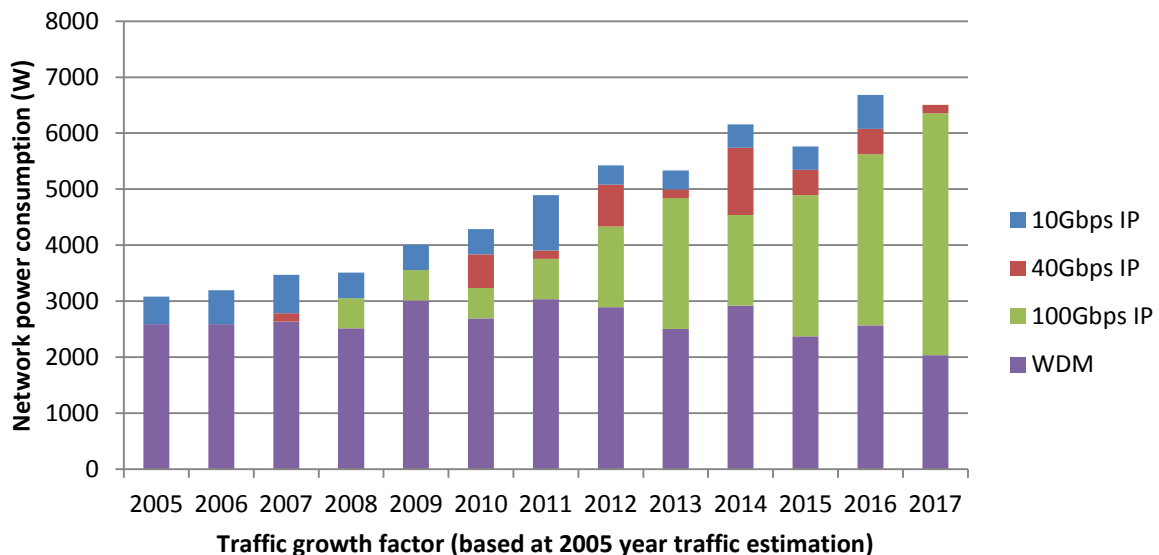


Figura 4.20 - Consumo energético total da rede por camada e capacidade transmissão para MLR

4.4.6 Modelo 6: Menor caminho com *bypass*, SLR, IPoOTNoWDM

Este modelo tem como base o modelo apresentado na secção 4.1 e usado no modelo 2, em que a diferença reside no critério de encaminhamento, que passa a ser pelo caminho mais curto, em vez de obter o menor consumo energético. Com isto resultou apenas uma alteração da função objectivo que corresponde à minimização da distância total de todos os canais ópticos de i para j . A função objectivo resultante é apresentada na equação (4.14).

- **Objectivo:** minimizar

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N: i \neq j} \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} W_{mn}^{ij} \cdot L_{mn} \quad (1) \quad (4.14)$$

$$+ \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} f_{mn} \quad (2)$$

Tratando-se de um modelo SLR, foram efectuadas simulações separadas para cada uma das capacidades de canal (10Gbps, 40Gbps e 100Gbps), cujos resultados são apresentados na Figura 4.21, Figura 4.22, Figura 4.23 e resumidamente na Figura 4.24. Pela última figura destaca-se o consumo elevado pelo uso de canais de 10Gbps a partir de 2011 face ao uso dos restantes canais, pois o encaminhamento pelo caminho mais curto não otimizando o volume de tráfego na rede, leva a requerer mais canais, fazendo-se sentir directamente a eficiência de cada um dos tipos de interfaces no consumo total da rede.

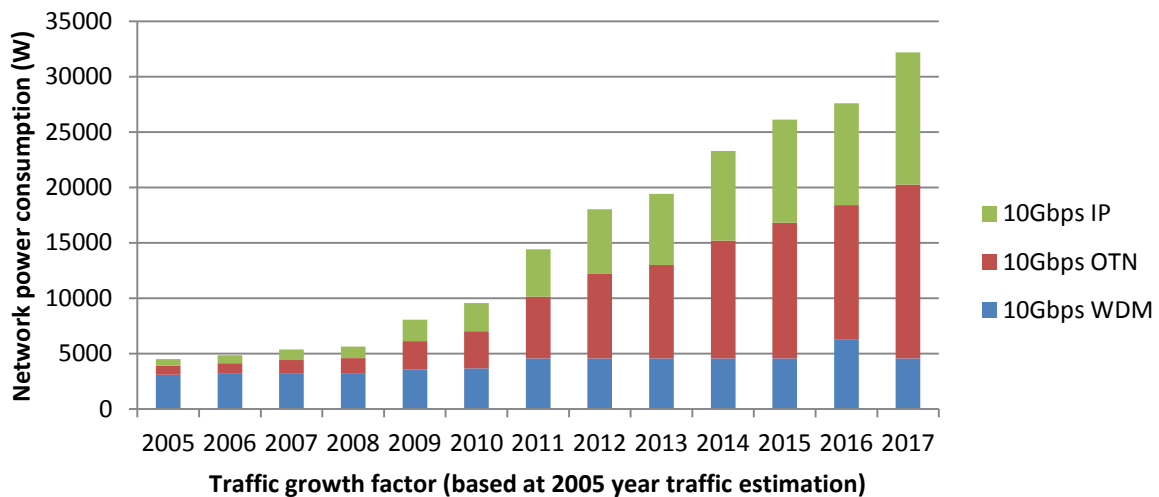


Figura 4.21 – Consumo energético total da rede por camada para SLR 10Gbps

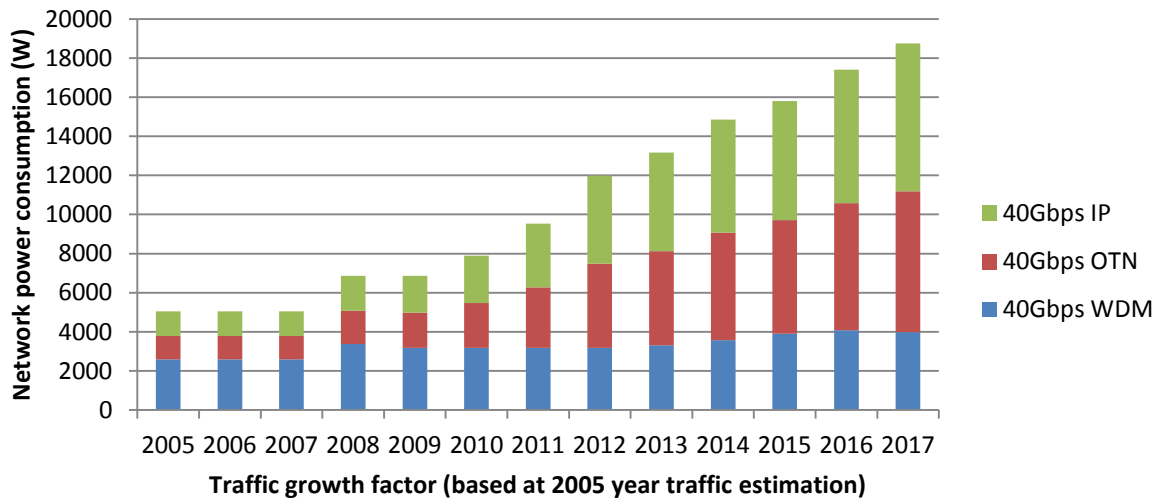


Figura 4.22 - Consumo energético total da rede por camada para SLR 40Gbps

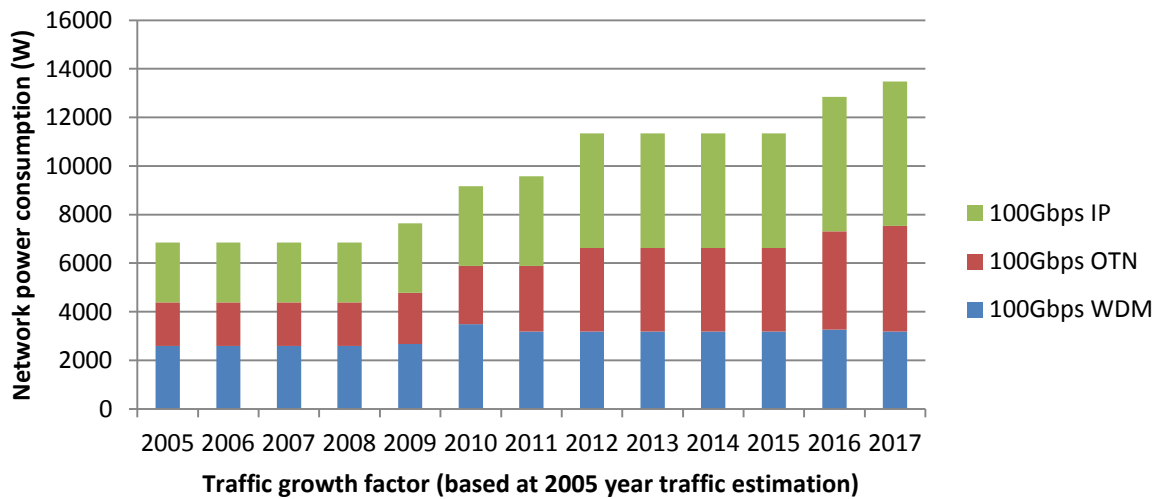


Figura 4.23 - Consumo energético total da rede por camada para SLR 100Gbps

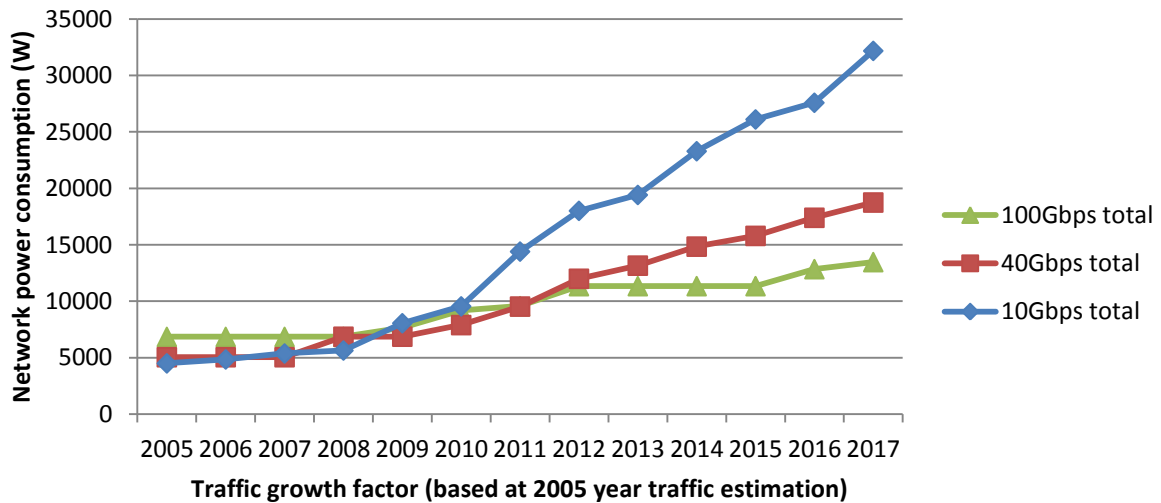


Figura 4.24 - Consumo energético total da rede para SLR de 10Gbps, 40Gbps e 100Gbps

4.4.7 Modelo 7: Menor caminho com *bypass*, SLR, IPoWDM

No modelo 7 é descartado o uso da camada OTN, sendo usado exactamente o mesmo modelo de optimização MILP que foi usado no modelo 6. A única diferença reside no cálculo posterior em fase de pós-processamento no consumo total da rede, onde não se considera o consumo de *transponders* OTN e passa-se a ter em conta o consumo de porto de *router Ethernet* com interface WDM para transportar o canal directamente sobre a camada WDM.

Os resultados da Figura 4.25, Figura 4.26, Figura 4.27 e Figura 4.28, refletem as eficiências energéticas apresentadas na Tabela 11 para cada uma das interfaces, com destaque mais uma vez para a interface de 100Gbps por apresentar uma eficiência de 0,56 Gbps/W face aos 0,26 Gbps/W e 0,27 Gbps/W das interface de 10Gbps e 40Gbps respectivamente.

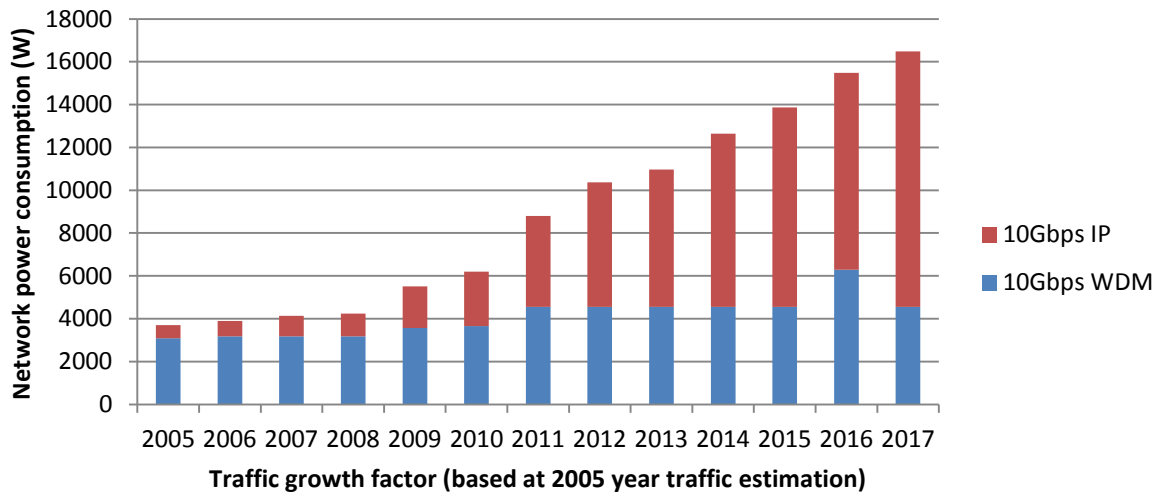


Figura 4.25 - Consumo energético total da rede por camada para SLR 10Gbps

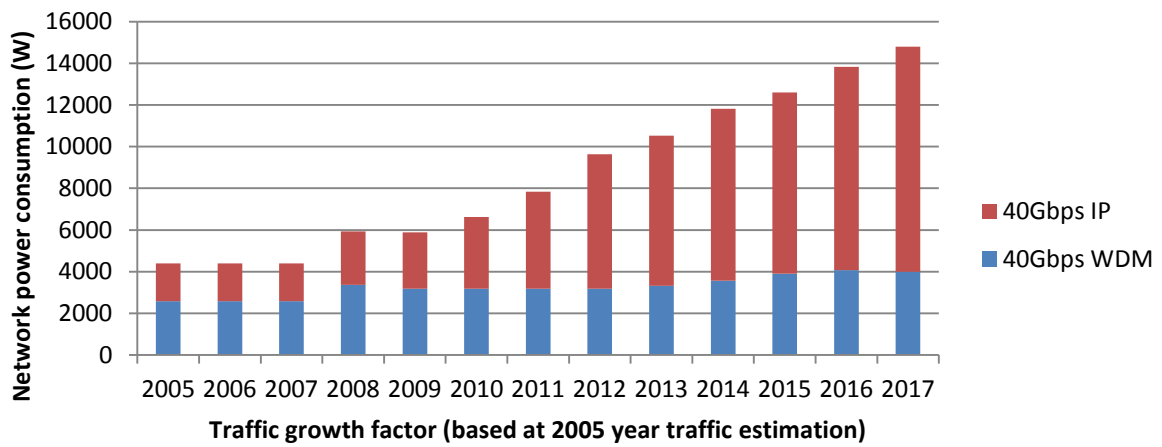


Figura 4.26 - Consumo energético total da rede por camada para SLR 40Gbps

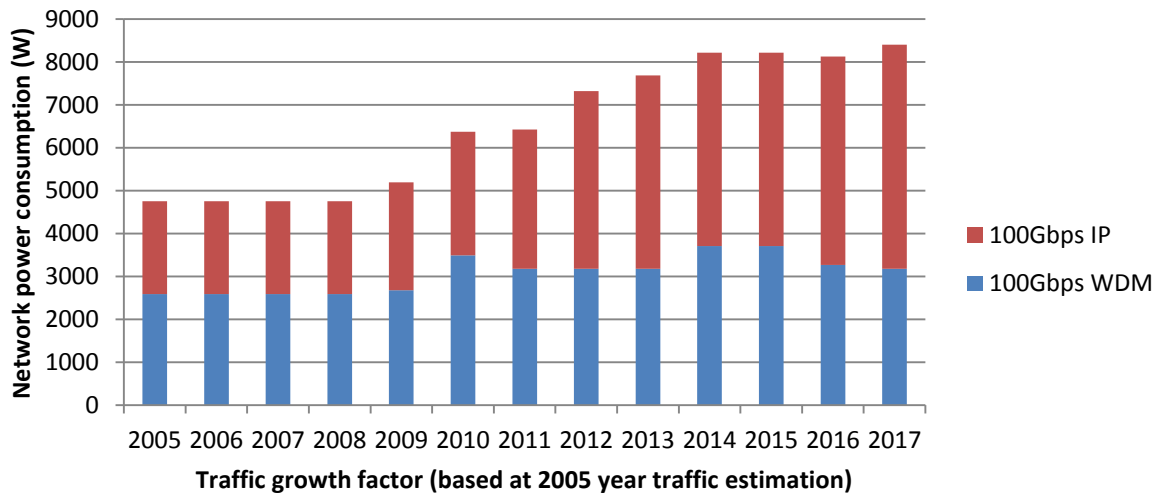


Figura 4.27 - Consumo energético total da rede por camada para SLR 100Gbps

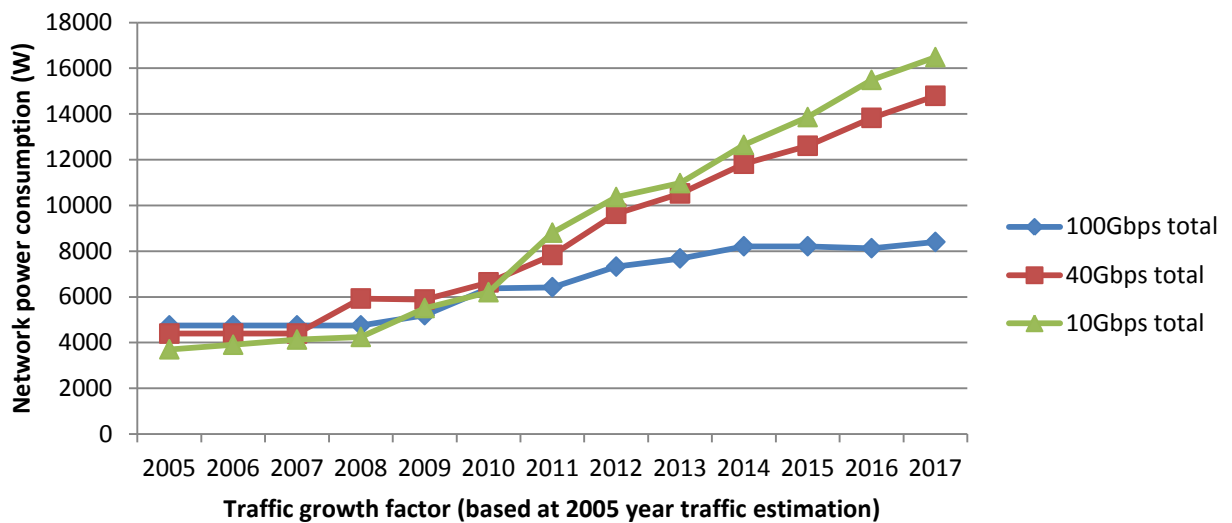


Figura 4.28 - Consumo energético total da rede para SLR de 10Gbps, 40Gbps e 100Gbps

4.4.8 Modelo 8: Menor caminho e menor consumo energético com bypass, MLR, IPoOTNoWDM

Com o objectivo de analisar o uso de modelo MLR na rede tendo em conta o critério de encaminhamento segundo o caminho mais curto, implementou-se o modelo 8, que tem como função objectivo a combinação do caminho mais curto com menor consumo energético, correspondendo à uma combinação do modelo 4 com o modelo 6.

- **Objectivo:** minimizar

$$\sum_{i \in N} (E_{pre} + E_{bst} + E_{wxc}) \quad (1)$$

$$+ \sum_{i \in N} \sum_{j \in N: i \neq j} \sum_{c \in NR} C_{ij}^c \cdot (E_{gt}^c + E_r^c) \quad (2)$$

$$+ \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} (E_{pre} + E_{bst} + E_{wxc}) \cdot f_{mn} \quad (3)$$

$$+ \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} E_e \cdot A_{mn} \cdot f_{mn} \quad (4)$$

$$+ \sum_{i \in N} \sum_{j \in N: i \neq j} \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} W_{mn}^{ij} \cdot L_{mn} \quad (5)$$

(4.15)

O resultado da simulação deste modelo é destacado na Figura 4.29, em que a principal diferença que se destaca neste caso face ao encaminhamento segundo apenas um dos critérios, é uma oscilação no consumo para todos os tipos de interfaces, ao longo dos anos. No entanto de forma mais subtil verifica-se que o uso de interfaces de capacidade de 100Gbps, apresenta uma contribuição significativa para a optimização deste modelo.

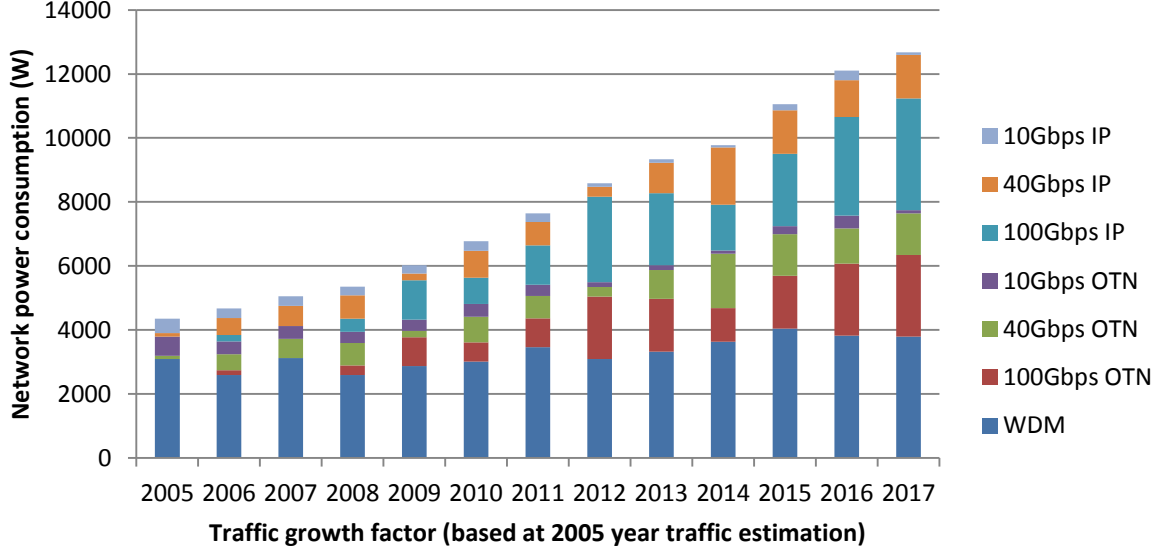


Figura 4.29 - Consumo energético total da rede por camada e capacidade transmissão para MLR

4.4.9 Modelo 9: Menor caminho e menor consumo energético com *bypass*, MLR, IPoWDM

O modelo 9 com base no modelo 8, apresenta uma única diferença na função objectivo na medida em que não considera o consumo de transponders OTN, e considerar portos de router com interface WDM, tal como representa a equação (4.16).

- **Objectivo:** minimizar

$$\sum_{i \in N} (E_{pre} + E_{bst} + E_{wxc}) \quad (1)$$

$$+ \sum_{i \in N} \sum_{j \in N: i \neq j} \sum_{c \in NR} C_{ij}^c \cdot (E_{cr}^c) \quad (2)$$

(4.16)

$$+ \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} (E_{pre} + E_{bst} + E_{wxc}) \cdot f_{mn} \quad (3)$$

$$+ \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} E_e \cdot A_{mn} \cdot f_{mn} \quad (4)$$

$$+ \sum_{i \in N} \sum_{j \in N: i \neq j} \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} \sum_{c \in NR} W_{mn}^{ij,c} \cdot L_{mn} \quad (5)$$

Com base nos resultados de simulação apresentados na Figura 4.30, é de notar que este é o modelo sem agregação em que as interfaces de 40Gbps contribuem mais para consumo total na

rede sem descartar o uso dos restantes tipos interfaces, isto mesmo não tendo um andamento linear ao longo dos anos para todas as interfaces.

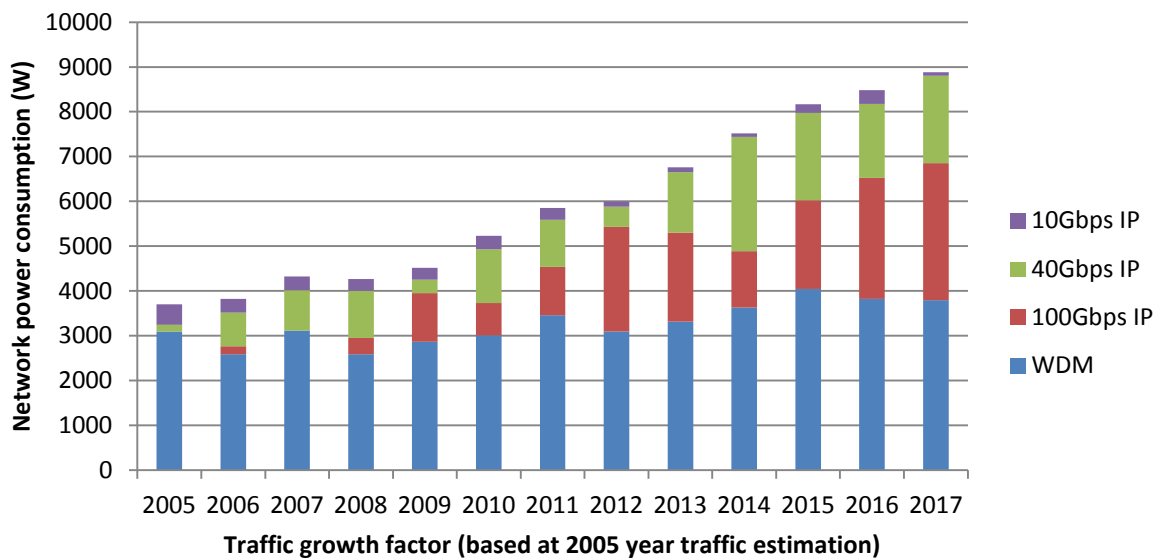


Figura 4.30 - Consumo energético total da rede por camada e capacidade transmissão para MLR

4.4.10 Modelo 10: Menor consumo energético com *bypass*, MLR, IPoOTNoWDM com agregação

Este modelo vai adicionar a capacidade de se poder fazer a agregação de canais de capacidade inferior em canais de capacidade superior pela substituição de *transponders* por *muxponders*. Deste modo, houve necessidade de efectuar alterações substanciais no modelo MILP a considerar, nomeadamente adição de uma nova variável que se traduza nos canais que interligam o *muxponder* aos portos dos *routers* no mesmo nó, pois os canais C_{ij} até agora considerados entre portos dos routers, passam apenas a ser considerados entre interfaces de linha de *muxponders* de nós diferentes.

Com recurso ao *muxponder* 10Gbps (Figura 4.31 –(a)) é possível multiplexar até dez canais de 1Gbps *Ethernet* no canal de 10Gbps a transmitir, o *muxponder* 40Gbps (Figura 4.31 –(b)) dá a possibilidade de multiplexar até 4 canais de 10Gbps *Ethernet*, por fim o *muxponder* 100Gbps (Figura 4.31 –(c)) possibilita a multiplexagem de até duas interfaces 40Gbps *Ethernet* num sinal de 100Gbps para transmitir na rede WDM.

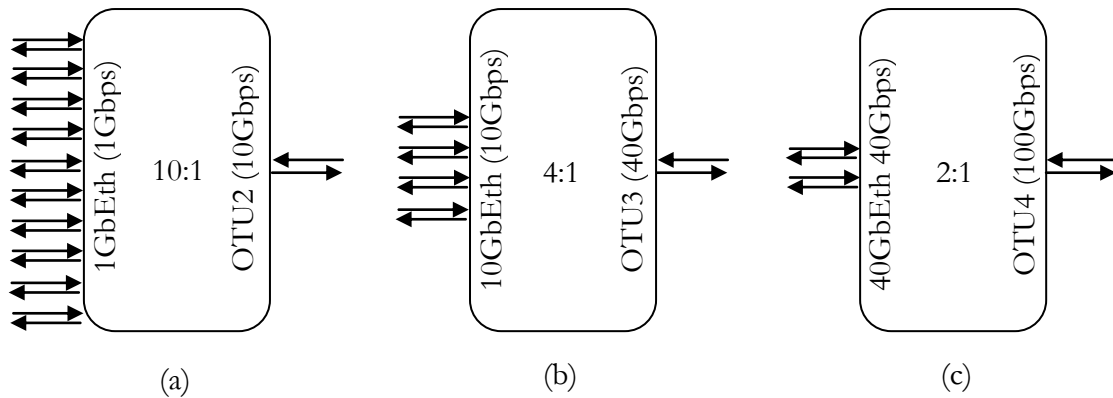


Figura 4.31 – *Muxponders* usados no modelo 10 como cenário de agregação. (a) *Muxponder* 10Gbps; (b) *Muxponder* 40Gbps; (c) – *Muxponder* 100Gbps

A Tabela 15 reflete a ocupação de cada um dos canais do tipo cc (cliente) em canais cl (linha).

Tabela 15 – Ocupação de cada um dos canais cc em canais cl

	$cc = 1$	$cc = 2$	$cc = 3$	$cc = 4$
$cl = 1$	0.1	0	0	0
$cl = 2$	0	0.25	0	0
$cl = 3$	0	0	0.4	0

Face ao modelo MILP apresentado em 4.1 foram adicionados os seguinte índices, constantes, variáveis e restrições respectivamente:

- cl : Índice associado a cada um dos tipos de canais na interface de linha de *muxponder*, a passar na camada WDM, na gama de NRI;
- cc : Índice associado a cada um dos tipos canais na interface de cliente de *muxponder* ligando à interface de *router*, na gama de canais NRC;
- NRI : Constante que representa o número de capacidades de transmissão de canais ópticos disponíveis para usar sobre a rede WDM. Definida com o valor 3 (10Gbps, 40Gbps e 100Gbps);

- NRC : Constante que representa o número de capacidades de transmissão de canais ópticos disponíveis a usar nas interfaces de cliente de *muxponder*. Definida com o valor 3 (1Gbps, 10Gbps e 40Gbps);
- B_c^{cc} : Vector de constantes que representa os valores de capacidade de transmissão para cada um dos tipos de interfaces de cliente de *muxponders* na gama de NR. Definido como [1, 10, 40] (Gbps);
- Mux_{cc}^{cl} : Matriz de constantes que traduz as possibilidades de multiplexagem, através da percentagem que cada canal cc ocupa num canal cl , os valores desta matriz encontram-se na Tabela 15;
- $Asso_{cc}^{cl}$: Matriz de constantes que traduz entre que tipos de canais cc e cl é possível haver agregação/associação, baseado na Tabela 15, apresentando o valor 1 para todos casos onde na Tabela 15 existam valores diferentes de 0, e 0 nos restantes valores da matriz.
- $W_{cij}^{cl,cc} \in \mathbb{N}$: Variável que define número de canais de capacidade cc agregados em canais de capacidade cl entre os nós i e j ;
- $C_{ij}^{cc} \in \mathbb{N}$: Variável que define número de canais de capacidade cc entre os nós i e j ;

- **6ª restrição:**

$$\sum_{cl \in NRl} w_{cij}^{cl,cc} \cdot Asso_{cc}^{cl} = C_{ij}^{cc} \quad \forall i, j \in N: i \neq j; cc \in NRC \quad (4.17)$$

A restrição 6 foi adicionada no sentido de se fazer a associação entre C_{ij}^{cc} e $w_{cij}^{cl,cc}$, de acordo com as possibilidades de associação entre canais C_{ij}^{cc} e C_{ij}^{cl} , não permitindo que se agregue canais incompatíveis.

- **7ª restrição:**

$$\sum_{cc \in NRC} C_{ij}^{cc} \cdot Mux_{cc}^{cl} \leq C_{ij}^{cl} \quad \forall i, j \in N: i \neq j; cl \in NRl \quad (4.18)$$

- 8ª restrição:

$$W_{cij}^{cl,cc} \cdot Asso_{cc}^{cl} \leq \frac{1}{Mux_{cc}^{cl}} \cdot C_{ij}^{cl} \quad \forall i, j \in N: i \neq j; cl \in NRL; cc \in NRC \quad (4.19)$$

A restrição 7 em conjunto com restrição 8 são as principais deste modelo, pois ditam as regras de multiplexagem de cada um dos *muxponders*, de acordo com as regras estabelecidas na matriz Mux_{cc}^{cl} . A restrição 8 tem por fim garantir que a variável $W_{cij}^{cl,cc}$ que define o número de canais de cliente de *muxponder* agregados em canais de linha de *muxponder*, não exceda a capacidade de multiplexagem do mesmo definida por $\frac{1}{Mux_{cc}^{cl}}$.

Relativamente ao mesmo modelo foram alteradas as seguintes constantes, variáveis:

- B^{cl} : Valores de capacidade de transmissão para cada um dos tipos de interfaces de linha de *muxponders* na gama de NRL. Definido como [10, 40, 100] (Gbps);
- E_r^{cc} : Consumo médio da cada porta dos *routers* IP bidireccional, para cada uma das capacidades de transmissão cc na gama de NRC (W). Valores definidos com base na Tabela 11, nos parâmetros: Porto *Ethernet* 1Gbps/10Gbps/40Gbps;
- E_{mux}^{cl} : Consumo médio de cada *muxponder* por par de canais da interface de linha, para cada uma das capacidades de transmissão cl na gama de NRL (W). Valores definidos com base na Tabela 10, nos parâmetros *Transponder/Muxponder* 10Gbps/40Gbps/100Gbps;
- $C_{ij}^{cl} \in \mathbb{N}$: Número de canais entre interfaces de linha de *muxponders* capacidade B^{cl} na ligação virtual entre i e j ;
- $w_{ijmn}^{cl} \in \mathbb{N}$: Número de canais de comprimento de onda de capacidade B^{cl} entre i e j que atravessa a ligação física entre m e n ;
- $w_{mn}^{cl} \in \mathbb{N}$: Número de canais na ligação física entre m e n , de capacidade de B^{cl} ;

Foram alteradas igualmente as seguintes restrições, assim como a função objectivo:

- **Objectivo:** minimizar

$$\sum_{i \in N} (E_{pre} + E_{bst} + E_{wxc}) \quad (1)$$

$$+ \sum_{i \in N} \sum_{j \in N: i \neq j} \sum_{cl \in NRL} C_{ij}^{cl} \cdot (E_{mux}^{cl}) \quad (2)$$

$$+ \sum_{i \in N} \sum_{j \in N: i \neq j} \sum_{cc \in NRc} C_{ij}^{cc} \cdot (E_r^{cc}) \quad (3) \quad (4.20)$$

$$+ \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} (E_{pre} + E_{bst} + E_{wxc}) \cdot f_{mn} \quad (4)$$

$$+ \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} E_e \cdot A_{mn} \cdot f_{mn} \quad (5)$$

A função objectivo foi alterada no sentido de se considerar o cálculo do consumo dos *muxponders* e portos *Ethernet* dos *routers* de forma separada em função dos canais C_{ij}^{cl} e C_{ij}^{cc} respectivamente.

- **2ª restrição:**

$$\sum_{s \in N} \sum_{d \in N: s \neq d} \lambda_{ij}^{sd} \leq \sum_{c \in N} C_{ij}^{cc} \cdot B_c^{cc} \quad \forall i, j \in N: i \neq j \quad (4.21)$$

A alteração na restrição 2, consistiu em passar a considerar os canais C_{ij}^{cc} e capacidade associada B_c^{cc} , de forma suportar o tráfego definido na matriz de tráfego.

- **3ª restrição:**

$$\sum_{n \in N: i \neq j} w_{ijmn}^{cl} - \sum_{n \in N: i \neq j} w_{ijnm}^{cl} = \begin{cases} C_{ij}^{cl} & m = i \\ -C_{ij}^{cl} & m = j \\ 0 & \text{outros} \end{cases} \quad \forall i, j, m \in N: i \neq j; cl \quad (4.22)$$

$\in NRL$

A restrição 3 requereu alterações no sentido de se verificar a conservação de forma separada para cada um dos tipos de canais C_{ij}^{cl} .

- **4ª restrição:**

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N: i \neq j} \sum_{cl \in NRL} w_{ijnm}^{cl} \leq W \cdot f_{mn} \quad \forall m, n \in N: m \neq n \quad (4.23)$$

-

- 5ª restrição:

$$W_{mn}^{cl} = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N: i \neq j} w_{ijmn}^{cl} \quad \forall m, n \in N: m \neq n; cl \in NRI \quad (4.24)$$

As restrições 4 e 5 sofreram alterações no sentido de se considerar canais w_{ijnm}^{cl} e w_{nm}^{cl} em vez de w_{nm}^{ij} e w_{nm} respectivamente.

A Figura 4.32 resultou da simulação do modelo 10, onde o consumo associado a 10Gbps/40Gbps/100Gbps Mux indica o peso no consumo que cada um dos tipos de *muxponders* tem na rede. É de destacar o facto de inicialmente começar por usar-se fundamentalmente *muxponders* de 10Gbps e em 2017 estes são usados em muita pouca quantidade predominando fundamentalmente *muxponders* de 40Gbps e 100Gbps levando a usar interfaces de routers IP de 10Gbps e 40Gbps respectivamente, de acordo com as a regras de multiplexagem.

Pode-se obter uma estimativa de quantidade de canais agregados para cada um dos tipos de *muxponders* pela relação entre consumos de 1Gbps IP e 10Gbps Mux, 10Gbps IP e 40Gbps Mux e 40Gbps IP e 100Gbps Mux. Com base neste resultados verifica-se de uma forma mais destacada nos primeiros anos que os *muxponders* de 10Gbps agregam um número inferior de interfaces de 1Gbps face aos anos seguintes que leva a que não contribua para o aumento da eficiência energética especialmente nestes primeiros anos.

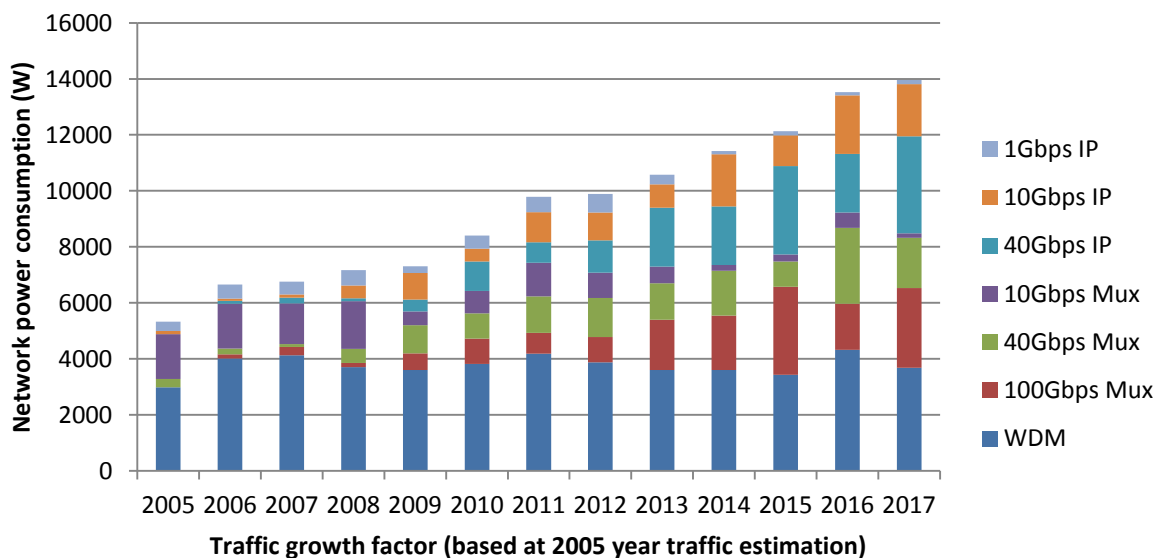


Figura 4.32 - Consumo energético total da rede por camada WDM e OTN e capacidade transmissão com *muxponders*

4.5 Resultados comparativos entre modelos

Os resultados dos capítulos anteriores apesar de permitirem obter alguns resultados interessantes, não foi dado destaque à comparação de resultados entre os diversos modelos, sendo assim este é o objectivo desta secção 4.5.

Numa primeira fase é apresentado o gráfico da Figura 4.33, onde são comparados modelos com critério de encaminhamento pelo caminho mais curto com e sem *bypass* óptico para as arquitecturas IPoWDM e IPoOTNoWDM, SLR com canais de 10Gbps. Como seria de esperar, o uso do *bypass* óptico possibilita uma maior poupança no consumo energético face ao caso em que não é considerado, assim como a vantagem no uso da arquitectura IPoWDM, na grande maior parte dos anos e para ambas as técnicas consegue-se uma redução de consumo na ordem dos 50%. De referir que a arquitectura IPoOTNoWDM, apesar de um consumo global mais elevado, possibilita uma poupança mais significativa pelo uso de *bypass* óptico.

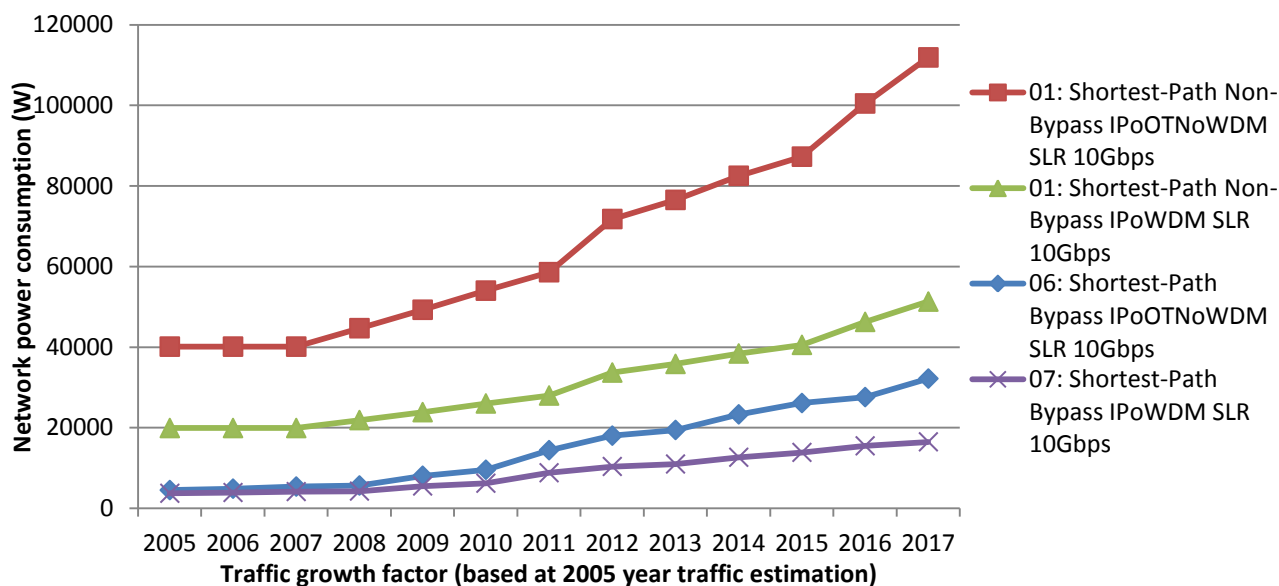


Figura 4.33 - Consumo energético total da rede com e sem *bypass*, para IPoWDM e IPoOTNoWDM

Na Figura 4.34 são apresentados os resultados de consumo total dos modelos 2 a 10 (com *bypass*) com canais de 10Gbps nas redes SLR. A Figura 4.35 para redes SLR de 40Gbps e a Figura 4.36 para redes SLR de 100Gbps. É de notar que o modelo 6 com encaminhamento pelo caminho mais curto em redes de 10Gbps apresenta um consumo muito superior face aos restantes modelos e tende a aproximar-se dos valores dos restantes modelos à medida que

aumenta a capacidade dos canais para 40Gbps e 100Gbps, pois a eficiência energética dos *transponders* e portos de *routers* tende a aumentar com a capacidade de transmissão.

Outro aspecto a destacar é a baixa eficiência que existe no uso do modelo 10, agregação de canais com *muxponder*, uns dos motivos para tal terá a ver pelo não aproveitamento de todos os portos de clientes dos *muxponders* considerando-se o mesmo consumo no muxponder independentemente do número de canais de cliente configurados, da mesma forma que para todos os três tipos de *muxponders* para se aproveitar a capacidade ao máximo usando o máximo de portos de cliente, obtém-se um consumo superior face ao uso de *transponders* com a mesma capacidade de transmissão na interface de linha. Contudo esta solução pode em alguns casos possibilitar a minimização do consumo nos *routers* IP não necessitando de implementar *routers* de alta capacidade de processamento que realizem a agregação e encaminhamento de interfaces de capacidade menor para interfaces de maior capacidade, pois o próprio modelo de optimização passa a considerar a função de agregação, embora estática.

No global a solução mais vantajosa de todos os modelos, corresponde ao uso do modelo 4 MLR com arquitectura IPoWDM.

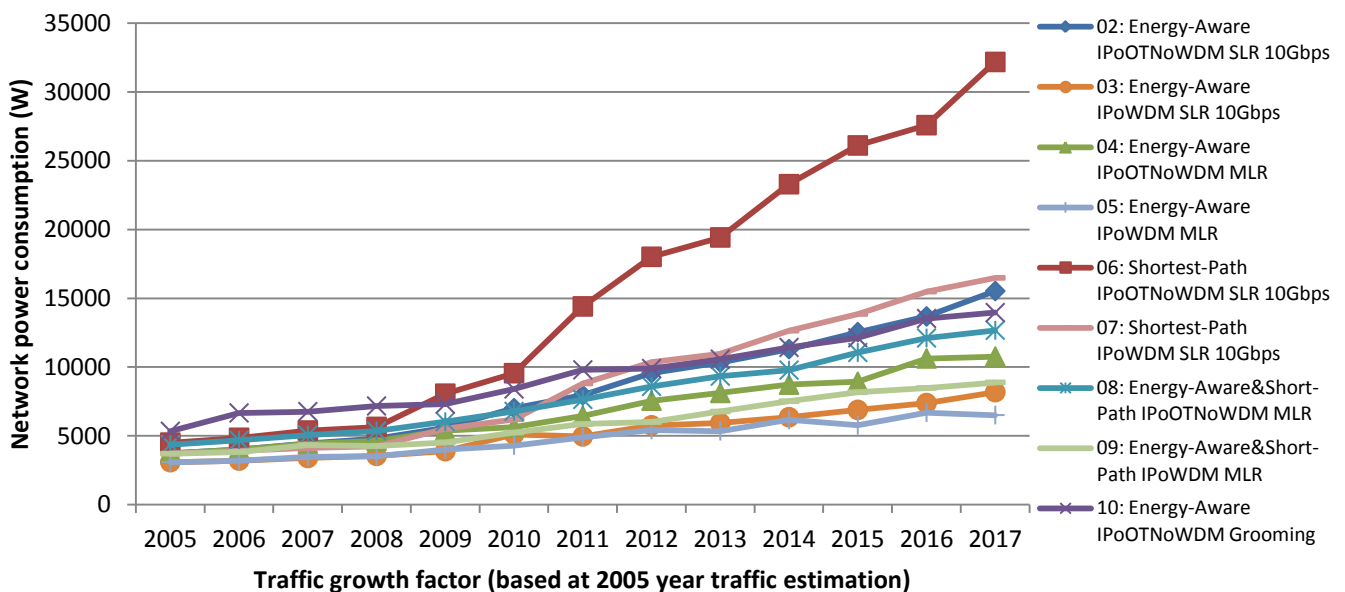


Figura 4.34 – Comparação de consumo total da rede para modelos 2 a 10, modelos de SLR com 10 Gbps

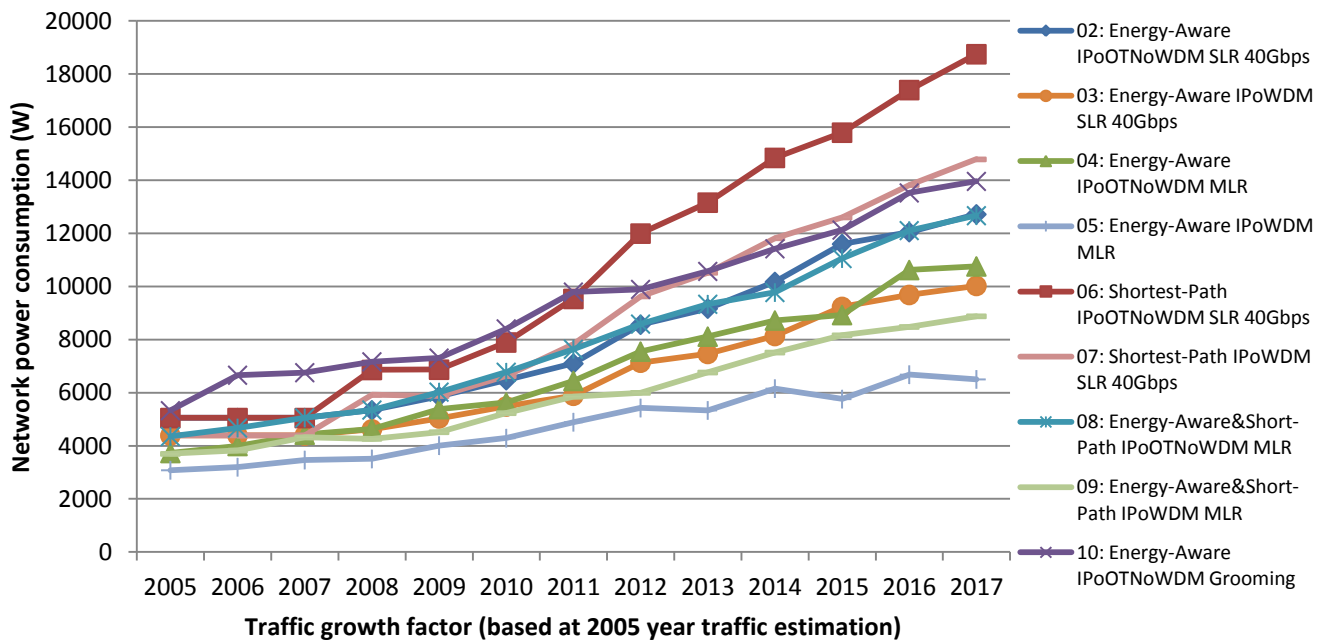


Figura 4.35 - Comparação de consumo total da rede para modelos 2 a 10, modelos de SLR com 40 Gbps

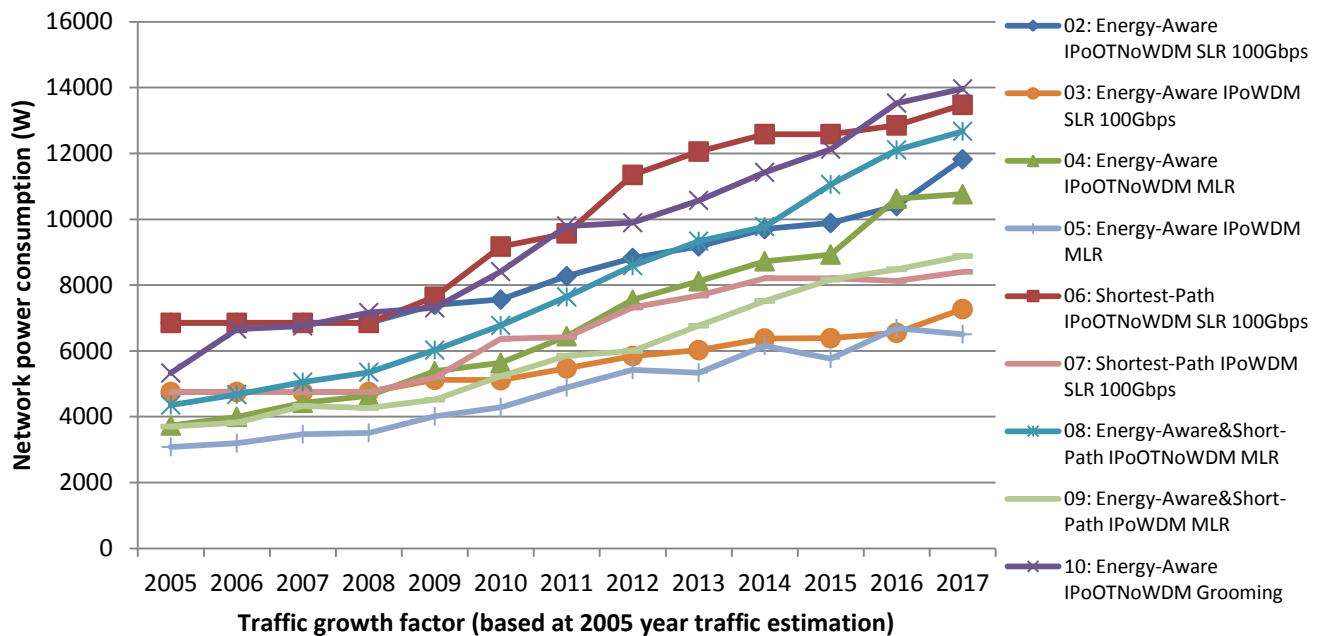


Figura 4.36 - Comparação de consumo total da rede para modelos 2 a 10, modelos de SLR com 100 Gbps

Capítulo 5: Conclusões

5.1 Conclusões

O aumento dos requisitos de tráfego em redes de telecomunicações, em muito devido ao crescimento de serviços de vídeo por IP e serviços em nuvem, tem uma implicação directa no crescimento das infraestruturas de redes, e conseqüentemente o aumento no consumo energético das mesmas. Considerando o uso combustíveis fósseis responsáveis pela emissão de CO₂ no processo de produção de energia eléctrica, as redes de telecomunicações passam assim a ter cada vez mais um papel mais predominante na emissão de CO₂.

A convergência dos serviços de telecomunicações para tecnologias de transmissão baseada em comutação de pacotes, como é o caso do protocolo de internet, leva a que se torne cada vez mais importante aumentar a eficiência dos equipamentos usados nas redes de transmissão IP. Para além da eficiência dos próprios equipamentos, existem ainda outras possibilidades para a redução do consumo total da rede, nomeadamente o uso de arquitecturas de redes com métodos de encaminhamento mais eficiente do ponto de vista energético, que cumprindo os requisitos de tráfego, consigam minimizar o consumo global da rede de transporte IP. Foi com base neste tópico que se desenvolveu o estudo no âmbito desta dissertação, mais especificamente em redes de transporte IP sobre WDM.

Neste trabalho começou-se por efectuar um enquadramento do problema no capítulo 1, e no capítulo 2 foi dado ênfase ao estado da arte actual no que respeita a estudos científicos elaborados e a normas e recomendações. No capítulo 3 foi apresentada a tecnologia em que se baseia a rede de transporte IP, ao nível das várias camadas a considerar, nomeadamente WDM, OTN e IP.

É no capítulo 4 que é apresentada a topologia de rede de 12 nós que se baseou na rede de um operador Português, os requisitos de tráfego entre os anos de 2005 a 2017, assim como os vários modelos de rede considerados, respectivos modelos MILP e resultados. Foram elaborados dois modelos (1) de rede onde não era considerado o *bypass* óptico e o encaminhamento era feito pelo caminho mais curto com canais de uma única capacidade de transmissão, um para rede IPoOTNoWDM e outro IPoWDM. Foram considerados outros dois modelos (2 e 3) para IPoOTNoWDM e IPoWDM respectivamente onde já era efectuado o *bypass* óptico e tinha o critério de encaminhamento a redução de consumo energético, com canais de uma única capacidade de transmissão, no caso específico com 10Gbps obteve-se uma redução de consumo de uma ordem de grandeza face ao modelo 1. Os modelos 4 e 5 acrescentaram aos modelos 2 e 3 respectivamente a possibilidade de se considerar na rede canais de variadas capacidades de transmissão (10Gbps, 40Gbps e 100Gbps), sendo o critério de atribuição de canais pelo próprio modelo de optimização. Os modelos 6 e 7 são também baseados nos modelos 2 e 3 respectivamente, mas em que o critério de encaminhamento passou a ser segundo o caminho mais curto, este tem especial interesse na comparação com o modelo 1 onde se verificou um grande ganho no consumo pelo uso da técnica de *bypass*. Foram implementados os modelos 8 e 9 (IPoOTNoWDM e IPoWDM) baseados nos modelos 4 e 5 respectivamente, mas onde o critério de encaminhamento passou a ser um compromisso entre o caminho mais curto e o menor custo. O último modelo implementado (10) com base apenas na arquitectura IPoOTNoWDM passou a considerar na camada OTN *muxponders* em vez de *transponders*, adicionando a funcionalidade de agregação na camada OTN, ainda que sem a funcionalidade de encaminhamento OTN, este modelo revelou-se pouco eficiente do ponto de vista energético na medida em que em muitos casos existe um sub-aproveitamento dos recursos do *muxponder*.

É de notar que o modelo 6 com encaminhamento pelo caminho mais curto em redes de 10Gbps apresenta um consumo muito superior face a todos os restantes modelos.

No global a solução mais vantajosa de todos os modelos, corresponde ao uso do modelo 4 do tipo MLR com arquitectura IPoWDM, assim como esta tem a vantagem de poder basear-se

numa topologia existente de um operador e adicionar novos serviços sem afectar os existentes de uma forma que diminua o impacto energético da implementação dos mesmos.

5.2 Trabalho futuro

Ao longo deste trabalho foram encontrados alguns obstáculos que limitaram de certa forma os resultados obtidos, o mais relevante deve-se à elevada complexidade de alguns dos modelos como foi o caso dos modelos 4, 5, 8, 9 e 10 pela sua maior gama de variáveis e consequentemente maior o número de possibilidades de encaminhamento, levando a elevados tempos de simulação, que na maior parte dos casos ultrapassava uma semana de simulação. Esta última limitação levou a que os resultados obtidos nestes modelos pudessem não ser os resultados óptimos por não ter aguardado pelo resultado final das simulações. Esta foi também a razão para não se considerar redes de maior dimensão a nível de nós e possibilidades ligações entre nós. Por forma a se poder evoluir neste tema usando redes de maior dimensão e arquitecturas de rede mais complexas, e até mesmo obter os resultados óptimos para os modelos onde não foi possível no âmbito deste trabalho, a abordagem a seguir poderá passar por implementar algoritmos heurísticos que permitem reduzir o tempo de simulação sem comprometer significativamente os resultados, tal como foi apresentado em [20] especialmente para redes grandes.

O encaminhamento tradicional pelo caminho mais curto, permite diminuir o atraso na transmissão entre origem e destino, no entanto os modelos de optimização 2, 3, 4, 5 e 10 implementados neste trabalho, têm como critério de encaminhamento, apenas o menor consumo energético, sendo também os que contribuem mais para o objectivo deste trabalho. Contudo não é garantido qualquer critério a nível de qualidade de serviço, podendo ser pertinente o estudo neste âmbito para analisar até ponto o encaminhamento adoptado possa ter impacto, principalmente em serviços mais exigentes a nível de atraso como é o caso de serviços em tempo real como VoIP, comunicações móveis, teleconferência e videoconferência.

Bibliografia

- [1] R. Ramaswami, K. N. Sivarajan e G. H. Sasaki, *Optical Networks, a practical perspective*, 3^a ed., USA: Elsevier, 2010.
- [2] U.S. Energy Information Administration, “International Energy Outlook 2011,” Setembro 2011. [Online]. Available: <http://www.eia.gov/forecasts/ieo/>.
- [3] U. C. A. Network, “Who's On Board With The Copenhagen Accord?,” 4 Março 2013. [Online]. Available: <http://www.usclimatenetwork.org/policy/copenhagen-accord-commitments>.
- [4] M. Gupta e S. Singh, *Greening of the Internet*, Portland: Portland State University, 2003.
- [5] Cisco and/or its affiliates, *Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2011–2016*, 2012.
- [6] DE-CIX, “Traffic Statistics,” Maio 2013. [Online]. Available: <http://www.de-cix.net/about/statistics/>. [Acedido em 02 Maio 2013].
- [7] J. Pedro, A. Teixeira, P. Monteiro e J. Pires, *On a Portuguese Backbone Network of Reference*, SEON 2005, 2005.
- [8] M. T. P. C. B. M. Yi Zhang, *Time-aware Energy Conservation in IP-over-WDM Networks*, OSA, 2010.

- [9] M. M. F. N. Luca Chiaraviglio, *Energy-Aware Networks: Reducing Power Consumption By Switching Off Network Elements*, IEEE, 2008.
- [10] H. Weigang, G. Lui e G. Xiaoxue, *Survivable power efficiency oriented integrated grooming in green networks*, Elsevier, 2011.
- [11] H. Weigang, G. Lei, G. Xiaoxue e L. Yejun, *Dynamic hybrid grooming based on power efficiency in green IP over WDM networks*, Journal Photonic Network Communications, 2012.
- [12] W. Hou, L. Guo e X. Gong, *Survivable power efficiency oriented integrated grooming in green networks*, China, 2012.
- [13] H. Weigang, G. Lei, G. Xiaoxue e S. Zhimin, *Multi-domain integrated grooming algorithm for green IP over WDM network*, China: Elsevier, 2013.
- [14] C. Lange e A. Gladisch, *Energy Efficiency Limits of Load Adaptive Networks*, Berlim, Alemanha: OSA / OFC/NFOEC, 2010.
- [15] P. Chowdhury, M. Tornatore e B. Mukherjee, *On the Energy Efficiency of Mixed-Line-Rate Networks*, California: OSA / OFC/NFOEC, 2010.
- [16] P. Vesarach e P. Saengudomlert, *Benefits of Optical Bypass in WDM Networks with Hybrid Optical-and-Electronic Switching Node Architecture*, Thailand, 2009.
- [17] G. Shen e R. S. Tucker, *Energy-Minimized Design for IP Over WDM Networks*, Optical Society of America, 2009.
- [18] J. Scharf, *Efficiency Analysis of Distributed Dynamic Optical Bypassing Heuristics*, University of Stuttgart, Pfaffenwaldring 47, Germany: IEEE ICC'12 Workshop on Green Communications and Networking, 2012.
- [19] I. Tsirilakis, C. Mas e I. Tomkos, *Cost Comparison of IP/WDM vs. IP/OTN for European Backbone Networks*, Peania, Greece : ICTON 2005, 2005.
- [20] I. Katib e D. Medhi, *IP/MPLS-over-OTN-over-DWDM Multilayer Networks: An Integrated Three-Layer Capacity Optimization Model, a Heuristic, and a Study*, IEEE, 2012.
- [21] T. O. A. K. A. H. T. K. T. K. M. S. S. A. *. T. M. T. O. I. S. M. Mitsunori Fukutoku, *Optimized Multi-Layer Optical Network using In-Service ODU / Wavelength Path Re-grooming*, Japão:

- OSA/OFC/NFOEC 2011, 2011.
- [22] M. Caria, M. Chamania e A. Jukan, *Trading IP Routing Stability for Energy Efficiency: A Case for Traffic Offloading with Optical Bypass*, Germany, 2011.
- [23] P. C. M. T. B. M. Yi Zhang, *ergy Efficiency in Telecom Optical Networks*, IEEE, 2010.
- [24] B. S. Arnaud, *CANARIE: Research networks to help reduce global*, OFC/NFOEC'09, Workshop on Energy Footprint of ICT: Forecast and Network Solutions, San Diego, CA, Mar. 2009., 2009.
- [25] International Telecommunication Union, *Best practices for green data centres, Recommendation ITU-T L.1300*, ITU, 2011.
- [26] International Telecommunication Union, *Overview and general principles of methodologies for assessing the environmental impact of information and communication technologies, Recommendation ITU-T L.1400*, ITU, 2011.
- [27] IEEE Standards Association, standards insight, “IEEE 802.3az Wins Best Electronic Design Award,” IEEE, Maio 2011. [Online]. Available: http://standardsinsight.com/ieee_news/ieee-802-3az-wins-best-electronic-design-award. [Acedido em Março 2013].
- [28] ETSI, World Class Standards , “Energy Efficiency,” [Online]. Available: <http://www.etsi.org/images/files/ETSITechnologyLeaflets/EnergyEfficiency.pdf>. [Acedido em 24 Março 2013].
- [29] Comissão europeia, *Standardisation mandate addressed to CEN, CENELEC and ETSI in the field of ICT to enable efficient energy use in fixed and mobile information and communication networks*, Bruxelas, 2010.
- [30] ETSI Standard, *Environmental Engineering (EE); Measurement Methods for Power Consumption in Transport Telecommunication Networks Equipment*, França: ETSI, 2012.
- [31] ATIS, “ATIS - About,” [Online]. Available: <http://www.atis.org/about/index.asp>. [Acedido em Março 2013].
- [32] ATIS, “Sustainability in Telecom: Energy and Protection Committee (STEP),” [Online]. Available: <http://www.atis.org/step/>. [Acedido em 25 Março 2013].

- [33] Telecommunications Industry Association (TIA), “Policy, Energy & Environment,” [Online]. Available: <http://www.tiaonline.org/policy/energy-environment>. [Acedido em 25 Março 2013].
- [34] Telecommunications Industry Association (TIA), *Smart Grid Policy Roadmap: Consumer Focused and Technology Driven*, 2011.
- [35] U. D. o. Commerce, “Earth System Research Laboratory,” U.S. Department of Commerce | National Oceanic and Atmospheric Administration , 19 09 2013. [Online]. Available: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/spectrum.gif>.
- [36] ITU-T, *G.709/Y.1331: Interfaces for the Optical Transport Network*, ITU, 03/2003.
- [37] ITU-T, *G.872: Architecture of optical transport networks*, 10/2012.
- [38] T. P. Walker, *Optical Transport Network (OTN) Tutorial*, ITU.
- [39] M. Levy, “Six Benefits Of IPv6,” Network Computing, 08 06 2011. [Online]. Available: <http://www.networkcomputing.com/ipv6/six-benefits-of-ipv6/230500009>. [Acedido em 01 09 2013].
- [40] J. F. Kurose e K. W. Koss, Computer Networking, 6ª ed., USA: Pearson, 6th edition, 2012.
- [41] L. Vogel, “Dijkstra's shortest path algorithm in Java,” 2 November 2009. [Online]. Available: <http://www.vogella.com/articles/JavaAlgorithmsDijkstra/article.html>. [Acedido em 26 September 2013].
- [42] Cisco Systems, *Cisco Visual Networking Index - Forecast and Methodology, 2007-2012*, Cisco, 2008.
- [43] Cisco and/or its affiliates, *Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2012-2017*, Cisco, 2013.
- [44] W. V. Heddeghem, F. Idzikowski, W. Vereecken, D. Colle, M. Pickavet e P. Demeester, *Power consumption modeling in optical multilayer networks*, Springer, 2011.
- [45] Cisco Systems, Inc, *Optical Amplifier Cards for the Cisco ONS 15454 Multiservice Transport Platform*, USA: Cisco Systems, Inc, 2007.
- [46] Cisco Systems Inc, *80-Channel Wavelength Cross-Connect Card for for the Cisco ONS 15454 Multiservice Transport Platform*, 2013.

- [47] Cisco Systems, Inc, *Datasheet: Cisco CRS 4-Port 10GE Tunable WDMPHY Interface Module*, 2010.
- [48] Cisco Systems, Inc, *Datasheet: Cisco CRS 1-Port OC-768C/STM-256C DPSK+ Tunable WDMPOS*, 2010.
- [49] Cisco Systems, Inc, *Datasheet: Cisco CRS 1-Port 100 Gigabit Ethernet Coherent*, 2012.
- [50] PrimeEnergyIT, 2012.
- [51] (Various), “Powerlib,” [Online]. Available: <http://powerlib.intec.ugent.be/database/>. [Acedido em 1 September 2013].
- [52] A. Al-Shaeya, “ICS343 (KFUPM),” 20 December 2013. [Online]. Available: <http://343networks.wordpress.com/page/2/>.