



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
SERVIÇO DE DOCUMENTAÇÃO E PUBLICAÇÕES

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

**Área Departamental de Engenharia de Electrónica e
Telecomunicações e de Computadores**

Análise comparativa entre o custo de implementação e o custo operacional numa rede core óptica

RUBEN ANICETO

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

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

Orientadores:

**Prof. Doutor Pedro Renato Tavares Pinho
Engenheiro Miguel Henriques (Coriant)**

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Mário Véstias

Vogais:

**Prof. Doutor António Teixeira
Prof. Doutor Pedro Renato Tavares Pinho**

Dezembro de 2017

Agradecimentos

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

A todos professores que me ensinaram e incentivaram a aprender ao longo dos anos, e em especial aos meus orientadores o Prof. Doutor Pedro Pinho, pela excelente orientação que me deu de forma a concluir esta dissertação com sucesso, por toda a disponibilidade e ajuda, nomeadamente na sugestão do melhor caminho a seguir e no esclarecimento de dúvidas.

Ao Eng. Miguel Henriques pela forma voluntária como se disponibilizou para me ajudar na realização desta dissertação, por todo apoio que me foi dando, fundamental no início da implementação dos modelos e no esclarecimento de dúvidas.

Ao Instituto de Telecomunicações de Aveiro e ao Eng. Nuno Silva por me ter disponibilizado um servidor para realizar simulações de elevada complexidade, o que permitiu reduzir o tempo total das simulações.

Por fim, um agradecimento muito especial aos meus pais que sempre me apoiaram em todas as etapas da minha vida, por todo o apoio incondicional que me deram, por sempre me incentivarem a nunca desistir das dificuldades e por terem sempre acreditado em mim.

A todos, um muito obrigado!

Resumo

Cada vez mais os operadores olham para os custos/consumos que as redes core actuais têm, sendo que este assunto tem sido recorrente em investigações académicas nos últimos anos. Actualmente os serviços de rede utilizam uma elevada largura de banda colocando o ónus nos operadores de rede de modo a fazerem uso dos recursos de rede de forma eficiente. Os grupos de standardização estão a fazer um progresso significativo ao tentar passar dos canais ópticos disponíveis, com velocidades de 10, 40 e 100 Gbps, até aos esperados 400 Gbps e ou até 1 Tbps nas redes core.

Recorrendo à plataforma de simulação *IMB ILOG CPLEX* (software que simula modelos matemáticos), este trabalho permitirá efectuar o estudo comparativo entre os diferentes modelos de optimização de custo de implementação e custo operacional para redes core IP (*Internet Protocol*) sobre WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), com foco em técnicas de encaminhamento eficientes, tal como o *bypass* óptico. Tendo por base as topologias *fixed-grid* e *flex-grid*, as tecnologias em questão possibilitarão a utilização de canais com diferentes velocidades de transmissão da mesma fibra óptica (MLR). De modo a poder-se simular uma abordagem realista, utilizou-se uma rede Alemã fazendo uso da matriz de tráfego IP e da sua previsão de crescimento de tráfego anual (CAGR), segundo o VNI da Cisco, com base em informação estatística.

Comparando os diferentes modelos, conclui-se que tanto o custo de implementação como para o operacional nas redes *flex-grid*, estes são menores nas tradicionais redes *fix-grid*. Verificou-se que o custo de implementação reduziu 17.0% enquanto que o custo operacional reduziu 175.8%, face às redes *fix-grid*.

As redes *flex-grid* permitem assim, o transporte de volumes de tráfego mais elevados de forma mais eficiente devido à sua maior capacidade, eficiência energética e espectral dos canais de transmissão associados a este tipo de redes.

Palavra-chave: *Flex-grid*, *fixed-grid*, IP, WDM, custo de implementação, custo operacional, espectro.

Abstract

More and more operators look at the costs / consumptions that current core networks have, and this subject has been recurrent in academic research in recent years. Currently network services use a high bandwidth by placing the burden on network operators to make efficient use of network resources. Standardization groups are making significant progress in moving from the available optical channels, with speeds of 10, 40 and 100 Gbps, up to the expected 400 Gbps and up to 1 Tbps in the core networks.

Using the IMB ILOG CPLEX simulation platform, this work will allow the comparative study of the different implementation cost optimization and operational cost models for Wavelength Division Multiplexing (WDM) Internet core networks. efficient routing techniques, such as optical bypass. Based on the fixed-grid and flex-grid topologies, the models in question will allow the use of channels with different transmission speeds of the same optical fiber (MLR). In order to simulate a realistic approach, a German network using the IP traffic matrix and its annual traffic growth forecast (CAGR), according to Cisco's VNI, was used based on statistical information.

Comparing the different models, it is concluded that both the implementation cost and the operational cost in the flex-grid networks is lower than in the traditional fix-grid networks. The cost of implementation was reduced to 17.0% while the operational cost reduced 175.8% compared to the fixed grid networks.

Flex-grid networks thus allow the transport of higher traffic volumes more efficiently due to their greater capacity, energy efficiency and spectral transmission channels associated with this type of networks.

Key words: Flex-grid, fixed-grid, IP, WDM, implementation cost, functional cost, spectrum.

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Índice de Figuras.....	xiii
Capítulo 1: Introdução	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Motivação.....	4
1.3. Objectivos.....	4
1.4. Organização da Dissertação	5
1.5. Contributos originais introduzidos.....	5
Capítulo 2: Estado da Arte - Redes Ópticas	7
2.1. Componentes de uma rede óptica.....	8
2.1.1. Terminal óptico de linha (OLT)	9
2.1.2. Amplificadores ópticos	9
2.1.3. Comutadores de cruzamento ópticos (OXC)	11
2.1.4. OADM (Optical Add and Drop Multiplexer)	12
2.2. Tecnologia Flex-Grid.....	13
2.2.1. Alocação do espectro em Flex-grid	14
2.2.2. RWA (Routing and Wavelength Assignment)	15
2.2.3. Superchannel.....	16
2.2.4. Estado de Fragmentação	17
2.3. Modulação.....	18
2.4. Camada de Internet do modelo TCP/IP.....	19
2.4.1. Router IP	21
2.4.2. Encaminhamento IP.....	23
2.4.3. Encaminhamento na rede global de internet.....	24
2.4.4. Encaminhamento intra-domínio	25
2.4.5. Encaminhamento inter-domínio	27
2.5. IP sobre WDM – Arquitectura de Multicamadas	27
2.6. Organizações e associações de standartização.....	30
2.6.1. ITU-T	30
2.6.2. IEEE	31
2.6.3. ETSI	31
2.6.4. ATIS.....	32

2.6.5. TIA.....	32
Capítulo 3: Modelos de redução de custo de implementação e custo operacional	33
3.1. Descrição do modelo de otimização do custo de implementação MILP	34
3.1.1. Pré-processamento de parâmetros.....	36
3.1.2. Objectivo e restrições do modelo	36
3.2. Descrição do modelo de otimização do custo operacional MILP	38
3.2.1. Pré-processamento de parâmetros.....	39
3.2.2. Objectivo e restrições do modelo	39
3.3. Modelos de Otimização	40
3.3.1. Modelo custo de implementação: Fixed-grid - menor custo de implementação	41
3.3.2 Modelo custo de implementação: Fixed-grid - menor custo de implementação e caminho mais curto	41
3.3.3 Modelo custo de implementação: Flex-grid - menor custo de implementação	42
3.3.4 Modelo custo de implementação: Flex-grid - menor custo de implementação e caminho mais curto	45
3.3.5 Modelo custo operacional: Fixed-grid - menor custo operacional	46
3.3.6 Modelo custo operacional: Fixed-grid - menor custo operacional e caminho mais curto	46
3.3.7 Modelo custo operacional: Flex-grid - menor custo operacional	47
3.3.8 Modelo custo operacional: Flex-grid - menor custo operacional e caminho mais curto	48
3.4. Cenário de Otimização – Topologia da rede	49
3.4.1. Requisitos de Tráfego	50
3.4.2. Custo dos equipamentos de rede.....	52
3.4.3. Consumo energético dos equipamentos de rede	54
Capítulo 4: Resultados de Simulação	57
4.1. Custo de implementação em redes Fixed-grid	58
4.1.1. Modelo Fixed-Grid - Menor Custo de Implementação	58
4.1.2. Modelo Fixed-grid – Menor custo de implementação e caminho mais curto	59
4.1.3. Custo de implementação em redes Flex-grid.....	59
4.1.4 Modelo Flex-grid com modulação DP-QPSK – Menor custo de implementação.....	60
4.1.5. Modelo Flex-grid com modulação 16-QAM – Menor custo de implementação.....	60
4.1.6. Modelo Flex-grid com modulação DP-QPSK – Menor custo de implementação e caminho mais curto	61
4.1.7 Modelo Flex-grid com modulação 16-QAM – Menor custo de implementação e caminho mais curto	62
4.2. Custo operacional em redes Fixed-grid.....	63

4.2.1. Modelo Fixed-grid – Menor custo operacional	63
4.2.2. Modelo Fixed-grid – Menor custo operacional e caminho mais curto	64
4.2.3 Resultados Modelos Flex-grid	65
4.2.4. Modelo Flex-grid com modulação DP-QPSK – Menor custo operacional	65
4.2.5. Modelo Flex-grid com modulação 16-QAM – Menor custo operacional.....	66
4.2.6. Modelo Flex-grid com modulação DP-QPSK – Menor custo operacional e caminho mais curto	66
4.2.7. Modelo Flex-grid com modulação 16-QAM – Menor custo operacional e caminho mais curto	67
4.3. Resultados Comparativos entre modelos	68
4.3.1 Custo total de implementação e custo operacional.....	68
4.4. Tempo de simulação	76
Capítulo 5: Conclusões	77
5.1. Trabalho futuro	79
Referências	81

Índice de Figuras

Figura 1 - Previsão de crescimento de tráfego IP Global, Cisco VNI [1]	1
Figura 2 - Cisco VNI crescimento tráfego global [2]	2
Figura 3 - Previsão do consumo de energia de 1970 até 2052, incluindo os tipos de combustíveis utilizados [5]	3
Figura 4 - Consumo global de energia e da infra-estrutura de telecomunicações desde 2007 até uma previsão de 2020 [5]	3
Figura 5 - Elementos de uma rede óptica [11]	8
Figura 6 - Diagrama de blocos de um OLT [10]	9
Figura 7 - Amplificador óptico EDFA com fibra dopada com érbio	10
Figura 8 - Amplificador óptico de Raman	11
Figura 9 - OXCs com comutação óptica e eléctrica [8]	12
Figura 10 - Multiplexer óptico de adicionar e remover comprimentos de onda (OADM) [8]	13
Figura 11 - Comparação de alocação de tráfego nas tradicionais redes WDM baseadas na tecnologia fixed-grid com base nos canais de largura de banda fixa e banda flexível [22]l.	15
Figura 12 - Fragmentação do espectro num link. A desfragmentação é realizada usando o realocação do espectro [26]	18
Figura 13 - Modelo OSI e TCP [19]	19
Figura 14 - Modelo em camadas do protocolo IP [19]	20
Figura 15 - Cabeçalho de um pacote IPV4 e IPV6 [19]	21
Figura 16 - Funcionalidades do router [19]	22
Figura 17 - Arquitectura genérica do router IP [6]	23
Figura 18 - Modelo hierárquico simplista da rede de Internet	25
Figura 19 - Transmissão em WDM com capacidade para 160 canais [33]	28
Figura 20 - Possibilidades de arquitecturas de multicamadas para mapeamento IP sobre WDM [19].	29
Figura 21 - Constituição do ROADM directionless [6]	30
Figura 22 - Modelo de Optimização do custo de implementação e operacional	41
Figura 23 - Topologia da rede da Alemanha com 17 nós de rede [52].	49
Figura 24 - Previsão do Crescimento de Tráfego IP com base nos dados VNI [1, 2]	57
Figura 25 - Custo de implementação do modelo fixed-grid, considerando o menor custo de implementação	58
Figura 26 - Custo de implementação do modelo fixed-grid, considerando o menor custo de implementação e caminho mais curto	59
Figura 27 - Custo de implementação do modelo flex-grid com modulação DP-QPSK, considerando o menor custo de implementação	60
Figura 28 - Custo de implementação do modelo flex-grid com modulação 16-QAM, considerando o menor custo de implementação	61
Figura 29 - Custo de implementação do modelo flex-grid com modulação DP-QPSK, considerando o menor custo de implementação e caminho mais curto	62
Figura 30 -- Custo de implementação do modelo flex-grid com modulação 16-QAM, considerando o menor custo de implementação e caminho mais curto	63
Figura 31 - Custo operacional do modelo fixed-grid, considerando o menor custo operacional	64
Figura 32 - Custo operacional do modelo fixed-grid, considerando o menor custo operacional e caminho mais curto	64

Figura 33 - Custo operacional do modelo flex-grid com modulação DP-QPSK, considerando o menor custo operacional	65
Figura 34 - Custo operacional do modelo flex-grid com modulação 16-QAM, considerando o menor custo operacional	66
Figura 35 - Custo operacional do modelo flex-grid com modulação DP-QPSK, considerando o menor custo operacional e caminho mais curto.....	67
Figura 36 - Custo operacional do modelo flex-grid com modulação 16-QAM, considerando o menor custo operacional e caminho mais curto.....	68
Figura 37 - Custo total de implementação da rede MLR IP sobre WDM fixed-grid e flex-grid com modulação DP-QPSK	69
Figura 38 - Custo total operacional da rede MLR IP sobre WDM fixed-grid e flex-grid com modulação DP-QPSK	70
Figura 39 - Custo total de implementação da rede IP sobre WDM flex-grid com modulação DP-QPSK e 16-QAM.....	71
Figura 40 - Custo total operacional da rede IP sobre WDM flex-grid com modulação DP-QPSK e 16-QAM	72
Figura 41 - Aumento Percentual do custo de implementação em redes fixed-grid e flex-grid e volume de tráfego	73
Figura 42 - Aumento Percentual do custo operacional em redes fixed-grid e flex-grid e volume de tráfego	74
Figura 43 - Custo de implementação das redes fix-grid e flexi-grid com modulação DP-QPSK e 16-QAM	75
Figura 44 - Custo operacional das redes fix-grid e flexi-grid com modulação DP-QPSK e 16-QAM	76

Lista de tabelas

Tabela 1 - Principais diferenças entre um amplificador EDFA e um amplificador de Raman.....	11
Tabela 2 - Lista de interfaces com tecnologia LPI na norma 802.3az	31
Tabela 3 - Parâmetros de topologia da rede [51].	49
Tabela 4 - Distância entre os nós da rede [51].....	50
Tabela 5 - Parâmetros de Tráfego IP com base no ano de 2004 [51].	50
Tabela 6 - Matriz de Tráfego IP com base no ano de 2004 [51]	51
Tabela 7 - Previsão de crescimento de tráfego IP na Europa Ocidental, baseado em [19] e [1, 2]	52
Tabela 8 - Componentes da camada WDM [19].	53
Tabela 9 - Componentes do router IP - Interfaces Ethernet WDM.....	53
Tabela 10 - Largura de banda dos canais	54
Tabela 11 - Parâmetros de simulação	54
Tabela 12 - Componentes da camada WDM [19].	55
Tabela 13 - Componentes do router IP - Interfaces Ethernet WDM.....	55

Lista de acrónimos

Acrónimo	Designação
ADM	Add/Drop Multiplexer
ANSI	American National Standards Institute
AS	Autonomous System
ATIS	Alliance for Telecommunications Industry Solutions
BGP	Border Gateway Protocol
CAGR	Compound Annual Growth Rate
CD	Chromatic Dispersion
CEN	European Committee for Standardization
CENELEC	European Committee for Electrotechnical Standardization
CO ₂	Carbon Dioxide
CP-QPSK	Coherent Polarized - Quadrature Phase Shift Keying
CPM	Cross-Phase Modulation
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
DOCSIS	Data Over Cable Service Interface Specification
DSL	Digital Subscriber Line
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
EDFA	Erbium-Doped Fiber Amplifier
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FDM	Frequency Division Multiplexing
FWM	Four-Wave Mixing
GFP	Generic Framing Procedure
HDLC	High-level Data Link Control
ICT	Information and Communications Technology
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP	Internet Protocol
IPoWDM	Internet Protocol over Wavelength Division Multiplexing
IPoOTNoWDM	Internet Protocol over Optical Transport Network over Wavelength Division Multiplexing

IPTV	I nternet P rotocol T ele v ision
ISP	I nternet S ervice P rovider
ITU	I nternational T elecommunication U nion
ITU-T	I nternational T elecommunication U nion, T elecommunication Standardization Sector
EUI	E xtended U nique I dentifier
LAN	L ocal A rea N etwork
LC	L iquid C rystal
LPI	L ow P ower I dle
MAC	M edia A ccess C ontrol
MEMS	M icro- E lectro- M echanical S ystems
MILP	M ixed I nteger L inear P rogramming
MLO	M ulti L ayer O ptimization
MLR	M ixed L ine R ate
MOSPF	M ulticast O pen S hortest P ath F irst
MPLS	M ultiprotocol L abel S witching
NAT	N etwork A ddress T ranslation
OADM	O ptical A dd- D rop M ultiplexer
OECD	O rganisation for E conomic C o-operation and D evelopment
OLA	O ptical L ine A mplifier
OLT	O ptical L ine T ermination
OSPF	O pen S hortest P ath F irst
OTN	O ptical T ransport N etwork
OXC	O ptical C ross- C onnect
PDH	P lesiochronous D igital H ierarchy
PMD	P olarization D ivision M ultiplexing
PPP	P oint-to- P oint P rotocol
PSTN	P ublic- S witched T elephone N etwork
QoS	Q uality of S ervice
RIP	R outing I nformation P rotocol
ROADM	R econfigurable O ptical A dd- D rop M ultiplexer
SBS	S timulated B rillouin S cattering
SDH	S ynchronous D igital H ierarchy
SLR	S ingle L ine R ate

SONET	S ynchronous O ptical N etworking
SPM	S elf- P hase M odulation
SRS	S timulated R aman S catering
STEP	S ustainability in T elecom: E nergy and P rotection
TCP	T ransmission C ontrol P rotocol
TDM	T ime D ivision M ultiplexing
TIA	T elecommunications I ndustry A ssociation
UDP	U ser D atagram P rotocol
WAN	W ide A rea N etwork
WDM	W avelength D ivision M ultiplexing
WSON	W avelength S witched O ptical N etworks
WSS	W avelength S elective S witch
WXC	W avelength C ross C onnect

Capítulo 1: Introdução

Nos últimos anos, devido ao aumento de tráfego IP, os operadores de telecomunicações começaram a investir em redes de fibra óptica. As redes de fibra óptica permitem uma enorme capacidade de transmissão, uma enorme largura de banda disponível podendo ser flexíveis, tal como é o caso da tecnologia SDN (*Software-Defined Networking*). Estas redes estão a ser desenvolvidas e padronizadas pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) e o ITU-T (*International Telecommunications Union Telecommunication Standardization Sector*) sendo os principais responsáveis pelo desenvolvimento das redes de fibra óptica.

1.1. Enquadramento

De acordo com a previsão da Figura 1 o tráfego IP de 2015 a 2020 irá quase triplicar, levando a um aumento anual do CAGR (Compound Annual Growth Rate) de 22% [1]. De 2015 a 2020 pode-se observar um aumento do consumo de tráfego de 168.1%. Maioritariamente este aumento do consumo de tráfego deve-se principalmente à utilização massiva dos conteúdos vídeo, uma vez que nos tempos que correm, qualquer telemóvel já dispõe de uma câmara de filmar de alta resolução, permitindo efectuar vídeos e partilha-los nas redes sociais.

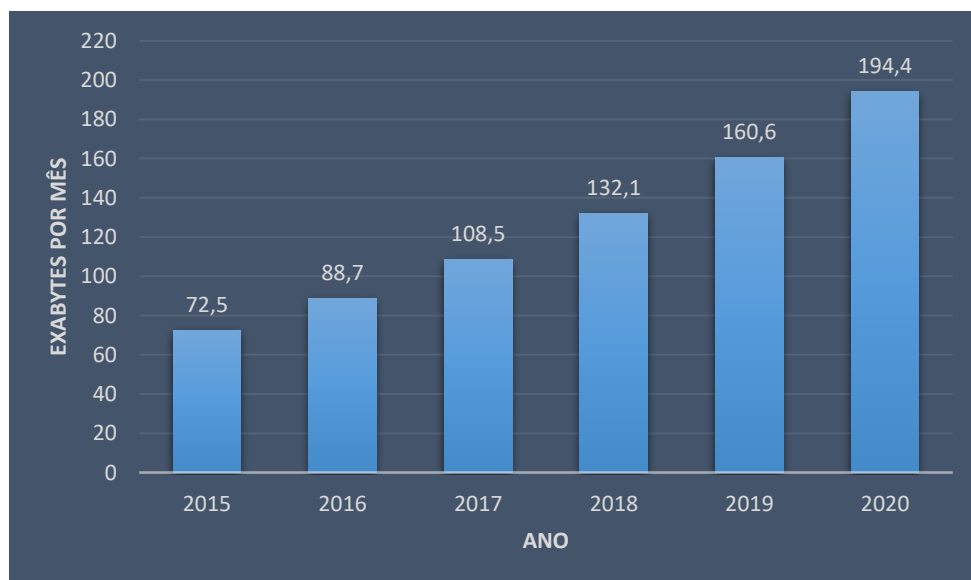


Figura 1 - Previsão de crescimento de tráfego IP Global, Cisco VNI [1]

A Figura 2 demonstra o crescimento global do tráfego IP por tipo ao longo dos anos entre 2014 e a previsão para 2019 [2]. Verifica-se que o consumo global de tráfego IP irá ter um CAGR de 23% ao ano. Em 2014 o tráfego global de IP era de 60 Exabytes por mês, sendo o maior consumo imposto pelo vídeo com cerca de 25 Exabytes por mês (43.4% de todo o consumo global) e o

menor consumo pelos jogos online com cerca de 5 Exabytes por mês (5% de todo o consumo global). A projecção para 2019 indica que iremos ter um consumo global de tráfego IP (*Internet Protocol*) por volta de 160 Exabytes por mês (aproximadamente um aumento de 260% em relação a 2014), em que o maior consumo continua a ser efectuado pelo vídeo com 110 Exabytes por mês (64.1% de todo o consumo global e aproximadamente um aumento de 440% em relação a 2014) e o menor consumo também continua a ser efectuado pelos jogos online com 8 Exabytes por mês (8% de todo o consumo global e aproximadamente um aumento de 62.5% em relação a 2014).

Global IP Video Traffic Growth

IP Video Will Account for 80% of Global IP Traffic by 2019



Figura 2 - Cisco VNI crescimento tráfego global [2]

De modo a suportar a procura de cada vez maior da informação digital, existe a necessidade de aumentar em capacidade as infra-estruturas das redes de fibra óptica, sendo necessário cada vez mais equipamento de redes, aumentando assim o CAPEX (*Capital EXpenditure*) existe também a necessidade de cada vez mais energia, aumentando assim o OPEX (*Operational EXpenditure*). Devido ao aumento das emissões de dióxido de carbono (CO_2) as alterações climáticas que têm ocorrido devido a este aumento, fizeram com que as empresas e os países se virassem para soluções mais amigas do ambiente, fazendo uma melhor utilização dos recursos, tornando os equipamentos mais eficientes e a utilização da chamada energia verde. Um exemplo desta preocupação ambiental é o acordo de Paris assinado em Dezembro de 2015, que veio demonstrar que existe uma grande necessidade de baixar os níveis de poluição ambiental. O tratado foi assinado por 195 países e tem como principal objectivo manter a temperatura média global abaixo dos 2 graus centígrados acima dos níveis pré-industriais e a continuar os esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5 graus centígrados, estas directrizes podem ser cumpridas com a redução drástica das emissões de gases com efeitos de estufa através de medidas de poupança de energia e de investimentos em energias renováveis a partir de 2020 [3].

A chamada energia verde consiste em deixar de utilizar os combustíveis fósseis, tais como o carvão mineral, o gás natural, produtos e derivados à base de petróleo e energia nuclear. A solução passa por começar a utilizar as energias renováveis, tais como, a biomassa, eólica, hídrica, solar e geotérmica. Deste modo, reduz-se o chamado efeito de estufa e os gastos económicos na produção de electricidade.

De acordo com a previsão da Figura 3, em 1970 praticamente não se utilizavam energias renováveis, a produção de energia era quase toda exclusiva de combustíveis fósseis. O combustível fóssil mais utilizado e com um maior aumento na produção de energia será o carvão, de acordo com a previsão este irá atingir o seu pico máximo em 2030. As energias renováveis começarão a ter um impacto maior na produção de energia a partir de 2010 e irão atingir o seu pico máximo em 2045, passando a ser o combustível mais utilizado na produção de energia.

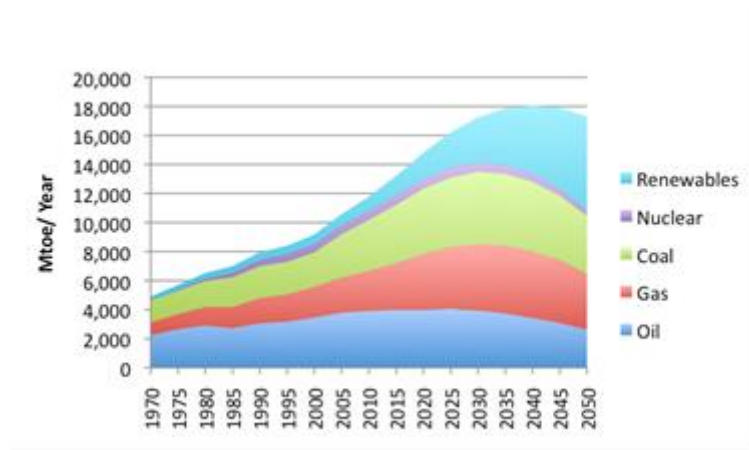


Figura 3 - Previsão do consumo de energia de 1970 até 2052, incluindo os tipos de combustíveis utilizados [5]

A Figura 4 representa o consumo global energético das tecnologias de telecomunicações entre 2007 e a previsão até 2020 [4]. O consumo tenderá a aumentar ao longo dos anos e irá passar de 700TWh em 2007 para 1100 TWh em 2020, o que corresponde a um aumento de quase 63% em relação a 2007. O maior aumento de tráfego regista-se nas tecnologias das redes fixas e nos datacenters, enquanto que o menor consumo regista-se na tecnologia IoT (*Internet of Things*), possivelmente por esta ser uma tecnologia recente em que ainda não se encontra totalmente desenvolvida e utilizada em larga escala.

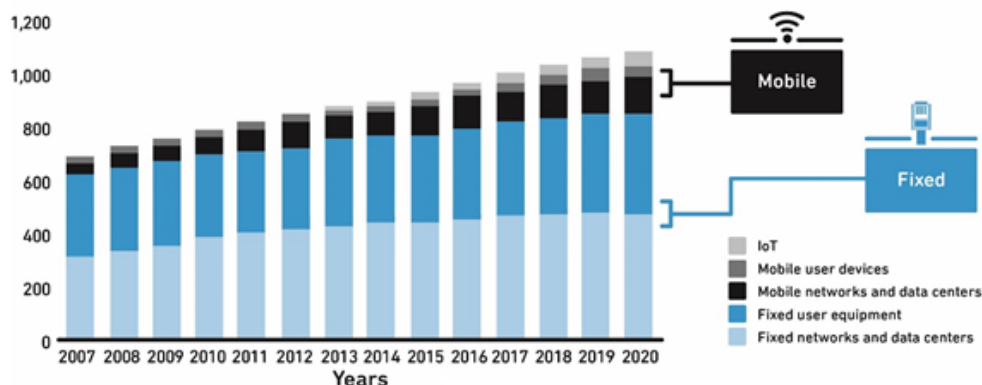


Figura 4 - Consumo global de energia e da infra-estrutura de telecomunicações desde 2007 até uma previsão de 2020 [5].

1.2. Motivação

Como resposta ao crescente aumento de tráfego IP nas 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 mesmo adoptar o uso de tecnologias de redes de transporte ópticas mais avançadas, com uma maior eficiência espectral.

Com o aumento do tráfego IP, as infra-estruturas tenderão a aumentar e implicarão um maior gasto na infra-estrutura originando um maior consumo energético, levando ao aumento das emissões de CO_2 .

O protocolo IP, é usado entre todos os equipamentos de redes de encaminhamento de dados e faz parte da camada de rede do modelo OSI (Open System Interconnection). É um dos protocolos mais importantes da internet, sendo responsável por endereçar e encaminhar pacotes que navegam pela rede mundial de computadores. Os pacotes de internet são divididos em duas partes, o cabeçalho que possui as informações de endereçamento de correspondência, e os dados da mensagem a ser transmitida. Uma das características é a possibilidade de fragmentar e juntar datagramas (pacotes de dados), de modo a que estes possam ser transmitidos entre redes que suportem diferentes tamanhos por blocos de dados.

Umas das preocupações dos engenheiros nos tempos recentes, tem sido de como economizar o consumo de energia nas redes ópticas. As redes não estão 24h na sua capacidade máxima, estas atingem a sua capacidade máxima em determinados momentos do dia, à noite normalmente a sobrecarga nas redes é mínima [6]. Existem diversas formas de baixar o consumo das redes, entre estas pode-se apontar as seguintes:

- Desligar selectivamente alguns elementos da rede quando atingirem um determinado tráfego mínimo ou um determinado horário;
- Projectar um desenho de rede energeticamente mais eficiente;
- Encaminhamento energeticamente eficiente.

1.3. Objectivos

A presente dissertação baseia-se em redes core IP sobre WDM como tecnologia futura e promissora para responder aos crescimentos de tráfego nas redes de telecomunicações fazendo uso de tecnologia *fixed-grid* e *flex-grid*, tendo como objectivo final a análise comparativa entre o custo de implementação e o custo operacional. Deste modo, pretende-se minimizar-se o custo de implementação associado, aumentando a eficiência das redes, pela redução de equipamento activo na rede e consequentemente o ajustamento no encaminhamento do tráfego. Pretende-se que as redes ópticas aumentem, fazendo-se o menor investimento possível, obtendo uma maior capacidade possível e um consumo energético menor e mais eficiente.

Como meio de se atingir a optimização do custo de implementação e operacional da rede, irá recorrer-se à programação linear inteira, MILP (*Mixed Integer Linear Programming*), de forma a testar o potencial destas arquitecturas nas redes de telecomunicações existentes hoje em dia. Tendo como base um caso de estudo real que considera uma rede Alemã, com 17 nós de rede

e fazendo uso da matriz de tráfego com informação referente ao ano de 2004, que necessitará de um ajuste anual à matriz de tráfego, com base na previsão de crescimento de tráfego disponibilizados pelo Cisco VNI (*Visual Networking Index*).

Deste modo pretende-se assim efectuar um estudo comparativo entre o custo de implementação e o custo operacional entre as redes ópticas actuais e as redes de próxima geração, *fixed-grid* e *flex-grid* respectivamente.

1.4. Organização da Dissertação

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos que se descreve de seguida:

- **Capítulo 1: Introdução** – É apresentado o enquadramento, a motivação desta dissertação, os objectivos que se pretendem atingir e a organização desta;
- **Capítulo 2: Estado da Arte: Redes Ópticas** – É introduzida a tecnologia usada para o transporte IP sobre WDM para redes *fixed-grid* e *flex-grid*, desde a camada física até à lógica, assim como as arquitecturas consideradas para efectuar a integração das várias camadas de rede a considerar;
- **Capítulo 3: Modelos de custo operacional e consumo energético** – Neste capítulo encontram-se descritos os modelos matemáticos de custo e optimização a considerar, a topologia da rede, requisitos de tráfego e elementos da rede utilizados;
- **Capítulo 4: Simulações e resultados** – São apresentados os resultados dos diversos modelos de optimização;
- **Capítulo 5: Conclusões** – São apresentadas as conclusões finais desta dissertação, após o trabalho de pesquisa e desenvolvimento efectuados, assim como algumas propostas de trabalho futuro.

1.5. Contributos originais introduzidos

Esta dissertação aborda os seguintes temas:

- Abordagem teórico-prática extensiva de redes IP sobre WDM, *fixed-grid* e *flex-grid*, com foco na redução do custo de implementação com a utilização de técnicas de encaminhamento energeticamente eficientes.
- Modelos de optimização desenvolvidos com o auxílio da plataforma de simulação IMB ILOG CPLEX.

Capítulo 2: Estado da Arte - Redes Ópticas

Com o avançar dos anos, a procura por soluções cada vez mais electrónicas e digitais de modo a facilitar o quotidiano do nosso dia a dia tem vindo a aumentar exponencialmente. Existe assim por parte da indústria das telecomunicações uma evolução das suas tecnologias de modo a acompanhar esta procura crescente de tráfego.

O que começou nas décadas de 1960-1970 com a Internet, tornou-se nos nossos dias a maior rede do mundo. Este aumento do tráfego IP deve-se ao aumento do número de utilizadores, mas também a dispositivos pessoais e conexões M2M (*machine-to-machine*) sendo previsível com a IoT, que o tráfego global de dados IP atinja os 168 Exabytes em 2019, muito acima dos 59.9 Exabytes atingidos em 2014 [1].

Até há pouco tempo a transmissão dos dados em larga escala era efectuada por cabos de par de cobre em que estes tinham como infra-estrutura uma rede de comutação por circuitos PSTN (Public Switched Telephone Network), esta rede servia essencialmente para transmissão de voz. De modo a haver uma transmissão de dados por pacotes, a informação passava pela utilização de um cabo coaxial, utilizando a tecnologia DOCSIS (Data Over Cable Service Interface Specification). Como existiam duas redes distintas para duas tecnologias diferentes, estas foram ao longo dos anos tornando-se obsoletas para os operadores de telecomunicações, deste modo os operadores começaram a fazer a migração para uma única infra-estrutura de rede, uma infra-estrutura de rede de comunicações ópticas. Esta nova infra-estrutura permitia a utilização de vários serviços em simultâneo, sendo que um deles era a comunicação pela tecnologia VoIP (*Voice over IP*), substituindo a rede de transmissão de voz (comutação por circuitos) por uma rede de dados.

A fibra óptica oferece inúmeras vantagens em relação ao cabo de cobre e ao cabo coaxial. Algumas das vantagens é a largura de banda elevada e a menor interferência electromagnética que oferece. Uma das desvantagens é a necessidade de instalar novos cabos de fibra óptica, o que acarreta elevados custos.

As redes ópticas podem ser divididas em três gerações. A primeira geração, a camada óptica está limitada apenas à transmissão, sendo que todas as funções mais inteligentes eram efectuadas no domínio electrónico. Como exemplo dessas tecnologias 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 já usada na geração anterior, acrescenta a funcionalidade de WDM 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 já no domínio óptico reduzindo o processamento no domínio eléctrico. A terceira geração consiste em que todas as funções sejam efectuadas no domínio óptico (seja comutação óptica no domínio do tempo ou até comutação óptica de pacotes) [6] (existem sempre vantagens e desvantagem numa rede puramente óptica).

Uma ligação óptica de longa distância pode ter diversas capacidades, estas podem variar entre os 2.5 Gbit/s a 10 Gbit/s, 40 Gbit/s, 100 Gbit/s, 200 Gbit/s, 400 Gbit/s e 1 Tbps [7]. Os sistemas

mais avançados aumentam a capacidade de transmissão simultaneamente usando várias dezenas ou centenas de diferentes comprimentos de onda (DWDM). Outro factor importante no desenvolvimento são os sistemas que ligam as diferentes estações com redes de fibra óptica. Esta abordagem pode ser bastante flexível e poderosa, mas também pode levantar um inúmero problema de questões técnicas não triviais, tais como a necessidade de adicionar ou retirar comprimentos de onda, idealmente de uma fonte totalmente reconfigurável, ou de modo a poder-se reajustar constantemente a topologia de conexão de maneira a obter uma performance elevada, ou a evitar falhas que possam comprometer a performance em geral.

2.1. Componentes de uma rede óptica

Neste subcapítulo são explorados alguns dos equipamentos de uma rede WDM que serão utilizados nesta dissertação.

Uma rede óptica consiste num conjunto de nós ligados entre si através de fibras ópticas. A informação chega ao destino final através da passagem por vários nós intermédios que direccionam a informação para diversas direcções. Assim, os nós intermédios têm de ter a capacidade de comutar e/ou converter os comprimentos de onda correspondentes de cada canal. Cada ligação pode suportar um determinado número de comprimentos de onda bem como do tipo de tecnologia utilizada para a transmissão [8].

Na Figura 5 são apresentados os elementos de rede no estabelecimento de uma ligação óptica.

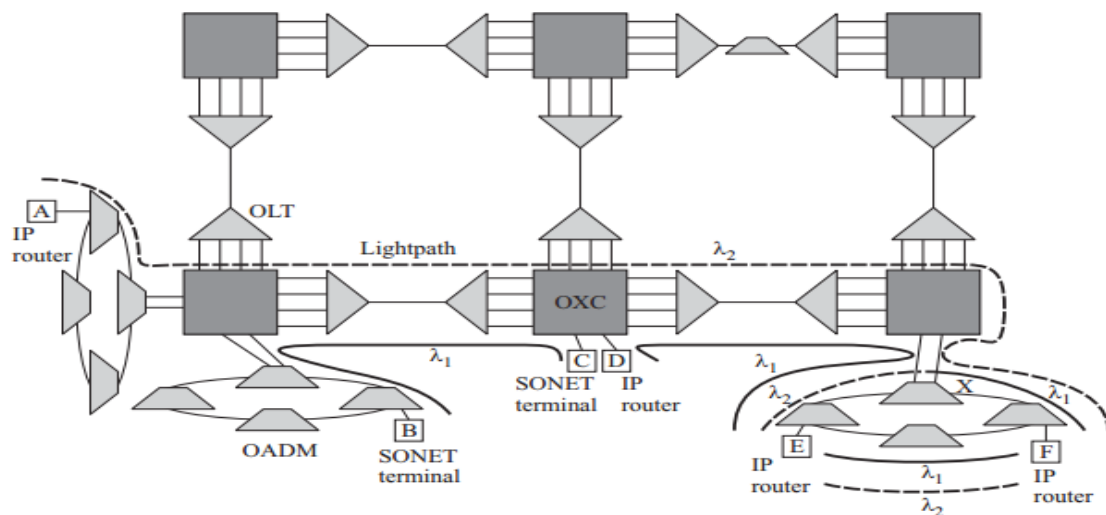


Figura 5 - Elementos de uma rede óptica [11]

Os elementos principais são os terminais ópticos, OLT (Optical Line Terminals), multiplexadores OADM (Optical Add-Drop Multiplexer), comutadores ópticos (OXC) interligados entre si através de fibra óptica. Os caminhos ópticos são estabelecidos ponto a ponto desde o nó inicial até ao nó final, utilizando o mesmo comprimento de onda. Esta propriedade de preservação do espectro é designada por restrição de continuidade do comprimento de onda. É demonstrada na Figura 5 pelo estabelecimento de seis caminhos ópticos, que fazem uso de dois comprimentos

de onda, λ_1 e λ_2 . O caminho óptico entre B e C, D e E é um dos caminhos ópticos entre E e F, não partilham as mesmas ligações físicas, logo podem utilizar o mesmo comprimento de onda λ_1 . Ao contrário dos caminhos ópticos de A para F e de B para C utilizam ligações comuns, logo não podem ser atribuídos a estes caminhos o mesmo comprimento de onda. Deste modo é atribuído à ligação A para F o comprimento de onda λ_2 e à ligação de B para C o comprimento de onda λ_1 . Deste modo e existindo apenas dois comprimentos de onda disponíveis na rede, pretende-se criar um novo caminho óptico entre E e F, teria que se realizar uma conversão do comprimento de onda, sem esta conversão, não seria possível estabelecer este caminho óptico. Assim é necessário que o nó X realize uma conversão do comprimento de onda de λ_1 para λ_2 . Desta maneira o caminho óptico entre E e F utilizaria o comprimento de onda λ_2 e na ligação E para X, o nó X converte o comprimento de onda λ_1 para λ_2 , desta forma a ligação de X para F teria um comprimento de onda de λ_1 [9].

2.1.1. Terminal óptico de linha (OLT)

O OLT é um componente de rede óptica utilizado no início e no fim de uma ligação. Tem duas funções principais, converter os sinais eléctricos usados entre o cliente e a rede óptica, realizando também o inverso, converter os sinais ópticos usados pela rede óptica para sinais eléctricos usados pelo cliente. A segunda função é a coordenação da multiplexagem e demultiplexagem entre os dispositivos de conversão nos terminais da rede óptica (OLTs), localizados nas instalações dos clientes [10].

O OLT é o equipamento que converte os sinais dos clientes, antes de estes serem multiplexados/demultiplexador em/de comprimentos de onda, tal como ilustrado na Figura 6.

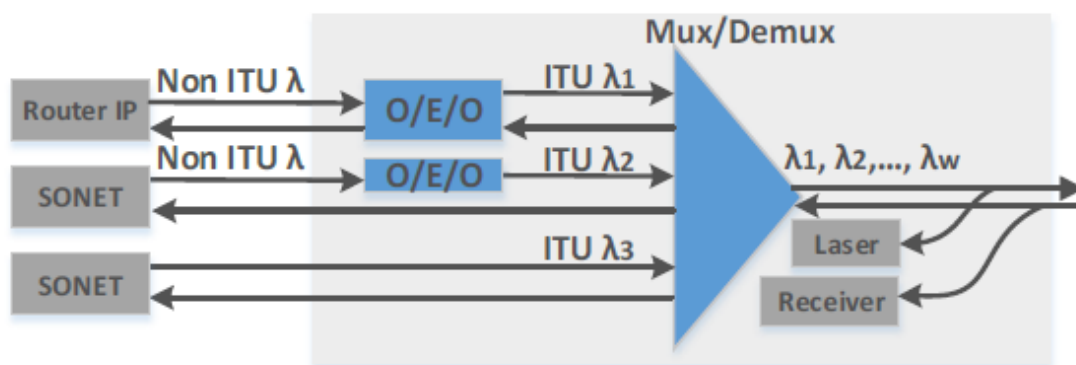


Figura 6 - Diagrama de blocos de um OLT [10]

2.1.2. Amplificadores ópticos

Quando um laser envia um sinal este irá sofrer ao longo do seu percurso atenuação, dispersão e efeitos não lineares, de modo a recuperar este sinal são instalados amplificadores ópticos. Estes são importantes nas comunicações ópticas e na física dos lasers e são utilizados normalmente a cada 80-120km. Os amplificadores ópticos são dispostos ao longo das fibras

ópticas que transportam o sinal WDM. A emissão estimulada no ganho médio do amplificador provoca a amplificação do sinal de entrada.

Os amplificadores ópticos são dispositivos analógicos que amplificam um sinal óptico directamente, sem a necessidade de primeiro converterem o sinal para eléctrico, são aplicados ao longo da fibra devido à propagação do sinal, usam uma fibra de sílica dopada com metais raros de modo a colocar o sinal num nível de potência que possa ser detectado nos estágios seguintes sem aumentar significativamente o valor global de ruído no sistema. A melhor maneira de amplificar o sinal é opticamente e o melhor método é por amplificadores de fibra (menor perda, mais eficientes, mais estabilidade). Existem três tipos de amplificadores: os amplificadores de materiais raros dopados (amplificadores de fibra EDFA), o amplificador de Raman e os amplificadores ópticos semicondutores (SOAs). Em fibra óptica normalmente são usados amplificadores de fibra EDFA e amplificadores de Raman, pelo que vamos apenas restringir-nos a estes dois tipos devido a ser os mais utilizados em sistemas WDM.

O amplificador de fibra EDFA é apresentado na Figura 7, sendo composto tipicamente por uma fibra óptica de sílica dopada com iões de érbio, com 10-30m de comprimento. Os iões de érbio são activados pela energia fornecida por um laser bombeador, permitindo criar uma inversão de população, e realizar amplificação por emissão estimulada [11]. O EDFA é usualmente bombeado por lasers de semicondutor operando a 980 nm ou 1480 nm, deste modo consegue-se amplificar simultaneamente diferentes tipos de comprimento de onda na banda C, mas também na banda L com EDFAs de ganho deslocado no espectro.

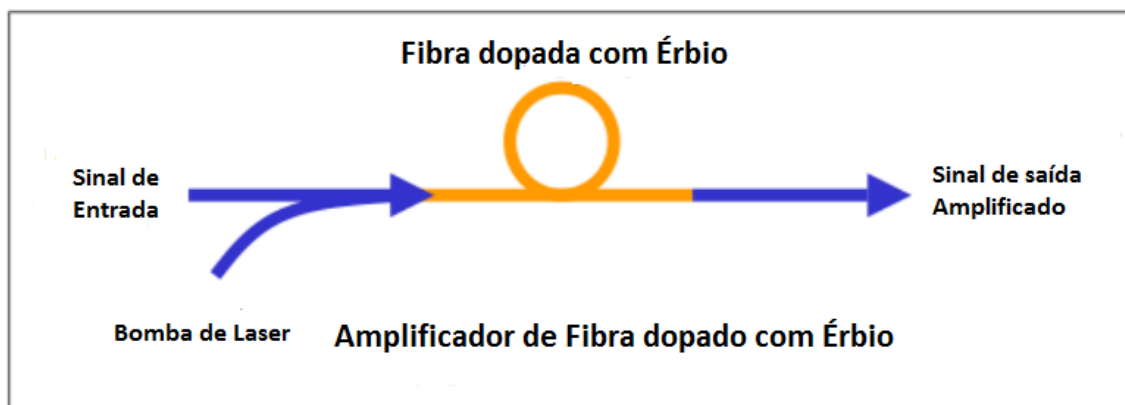


Figura 7 - Amplificador óptico EDFA com fibra dopada com érbio

O amplificador de Raman é demonstrado na Figura 8 e baseia-se em amplificar os sinais ópticos, através de um efeito não linear de propagação em fibras ópticas SRS (*Stimulated Raman Scattering*). O pico de ganho é centrado perto de 13THz e consegue-se obter um ganho no espectro a cerca de 100nm acima [11].

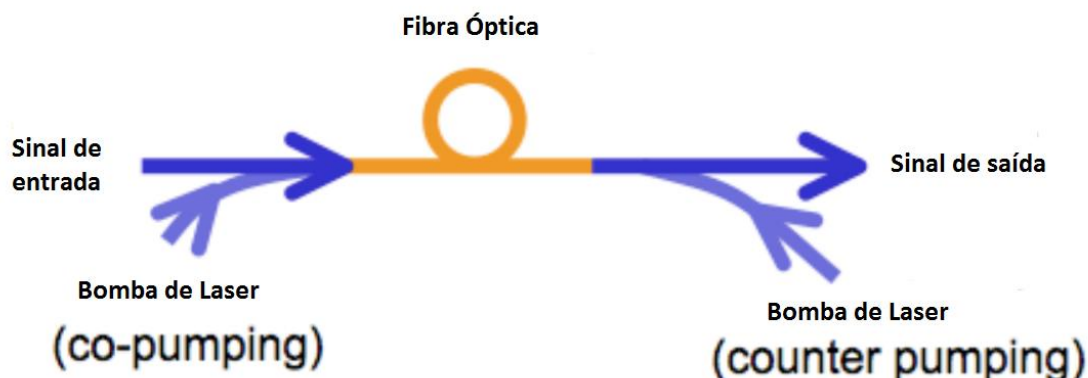


Figura 8 - Amplificador óptico de Raman

A Tabela 1 apresenta de uma forma simplificada as principais características dos amplificadores ópticos EDFA e de Raman:

Tabela 1 - Principais diferenças entre um amplificador EDFA e um amplificador de Raman

Características	EDFA	Raman
Amplificação de banda	Dependente da componente dopado	Depende do comprimento de onda da bomba
Largura de banda	20 nm, é necessário um valor superior para múltiplos componentes dopantes	48 nm, é necessário mais para múltiplas bombas
Ganho	20 dB ou mais, depende da concentração de iões, comprimento da fibra e da configuração da bomba	4-11 dB, proporcional à potência da bomba e eficiência do comprimento da fibra
Saturação de ganho	Depende do ganho e dos materiais constituídos	Equivalente à potência da bomba
Comprimento de onda	980 nm ou 1480 nm para EDFA	100 nm mais baixo que o sinal de pico de ganho

2.1.3. Comutadores de cruzamento ópticos (OXC)

O OXC (*Optical cross-connector*) é um dispositivo fundamental na maioria dos sistemas de comunicação. A nível óptico consiste em comutar os canais ópticos (comprimentos de onda) nas portas (entrada-saída) entre as diferentes direcções de transmissão de uma interconexão óptica (nó). A utilização de OXCs na rede óptica de transporte permite uma evolução de estruturas lineares e em anel para topologias em malha. Um OXC pode ter de comutar milhares de canais

(comprimentos de onda). Esta solução constitui uma forma de comutação de circuitos, pois os canais ópticos são comutados de forma totalmente transparente [12].

O OXC é apresentado na Figura 9, este é um elemento chave das redes ópticas, proporcionando uma plataforma de integração com a óptica, adaptada à rede ITU-T WDM, enquanto internamente os serviços são administrados no domínio eléctrico. Um OXC é constituído por vários OTMs, que realizam entre outras as funções de multiplexagem/demultiplexagem e por uma matriz de comutação [13]. A matriz de comutação pode ser óptica ou eléctrica.

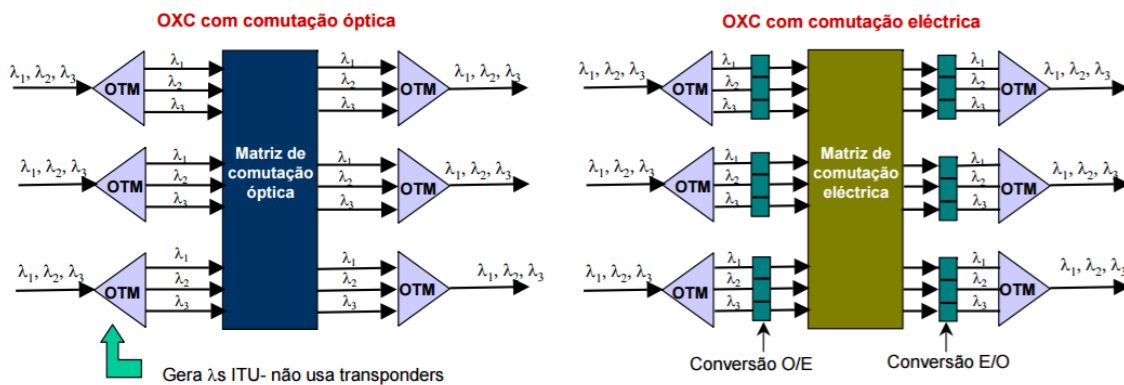


Figura 9 - OXCs com comutação óptica e eléctrica [8]

Os OXC são usados para:

- Gestão de conexão e largura de banda, de modo a providenciarem conexões de canais livres (para serviços de comprimento de onda de linhas privadas) e de canais ópticos (com a capacidade de suportar redes não-SONET/SDH) de modo a providenciar funções de adicionar/retirar funcionalidades;
- *Grooming* (permite aos operadores de rede transportar vários fluxos de bits com requisitos menores que a largura de banda oferecida pela sua hierarquia de transmissão) do comprimento de onda, de modo a poder utilizar-se a infra-estrutura instalada;
- Protecção / restauração ao nível do comprimento de onda, para portas do router que se encontrem desprotegidas de maneira a maximizar a eficiência e a performance da estrutura da rede;
- Alocação dinâmica dos comprimentos de onda, quando acoplados com os routers da rede core, de modo a conseguir uma solução económica contra as exigências da largura de banda flutuante.

2.1.4. OADM (Optical Add and Drop Multiplexer)

O OADM funciona como um nó óptico em que adiciona um ou mais comprimentos de onda a uma rede WDM ou remove um ou mais comprimentos de onda de uma rede WDM, passando esses sinais para outro caminho de rede. Estes selectivamente adicionam e retiram conjuntos de comprimentos de onda de uma rede WDM. Os OADMs são usados devido ao seu custo

eficiente de aceder ao domínio óptico e passar para o domínio eléctrico, podendo também efectuar a passagem do domínio eléctrico para o domínio óptico. Fornece flexibilidade para as redes de fibra óptica cada vez mais complexas, por ser um multiplexador totalmente óptico, eliminando a possibilidade de ter de fazer conversões do domínio óptico-eléctrico-óptico. São usados em pontos da rede em que é necessário terminar localmente uma certa fracção dos comprimentos de onda transmitidos.

O tradicional OADM é apresentado na Figura 10, este consiste em três funções: um desmultiplexador óptico, um multiplexador óptico e um reconfigurador de caminhos entre o desmultiplexador e o multiplexador. O desmultiplexador óptico separa os comprimentos de onda de uma fibra para os portos [9]. A reconfiguração pode ser obtida através de uma ligação *cross connect* ou através de interruptores ópticos em que estes direccionam os comprimentos de onda do multiplexador para as portas de saída. O multiplexador óptico multiplexa os diferentes comprimentos de onda que são posteriormente adicionados a uma única fibra de saída.

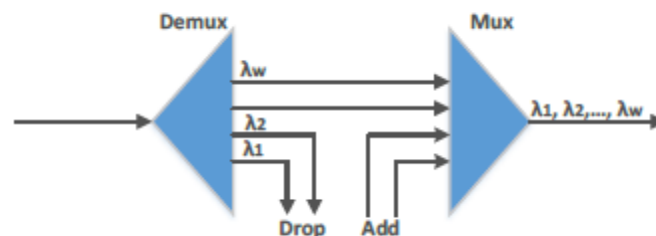


Figura 10 - Multiplexer óptico de adicionar e remover comprimentos de onda (OADM) [8]

Um OADM com *switchs* ópticos reconfiguráveis remotamente (1x2) pode ser chamado de um reconfigurável OADM (ROADM), os que não possuem esta característica são chamados de OADMs fixos. O termo OADM aplica-se a ambos os tipos, referindo-se muitas vezes a ROADM [14].

2.2. Tecnologia Flex-Grid

O recente crescimento de tráfego IP juntamente com um aumento do nível de aplicações por parte dos utilizadores (serviços de *cloud*), tem impulsionado o desenvolvimento de redes de banda larga altamente eficientes e flexíveis, começando nas redes ópticas de *backbone*. As redes ópticas estão a evoluir em relação à flexibilidade, com o objectivo de maximizar a taxa e o alcance de dados, adaptando a sua operação à procura crescente de tráfego. De modo a poder utilizar a infra-estrutura instalada e poder obter um retorno dos investimentos efectuados (CAPEX), a solução passa por reutilizar os equipamentos e fibras já instalados em vez de os substituir, deste modo a tecnologia *fixed-grid* continua instalada nos equipamentos introduzindo a flexibilidade através da substituição dos transponders [15].

Tecnologias avançadas de transmissão ópticas, tais como OFDM (optical *orthogonal frequency-division multiplexing*), Nyquist WDM (*N-WDM*), estão identificadas como as tecnologias emergentes para as redes ópticas *flexible-grid*. Ao utilizar a atribuição de espectro e o formato de modulação necessário naquele momento, as redes podem significativamente melhorar a

eficiência do espectro e aumentar a capacidade geral da rede. Além disso os supercanais podem ser configurados para suportar altas larguras de banda (por exemplo 400Gb/s e 1 TB/s) [16].

Nas redes ópticas de *flexible-grid* o espectro disponível na banda-C, é dividido num conjunto de *slots* com uma menor largura espectral, FS (*Frequency Slots*) [17]. As propostas actuais para o tamanho de cada *slot* são de 50 GHz, 25 GHz, 12.5 GHz e até 6.25 GHz [18]. Por conseguinte, consoante as exigências de tráfego são atribuídos os *slots* de acordo com o *bit-rate* necessário, bem como o formato de modulação adequado. Assim, em função da capacidade pretendida, a técnica de modulação e largura espectral é atribuído a cada canal um conjunto de *slots* [19]. Comparando as interfaces dos 100 Gb/s e os 400 Gb/s, a interface dos 400 Gb/s oferece 4 vezes mais largura de banda, oferece mais 2.6 vezes eficiência espectral, oferece 4 vezes mais densidade, oferece mais 1.5 vezes alcance e desempenho, consome menos 33% de energia e é 25% melhor em termos de tolerância às imperfeições da fibra (estes resultados são possíveis de atingir com a modulação mais apropriada para os requisitos da rede) [20].

Uma rede óptica para ser considerada *flex-grid* terá que ter os seguintes elementos [20]:

- Solução DWDM de modo a atingir a capacidade de *multiterabit/s* com uma configuração de supercanal;
- Nós reconfiguráveis e operações de *flex-grid*;
- Diferentes formatos de modulações consoante as necessidades da rede.

2.2.1. Alocação do espectro em Flex-grid

A arquitectura das redes de *flex-grid* parece ser o próximo passo promissor para atender aos requisitos das próximas gerações de redes. A recomendação do ITU G.694 para uma rede *flex-grid* define um novo padrão de grelha espectral flexível para aplicações de WDM. Esta grelha espectral flexível pode possuir uma granularidade de *slot* de 50 GHz, 25 GHz, 12.5 GHz e até 6.25 GHz em comparação com a grelha da rede fixa de 50GHz que é usada nas redes *fixed-grid*. Esta recomendação fez das redes *flex-grid* uma tecnologia capaz de acompanhar o crescimento de tráfego. As redes de *flex-grid* usam eficientemente os recursos disponíveis, especialmente quando associadas a novas tecnologias coerentes e formatos de modulação avançados [21].

A mudança da tecnologia de *fixed-grid* para *flex-grid* pode ter um impacto muito grande nos amplificadores ópticos já instalados na rede. De facto, os amplificadores ópticos presentes no final de cada intervalo são projectados para uma rede WDM *fixed-grid*. Uma vez que a tecnologia *flex-grid* permite a redução do espaçamento dos canais, esta permite a possibilidade de criar novos canais ópticos sobre o espectro utilizado. No entanto, esse aumento no número de canais ópticos aumenta a potência óptica podendo causar efeitos indesejáveis devido à saturação de alguns amplificadores instalados na rede implementada [21].

Com a utilização de redes SLICE (*Spectrum Sliced Elastic Optical Path*) tornou-se possível de realizar alocações de espectro adaptável ao ritmo/ distância de uma maneira altamente eficiente em termos de espectro [22]. Estes recursos são demonstrados na Figura 11. É demonstrado a funcionalidade da alocação do espectro segundo o *bit rate*. Neste caso, o cliente solicita uma capacidade menor que a capacidade máxima da interface. Numa rede baseada em WDM, o comprimento total do canal óptico é alojado, levando a que alguns canais sejam apenas utilizados parcialmente. Uma rede de caminhos ópticos elásticos permite alocar apenas a largura de banda mínima necessária correspondente a solicitações individuais, utilizando esta

técnica, apenas se utiliza os recursos necessários deixando os recursos que não foram utilizados disponíveis [22].

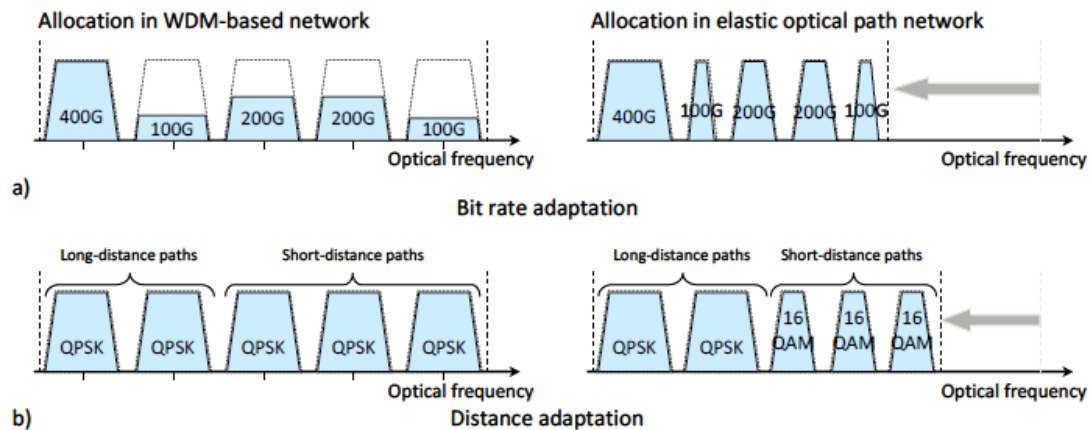


Figura 11 - Comparação de alocação de tráfego nas tradicionais redes WDM baseadas na tecnologia fixed-grid com base nos canais de largura de banda fixa e banda flexível [22].

O segundo benefício das redes ópticas *flex-grid*, é a característica de adaptação à distância. A transmissão do sinal passa por múltiplos nós de rede troços de fibra até chegar ao destino final, isto provoca a degradação do sinal resultando na redução do OSNR (*Optical Signal-to-Noise Ratio*). Nas redes tradicionais WDM, todos os canais recebem a mesma margem para satisfazerem os requisitos necessários para o pior caminho. Uma rede *flex-grid* adaptável à distância permite otimizar a margem dos caminhos individuais. Nesse caso, para caminhos mais curtos, o sinal apresenta menor degradação, sendo alocados menos recursos espectrais. A atribuição do espectro adaptativo à distância leva a uma melhoria na eficiência geral da utilização de recursos. A atribuição de espectro adaptável à distância leva a uma melhoria na eficiência geral da utilização de recursos [22].

Apesar dos seus benefícios as redes ópticas *flex-grid* impõem novos desafios, por exemplo, a chegada e partida das conexões ópticas (que podem solicitar um número variável de *slots* de frequência adjacentes).

2.2.2. RWA (Routing and Wavelength Assignment)

Com o desenvolvimento da tecnologia de redes ópticas baseadas em WDM, a pesquisa sobre qual o melhor encaminhamento do sinal na rede óptica tem resultado em muitas investigações. Devido às particularidades das redes ópticas, o processo envolve a determinação não apenas das rotas, mas também dos comprimentos de onda a serem atribuídos de modo a estabelecer caminhos após o pedido da conexão chegar.

Nas redes ópticas tradicionais de grande escala, as mudanças de estado dos recursos da rede são enviadas para o centro de encaminhamento e gestão da rede em termos de pacotes, o que poderá trazer dois problemas. O primeiro, a gestão da rede de comunicação (MCN), esta será preenchida com um grande número de pacotes de estado, o que provoca o congestionamento nas comunicações da rede. O segundo, como política centralizada de encaminhamento, a falta de flexibilidade, a rede não pode atender ao pedido de atribuição de encaminhamento em

tempo real, em que os estados de recursos estão a mudar rapidamente e todos estes levam ao aumento do grau de congestionamento da rede.

Nas redes ópticas baseadas em WDM, de modo a reduzir drasticamente o investimento operacional, a restrição da continuidade do comprimento de onda é um factor muito importante a ser considerado. A pesquisa sobre o problema do RWA numa rede óptica é crucial para o seu desempenho, tais como a utilização de recursos da rede e o nível de congestionamento.

Quando um pedido de conexão chega, a tarefa do RWA é aplicar um cálculo de modo a calcular a rota de origem para a rota de destino de acordo com a topologia da rede física, de seguida atribuir um comprimento de onda contínuo para todos os *links* envolvidos na tabela de encaminhamento. Como todos os estabelecimentos de conexão são aleatórios, o estado da rede está em constante mudança, o que é conhecido como o problema de RWA dinâmico. Existem dois objectivos principais na resolução do problema do RWA: um é o minimizar das quantidades de comprimentos de onda em toda a rede, o outro é encurtar o comprimento do caminho. Após uma solicitação de uma conexão a chegar, a unidade de direccionamento deve seleccionar uma direcção e atribuir o comprimento de onda para a conexão de acordo com a informação de estado actual da rede e em seguida configurar o seu caminho. Se os recursos da rede forem insuficientes para suportar o estabelecimento da conexão, esse pedido será atrasado até disponibilidade de recursos ou mesmo rejeitado. No problema do RWA dinâmico, um parâmetro crucial para avaliar um algoritmo de atribuição de comprimento de onda é a probabilidade de bloqueio. O RWA dinâmico é muito mais difícil de resolver do que o estático, o método mais comum do problema do RWA é dividir em dois sub-problemas: selecção de direcção e atribuição de comprimentos de onda. Geralmente são utilizados algoritmos nos comprimentos de onda, tais como, FF(*First-Fit*), LU(*Least-Used*), RLI (*influencia relativa*) entre outros. Todos estes algoritmos são para escolher um recurso de comprimento de onda adequado para o caminho sob a restrição de continuidade de comprimento de onda [23].

2.2.3. Superchannel

Transmissões ópticas de grande capacidade são desejadas para os futuros sistemas das redes ópticas. De modo a satisfazer o requisito da largura de banda, uma abordagem básica é aumentar a eficiência espectral. Até agora, existem duas estratégias diferentes para alcançar uma eficiência espectral elevada com uma complexidade de processamento razoável do sinal. A primeira estratégia é a multiplexagem da divisão de frequências ortogonais ópticas (CO-OFDM), que tem como as principais vantagens a sua robustez contra a dispersão do canal e a facilidade de fase e estimativa do canal em um ambiente variável no tempo. A segunda estratégia é baseada no pulso de Nyquist, em que cujo o espectro cumpre o primeiro critério de Nyquist. Como técnica de suporte, o sinal de Nyquist possui um PAPR (*peak-to-average power ratio*) mais baixo, o que torna o sinal um candidato atraente para o sistema de transmissão óptica de longo curso. O sinal moldado por Nyquist com uma alta eficiência espectral mostrou ser um meio eficiente para transmissões ópticas de grandes capacidades [24].

À medida que os sistemas de 100 Gb/s estão a ser implementados comercialmente, estão a aparecer novas tecnologias que permitem a transmissão a 400 GB/s. Para se obter uma maior eficiência espectral comparando com os sistemas de 100 Gb/s usando DP-QPSK, a maioria das demonstrações a 400 GB/s escolhem formatos de modulação multidimensional com sinalização multinível, com a ajuda de detecção coerente e processadores digitais de sinais para permitir a

compensação avançada de comprometimento juntamente com os códigos de decisão suave para aumentar o ganho de codificação. A modulação de amplitude em quadratura (DP-16QAM) é uma das modulações candidatas para a transmissão de 400 Gb/s, duplicando a eficiência espectral de DP-QPSK. No entanto, a grande constelação de DP-16QAM requer uma relação de sinal-ruído óptico muito maior e mais sensível à não-linearidade da fibra e ao ruído de fase do laser, limitando o alcance do sistema em relação ao *link* de fibra, tais como, a dispersão gerida pela fibra [25].

Uma outra maneira de melhorar a eficiência espectral sem aumentar a constelação do sinal é utilizar a tecnologia do *superchannel* óptico, esta tecnologia é baseada em sub-portadoras compactas usando os tons ópticos de fase-bloqueados. Demonstrações mostraram que o canal óptico superior utiliza sub-portadoras moduladas a partir de lasers de funcionamento livre, onde o espaçamento da sub-portadora é tipicamente maior que a velocidade de transmissão da sub-portadora, a fim de evitar a interferências entre portadoras. De maneira a reduzir ainda mais o espaçamento da sub-portadora, é possível utilizar impulsos de co-seno elevados e gerados de uma forma digital ou óptica.

2.2.4. Estado de Fragmentação

Um estado de fragmentação significa que em cada *link*, o espectro contém *slots* de frequência inativos de banda estreita e não contígua, que não podem ser alocados para pedidos de conexão futuras. O aumento da probabilidade de bloqueio da conexão é o resultado de um espectro fragmentado. Uma solução para resolver esse problema é re-otimizar a configuração dos caminhos de luz estabelecidos na rede, ou seja, a sua alocação do espectro ou o seu percurso pelos diversos nós da rede. Ao utilizar esta solução a desfragmentação do espectro na rede é realizada em grandes blocos de *slots* de espectro vazios, adjacentes e disponíveis para futuras solicitações de conexão.

No futuro as redes ópticas WDM *flex-grid*, irão ter as conexões *multirate* estabelecidas dinamicamente, o espectro pode alcançar ao longo de tempo um estado de fragmentação. Nesse estado, é difícil de encontrar pedaços de espectro disponíveis que possam ser utilizados para novas solicitações de conexão.

Como se pode observar, a Figura 12 contém cinco conexões, quando a conexão alocada ao canal 2 (Ch 2) é enviada, esta deixa espaço para três *slots* de espectro, o que cria um estado de desfragmentação. Neste estado, o *link* possui oito *slots* livres que não são adjacentes entre si. Assim, se uma nova conexão solicitar mais de três *slots*, esta será rejeitada devido a não cumprir a contiguidade do espectro. Ao executar um processo de desfragmentação, o espectro ocupado pelas quatro conexões restantes podem ser redistribuídas, deste modo as quatro conexões ocupam os primeiros *slots*, ficando as quatro conexões seguidas e libertando oito *slots* no final do espectro. Redistribuição do espectro, pode melhorar a utilização do espectro, reduzindo deste modo, intervalos não utilizados entre os intervalos de frequências ocupados [26].

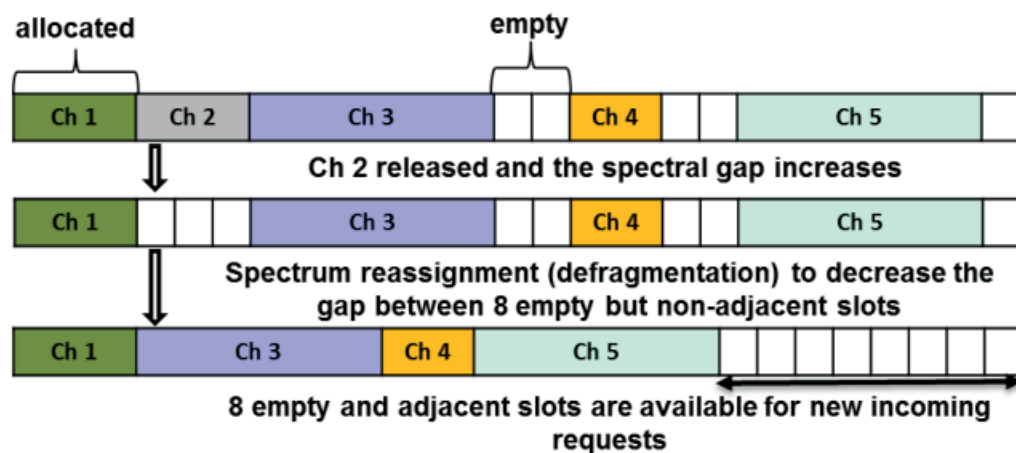


Figura 12 - Fragmentação do espectro num link. A desfragmentação é realizada usando a realocação do espectro [26].

2.3. Modulação

As redes de fibra óptica, tal como as conhecemos hoje, mudaram da interferência inter-simbólica (ISI) limitada para o regime limitado de largura de banda. Durante décadas a modulação OOK foi o formato de modulação de escolha em redes de fibra óptica. A modulação OOK fornece muitas vantagens, com uma estrutura TX/RX económica, simples e robusta contra deficiências não-lineares. No entanto, a principal desvantagem da modulação OOK é que tem uma baixa tolerância em relação à ISI. ISI é uma forma de distorção onde os símbolos vizinhos interferem uns com os outros, causando uma penalidade de potência quando não são compensados. As principais causas do ISI são distorções lineares, como a dispersão cromática e a dispersão do modo de polarização (PMD).

A evolução das redes de transporte ópticas e de grande capacidade são necessárias para suportar as exigências crescentes de novos serviços de banda larga, tais como, *streaming* de vídeo e *clouds*. O transporte de longo alcance do sinal de clientes de banda larga, tais como Ethernet de 100 Gb/s, foi alcançado pelo desenvolvimento da tecnologia de detecção coerente com processamento digital de sinal (DSP), o que melhora drasticamente a eficiência espectral com o uso de formatos de modulação de diversos níveis e divisão por polarização multiplexada (PDM).

Enquanto o aumento da eficiência espectral é visto como uma técnica promissora para atender ao requisito por uma maior capacidade nas redes WDM já instaladas, a implementação relacionada é ainda amplamente debatida e investigada. Uma abordagem directa consistiria em reduzir o espaçamento dos canais espectrais ou usar formatos de modulação complexa. Os sistemas de transmissão de 100 Gb/s são geralmente implantados em redes WDM de transporte comercial. A maioria delas é baseada em um único suporte modelado com QPSK multiplexado por divisão de polarização (PDM) e opera numa grelha de canal de 50GHz, produzindo uma eficiência espectral de 2 bps/Hz. Para a próxima geração de sistemas coerentes, os formatos de modulação PDM e QAM estão actualmente sob investigação activa para apaziguar o crescimento incessante do tráfego de cerca de 40% ao ano [27] nas comunicações de fibra

óptica, uma vez que estas modulações permitem uma maior eficiência espectral à custa da redução do alcance. Em particular o formato de modulação PDM-16QAM [27] de dupla-
portadora de 400 Gb/s é geralmente considerado como uma das melhores modulações
candidatas para o padrão de transmissão. Paralelamente à óptica de alta velocidade, as
tecnologias flexíveis da rede óptica também são importantes para suportar o tráfego futuro e
para melhorar a eficiência da rede, por exemplo, a tecnologia de *flex-grid* é necessária para
suportar o chamado *superchannel* óptico, desta forma consegue-se alcançar uma melhor
eficiência espectral [27].

2.4. Camada de Internet do modelo TCP/IP

Quando surgiram as primeiras redes IP, grande parte dos equipamentos só comunicavam com
equipamentos do mesmo fabricante. No final da década de 1970, foi criado um modelo de
referência pelo grupo ISO (International *Organization for Standardization*), denominado de
modelo OSI (*Open Systems Interconnection*). O modelo OSI foi concebido com o intuito de criar
dispositivos de rede e *software* interoperáveis através de diversos protocolos de rede. Este
modelo descreve como é feita a comunicação de dados e a informação de rede desde um
equipamento terminal atravessando a rede e chegando a outro equipamento terminal [19].

A Figura 13 demonstra a hierarquização das diferentes camadas de rede do modelo OSI. Este é
constituído por sete camadas distintas, divididas em dois grupos. As três camadas superiores
definem como é realizada a comunicação entre a aplicação e o equipamento terminal e os
utilizadores. As quatro primeiras camadas definem como é transmitida a informação ponto a
ponto.

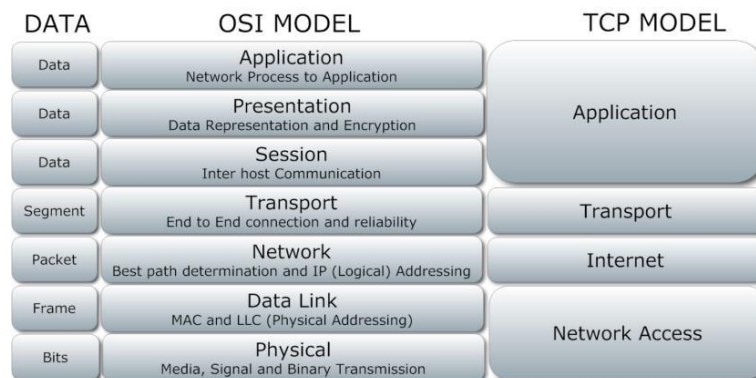


Figura 13 - Modelo OSI e TCP [19]

O protocolo TCP/IP foi desenvolvido em 1969 pelo *U.S Department of Defense Advanced Research Projects Agency*, de modo a preencher a necessidade de comunicação entre um grande
número de sistemas de computadores em diversas organizações militares. O objectivo do
projecto era disponibilizar *links* de comunicação com alta velocidade utilizando redes de
comutação de pacotes. O protocolo deveria de ser capaz de identificar e encontrar a melhor
rota possível entre dois sites, além de ser capaz de procurar rotas alternativas para chegar ao
destino, caso alguma dessas rotas tivesse sido destruída. Este protocolo deriva de dois
protocolos, o TCP (*Transmission Control Protocol*) e o IP (*Internet Protocol*). Este conjunto de
protocolos pode ser visto como um modelo de camadas, onde cada camada é responsável por

um grupo de tarefas, fornecendo um conjunto de serviços bem definidos para o protocolo da camada superior.

A Figura 14 demonstra a estrutura definida para o modelo TCP/IP, em que cada camada inferior presta serviços à camada superior.

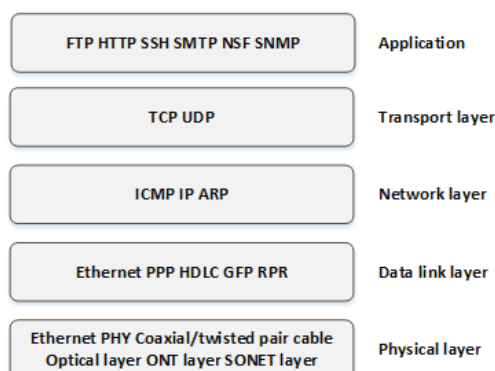


Figura 14 - Modelo em camadas do protocolo IP [19].

Nesta dissertação irá ter-se em conta as camadas 1 e 2 do modelo TCP/TP, pois são estas as camadas responsáveis pela definição do meio de transporte físico até ao encaminhamento (routing) ao nível da camada IP.

O protocolo TCP é um dos protocolos sob os quais a internet funciona hoje em dia. É um protocolo de *byte-stream* e o seu controlo de fluxo e erros são baseados nos números de bytes em vez dos números de pacotes. Os dados quando solicitados são transmitidos e cada pacote é identificado por uma sequência de números. Quando o destino recebe o segmento de dados, verifica os dados um a um enviando sempre um *ACK(Acknowledge)*, desta maneira consegue verificar se recebeu todos os números da sequência e pedir os dados que não recebeu ou vieram com erro. A versatilidade e a robustez do TCP tornaram-no adequado a redes globais, já que este verifica se os dados são enviados de forma correcta, na sequência apropriada sem erros pela rede [28].

O protocolo IP é um protocolo de comunicação usado entre todas as máquinas em rede para encaminhamento dos dados. Tanto no modelo TCP/IP, quanto no modelo OSI, o protocolo IP está na camada intitulada camada de rede. Os dados na rede são enviados em blocos referidos como ficheiros, no protocolo IP nenhuma definição é necessária antes do nó tentar enviar ficheiros para um nó com o qual não comunicou previamente. Este oferece um serviço de datagramas não confiável (também chamado de melhor esforço), ou seja, o pacote vem sem garantias, pode chegar desordenado, pode também chegar em duplicado ou perdido.

A Figura 15 representa o cabeçalho de um pacote IPv4 e IPv6. Existiu a necessidade de ser criado o IPv6, devido aos endereços em IPV4 estarem a acabar.

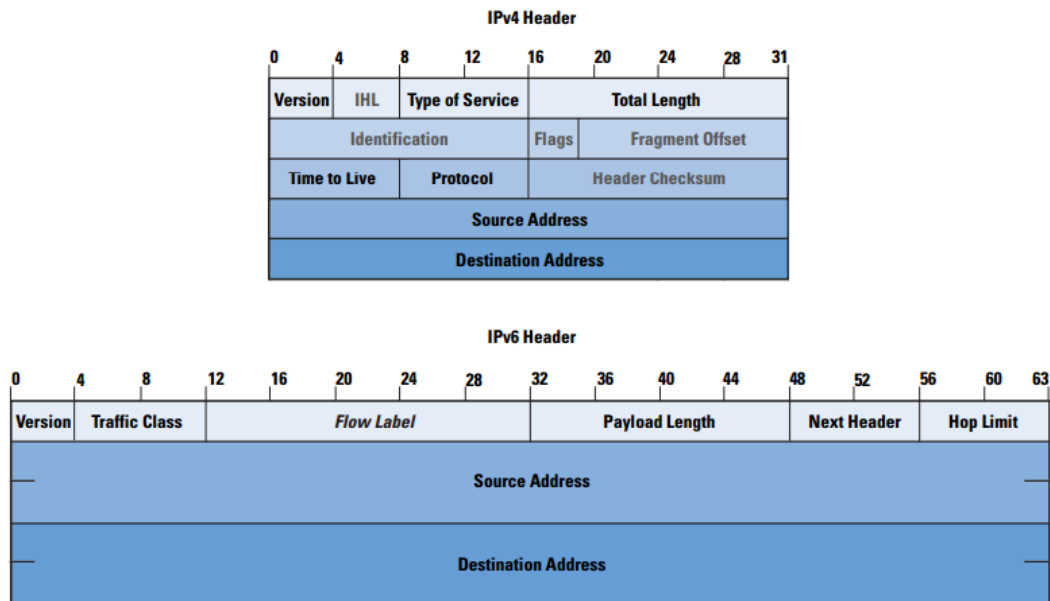


Figura 15 - Cabeçalho de um pacote IPV4 e IPV6 [19].

O IPv4 foi a quarta versão do protocolo IP, é um dos melhores protocolos actualmente na internet e o que teve maior adesão até aos dias de hoje. É um protocolo para uso em redes com comutação de pacotes, opera com um modelo de entrega de melhor esforço, na medida que não garante a entrega, nem garante uma sequência adequada ou evita a entrega em duplicado. Os endereços de IPv4 podem ser representados em qualquer notação que expresse um valor inteiro de 32 bits. São geralmente criados e separados com um ponto, em que consistem em quatro octetos de endereços. Sustenta aproximadamente 4.29 milhões de endereços IPs pelo mundo todo, neste momento estes endereços estão praticamente quase ou todos utilizados.

O IPv6 é a sexta versão do protocolo IP e é o sucessor natural do IPv4. Faz praticamente o mesmo que o IPv4, mas tem um tamanho de 128 bits. Devido à crescente procura de cada vez mais dispositivos ligados à internet, verificou-se que seria necessário criar uma nova versão do protocolo IP. Este protocolo está sendo implementado gradualmente na internet e deve de funcionar lado a lado com o IPv4. A longo prazo o IPv6 irá substituir o IPv4, devido a este suportar cerca de 3.4×10^{38} endereços. Este assunto está a ser encarado com uma grande preocupação, devido a já não haver em alguns países endereços novos de IPv4 para distribuírem [29].

2.4.1. Router IP

O router IP é um dispositivo que encaminha pacotes de dados entre as diversas redes de computadores, este é conectado a duas ou mais linhas de dados. Quando um pacote de dados chega, o router verifica a informação de endereço no pacote e encaminha este para o melhor caminho que tiver na sua tabela de encaminhamento.

Os routers ópticos são um dos elementos chaves numa rede de comutação de pacotes, estes localizam-se nos nós da rede óptica, fazendo parte da camada de transporte da mesma. São os principais responsáveis pelo processamento e encaminhamento da informação, dado que são

os equipamentos com mais inteligência ao longo da rede de transmissão. Uma das suas características é poderem substituir o cabeçalho de pacotes em tempo real em situações onde é necessário efectuar a troca de etiquetas, bem como realizar a conversão do comprimento de onda, de modo a assegurar a regeneração do sinal óptico de dados e cabeçalho, possibilitando uma cascata com vários nós.

A Figura 16 demonstra as funções de um router. As funções de encapsulamento e conversão são utilizadas para interligar duas redes com tecnologias da camada 2, tais como o ATM, *frame relay* e *Ethernet*. As funções de processamento e classificação de pacotes, servem essencialmente para a análise dos cabeçalhos dos pacotes que passam no *router*, classificando-os com a informação aí existente, nomeadamente os endereços de origem e destino. As funções de encaminhamento funcionam com base na tabela de encaminhamento e servem para indicar qual o próximo destino do pacote. As funções de encaminhamento são responsáveis pelo sincronismo entre os routers de forma a manterem constantemente as tabelas de encaminhamento actualizadas.

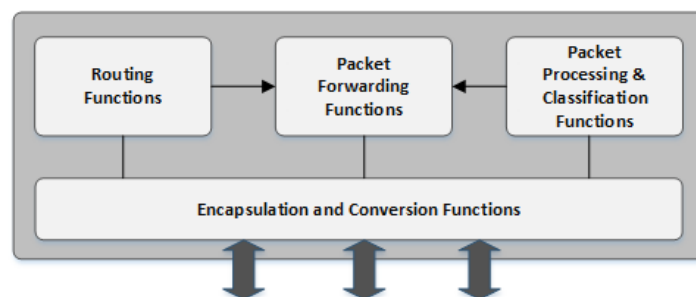


Figura 16 - Funcionalidades do router [19].

O router executa funcionalidades até à camada 3 da rede, nesta camada são executadas as funcionalidades acima descritas.

Na Figura 17 é demonstrada a arquitectura genérica de um router IP, esta arquitectura é composta por 4 componentes:

- **Portos de entrada** - executam diversas funções, tais como, a terminação da ligação física que chega ao router e que está associada à caixa mais à esquerda de *Input port* representada na Figura 17. Um porto de entrada também executa tarefas ao nível da camada 2 de *Data Link*, de modo a poder interagir com outro equipamento noutra extremidade da ligação na mesma camada, esta situação corresponde à caixa do meio dos portos de entrada e saída. A caixa mais à direita do porto de entrada, é talvez a mais importante, 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 sinalização são directamente encaminhados para o *Routing Processor*;
- **Switching fabric** – encontra-se totalmente integrado dentro do próprio router e tem a funcionalidade de interligar os portos de entrada com os portos de saída onde devem de ser encaminhados cada um dos pacotes;
- **Porto de saída** – aloja os pacotes recebidos de *switching fabric* e encaminham pela ligação física do porto, efectuando as funcionalidades necessárias da camada de ligação e física. No caso de os portos serem bidireccionais, o porto de saída está directamente associado a um porto de entrada, encontrando-se ambos na mesma carta de linha (placa

de circuito impresso que contêm um ou mais porto de entrada, estes estão ligados à *switching fabric*);

- **Processador de encaminhamento** – executa os protocolos de encaminhamento, calcula e mantém as tabelas de encaminhamento e estado das ligações. É também responsável pelas funcionalidades de gestão de rede.

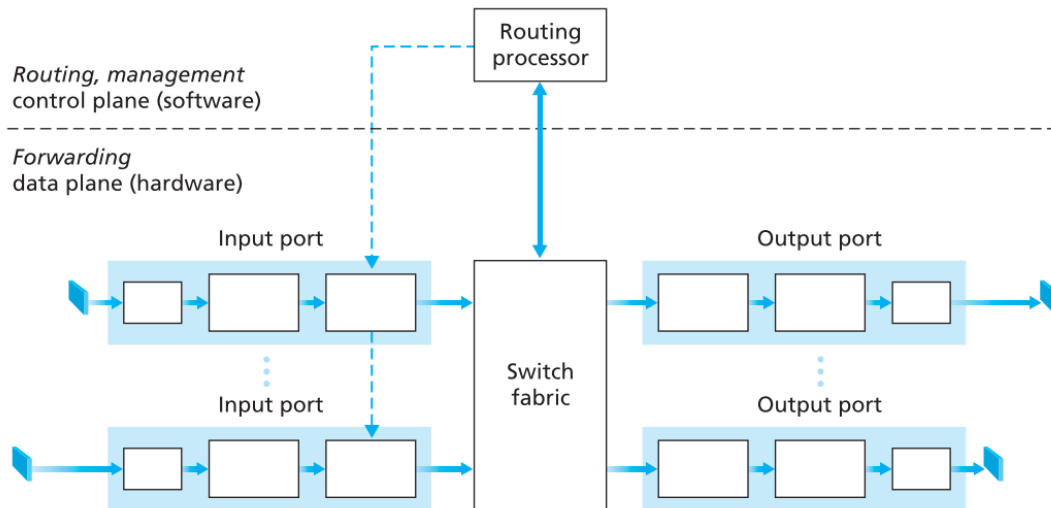


Figura 17 - Arquitectura genérica do router IP [6].

2.4.2. Encaminhamento IP

O encaminhamento IP é uma das funcionalidades mais importantes da engenharia de tráfego e consequentemente das redes IP.

Na camada de transmissão da internet, assim que chega um pacote 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 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 Short Path Protocol*) e BGP (*Border Gateway Protocol*)) não entra para o cálculo do caminho com o menor custo, o nível de congestionamento da rede [30].

O encaminhamento IP define a forma como são construídas as tabelas de routing, estas podem ser construídas através de dois algoritmos distintos, *distance-vector* e *link-state*.

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 disso, cada nó começa por ter o conhecimento das ligações directas entre si, e por forma a calcular o custo de uma ligação até ao destino, os

diversos 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 dessa informação de *distance-vector*, 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 *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 diversos factores, podendo em certos casos requerer um maior número de iterações e consequentemente 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 o custo alterado.

Algoritmos do tipo *link-state*, calcula 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* 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 o facto de conseguir geralmente tempos de convergência menores.

O algoritmo de encaminhamento do tipo *link-state* usado na internet é conhecido por algoritmo de *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.

A internet é uma rede muito grande, sendo impensável que cada *router* conheça a topologia de toda a internet. Assim a rede encontra-se dividida em diversos domínios designados por AS (*Autonomous System*) interligados entre si. É assim utilizado um protocolo de interdomínio para efectuar o *routing* entre os diversos domínios, tal como o BGP.

2.4.3. 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 de encaminhamento descritos em cima, tais como, *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 de serviços de internet (ISP – *Internet Service Provider*) responsáveis por uma parte da 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), também designado por domínio, em que cada AS consiste num conjunto de routers ligados

entre si que são normalmente controlados pelo ISP. Tipicamente um AS está associado a um ISP, contudo um ISP pode ser responsável por diversos AS. Com esta solução, todos os *routers* dentro do mesmo AS utilizam o mesmo protocolo de encaminhamento, denominado de protocolo de encaminhamento intra-domínio e que requer que seja o mesmo entre domínios adjacentes.

A Figura 18 apresenta um exemplo simplista da rede de internet dividida por domínios intra-domínios e inter-domínios. Os *routers* RTA, RTB, RTC e RTD são os routers de fronteira ou *Gateway routers*.

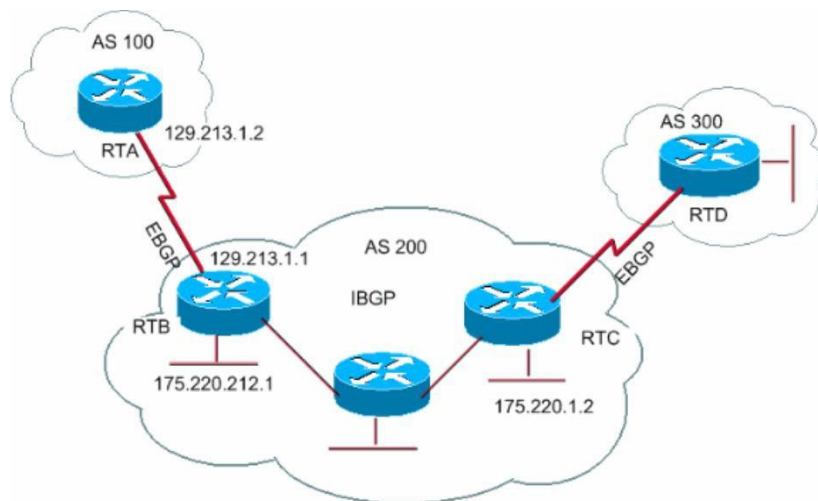


Figura 18 - Modelo hierárquico simplista da rede de Internet

2.4.4. Encaminhamento intra-domínio

Na rede de Internet os protocolos de encaminhamento intra-domínios usados mais conhecidos são o *Routing Information Protocol* (RIP) e *Open Shortest Path First* (OSPF), um outro protocolo relacionado com o OSPF é o IS-IS [30].

O RIP foi um dos primeiros protocolos a ser desenvolvido, este utiliza um algoritmo do tipo *distance-vector*. Utiliza como métrica de custo o número de saltos em que cada ligação entre dois *routers* é contabilizada como um salto. No RIP tal como no OSPF, o número de saltos (*hops*) é contabilizado desde o router de origem até ao router de destino. O custo máximo de um caminho em RIP está limitado a 15 saltos. *Routers* que usem o protocolo RIP guardam a tabela de encaminhamento para todas as sub-redes conhecidas, que contenham o endereço da sub-rede de destino com a interface de saída associada, mas também o custo traduzido em número 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 [30].

O protocolo OSPF é outro protocolo também de encaminhamento utilizado na rede de internet, é usado tipicamente por ISPs, tal como redes núcleo, enquanto que o protocolo RIP é mais usados por redes ISPs que operam redes a uma escala menor (com um custo máximo de 15 saltos), tal como redes metropolitanas. O protocolo OSPF foi elaborado como sucessor do 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, o que permite aos

routers do domínio criar um mapa topológico de todo o domínio, esta troca de informação ocorre sempre que haja alterações ao custo de uma ligação e periodicamente em períodos não superiores a 30 minutos (tempo por *default*, pode ser alterado para mais ou menos tempo) mesmo sem alterações.

No protocolo OSPF o algoritmo para cálculo de menor custo é o algoritmo de *Dijkstra* que usa como referência o caminho do domínio para o cálculo da árvore de caminhos de menor custo para todas as sub-redes do domínio. A 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 como base nesta informação que é calculado o custo da ligação, sendo o custo inversamente proporcional à capacidade de transmissão da ligação, sendo calculado pela expressão $Cost = \frac{10^8}{BW [b/s]}$, onde BW representa a capacidade 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, pode ser vantajoso no controlo de carga na rede de internet. É uma das maneiras de indicar à rede que o tráfego deve de seguir por determinado caminho em detrimento de outro.

As mensagens de sinalização de OSPF são transportadas directamente por IP com um protocolo de camada superior para OSPF, que deve de 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 por dois tipos de autenticação, a autenticação simples onde a mesma password é configurada em cada *router* e é trocada em formato de texto entre *routers*, este método não é claramente muito seguro. O outro tipo de autenticação passível é usar o MD5, que usa chaves secretas partilhadas em todos os *routers* e não transmite a 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, este pode ser distribuído por diversos caminhos com o mesmo factor de custo, executando desta maneira o balanceamento da rede.
- **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 assim 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, os *area border routers* são responsáveis por encaminhar pacotes para fora da área. Essa é talvez a funcionalidade mais importante do protocolo OSPF.

2.4.5. Encaminhamento inter-domínio

Na rede global de internet é usado apenas o protocolo BGP para encaminhamento do tráfego entre domínios, este deve de ser capaz de calcular o melhor caminho a seguir entre a origem e destino em que exista a necessidade de passar por diversos domínios. Este protocolo também é responsável anunciar a existência de sub-redes num domínio ao resto da rede internet [30].

Com o protocolo BGP, os *routers* com ligação directa, estabelecem uma ligação TCP no porto 179 semipermanente entre ambos que passam a ser designados de BGP *peers*. A ligação ou sessão BGP entre dois *routers* tanto é feita entre *gateways* de domínios 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 endereços de sub-redes ou 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 da internet a todos os domínios. Os novos endereços de sub-redes recebidos num router, fazem com que seja criada uma nova entrada na tabela de encaminhamento.

2.5. IP sobre WDM – Arquitectura de Multicamadas

Nas redes core são utilizadas tecnologias ópticas para suportar a infra-estrutura física básica e de forma a atingir alta velocidade, alta capacidade, escalabilidade, etc. Para controlar de forma inteligente e gerir a rede de fibra óptica, vários equipamentos de gestão de alto nível e tecnologias têm sido desenvolvidos.

Os custos excessivos apresentados pelas arquitecturas multicamadas nas redes core faz com que o modelo de duas camadas, IP sobre WDM, seja considerado o mais atraente para transportar tráfego IP sobre uma infra-estrutura óptica. O consumo energético associado a este tipo de modelo tem assim em consideração ambas as camadas de rede. Esta arquitectura de duas camadas, entre outras virtudes, oferece maior flexibilidade, fiabilidade, melhor eficiência, maior escalabilidade, transporte óptico verdadeiramente transparente e redução de custos [31].

O consumo de energia nas redes core começa a estar na mira das preocupações devido a dois motivos. Primeiro devido ao aumento da percentagem de energia consumida pelas redes core e com tendência a aumentar significativamente com a crescente popularidade das aplicações intensivas, como a IPTV de alta definição. Além disso, como o consumo de energia das redes core é muitas vezes limitado a alguns locais, a dissipação do calor torna-se uma questão importante a considerar, logo minimizando o consumo de energia sobre a rede core WDM é uma questão importante [32].

As redes ópticas são compostas por equipamentos basados em WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), tecnologia que utiliza cabos de fibra óptica. Desde que se utiliza a tecnologia WDM os sistemas têm capacidades perto do nível de Terabits, as capacidades das redes podem

ser aumentadas sem ser necessário adicionar novos cabos. Desenvolvimentos importantes em WDM provocam a eliminação de problemas de capacidade.

WDM é um método de multiplexação de sinais a diferentes comprimentos de onda sobre a fibra. É possível transportar 8, 16, 32, 80 e 160 canais de tráfego usando WDM. Esta tecnologia encontra-se representada na Figura 19.

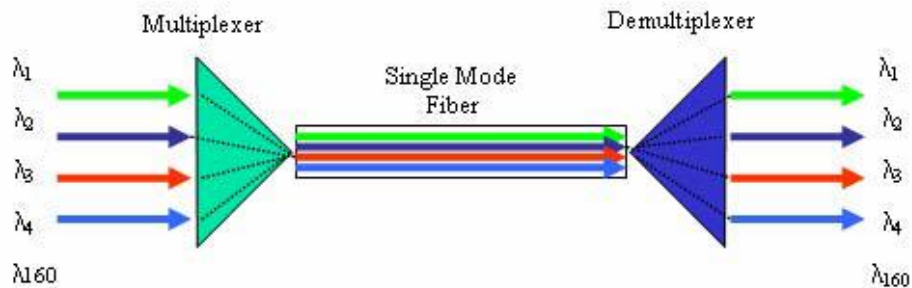


Figura 19 - Transmissão em WDM com capacidade para 160 canais [33]

As redes ópticas baseadas em IP/WDM serão um dos principais componentes das redes de nova geração. Nas redes IP/WDM, as conexões cruzadas ópticas (OXC) são interligados por *links* ópticos de modo a construir uma camada óptica, os *routers* IP são anexados aos OXC através de *transceivers* ópticos. A camada óptica fornece conectividade ponto-a-ponto entre *routers* IP na forma de caminho de luz.

O mapeamento de pacotes IP em comprimentos de onda necessitam de realizar uns passos intermédios de encapsulamento. Existem várias propostas de padronizações desse mapeamento, no IETF (Internet Engineering Task Force), no ANSI (American National Standards Institute) e no ITU, que são de forma geral complementares e baseados em enquadramentos SDH/SONET, Gigabit Ethernet e/ou comutação multiprotocolo por rótulos MPLS (Multi-Protocol Label Switching). As mais importantes são baseadas em enquadramentos SDH/SONET ou Gigabit Ethernet, onde os pacotes IP são encapsulados em pacotes PPP (Point-to-Point Protocol), o que fornece encapsulamento multiprotocolo, controlo de erro e funções de controlo de inicialização.

A tecnologia SDH/SONET é uma estrutura fortemente multiplexada, com o cabeçalho entrelaçado entre os dados de uma forma complexa. Isto permite que os dados encapsulados tenham a sua própria taxa de dados e possam “flutuar” em relação à estrutura e à taxa de dados SDH/SONET. Esta intercalação permite uma latência muito baixa para os dados encapsulados. Contudo o processo de segmentação pode ser bastante custoso em termos de processamento, o que provoca uma degradação considerável no desempenho da rede. A principal vantagem é que transporta sinalização e informações de gestão de cabeçalho. Muitas dessas informações podem ser minimizadas se tais funções forem incorporadas pelos dispositivos IP.

Existem dois tipos de redes WDM, a primeira consiste em ligações estáticas ponto a ponto de routers IP, não sendo uma arquitectura muito flexível devido à sua configuração estática da rede de transporte, necessitando assim de uma manutenção humana de modo a poderem ser feitas as alterações e encaminhamentos da rede de transporte. A segunda arquitectura de rede de transporte IP sobre WDM é reconfigurável, não tem os routers interligados por canais estáticos. Assim nesta arquitectura a topologia física é diferente da topologia virtual. A topologia física WDM é composta por equipamentos de rede interligados por fibras ópticas, 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.

Nas duas tecnologias de rede, os pacotes IP podem ser mapeados de diferentes formas sobre WDM.

Na Figura 20 encontra-se representada as diferentes formas de mapeamento de IP sobre WDM.

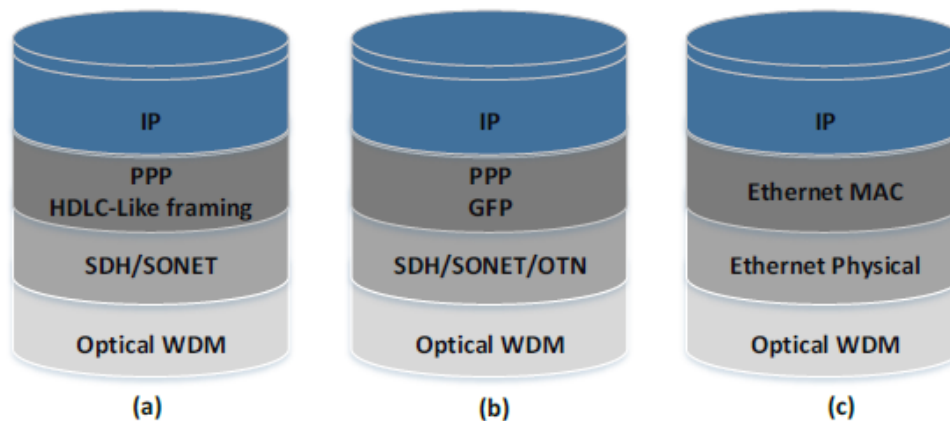


Figura 20 - Possibilidades de arquiteturas de multicamadas para mapeamento IP sobre WDM [19].

Das três possibilidades de mapeamento de IP sobre WDM apresentadas na Figura 20, em (a) é apresentada a variante conhecida como POS (*Packet-Over-SONET*) /SDH, onde os pacotes IP são mapeados em *frames* PPP, sobre os quais é feito o 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 depois serem posteriormente mapeadas sobre SONET, SDH ou OTN (*Optical Transport Network*) usando a técnica de multiplexagem GFP (*Generic Framing Procedure*). Usando a vertente (c) as interfaces de *Ethernet* tais como 1G/10G/40G/100G 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 [19].

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 21, 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 bidireccional (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 comprimentos de onda.

Para cada nó ROADM, é usado um *Splitter* e *Combiner*, componente passivo, ligado a cada um dos WXC, por forma a que o sinal proveniente de cada WXC seja transmitido para todos os outros WXC, da mesma forma que cada WXC receba sinal de todos os restantes WXC do ROADM. No exemplo da Figura 21 é apresentado um nó ROADM com duas direcções de transmissão e a direcção para retirar e adicionar comprimento de onda.

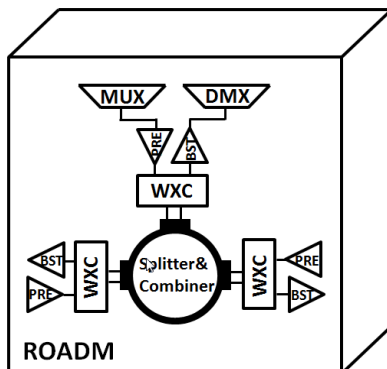


Figura 21 - Constituição do ROADM directionless [6].

2.6. Organizações e associações de standartização

Existem actualmente diversos grupos de investigação que estão directamente associados a entidades de standardização de telecomunicações, que recomendam que se siga diversas boas práticas de modo a obter o melhor rendimento/performance dos equipamentos.

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

2.6.1. 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 nove recomendações, sendo a destacar a ITU-T L.1300 [34] que inclui um conjunto de boas práticas a aplicar em datacenters. De igual forma, da série de recomendações ITU-T L.1400, o primeiro da série [35], apresenta os princípios gerais das metodologias de avaliação do impacto ambiental das ICT assim como 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.

2.6.2. IEEE

O IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) é uma associação sem fins lucrativos e tem como um dos principais objectivos a elaboração de normas na área eléctrica, electrónica, telecomunicações e de 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 da rede durante os períodos em que não exista um fluxo de dados suficiente para que exista a necessidade de ter todos os equipamentos a funcionar em simultâneo, colocando assim as interfaces em estado de baixo consumo [36] através da tecnologia LPI (*Low Power Idle*), pois cerca de 50% da energia é consumida pelos equipamentos quando este estão ligados [36]. Nesta norma estão incluídas as interfaces apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - 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
100BASE-T (Full Duplex)	RJ45	Cat. 5, 5e, 6, ou 7 (cobre)	100 m
10GBASE-T	RJ45	Cat. 5, 5e, 6, ou 7 (cobre)	55 m (Cat. 5e ou 6) 100 m (Cat. 6a ou 7)
10GBASE-KR	RJ45	PCB (Cobre)	1 m
10GBASE-KX4	RJ45	PCB (Cobre)	1 m

2.6.3. 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 relacionadas:

- 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 [37];

Baseando-se nestas três áreas e por incumbimento da Comissão Europeia para a responsabilidade de executar diversos mandatos, é de destacar o mandato 462 [38]. Em conjunto com o CEN (Comité Européen de Normalização) e a CENELEC (*European Committee for Electrotechnical Standardization*) foram já lançadas diversas normas, de modo a aplicar-se as boas práticas.

2.6.4. ATIS

A ATIS (*Alliance for Telecommunications Industry Solutions*) é uma das maiores organizações que contribui para o ITU, 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 [39]. 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;

2.6.5. 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 [40]. No âmbito da mesma foi também já publicado o *white paper* [41], 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: Modelos de redução de custo de implementação e custo operacional

O objectivo desta dissertação é efectuar a diferença entre o custo de implementação e o custo operacional em redes IP sobre WDM, com base no custo normalizado e no consumo energético dos equipamentos. O custo de implementação corresponde ao valor do custo normalizados que os operadores têm de gastar para obter os equipamentos, os custos normalizados utilizados nesta dissertação foram obtidos através do modelo de custo em trabalhos de investigação do IEEE [42, 43, 44], o custo funcional corresponde ao valor do custo do consumo energético por cada equipamento.

As arquitecturas de rede de transporte IP apresentadas no capítulo 2 fazem uso de equipamentos reconfiguráveis, nomeadamente os ROADMs, que proporcionam à rede a capacidade de adicionar e/ou retirar os comprimentos de onda que contenham tráfego que necessita ser processado pelos *routers* IP naquele nó de rede. Desta forma o tráfego transportado em comprimentos de onda que não necessitam de ser processados electronicamente nesse nó é óticamente comutado para outra direcção, sem ter de ser processado pelo *router* IP. Assim, é possível minimizar o processamento na camada IP, o número de interfaces activas no *router* IP e o número de conversões O-E-O (*Optical-Electrical-Optical*), traduzindo-se numa consequente redução do custo de implementação e custo operacional.

Quanto maior a capacidade da rede, mais equipamentos terão que ser instalados, deste modo iremos tentar reduzir o número de equipamentos ao máximo de forma a que se consiga uma relação sustentável entre custo dos equipamentos e o seu consumo, de modo a que a capacidade da rede não seja prejudicada.

É com base nestes conceitos que se efectuará uma avaliação ao modelo de optimização de custo e consumo recorrendo à programação linear inteira, MILP, com base no modelo proposto em [45] [46] para as redes *fixed-grid*, com base em [47] para as redes *flex-grid*.

Este modelo será testado com a topologia de uma rede da Alemanha, sendo que a implementação do modelo será efectuada através da plataforma *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio*, versão 12.6 [48]. Para avaliar a mais-valia, a nível energético, da utilização deste modelo de optimização, pretende-se optimizar o encaminhamento na rede em função do consumo energético dos equipamentos existentes e da capacidade dos canais existentes em cada ligação óptica. Para avaliar a mais-valia, a nível de custo de implementação, utiliza-se o custo normalizado dos equipamentos.

3.1. Descrição do modelo de optimização do custo de implementação MILP

Neste capítulo é apresentado em detalhe o modelo MILP para o custo de implementação utilizado para as redes IP sobre WDM em redes *fixed-grid*, utilizando canais com diferentes velocidades de transmissão de 10 Gbps, 40 Gbps e 100 Gbps a passar na mesma fibra óptica, em redes MLR. Nas secções posteriores serão apresentados outros modelos utilizados dando destaque às alterações efectuadas relativamente a este primeiro modelo.

O modelo apresentado pretende minimizar o custo em redes IP sobre WDM segundo a aplicação de um conjunto de restrições. Assim, é necessário definir índices, constantes, parâmetros e variáveis de decisão do modelo.

Os índices identificam fundamentalmente a origem e o destino das várias camadas de rede. Os dados de entrada neste modelo são definidos como constantes. Com base nas constantes de entrada e na arquitectura de rede, são posteriormente calculados os parâmetros de rede. Finalmente, as variáveis de decisão podem variar no intervalo definido de forma a cumprir o objectivo definido pelo modelo.

Índices:

- $m, n \in N$ Índice dos nós de origem m e de destino n da topologia física, na camada óptica. A ligação física consiste na ligação destes dois nós;
- $i, j \in N$ Índice dos nós de origem i e de destino j da 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;
- $c \in NR$ Índice dos canais de transmissão com diferentes capacidades de transmissão, na gama NR;

Em que N corresponde ao número de nós da topologia física e NR número de canais com diferentes capacidades de transmissão suportados na fibra, MLR.

Constantes:

- $T = (N, E)$ Topologia física composta por N nós e E ligações físicas. Os nós são constituídos por comutadores ópticos e *routers* IP, em que as ligações físicas E são estabelecidas por fibra óptica entre comutadores ópticos;
- L_{mn} Distância física entre os nós m e n em metros. Esta distância será utilizada para determinar o número de EDFA necessários em cada ligação durante o pré-processamento, secção 3.1.1;
- λ^{sd} A matriz de previsão do custo de tráfego entre nós s, d em Mbps. É apenas suportado tráfego simétrico, ou seja, o tráfego enviado por um nó é igual ao tráfego recebido no mesmo nó;

- W Número de comprimentos de onda suportados por fibra MLR;
- B_c Capacidades de transmissão dos canais MLR suportados, em Mbps;
- S Distância máxima entre dois amplificadores ópticos numa ligação física, em metros;
- C_{cr}^c Consumo médio da cada porta (interface) bidireccional dos *routers* IP, para cada um dos canais com capacidades de transmissão B_c , em Watt;
- C_e Consumo médio de um amplificador óptico em Watt;
- C_{pre} Consumo médio de pré amplificador, *pre-amplifier*, por fibra óptica à entrada de cada nó óptico na transmissão e por cada nó para adicionar e retirar canais, em Watt;
- C_{bst} Consumo médio de amplificador de potência, *booster*, por fibra óptica à saída de cada nó óptico na transmissão e por cada nó para adicionar e retirar canais, em Watt;
- C_{wxc} Consumo médio de comutador de comprimento de onda, WXC (*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, em Watt;

Parâmetros:

- $A_{mn} \in N$ Número de amplificadores ópticos em cada ligação física entre m e n . Este valor é obtido através de pré-processamento, secção 3.1.1, antes de se executar o algoritmo MILP;

Variáveis de decisão:

- $\lambda_{ij}^{sd} \in N$ Volume de tráfego de s para d que atravessa a ligação virtual entre i e j , em Mbps;
- $C_{ij}^c \in N$ Número de canais de capacidade c na ligação virtual entre i e j ;
- $W_{mn}^{ij,c} \in N$ Número de canais de capacidade c entre i e j que atravessa a ligação física entre m e n ;
- $W_{mn}^c \in N$ Número de canais de capacidade c na ligação física m e n ;
- $f_{mn} \in N$ Número de fibras ópticas na ligação física entre m e n .

3.1.1. Pré-processamento de parâmetros

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

- A_{mn} Calculado com o maior número inteiro inferior ou igual a $(\frac{L_{mn}}{S})$.
Assim a cada distância de S é colocado um amplificador de linha.

3.1.2. Objectivo e restrições do modelo

O modelo adoptado concentra-se em minimizar o custo total pelo qual são responsáveis equipamentos como *router* IP, EDFA e camada WDM. Na equação 3.1 é apresentada a formulação matemática da função objectivo do problema.

- **Objectivo: minimizar**

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

$$+ \sum_{i \in N} \sum_{j \in N: i \neq j} \sum_{c \in NR} C_{ij}^c \times C_{cr}^c \quad (2) \quad (3.1)$$

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

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

Analisando a função objectivo verifica-se que esta é formada por 4 partes, representados na equação como (1) a (4).

A expressão (1) traduz o custo considerado em cada nó para adicionar e/ou retirar comprimentos de onda de/para o nó de índice i . A expressão (2) considera o custo na camada IP em que cada canal óptico com capacidade B está associado uma interface bidireccional WDM do *router* IP. Na expressão (3) é considerado o custo por cada direcção onde são utilizados pré-amplificadores e amplificadores de potência, em conjunto com o WXC responsável por seleccionar os comprimentos de onda a transmitir na mesma direcção. Por último a expressão (4) considera o custo dos amplificadores ópticos, EDFA, colocados ao longo das ligações físicas por fibra óptica.

Apresentada a função objectivo e de forma a cumprir um conjunto regras necessárias, encontram-se descritas as restrições associadas ao modelo:

- Garantir que a rede suporta o tráfego exigido;
- Garantir a conservação de tráfego nos nós de rede da camada WDM e IP;
- 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.

As restrições necessárias ao modelo são definidas matematicamente da seguinte forma:

- **1ª Restrição**

$$\sum_{j \in N: i \neq j} \lambda_{ij}^{sd} - \sum_{j \in N: i \neq j} \lambda_{ji}^{sd} = \begin{cases} \lambda^{sd} & i = s \\ -\lambda^{sd} & i = d \\ 0 & \text{outros} \end{cases} \quad \forall s, d, i, j \in N: s \neq d \quad (3.2)$$

A primeira restrição representa a conservação do fluxo de tráfego na camada IP, equação 3.2. Assim do nó de origem, s , são transmitidos λ^{sd} Mbps para o nó de destino, d . O resultado $-\lambda^{sd}$ indica que no nó d são recebidos λ^{sd} Mbps tendo como origem o nó s . Ao invés de que o resultado λ^{sd} indica que no nó s são adicionados λ^{sd} Mbps que tem como destino o nó d . Para os nós intermédios de uma ligação, todo o tráfego de s para d que chega ao nó tem de ser encaminhado, por esse motivo a expressão é igual zero. Esta restrição adiciona possibilidade da divisão do tráfego por múltiplos caminhos.

- **2ª Restrição**

$$\sum_{s \in N} \sum_{d \in N: s \neq d} \lambda_{ij}^{sd} \leq \sum_{c \in NR} C_{ij}^c \times B_c \quad \forall i, j \in N: i \neq j \quad (3.3)$$

A segunda restrição, equação 3.3, define que todos canais de capacidade B na ligação virtual entre i e j têm capacidade para alocar o tráfego entre todos os pares s e d , que tenham tráfego a passar pela ligação virtual entre i e j .

- **3ª Restrição**

$$\sum_{n \in N} W_{mn}^{ij,c} - \sum_{n \in N} W_{nm}^{ij,c} = \begin{cases} C_{ij}^c & m = i \\ -C_{ij}^c & m = j \\ 0 & \text{outros} \end{cases} \quad \forall i, j, m \in N: i \neq j; c \in NR \quad (3.4)$$

A terceira restrição representa a conservação do fluxo de canais ópticos de capacidade B de i para j , equação 3.4. Todos os canais que chegam a um nó intermédio têm de ser encaminhados até ao nó de destino. Neste caso, todos os canais a transmitir entre i e j não necessitam de usar as mesmas ligações físicas i e j , podendo ser divididos ao longo do caminho por múltiplas ligações físicas m e n alternativas.

- **4ª Restrição**

$$W_{mn}^c = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N: i \neq j} w_{mn}^{ij,c} \quad \forall m, n \in N: m \neq n; c \in NR \quad (3.5)$$

A quarta restrição, equação 3.5, define que o número de comprimentos de onda com capacidade de transmissão B entre dois nós m e n , deve ser igual à soma de todos os canais com capacidade B entre todas as ligações físicas i e j , que passam por m e n .

- **5ª Restrição**

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N: i \neq j} \sum_{c \in NR} w_{nm}^{ij,c} \leq W \times f_{mn} \times T_{mn} \quad \forall m, n \in N: m \neq n \quad (3.6)$$

A quinta restrição, equação 3.6, tem o intuito de garantir que todas as fibras ópticas entre dois nós m e n têm capacidade para suportar o número de canais ópticos que circula entre os dois nós em questão.

- **6ª Restrição**

$$C_{ij}^c, \lambda_{ij}^{sd}, w_{mn}^c, f_{mn} \geq 0 \quad \forall m, n, i, j, s, d \in N: c \in NR \quad (3.7)$$

A sexta restrição, equação 3.7, limita as variáveis de decisão a inteiras e não negativas.

3.2. Descrição do modelo de optimização do custo operacional MILP

Neste capítulo é apresentado em detalhe o modelo MILP para o custo operacional utilizado para as redes IP sobre WDM em redes *fixed-grid*, utilizando canais com diferentes velocidades de transmissão de 10 Gbps, 40 Gbps e 100 Gbps a passar na mesma fibra óptica, possível em redes MLR. Nas secções posteriores serão apresentados outros modelos utilizados dando destaque às alterações efectuadas relativamente a este primeiro modelo.

O modelo apresentado é igual ao modelo do custo de implementação com as excepções de:

Índices:

- Iguais ao custo de implementação

Constantes:

- E_{cr}^c Consumo médio de cada porta (interface) bidireccional dos *routers* IP, para cada um dos canais com capacidades de transmissão B_c , em Watt;
- E_e Consumo médio do amplificador óptico em Watts;
- E_{pre} Consumo médio do pré amplificador, *pre-amplifier*, por fibra óptica à entrada de cada nó óptico na transmissão e por cada nó para adicionar e retirar canais, em Watt;
- E_{bst} Consumo médio do amplificador de potência, *booster*, por fibra óptica à saída de cada nó óptico na transmissão e por cada nó para adicionar e retirar canais, em Watts;
- E_{wxc} Consumo médio do comutador de comprimento de onda, WXC (*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, em Watts;

Parâmetros:

- Iguais ao custo de implementação

Variáveis de decisão:

- Iguais ao custo de implementação

3.2.1. Pré-processamento de parâmetros

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

- Iguais ao custo de implementação

3.2.2. Objectivo e restrições do modelo

O modelo adoptado concentra-se em minimizar o custo total pelo qual são responsáveis equipamentos como *router* IP, EDFA e camada WDM. Na equação 3.8 é apresentada a formulação matemática da função objectivo do problema.

- **Objectivo: minimizar**

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

$$+ \sum_{i \in N} \sum_{j \in N: i \neq j} \sum_{c \in NR} C_{ij}^c \times C_{cr}^c \quad (2) \quad (3.8)$$

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

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

Analisando a função objectivo verifica-se que esta é formada por 4 partes, representados na equação como (1) a (4).

A expressão (1) traduz o custo operacional considerado em cada nó para adicionar e/ou retirar comprimentos de onda de/para o nó de índice i . A expressão (2) considera o custo operacional na camada IP em que cada canal óptico com capacidade B está associado uma interface bidireccional WDM do *router* IP de custo. Na expressão (3) é considerado o custo operacional por cada direcção onde são utilizados pré-amplificadores e amplificadores de potência, em conjunto com o WXC responsável por seleccionar os comprimentos de onda a transmitir na mesma direcção. Por último a expressão (4) considera o custo operacional dos amplificadores ópticos, EDFA, colocados ao longo das ligações físicas por fibra óptica.

Apresentada a função objectivo e de forma a cumprir um conjunto regras necessárias, encontram-se descritas as restrições associadas ao modelo:

- Garantir que a rede suporta o tráfego exigido;
- Garantir a conservação de tráfego em nós de rede na camada WDM e IP;
- 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.

As restrições implementadas no custo operacional são as mesmas implementadas no custo de implementação.

3.3. Modelos de Optimiza  o

Neste subcapítulo são apresentados e descritos os diferentes modelos de optimiza  o abordados neste trabalho. Estes diferem na própria arquitectura de rede, tipo de encaminhamento óptico, tipo de modula  o e capacidade de transmissão dos canais a utilizar na rede, multiplexagem e critério de encaminhamento.

Desenvolveram-se modelos para redes *fixed-grid* e *flex-grid* de forma a analisar o custo de implementa  o e o custo operacional das redes. Foram considerados critérios de encaminhamento de tráfego com o menor custo/consumo da rede, caminho mais curto e caminho mais curto com menor custo/consumo.

Todos os modelos abordados ao longo deste trabalho são do tipo MLR com *bypass*   pticos. No entanto dependendo da tecnologia utilizada para a aloca  o de comprimentos de onda, faz uso de canais com capacidades diferentes. Assim para as redes *fixed-grid* considerou-se canais com capacidade de transmissão de 10 Gbps, 40 Gbps e 100 Gbps.

Nas redes *flex-grid* foram considerados dois cenários distintos de modo a tirar partido da flexibilidade na aloca  o de espectro. Em ambos os cenários consideram-se canais com capacidades de transmissão de 100 Gbps, 400 Gbps e 1 Tbps.

No primeiro cenário consideram-se canais com modula  o DP-QPSK que    a op  o de transmissão mais adequada para as redes de próxima gera  o, uma vez que possibilita maior alcance com baixo consumo energético [49]. No segundo cenário considerou-se uma modula  o de nível superior, 16-QAM, que possui uma maior eficiência espectral, no entanto o alcance óptico deste tipo de modula  o    inferior [50].

Na Figura 22 encontra-se descrito um resumo dos modelos de custo operacional e operacional considerados nesta disserta  o.

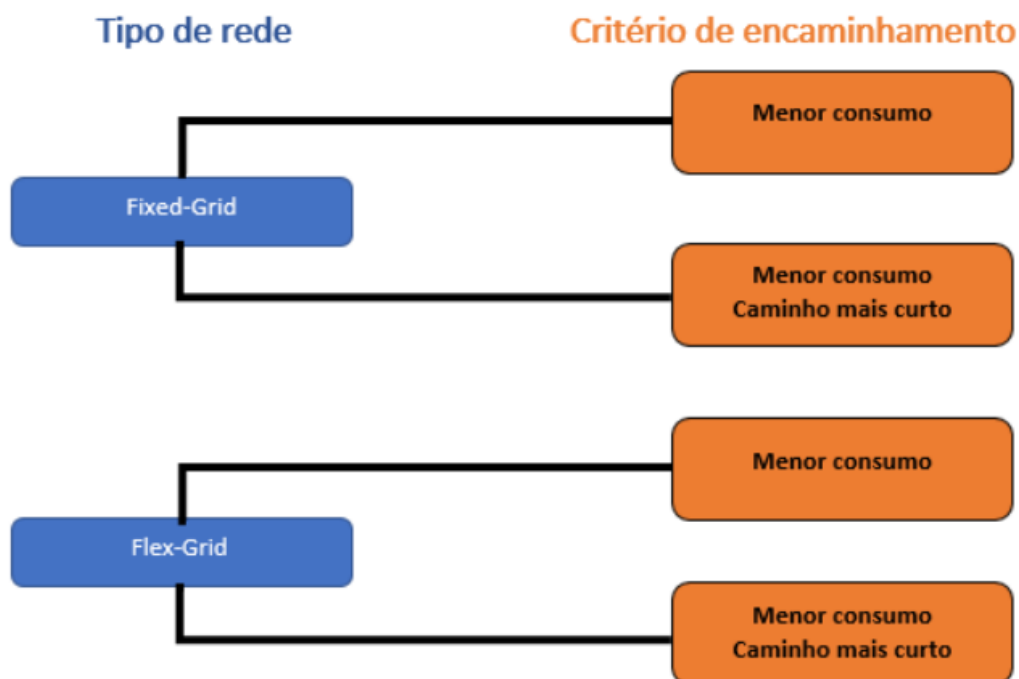


Figura 22 - Modelo de Optimização do custo de implementação e operacional

3.3.1. Modelo custo de implementação: Fixed-grid - menor custo de implementação

Este modelo pelo facto de ser MLR permite liberdade e selecção do tipo de canal, capacidade de transmissão, de acordo com o que se achar mais adequado para passar todo o tráfego da rede e minimizando o custo total da rede. Este é o modelo que se encontra descrito anteriormente na secção 3.1 e que serve como base para todos os outros modelos.

3.3.2 Modelo custo de implementação: Fixed-grid - menor custo de implementação e caminho mais curto

Neste modelo o objectivo final consiste na minimização do custo total da rede considerando a junção do menor custo, descrito na secção 3.3.1, com a escolha do caminho mais curto. Assim, a formulação matemática da função objectivo para este modelo encontra-se descrita na equação 3.15.

- **Objectivo: minimizar**

$$\begin{aligned}
& \sum_{i \in N} (C_{pre} + C_{bst} + C_{wxc}) \\
& + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N: i \neq j} \sum_{c \in NR} C_{ij}^c \times C_{cr}^c \\
& + \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} (C_{pre} + C_{bst} + C_{wxc}) \times f_{mn} \\
& + \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} C_e \times A_{mn} \times f_{mn} \\
& + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N: i \neq j} \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} W_{nm}^{ij,c} \times L_{mn}
\end{aligned} \tag{3.15}$$

3.3.3 Modelo custo de implementação: Flex-grid - menor custo de implementação

Nas arquitecturas WDM associadas a redes *flex-grid* existem características fundamentais que não se encontram implementadas nas redes WDM actualmente existentes. A funcionalidade chave consiste no provisionamento dinâmico de recursos espectrais nas ligações, introduzindo um grande paradigma associado às redes *flex-grid*, também conhecido na literatura como RWSA (*Routing, Wavelength assignment, and Spectrum Allocation*) [45], combinação dos problemas RWA e RSA. O problema RWSA consiste na alocação de espectro de modo a acomodar o tráfego tentando minimizar ao máximo a banda atribuída.

Considerando o modelo apresentado na secção 3.1 cuja função objectivo considera o menor custo e de modo a ter em conta as funcionalidades associadas as redes *flex-grid*, adicionaram-se e/ou alteraram-se os seguintes índices, constantes, parâmetros e variáveis de decisão.

Índices:

- $Sl \in SL$ Índice associado às *slots* dentro da gama *SL*;
- $lp \in LP$ Índice associado aos diversos *lightpaths* dentro da gama *LP*;
- SL Número de *slots* suportado por fibra, para uma largura de banda de 50 GHz considerou-se 80 *slots*;
- LP Número de *slots* suportados por fibra, para sinalização dos caminhos ópticos, *lightpath*, suportados por fibra;
- $SlotsB$ Largura espectral necessária para suportar todos os canais com capacidade de transmissão *Bc*, em número de *slots*;

- C_{wss} Custo médio de WSS, por cada fibra óptica de transmissão à saída do nó óptico para seleccionar comprimentos de onda a transmitir, em Watt;
- C_{mcs} Custo médio de MCS, por cada quatro fibras ópticas de transmissão em cada nó para adicionar e/ou retirar canais, em Watt;
- D_m Número de direcções, *degree*, por cada nó;

Parâmetros:

- N_{mcs_m} Número MCS necessários por nó, dado que cada MCS apenas suporta 4 direcções ou fibras. Calculado como maior número inteiro $\left(\frac{D_m}{4}\right)$.

Assim, por cada 4 direcções é adicionada uma MCS;

Variáveis de decisão:

- $C_{ij}^{c,lp} \in N$ ca os *lightpaths* estabelecidos com capacidade c na ligação virtual entre i e j ;
- $W_{mn}^{ij,c,lp} \in N$ ca os *lightpaths* estabelecidos com capacidade c na ligação virtual entre i e j que atravessa a ligação física entre m e n . Coloca a um a primeira *slot* ocupada pelo *lightpath* i ;
- $C_Slots_{ij}^l \in N$ ca as *slots* que se encontram ocupadas na ligação entre i e j , encontra-se a 1 caso esteja ocupada e 0 caso contrario;

A semelhança da função objectivo referente às redes *fixed-grid* verifica-se que esta também se encontra formulada em 4 blocos, representados na equação 3.16 de (1) a (4).

- **Objectivo: minimizar**

$$\sum_{m \in N} N_{mcs}^m \times C_{mcs} \quad (1)$$

$$+ \sum_{i \in N} \sum_{j \in N: i \neq j} \sum_{c \in NR} \sum_{lp \in LP} C_{ij}^{c,lp} \times C_{cr}^c \quad (2) \quad (3.16)$$

$$+ \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} C_{wss} \times f_{mn} \quad (3)$$

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

A expressão (1) traduz o custo considerado em cada nó para adicionar e/ou retirar comprimentos de onda de/para o mesmo. Sendo que o número de cartas MCS necessárias é calculado com base na topologia física e no número de fibras que ligam ao nó. A expressão (2) considera o custo na camada IP em que cada *lightpath* com capacidade Bc está associado uma interface bidireccional WDM do *router* IP. Na expressão (3) é considerado o custo por cada

direcção onde são utilizados WSS, que incorporam pré amplificadores e amplificadores de potência, responsáveis por seleccionar os comprimentos de onda a transmitir na mesma direcção. Por último a expressão (4) considera o custo dos amplificadores ópticos colocados ao longo das ligações físicas por fibra óptica.

Apresentada a função objectivo e de forma a cumprir um conjunto regras necessárias, encontram-se descritas as restrições associadas ao modelo que sofreram alterações e que se acrescentaram:

- **1ª Restrição**

$$\sum_{s \in N} \sum_{d \in N: s \neq d} \lambda_{ij}^{sd} \leq \sum_{c \in NR} \sum_{lp \in LP} C_{ij}^{c,lp} \times B_c \quad \forall i, j \in N: i \neq j; c \in NR \quad (3.17)$$

A primeira e segunda restrição foram alteradas de modo a ter em consideração o índice correspondente ao início de cada canal óptico de largura de banda flexível, *lightpath*.

Assim a primeira restrição, equação 3.17, define que todos os *lightpath* estabelecidos de capacidade c na ligação virtual entre i e j têm de ter capacidade para alocar o tráfego entre todos os pares s e d que tenham tráfego a passar pela ligação virtual entre i e j .

- **2ª Restrição**

$$\sum_{n \in N} W_{mn}^{ij,c,lp} - \sum_{n \in N} W_{nm}^{ij,c,lp} = \begin{cases} C_{ij}^{c,lp} & m = i \\ -C_{ij}^{c,lp} & m = j \\ 0 & \text{outros} \end{cases} \quad \forall i, j, m \in N: i \neq j; c \in NR; lp \in LP \quad (3.18)$$

A segunda restrição representa a conservação do fluxo dos *lightpath* estabelecidos de capacidade c de i para j , equação 3.18. Todos os *lightpath* que chegam a um nó intermédio têm de ser encaminhados até ao nó de destino. Neste caso, todos os *lightpath* a transmitir entre i e j não necessitam de usar as mesmas ligações físicas i e j , podendo ser divididos ao longo do caminho por múltiplas ligações físicas m e n alternativas.

- **3ª Restrição**

$$\sum_{sl \in SL} C_{Slots_{ij}^{sl}} = \sum_{c \in NR} \sum_{lp \in LP} C_{ij}^{c,lp} \times SlotsB^c \quad \forall i, j \in N: i \neq j \quad (3.19)$$

A terceira restrição, equação 3.19, é responsável pela alocação de espectro, *slots*. Esta define o número de *slots* ocupados na ligação virtual entre i e j , tem de ser igual ao número de *lightpaths* estabelecidos de capacidade c entre i e j tendo em conta o número de *slots* que cada canal de capacidade c ocupa.

- **4ª Restrição**

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N: i \neq j} \sum_{c \in NR} \sum_{lp \in LP} W_{nm}^{ij,c,lp} \times SlotsB^c \leq Wxf_{mn} \times T_{mn} \quad \forall m, n \in N: m \neq n \quad (3.20)$$

A quarta restrição, equação 3.20, tem o intuito de garantir que todas as fibras ópticas entre dois nós m e n têm capacidade para suportar o número de canais ópticos que circula entre os dois nós em questão. Sendo que neste modelo é necessário considerar o número de *slots* que cada tipo de canal ocupa.

- **5ª Restrição**

$$C_{ij}^{c,lp}, C_{Slots_{ij}}^{sl}, \lambda_{ij}^{sd}, W_{mn}^{ij,c,lp}, f_{mn}, N_{mcs}^i \geq 0 \forall m, n, i, j, s, d \in N; c \in NR; lp \in LP; sl \in SL \quad (3.21)$$

Na quinta restrição, equação 3.21, acrescentou-se as variáveis de decisão associadas a este modelo que devem ser inteiras e positivas.

- **6ª Restrição**

$$N_{mcs}^m \geq \frac{(\sum_{n \in N} f_{mn})}{4} \quad \forall m \in N \quad (3.22)$$

A sexta restrição, equação 3.22, adicionou-se com o intuito de garantir que o número de cartas MCS existentes em cada nó de rede tem todas as fibras ópticas entre dois nós m e n e têm capacidade para suportar o número de canais ópticos que circula entre os dois nós em questão. Cada MCS suporta até um máximo de quatro fibras ópticas e/ou direcções, sendo quatro o número máximo portas existentes para interligação das fibras.

- **7ª Restrição**

$$C_{ij}^{c,lp}, C_{Slots_{ij}}^{sl}, W_{mn}^{ij,c,lp} \leq 1 \quad \forall m, n, i, j \in N; c \in NR; lp \in LP; sl \in SL \quad (3.23)$$

A sétima restrição, equação 3.23, adicionou-se de modo a solucionar conflitos associados a sobreposição de *slots* ou *lightpath* na alocação de espectro. Assim garante que cada *slot* nas ligações virtuais entre i e j , só estão alocadas uma vez, a um *lightpath*.

3.3.4 Modelo custo de implementação: Flex-grid - menor custo de implementação e caminho mais curto

Neste modelo o objectivo final consiste na minimização do custo total da rede considerando a junção do menor custo, descrito na secção 3.3.1, com a escolha caminho mais curto para as redes *flex-grid*. Assim, a função objectivo resulta na função apresentada na equação 3.24.

- **Objectivo: minimizar**

$$\begin{aligned}
& \sum_{m \in N} N_{mcs}^m \times C_{mcs} \\
& + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N: i \neq j} \sum_{c \in NR} \sum_{lp \in LP} C_{ij}^{c,lp} \times C_{cr}^c \\
& + \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} C_{wss} \times f_{mn} \\
& + \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} C_e \times A_{mn} \times f_{mn} \\
& + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N: i \neq j} \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} \sum_{c \in NR} \sum_{lp \in LP} W_{mn}^{ij,c,lp} \times L_{mn}
\end{aligned} \tag{3.24}$$

3.3.5 Modelo custo operacional: Fixed-grid - menor custo operacional

Este modelo pelo facto de ser MLR permite liberdade e selecção do tipo de canal, capacidade de transmissão, de acordo com o que se achar mais adequado para passar todo o tráfego da rede e minimizando o custo total da rede. Este é o modelo que se encontra descrito anteriormente na secção 3.1 e que serve como base para todos os outros modelos.

3.3.6 Modelo custo operacional: Fixed-grid - menor custo operacional e caminho mais curto

Neste modelo o objectivo final consiste na minimização do consumo total da rede considerando a junção do menor consumo energético, descrito na secção 3.1, com a escolha caminho mais curto. Assim, a formulação matemática da função objectivo para este modelo encontra-se descrita na equação 3.25.

- **Objectivo: minimizar**

$$\begin{aligned}
& \sum_{i \in N} (E_{pre} + E_{bst} + E_{wxc}) \\
& + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N: i \neq j} \sum_{c \in NR} C_{ij}^c \times E_{cr}^c \\
& + \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} (E_{pre} + E_{bst} + E_{wxc}) \times f_{mn} \\
& + \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} E_e \times A_{mn} \times f_{mn} \\
& + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N: i \neq j} \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} W_{nm}^{ij,c} \times L_{mn}
\end{aligned} \tag{3.25}$$

3.3.7 Modelo custo operacional: Flex-grid - menor custo operacional

Nas arquitecturas WDM associada a redes *flex-grid* existem características fundamentais que não se encontram implementadas nas redes WDM actualmente existentes. A funcionalidade chave consiste no provisionamento dinâmico de recursos espectrais nas ligações, introduzindo um grande paradigma associado às redes *flex-grid*, também conhecido na literatura como RWSA (*Routing, Wavelength assignment, and Spectrum Allocation*) [45], combinação dos problemas RWA e RSA. O problema RWSA consiste na alocação de espectro de modo a acomodar o tráfego tentando minimizar ao máximo a banda atribuída.

Considerando o modelo apresentado na secção 3.1 cuja função objectivo considera o menor consumo energético e de modo a ter em conta as funcionalidades associadas as redes *flex-grid*, adicionaram-se e/ou alteraram-se os seguintes índices, constantes, parâmetros e variáveis de decisão.

Índices:

- Iguais ao modelo do custo de implementação

Parâmetros:

- Iguais aos modelos do custo de implementação

Variáveis de decisão:

- Iguais aos modelos do custo de implementação

A semelhança da função objectivo referente às redes *fixed-grid* verifica-se que esta também se encontra formulada em 4 blocos, representados na equação 3.26 de (1) a (4).

- **Objectivo: minimizar**

$$\begin{aligned}
 & \sum_{m \in N} N_{mcs}^m \times E_{mcs} \\
 & + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N: i \neq j} \sum_{c \in NR} \sum_{lp \in LP} C_{ij}^{c,lp} \times E_{cr}^c \\
 & + \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} E_{wss} \times f_{mn} \\
 & + \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} E_e \times A_{mn} \times f_{mn}
 \end{aligned} \tag{3.26}$$

A expressão (1) traduz o consumo considerado em cada nó para adicionar e/ou retirar comprimentos de onda de/para o mesmo. Sendo que o número de cartas MCS necessárias é calculado com base na topologia física e no número de fibras que ligam ao nó. A expressão (2)

considera o consumo na camada IP em que cada *lightpath* com capacidade B_c está associado uma interface bidireccional WDM do *router* IP de custo. Na expressão (3) é considerado o consumo por cada direcção onde são utilizados WSS, que incorporam pré amplificadores e amplificadores de potência, responsáveis por seleccionar os comprimentos de onda a transmitir na mesma direcção. Por último a expressão (4) considera o consumo dos amplificadores ópticos colocados ao longo das ligações físicas por fibra óptica.

Apresentada a função objectivo e de forma a cumprir um conjunto de regras necessárias, as restrições são as mesmas implementadas no modelo de custo de implementação.

3.3.8 Modelo custo operacional: Flex-grid - menor custo operacional e caminho mais curto

Neste modelo o objectivo final consiste na minimização do consumo total da rede considerando a junção do consumo energético, descrito na secção 3.3.5, com a escolha do caminho mais curto para as redes *flex-grid*. Assim, a função objectivo resulta na função apresentada na equação 3.33.

- **Objectivo: minimizar**

$$\begin{aligned}
& \sum_{m \in N} N_{mcs}^m \times E_{mcs} \\
& + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N: i \neq j} \sum_{c \in NR} \sum_{lp \in LP} C_{ij}^{c,lp} \times E_{cr}^c \\
& + \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} E_{wss} \times f_{mn} \\
& + \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} E_e \times A_{mn} \times f_{mn} \\
& + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N: i \neq j} \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} \sum_{c \in NR} \sum_{lp \in LP} W_{mn}^{ij,c,lp} \times L_{mn}
\end{aligned} \tag{3.33}$$

3.4. Cenário de Optimização – Topologia da rede

A topologia de rede de transporte IP adoptada é baseada em [51], onde se encontra definida a topologia de uma rede da Alemanha, Figura 23.

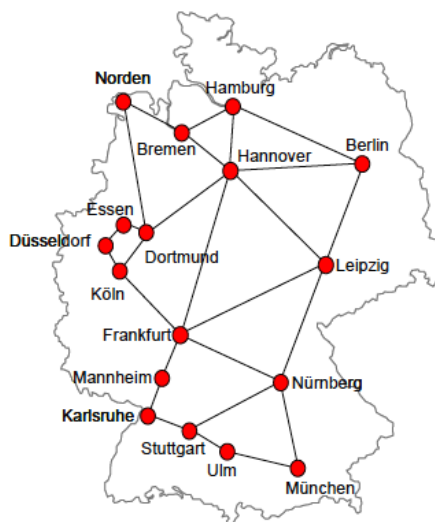


Figura 23 - Topologia da rede da Alemanha com 17 nós de rede [52].

A rede é caracterizada pelas ligações físicas dos canais. Na Tabela 3, encontram-se sintetizados os principais parâmetros da topologia de rede a considerar ao longo desta dissertação.

Tabela 3 - Parâmetros de topologia da rede [51].

Descrição	Valor
Número de nós	17
Número de ligações	26
Número mínimo de degree por nó	2
Número máximo de degree por nó	6
Menor distância entre nós [km]	36
Maior distância entre nós [km]	353
Distância média entre nós[km]	170,269
Diâmetro da rede [km]	951
Distância média do lightpath [km]	413,5
Número médio de saltos nas ligações	2,7

Os comprimentos das ligações de fibra na rede Alemã consistem na distância em linha recta entre os diferentes nós multiplicados pelo factor de 1,2 com base em valores de empíricos de redes reais [51].

Tabela 4 - Distância entre os nós da rede [51].

Nós da rede		Distância [km]
Berlin (B)	Hamburg (HH)	306
	Hannover (H)	298
	Leipzig (L)	174
Bremen (HB)	Hannover (H)	114
	Norden (No)	120
	Norden (No)	144
Dortmund (Do)	Essen (E)	37
	Hannover (H)	208
	Köln (K)	88
	Norden (No)	278
Düsseldorf (D)	Essen (E)	36
	Köln (K)	41
Frankfurt (F)	Hannover (H)	316
	Köln (K)	182
	Leipzig (L)	353
	Mannheim (Ma)	85
	Nürnberg (N)	224
Hamburg (HH)	Hannover (H)	157
Hannover (H)	Leipzig (L)	258
Karlsruhe (Ka)	Mannheim (Ma)	64
	Stuttgart (S)	74
Leipzig (L)	Nürnberg (N)	275
München (M)	Nürnberg (N)	179
	Ulm (Ul)	143
Nürnberg (N)	Stuttgart (S)	187
Stuttgart (S)	Ulm (Ul)	86

3.4.1. Requisitos de Tráfego

Relativamente aos requisitos de tráfego entre nós, ou seja, a matriz de tráfego de rede, utilizou-se como referência a informação associada ao tráfego IP no ano de 2004 apresentado em [51].

Tabela 5 - Parâmetros de Tráfego IP com base no ano de 2004 [51].

Descrição	Valor
Volume de tráfego IP [Gbps]	1905.45
Tráfego médio por nó [Gbps]	224.17

Tabela 6 - Matriz de Tráfego IP com base no ano de 2004 [51] .

Tráfego IP em 2004																	
	B	HB	Do	D	E	F	HH	H	Ka	K	L	Ma	M	No	N	S	UI
B		9,20	13,7	14,6	10,5	49,1	18,8	20,8	4,63	15,6	30,7	8,11	16,5	0	13	19,4	12,1
H	9,19		5,69	6,27	4,51	21,5	18,1	8,93	1,99	6,72	13,2	3,49	7,07	0	5,58	8,34	5,22
Do	13,6	5,69		9,05	6,51	30,6	11,6	12,9	2,87	9,69	18,9	5,02	10,2	0	8,05	12,0	7,52
D	14,6	6,27	9,05		7,17	33,9	12,8	14,1	3,16	10,6	20,9	5,53	11,2	0	8,87	13,2	8,29
E	10,5	4,51	6,51	7,17		34,5	9,21	10,2	2,27	7,68	15,0	3,98	8,07	0	6,38	9,53	5,96
F	49,1	21,5	30,8	33,9	24		43,3	47,7	10,9	36,3	69,1	19	38,1	252	30,2	44,7	28,3
HH	18,8	8,06	11,6	12,9	9,21	43,3		18,3	4,06	13,7	26,8	7,11	14,4	0	11,4	17,0	10,6
H	20,8	8,93	12,9	14,2	10,2	47,3	18,3		4,49	15,2	29,8	7,87	15,9	0	12,6	18,9	11,8
Ka	4,63	1,99	2,87	3,16	2,27	10,9	4,06	4,49		3,38	6,63	1,75	3,55	0	2,81	4,2	2,62
K	15,6	6,72	9,69	10,7	7,68	36,3	13,7	15,2	3,38		22,4	5,93	12,0	0	9,49	14,2	8,88
L	30,6	13,2	18,9	20,9	15,0	69,1	26,8	29,7	6,62	22,4		11,6	23,5	0	18,6	27,8	17,3
Ma	8,11	3,48	5,02	5,53	3,98	19,0	7,11	7,87	1,75	5,92	11,6		6,23	0	4,92	7,35	4,6
M	16,5	7,00	10,2	11,2	8,07	38,1	14,4	15,9	3,55	12,1	23,5	6,32		0	9,99	14,9	9,36
No	0	0	0	0	0	252	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0
N	13,0	5,58	8,05	8,87	6,38	30,3	11,4	12,6	2,81	9,49	18,6	4,92	9,99	0		11,7	7,38
S	19,4	8,34	12,0	13,2	9,53	44,7	17,0	18,8	4,2	14,2	27,8	7,35	14,9	0	11,8		11,0
UI	12,1	5,22	7,53	8,29	5,96	28,3	10,6	11,7	2,62	8,88	17,3	4,6	9,34	0	7,37	11,0	

Para efeitos de simulação optou-se por redimensionar a matriz de tráfego com uma periodicidade anual, com base na previsão de crescimento de tráfego disponibilizada por Cisco VNI [1] e [2]. Tendo em conta o tráfego IP global e a região “Western Europe”, onde se engloba a Alemanha, a previsão de crescimento de tráfego de 2006 a 2014 foi estimada com base em [19].

A informação relativamente a previsão de crescimento de tráfego estimada, encontra-se sintetizada na Tabela 7. Tendo como base o tráfego referente ao ano de 2004 aplicou-se de igual forma sobre todos os elementos da matriz de tráfego um factor multiplicativo referente ao crescimento em cada ano. Esta dissertação baseia-se nos valores entre 2015 a 2020.

Tabela 7 - Previsão de crescimento de tráfego IP na Europa Ocidental, baseado em [19] e [1, 2].

Ano	Crescimento ao ano [%]	Factor de crescimento de tráfego relativamente ao ano 2004	Taxa de crescimento anual [%]
2004	-	1	
2005	52	1,52	52
2006	52	2,31	
2007	52	3,51	
2008	67	5,86	
2009	58	9,26	
2010	53	14,17	
2011	39	19,7	
2012	42	27,97	
2013	17	32,72	17
2014	16	37,96	
2015	17	44,41	
2016	22	54,18	22
2017	22	66,1	
2018	22	80,64	
2019	22	98,38	
2020	22	120,02	

3.4.2. Custo dos equipamentos de rede

Os equipamentos de rede e respectivos custos baseiam-se em valores de referência para o custo normalizado bem como em valores retirados de diversas investigações, com a excepção das interfaces de 1 Tbps que ainda não existem valores no mercado. Segundo a projecção efectuada *Ethernet Alliance's* em 2015, a interface de 1Tbps encontra-se em desenvolvimento e tem data prevista para 2020.

Na camada WDM como mencionado anteriormente, foram considerados amplificadores ópticos, pré-amplificador, amplificadores de potência e WXC para as redes *fixed-grid* e WSS e MCS para redes *flex-grid*. Os valores de custo encontram-se detalhados na Tabela 8.

Tabela 8 - Componentes da camada WDM [19].

Equipamento	Custo normalizado	Nota	Referência
OLA (Optical Line Amplifier)	$C_e = 4$	Por par de fibra, com alcance de 80 km	[42]
Optical Booster	$C_{bst} = 4$	Valor de referência, suporta 64 canais na banda C	[42]
Optical Pre-Amplifier	$C_{pre} = 4$		
WXC (Wavelength Cross Connect)	$C_{wxc} = 4$	Por fibra, à saída do nó	[42]
WSS (Wavelength Selective Switch)	$C_{wss} = 27$	Por fibra, à saída do nó	[44]
MSC (Multicast Switch)	$C_{msc} = 20$	Por par de fibra, suporta 16 canais na banda C	[44]

Ao nível da camada IP considerou-se portos dos *routers* IP com interface WDM de longo alcance, passível de ser utilizado directamente sobre a camada WDM, cujas descrições de encontram Tabela 9.

Tabela 9 - Componentes do router IP - Interfaces Ethernet WDM

Equipamento	Custo Normalizado	Eficiência espectral [bit/s/Hz]	Referência
Interface Ethernet WDM 10 Gbps	$C_{cr} = 3$	0,2	[43]
Interface Ethernet WDM 40 Gbps	$C_{cr} = 8$	0,8	
Interface Ethernet WDM 100 Gbps	$C_{cr} = 21$	2	
Interface Ethernet WDM 400 Gbps	$C_{cr} = 66$	2	
Interface Ethernet WDM 1 Tbps	$C_{cr} = 135$	2	

Na Tabela 10 são apresentados os requisitos de cada canal de acordo com a capacidade de transmissão associada a cada um. Sendo que os canais com capacidades de transmissão de 10, 40 e 100 Gbps são consideradas nas redes *fixed-grid* pelo que apresentam uma largura de banda fixa, 50 GHz, com modulação DP-QPSK. Os restantes canais de 400 Gbps e 1 Tbps, são considerados nas redes *flex-grid* apresentam uma largura de banda variável dependendo do tipo de modulação utilizado. Para a modulação DP-QPSK considerou-se uma largura de banda de 200 e 500 GHz e para a modulação 16-QAM considerou-se uma largura de banda de 100 e 250 GHz, respectivamente.

Tabela 10 - Largura de banda dos canais

Capacidade de Transmissão	Largura de banda [GHz]	Modulação	Eficiência Espectral [bit/s/Hz]	Referência
10 Gbps	50	DP-QPSK	0,2	[19]
40 Gbps	50	DP-QPSK	0,8	
100 Gbps	50	DP-QPSK	2	
	50	16-QAM	2	
400 Gbps	200	DP-QPSK	2	
	100	16-QAM	4	
1 Tbps	500	DP-QPSK	2	
	250	16-QAM	4	

Para os restantes parâmetros de entrada do modelo considerou-se valores típicos para redes WDM, Tabela 11. Para o número máximo de canais por fibra considerou-se o valor de referência para a tecnologia WDM com largura de banda de canais de 50 GHz que corresponde a 80 canais. Cada um dos canais ópticos é associado um comprimento de onda com capacidade B de 10 Gbps, 40 Gbps ou 100 Gbps em redes *fixed-grid* e 100 Gbps, 400 Gbps, 1 Tbps em redes *flex-grid*. Sendo que foi colocado a uma distância máxima de 80 km amplificadores.

Tabela 11 - Parâmetros de simulação

Parâmetro	Definição	Valor
W	Número máximo de canais por fibra	80
B	Ritmo de transmissão dos canais ópticos para redes <i>fixed-grid</i>	10 Gbps, 40 Gbps, 100 Gbps
	Ritmo de transmissão dos canais ópticos para redes <i>flex-grid</i>	100 Gbps, 400 Gbps, 1 Tbps
S	Distância máxima a que é alocado cada amplificador óptico	80 km

3.4.3. Consumo energético dos equipamentos de rede

Os equipamentos de rede e respectivos custo operacionais baseiam-se em valores de referência para o consumo energético bem como em valores retirados dos equipamentos *Cisco Systems, Inc.* Segundo a projecção efectuada *Ethernet Alliance's* em 2015, a interface de 1Tbps encontra-se em desenvolvimento e tem data prevista para 2020.

Na camada WDM como mencionado anteriormente, foram considerados amplificadores ópticos, pré-amplificador, amplificadores de potência e WXC para as redes *fixed-grid* e WSS e MCS para redes *flex-grid*. Os valores de consumo encontram-se detalhados na Tabela 12.

Tabela 12 - Componentes da camada WDM [19].

Equipamento	Consumo energético [W]	Nota	Referência
OLA (Optical Line Amplifier)	$E_e=110$	Por par de fibra, com alcance de 80 km	[19]
Optical Booster	$E_{bst}=30$	Valor de referência, suporta 64 canais na banda C	
Optical Pre-Amplifier	$E_{pre}=30$		
WXC (Wavelength Cross Connect)	$E_{wxc}=25$	Por fibra, à saída do nó	
WSS (Wavelength Selective Switch)	$E_{wss}=60$	Por fibra, à saída do nó	
MSC (Multicast Switch)	$E_{msc}=40$	Por par de fibra, suporta 16 canais na banda C	

Ao nível da camada IP consideram-se portos dos *routers* IP com interface WDM de longo alcance, passível de ser utilizado directamente sobre a camada WDM, cujas descrições de encontram na Tabela 13.

Tabela 13 - Componentes do router IP - Interfaces Ethernet WDM

Equipamento	Consumo energético [W]	Eficiência espectral [bit/s/Hz]	Referência
Interface Ethernet WDM 10 Gbps	$E_{cr} = 38$	0,2	[19]
Interface Ethernet WDM 40 Gbps	$E_{cr} = 150$	0,8	
Interface Ethernet WDM 100 Gbps	$E_{cr} = 180$	2	
Interface Ethernet WDM 400 Gbps	$E_{cr} = 400$	2	
Interface Ethernet WDM 1 Tbps	$E_{cr} = 500$	2	

Os requisitos de cada canal são iguais ao modelo implementado no custo de implementação e encontram-se apresentados na Tabela 9

Os restantes parâmetros de entrada consideram-se os mesmos parâmetros que os utilizados no modelo de custo de implementação apresentados na Tabela 10.

Capítulo 4: Resultados de Simulação

Nesta dissertação espera-se evidenciar a relação entre o custo de implementação e o custo operacional das redes IP sobre WDM, comparando as redes *fixed-grid* actualmente existentes com as redes de nova geração *flex-grid*.

Existe uma grande necessidade de diminuir a pegada ecológica no planeta, o desafio e o objectivo das empresas de telecomunicações é diminuir ou a otimizar os custos associados aos equipamentos, mas simultaneamente permitir que a disponibilidade da capacidade da rede aumente consoante as necessidades dos utilizadores.

Deste modo o objectivo é minimizar o custo de implementação e o custo operacional deste tipo de redes, com base no custo e consumo dos seus componentes e novas tecnologias de transmissão, mantendo sempre a disponibilidade da capacidade da rede para as necessidades actuais.

Foram testadas diversas formas de encaminhamento com a topologia de uma rede da Alemanha (referenciada no capítulo 3) e irão ser avaliadas quais das formas de encaminhamento mais eficiente em termos de custo/consumo e como varia este indicador com o aumento do tráfego.

Pretende-se demonstrar que é possível diminuir o custo e aumentar a eficiência energética das redes ópticas *core*, através da optimização dos seus recursos, utilizando as novas tecnologias de transmissão, tais como a utilização da tecnologia *flex-grid*, mesmo com o aumento de tráfego anual ilustrado na Figura 24.

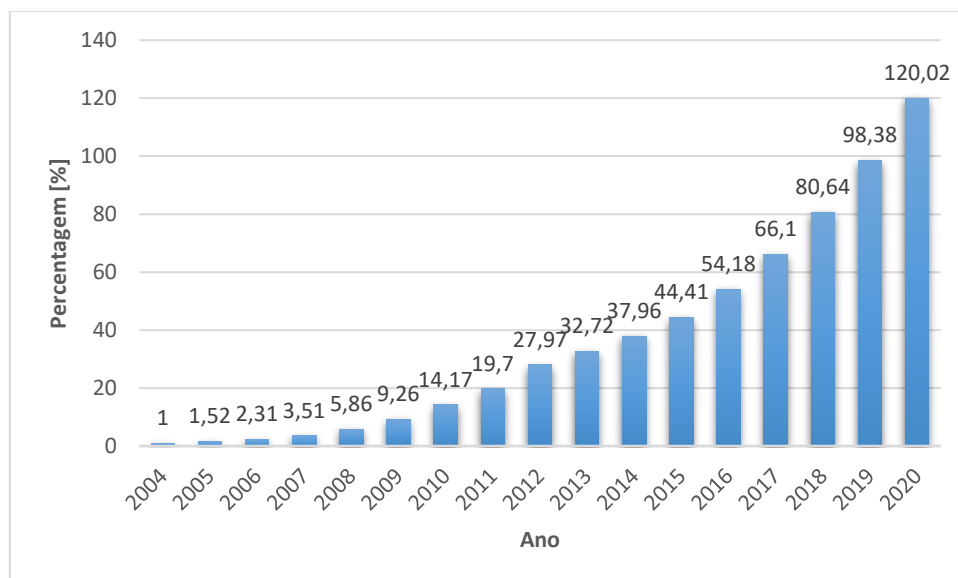


Figura 24 - Previsão do Crescimento de Tráfego IP com base nos dados VNI [1, 2].

4.1. Custo de implementação em redes *Fixed-grid*

Nesta secção serão apresentados os resultados referentes aos modelos *fixed-grid*. Estes modelos têm sempre por base uma modulação DP-QPSK para o canal óptico por se tratar do tipo de modulação mais adequada para a tecnologia utilizada, como já foi referido anteriormente. Será assim analisado o custo de implementação para o encaminhamento segundo o menor custo de implementação e segundo o caminho mais curto com menor custo de implementação.

4.1.1. Modelo *Fixed-Grid* - Menor Custo de Implementação

Neste cenário como é possível verificar pelos resultados apresentados na Figura 25, o modelo implementado resulta na utilização de interfaces de 40 Gbps e 100 Gbs apenas, devido a estas interfaces terem uma maior capacidade, sendo que a interface de 10 Gbps não é utilizada neste cenário de rede. Nota-se que existe um maior uso das interfaces de 40 Gbps em relação às de 100 Gbps, devido a estas terem um custo de implementação inferior. Neste caso e devido ao tráfego da rede revela-se mais vantajoso em termos de custos ter mais interfaces de 40 Gbps e menos interfaces de 100 Gbps.

É de salientar que camada IP é responsável em média por cerca de 96.8% do custo de implementação total da rede e apenas cerca 3.2% do custo de implementação diz respeito à camada WDM. Verifica-se ainda que o custo de implementação na camada IP vai aumentando ao longo dos anos, sendo que são necessárias mais interfaces IP à medida que o tráfego na rede vai aumentando. Na camada WDM o custo de implementação também aumenta ao longo dos anos.

É possível verificar que o custo de implementação neste cenário de rede aumentou 166.3% desde o ano de 2015 até ao ano de 2020 sendo a causa para este aumento do custo de implementação o aumento do volume de tráfego.

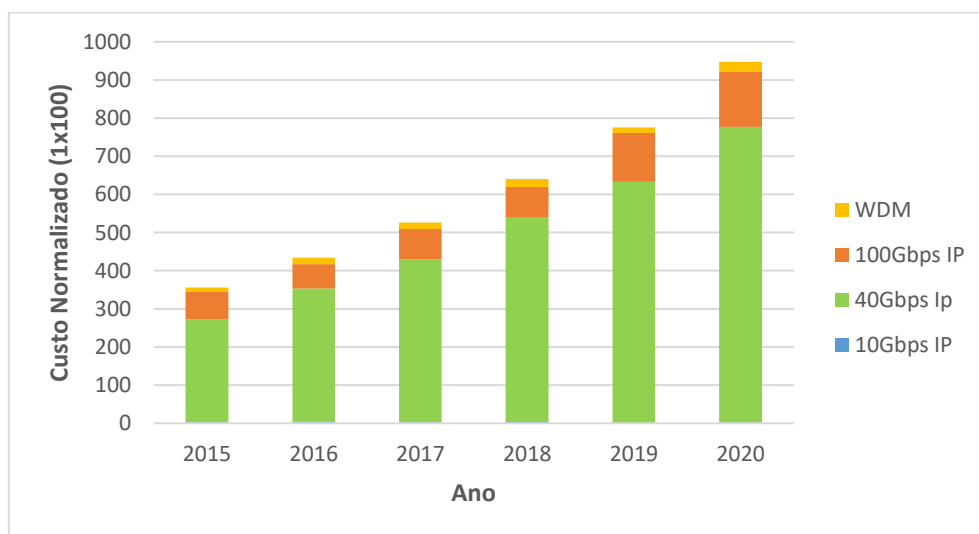


Figura 25 - Custo de implementação do modelo *fixed-grid*, considerando o menor custo de implementação

4.1.2. Modelo *Fixed-grid* – Menor custo de implementação e caminho mais curto

Com base nos resultados de simulação apresentados na Figura 26 é visível que à semelhança do que acontecia com o modelo anterior e dado que apenas se alterou neste modelo o modo de encaminhamento, as interfaces de 40 Gbps e de 100 Gbps continuam a ser as mais viáveis para transportar o tráfego da rede, sendo que não compensa em termos de custo de implementação ter interfaces de 10 Gbps para o tráfego da rede.

Neste modelo em média 95.0% do custo de implementação total da rede é devido à camada IP e apenas 5.0% à camada WDM. Aqui, o custo de implementação por parte da camada WDM é um pouco superior face ao modelo *fixed-grid* tendo em conta técnicas de encaminhamento com base no menor custo de implementação, isto porque este modelo também tem em consideração o caminho mais curto e assim por vezes é necessário introduzir mais equipamentos para transportar o mesmo volume tráfego pelo caminho mais curto.

O custo de implementação neste cenário de rede prevê um aumento 158.9% desde o ano de 2015 até ao ano de 2020 sendo a causa para este aumento do custo de implementação o aumento do volume de tráfego.

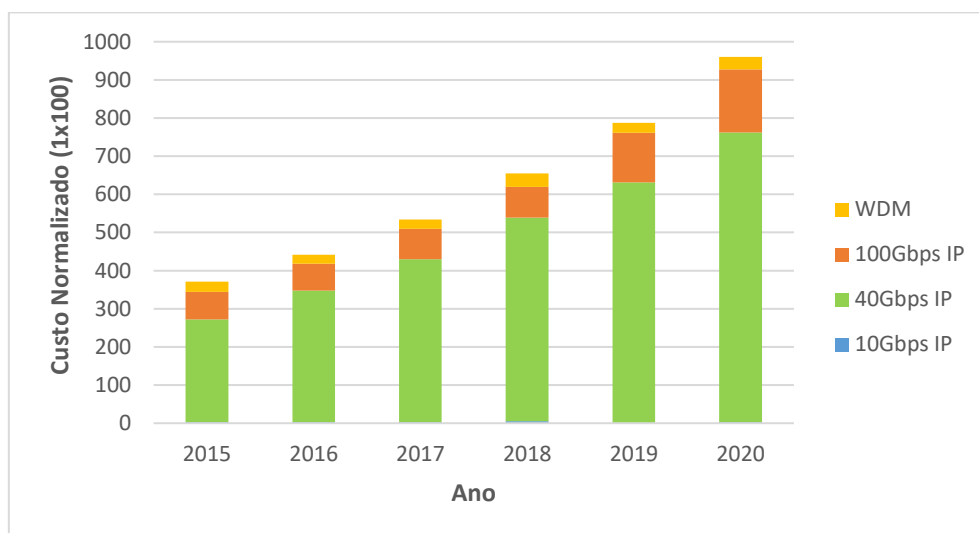


Figura 26 - Custo de implementação do modelo *fixed-grid*, considerando o menor custo de implementação e caminho mais curto

4.1.3. Custo de implementação em redes *Flex-grid*

Nesta secção serão apresentados os resultados referentes aos modelos *flex-grid*. Será analisado o custo de implementação por camadas para o encaminhamento segundo o menor custo de implementação e segundo o caminho mais curto com menor custo de implementação. Para ambos os modelos considerou-se inicialmente modulação DP-QPSK e posteriormente modulação 16-QAM de forma avaliar o impacto no custo de implementação total da rede com a diminuição da largura de banda necessária por canal.

4.1.4 Modelo *Flex-grid* com modulação DP-QPSK – Menor custo de implementação

É de salientar que o custo de implementação da camada IP baixou em média 8% face ao modelo *fixed-grid* com a mesma técnica de encaminhamento menor custo de implementação, sendo agora a camada IP responsável por 88.6% do custo de implementação total da rede e a camada WDM responsável por 11.4%, tal como apresentado na Figura 27. Isto deve-se ao facto de as interfaces utilizadas nas redes *flex-grid* possuírem uma maior capacidade comparadas com as interfaces utilizadas nos modelos *fixed-grid*. A maior capacidade associada às interfaces utilizadas no modelo *flex-grid* reduz o número de interfaces necessárias na rede e consequentemente aumenta o custo de implementação da rede. Quanto ao aumento percentual do custo na camada WDM, deve-se ao facto de nas redes *flex-grid* existir a necessidade de adicionar MSC nos ROADMs com base no número de canais adicionados e/ou retirados no nó, o número fibras ópticas necessárias para transportar o tráfego da rede e/ou número de direcções de transmissão. Assim, com o aumento do volume de tráfego ao longo dos anos, aumenta o número de canais e fibras ópticas necessárias e consequentemente são necessários mais MSC e WSS por cada nó de rede o que leva a um aumento do custo de implementação na camada WDM.

O custo de implementação neste cenário de rede prevê um aumento de 136.8% desde o ano de 2015 até ao ano de 2020, sendo a causa para este aumento do custo de implementação o aumento do volume de tráfego.

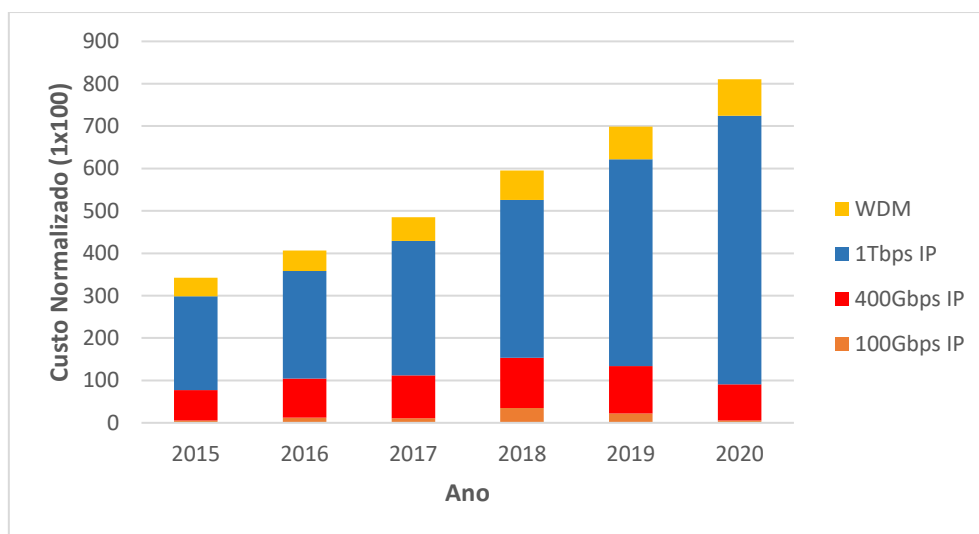


Figura 27 - Custo de implementação do modelo *flex-grid* com modulação DP-QPSK, considerando o menor custo de implementação

4.1.5. Modelo *Flex-grid* com modulação 16-QAM – Menor custo de implementação

Neste modelo a camada IP é responsável por 91.0% do custo de implementação total da rede e a camada WDM responsável por 9.0%, tal como apresentado na Figura 28. Verificou-se que o

custo de implementação na camada WDM baixou em média 2.4% em comparação com o mesmo modelo com modulação DP-QPSK, isto porque como com a modulação 16-QAM os canais de transmissão possuem uma menor largura espectral, reduzindo assim o número de fibras ópticas necessárias entre os nós para o transporte de tráfego.

O custo de implementação neste cenário de rede prevê um aumento de 103.4% desde o ano de 2015 até ao ano de 2019 sendo a causa para este aumento do custo de implementação o aumento do volume de tráfego. No entanto esta modulação apresenta limitações adicionais, tal como um menor alcance dos canais ópticos, o que pode limitar a sua implementação em redes de longo alcance.

Não foi possível calcular o custo de implementação para o ano de 2020, devido a limitações de memória por parte do servidor.

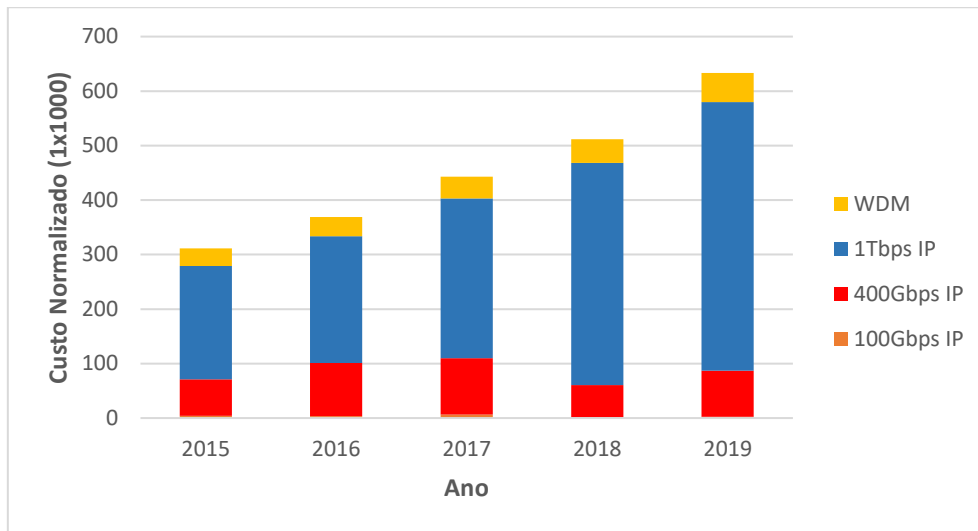


Figura 28 - Custo de implementação do modelo flex-grid com modulação 16-QAM, considerando o menor custo de implementação

4.1.6. Modelo *Flex-grid* com modulação DP-QPSK – Menor custo de implementação e caminho mais curto

Tendo por base os resultados de simulação apresentados na Figura 29, face ao modelo *flex-grid* apresentado, verificou-se que as interfaces de 1 Tbps continuam a ser as interfaces mais utilizadas. No entanto, existe uma redução muito elevada na utilização de interfaces de 400 Gbps, esta redução deve-se ao facto de este modelo considerar o encaminhamento com base no caminho mais curto e, portanto, o modelo tendencialmente utiliza interfaces de maior capacidade de modo a escolher o caminho mais curto.

Neste modelo em média 89.9% do custo de implementação total da rede é devido à camada IP e apenas 10.1% é referente à camada WDM. Aqui, o custo de implementação total da rede aumentou 122.9% desde o ano de 2015 até ao ano de 2020, sendo a causa para este aumento do custo de implementação o aumento do volume de tráfego que força a utilização de mais

interfaces IP e mais equipamentos na rede WDM de modo a adicionar e/ou remover canais ópticos.

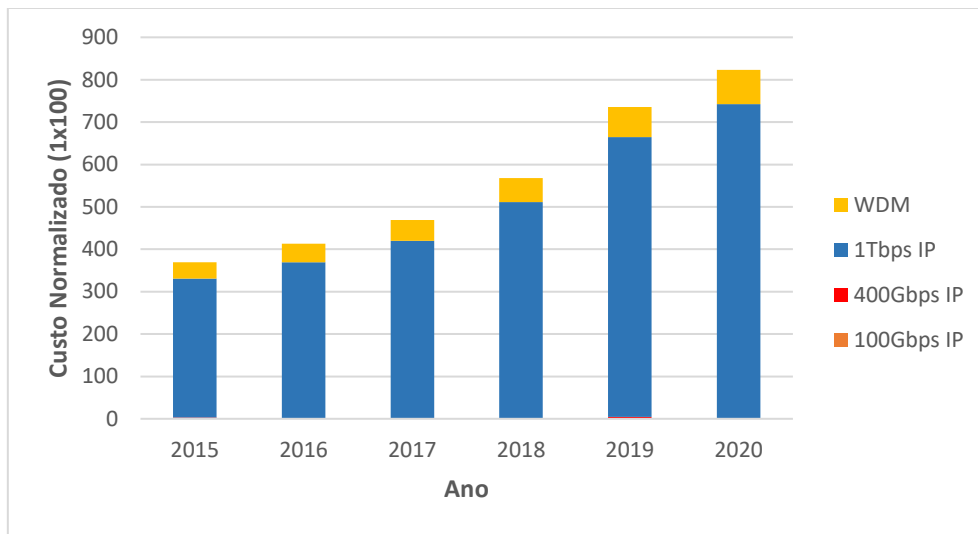


Figura 29 - Custo de implementação do modelo flex-grid com modulação DP-QPSK, considerando o menor custo de implementação e caminho mais curto

4.1.7 Modelo *Flex-grid* com modulação 16-QAM – Menor custo de implementação e caminho mais curto

Neste modelo a camada IP é responsável por 92.0% do custo de implementação total da rede e a camada WDM responsável por 8.0%, tal como apresentado na Figura 30. Verificou-se que o consumo na camada WDM diminuiu cerca de 2.1% em relação ao mesmo modelo com modulação DP-QPSK, isto porque como com a modulação 16-QAM as técnicas de encaminhamento segundo o menor custo de implementação, os canais têm uma menor largura espectral reduzindo assim o número de fibras ópticas necessárias entre nós para transporte do tráfego e consequentemente o número de MCS e WSS necessários.

O custo de implementação neste cenário de rede aumentou 145.5% desde o ano de 2015 até ao ano de 2020 sendo a causa para este aumento do custo de implementação o aumento do volume de tráfego.

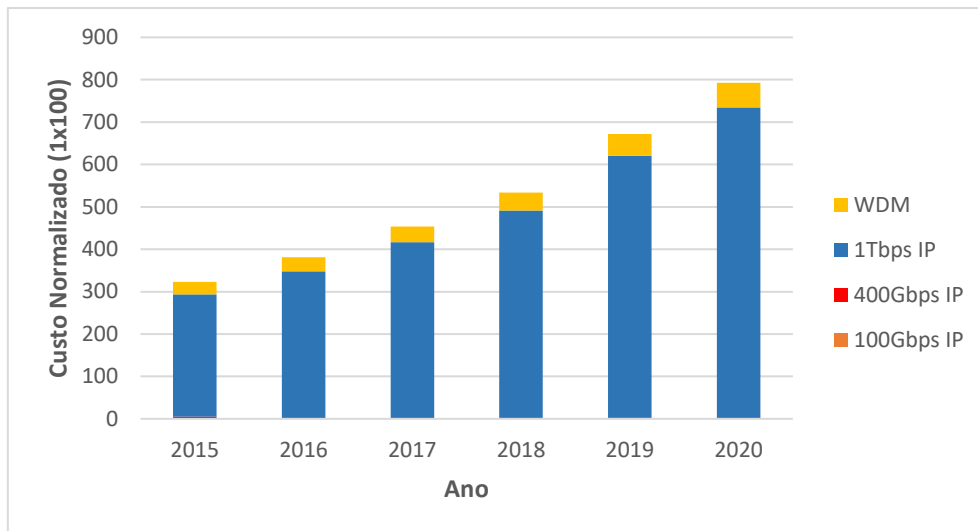


Figura 30 -- Custo de implementação do modelo flex-grid com modulação 16-QAM, considerando o menor custo de implementação e caminho mais curto

4.2. Custo operacional em redes *Fixed-grid*

Nesta secção serão apresentados os resultados referentes aos modelos *fixed-grid*. Estes modelos têm sempre por base uma modulação DP-QPSK para o canal óptico por se tratar do tipo de modulação mais adequada para a tecnologia utilizada, como já foi referido anteriormente. Será assim analisado o custo operacional por camadas para o encaminhamento segundo o menor custo operacional e segundo o caminho mais curto com menor custo operacional.

4.2.1. Modelo Fixed-grid – Menor custo operacional

Neste cenário de simulação como é possível verificar pelos resultados apresentados na Figura 31, o modelo implementado resulta na utilização de interfaces de 100 Gbps, devido à sua elevada capacidade, sendo que as interfaces de 10 Gbps e de 40 Gbps não são utilizadas neste cenário de rede. O uso das interfaces de 100 Gbps, revela-se mais vantajoso devido a esta apresentar uma maior capacidade e eficiência espectral, comparando com as interfaces de 10 Gbps e de 40 Gbps.

Pode-se reparar que a camada IP de 2015 a 2020 é responsável em média por 96.1% do custo operacional total da rede e apenas 3.9% diz respeito à camada WDM. Nota-se também que o custo operacional da camada IP vai aumentando em média 0.12% ao ano, sendo necessário mais interfaces IP à medida que o tráfego da rede vai aumentando. Na camada WDM o custo operacional desta reduz ao ao longo dos anos a uma média de 0.12% ao ano.

O custo operacional neste cenário de rede aumentou 165% desde o ano de 2015 até ao ano de 2020, sendo a causa para este aumento do custo operacional o aumento do volume de tráfego.

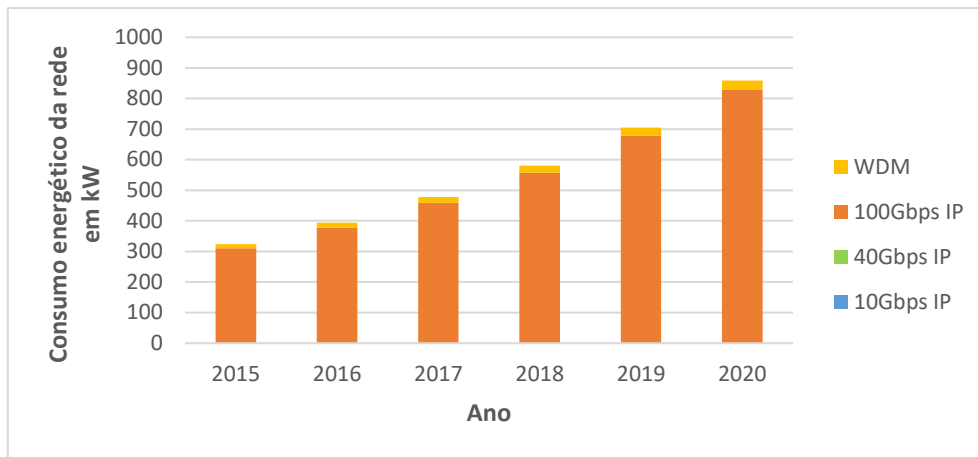


Figura 31 - Custo operacional do modelo fixed-grid, considerando o menor custo operacional

4.2.2. Modelo *Fixed-grid* – Menor custo operacional e caminho mais curto

Com base nos resultados de simulação apresentados na Figura 32 torna-se outra vez visível que tal como acontecia com o modelo anterior e dado que apenas se alterou neste modelo o modo de encaminhamento, as interfaces de 10 Gbps e de 40 Gbps não são necessárias para transportar o tráfego de rede. Ao não se utilizar estas interfaces consegue-se uma redução no custo operacional uma vez que se diminui o número de interfaces IP, levando o modelo a utilizar maioritariamente as interfaces de 100 Gbps.

Pode-se reparar que a camada IP de 2015 a 2020 é responsável em média por 96.1% do custo operacional total da rede e apenas 3.9% diz respeito à camada WDM. Nota-se também que o custo operacional da camada IP vai aumentando em média 0.17% ao ano sendo necessário mais interfaces IP à medida que o tráfego da rede vai aumentando. Na camada WDM o custo operacional desta reduz ao ao longo dos anos a uma média de 0.17% ao ano.

O custo operacional neste cenário de rede aumentou 163.7% desde o ano de 2015 até ao ano de 2020, sendo a causa para este aumento do custo operacional o aumento do volume de tráfego.

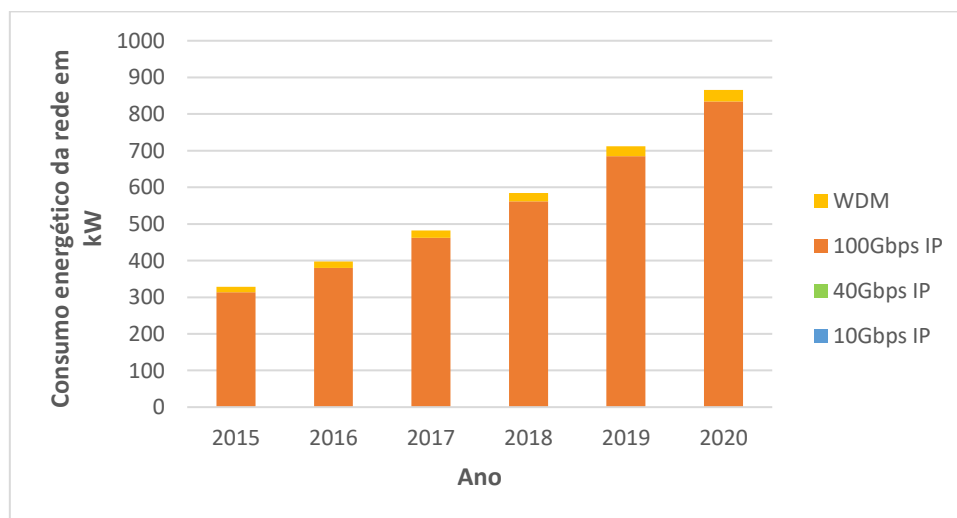


Figura 32 - Custo operacional do modelo fixed-grid, considerando o menor custo operacional e caminho mais curto

4.2.3 Resultados Modelos *Flex-grid*

Nesta secção serão apresentados os resultados referentes aos modelos *flex-grid*. Será analisado o custo operacional por camadas para o encaminhamento segundo o menor custo operacional e segundo o caminho mais curto com menor custo operacional. Para ambos os modelos considerou-se inicialmente modulação DP-QPSK e posteriormente modulação 16-QAM de forma avaliar o impacto no custo operacional total da rede com a diminuição da largura de banda necessária por canal.

4.2.4. Modelo *Flex-grid* com modulação DP-QPSK – Menor custo operacional

Pode-se salientar que o custo operacional percentual da camada IP diminuiu em média 34% e o custo operacional da camada WDM aumenta 8% em relação ao modelo *fixed-grid* com a mesma técnica de encaminhamento e menor custo operacional, sendo agora a camada IP responsável por 88.6% do custo operacional da rede e a camada WDM responsável por 11.4%, tal como apresentado na Figura 33. Estes resultados devem-se ao facto de as interfaces utilizadas em *flex-grid* possuírem uma maior capacidade e também uma maior eficiência energética comparadas com as interfaces utilizadas nos modelos *fixed-grid*. Quanto ao aumento percentual do custo operacional na camada WDM, deve-se ao facto de nas redes *flex-grid* existir a necessidade de adicionar MSC nos ROADMs com base no número de canais adicionados e/ou retirados no nó, o número fibras ópticas necessárias para transportar o tráfego da rede e/ou número de direcções de transmissão. Assim, com o aumento do volume de tráfego ao longo dos anos, aumenta o número de canais e fibras ópticas necessárias e consequentemente são necessários mais MSC e WSS por cada nó de rede o que leva a um aumento do consumo na camada WDM.

O custo operacional neste cenário de rede prevê um aumento de 146.9% desde o ano de 2015 até ao ano de 2020, sendo a causa para este aumento do custo operacional o aumento do volume de tráfego.

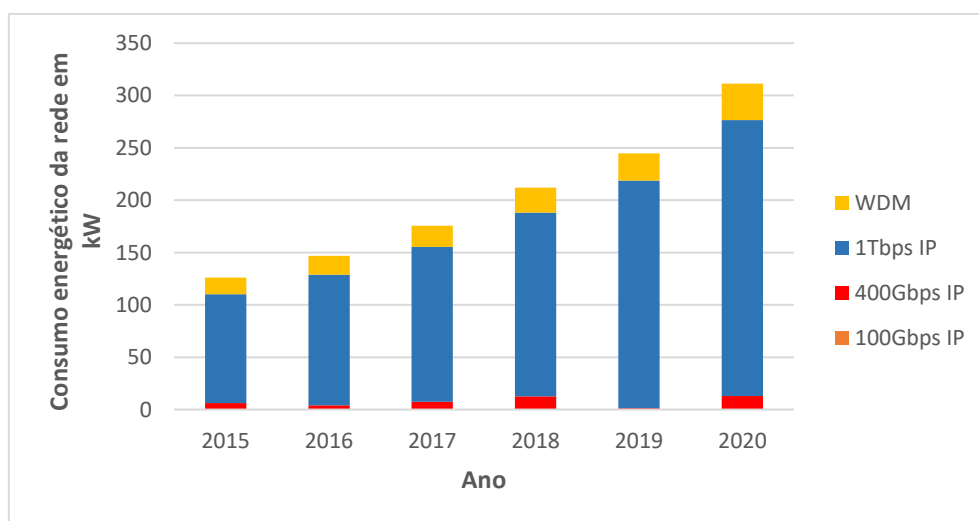


Figura 33 - Custo operacional do modelo *flex-grid* com modulação DP-QPSK, considerando o menor custo operacional

4.2.5. Modelo Flex-grid com modulação 16-QAM – Menor custo operacional

Neste modelo a camada IP é responsável por 92.4 % do custo operacional total da rede e a camada WDM é responsável por 7.6 %, como apresentado na Figura 34. Verificou-se que o consumo na camada WDM baixou em média 4%, isto porque como com a modulação 16-QAM os canais de transmissão possuem uma menor largura espectral, reduzindo assim o número de fibras ópticas necessárias entre nós para o transporte de tráfego.

O custo operacional neste cenário de rede prevê um aumento de 148.3 % desde o ano de 2015 até ao ano de 2020 sendo a causa para este aumento do custo operacional o aumento do volume de tráfego.

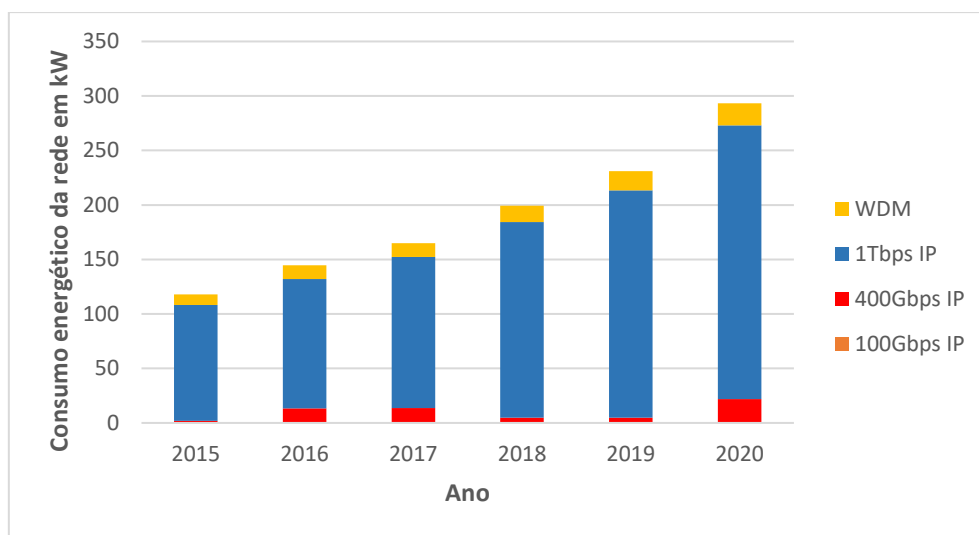


Figura 34 - Custo operacional do modelo flex-grid com modulação 16-QAM, considerando o menor custo operacional

4.2.6. Modelo Flex-grid com modulação DP-QPSK – Menor custo operacional e caminho mais curto

De acordo com os resultados apresentados na Figura 35 face ao modelo *flex-grid* com a modulação DP-QPSK com menor custo operacional, verifica-se que as interfaces de 1 Tbps continuam a ser as interfaces mais utilizadas. No entanto, existe uma redução na utilização de interfaces de 400 Gbps face ao mesmo modelo para redes *flex-grid* com encaminhamento segundo o menor custo operacional. Esta redução nas interfaces de 400 Gbps deve-se ao facto de este modelo considerar o encaminhamento com base no caminho mais curto e, portanto, o modelo tendencialmente utiliza interfaces de maior capacidade de modo a escolher o caminho mais curto.

Neste modelo a camada IP é responsável em média por 89.4% do custo operacional total da rede e apenas 10.6% é pertencente à camada WDM. O custo operacional total da rede aumentou 156.0% desde o ano de 2015 até ao ano de 2020, sendo a causa para este aumento

do custo operacional o aumento do volume de tráfego que força a utilização de mais interfaces IP e mais equipamentos na rede WDM de modo a adicionar e/ou remover canais ópticos.

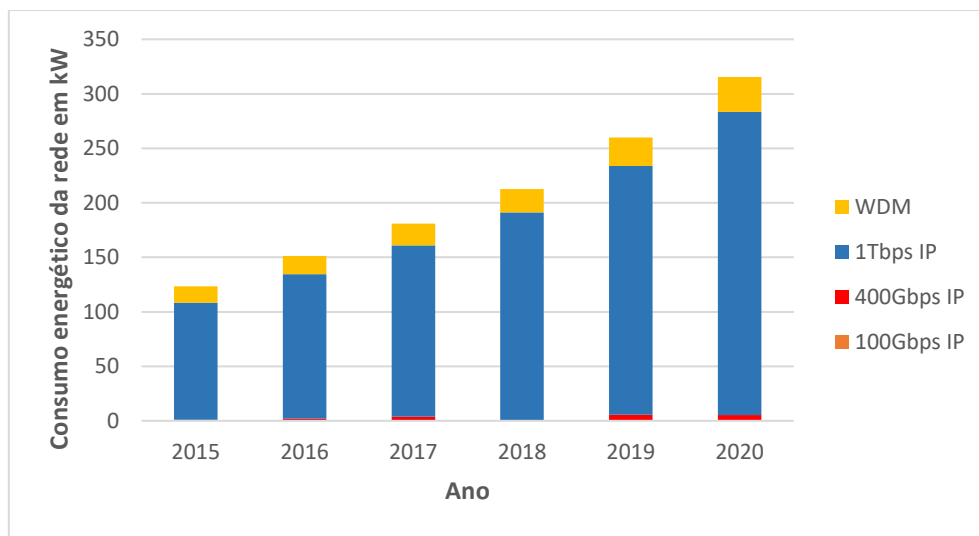


Figura 35 - Custo operacional do modelo flex-grid com modulação DP-QPSK, considerando o menor custo operacional e caminho mais curto

4.2.7. Modelo Flex-grid com modulação 16-QAM – Menor custo operacional e caminho mais curto

Neste modelo a camada IP é responsável por 92.4% do custo operacional total da rede e a camada WDM é responsável por 7.6%, tal como apresentado na Figura 36. Verifica-se que o custo operacional na camada WDM diminuiu em percentagem uma média de 3% em relação ao modelo *flex-grid* DP-QPSK com menor custo operacional e caminho mais curto, isto porque como com a modulação 16-QAM, tal como foi verificado para os modelos com técnicas de encaminhamento segundo o menor custo operacional, os canais têm uma menor largura espectral reduzindo assim o número de fibras ópticas necessárias entre nós para transporte do tráfego e consequentemente o número de MCS e WSS necessários.

O custo operacional neste cenário de rede aumentou 148.3% desde o ano de 2015 até ao ano de 2020 sendo a causa para este aumento do custo operacional o aumento do volume de tráfego. É também possível verificar que para o mesmo modelo, menor caminho e menor custo operacional, com modulação DP-QPSK o aumento foi de 156%, o que demonstra que a longo prazo os modelos *flex-grid* com modulação 16-QAM tornam-se eficientes em termos de custo operacional. No entanto é sempre necessário ter em atenção a distância da ligação neste tipo de modulação, que pode inviabilizar a utilização da mesma.

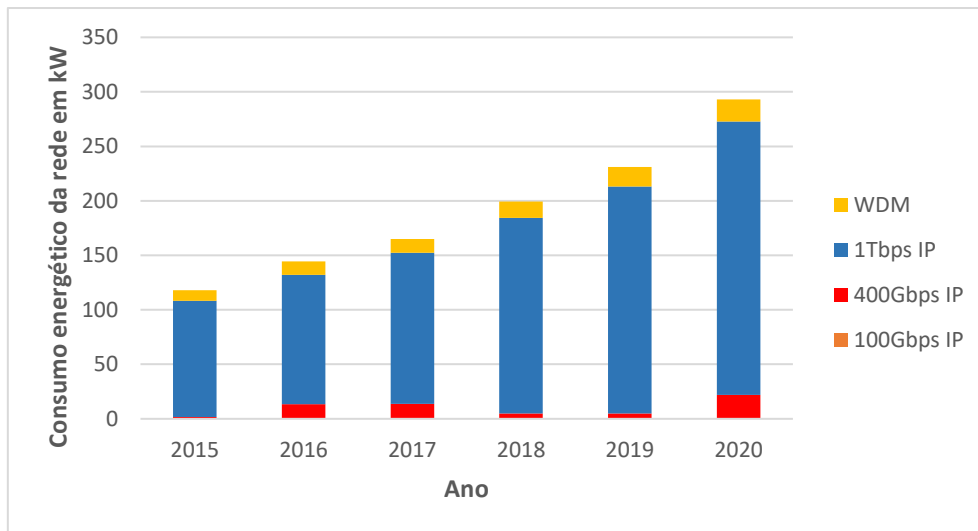


Figura 36 - Custo operacional do modelo *flex-grid* com modulação 16-QAM, considerando o menor custo operacional e caminho mais curto

4.3. Resultados Comparativos entre modelos

Os resultados apresentados nas secções anteriores permitiram analisar os modelos de forma individual, nesta secção serão alvo de comparação os resultados apresentados pelos diversos modelos.

Será avaliado o desempenho das redes e os resultados das redes *fixed-grid* e *flex-grid*, tanto para o custo de implementação como para o custo operacional. Nas redes *fixed-grid* foi utilizada a modulação QPSK e nas redes *flex-grid* foi utilizada as modulações DP-QPSK e 16-QAM.

4.3.1 Custo total de implementação e custo operacional

A Figura 37 representa o custo de implementação por parte das redes IP sobre WDM *fixed-grid* e *flex-grid* com modulação DP-QPSK, tanto para o encaminhamento de menor custo de implementação bem como para o encaminhamento de menor custo de implementação e caminho mais curto. Como era de prever verifica-se um menor custo de implementação por parte das redes *flex-grid* em relação às redes *fixed-grid*. Nota-se também que em 2015 quando o volume de tráfego é menor a diferença entre o custo de implementação entre as redes *fixed-grid* e *flex-grid* é também menor. Inicialmente existe uma diferença de menos 4% de custo de implementação em redes *flex-grid* para o encaminhamento com o menor custo de implementação e uma diferença de menos 0.4% para o encaminhamento com o menor custo de implementação e caminho mais curto. Com o passar dos anos, a diferença do custo de implementação tende a aumentar, chegando ao ano de 2020 com uma redução do custo de implementação de 17.0% nas redes *flex-grid* para o encaminhamento de menor custo de implementação e uma redução do custo de implementação de 16.7% para o encaminhamento de menor custo de implementação e caminho mais curto. Esta diferença nos modelos MLR

acontece, devido a este modelo utilizar a interface de transmissão mais eficiente em cada cenário e como nas redes de *flex-grid* existe a possibilidade de utilização de interfaces de 1 Tbps, o número de interfaces utilizadas reduz consideravelmente o que se traduz numa redução do custo de implementação. No entanto, embora as interfaces de 1 Tbps sejam as interfaces com um maior custo, neste caso fica mais económico ter mais interfaces de 1 Tbps do que várias interfaces de menor capacidade.

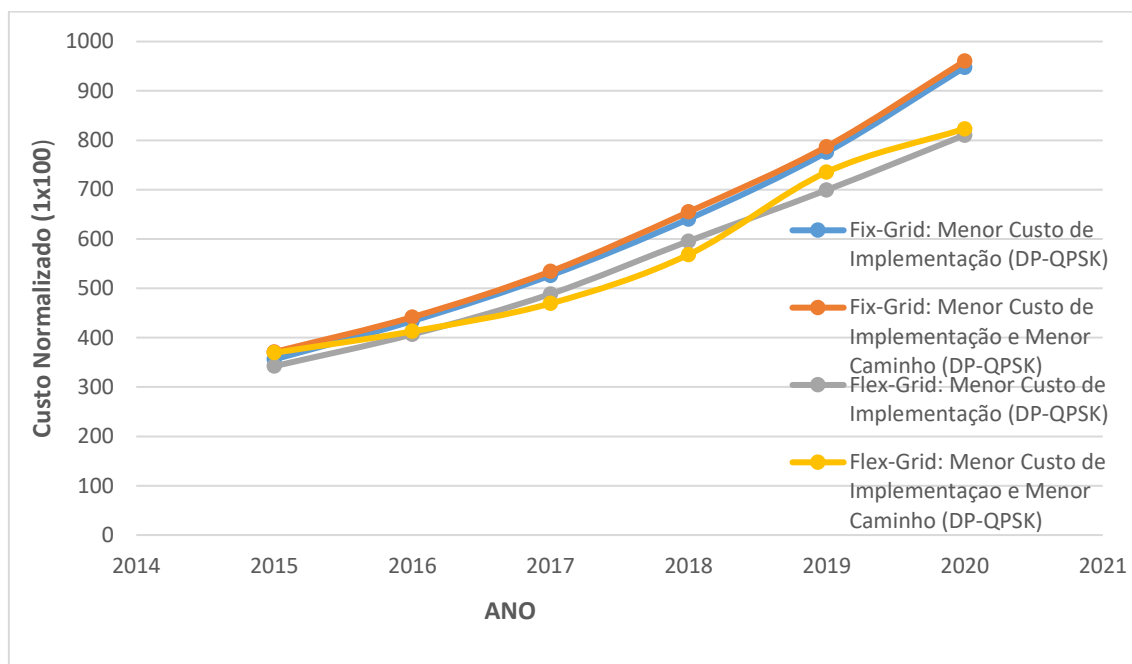


Figura 37 - Custo total de implementação da rede MLR IP sobre WDM *fixed-grid* e *flex-grid* com modulação DP-QPSK

A Figura 38 representa o custo operacional por parte das redes IP sobre WDM *fixed-grid* e *flex-grid* com modulação DP-QPSK, tanto para o encaminhamento de menor custo operacional bem como para o encaminhamento de menor custo operacional e caminho mais curto. Como era de prever verifica-se um menor custo operacional por parte das redes *flex-grid* em relação às redes *fixed-grid*. Nota-se também que em 2015 quando o volume de tráfego é menor a diferença entre o custo operacional entre as redes *fixed-grid* e *flex-grid* é também menor. Inicialmente existe uma diferença de menos 157.0% do custo operacional em redes *flex-grid* para o encaminhamento com o menor custo de implementação e uma diferença de menos 162.6% para o encaminhamento com o menor custo de implementação e caminho mais curto. Com o passar dos anos, a diferença do custo operacional vai aumentando, chegando ao ano de 2020 com uma redução do custo de implementação de 175.8% nas redes *flex-grid* para o encaminhamento de menor custo operacional e uma redução do custo operacional de 174.5% para o encaminhamento de menor custo operacional e caminho mais curto. Esta diferença nos modelos MLR acontece, devido a este modelo utilizar a interface de transmissão mais eficiente em cada cenário e como nas redes de *flex-grid* existe a possibilidade de utilização de interfaces de 1 Tbps, o número de interfaces utilizadas reduz consideravelmente o que se traduz numa redução do custo operacional. No entanto, embora as interfaces de 1 Tbps sejam as interfaces com um maior custo, neste caso fica mais económico ter interfaces de 1 Tbps do que várias interfaces de menor capacidade.

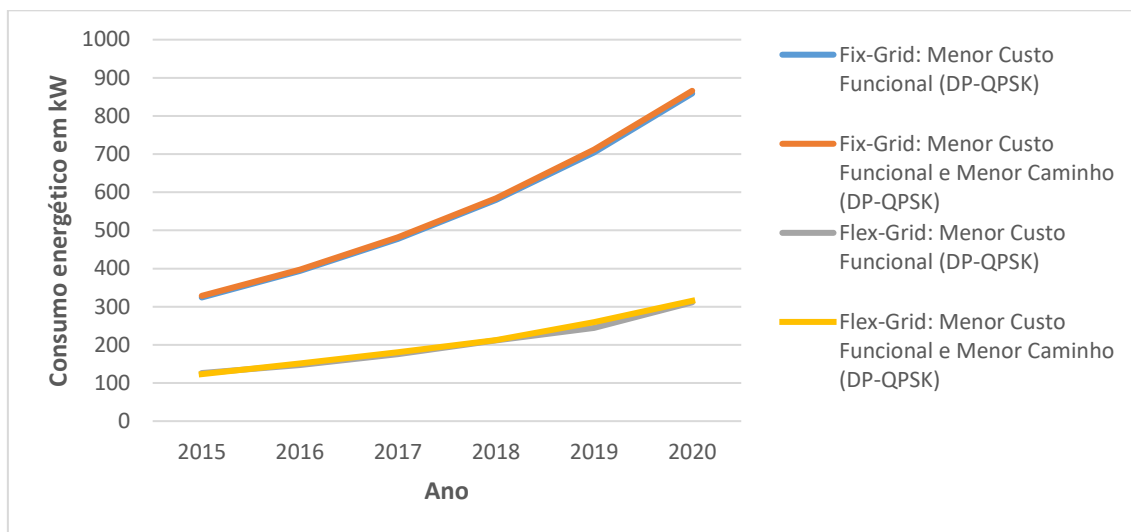


Figura 38 - Custo total operacional da rede MLR IP sobre WDM fixed-grid e flex-grid com modulação DP-QPSK

De modo a analisar o impacto do tipo de modulação utilizada nas redes *flex-grid* a Figura 39 representa o custo de implementação das redes *flex-grid* com modulação DP-QPSK e 16-QAM, para o encaminhamento com base no menor custo de implementação, bem como o menor custo de implementação e caminho mais curto. É visível que os modelos com modulação 16-QAM apresentam sempre menores custos de implementação face aos modelos com modulação DP-QPSK. Esta redução nos modelos 16-QAM deve-se essencialmente ao facto de os canais com este tipo de modulação necessitarem de uma menor largura de banda, ou seja, têm maior eficiência espectral. Assim, para transportar o mesmo volume de tráfego os modelos DP-QPSK necessitam de mais fibras na rede e consequentemente mais MCS e WSS que os modelos 16-QAM aumentando consequentemente o custo de implementação total da rede.

Inicialmente para o ano de 2015 o custo de implementação da rede em cenários *flex-grid* com modulação 16-QAM é 9.9% inferior ao custo de implementação para o mesmo modelo com modulação DP-QPSK e para o encaminhamento com base no caminho mais curto e menor custo de implementação de 14.3%. À medida que os anos passam essa diferença em termos de custo de implementação este tende a diminuir. Conseguindo-se no ano de 2020 uma redução do custo de 3.8% utilizando modulação 16-QAM face à modulação DP-QPSK para o encaminhamento com base no menor caminho e menor custo. Não foi possível verificar para o ano de 2020 a relação entre as modulações 16-QAM e DP-DPSK, devido ao servidor não ter conseguido calcular os resultados por falta de recursos. Mesmo assim verifica-se que o modelo *flex-grid* com modulação 16-QAM é o modelo com uma melhor relação de custo de implementação.

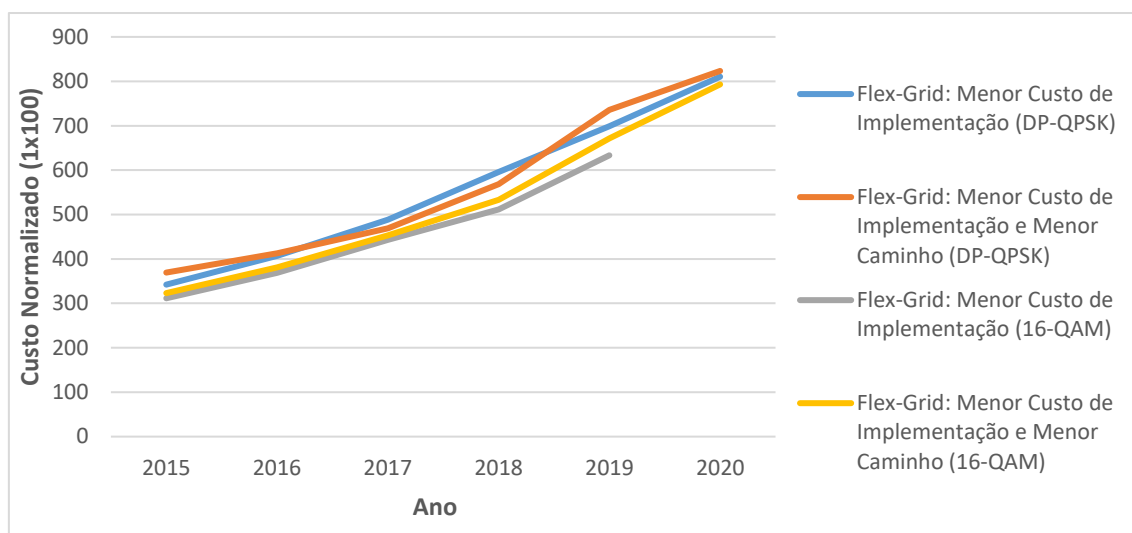


Figura 39 - Custo total de implementação da rede IP sobre WDM flex-grid com modulação DP-QPSK e 16-QAM

De modo a analisar o impacto do tipo de modulação utilizada nas redes *flex-grid* a Figura 40 apresenta o custo operacional das redes *flex-grid* com modulação DP-QPSK e 16-QAM, para o encaminhamento segundo o menor custo operacional, bem como caminho mais curto e menor custo operacional. É notório que existe uma diferença muito pequena nas modulações *flex-grid*, sendo os modelos com modulação 16-QAM os que apresentam sempre um menor custo de implementação face aos modelos com modulação DP-QPSK. Esta redução nos modelos 16-QAM deve-se essencialmente ao facto de os canais com este tipo de modulação necessitarem de uma menor largura de banda, ou seja, maior eficiência espectral. Assim, para transportar o mesmo volume de tráfego os modelos DP-QPSK necessitam de mais fibras na rede e consequentemente mais MCS e WSS que os modelos 16-QAM aumentando consequentemente o custo de implementação total da rede.

Inicialmente para o ano de 2015 o custo operacional geral da rede em cenários *flex-grid* com modulação 16-QAM é 6.9% inferior ao custo operacional para o mesmo modelo com modulação DP-QPSK e para o encaminhamento com base no caminho mais curto e menor custo operacional é de 2.9%. À medida que os anos passam essa diferença em termos de consumo tende a variar. Conseguindo-se no ano de 2020 uma redução energética de 6.2% utilizando modulação 16-QAM face à modulação DP-QPSK para o encaminhamento segundo o menor custo operacional e uma redução de 4.7% para as redes com o encaminhamento com menor caminho e menor custo operacional. Verificando-se assim que o modelo *flex-grid* com modulação 16-QAM e técnicas de encaminhamento segundo o menor custo operacional é o modelo energeticamente mais eficiente.

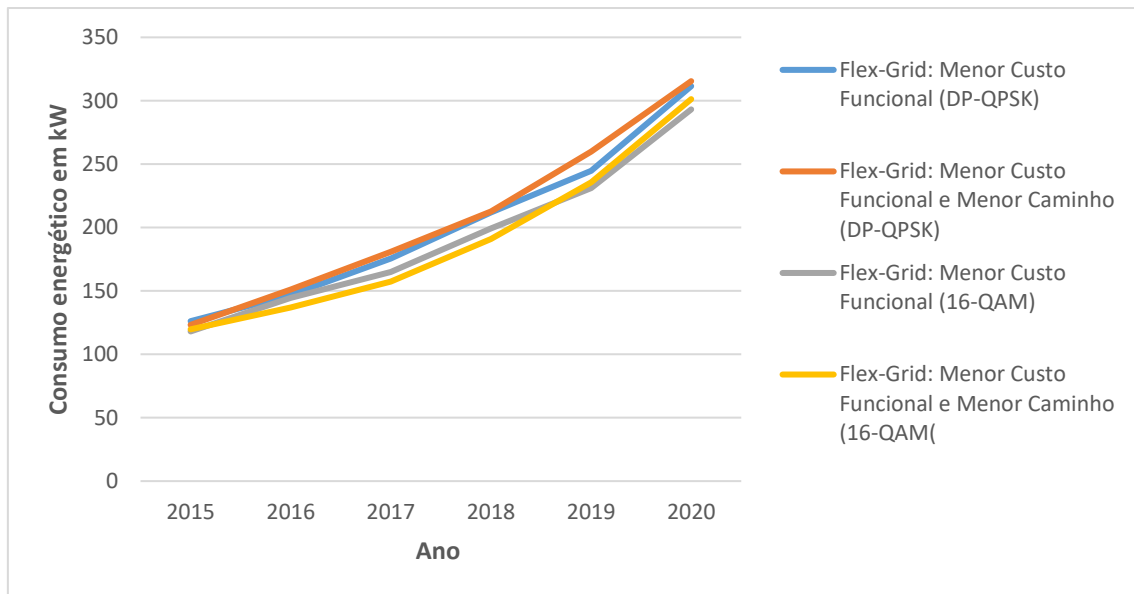


Figura 40 - Custo total operacional da rede IP sobre WDM flex-grid com modulação DP-QPSK e 16-QAM

De maneira a poder avaliar-se como o aumento do volume de tráfego IP influencia o custo de implementação global da rede, é apresentado na Figura 41 a evolução percentual do custo de implementação total da rede para todos os modelos, bem como a evolução percentual do tráfego IP (linha vermelha). O aumento percentual do custo de implementação e do volume de tráfego foi calculado com base nos resultados obtidos no primeiro ano de simulação, o ano de 2015.

Na Figura 41 pode-se reparar que o aumento do custo de implementação está directamente relacionado com o aumento do volume de tráfego ao longo dos anos, sendo que os modelos *fixed-grid* apresentam um aumento percentual com um andamento muito semelhante ao aumento percentual do volume de tráfego. Nos modelos *flex-grid* o aumento percentual do custo de implementação apresenta uma subida menos elevada e tende ao longo dos anos a distanciar-se do aumento do volume de tráfego. Esta diferença é mais notável nos modelos com modulação 16-QAM. Desde o ano de 2015 até ao ano de 2020 o volume de tráfego aumentou em 145.5%, tendo os custos de implementação associados às redes *fixed-grid* aumentado em 166.3% para o encaminhamento segundo o menor custo de implementação e 158.9% para o encaminhamento segundo o caminho mais curto e menor custo de implementação. Nas redes *flex-grid* para modulação de canal óptico com DP-QSPK o aumento é de 136.8% para o encaminhamento segundo o menor custo de implementação e de 122.9% para o encaminhamento segundo o caminho mais curto e menor custo de implementação. Já nas redes *flex-grid* para modulação de canal óptico com 16-QAM o aumento face ao ano de 2015-2019 é de 103.4% para encaminhamento segundo o menor custo de implementação e de 145.5% para o encaminhamento segundo o caminho mais curto e menor custo de implementação para os anos de 2015-2020.

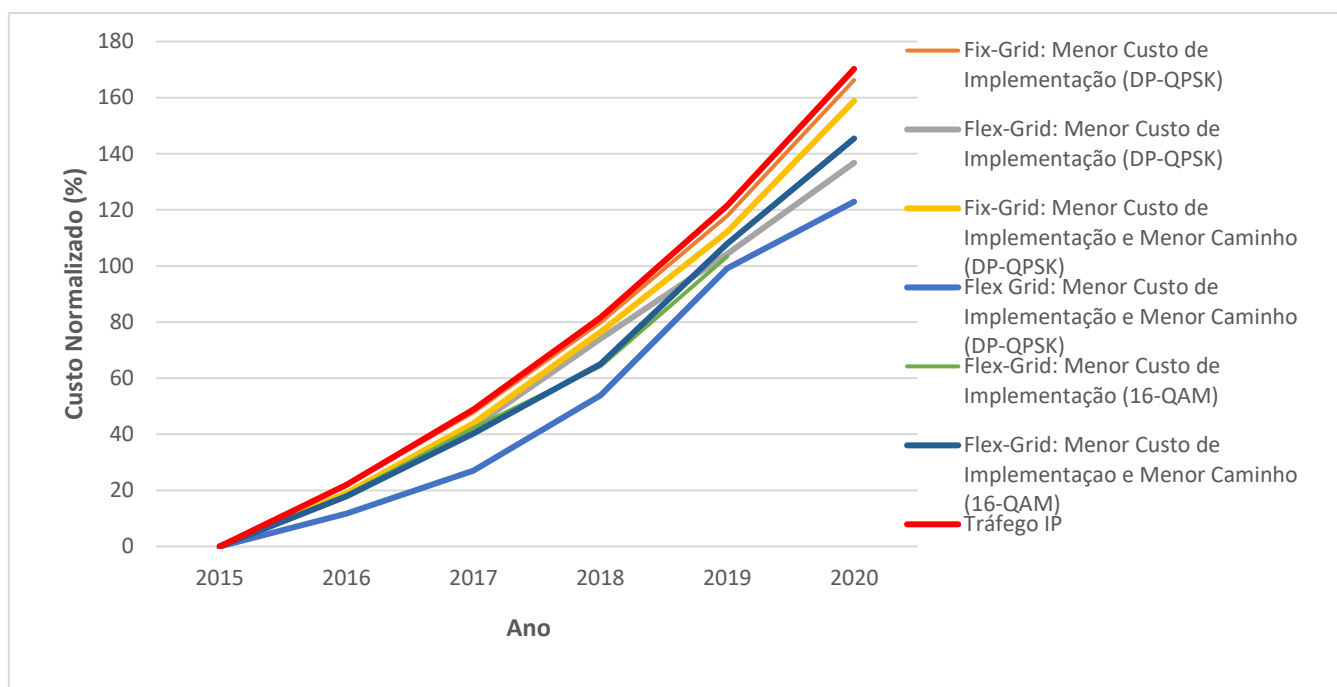


Figura 41 - Aumento Percentual do custo de implementação em redes fixed-grid e flex-grid e volume de tráfego

De acordo com os resultados apresentados na Figura 42 o aumento do volume de tráfego IP influencia o custo operacional global da rede. O aumento percentual do custo operacional e do volume de tráfego foi calculado com base nos resultados obtidos no primeiro ano de simulação, o ano de 2015.

Na Figura 42 pode-se reparar que o aumento do custo operacional está directamente relacionado com o aumento do volume de tráfego ao longo dos anos, sendo que os modelos *fixed-grid* apresentam um aumento percentual com um andamento muito semelhante ao aumento percentual do volume de tráfego. Nos modelos *flex-grid* o aumento percentual do custo operacional apresenta uma subida menos elevada e tende ao longo dos anos a distanciar-se do aumento do volume de tráfego, esta diferença é mais notável nos modelos com modulação 16-QAM. Desde o ano de 2015 até ao ano de 2020 o volume de tráfego aumentou em 145.5%, tendo o custo operacional associado às redes *fixed-grid* aumentado em 165.0% para o encaminhamento segundo o menor custo de implementação e 163.7% para o encaminhamento segundo o caminho mais curto e menor custo de implementação. Nas redes *flex-grid* para modulação de canal óptico com DP-QSPK o aumento é de 146.9% para o encaminhamento segundo o menor custo de implementação e de 156.0% para o encaminhamento segundo o caminho mais curto e menor custo de implementação. Já nas redes *flex-grid* para modulação de canal óptico com 16-QAM o aumento face ao ano de 2015-2020 é de 148.3% para encaminhamento segundo o menor custo de implementação e de 151.7% para o encaminhamento segundo o caminho mais curto e menor custo de implementação.

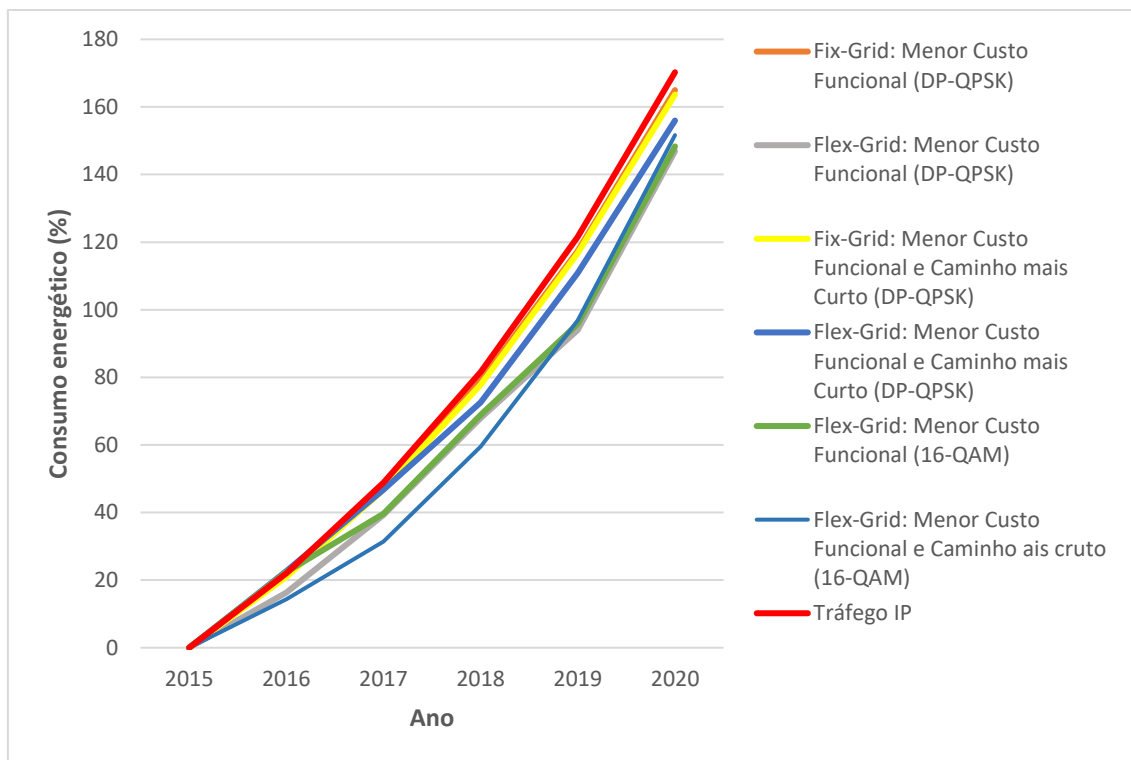


Figura 42 - Aumento Percentual do custo operacional em redes *fixed-grid* e *flex-grid* e volume de tráfego

De modo a analisar o impacto de cada tipo de modulação utilizada nas redes *fix-grid* e *flex-grid* a Figura 43 representa o custo de implementação com as modulações DP-QPSK e 16-QAM, para o encaminhamento com base no menor custo de implementação, bem como o menor custo de implementação e caminho mais curto.

Mais uma vez como seria de esperar, os modelos com modulação 16-QAM apresentam sempre menores custos de implementação face aos modelos com modulação DP-QPSK.

Inicialmente para o ano de 2015 o custo de implementação da rede em cenários *fix-grid* com modulação DP-QPSK é 4.2% menor para o encaminhamento com base no caminho mais curto em relação ao encaminhamento com base no caminho mais curto e menor custo de implementação. À medida que os anos passam essa diferença em termos de custo de implementação tende a diminuir. Conseguindo-se em 2020 que o encaminhamento com base no caminho mais curto e menor custo é 1.3% menor em relação ao encaminhamento com menor custo de implementação.

Nos cenários das redes *flex-grid* com modulação 16-QAM é 9.9% inferior ao custo de implementação para o mesmo modelo com modulação DP-QPSK e para o encaminhamento com base no caminho mais curto e menor custo de implementação de 14.3%. À medida que os anos passam essa diferença em termos de custo de implementação tende a diminuir. Conseguindo-se no ano de 2020 uma redução do custo de implementação de 3.8% utilizando modulação 16-QAM face à modulação DP-QPSK para o encaminhamento com base no menor caminho e menor custo de implementação. Não foi possível verificar para o ano de 2020 a relação entre as modulações 16-QAM e DP-DPSK, devido ao servidor não ter conseguido calcular os resultados por falta de recursos. Mesmo assim verifica-se que o modelo *flex-grid* com modulação 16-QAM é o modelo com uma melhor relação de custo de implementação.

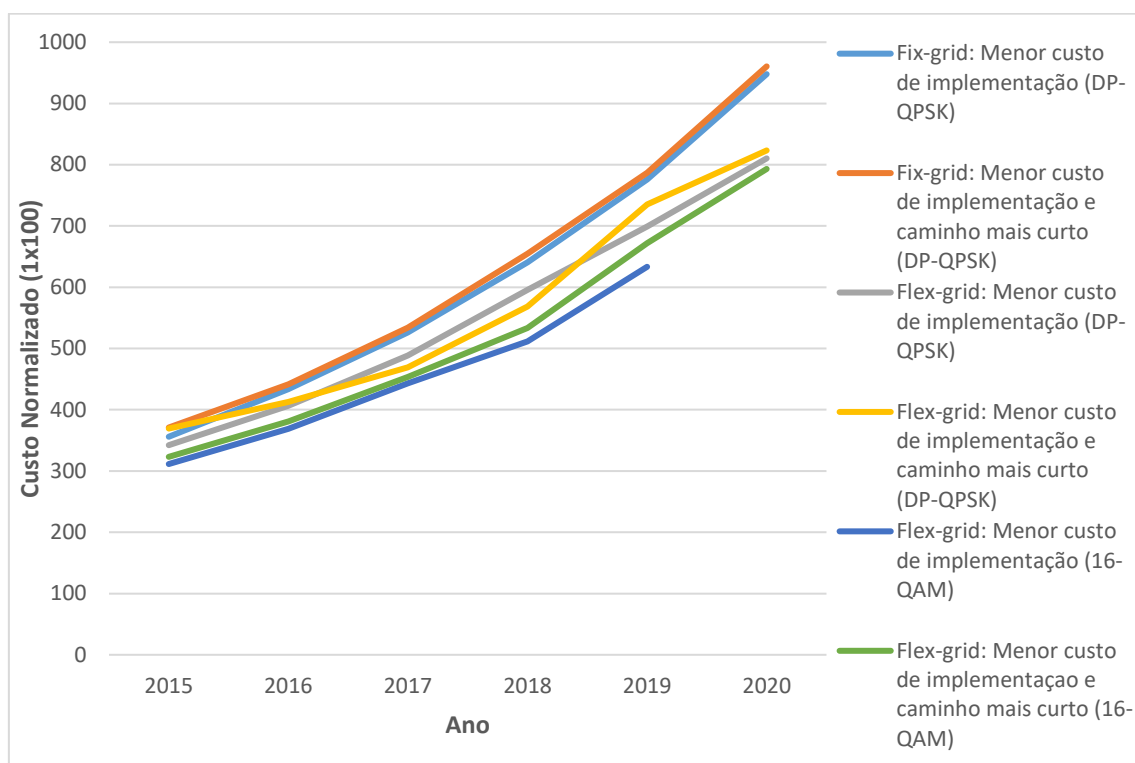


Figura 43 - Custo de implementação das redes *fix-grid* e *flexi-grid* com modulação DP-QPSK e 16-QAM

De modo a analisar o impacto de cada tipo de modulação utilizada nas redes *fix-grid* e *flex-grid* a Figura 44 representa o consumo energético com as modulações DP-QPSK e 16-QAM, para o encaminhamento com base no menor custo operacional, bem como o menor custo operacional e caminho mais curto.

Os resultados obtidos para o custo de implementação são muito parecidos entre as tecnologias e modulações, obtendo-se um menor custo de implementação para os módulos *flex-grid* com modulação 16-QAM

Inicialmente para o ano de 2015 o custo de implementação da rede em cenários *fix-grid* com modulação DP-QPSK é 1.3% menor para o encaminhamento com base no caminho mais curto em relação ao encaminhamento com base no caminho mais curto e menor custo operacional. À medida que os anos passam essa diferença em termos de custo operacional tende a diminuir ligeiramente. Conseguindo-se no ano de 2020 que seja 0.8% menor para o encaminhamento com base no caminho mais curto em relação ao o encaminhamento com base no caminho mais curto e menor custo.

Nos cenários das redes *flex-grid* com modulação 16-QAM é 1.4% inferior ao custo operacional para o mesmo modelo com encaminhamento com base no caminho mais curto em relação ao encaminhamento com base no caminho mais curto com menor custo operacional. À medida que os anos passam essa diferença em termos de custo de implementação tende a aumentar. Conseguindo-se no ano de 2020 uma redução do custo de implementação de 2.8% utilizando modulação 16-QAM face à modulação DP-QPSK para o encaminhamento com base no menor caminho.

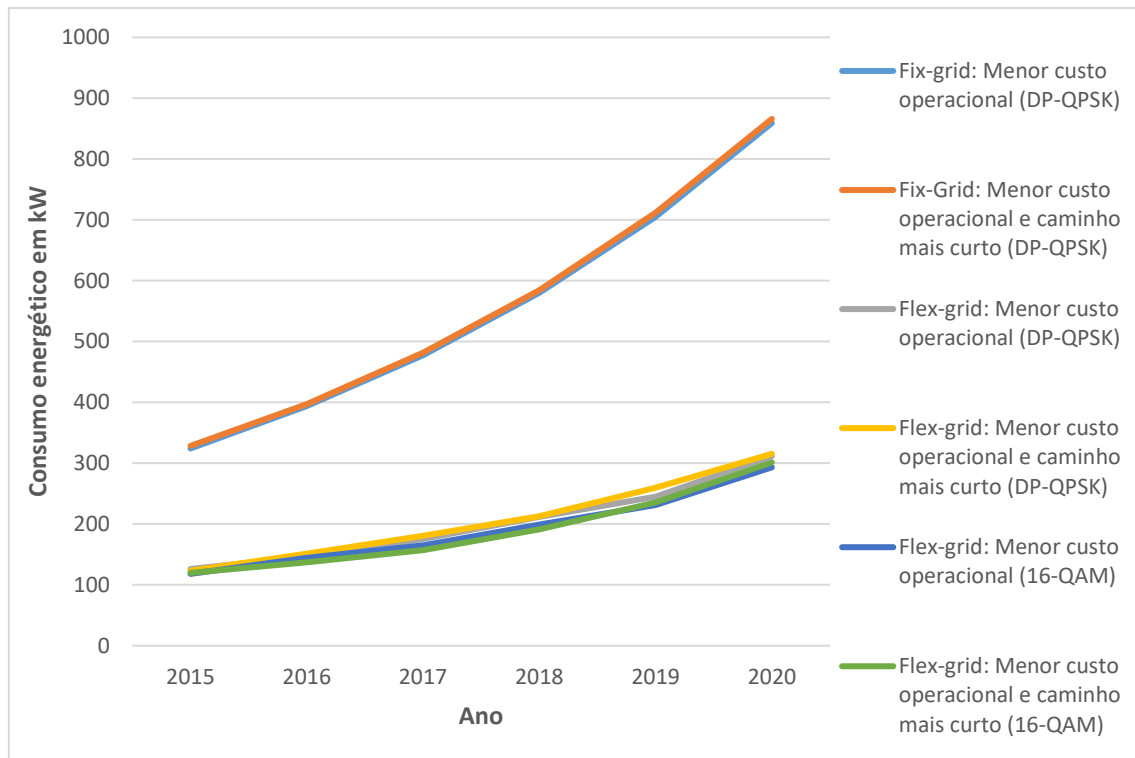


Figura 44 - Custo operacional das redes fix-grid e flexi-grid com modulação DP-QPSK e 16-QAM

4.4. Tempo de simulação

Devido à elevada complexidade dos modelos considerados, foram encontradas algumas dificuldades nos resultados obtidos, principalmente nos modelos *flex-grid*, mais propriamente na modulação 16-QAM, em que ao fim de 107 horas o servidor reiniciou devido a não ter mais recursos para encontrar uma solução. Isto acontece devido à elevada quantidade de variáveis e a diversas possibilidades de encaminhamento, o que leva a que seja necessário adicionar um maior número de restrições, tornando assim o modelo demasiado pesado para os recursos utilizados. Esta limitação levou a que o tempo de simulação de cada modelo fosse demasiado longo, não se conseguindo extrair o resultado final das simulações.

Capítulo 5: Conclusões

Devido ao aumento do número de aplicações e de cada vez mais os dispositivos estarem ligados às redes de telecomunicações, quer seja por IP ou ligados a serviços de *cloud*, cada vez mais existe uma implicação directa no crescimento das infra-estruturas de redes, e consequentemente o aumento do seu custo de implementação e operacional das mesmas. Considerando o uso de combustíveis fósseis responsáveis pela emissão de CO_2 no processo de produção de energia eléctrica, as redes de telecomunicações passam assim a ter cada vez mais um papel predominante na emissão de CO_2 .

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, nos resultados obtidos verifica-se que em média uma rede IP gasta 90% do consumo energético e a rede WDM apenas 10%. Nota-se também que o maior custo provém da camada IP, sendo que deve de ser aqui que se deverá de investir de modo a tornar a rede mais rentável. Desta forma torna-se necessário investir mais nas redes IP em vez na rede WDM, além da eficiência dos próprios equipamentos, existem ainda outras possibilidades para a redução do custo total da rede, nomeadamente o uso de arquitecturas de redes, tais como as redes *flex-grid*. É necessário também a utilização de métodos de encaminhamento mais eficientes 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 esta dissertação, mais especificamente em redes *fixed-grid* e *flex-grid* de transporte IP sobre WDM.

O estudo foi realizado tendo como base a topologia de uma rede da Alemanha com 17 nós. Para analisar a evolução do custo de implementação e operacional desde o ano de 2015 até ao ano de 2020, efectuou-se um reajuste anual à matriz de tráfego de 2004, com base na previsão de crescimento de tráfego disponibilizados pelo Cisco VNI.

As simulações realizadas e os resultados apresentados tiveram por base modelos MILP. Consideram-se dois modelos de rede MLR IP sobre WDM cm *bypass* óptico, para arquitecturas de rede *fixed-grid* e *flex-grid* respectivamente. Visto a possibilidade de utilização de diferentes tipos de modulação nas redes *flex-grid*, dada a flexibilidade espectral associada a esta tecnologia, considerou-se nos modelos *flex-grid* dois cenários distintos. O primeiro cenário *flex-grid* tem por base uma modulação DP-QSPK de modo a possibilitar a comparação com as redes tradicionais, *fixed-grid*, que utilizam o mesmo formato de modulação. Num segundo cenário *flex-grid* considerou-se uma modulação 16-QAM, tratando-se de uma modulação de nível superior consegue reduzir a largura de banda necessária nos canais de transmissão. Em todos os cenários de simulação foram considerados dois métodos de encaminhamento baseados nos seguintes objectivos:

- Minimização do custo de implementação e operacional total da rede
- Minimização do custo de implementação e operacional total da rede considerando o caminho mais curto

Das simulações realizadas, do ponto de vista de implementação verificou-se que as redes *fixed-grid* tendem a ter um maior custo em relação às *flex-grid*. Nos dois modelos *fixed-grid* verifica-se que seguem sempre os dois muito próximos um do outro, ao longo dos anos verifica-se também que a distancia do custo de implementação tende a aumentar, levando a que estas

redes tenham um custo mais elevado em relação às redes *flex-grid*. Analisando as simulações verifica-se que as interfaces de 10 Gbps praticamente não são utilizadas, sendo na sua maioria utilizadas as interfaces de 40 Gbps e algumas de 100 Gbps. Nos modelos *flex-grid* testados, tal como esperado, devido ao elevado tráfego é utilizado maioritariamente interfaces de 1 Tbps, seguidas das interfaces de 400 Gbps, verifica-se também que devido ao elevado tráfego, as interfaces de 100 Gbps são praticamente inexistentes. Em termos de custos de implementação é preferível ter uma modulação 16-QAM em relação à modulação DP-QPSK, sendo também preferível ter um método de encaminhamento com base no menor custo do que o encaminhamento com base no menor caminho e menor custo.

Das simulações realizadas, do ponto de vista do custo operacional verifica-se que as redes *fixed-grid* tendem a ter um maior custo operacional em relação às *flex-grid*. Nos dois modelos *fixed-grid* verifica-se que seguem sempre os dois muito próximos um do outro, ao longo dos anos verifica-se também que a distancia do custo operacional tende a aumentar, levando a que estas redes tenham um custo mais elevado em relação às redes *flex-grid*. Analisando as simulações é visível verificar que as interfaces de 10 Gbps praticamente não são utilizadas, sendo na sua maioria utilizadas as interfaces de 100 Gbps. Nos modelos *flex-grid* testados, tal como esperado, devido ao elevado tráfego é utilizado maioritariamente interfaces de 1 Tbps, seguidas das interfaces de 40 Gbps, verifica-se também que devido ao elevado tráfego, as interfaces de 100 Gbps são praticamente inexistentes. Em termos de custos funcionais é preferível ter uma modulação 16-QAM em relação à modulação DP-QPSK, é também preferível ter um método de encaminhamento com base no menor custo do que o encaminhamento com base no menor caminho e menor custo. Nota-se também que o maior custo provém da camada IP, sendo que deve de ser aqui que se deverá de investir de modo a tornar a rede mais rentável.

Comparando os custos de implementação nos modelos *flex-grid* em relação aos modelos *fixed-grid* com modulação DP-QPSK verifica-se uma redução do custo de implementação para o ano de 2020 de 17.0% para o encaminhamento segundo o menor custo de implementação. Esta redução no custo de implementação deve-se essencialmente à possibilidade de existência de canais de transmissão com maior capacidade nas redes *flex-grid*, diminuindo o número de interfaces necessárias. Verifica-se que a utilização da modulação 16-QAM nas redes *flex-grid* tem um custo de implementação menor do que a modulação DP-QPSK, reduzindo-se o custo de implementação da rede em 2019 de 6.1% para o encaminhamento com base no menor custo e de 5.2% para encaminhamento com base no menor custo e caminho mais curto.

Comparando os custos funcionais nos modelos *flex-grid* em relação aos modelos *fixed-grid* com modulação DP-QPSK verifica-se uma redução do custo operacional para o ano de 2020 de 175.8% para o encaminhamento segundo o menor custo operacional e de 174.5% para o encaminhamento segundo o menor custo operacional e menor caminho. Esta redução no custo operacional deve-se essencialmente à possibilidade de existência de canais de transmissão com maior capacidade nas redes *flex-grid*, diminuindo o número de interfaces necessárias. Verifica-se que a utilização da modulação 16-QAM nas redes *flex-grid* tem um custo operacional menor do que a modulação DP-QPSK, reduzindo-se o custo operacional da rede em 2020 de 2.8% para o encaminhamento com base no menor custo e de 1.3% para encaminhamento com base no menor custo e caminho mais curto.

5.1. Trabalho futuro

Tendo presente que as redes IP sobre WDM com uso da tecnologia *flex-grid* constituem um tema inovador e bastante actual, sugere-se sejam efectuados alguns desenvolvimentos nesta área das redes ópticas.

Por forma a se poder evoluir neste tema utilizando redes de maior dimensão, arquitectura de rede mais complexas e até mesmo obter o resultado óptimo para os modelos onde não foi possível extrair o resultado final das simulações no âmbito desta dissertação, a abordagem a considerar passa por implementar algoritmos heurísticos que reduzam o tempo de simulação sem comprometer os resultados.

Foram utilizados modelos para os custos de implementação e para o custo operacional, tanto para redes *fix-grid* como para redes *flex-grid*, com modulações DP-QPSK e 16-QAM, tendo sido utilizado um valor fixo tanto para os custos de implementação como para os custos funcionais. Foi também utilizado um valor fixo para a largura de banda associada a cada canal. Com o avançar dos anos os custos com a tecnologia tendem a reduzir e as modulações de nível superior possuem uma maior eficiência espectral, no entanto, um menor alcance e que quanto menor a largura de banda atribuída a cada canal de transmissão menor o seu alcance. Pelo que seria interessante otimizar o modelo de forma a conseguir com que os valores de custo de implementação e de custo operacional fossem diminuindo ao longo dos anos e desta forma verificar qual a modulação a utilizar, a largura de banda a atribuir a cada canal de transmissão em função da distância da ligação de modo a tornar a rede mais eficiente.

Referências

- [1] W. P. Cisco and/or its affiliates, “Cisco Visual Networking Index Predicts Near-Tripling of IP Traffic by 2020,” USA, 2016.
- [2] W. P. Cisco and/or its affiliates, “Global IP Video Traffic Growth, 2014-2019,” USA, 2015.
- [3] T. N. Y. TIMES, “The Road to a Paris Climate Deal,” 12 December 2015. [Online]. Available: <https://www.nytimes.com/interactive/projects/cp/climate/2015-paris-climate-talks/key-points-of-the-final-paris-climate-draft>.
- [4] D. Schnaufer, “Energy Efficiency In The Telecommunications Network,” 20 July 2016. [Online]. Available: <https://www.rfglobalnet.com/doc/energy-efficiency-in-the-telecommunications-network-0001>.
- [5] M. Mace, “Smart technology could slash global emissions by 15%,” 2015. [Online]. Available: <https://www.edie.net/news/6/Mobile-devices-could-slash-global-emissions-by-15-/>. [Acedido em 21 07 2017].
- [6] M. A. HENRIQUES, ATRIBUIÇÃO E ENCAMINHAMENTO DE COMPRIMENTO DE ONDA EM REDES IP SOBRE WDM ENERGETICAMENTE EFICIENTE, Portugal, 2014.
- [7] B. Welch, 400G Optics – Technologies, Timing, and Transceivers, 2014.
- [8] “. N. R. Ramaswami e K. N. Sivarajan, “A Practical Persperctive,” em *Second Edition*, Morgan Kaufmann Publishers, USA, 2012.
- [9] P. Pinho, Slides de Optical Components, Lisboa: ISEL.
- [10] T. W. N. A. Jingjing Zhang, Designing Energy-efficient Optical Line Terminal for TDM Passive Optical Networks, New Jersey, USA: IEEE, 2011.
- [11] K. T. Umesh Tiwari, Comparative Study of EDFA/SOA Hybrid Amplifier for Application in Broadband Communication, Chennai, India: IEEE, 2012.
- [12] I. O. F. H. S. J. P. Carvalho, Optical Cross-Connect Architectures based on Fibre Bragg Gratings and Optical Circulators, London Communications Symposium: IEEE, 2002.
- [13] J. Pires, Slides de Redes Ópticas, Instituto Superior Tecnico de Lisboa: IST.
- [14] A. N. P. ., L. P. ., A. a. M. P. P. S. André, Optical Add-Drop Multiplexer Based on Fiber Bragg Gratings for Dense Wavelength Division Multiplexing Networks, Aveiro: Universidade de Aveiro.
- [15] R. L. C. R. S. F. A. C. a. V. C. Fernando P. Guiomar, Hybrid Modulation Formats Enabling Elastic Fixed-Grid Optical Networks, IEEE, 2016.
- [16] M. T. M. X. J. W. J. Z. Y. Z. J. Z. B. M. Xiaosong Yu, Migration from Fixed Grid to Flexible Grid in Optical Networks, IEEE, 2015.
- [17] L. V. J. C. a. G. J. Alberto Castro, Dynamic Restoration in Multi-layer IP/MPLS-over Flexgrid Networks, Barcelona: IEEE.

- [18] R. I.-T. G.694.1, Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid, TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU, 2012.
- [19] N. S. GOUVEIA, Otimização energética em redes óticas de próxima geração Flex-Grid vs Fixed-Grid, Portugal, 2015.
- [20] S. M. Claudio Colombo, Reconfigurable DP-16QAM/QPSK Transponders for the Transmission of Coherent 200G Carriers in a Flexgrid Super-Channel Arrangement, Milano: IEEE, 2014.
- [21] E. L. R. D. A. J. A. B. C. N. B. M. Kanj, Optical Power Control to Efficiently Handle Flex-Grid Spectrum Gain over Existing Fixed-Grid Network Infrastructures, Kauai, HI, USA: IEEE, 2016.
- [22] K. Y. a. M. J. H. Takara, Spectrally-efficient Elastic Optical Path Networks Toward 1 Tbps Era, Los Angeles, CA, USA: IEEE, 2013.
- [23] G. W.-y. H. S.-g. ZHENG Yan-lei, An Ant-Based Research on RWA in Optical Networks, Macau, China: IEEE, 2009.
- [24] Los Angeles, CA, USA: IEEE, 2015.
- [25] D. Q. F. Y. a. T. W. Yue-Kai Huang, Real-Time 400G Superchannel Transmission using 100-GbE based 37.5-GHz Spaced Subcarriers with Optical Nyquist Shaping over 3,600-km DMF link, Anaheim, CA, USA: IEEE, 2013.
- [26] R. R. R. M. E. T. B. Arian Ghallaj, Optimizing Spectrum Allocation in Flex-grid Optical Networks, Leipzig: IEEE, 2017.
- [27] O. B.-P. C. B. M. L. E. B. M. L. M. R. a. L. S. B. Lavigne, 400 Gb/s Real-Time Trials on Commercial Systems for Next Generation Networks, IEEE, 2016.
- [28] K.-C. L. A. V. O. K. LI, TRANSMISSION CONTROL PROTOCOL (TCP) IN WIRELESS NETWORKS: ISSUES, APPROACHES, AND CHALLENGES, HONG KONG: IEEE, 2006.
- [29] Next Generation Internet: IPv4 Address Exhaustion, Mitigation Strategies and Implications for the U.S., USA: IEEE-USA White Paper, 2009.
- [30] n. Cisco and/or its affiliates vol.9, The Internet Protocol Journal, USA: Cisco, Setembro 2006.
- [31] Q. Z. W. W. G. Z. J. Y. Y. J. a. L. Y. Tong Ye, Routing Algorithms in IP/WDM Networks Based on Hop-Constraint Lightpath Establishment Approach, IEEE, 2005.
- [32] T. E.-G. a. J. M. H. E. Xiaowen Dong, An Energy Efficient IP over WDM Network, United Kingdom: IEEE, 2010.
- [33] C. TAŞKIN, Performance Analysis in IP over WDM Networks, Turkey: IEEE, 2007.
- [34] I. T. Union, Best practices for green data centres, Recommendation ITU-T L.1300, ITU, 2011.

- [35] I. T. Union, overview and general principles of methodologies for assessing the environmental impact of information and communication technologies, Recommendation ITU-T L.1400, ITU, 2011.
- [36] s. i. IEEE Standards Association, IEEE 802.3az Wins Best Electronic Design Award, IEEE, 2011.
- [37] W. C. S. ETSI, Energy Efficiency, ETSI, 2013.
- [38] C. 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, Bruxelles, Bruxelles: Comissão europeia, 2010.
- [39] ATIS, Sustainability in Telecom: Energy and Protection Committee (STEP), ATIS.
- [40] T. I. A. (TIA), Policy, Energy & Environment, Telecommunications Industry Association, 2013.
- [41] T. I. A. (TIA), Smart Grid Policy Roadmap: Consumer Focused and Technology Driven, Telecommunications Industry Association, 2011.
- [42] H. H. M. I. a. K.-i. S. F. Isao Yagyu, An Efficient Hierarchical Optical Path Network Design Algorithm based on a Traffic Demand Expression in a Cartesian Product Space, IEEE, 2008.
- [43] A. C. L. V. M. R. J. P. F.-P. a. D. C. O. Pedrola, CAPEX Study for a Multilayer IP/MPLS-Over-Flexgrid Optical Network, IEEE, 2012.
- [44] M. R. N. V. G. d. O. B. C. C. A. J. R. F. d. O. J. C. R. F. d. O. Eduardo C. Magalhães, Node Architectures for Next Generation ROADMs: A comparative study among emergent optical solutions, Campinas, Brazil: IEEE, 2013.
- [45] P. P. e. A. T. M. Henriques, Energy-Aware routing and grooming for IP transport over WDM MLR networks, IEEE, Novembro 2014.
- [46] G. S. e. R. S. Tucker, Energy-Minimized Design for IP Over WDM Networks, Optical Society of America, Journal Optical Communication Network (JCON), Vol. 1,, 2009.
- [47] P. N. J. J. J. e. T. W. A. N. Patel, Routing, wavelength assignment, and spectrum allocation algorithms in transparent flexible optical WDM networks, Optical Switching and Networking 9, 2012.
- [48] D. M. Gay, IBM ILOG CPLEX Optimization Studio CPLEX User's Manual, IBM, 2013.
- [49] F. N. C. Inc, Path to 400G, 2013.
- [50] P. M. V. B. R. S. L. W. e. G. I. A. Udalcovs, Spectral and Energy Efficiency Considerations in Mixed-Line Rate WDM Networks with Signal Quality Guarantee, ICTON, 2013.
- [51] C. G. R. H. M. J. M. B. S. B. J. S. C. G. e. M. K. A. Betker, Reference Transport Network Scenarios, Multi Tera Net Report, 2013.
- [52] S. B. M. B. A. B. C. G. M. J. M. K. e. J. S. R. Hülsermann, Set of Typical Transport Network Scenarios for Network Modelling, Leipzig: ITG-Fachtagung Photonische Netze, 2004.

- [53] G. K. F. G. F. A. F. L. M. C. C. T. R. D. S. A. B. T. E. P. Matthijsse, Multimode Fiber enabling 40 Gbit/s multi-mode Transmission over Distances > 400 m, Anaheim, CA, USA: IEEE, 2016.
- [54] D. Z. R. E. S. S. M. A. C. H.-H. J. a. W. K. Reinhard Caspary, "Single-Mode Polymer Optical Fibers," em *Transparent Optical Networks (ICTON), 2014 16th International Conference on*, Graz, Austria, 2014.
- [55] S. W. Koch, Physics and Simulation of Semiconductor Lasers, Baltimore, MD, USA: IEEE, 2005.
- [56] "Laser Systems," em *5th International Conference and Exhibition on Lasers, Optics & Photonics (optics 2016)*, Atlanta, USA, 2016.
- [57] R. O. M. T. M. R. G. A. P. L. B. M. J. P. E. V. S. M. A. G. M. C. W. I. C. Cristian Rivera, Numerical Simulations and Experimental Results of a Hybrid EDFA-Raman Amplifier, Belem, Brazil: IEEE, 2009.
- [58] J. Randers, 2052-A Global Forecast for the Next Forty Years, Vermont, USA: Chelsea Green Publishing, June 2012.
- [59] P. P. K. C. G. P. E. V. P. Soumplis, Energy Minimization Design of Fixed- and Flex-Grid Optical Networks, Athens: IEEE, 2015.