



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
SERVIÇO DE DOCUMENTAÇÃO E PUBLICAÇÕES

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia de Eletrónica e
Telecomunicações e de Computadores

Otimização energética em redes óticas de próxima geração Flex-Grid vs Fixed-Grid

NICOL SIMÕES GOUVEIA

(Licenciada em Engenharia de Eletrónica e Telecomunicações e de
Computadores)

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

Orientadores:

Doutor Pedro Renato Tavares Pinho
Engenheiro Miguel Henriques (Coriant)

Júri:

Presidente: Doutor Mário Pereira Véstias

Vogais:

Doutor António Luís Jesus Teixeira
Doutor Pedro Renato Tavares Pinho

Dezembro de 2015

agradecimentos

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

A todos professores que me ensinaram e incentivaram a aprender ao longo dos anos, e em especial ao meu orientador, o Prof. 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 deste dissertação, por todo apoio que me foi dando, fundamentalmente no início da implementação dos modelos e no esclarecimento de dúvidas.

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

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

A avaliação e redução do consumo energético de redes *core* tem sido um assunto recorrente em investigações acadêmicas nos últimos anos. Atualmente os serviços de rede utilizam uma elevada largura de banda colocando o ônus 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 óticos disponíveis, com velocidades de 10, 40, 100 Gbps, até aos esperados 400 Gbps e ou até 1 Tbps nas redes *core*.

As redes DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) de próxima geração permitirão uma transmissão ótica eficiente com *bit rates* a partir dos 400 Gbps utilizando tecnologia *flex-grid*. O *flex-grid* proporciona aos operadores maior flexibilidade na atribuição de espectro quando comparado com as tradicionais redes fixas WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), *fixed-grid*, que utilizam a grelha de 50 GHz do ITU-T. No *flex-grid* o espectro é dividido em pequenos *slots*, como recentemente definido pelo ITU-T. Esta flexibilidade adicional permitirá o transporte mais rápido, utilizando canais óticos que operam a velocidades diferentes com uma alocação espectral menos fixa e rígida dos comprimentos onda atribuídos. Fazendo uso deste novo formato de atribuição de espectro, o *flex-grid* proporcionará aos operadores de rede a capacidade para transportar mais tráfego nas redes WDM com maior eficiência dada a otimização espectral e redução de OPEX (*OPerational EXpenditure*).

Recorrendo à plataforma de simulação *IMB ILOG CPLEX*, nesta dissertação irá efetuar-se o estudo comparativo entre diferentes modelos de otimização energética para redes *core* IP (*Internet Protocol*) sobre WDM com foco em técnicas de encaminhamento energeticamente eficientes, como o *bypass* ótico. Tendo por base as tecnologias *fixed-grid* e *flex-grid*, os modelos em questão possibilitam a utilização de canais com diferentes velocidades de transmissão na mesma fibra ótica (MLR).

De forma a efetuar-se uma abordagem realista, utilizou-se uma rede da Alemanha fazendo uso da matriz de tráfego IP e previsão de crescimento de tráfego anual (CAGR) segundo VNI da Cisco, com base em informação estatística.

Da comparação entre os diferentes modelos concluiu-se que as redes *flex-grid* são energeticamente mais eficientes, conseguindo-se uma redução do consumo global da rede em 60% face às redes tradicionais, *fixed-grid*. As redes *flex-grid* permitem o transporte de volumes de tráfego elevados de forma energeticamente mais eficiente devido à maior capacidade, eficiência energética e espectral dos canais de transmissão associados a este tipo de redes.

Palavra-chave: *Flex-grid*, *Fixed-grid*, IP, WDM, eficiência, energia, espectro.

Abstract

The evaluation and reduction of energy consumption of core network has been a popular subject of academic research in the last years. Currently the network services use high bandwidth and put the onus on the network operators in order to efficiently use the network resources. The Standardization Groups are doing a significant progress moving from available optical channels (10, 40, 100 Gbps) up to the expected 400 Gbps or even 1 Tbps in the future core networks.

The next generation of DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) allow spectrum-efficient optical transmission with bit rates from 400 Gbps and beyond using flex-grid technology. Flex-grid provide flexibility to the operators when assigning spectrum compared to traditional fixed-grid WDM (Wavelength Division Multiplexing) networks using the 50 GHz ITU grid. In the flex-grid networks the spectrum is broken into small slots as recently defined by ITU-T. This additional flexibility will allow faster transport by using optical channels operating at different speeds with different spectral widths assigned. From the use of these new spectrum allocation format, a key benefit that flex-grid offers to the network operators the ability to carry more traffic over WDM networks with optimized spectral efficiency and reduction of OPEX (OPERational EXpenditure).

Using IBM ILOG CPLEX simulation platform, in this dissertation will be performed a study of different energy optimization models for IP (Internet Protocol) transport over WDM network, focusing on energy efficient routing techniques such as optical bypass. Based on the fixed-grid and flex-grid technologies, the models allow the use of channels with different transmission speeds on the same optical fiber (MLR).

In order to get results more closely to reality, in this study a real German network was considered with IP traffic matrix and Cisco VNI forecast compound annual growth rate (CAGR), allowing consumption analysis along some years.

After comparing different models it was possible to conclude that flex-grid networks has a better performance in energy-aware over traditional fixed-grid networks, achieving a reduction in overall network consumption by 60%. Flex-grid can carry higher volumes of traffic with lower energy consumption due to higher capacity and spectral efficiency of the transmission channels.

Keywords: Flex-grid, Fixed-grid, IP, WDM, efficiency, energy, spectrum.

Índice

Resumo	i
Abstract	iii
Índice	v
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xi
Lista de Acrónimos.....	xiii
Capítulo 1 - Introdução.....	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Motivação	4
1.3. Objetivos do trabalho em desenvolvimento	5
1.4. Estrutura do documento	5
1.5. Principais Contribuições.....	6
Capítulo 2 - Estado da Arte - Redes Óticas	7
2.1. Componentes de uma rede ótica.....	8
2.1.1. Fonte Ótica - Laser	10
2.1.2. Fibra Ótica.....	11
2.1.3. Optical Line Terminal	11
2.1.4. Optical Line Amplifier	12
2.1.5. Optical Add and Drop Multiplexers	14
2.1.6. Optical Crossconnects	15
2.2. Topologias de rede	16
2.3. Comprimentos de onda, frequência e espaçamento de canal	18
2.4. Tecnologia Flex-grid	20
2.4.1. Alocação de espectro em Flex-grid.....	21
2.4.1.1. Superchannel	23

2.4.1.2. Modulação	23
2.4.2. RWSA	24
2.4.3. Questões em aberto no Flex-grid	25
2.4.3.1. Fragmentação de Espectro	25
2.4.3.2. Exigência de Tráfego	27
2.5. Camada de internet - Modelo TCP/IP	27
2.5.1 Router IP	29
2.5.2. Encaminhamento IP	30
2.6. IP sobre WDM - Arquitetura Multicamadas	32
2.6.1 Arquitetura de modelo IP sobre WDM	34
2.6.1.1. ROADM Directionless	35
2.6.1.2. ROADM CDC	36
Capítulo 3 - Modelos de redução do consumo energético.....	39
3.1. Algoritmo de Otimização MILP	40
3.1.1. Pré-processamento de parâmetros	42
3.1.2. Objetivo e restrições do modelo	42
3.2. Modelos de Otimização	45
3.2.1. Modelo Fixed-grid: menor consumo energético	46
3.2.2. Modelo Fixed-grid: caminho mais curto e menor consumo energético	47
3.2.3. Modelo Flex-grid: menor consumo energético	47
3.2.4. Modelo Flex-grid: caminho mais curto e menor consumo energético	51
3.3. Cenário de Otimização - Topologia de Rede	52
3.3.1. Requisitos de Tráfego	54
3.3.2. Consumo energético de equipamentos de rede	55
Capítulo 4 - Resultados	59
4.1. Resultados Modelos Fixed-grid	60
4.1.1. Modelo Fixed-grid – Menor consumo energético	60

4.1.2. Modelo Fixed-grid – Menor consumo energético e caminho mais curto	61
4.2. Resultados Modelos Flex-grid.....	62
4.2.1. Modelo Flex-grid com modulação DP-QPSK – Menor consumo energético.....	63
4.2.2. Modelo Flex-grid com modulação 16-QAM – Menor consumo energético.....	64
4.2.3. Modelo Flex-grid com modulação DP-QPSK – Menor consumo energético e caminho mais curto	65
4.2.4. Modelo Flex-grid com modulação 16-QAM – Menor consumo energético e caminho mais curto	65
4.3. Resultados comparativos entre modelos.....	66
4.3.1. Consumo total de Potência	67
4.3.2. Eficiência Energética.....	70
4.4. Tempo de Simulação	71
Capítulo 5 - Considerações Finais.....	73
5.1. Conclusões.....	73
5.2. Trabalho futuro	75
Referências.....	77

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Previsão de crescimento de tráfego IP global, [2].	1
Figura 1.2 – Conseqüências do aumento do tráfego, [4].	2
Figura 1.3 – Previsão do consumo energético nas redes de telecomunicações, [6].	3
Figura 2.1 – Rede ótica com representação dos elementos de rede, [16].	9
Figura 2.2 – Diagrama de blocos de um OLT, [3].	12
Figura 2.3 – Amplificador EDFA, [16].	13
Figura 2.4 – OADM, [3].	14
Figura 2.5 – OXC, [3].	15
Figura 2.6 – Topologias de rede, [3].	16
Figura 2.7 – Grelha de frequências 100 GHz ITU, [16].	19
Figura 2.8 – Grelha <i>fixed-grid</i> WDM com largura de banda de 50 GHz, [11].	19
Figura 2.9 – Grelha <i>flex-grid</i> WDM com largura de banda de 12.5 GHz, [11].	20
Figura 2.10 – Comparação dos regimes de repartição de tráfego na rede tradicional WDM com base nos canais de largura de banda fixa e da rede flexível, [31].	21
Figura 2.11 – (a) Espectro ótico dividido em slots (b) Ligação ótica utilizando um conjunto de slots (c) atribuição de canal, [34].	24
Figura 2.12 – Alocação de espectro entre os nós A e E, [19].	26
Figura 2.13 – Modelo OSI.	27
Figura 2.14 – Modelo em camadas do protocolo IP.	28
Figura 2.15 – Cabeçalhos de um pacote IPv4 e IPv6, [22].	29
Figura 2.16 – Funcionalidades de Router IP, [3].	30
Figura 2.17 – Possibilidades de arquiteturas multicamadas para mapeamento IP sobre WDM, [16].	34
Figura 2.18 – Arquitetura IP sobre WDM.	35
Figura 2.19 – Arquitetura de ROADM <i>directionless</i> .	36
Figura 2.20 – Arquitetura de ROADM CDC.	37

Figura 3.1 – Modelos de Otimização.	46
Figura 3.2 – Topologia de rede da Alemanha com 17 nós de rede [13].	52
Figura 4.1 – Previsão de Crescimento de Tráfego IP com base na matriz de tráfego de 2004.60	
Figura 4.2 – Consumo energético do modelo <i>fixed-grid</i> , considerando menor consumo energético.	61
Figura 4.3 – Consumo energético do modelo <i>fixed-grid</i> , considerando menor consumo energético e caminho mais curto.	62
Figura 4.4 – Consumo energético do modelo <i>flex-grid</i> com modulação DP-QPSK, considerando menor consumo energético.	63
Figura 4.5 – Consumo energético do modelo <i>flex-grid</i> com modulação 16-QAM, considerando menor consumo energético.	64
Figura 4.6 – Consumo energético do modelo <i>flex-grid</i> com modulação DP-QPSK, considerando menor consumo energético e caminho mais curto.	65
Figura 4.7 – Consumo energético do modelo <i>flex-grid</i> com modulação 16-QAM, considerando menor consumo energético e caminho mais curto.	66
Figura 4.8 – Consumo total energético da rede MLR IP sobre WDM <i>fixed-grid</i> e <i>flex-grid</i> com modulação DP-QPSK.	67
Figura 4.9 – Consumo total energético da rede IP sobre WDM <i>flex-grid</i> com modulação DP-QPSK e 16-QAM.	68
Figura 4.10 – Aumento percentual do consumo energético em redes <i>fixed-grid</i> e <i>flex-grid</i> e volume de tráfego IP.	69
Figura 4.11 – Eficiência energética da rede MLR IP sobre WDM <i>fixed-grid</i> e <i>flex-grid</i>	70

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Requisitos espectrais <i>flex-grid</i> com largura de banda de 50 GHz, [32].	22
Tabela 3.1 – Parâmetros da topologia de rede, [12].	52
Tabela 3.2 – Distância física entre os nós de rede, [12].	53
Tabela 3.3 – Parâmetros de tráfego IP com base no ano de 2004, [12].	54
Tabela 3.4 – Matriz de tráfego IP com base no ano de 2004, [12].	54
Tabela 3.5 – Previsão de crescimento de tráfego IP em Europa Ocidental, baseado em [1] e [41- 42].	55
Tabela 3.6 – Componentes da camada WDM.	56
Tabela 3.7 – Componentes de <i>router</i> IP – Interfaces Ethernet WDM.	56
Tabela 3.8 – Largura de banda dos canais.	57
Tabela 3.9 – Parâmetros de simulação.	57

Lista de Acrónimos

Acrónimo	Designação
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
AS	<i>Autonomous System</i>
ATM	<i>Asynchronous Transfer Mode</i>
BGP	<i>Border Gateway Protocol</i>
BV-OXC	<i>Bandwidth-Variable-Optical Cross-Connects</i>
CAGR	<i>Compound Annual Growth Rate</i>
CAPEX	<i>CAPital EXpenditure</i>
CDC	<i>Colorless, Directionless, and Contentionless</i>
CEN	<i>European Committee for Standardization</i>
DBR	<i>Distributed Bragg Reflector</i>
DEMUX	<i>Demultiplexer</i>
DFB	<i>Distributed FeedBack</i>
DP-QPSK	<i>Dual Polarization - Quadrature Phase-Shift-Keying</i>
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>
EDFA	<i>Erbium-Doped Fiber Amplifier</i>
FS	<i>Frequency Slots</i>
GFP	<i>Generic Framing Procedure</i>
GHG	<i>Green House Gases</i>
HDLC	<i>High-level Data Link Control</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commissio</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IETF	<i>Internet Engineering Task Force</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IPv4	<i>Internet Protocol version 4</i>
IPv6	<i>Internet Protocol version 6</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ITU-T	<i>International Telecommunications Union Telecommunication</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
MCS	<i>Multicast Switch</i>
MILP	<i>Mixed Integer Linear Programming</i>

MLR	<i>Multi-Line-Rate</i>
MPLS	<i>Multi-Protocol Label Switching</i>
MUX	<i>Multiplexer</i>
NRZ	<i>Non-Return-to-Zero</i>
OADM	<i>Optical Add-Drop Multiplexer</i>
O-E-O	<i>Optical-Electrical-Optical</i>
OLT	<i>Optical Line Terminals</i>
ONU	<i>Organização das Nações Unidas</i>
OOK	<i>On-Off Keying</i>
OPEX	<i>Operational EXpenditure</i>
OSC	<i>Optical Supervisory Channel</i>
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>
OSNR	<i>Optical Signal-to-Noise Ratio</i>
OTDM	<i>Optical Time-Division Multiplexing</i>
OTN	<i>Optical Transport Network</i>
OXC	<i>Optical Cross-Connect</i>
POS	<i>Packet-Over-SONET</i>
PPP	<i>Point-to-Point Protocol</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
ROADM	<i>Reconfigurable Optical Add and Drop Multiplexer</i>
RWA	<i>Routing, Wavelength Assignment</i>
RWSA	<i>Routing, Wavelength assignment, and Spectrum Allocation</i>
SDH	<i>Synchronous Digital Hierarchy</i>
SMF	<i>Single Mode Fiber</i>
SONET	<i>Synchronous Optical Networking</i>
SRS	<i>Stimulated Raman Scattering</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
VNI	<i>Visual Networking Index</i>
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>
WSS	<i>Wavelength Selective Switch</i>
WXC	<i>Wavelength Cross Connect</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1. Enquadramento

Durante os últimos anos, muitas mudanças foram acontecendo na indústria de telecomunicações, com impactos na vida das pessoas. O constante crescimento das redes de telecomunicações e a sua evolução deram origem à maior rede do mundo, a Internet. O tráfego IP (*Internet Protocol*) global está a crescer a um ritmo acelerado, sendo que quintuplicou nos últimos cinco anos e prevê-se que vá triplicar nos próximos cinco anos [1], forçando as operadoras a aumentarem a capacidade e a dimensão das suas infraestruturas. Prevê-se um crescimento do tráfego IP global de 168 EB por mês em 2019 acima dos 59.9 EB por mês em 2014, que se traduz num crescimento médio anual, CAGR (*Compound Annual Growth Rate*), de 23%, tal como ilustrado na figura 1.1.

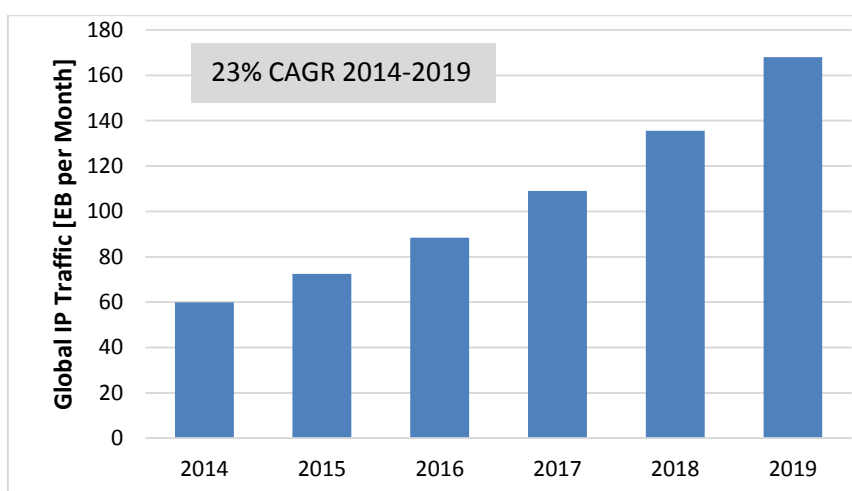


Figura 1.1 – Previsão de crescimento de tráfego IP global, [2].

As tecnologias associadas as redes óticas são responsáveis pela enorme largura de banda disponíveis no mundo atual e as mesmas continuam a evoluir rapidamente em termos de funcionalidades e de capacidade. Os centros de pesquisa, a indústria de equipamentos de telecomunicações e as organizações de padronização, tais como o IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) e o ITU-T (*International Telecommunications Union Telecommunication Standardization Sector*), são os principais responsáveis pelo desenvolvimento das redes óticas [3].

A expansão das redes de telecomunicações, o surgimento de novos serviços e o correspondente aumento do tráfego tem levado a um aumento dos equipamentos de rede necessários, aumentando assim o CAPEX¹ (*CAPital EXpenditure*), bem como a um aumento acentuado do consumo energético, aumento do OPEX² (*OPERational EXpenditure*), e das emissões de CO₂ (*Carbon Dioxide*) associadas a estas redes, como é possível verificar no esquema apreseto na figura 1.2.

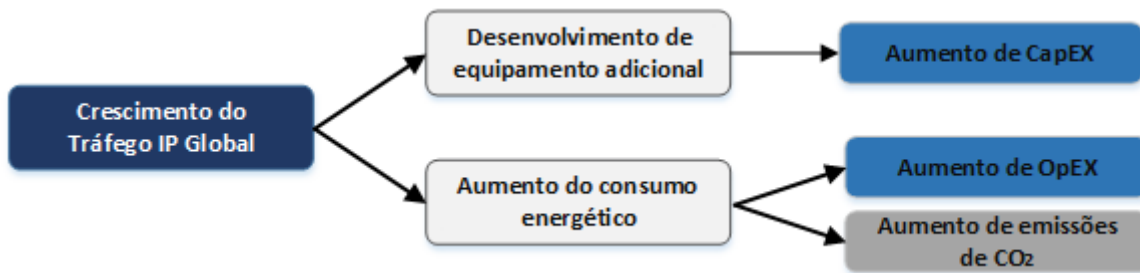


Figura 1.2 – Consequências do aumento do tráfego, [4].

Na sociedade atual tem-se notado uma crescente necessidade de colocar o nível de consumo energético no topo da agenda de investigação. Desde o trabalho original apresentado por Gupta e Singh [5], em 2003, vários grupos de investigação têm procurado soluções para reduzir os consumos energéticos nas redes de telecomunicações. A Figura 1.3 demonstra o preocupante aumento do consumo energético por parte das redes de telecomunicações em função dos anos. A investigação em redes óticas eficientes do ponto de vista energético tem merecido especial atenção [6]. Mais recentemente, com o objetivo de reduzir as emissões de CO₂, começou a

¹ Montante de investimentos realizados em equipamentos e instalações de forma a manter a produção de um produto ou serviço.

² Custo associado à manutenção dos equipamentos e aos gastos de consumíveis e outras despesas operacionais.

considerar-se o uso de fontes de energia renovável como forma de reduzir o impacto das redes óticas no efeito de estufa [7].

Atualmente, os recursos energéticos tradicionais, como a energia fornecida pelos hidrocarbonetos, formam grande parte do consumo energético, mas esse tipo de energia não é renovável. Além disso, a combustão de materiais de hidrocarbonetos liberta grandes quantidades de gases, GHG (*Green House Gases*), um dos principais responsáveis pelo aquecimento global, problema este que foi alvo de debate na cimeira do clima da ONU (Organização das Nações Unidas) por parte dos grandes líderes mundiais, realizada em Setembro de 2014 em Nova Iorque. Assim, tem-se vindo a reunir esforços para colmatar esta situação.

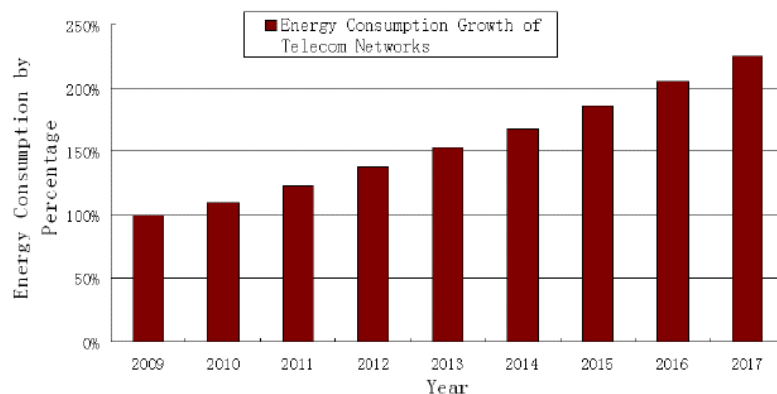


Figura 1.3 – Previsão do consumo energético nas redes de telecomunicações, [6].

Uma solução possível para a redução de emissões de CO₂ é a utilização de energia renovável, que abre o caminho para um desenvolvimento social sustentável e favorável ao meio ambiente. No entanto estas fontes renováveis têm limitações, como por exemplo, a existência de vento ou sol. A segunda solução está associada ao desenvolvimento de componentes, equipamentos, tecnologias e sistemas mais eficientes energeticamente, não só com a finalidade de reduzir os custos, mas também com o objetivo de melhorar o nosso meio ambiente.

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

Como tal o presente trabalho, com base nestas previsões pretende apresentar soluções mais eficientes de distribuição de tráfego IP que minimizem o aumento de emissões de CO₂, associado à produção de energia elétrica.

1.2. Motivação

Como resposta ao crescente aumento de tráfego IP nas redes de telecomunicações, existe a necessidade de aumentar a capacidade das infraestruturas atuais quer seja aumentando o número de canais ou fibras óticas, ou até adotar o uso de tecnologias de redes de transporte óticas mais avançadas, com uma maior eficiência espectral.

O IP é o protocolo que permite a convergência na Internet à escala global. Este é um protocolo de camada 3 e é projetado para lidar com a interoperabilidade das redes e o encaminhamento em níveis de sub-redes diferentes, permitindo a utilização de tecnologias nas diversas camadas superiores e inferiores. As camadas superiores contêm uma grande variedade de serviços baseados em IP, uma grande parte dos quais ainda estão em evolução e outros em desenvolvimento. Um exemplo é a interligação de uma variada gama de equipamentos em redes domésticas, tais como multifunções, computadores portáteis, telemóveis, etc. Quanto às camadas inferiores, existe uma convergência para a utilização de fibra ótica através dos sistemas WDM (*Wavelength Division Multiplexing*). Esta convergência deve-se ao facto da tecnologia ótica oferecer uma enorme capacidade em termos de largura de banda.

Nos últimos 15 anos tem sido utilizada uma grelha WDM fixa disponibilizada pelo ITU que permite aos operadores de rede optar entre uma largura espectral de 50 GHz ou 100 GHz [8]. Esta grelha fixa tem permitido aos operadores suportar o constante aumento de tráfego com aumentando simplesmente da velocidade de transporte associado a cada canal ótico. Os canais óticos tem evoluídos dos 2,5 Gbps até aos atualmente disponíveis de 10 Gbps, 40 Gbps e 100 Gbps com avanços tecnológicos que lhes tem permitido manter uma largura espectral de 50 GHz [8].

Prevê-se que no futuro os atuais canais óticos disponíveis não sejam suficientes para acomodar o crescimento do volume de tráfego nas redes de telecomunicações de forma eficiente, como tal os grupos de standarização estão a fazer esforços de modo a disponibilizar canais óticos de 400 Gbps em 2017 e até 1 Tbps em 2020 nas redes *core* [9].

Para a próxima geração de sistemas WDM, estudos tem mostrado que é difícil manter a largura espectral de 50 GHz, para a viabilização de canais óticos com velocidades a partir dos 400 Gbps utilizando um formato de modulação *standard* com alcances úteis. Assim, a grelha de 50 GHz não vai ser suficiente para suportar o futuro aumento de tráfego. Uma opção seria a utilização de uma grelha fixa de 100 GHz mas isso traduzir-se-ia numa baixa eficiência espectral para canais que utilizam uma menor largura de banda.

Os recentes avanços na tecnologia de transmissão e recepção coerente fazem com que seja possível a utilização de canais ótico que operam a velocidades diferentes com uma alocação espectral menos fixa e rígida dos comprimentos onda atribuídos, redes *flex-grid*, criando assim uma relação entre o alcance e o custo dos diferentes equipamentos de modo a melhorar a eficiência energética e diminuir o custo total da rede [10]. Assim, estas são concebidas com o objetivo de minimizar os custos (CAPEX), utilizando algoritmos apropriados RWA (*Routing and Wavelength Assignment*)/RSA (*Routing and Spectrum Allocation*). No entanto o ponto-chave para a redução de despesa de operação (OPEX) neste tipo de redes é o consumo energético [11].

1.3. Objetivos do trabalho em desenvolvimento

A presente dissertação baseia-se em redes *core* IP sobre WDM como tecnologia futura e promissora para responder aos crescimento de tráfego nas redes de telecomunicações fazendo uso de tecnologia *fixed-grid* e *flex-grid*, tendo como objetivo final a minimização do consumo energético associado a estas redes, aumentando a eficiência das mesmas, pela redução de equipamento ativo na rede e conseqüentemente o ajustamento no encaminhamento do tráfego.

Como meio de se atingir a otimização energética da rede, irá recorrer-se à programação linear inteira, MILP (*Mixed Integer Linear Programming*), de forma a testar o potencial destas arquiteturas nas redes de telecomunicações existentes hoje em dia. Tendo como base um caso de estudo real que considera uma rede Alemã [12-13], 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*) [14].

Pretende-se assim efetuar um estudo comparativo da eficiência energética entre as redes óticas atuais e as redes de próxima geração, *fixed-grid* e *flex-grid* respetivamente.

1.4. Estrutura do documento

- **Capítulo 1: Introdução** – Neste capítulo é apresentado o enquadramento, a motivação e os objetivos que se pretendem atingir, bem como as contribuições originais resultantes deste trabalho;

- **Capítulo 2: Redes Óticas** – Neste capítulo 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 arquiteturas consideradas para efetuar a integração das várias camadas de rede a considerar;
- **Capítulo 3: Modelo de redução do consumo energético** – Neste capítulo encontram-se descritos os modelos matemáticos de otimização a considerar, a topologia de rede, requisitos de tráfego e elementos de rede utilizados;
- **Capítulo 4: Resultados** – Neste capítulo são apresentados os resultados referentes aos vários modelos de otimização;
- **Capítulo 5: Conclusões** – Neste capítulo são apresentadas as conclusões finais mais relevantes, provenientes de todo o trabalho desenvolvido, assim como algumas propostas de trabalho futuro.

1.5. Principais Contribuições

As principais contribuições originais resultantes deste trabalho são:

- Abordagem teórico-prática extensiva sobre redes IP sobre WDM, *fixed-grid* e *flex-grid*, com foco em técnicas de encaminhamento energeticamente eficientes;
- Modelos de otimização desenvolvidos com o auxílio da plataforma de simulação *IMB ILOG CPLEX*.

Destas contribuições resultaram a publicação dos dois artigos seguintes:

- N. S. Gouveia, M. Henriques, e P. Pinho, "Energy aware performance for next-generation Flex-grid vs Fixed-grid Optical Network", Advanced Laser Technologies 2015 (ALT15), Faro, Portugal, 7 a 11 de Setembro de 2015;
- N. S. Gouveia, M. Henriques, e P. Pinho, "Energy-Aware Performance for Fixed-Grid and Flex-Grid Optical Network", Optical and Quantum Electronics, Outubro de 2015. (submetido e a aguardar resposta)

Capítulo 2

Estado da Arte - Redes Óticas

Durante a evolução tecnológica das redes óticas percebeu-se que uma forma de aproveitar a capacidade de transporte das redes era aumentar o número de comprimentos de onda por fibra ótica, e neste contexto surge a tecnologia WDM.

A multiplexação por comprimentos de onda, WDM, consiste em permitir que múltiplos sinais óticos, de diferentes comprimentos de onda, sejam multiplexados numa única fibra, e portanto, possam ser transportados em paralelo na mesma. Desta forma a tecnologia WDM permite alta capacidade e flexibilidade devido à transmissão paralela de diversos comprimentos de onda na mesma fibra. O WDM é responsável pela transmissão em fibras óticas, não especificando, porém os requisitos necessários aos nós da rede e os procedimentos na comutação destes sinais óticos. Tipicamente, nas redes óticas mais avançadas, esta comutação é realizada através de dispositivos óticos, como as matrizes de comutação óticas, as OXC (*Optical Cross-Connect*), apresentadas posteriormente nesta dissertação.

Com a tecnologia WDM, mantendo a parte eletrónica a ritmos relativamente reduzidos, a capacidade do sistema é aumentada de um fator N , sendo que N representa o número de canais. Atualmente, já foram implementados sistemas com 16, 40, 80, 120 e mesmo mais canais por fibra, sendo que o número máximo de canais depende do espaçamento utilizado entre eles, da largura de banda ótica disponível e das limitações impostas pelos EDFA (*Erbium-Doped Fiber Amplifier*). Presentemente, a recomendação G.692 [15] define 41 canais com espaçamento de 100 GHz ou 81 canais com espaçamento de 50 GHz, na banda C de um EDFA, começando em 1528.77 nm (196.1 THz) e terminando em 1560.61 nm (192.1 THz). Em última instância a maximização da capacidade de um sistema de comunicação ótica multicanal depende de quão próximos os canais com um determinado débito podem ser colocados. Assim, a recente

recomendação G.692 possibilita utilização de canais ótico que operam a velocidades diferentes com uma alocação espectral menos fixa e rígida dos comprimentos onda atribuídos. A maximização da capacidade corresponde à maximização da eficiência espectral (bit/s/Hz), que por sua vez implica a otimização das características dos vários constituintes do sistema, como os terminais óticos e os ROADMs (*Reconfigurable Optical Add and Drop Multiplexer*), descritos na secção 2.6.1.

A possibilidade de fornecer uma capacidade de transmissão potencialmente ilimitada é a mais óbvia vantagem da tecnologia WDM. As vantagens técnicas associadas à tecnologia WDM consistem em:

- Transparência - apresentando o WDM uma arquitetura de camada física, pode suportar de forma transparente os variados formatos de dados, tais como IP, ATM (*Asynchronous Transfer Mode*), entre outros e também com diferentes velocidades de transmissão. Assim os canais óticos podem transportar dados com diferentes velocidades e protocolos [16];
- Escalabilidade – aproveita a abundância de fibra numa dada região para satisfazer de forma rápida os requisitos de tráfego em termos de capacidade em ligações ponto a ponto;
- Provisão Dinâmica- provisionamento de ligações de rede aos clientes com maior largura de banda de forma rápida, simples e dinâmica.

Nesse contexto, seguidamente analisa-se de que forma cada um dos componentes limita a configuração de um sistema WDM, nomeadamente no número de canais, na separação entre eles, na distância de transmissão atingível e no débito/canal.

2.1. Componentes de uma rede ótica

Uma rede ótica consiste num conjunto de nós ligados entre si através de fibras óticas, onde são comutados canais óticos. Estes, para alcançar o seu destino podem passar por vários nós intermédios, com capacidade para comutar o respetivo comprimento de onda para diferentes direções. Assim, os nós intermédios tem de ter a capacidade de comutar e/ou converter os comprimentos de onda correspondentes a cada canal. Cada ligação pode suportar um determinado número de comprimentos de onda que depende dos componentes utilizados bem como do tipo de tecnologia utilizada para a transmissão [16].

Na figura 2.1 é apresentado um exemplo de uma rede WDM e os principais elementos de rede intervenientes no estabelecimento de um canal ótico.

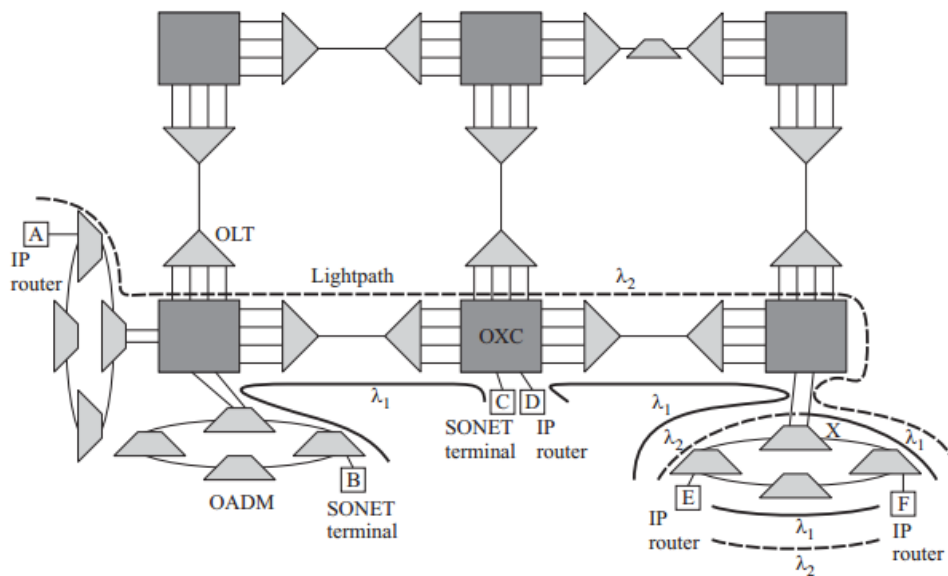


Figura 2.1 – Rede ótica com representação dos elementos de rede, [16].

Os elementos chave responsáveis pela comutação ótica são os terminais óticos, OLT (*Optical Line Terminals*), multiplexadores OADM (*Optical Add-Drop Multiplexer*) e comutadores óticos, OXC, interligados através de fibra, como ilustrado na figura 2.1, na qual se pode observar também a ilustração do estabelecimento de alguns caminhos óticos. Os caminhos óticos são estabelecidos ponto-a-ponto, desde um nó de origem até um nó de destino de uma rede ótica, utilizando o mesmo comprimento de onda disponível em todas as ligações. Diferentes caminhos óticos podem utilizar o mesmo comprimento de onda, desde que não compartilhem a mesma ligação física em simultâneo. Esta propriedade de preservação do espectro é designada por restrição de continuidade do comprimento de onda. É apresentada na figura 2.1 de forma ilustrativa o estabelecimento de seis caminhos óticos, que fazem uso de dois comprimentos de onda, λ_1 e λ_2 . O caminho ótico entre B e C, D e E e um dos caminhos óticos entre E e F não partilham ligações físicas e portanto podem utilizar o mesmo comprimento de onda λ_1 . Como os caminhos óticos de A para F e de B para C utilizam ligações físicas comuns, não pode ser atribuído a estes o mesmo comprimento de onda de acordo com restrição de continuidade. Pelo que é atribuído à ligação A-F o comprimento de onda λ_2 e à ligação B-C o comprimento de onda λ_1 . O mesmo já não acontece quando se estabelece o caminho ótico de E para F, como este não partilha as mesmas ligações físicas do primeiro caminho ótico estabelecido, este pode voltar a utilizar o comprimento de onda λ_1 sem qualquer

restrição. Supondo que apenas existem dois comprimentos de onda disponíveis na rede e se queria estabelecer um novo caminho ótico entre E e F teria de se realizar uma conversão de comprimento de onda. Sem conversão de comprimento de onda não seria possível estabelecer este caminho ótico. Assim, se é necessário que nó intermedio X se realizar uma conversão de comprimento de onda, podemos configurar o novo caminho ótico entre E e F utilizando o comprimento de onda λ_2 na ligação E-X e o comprimento de onda λ_1 na ligação X-F.

2.1.1. Fonte Ótica - Laser

As fontes óticas para os sistemas de comunicação óticos de médio e elevado desempenho são do tipo laser, devido à sua pequena largura espectral. A utilização de lasers semicondutores, em detrimento de outros tipos, por exemplo dos anéis de fibra, é justificado pela robustez física, longevidade elevada e volume reduzido, pelo que nos vamos restringir a estes.

Um laser semiconductor baseia-se numa cavidade de Fabry-Pérot, oferecendo portanto, condições para o aparecimento de um certo número de modos longitudinais (multimodo) em frequências discretas separadas. Contudo, esses modos laterais podem ser atenuados por recurso a diversas técnicas, por exemplo recorrendo a uma cavidade externa ou a realimentação distribuída.

Os lasers monomodo mais vulgares são os lasers com realimentação distribuída (DFB: *Distributed FeedBack*), os lasers com uma rede de Bragg (DBR: *Distributed Bragg Reflector*) e os que utilizam ambas as técnicas [16].

A estrutura dos lasers foi evoluindo, surgindo os lasers semicondutores com poços quânticos (*quantum wells*), que apresentam vantagens significativas como a maior velocidade de modulação, largura espectral reduzida e um menor alargamento espectral dinâmico (*chirp*), em relação aos referidos anteriormente, designados por lasers maciços (*bulk*). Mais recentemente, surgiram os lasers de linha (*quantum line*) e de ponto quântico (*quantum dot*), tendendo-se para o confinamento da região ativa, que torna o movimento de portadores nessa região mais restrito. Este facto leva a que a energia dos portadores também se restrinja a níveis discretos, resultando numa maior pureza espectral do campo.

De entre os problemas relacionados com o laser de emissão dos vários canais WDM destacam-se a instabilidade da frequência e potência emitidas ao longo do tempo, e o seu ruído.

2.1.2. Fibra Ótica

Em sistemas de comunicação óticos, a fibra ótica é o elemento central do canal de comunicação. Ao nível da produção das fibras óticas têm sido tentadas várias configurações, no sentido de minimizar o impacto da dispersão e dos efeitos não-lineares, melhorando dessa forma o desempenho do sistema de comunicação ótica em que se insere. No entanto, essas soluções estão limitadas pela enorme quantidade de fibra normal, monomodo, já instalada, que os operadores de telecomunicações pretendem rentabilizar, pelo que será este o tipo de fibra considerado neste trabalho.

A fibra ótica monomodo, SMF (*Single Mode Fiber*), é constituída por um núcleo de sílica envolto por um revestimento cujo índice de refração é ligeiramente inferior ao do núcleo. O diâmetro do núcleo tem que ser suficientemente pequeno (3 a 5 μm) para garantir condições para a existência de apenas um modo de propagação.

A propagação de impulsos óticos ao longo de uma SMF está sempre sujeita a efeitos lineares (atenuação, dispersão cromática e dispersão devida aos modos de polarização), e a efeitos não lineares que limitam o desempenho dos sistemas.

A SMF apresenta uma largura de banda que excede 12 THz na segunda janela de transmissão, centrada em 1300 nm, e 15 THz na terceira janela, centrada em 1550 nm [17]. Para utilizar essa largura de banda na totalidade, seriam necessários impulsos óticos individuais com duração de poucos femtosegundos (fs) [18]. Contudo, atualmente o ritmo de transmissão difundido nos sistemas implementados está limitado a 100 Gbps (largura de impulso de 100 ps para formato NRZ - *Non-Return-to-Zero*), devido às limitações impostas pela dispersão da fibra e pelas suas não-linearidades.

2.1.3. Optical Line Terminal

O OLT é um componente de rede utilizado no início e no fim de uma ligação para multiplexar e desmultiplexar comprimentos de onda. Podem ser formados por *transponders*, responsáveis por adaptar o sinal de entrada para ser transportado no domínio ótico, bem como por *multiplexers* de comprimentos de onda e, opcionalmente, amplificadores óticos [3], tal como ilustrado na figura 2.2. O *transponder* adapta o sinal de entrada, proveniente dos clientes da rede de fibra ótica, num sinal apropriado para o uso dentro da rede ótica. Do mesmo modo, no sentido inverso, adapta o sinal da rede ótica num sinal adequado ao cliente. Por sinal adequado entende-se aqui um sinal transportado segundo um comprimento de onda definido pelo ITU.

Em casos nos quais a interface do equipamento da rede cliente possui funções de adaptação de comprimento de ondas, o uso de *transponders* é desnecessário. O sinal de saída de um *transponder* é multiplexado em diferentes comprimentos de onda por um multiplexador [3].

O OLT é o equipamento onde o sinal dos clientes não compatíveis com a norma ITU é convertido no *transponder*, antes de ser encaminhado para o *multiplexer/demultiplexer*, que na saída ainda possui um canal separado de supervisão OSC (*Optical Supervisory Channel*).

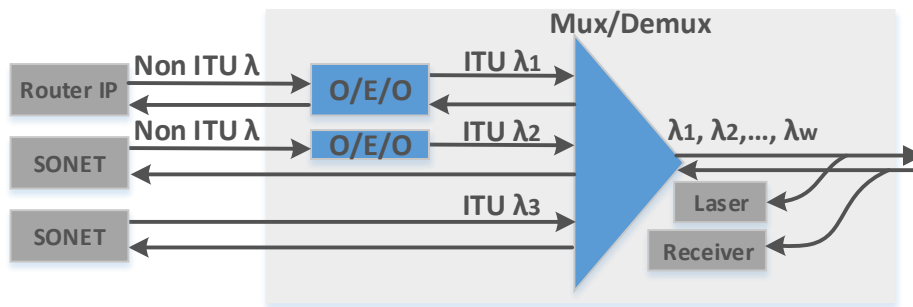


Figura 2.2 – Diagrama de blocos de um OLT, [3].

2.1.4. Optical Line Amplifier

O sinal ótico, quando transmitido, perde potência à medida que se propaga na fibra com a atenuação, dispersão e efeitos não lineares que dificulta a sua detecção após percorrer longas distâncias.

Os amplificadores são implementados no meio da ligação, a cada 80-120 km [3], de modo a amplificar o sinal e colocá-lo num nível de potência que possa ser detetado nos estágios seguintes sem afetar significativamente o valor global de ruído no sistema. Estes também são constituídos por compensadores de dispersão para compensar a dispersão cromática acumulada ao longo da ligação.

No caso dos amplificadores, eles podem ser usados como amplificadores de potência, em linha ou como pré amplificadores. Em ambos os casos, o sinal pode ser reforçado quando sai do *multiplexer* ou antes de entrar no recetor. Amplificadores em linha são usados em ligações WDM de longa distância para reforçar o sinal e compensar as perdas ao longo do percurso [3].

Existem vários tipos de amplificadores óticos, no entanto este capítulo centra-se em dois tipos o EDFA e o amplificador de *Raman*, que são os mais utilizados em redes WDM.

O amplificador de fibra EDFA é constituído por uma fibra ótica típica de sílica dopada de iões de érbio. À entrada da fibra por onde passa o sinal WDM é aplicado um *multiplexer* que

adiciona sinal de um laser bombeador tipicamente a 980 nm ou 1480 nm [16]. De modo a combinar a saída do laser bombeador com o sinal de entrada, a fibra dopada é precedida por um acoplador de comprimento de onda seletivo.

Deste modo é possível amplificar simultaneamente diferentes comprimentos de onda na banda C mas também na banda L com EDFA de ganho deslocado no espectro. Pelo facto de ser necessário adicionar um sinal de comprimento de onda bombeador, de forma a não interferir com sistemas a jusante este também necessita de ser posteriormente retirado da fibra através de um isolador logo após o amplificador, tal como ilustra a figura 2.3. De forma a obter-se amplificação simultaneamente na banda C e L é necessário usar dois amplificadores EDFA fisicamente separados um do outro para amplificar cada banda separadamente.

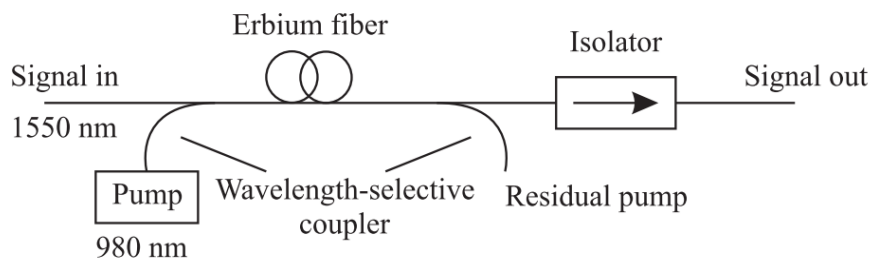


Figura 2.3 – Amplificador EDFA, [16].

A combinação de vários fatores como a disponibilidade e a elevada potência do laser bombeador, o facto de ser um dispositivo totalmente de fibra e a simplicidade do equipamento tem feito dos amplificadores EDFA a principal escolha para as redes comunicação ótica da atualidade [16].

Os amplificadores de *Raman* tiram partido do efeito não linear de propagação de sinais em fibras óticas, o SRS (*Stimulated Raman Scattering*). Nos amplificadores *Raman* é utilizado um laser bombeador de alta potência em cada nó de amplificação para bombear na fibra um sinal puramente ótico em sentido oposto ao sinal WDM propagado. O sinal ótico introduzido tem de ter elevada potência de modo a causar o efeito não linear pretendido.

Este tipo de amplificador apesar de conseguir amplificar outras bandas WDM, como é o caso da banda 1310 nm, não tem a capacidade do EDFA de amplificar a banda toda ao mesmo tempo bastando aplicar um sinal de pequena largura espectral.

Os amplificadores de Raman são tipicamente usados no complemento dos amplificadores de EDFA para proporcionar ganho adicional de uma maneira distribuída em sistemas de longo alcance, *ultra-long-haul*. [16].

2.1.5. Optical Add and Drop Multiplexers

O OADM tem a capacidade de inserir e extrair seletivamente determinados comprimentos de onda, canais óticos, em nós de rede WDM. Geralmente este é configurado para adicionar e/ou retirar um grupo fixo de canais, permitindo que os restantes passem diretamente, *bypass* ótico [3].

A figura 2.4 ilustra o esquema de um OADM com uma fibra ótica de entrada e uma de saída, onde é possível adicionar e/ou retirar (*add/drop*) um ou mais comprimentos de onda. Por sua vez, os comprimentos de onda que não foram comutados pelo OADM podem ainda ser regenerados para recuperação da relação sinal/ruído e encaminhados para a fibra de saída sem qualquer envolvimento eletrónico.

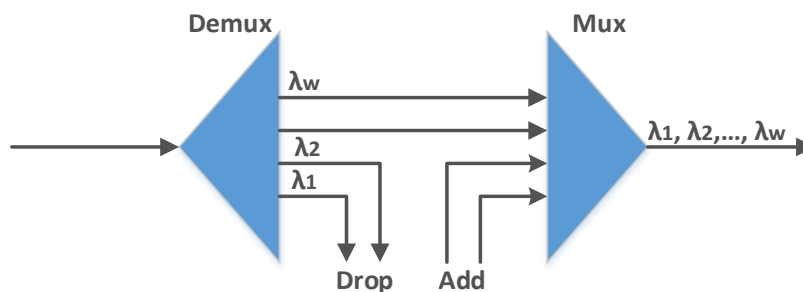


Figura 2.4 – OADM, [3].

O OADM pode ser usado em topologias de rede linear ou anel, e pode operar no modo fixo ou reconfigurável [3]. No modo fixo, os canais que poderão ser adicionados ou retirados são previamente fixados e só podem ser configurados manualmente. Já no ROADM (*Reconfigurable Optical Add and Drop Multiplexer*), os canais podem ser configurados dinamicamente e de forma remota [3].

A flexibilidade associada aos ROADM é possível devido à introdução de *transpondes* reconfiguráveis que utilizam lasers com comprimentos de onda sintonizáveis, recetores de banda larga capazes de receber sinal em qualquer comprimento de onda, bem como *switches*, WSS (*Wavelength Selective Switch*) que comutam os comprimentos de onda de forma dinâmica.

Os ROADM não apresentam uma arquitetura universal que seja comum a todos os fabricantes. No entanto vários fabricantes como a *Cisco System, Inc* integram nos nós ROADM equipamentos como o WXC (*Wavelength Cross Connect*) constituídos internamente por comutadores óticos que permitem a seleção de comprimentos de onda a transmitir numa

determinada direção e/ou *switches*, WSS que comutam os comprimentos de onda de forma dinâmica. Com a introdução de redes *flex-grid* os WSS permitem a delimitação do espectro de modo a tratar as sub-portadoras que constituem um *superchannels* como uma entidade única.

2.1.6. Optical Crossconnects

O comutador ótico OXC é um dispositivo que permite a comutação de um feixe de luz de uma porta de entrada para uma porta de saída, do tipo $N \times M$, com N fibras de entrada por M fibras de saída [3]. O processo de comutação de comprimentos de onda pode exigir uma conversão ótico-elétrica na porta de entrada e uma conversão eletro-ótica na porta de saída, no caso de redes opacas, conversores OEO. No entanto os conversores OEO têm o inconveniente de inserir atrasos de processamento, além de aumentar significativamente o custo do equipamento. Nas redes óticas transparentes o encaminhamento de comprimento de onda é realizado no domínio ótico eliminando a necessidade de conversores OEO e suas limitações [3].

Ele é constituído, basicamente, por duas entidades: uma da camada WDM, a matriz de comutação ótica e uma entidade da camada IP que controla a matriz de comutação ótica.

O OXC, como ilustrado na figura 2.5, funciona no plano ótico comutando sinais óticos, sem decodificar os sinais óticos em dados, para obtenção de endereços para a comutação, como acontece em comutadores *ethernet*, por exemplo. Esta função é realizada pela matriz de comutação ótica, que, por ser totalmente passiva, necessita de uma unidade de controlo. Esta unidade controladora deve implementar protocolos de sinalização e de encaminhamento que são necessários para comutar e estabelecer as conexões no plano ótico. É através deste controlador que os nós da rede trocam informações sobre o estado dos nós e de ocorrência de falhas de recursos, além de sinalizar o estabelecimento de canais óticos, permitindo assim o estabelecimento de novas rotas para os caminhos óticos atingidos pelas falhas.

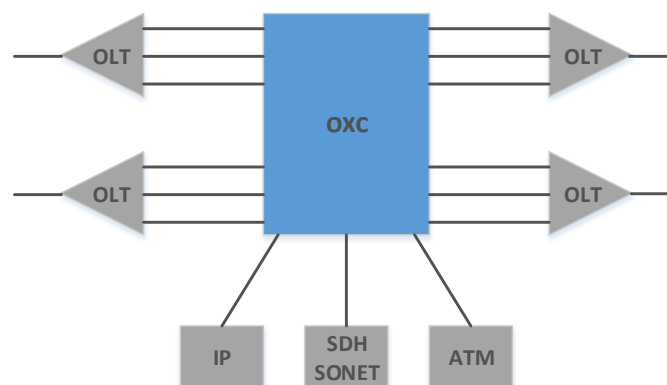


Figura 2.5 – OXC, [3].

O OXC, também pode ser usado como um OADM, isto é, pode terminar um sinal ótico de vários comprimentos de onda de entrada e inserir novos sinais óticos com os mesmos comprimentos de onda na saída.

Para implementação das redes óticas de nova geração, *flex-grid* mais à frente neste capítulo, precisa ser desenvolvido o BV-OXC (*Bandwidth-Variable-Optical Cross-Connects*) [19]. O BV-OXC é constituído por um *switch* de largura de banda variável, que adiciona a flexibilidade necessária para o estabelecimento de caminhos óticos de largura de banda variável. Os caminhos óticos de largura de banda variável são constituídos por canais óticos, que podem ter larguras de banda diferentes em função da capacidade pretendida.

2.2. Topologias de rede

A principal distinção entre os vários tipos de redes óticas baseia-se no esquema de multiplexagem utilizado: multiplexagem por divisão no comprimento de onda, WDM, ou multiplexagem ótica por divisão no tempo, OTDM (*Optical Time-Division Multiplexing*). As redes WDM podem ainda subdividir-se em ligações ponto-a-ponto, redes de acesso, redes de difusão, e redes com encaminhamento por comprimento de onda.

A primeira topologia ilustrada na figura 2.6 é um anel designado por ligação WDM ponto-a-ponto. Neste tipo de rede o caminho ótico é um anel, tal como a topologia de fibra, exceto que podem ter vários caminhos ótico entre nós adjacentes de modo a proporcionar a capacidade necessária entre os *routers* IP.

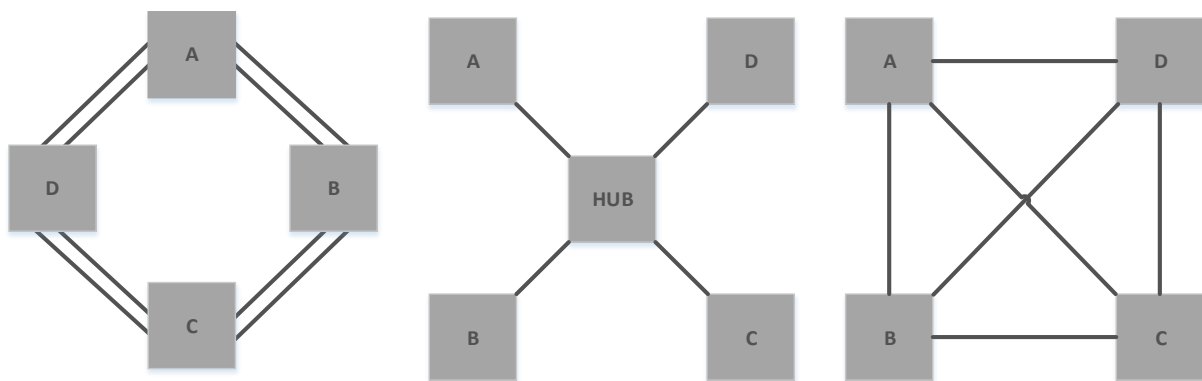


Figura 2.6 – Topologias de rede, [3].

Na segunda topologia apresentada todos os *routers* estão ligados a um *router* central, designado por *hub*, por um ou mais caminhos óticos.

O terceiro exemplo ilustra uma conceção totalmente ótica. Neste caso, são estabelecidos caminhos óticos diretos entre todos os *routers*. Assim, os pacotes percorrem apenas um caminho ótico desde o *router* de origem até ao *router* de destino.

As ligações ponto-a-ponto com WDM não constituem uma rede no sentido usual, tratando-se apenas de sistemas de transmissão. O interesse por este tipo de sistemas surgiu com a introdução dos amplificadores de fibra dopada com érbio. As aplicações da tecnologia WDM no subsistema de transmissão incluem o aumento da capacidade e transmissão em sistemas de longa distância.

As redes de difusão baseiam-se num acoplador passivo em estrela interligando as várias estações numa topologia em estrela. Estas redes apresentam duas desvantagens, além do elevado custo que é um problema atual de todas as redes óticas. A primeira desvantagem resulta do facto de a potência ótica emitida por cada estação ser difundida para todas as estações recetoras, o que representa um enorme desperdício, no caso de o número de estações ser elevado. Além disso, o número de estações que a rede pode suportar está diretamente relacionado com o número de comprimentos de onda disponíveis, não permitindo que o número de estações seja muito elevado. Para a largura de banda disponível em sistemas de transmissão usando amplificadores óticos, o número máximo de estações que é possível interligar atualmente é da ordem de uma centena [3].

No entanto, é possível construir redes óticas sem as limitações anteriores, se as várias ligações WDM forem interligadas num nó através de um subsistema de comutação, também designado por encaminhador de comprimentos de onda. Cada encaminhador de comprimentos de onda toma as decisões de encaminhamento com base no porto de entrada e no comprimento de onda. O encaminhamento no comprimento de onda é realizado através da implementação nos nós da rede de elementos seletivos no comprimento de onda. Esta configuração é designada por conector de cruzamento reconfigurável, a qual pertence à família dos conectores de cruzamento seletivos no comprimento de onda. Usando esta configuração, cada comprimento de onda em qualquer fibra à entrada pode ser interligado a qualquer fibra à saída desde que esse comprimento de onda não esteja já a ser utilizado na fibra de saída.

2.3. Comprimentos de onda, frequência e espaçamento de canal

Quando se fala em sinais WDM, implica fazer referência a comprimentos de onda, ou frequência desse mesmo sinal. O ITU tem tido um papel ativo na tentativa de padronizar um conjunto de comprimentos de onda para uso em redes WDM necessário para eventual interoperabilidade entre diferentes fabricantes [16].

O comprimento de onda λ e a frequência f relacionam-se pela equação 2.1, onde c representa a velocidade da luz em espaço livre, 3×10^8 m/s.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.1)$$

Os comprimentos de onda de interesse para comunicações em fibras óticas estão centradas nos 0.8, 1.3 e 1.55 μm . Estes comprimentos de onda situam-se na faixa dos infravermelhos, o que não é visível para o olho humano. Usando 3×10^8 m/s, um comprimento de onda de 1.55 μm corresponde uma frequência de aproximadamente 193 THz.

Diferenciando a equação em torno do comprimento de onda central λ_0 obtém-se a relação entre o espaçamento de frequências Δf e o espaçamento em comprimentos de onda $\Delta \lambda$, como descrito pela equação 2.2.

$$\Delta f = -\frac{c}{\lambda_0^2} \Delta \lambda \quad (2.2)$$

Esta relação é válida desde que o espaçamento entre comprimentos de onda ou frequência sejam inferiores ao comprimento de onda real do canal ou frequência, que é o caso dos sistemas de comunicação ótica. Por exemplo, no comprimento de onda central de $\lambda_0 = 1550$ nm, um espaçamento entre comprimentos de onda de 0.8 nm corresponde a um espaçamento espectral de 100 GHz, também usado em redes WDM.

Os sinais com informação digital são vistos como uma sequência periódica de pulsos de acordo com os dados. O *bit rate* corresponde ao inverso do período. Estes sinais tem uma representação equivalente no domínio da frequência onde a energia do sinal é distribuídas através de um conjunto de frequências, designado de espectro. A largura de banda do sinal corresponde assim ao espectro do sinal. A largura de banda e o *bit rate* de um sinal digital estão relacionados mas não são exatamente a mesma coisa. A relação entre os dois depende do tipo de modulação utilizado [16]. Por exemplo o sinal de linha telefónica dispõe de uma largura de banda de 4 kHz, mas dada a tecnologia de modulação permite realizar um *bit rate* de 56 kbps ao longo da mesma. A relação existente entre o *bit rate* e a largura de banda disponível denomina-se eficiência

espectral. Os sistemas de comunicação ótica utilizam técnicas de modulação relativamente simples que alcançam uma eficiência espectral de 0.4 bits/s/Hz, sendo razoável para considerar um sinal com um *bit rate* de 10 Gbps utilizando uma largura de banda de 50 GHz. É de salientar que a largura de banda associada a um sinal deve ser relativamente menor que o espaçamento entre canais para evitar efeitos indesejáveis como a interferência entre canais adjacentes e a distorção do próprio sinal. Na figura 2.7 é apresentada a grelha de frequências de 100 GHz ITU tendo como base a frequência de 193.1 THz [16]. A grelha de 50 GHz foi igualmente definida em torno dos mesmos valores de referência para a frequência.

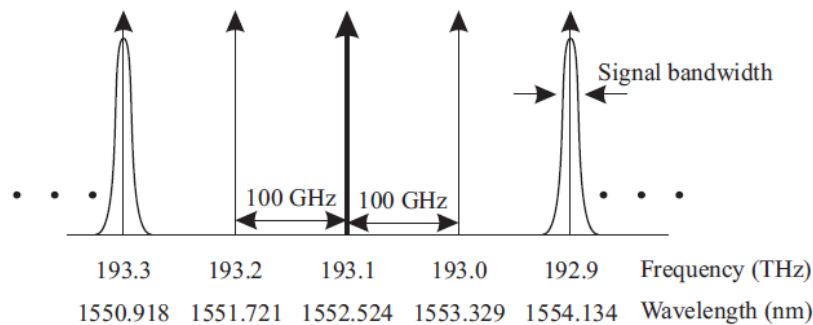


Figura 2.7 – Grelha de frequências 100 GHz ITU, [16].

O ITU definiu na norma G.692 como padrão uma largura espectral de 50 GHz com um espaçamento entre comprimentos de onda de 0.4 nm e uma frequência central de 193.1 THz, como ilustrado na figura 2.8. Esta última grelha corresponde a última grelha fixa que veio substituir a anterior que era composta por uma largura espectral de 100 GHz [16].

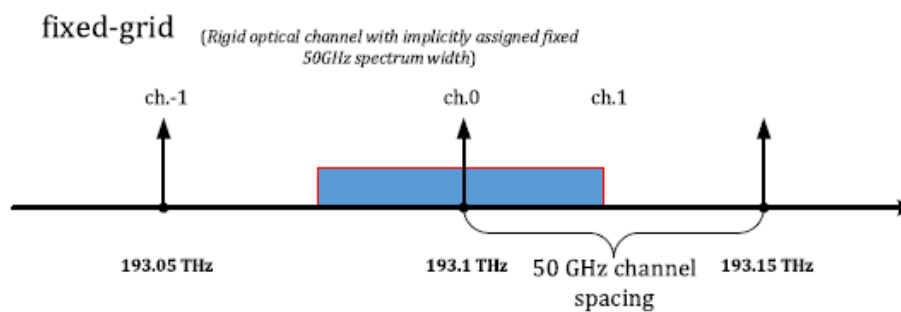


Figura 2.8 – Grelha *fixed-grid* WDM com largura de banda de 50 GHz, [11].

De forma a suportar a próxima geração de redes DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) o ITU definiu uma nova norma, G.694, que suporta uma grelha flexível, permitindo diferentes *bit rates* e/ou formatos de modulação. A nova grelha *flex-grid* proporciona uma maior flexibilidade na atribuição de espectro quando comparado a grelha

anterior [15] dividindo o espectro em pequenos *slots* (tipicamente 12,5 GHz) [20]. Estes são posteriormente alocados de acordo com a necessidade de largura de banda e esquema de modulação de cada canal, conforme ilustrado na figura 2.9.

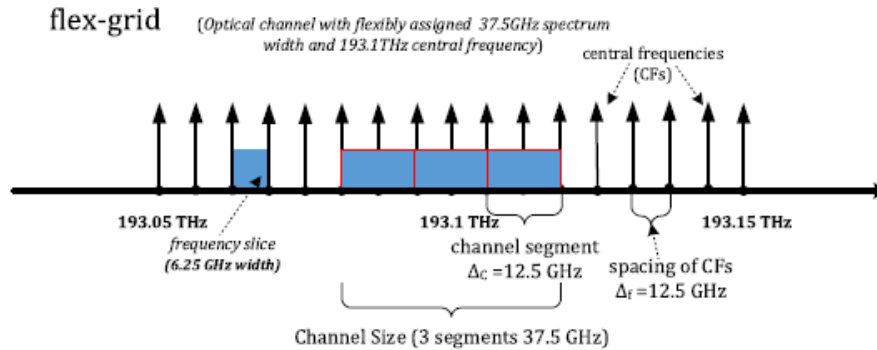


Figura 2.9 – Grelha *flex-grid* WDM com largura de banda de 12.5 GHz, [11].

2.4. Tecnologia Flex-grid

Nas redes óticas convencionais, consegue-se comunicar a um *bit rate* de 100 Gbps com base em detecções coerente e em multiplexação de comprimentos de onda, WDM, com uma largura espectral de 50 GHz, atingindo assim uma eficiência espectral de 2 bit/s/Hz [27]. No entanto, com o forte crescimento de tráfego é necessário uma melhor exploração das ligações óticas na operação da banda C, fomentando a busca por técnicas de transmissão com uma maior eficiência espectral [11].

Os grupos de padronização estão a fazer esforços de modo a evoluir dos atuais canais óticos de 10, 40, 100 Gbps para os esperados canais de 400 Gbps em 2017 e até 1 Tbps em 2020 [9]. No entanto, para que os sistemas de próxima geração se tornem viáveis, com formatos de modulação *standard* e de modo a conseguir transmissões para distâncias aceitáveis, não se pode manter o espaçamento espectral de 50 GHz que os atuais sistemas utilizam [28].

Nas redes óticas *flex-grid* o espectro disponível, banda C, é dividido num conjunto de *slots* com uma menor largura espectral, FS (*Frequency Slots*) [19]. As propostas atuais para o tamanho de cada *slot* é de 50 GHz, 25 GHz, 12.5 GHz e até 6.25 GHz [20]. Por conseguinte, consoante as exigências de tráfego são atribuídos os *slots* de acordo com o *bit rate* necessário, bem como o formato modulação adequado. Assim, em função da capacidade pretendida, a técnica de modulação e a largura espectral é atribuído a cada canal um conjunto de *slots*.

Elementos tecnológicos chave para conseguir redes *flex-grid* são [29]:

- Utilização de espaçamento reduzido de modo a aumentar a eficiência espectral e introduzir maior flexibilidade;
- Atribuição de espectro de forma flexível, permitindo um aumento da capacidade da rede;
- Escolha da modulação dependendo das necessidades da rede;
- Capacidade programável;
- Resiliência e controlo.

2.4.1. Alocação de espectro em Flex-grid

O estabelecimento de uma ligação em redes *flex-grid* é um processo complexo. Em contraste com as redes *fixed-grid* onde para o estabelecimento de uma ligação é atribuído um único comprimento de onda, problema conhecido como RWA, nas redes *flex-grid* podem ser combinados múltiplos *slots* do espectro de forma a conseguir-se canais com largura de banda variável, o que leva a um problema de encaminhamento e alocação de espectro designado por RWSA (*Routing, Wavelength assignment, and Spectrum Allocation*) [10] e [30], apresentados posteriormente na secção 2.4.2.

Graças a esta tecnologia flexível, as redes óticas *flex-grid* pode ajustar-se as variações de tráfego que vão ocorrendo ao longo do tempo, criando assim um cenário de rede onde os canais são dimensionados, segundo *bit rate*, alcance e largura de banda, de acordo com as exigências do tráfego.

Na figura 2.10 é apresentado de forma esquemática esta funcionalidade. Em cada um dos cenários é visível uma poupança em termos de recursos espectrais com a introdução do *flex-grid*, representada pela seta cinza.

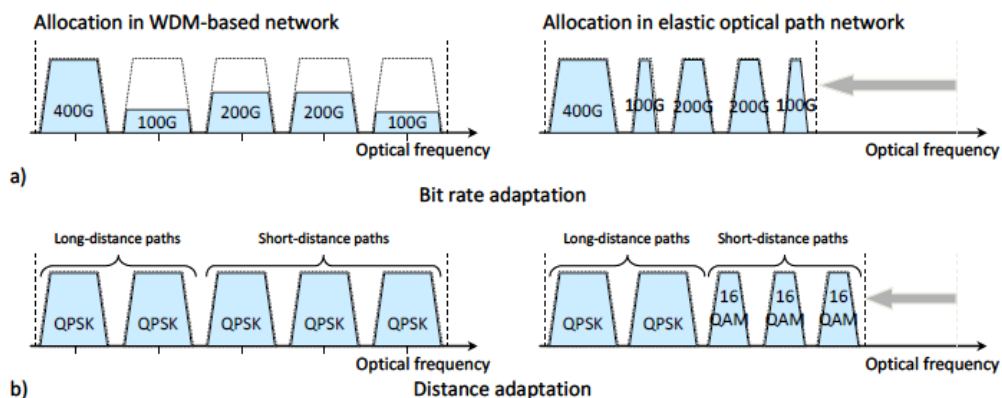


Figura 2.10 – Comparação dos regimes de repartição de tráfego na rede tradicional WDM com base nos canais de largura de banda fixa e da rede flexível, [31].

A figura 2.10 (a) mostra a funcionalidade de alocação de espectro segundo o *bit rate*. Neste cenário, o cliente solicita uma capacidade inferior à capacidade máxima da interface. Em redes *fixed-grid* é atribuído a todos os canais uma largura de banda fixa, levando a que determinados canais utilizem apenas parte da sua capacidade. Já nas redes *flex-grid* é atribuído a cada canal a largura de banda mínima necessária para passar os pedidos individuais, conseguindo assim libertar-se alguns recursos espectrais anteriormente alocados e consequentemente aumentando a eficiência espectral.

A figura 2.10 (b) mostra a funcionalidade de alocação de espectro segundo a distância necessária em cada caminho ótico. Os caminhos óticos passam por múltiplos nós de rede e troços de fibra antes da chegada ao nó de destino, o que causa degradação do sinal resultando na diminuição de OSNR (*Optical Signal-to-Noise Ratio*). Nas redes WDM tradicionais é atribuída a mesma margem de modo a satisfazer os requisitos necessários para o pior caminho, maior alcance. Em redes *flex-grid* a largura espectral é atribuída consoante o alcance necessário em cada um dos caminhos óticos. Portanto, os caminhos mais curtos, onde a degradação do sinal é inferior e a modulação utilizada no canal consegue ser mais sofisticada (nível superior), é atribuído uma menor largura de banda, o que resulta numa melhoria da eficiência global da utilização dos recursos.

Ainda não existem valores definidos para os requisitos em termos de largura espectral para os diferentes canais. Os grupos de standardização como o ITU, IEC (*International Electrotechnical Commission*), IEEE, estão a desenvolver novas tecnologias e *standards* de modo a satisfazer os requisitos para transmissões acima dos 100 Gbps [23]. Assim, com base em [32] estipulou-se os requisitos espectrais para as redes *flex-grid* apresentados na tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Requisitos espectrais *flex-grid* com largura de banda de 50 GHz, [32].

Capacidade de transmissão	Largura de Banda [GHz]	Modulação	Alcance [km]	Eficiência espectral [bit/s/Hz]
100 Gbps	50	DP-QPSK	2500	2
400 Gbps	200	DP-QPSK	2500	2
400 Gbps	100	16-QAM	600	4
1 Tbps	500	DP-QPSK	2500	2
1 Tbps	250	16-QAM	600	4

2.4.1.1. Superchannel

As redes óticas WDM tem evoluído de sistemas de canal único com 80 canais. Até à data cada canal é transmitido numa única portadora ótica, espaçadas 50 GHz conforme definido pelo ITU. Para *bit rate* de dados mais elevados, incluindo *bit rate* de 400 Gbps e eventualmente 1 Tbps são necessários vários canais e conseqüentemente, varias sub-portadoras. O conjunto de sub-portadoras necessárias chamamos de *superchannels* [23]. Assim os *superchannels* são provisionados, transmitidos e encaminhados na rede como uma entidade única e tratados como um único canal.

A utilização de sub-portadoras oferece vantagens que são a chave para a introdução da tecnologia *flex-grid* nas redes existentes. Utilizando sub-portadoras consegue-se: baixar o *bit rate* associado a cada portadora nas fibras óticas e suporte de grelhas com espaçamento de 50 GHz associada as redes *fixed-grid* e/ou grelhas com espaçamento flexível.

2.4.1.2. Modulação

Com a introdução de velocidades de transmissão de 100 Gbps a técnica de modulação passou da OOK (*On-Off Keying*), que transportava um único *bit* de dados, para técnicas de modulação de fase mais avançadas DP-QPSK (*Dual Polarization - Quadrature Phase-Shift-Keying*) capazes de codificar e enviar vários *bits* em simultâneo [23]. Assim, os diferentes débitos são conseguidos através da modulação das sub-portadoras com o nível de modulação que pode variar entre DP-QPSK e n-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) (n=8, 16, 32, 64) [33]. Estas técnicas de modulações mais avançadas permitem *bit rates* elevados e uma melhor compensação de perdas óticas, dispersão cromática e a dispersão dos modos de polarização.

Existe no entanto um compromisso associado às técnicas de modulação mais avançadas dado que estas requerem um OSNR mais elevado. A relação OSNR traduz-se diretamente na distância de alcance suportada antes de um nó de regeneração. Assim, quanto maior o nível de modulação, menor o alcance ótico suportado pela mesma. Sendo este um tema em pesquisa e desenvolvimento para o lançamento das interfaces com débitos superiores a 100 Gbps [23].

Os fabricantes de equipamentos estão a avaliar a melhor combinação em termos de modulação, largura de banda do canal e os requisitos OSNR. Sendo que as modulações mais favoráveis para a standarização de interfaces de 400 Gbps são DP-QPSK e 16-QAM. A modulação DP-QPSK apresenta melhores resultados para redes de longa distância, devido ao seu alcance

superior, enquanto a modulação 16-QAM é ideal para distâncias comuns em redes metro/regionais [23].

Em [40] é explorado o compromisso entre eficiência espectral, consumo energético e alcance ótico em redes MLR (*Multi-Line-Rate*) WDM. Recomendando-se a transmissão a 100 Gbps com DP-QPSK como sendo a opção de transmissão mais adequada para as redes de próxima geração, uma vez que atinge um alcances ótico com baixo consumo energético. Com base nesta informação considerou-se modulação DP-QPSK ao longo desta dissertação.

2.4.2. RWSA

De modo a planejar, implementar e operar redes flexíveis e elásticas são necessários métodos eficientes de *routing* e de alocação de espectro, RWSA. Os recursos espectrais atribuídos a um canal devem ser, na ausência de conversores de espectro, o mesmo ao longo das ligações de um determinado caminho, restrição de continuidade, o mesmo *slot* deve ser utilizado em todas as ligações ao longo do caminho, e contíguos no espectro, restrição de contiguidade [34].

A título de exemplo é apresentada na figura 2.11 (a) um exemplo do espectro ótico dividido em *slots* de frequências todas com a mesma largura espectral. Deve ser introduzida uma banda de guarda que separa duas ligações espectrais adjacentes em todas as ligações óticas, figura 2.11 (b).

Assume-se que uma vez que tenham sido atribuídos os recursos solicitados de frequência na ligação ótica pode ser utilizada para transmissão de sinais modulados em portadora única ou multi-portadora. No entanto a seleção apropriada do formato de sinal está fora do âmbito deste trabalho.

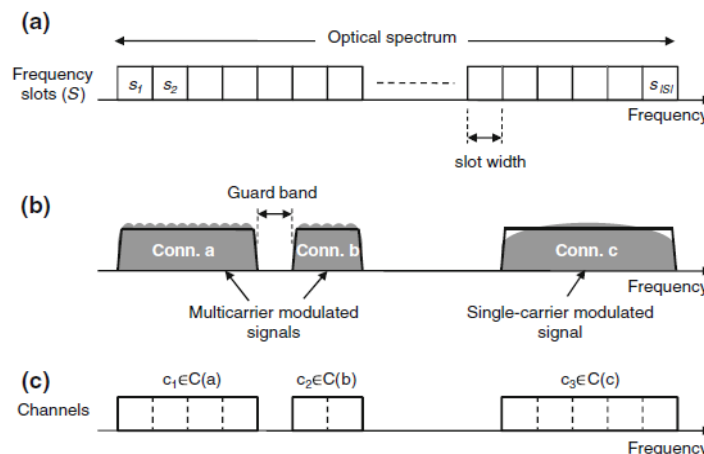


Figura 2.11 – (a) Espectro ótico dividido em slots (b) Ligação ótica utilizando um conjunto de slots (c) atribuição de canal, [34].

A formulação de RWSA não pode ser resolvida em tempos práticos, e, portanto, os autores em [34] apresentam um método de decomposição que quebra a formulação anterior em dois sub-problemas: encaminhamento de tráfego e a atribuição espectral.

O encaminhamento de tráfego é responsável por encontrar um conjunto de *line rates* para os pedidos de modo a que o total da capacidade oferecida pelo conjunto de *line rates* seja suficiente para dar vazão a todos os pedidos.

O sub-problema de atribuição espectral define como são definidos os *lightpaths* com os diferentes *line rates* de modo a minimizar o recursos espectrais necessários e aumentar a eficiência espectral.

Como consequência é crucial que existam métodos eficientes para resolução do problema de RWSA em tempo útil. Assim, tendo em conta que a restrição de contiguidade adiciona grande complexidade ao problema de RWSA, considerou-se canais com espectro não contíguo. Com base em [35] a diferença em termos de OSNR entre canais com espectro contíguo e não contíguo é inferior a 0.3 dB. Concluindo-se que a forma como é atribuído o espectro não afeta o desempenho de transmissão.

2.4.3. Questões em aberto no Flex-grid

As redes *flex-grid* demonstram proporcionar redes espectralmente mais eficientes e conseqüentemente aumentar a capacidade das redes atuais. No entanto, existem ainda algumas questões em aberto que precisam ser resolvidas antes de se conseguir usufruir de todo o potencial das redes *flex-grid* [8]. Estas questões são alvo grandes investigações por parte de toda a comunidade internacional e em projetos de investigação.

2.4.3.1. Fragmentação de Espectro

A primeira questão em aberto está relacionada com a fragmentação espectral. Em redes WDM sempre existiu a restrição de continuidade espectral, ou seja, para transmitir um sinal a partir de um nó de origem para o nó de destino deve ser utilizado o mesmo canal em todas as ligações físicas que constituem o caminho ótico selecionado entre os dois nós ou então conservação do comprimento de onda. Esta restrição evita conversões ótico-eletrónicas nos nós intermédios de modo a alterar o comprimento de onda.

Nas redes *flex-grid* a restrição de continuidade espectral existe, mas o problema assume uma dimensão maior dado que o espectro livre pode ficar isolado devido à existência de canais com

diferentes dimensões. Na figura 2.12 é possível verificar o resultado da aplicação da restrição de continuidade em redes *flex-grid*. Embora haja espectro livre suficiente no percurso entre A e E para adição de um novo canal de 75 GHz, o espectro está dividido em dois blocos não contíguos, 50 GHz e 25 GHz respectivamente, logo não vão poder ser utilizados para a adição do canal de 75 GHz.

Existem duas formas de resolver este problema. A primeira consiste no desenvolvimento de um esquema de modo a fragmentar o espectro ótico. Esta iria tentar redirecionar e realocar o espectro de forma a minimizar a quantidade de espectro livre isolado. No entanto qualquer esquema desse género quando aplicado na rede de um operador poderia ser disruptivo e motivo de preocupação.

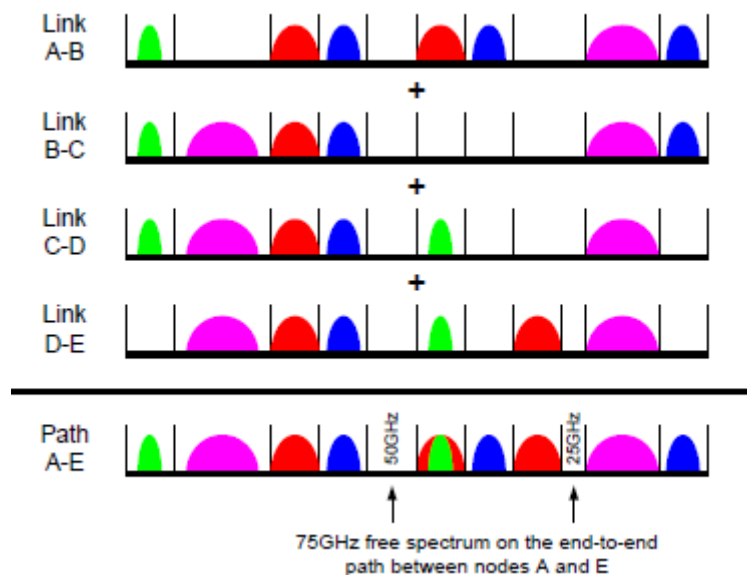


Figura 2.12 – Alocação de espectro entre os nós A e E, [19].

A fragmentação em redes *flex-grid* pode levar a uma redução da eficiência espectral e a um aumento da taxa de bloqueio. Portanto o agrupamento de sinais com a mesma largura de banda necessária numa banda contínua é benéfico para reduzir a necessidade de fragmentação [35].

A segunda forma onde a fragmentação de espectro poderia ser controlada está no algoritmo RSA que determina como um canal é encaminhado. Esta solução seria ideal, uma vez que limita a necessidade de fragmentação, mas existem complexidades significativas no desenvolvimento de um algoritmo com estas capacidades.

2.4.3.2. Exigência de Tráfego

A segunda questão em aberto consiste no comportamento da exigência de tráfego no futuro. É esperado que o tráfego se torne cada vez mais dinâmico com canais de tráfego sendo adicionadas/removidas. O *flex-grid* proporciona flexibilidade espectral adicional, no entanto as lacunas que podem ser deixadas quando um canal é removido da rede pode conduzir a uma maior fragmentação espectral se não for adequadamente controlado.

É necessário uma melhor compreensão das propriedades dinâmicas do tráfego, particularmente na camada ótica, de modo a poder determinar o impacto no planeamento e operação de rede.

2.5. Camada de internet - 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 OSI (*Open Systems Interconnection*) [21]. O modelo OSI foi concebido com o intuito de criar dispositivos de rede e *software* interoperáveis através de vários protocolos de rede. Este modelo descreve como é feita a comunicação entre os dados e a informação de rede desde um equipamento terminal atravessando a rede e chegando a outro equipamento terminal. É por isso importante ter bem definido a função de cada camada de rede e a interface entre as camadas.

A figura 2.13 ilustra uma forma clássica de hierarquização das diferentes camadas de rede proposta pelo modelo OSI [16]. 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.

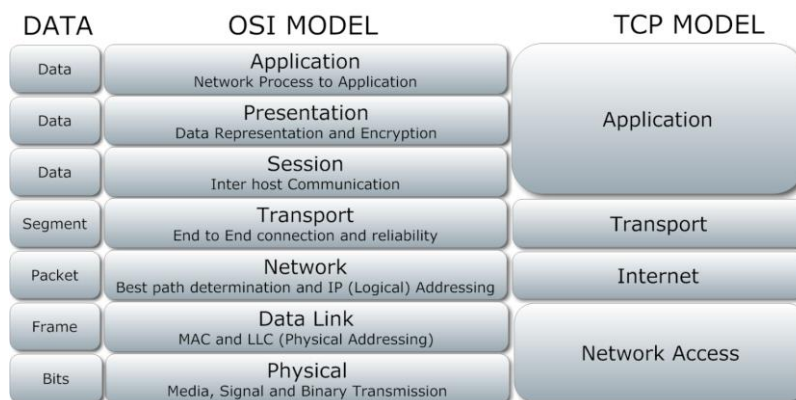


Figura 2.13 – Modelo OSI.

O protocolo IP que serve de suporte à rede de internet é atualmente o mais popular e não proprietário. Este é utilizado para comunicar ao longo de um variado conjunto de redes interligadas, que não necessitam de estar restritas a apenas um meio de transmissão sendo capazes de suportar uma elevada variedade de serviços. A estrutura do modelo definido para TCP (*Transmission Control Protocol*)/IP deriva do modelo OSI, figura 2.14.

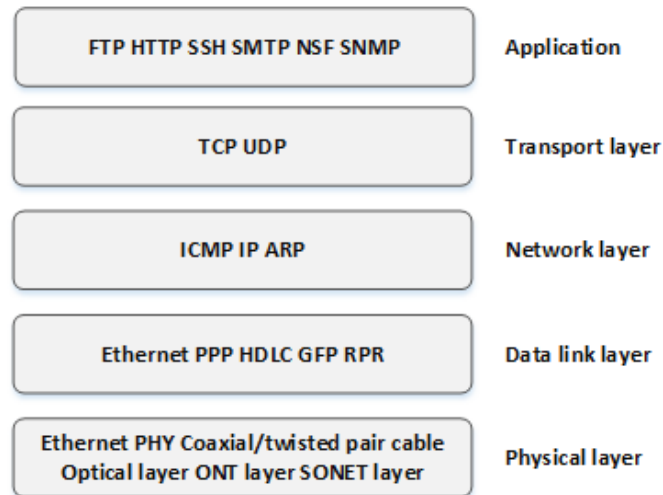


Figura 2.14 – Modelo em camadas do protocolo IP.

No âmbito desta dissertação tem-se em conta as camadas 1 e 2 do modelo TCP/ IP, pois são as responsáveis pela definição do meio de transporte físico até ao encaminhamento (*routing*) ao nível da camada IP.

Com funções muito semelhantes à camada 3 de rede do modelo OSI, é nesta camada que é definida a função de interligação de redes/equipamentos IP, entre as suas responsabilidades encontra-se o encaminhamento de dados para a rede ou equipamento correto na rede de destino. Apesar de na Figura 2.10 ser representado como a unidade de transporte de dados nesta camada o pacote, tratando-se neste caso de pacotes gerados pela camada de internet a estes dá-se o nome de pacote IP, que são encapsulados na unidade de transporte da camada inferior.

De forma a ser possível executar as várias funcionalidades deste protocolo, é necessário adicionar alguma informação adicional para além dos próprios dados a transportar. É neste sentido que o pacote IP é constituído pelo cabeçalho, designado por *header*, que contém informação de controlo para este protocolo e os dados a transportar, designados por *data* ou *payload*. A estrutura dos cabeçalhos das duas versões mais populares do protocolo de internet, IPv4 (*Internet Protocol version 4*) e IPv6 (*Internet Protocol version 6*), são apresentados na figura 2.15 respetivamente.

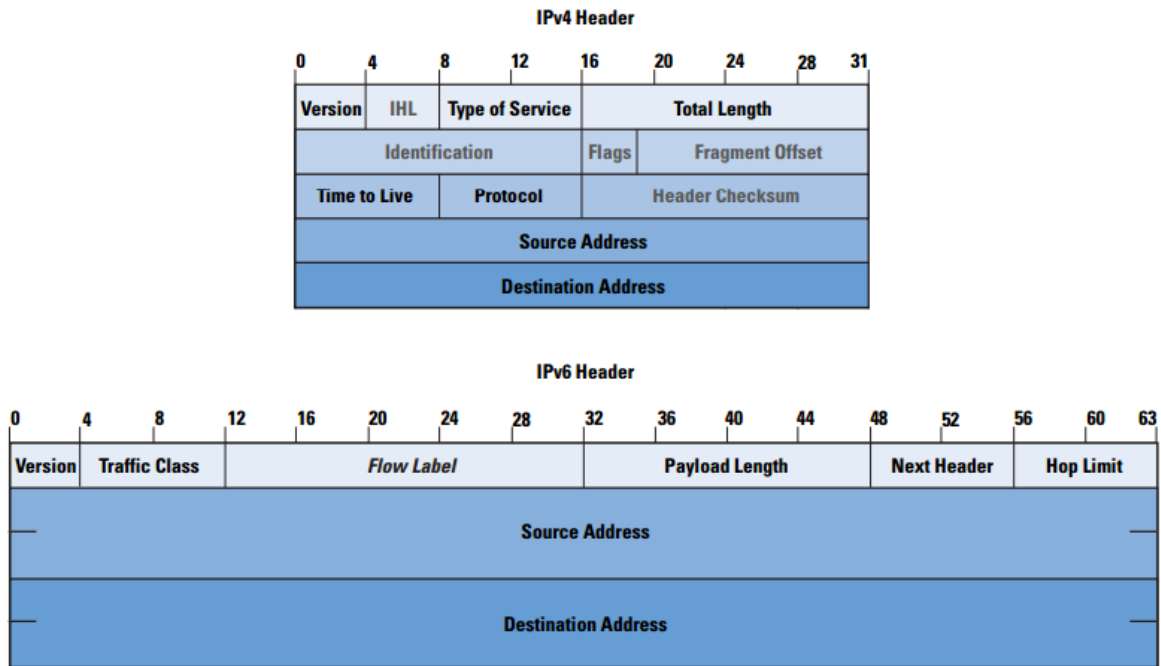


Figura 2.15 – Cabeçalhos de um pacote IPv4 e IPv6, [22].

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

Com o elevado crescimento da internet nos últimos anos notou-se que a capacidade de endereçamento de 32 bits de IPv4 não seria suficiente para os equipamentos ou redes, com necessidade de ligação à rede global de internet como tal definiu-se uma nova forma de endereçamento de 128 bits, o IPv6 [22].

2.5.1 Router IP

Os *routers* óticos constituem elementos críticos numa rede de comutação de pacotes. Estão localizados nos nós de rede ótica, fazendo parte da camada de transporte da mesma. São responsáveis pelo processamento de informação presente nos cabeçalhos dos pacotes, bem como do encaminhamento desses mesmos pacotes para os nós seguintes. As principais características dos *routers* são a capacidade para substituir o cabeçalho de pacotes em tempo real em situações onde é necessário efetuar a troca de etiqueta, bem como realizar a conversão do comprimento de onda e assegurar a regeneração do sinal ótica de dados e cabeçalho, possibilitando uma cascata com vários nós. A figura 2.16 mostra as quatro funções base de um

router IP: funcionalidade de encapsulamento e conversão (*encapsulation and conversion*), processamento e classificação de pacotes (*packet processing and classification*) encaminhamento (*routing*), encaminhamento de pacotes IP (*packet forwarding*).

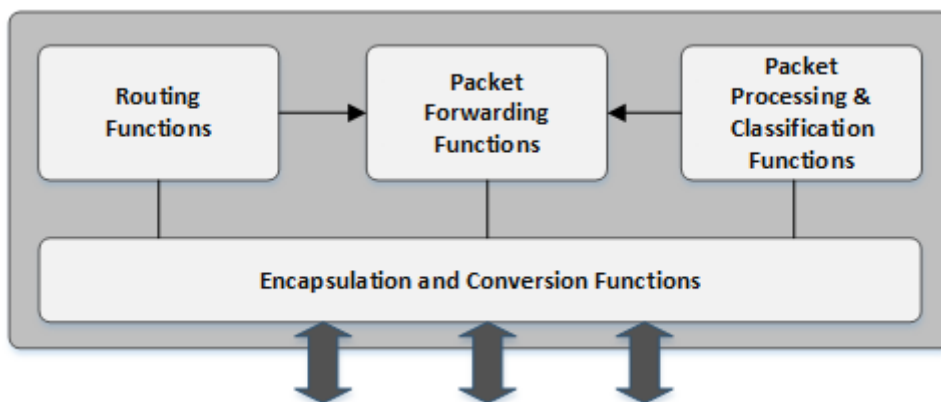


Figura 2.16 – Funcionalidades de Router IP, [3]

As funções de encapsulamento e conversão são utilizadas para encapsular e/ou converter os dados entre os diferentes protocolos da camada de ligação, permitindo a interligação com diferentes configurações de rede. As funções de processamento e classificação de pacotes analisa o cabeçalho de todos os pacotes que passam pelo *router*, classificando os mesmos de acordo com a informação existente no cabeçalho do pacote. As funções de encaminhamento de pacotes indicam o próximo salto (*next-hop*) do pacote com base na informação presente na tabela de *routing*. Cada *router* mantém tabela de *routing*, que contem uma ou mais entradas para cada *router* de destino na rede. Por sua vez, estas são preenchidas usando as funções de encaminhamento.

O *router* IP executa funcionalidades até a camada 3 de rede, onde são executadas as funcionalidades anteriormente descritas. O *router* IP usa uma tecnologia de comutação de pacotes de *store-and-forward*. As funções de *routing* descobrem e mantêm a topologia de rede e processam caminhos de *routing* através da rede para outros destinos.

2.5.2. Encaminhamento IP

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

Na camada de transmissão de internet, assim que um pacote chega a um *router*, uma das tarefas a fazer nos portos de entrada é a indexação da tabela de encaminhamento por forma a determinar

o porto de saída para encaminhar o pacote. Com base na troca de informação entre *routers* vizinhos, são também atualizados os algoritmos de encaminhamento. Tipicamente o melhor caminho é dado pelo que apresenta o menor custo, onde podem entrar fatores que dependem do algoritmo de encaminhamento usado. Nos algoritmos de encaminhamento na internet usados atualmente, como RIP (*Routing Information Protocol*), OSPF (*Open Shortest Path First*) e BGP (*Border Gateway Protocol*) não entra em conta para o cálculo do caminho de menor custo, o nível de congestionamento da rede [23]. 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 as tabelas de encaminhamento de cada *router*.

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*.

Os algoritmos do tipo *link-state* calculam o caminho de menor custo com base no conhecimento de toda a rede a nível dos custos das ligações, e que requer o conhecimento prévio de toda a rede. Este baseia-se no algoritmo de *link-state broadcast* que é usado na rede de internet pelo protocolo OSPF, com isto cada *router* difunde para todos os routers da rede a sua própria informação das ligações associadas às interfaces do mesmo, passando todos os routers da rede a ficarem atualizados com a mesma informação e uma visão completa de toda a rede. A partir daqui cada *router* pode executar o próprio algoritmo *link-state*. Uma das vantagens deste algoritmo face ao *distance-vector* é facto de conseguir geralmente tempos de convergência inferiores. O algoritmo de encaminhamento do tipo *link-state* usado na internet é conhecido por algoritmo Dijkstra. Este calcula o caminho de menor custo desde um *router* para todos os outros *routers* da rede. Trata-se de um algoritmo iterativo que após k iterações calcula os caminhos de menor custo para os k *routers*

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

Com algoritmos de encaminhamento do tipo *distance-vector*, o cálculo do caminho de menor custo é feito de forma iterativa e distribuída. Nenhum nó tem previamente conhecimento do custo de todas as ligações da rede. Em vez disto, cada nó começa por ter o conhecimento das ligações diretas ao mesmo, e por forma a calcular o custo de uma ligação até um destino, os vários nós envolvidos comunicam entre si iterativamente, com isto o nó de origem calcula

gradualmente o caminho de menor custo para o destino. Este algoritmo permite que cada nó contenha vetores com custos estimados para todos os outros nós da rede. Trata-se também de um algoritmo assíncrono, pois cada nó envia periodicamente aos seus vizinhos uma cópia da sua informação de *distance-vector*, não se tratando de uma informação que é atualizada ao mesmo tempo em todos os nós. Algoritmos do tipo *distance-vector* são usados em vários protocolos de encaminhamento na internet, como é o caso dos protocolos, RIP e BGP.

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

2.6. IP sobre WDM - Arquitetura Multicamadas

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

Os custos excessivos apresentados pelas arquiteturas 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 infraestrutura ótica. O consumo energético associado a este tipo de modelo tem assim em consideração ambas as camadas de rede. Esta arquitetura de duas camadas, entre outras virtudes, oferece maior flexibilidade, fiabilidade, melhor eficiência, maior escalabilidade, transporte ótico verdadeiramente transparente e redução de custos [24-25].

Como as redes *core* apresentam arquiteturas de rede de múltiplas camadas, o consumo de energia da rede principal deve ser considerada em ambas as camadas de rede, ou seja, a camada ótico e da camada eletrónica.

A expressão IP diretamente sobre WDM refere-se à interligação dos equipamentos, isto é, ligação direta entre *routers* IP e equipamentos WDM e não a um mapeamento direto do

protocolo IP sobre WDM. Afinal, sistemas de fibras óticas, em geral, oferecem um serviço para fluxos de dados contínuos, enquanto os pacotes IP não têm essa capacidade.

Para realizar o mapeamento de pacotes IP em comprimentos de onda são necessários passos intermediários 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 uma forma geral, complementares e baseadas em enquadramentos SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*)/SONET (*Synchronous Optical Networking*), Gigabit Ethernet e/ou comutação multi-protocolo 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, detecção de erro e funções de controle de inicialização.

Contudo, o enquadramento SDH/SONET possui limitações relacionadas com o processo de segmentação, que pode ser bastante custoso em termos de tempo de processamento, resultando em degradação do desempenho da rede. Outra desvantagem do uso de quadros SDH/SONET é o atual custo elevado dos *transponders* e equipamentos de regeneração.

A principal vantagem do enquadramento SDH/SONET é que ele transporta sinalização e informações de gestão no cabeçalho. Contudo, muitas dessas informações são reservadas para monitorização de falhas e operações de suporte do sistema. Essa sobrecarga de informações pode ser minimizada se tais funções forem incorporadas pelos dispositivos IP.

As redes WDM podem ser classificadas em duas categorias distintas, WDM reconfigurável e WDM comutado. A primeira é utilizada em redes WDM comutadas por circuitos, na qual uma topologia de caminho ótico formada por circuitos estabelecidos é reconfigurável de acordo as mudanças de tráfego e o planeamento da rede. Enquanto as redes WDM comutadas são utilizadas em redes WDM comutadas por pacotes, em que os cabeçalhos óticos são anexados aos dados e processados em cada comutador de rede.

Em ambas as arquiteturas de rede, os pacotes IP podem ser mapeados de diferentes formas sobre WDM. Na figura 2.17, encontram-se representadas diferentes formas de mapeamento de IP sobre WDM.

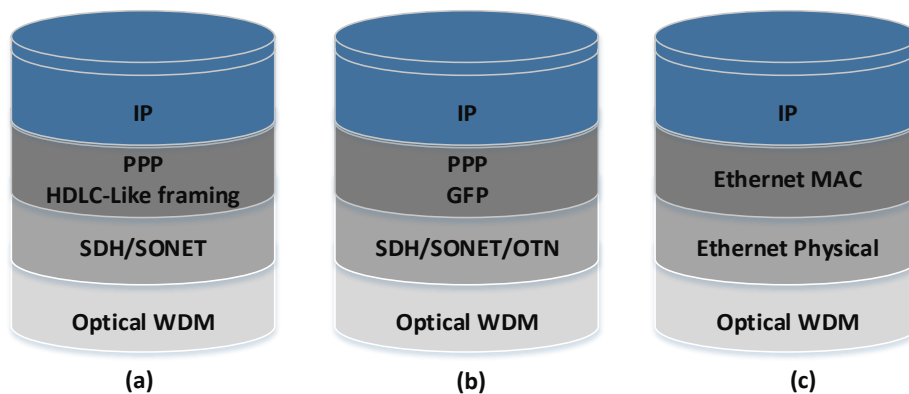


Figura 2.17 – Possibilidades de arquiteturas multicamadas para mapeamento IP sobre WDM, [16].

Das três possibilidades de mapeamento de IP sobre WDM apresentadas na Figura 2.17, em (a) é apresentada a variante conhecida como POS (*Packet-Over-SONET*)/SDH, onde os pacotes IP são mapeados em *frames* PPP, sobre as quais é feito mapeamento e codificação do tipo HDLC (*High-level Data Link Control*), para ser finalmente adicionado a *frames* SONET ou SDH. Com a implementação de (b) os pacotes IP são mapeados em *frames* PPP, para ser posteriormente serem mapeadas sobre SONET, SDH ou OTN (*Optical Transport Network*) usando a técnica de multiplexagem GFP (*Generic Framing Procedure*). Usando a vertente (c) as interfaces *Ethernet* tais como 1/10/40/100 Gbps 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.

2.6.1 Arquitetura de modelo IP sobre WDM

A arquitetura de rede considerada para o transporte IP sobre WDM é baseada em *links* de fibra, nós óticos e *routers* IP, como ilustrado na figura 2.18. A ligação física entre os nós de rede pode ser de 80 km, *span link*, que consiste num segmento *standard* de uma fibra multimodo, SMF [10]. Tendo em conta a atenuação sofrida ao longo da fibra no fim de cada *span link* é introduzido um amplificador ótico, *In-Line Amplifier*. Cada fibra ótica suporta a transmissão de um valor máximo W de comprimentos de onda. Cada comprimento de onda está associado a um canal de transmissão em redes *fixed-grid*, sendo que em redes *flex-grid* um canal de transmissão, *superchannel*, pode ser constituído por um ou mais comprimentos de onda pelo que é necessário considerar equipamentos de largura de banda variável.

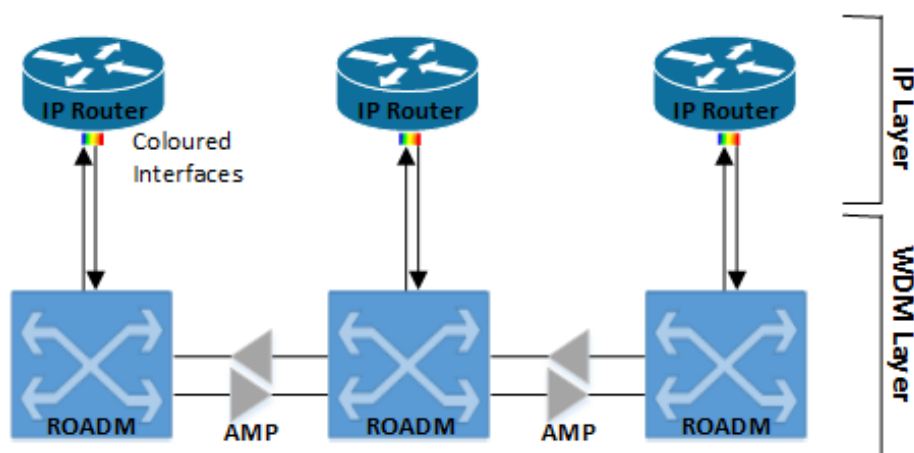


Figura 2.18 – Arquitetura IP sobre WDM.

Por forma a cumprir os requisitos necessários para ambas as tecnologias, no âmbito desta dissertação considerou-se arquitetura de rede reconfigurável, com uso de um ROADM *directionless* para redes *fixed-grid* e um ROADM-CDC (*Colorless, Directionless, Contentionless*) para redes *flex-grid*. Estas arquiteturas contrariamente às arquiteturas de redes WDM comutadas por circuitos apresentam uma topologia física diferente da topologia virtual. A topologia virtual é composta pelos diferentes caminhos óticos e pelos *routers* IP onde se efetua a comutação do tráfego IP.

Os ROADM reconfiguráveis aumentam a flexibilidade da rede para que a adição/remoção de comprimentos de onda se torne uma tarefa simples e gerida de forma remota, conseguindo-se controlo total sobre a infraestrutura. Estes são ligados para efeitos de *add/drop* ao *router* IP que possui interfaces compatíveis com WDM, *colored interfaces*.

2.6.1.1. ROADM Directionless

A topologia física de uma rede reconfigurável *directionless* possibilita que determinado comprimento de onda seja adicionado e/ou retirado no nó dinamicamente, qualquer que seja a direção. Na figura 2.19 é ilustrado a arquitetura do ROADM *directionless* utilizado.

Os ROADM *directionless* encontram-se interligados por fibra ótica. Por cada direção bidirecional, par de fibras, o ROADM utiliza um WXC que seleciona os comprimentos de onda a transmitir para os outros nós de rede na respetiva direção, sendo também incorporado um BST e um PRE de forma a aumentar a potência do sinal a transmitir e melhorar a qualidade de sinal na receção, compensando perdas na transmissão. Por cada nó para efeitos de adição e/ou remoção de comprimentos de onda na rede de transmissão é igualmente utilizado um WXC, BST e PRE, bem como um MUX (*Multiplexer*) e DEMUX (*Demultiplexer*), como interfaces

de entrada/saída, com o intuito de disponibilizar interfaces para cada um dos comprimentos de onda que liga diretamente a interface do *router* IP.

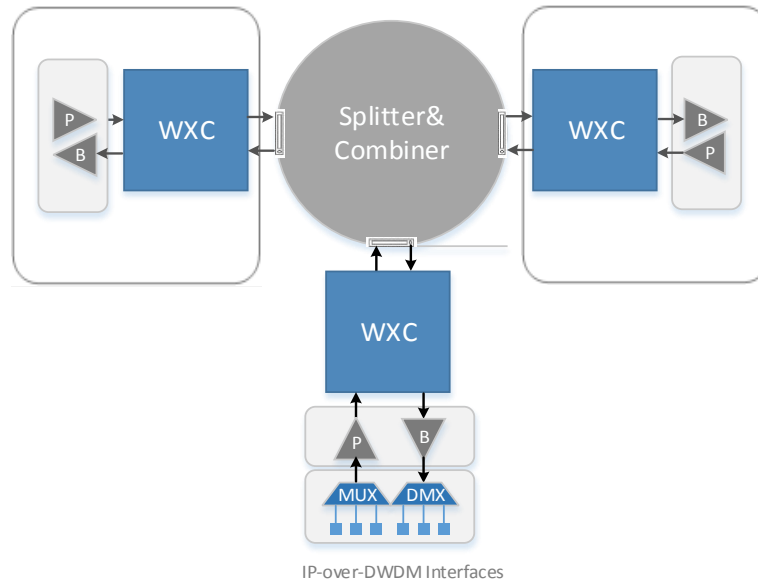


Figura 2.19 – Arquitetura de ROADM *directionless*.

Em cada nó ROADM é também utilizado um *Splitter* e *Combiner*, componente passivo, ligado a cada um dos WXC, para que o sinal proveniente de cada WXC seja transmitido para todos os outros, da mesma forma que cada WXC receba sinal de todos os restantes WXC do ROADM.

O *Splitter* e *Combiner*, MUX e DEMUX, por se tratarem de componentes passivos não são considerados para o consumo total na rede.

2.5.1.2. ROADM CDC

A topologia física de um ROADM CDC para além da funcionalidade *directionless* dispõe da funcionalidade *connectionless* e *colorless*:

- *Colorless* - possibilita que cada comprimento de onda possa ser enviado para qualquer interface WDM;
- *Directionless* – permite que os comprimentos de onda sejam adicionados e/ou retirados do nó dinamicamente, qualquer que seja a direção;
- *Contentionless* - possibilita adição/remoção de canais óticos de um nó ROADM de modo a acomodar N (número de direções) comprimentos de onda da mesma frequência num único MCS (*Multicast Switch*).

Na figura 2.20 é ilustrado a arquitetura do ROADM CDC utilizado. O elemento básico de um ROADM CDC é o WSS. O WSS é um componente ativo que monitoriza e comuta os canais óticos de largura de banda variável, possibilitando a remoção dinâmica de comprimentos de onda para qualquer porta ou efetuando o *bypass* para o próximo nó da rede.

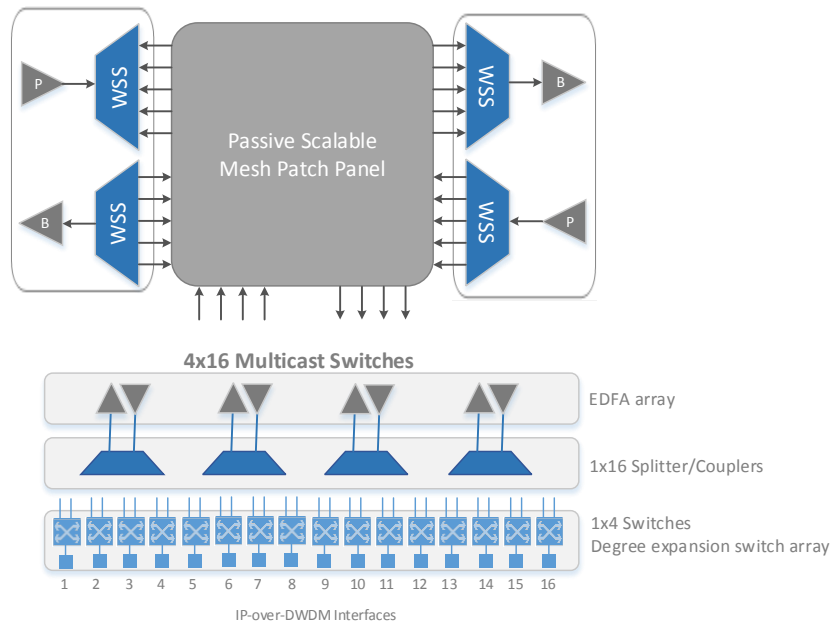


Figura 2.20 – Arquitetura de ROADM CDC.

Com a introdução do conceito de *superchannels* associado às redes *flex-grid*, o WSS possibilita a delimitação do espectro de modo a tratar todas as sub-portadoras pertencentes ao mesmo *superchannel* como uma entidade única. Este, também incorpora um BST e um PRE de forma a aumentar a potência do sinal a transmitir e melhorar a qualidade de sinal na recepção compensando perdas na transmissão. De forma a adicionar e/ou remover comprimentos é utilizado por cada nó no mínimo um MCS, com o intuito de disponibilizar interfaces para cada um dos comprimentos de onda como interfaces de entrada/saída, ou seja, é o elemento responsável por adicionar/remover comprimentos de onda. O MCS apenas dispõe de quatro interfaces de entrada pelo que apenas suporta quatro direções, *degree*, ou fibras de rede para interligação com outros nós de rede, sendo expansível a 16 direções com adição de MSC adicionais. No que diz respeito às interfaces de saída, o MCS dispõe de 16 interfaces suportando assim a adição e remoção de 16 canais por cada nó, sendo necessário integrar mais um MCS ao ROADM por cada 16 canais [26].

Capítulo 3

Modelos de redução do consumo energético

Uma forma de reduzir o consumo energético em redes IP sobre WDM é utilizando equipamentos que selecionem quais os comprimentos de onda que necessitam ser processados na camada IP, reduzindo assim a quantidade de portas IP ativas em cada nó da rede.

As arquiteturas 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 eletronicamente nesse nó é ópticamente comutado para outra direção, sem ter de ser processado pelo *router* IP. Assim, é possível minimizar o processamento na camada IP, o número de interfaces ativas no *router* IP e o número de conversões O-E-O (*Optical-Electrical-Optical*), traduzindo-se numa consequente redução do consumo energético. Esta técnica é denominada de *bypass* ótico, sendo esta técnica fundamentalmente utilizada neste trabalho para a otimização energética.

É com base nestes conceitos que se efetuará uma avaliação ao modelo de otimização recorrendo à programação linear inteira, MILP, com base no modelo proposto em [36-37] para as redes *fixed-grid* e com base em [38] para as redes *flex-grid*.

Este modelo será testado com a topologia de uma rede da Alemanha, sendo que a implementação do modelo será efetuada através da plataforma *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio*, versão 12.6 [39]. Para avaliar a mais-valia, a nível energético, da utilização deste modelo de otimização, pretende-se otimizar o encaminhamento na rede em função do consumo

energético dos equipamentos existentes e da capacidade dos canais existentes em cada ligação ótica.

3.1. Algoritmo de Otimização MILP

Neste capítulo é apresentado em detalhe o modelo MILP 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 ótica, possível em redes MLR. Nas secções posteriores serão apresentados outros modelos utilizados dando destaque às alterações efetuadas relativamente a este primeiro modelo.

O modelo apresentado pretende minimizar o consumo 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, apresentados posteriormente na secção 3.3. Com base nas constantes de entrada e na arquitetura de rede, são posteriormente calculados os parâmetros de rede. Finalmente, as variáveis de decisão podem variar no intervalo definido de forma a cumprir o objetivo definido pelo modelo.

Índices:

- $m, n \in N$ Índice dos nós de origem m e de destino n da topologia física, na camada ótica. 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 de 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 óticos e *routers* IP, em que as ligações físicas E são estabelecidas por fibra ótica entre comutadores óticos;
- 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;
- N Número de nós na topologia física;
- λ^{sd} A matriz de previsão do consumo 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 óticos numa ligação física, em metros;
- E_{cr}^c Consumo médio da cada porta (interface) bidirecional dos *routers* IP, para cada um dos canais com capacidades de transmissão B_c , em Watt;
- E_e Consumo médio de amplificador ótico em Watt;
- E_{pre} Consumo médio de pré amplificador, *pre-amplifier*, por fibra ótica à entrada de cada nó ótico na transmissão e por cada nó para adicionar e retirar canais, em Watt;
- E_{bst} Consumo médio de amplificador de potência, *booster*, por fibra ótica à saída de cada nó ótico na transmissão e por cada nó para adicionar e retirar canais, em Watt;
- E_{wxc} Consumo médio de comutador de comprimento de onda, WXC, por cada fibra ótica de transmissão, à saída do nó ótico de modo a 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 óticos 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 óticas 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 diretamente os parâmetros do modelo, mesmo antes de ser aplicado o modelo.

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

3.1.2. Objetivo e restrições do modelo

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

Objetivo: minimizar

$$\begin{aligned}
 & \sum_{i \in N} (E_{pre} + E_{bst} + E_{wxc}) & (1) \\
 & + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N: i \neq j} \sum_{c \in NR} C_{ij}^c \times E_{cr}^c & (2) \\
 & + \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} (E_{pre} + E_{bst} + E_{wxc}) \times f_{mn} & (3) \\
 & + \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} E_e \times A_{mn} \times f_{mn} & (4)
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Analisando a função objetivo verifica-se que esta é formada por 4 partes, representados na equação como (1), (2), (3) e (4).

A expressão (1) traduz o consumo considerado em cada nó para adicionar e/ou retirar comprimentos de onda de/para o nó de índice i . A expressão (2) considera o consumo na camada IP em que cada canal ótico com capacidade B está associado uma interface bidirecional WDM do *router* IP de consumo E_{cr}^c . Na expressão (3) é considerado o consumo por cada direção onde são utilizados pré amplificadores e amplificadores de potência, em conjunto com o WXC responsável por selecionar os comprimentos de onda a transmitir na mesma direção. Por último a expressão (4) considera o consumo dos amplificadores óticos, EDFA, colocados ao longo das ligações físicas por fibra ótica.

Apresentada a função objetivo 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 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 óticos de capacidade B de i para j , equação 3.4. Todos os canais que chegam a um nó intermédio tem 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:**

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

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

- **6ª Restrição**

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

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

3.2. Modelos de Otimização

Ao longo desta secção estão descritos os diferentes modelos de otimização abordados neste trabalho que diferem entre si na própria arquitetura de rede, tipo de encaminhamento ótico, tipo de modulação e capacidade de transmissão dos canais a utilizar na rede, multiplexagem e critério de encaminhamento.

De forma a analisar a eficiência energética das redes atualmente existentes com as redes de próxima geração desenvolveu-se modelos de simulação para redes *fixed-grid* e *flex-grid*. Para ambos os cenários de rede considerou-se modelos que como critério de encaminhamento de tráfego considera o menor consumo energético da rede, o caminho mais curto e por último o caminho mais curto em conjunto com o menor consumo energético.

Todos os modelos abordados ao longo deste trabalho são do tipo MLR com *bypass* ótico. No entanto dependendo da tecnologia utilizada para a alocação 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, dada a limitação existente a nível de espectro.

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

No primeiro cenário considerou-se canais com modulação DP-QPSK que é a opção de transmissão mais adequada para as redes de próxima geração, uma vez que possibilita maior alcance com baixo consumo energético [23]. No segundo cenário considerou-se uma modulação de nível superior, 16-QAM, que possui uma maior eficiência espectral, no entanto o alcance ótico deste tipo de modulação é inferior [40].

Na figura 3.1 é apresentado de uma forma visual um resumo de todos os modelos considerados ao longo desta dissertação.

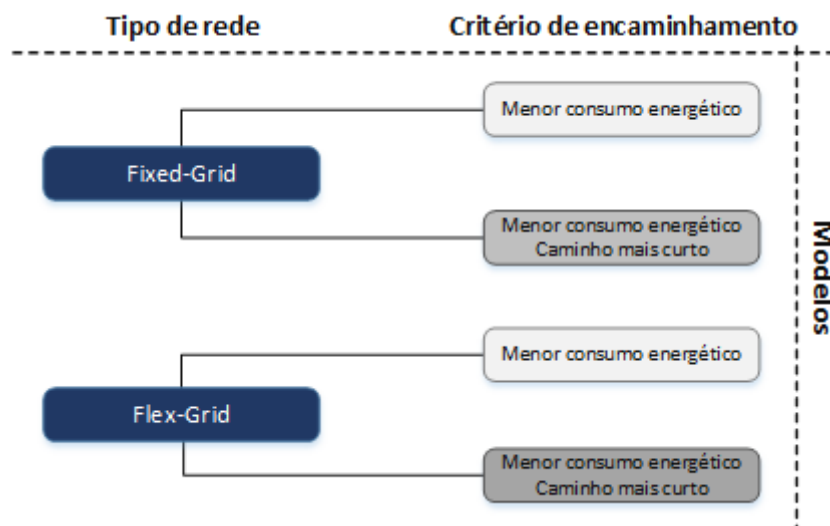


Figura 3.1 – Modelos de Otimização.

3.2.1. Modelo Fixed-grid: menor consumo energético

Este modelo pelo facto de ser MLR permite liberdade e seleção 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 consumo energético 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.

3.2.2. Modelo Fixed-grid: caminho mais curto e menor consumo energético

Neste modelo o objetivo final consiste na minimização do consumo total da rede considerando a junção do menor consumo energético, descrito na secção 3.2.1, com a escolha caminho mais curto. Assim, a formulação matemática da função objetivo para este modelo encontra-se descrita na equação 3.8.

- **Objetivo:** minimizar

$$\begin{aligned}
 & \sum_{i \in N} (E_{pre} + E_{bst} + E_{wxc}) \\
 & + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N: i \neq j} \sum_{c \in NR} C_{ij}^c \times E_{cr}^c \\
 & + \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} (E_{pre} + E_{bst} + E_{wxc}) \times f_{mn} \\
 & + \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} E_e \times A_{mn} \times f_{mn} \\
 & + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N: i \neq j} \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} w_{nm}^{ij,c} \times L_{mn}
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

3.2.3. Modelo Flex-grid: menor consumo energético

Nas arquiteturas WDM associada a redes *flex-grid* existem características fundamentais que não se encontram implementadas nas redes WDM atualmente 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 [38], 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 objetivo considera o menor consumo 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 a cada *slot* dentro da gama *SL*;
- $lp \in LP$ Índice associado aos diversos *lightpaths* dentro da gama *LP*;

Constantes:

- 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 óticos, *lightpath*, suportados por fibra;
- $SlotsB$ Largura espectral necessária para suportar todos os canais com capacidade de transmissão B_c , em número de *slots*;
- E_{wss} Consumo médio de WSS, por cada fibra ótica de transmissão à saída do nó ótico para selecionar comprimentos de onda a transmitir, em Watt;
- E_{msc} Consumo médio de MCS, por cada quatro fibras óticas de transmissão em cada nó para adicionar e/ou retirar canais, em Watt;
- D_m Número de direções, *degree*, por cada nó;

Parâmetros:

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

Variáveis de decisão:

- $C_{ij}^{c,lp} \in N$ Indica os *lightpaths* estabelecidos com capacidade c na ligação virtual entre i e j ;
- $w_{mn}^{ij,c,lp} \in N$ Indica os *lightpaths* estabelecidos com capacidade c na ligação virtual entre i e j que atravessa a ligação física entre m e n . Coloca a 1 a primeira *slot* ocupada pelo *lightpath*;
- $C_Slots_{ij}^{sl} \in N$ Indica 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 objetivo referente às redes *fixed-grid* verifica-se que esta também se encontra formulada em 4 blocos, representados na equação 3.9 como (1), (2), (3) e (4).

- **Objetivo:** minimizar

$$\begin{aligned}
 & \sum_{m \in N} N_{mcs}^m \times E_{mcs} & (1) \\
 & + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N: i \neq j} \sum_{c \in NR} \sum_{lp \in LP} C_{ij}^{c,lp} \times E_{cr}^c & (2) \\
 & + \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} E_{wss} \times f_{mn} & (3) \\
 & + \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} E_e \times A_{mn} \times f_{mn} & (4)
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

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 MSC 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 bidirecional WDM do *router* IP de consumo E_{cr}^c . Na expressão (3) é considerado o consumo por cada direção onde são utilizados WSS, que incorporam pré amplificadores e amplificadores de potência, responsáveis por selecionar os comprimentos de onda a transmitir na mesma direção. Por último a expressão (4) considera o consumo dos amplificadores óticos colocados ao longo das ligações físicas por fibra ótica.

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

- **2ª Restrição**

$$\sum_{s \in N} \sum_{d \in N: s \neq d} \lambda_{ij}^{sd} \leq \sum_{c \in NR} \sum_{lp \in LP} C_{ij}^{c,lp} \times B_c \quad \forall i, j \in N: i \neq j; c \in NR \tag{3.10}$$

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

Assim a segunda restrição, equação 3.10, 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 .

- **3ª Restrição**

$$\sum_{n \in N} W_{mn}^{ij,c,lp} - \sum_{n \in N} W_{nm}^{ij,c,lp} = \begin{cases} C_{ij}^{c,lp} & m = i \\ -C_{ij}^{c,lp} & m = j \\ 0 & \text{outros} \end{cases} \quad \forall i, j, m \in N : i \neq j; c \in NR; lp \in LP \quad (3.11)$$

A terceira restrição representa a conservação do fluxo dos *lightpath* estabelecidos de capacidade c de i para j , equação 3.11. Todos os *lightpath* que chegam a um nó intermédio tem 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.

- **4ª Restrição:**

$$\sum_{sl \in SL} C_{-} Slots_{ij}^{sl} = \sum_{c \in NR} \sum_{lp \in LP} C_{ij}^{c,lp} \times SlotsB^c \quad \forall i, j \in N : i \neq j \quad (3.12)$$

A quarta restrição, equação 3.12, 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.

- **5ª Restrição:**

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N : i \neq j} \sum_{c \in NR} \sum_{lp \in LP} W_{nm}^{ij,c,lp} \times SlotsB^c \leq W \times f_{mn} \times T_{mn} \quad \forall m, n \in N : m \neq n \quad (3.13)$$

A quinta restrição, equação 3.13, tem o intuito de garantir que todas as fibras óticas entre dois nós m e n têm capacidade para suportar o número de canais óticos 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.

- **6ª Restrição**

$$C_{ij}^{c,lp}, C_{-} Slots_{ij}^{sl}, \lambda_{ij}^{sd}, W_{mn}^{ij,c,lp}, f_{mn}, N_{mcs}^i \geq 0 \quad \forall m, n, i, j, s, d \in N; c \in NR; lp \in LP; sl \in SL \quad (3.14)$$

Na sexta restrição, equação 3.14, acrescentou-se as variáveis de decisão associadas a este modelo que devem ser inteiras e positivas.

- **7ª Restrição**

$$N_{mcs}^m \geq \frac{\left(\sum_{n \in N} f_{mn} \right)}{4} \quad \forall m \in N \quad (3.15)$$

A sétima restrição, equação 3.15, adicionou-se com o intuito de garantir que o número de cartas MCS existentes em cada nó de rede tem capacidade de suportar todas as fibras óticas entre dois nós m e n têm capacidade para suportar o número de canais óticos que circula entre os dois nós em questão. Cada MCS suporta até um máximo de quatro fibras óticas e/ou direções, sendo quatro o número máximo portas existentes para interligação das fibras.

- **8ª Restrição**

$$C_{ij}^{c,lp}, C_{ij}^{sl}, w_{mn}^{ij,c,lp} \leq 1 \quad \forall m, n, i, j, \in N; c \in NR; lp \in LP; sl \in SL \quad (3.16)$$

A oitava restrição, equação 3.16, 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*.

3.2.4. Modelo Flex-grid: caminho mais curto e menor consumo energético

Neste modelo o objetivo final consiste na minimização do consumo total da rede considerando a junção do menor consumo energético, descrito na secção 3.2.3, com a escolha caminho mais curto para as redes *flex-grid*. Assim, a função objetivo resulta na função apresentada na equação 3.17.

- **Objetivo:** minimizar

$$\begin{aligned} & \sum_{m \in N} N_{mcs}^m \times E_{mcs} \\ & + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N: i \neq j} \sum_{c \in NR} \sum_{lp \in LP} C_{ij}^{c,lp} \times E_{cr}^c \\ & + \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} E_{wss} \times f_{mn} \\ & + \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} E_e \times A_{mn} \times f_{mn} \\ & + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N: i \neq j} \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} \sum_{c \in NR} \sum_{lp \in LP} w_{mn}^{ij,c,lp} \times L_{mn} \end{aligned} \quad (3.17)$$

3.3. Cenário de Otimização - Topologia de Rede

A topologia de rede de transporte IP adotada é baseada em [12], onde se encontra definida a topologia de uma rede da Alemã, figura 3.2.

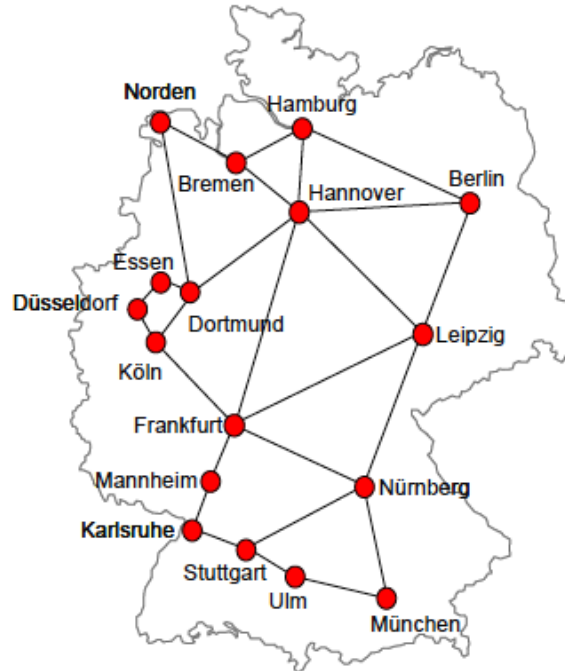


Figura 3.2 – Topologia de rede da Alemanha com 17 nós de rede [13].

A rede é caracterizada pela sua topologia de rede lógica e pelas ligações físicas dos canais. Na tabela 3.1, encontram-se sintetizados os principais parâmetros da topologia de rede a considerar ao longo desta dissertação.

Tabela 3.1 – Parâmetros da topologia de rede, [12].

Descrição	Valor
Número de nós	17
Número de ligações	26
Número mínimo de <i>degree</i> por nó	2
Número máximo de <i>degree</i> 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 <i>lightpath</i> [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 reta entre os diferentes nós multiplicados pelo fator de 1.2 com base em valores de empíricos de redes reais [12], tabela 3.2. Nesta, é sintetizada a informação relativamente aos 17 dos nós físicos de rede, todos bidirecionais, onde a quantidade de fibras óticas a utilizar consiste num parâmetro calculado pelo modelo em função do tráfego.

Tabela 3.2 – Distância física entre os nós de rede, [12].

Nós de rede		Distância [km]
Berlin (B)	Hamburg (HH)	306
	Hannover (H)	298
	Leipzig (L)	174
Bremen (HB)	Hamburg (HH)	114
	Hannover (H)	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

3.3.1. 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 [12].

Tabela 3.3 – Parâmetros de tráfego IP com base no ano de 2004, [12].

Descrição	Valor
Volume de tráfego IP [Gbps]	1905,45
Tráfego médio por nó [Gbps]	224,17

Tabela 3.4 – Matriz de tráfego IP com base no ano de 2004, [12].

Tráfego IP em 2004 [Gbps]																	
	B	HB	Do	D	E	F	HH	H	Ka	K	L	Ma	M	No	N	S	UI
B		9,20	13,27	14,62	10,51	49,122	18,778	20,794	4,63	15,652	30,666	8,11	16,46	0	13,00	19,434	12,152
HB	9,196		5,694	6,274	4,51	21,546	8,06	8,926	1,988	6,718	13,162	3,482	7,066	0	5,58	8,342	5,216
Do	13,268	5,694		9,054	6,508	30,866	11,63	12,878	2,868	9,694	18,99	5,024	10,194	0	8,05	12,036	7,526
D	14,618	6,274	9,054		7,17	33,928	12,814	14,19	3,16	10,68	20,924	5,534	11,232	0	8,87	13,262	8,292
E	10,508	4,51	6,508	7,17		24,564	9,21	10,2	2,27	7,676	15,04	3,978	8,074	0	6,376	9,532	5,96
F	49,122	21,546	30,866	33,928	24,564		43,26	47,73	10,934	36,26	69,144	19,04	38,076	252	30,256	44,718	28,326
HH	18,778	8,06	11,63	12,814	9,21	43,26		18,226	4,058	13,72	26,878	7,11	14,428	0	11,394	17,034	10,652
H	20,794	8,926	12,878	14,19	10,2	47,73	18,226		4,494	15,192	29,764	7,872	15,976	0	12,618	18,864	11,794
Ka	4,63	1,988	2,868	3,16	2,27	10,934	4,058	4,494		3,382	6,626	1,754	3,556	0	2,81	4,2	2,626
K	15,652	6,718	9,694	10,68	7,676	36,26	13,72	15,192	3,382		22,404	5,926	12,026	0	9,498	14,198	8,878
L	30,666	13,162	18,99	20,924	15,04	69,144	26,878	29,764	6,626	22,404		11,608	23,56	0	18,606	27,818	17,394
Ma	8,11	3,482	5,024	5,534	3,978	19,04	7,11	7,872	1,754	5,926	11,608		6,232	0	4,922	7,358	4,6
M	16,46	7,066	10,194	11,232	8,074	38,076	14,428	15,976	3,556	12,026	23,56	6,232		0	9,988	14,932	9,336
No	0	0	0	0	0	252	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0
N	13,00	5,58	8,05	8,87	6,376	30,256	11,394	12,618	2,81	9,498	18,606	4,922	9,988	0		11,792	7,374
S	19,434	8,342	12,036	13,262	9,532	44,718	17,034	18,864	4,2	14,198	27,818	7,358	14,932	0	11,792		11,024
UI	12,152	5,216	7,526	8,292	5,96	28,326	10,652	11,794	2,626	8,878	17,394	4,6	9,336	0	7,374	11,024	

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 [41-42]. Tendo em conta o tráfego IP global e a região da Europa Ocidental, onde se engloba a Alemanha, a previsão de crescimento de tráfego de 2006 a 2012 foi estimada em [41], a previsão de 2012 a 2014 em [42] e a previsão de 2014 a 2019 em [1]. Uma vez que a matriz de tráfego utilizada como base no modelo é referente ao ano de 2004, e não existindo dados relativamente ao crescimento de tráfego no período de 2004 a 2006, considerou-se o crescimento médio entre os anos de 2006 a 2012 presente em [41].

A informação relativamente a previsão de crescimento de tráfego estimada, encontra-se sintetizada na tabela 3.5. Tendo como base o tráfego referente ao ano de 2004 aplicou-se de igual forma sobre todos os elementos da matriz de tráfego um fator multiplicativo referente ao crescimento em cada ano.

Tabela 3.5 – Previsão de crescimento de tráfego IP em Europa Ocidental, baseado em [1] e [41-42].

Ano	Crescimento ao ano [%]	Fator 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	9,29	
2010	53	14,17	
2011	39	19,7	
2012	42	27,97	17
2013	17	32,72	
2014	16	37,96	21
2015	17	44,41	
2016	20	53,29	
2017	21	64,48	
2018	22	78,67	
2019	23	96,76	

3.3.2. Consumo energético de equipamentos de rede

Os equipamentos de rede e respetivos consumos baseiam-se em valores de referência para o consumo energético bem como em valores retirados dos equipamentos *Cisco Systems, Inc*, com a exceção das interfaces de 400 Gbps e 1 Tbps que ainda não existem valores no mercado. Segundo a projeção efetuada pela *Ethernet Alliance's* em 2015 [9], a interface de 400 Gbps encontra-se em desenvolvimento e tem data prevista para 2017 e a interface de 1 Tbps em 2020.

Na camada WDM como mencionado anteriormente, secção 2.6.1, foram considerados amplificadores óticos, 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 3.6.

Tabela 3.6 – Componentes da camada WDM.

Equipamento	Consumo energético [W]	Nota	Referência
OLA (Optical Line Amplifier)	$E_e=110$	Por par de fibra, com alcance de 80 km	[43]
Optical Booster	$E_{bst} = 30$	Valor de referência, suporta 64 canais na banda C	[43]
Optical Pre-Amplifier	$E_{pre} = 30$		[43]
WXC (Wavelength Cross Connect)	$E_{wxc} = 25$	Por fibra, à saída do nó	[44]
WSS (Wavelength Selective Switch)	$E_{wss} = 60$	Por fibra, à saída do nó	[45]
MSC (Multicast Switch)	$E_{msc} = 40$	Por par de fibra, suporta 16 canais na banda C	[26]

Ao nível da camada IP considerou-se o consumo energético por parte dos portos dos *routers* IP com interface WDM de longo alcance, passível de ser utilizado diretamente sobre a camada WDM, cujas descrições de encontram na tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Componentes de *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	[46]
Interface Ethernet WDM 40 Gbps	$E_{cr}=150$	0,8	[47]
Interface Ethernet WDM 100 Gbps	$E_{cr}=180$	2	[48]
Interface Ethernet WDM 400 Gbps	$E_{cr}=300$	2	[49]
Interface Ethernet WDM 1 Tbps	$E_{cr}=500$	2	[49]

Na tabela 3.8 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 Gbps, 40 Gbps 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, 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 GHz e 500 GHz e para a modulação 16-QAM considerou-se uma largura de banda de 100 GHz e 250 GHz, respetivamente.

Tabela 3.8 – 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	[20]
40 Gbps	50	DP-QPSK	0,8	[20]
100 Gbps	50	DP-QPSK	2	[20]
	50	16-QAM	2	[23]
400 Gbps	200	DP-QPSK	2	[32]
	100	16-QAM	4	[32]
1 Tbps	500	DP-QPSK	2	[32]
	250	16-QAM	4	[32]

Para os restantes parâmetros de entrada do modelo considerou-se valores típicos para redes WDM, tabela 3.9. 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 óticos 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 3.9 – Parâmetros de simulação.

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

Capítulo 4

Resultados

Ao longo desta dissertação espera-se evidenciar a eficiência energética das redes IP sobre WDM. Comparando as redes *fixed-grid* atualmente existentes com as redes de nova geração *flex-grid*. Embora estas apenas consumam uma pequena percentagem energética do total da rede, esta percentagem tem vindo a aumentar com o aumento de tráfego. Outro motivo importante pela qual é necessário reduzir o consumo energético destas redes, é a elevada densidade energética existente nos poucos edifícios que as constituem, da qual advêm grandes custos operacionais (OPEX) para os operadores.

Assim pretende-se minimizar o consumo energético deste tipo de redes, com base no consumo dos seus componentes e novas tecnologias de transmissão ao invés do objetivo mais comum que consiste na minimização do atraso médio de pacotes ou do custo total da rede.

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

Testaram-se como apresentado no capítulo anterior, diferentes formas de encaminhamento com a topologia de uma rede da Alemã e irão avaliar-se qual das formas de encaminhamento é mais eficiente energeticamente e como varia o consumo energético com o aumento do tráfego.

Em termos de simulação, pretende-se demonstrar que é possível aumentar a eficiência energética das redes óticas de *core*, através da otimização dos seus recursos, bem como através da utilização de novas tecnologias de transmissão como é o caso do *flex-grid*, mesmo com o crescente aumento de tráfego como ilustrado na figura 4.1.

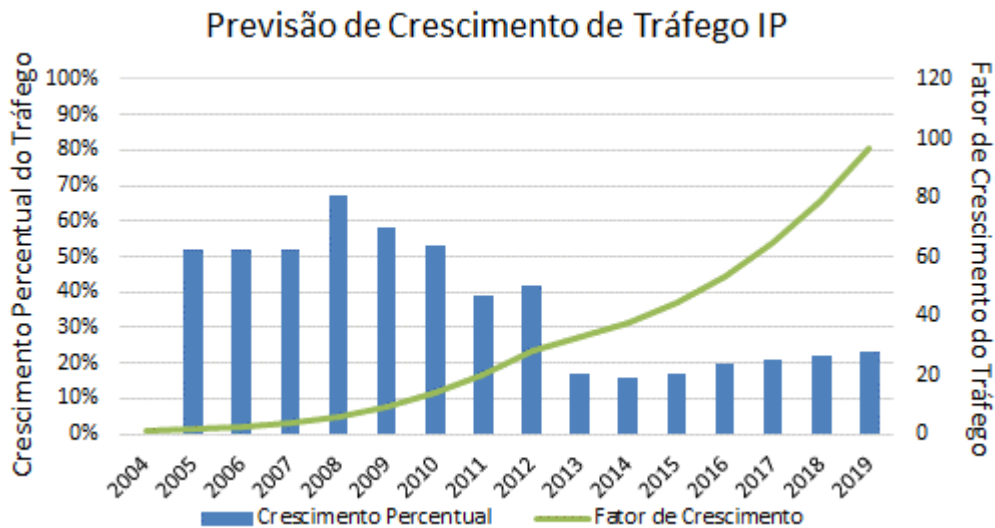


Figura 4.1 – Previsão de Crescimento de Tráfego IP com base na matriz de tráfego de 2004.

4.1. Resultados Modelos Fixed-grid

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

4.1.1. Modelo Fixed-grid – Menor consumo energético

Neste cenário de simulação como é possível verificar pelos resultados apresentados na figura 4.2 o modelo implementado resulta na utilização de interfaces de 100 Gbps apenas, pela maior capacidade, sendo que as interfaces de 10 Gbps e de 40 Gbps não são utilizadas neste cenário de rede. O uso de interfaces de 100 Gbps revela-se mais vantajoso dado que esta interface apresenta uma maior capacidade e eficiência espectral, comparado com as interfaces de 10 Gbps e 40 Gbps.

É de salientar que camada IP é responsável em média por cerca de 95.9% do consumo energético total da rede e apenas cerca 4.1% do consumo diz respeito a camada WDM. Verifica-se que o consumo na camada IP vai aumentando gradualmente o longo dos anos, sendo que são necessárias mais interfaces IP à medida que o tráfego na rede vai aumentando. Na camada WDM o consumo energético também aumenta ao longo dos anos, no entanto de forma menos abrupta através do aumento do número fibras óticas necessárias para transportar o tráfego da rede e/ou número de direções de transmissão.

É possível verificar que o consumo energético neste cenário de rede aumentou 538.3% desde o ano de 2010 até ao ano de 2019 sendo a causa para este aumento de consumo energético o aumento do volume de tráfego.

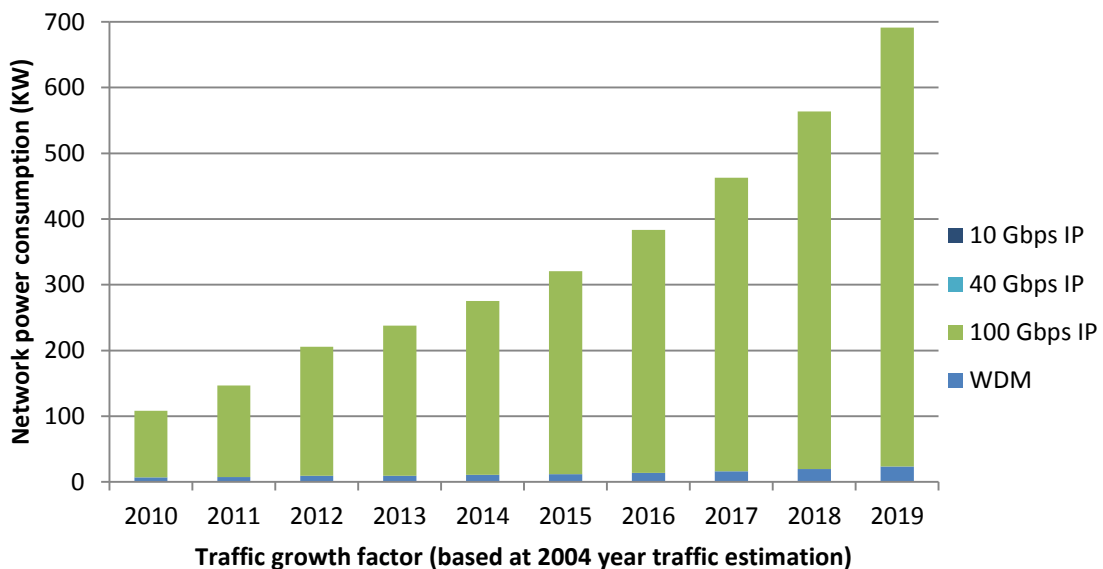


Figura 4.2 – Consumo energético do modelo *fixed-grid*, considerando menor consumo energético.

4.1.2. Modelo Fixed-grid – Menor consumo energético e caminho mais curto

Com base nos resultados de simulação apresentados na figura 4.3 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 10 Gbps e de 40 Gbps já não são viáveis para transportar o tráfego da rede, a utilização das mesmas interfaces traduzir-se-ia num aumento do consumo uma vez que seria necessário um maior número de interfaces IP, levando o modelo a utilizar maioritariamente interfaces de 100 Gbps.

Neste modelo em média 94.8% do consumo total da rede é devido à camada IP e apenas 5.2% à camada WDM. Aqui, o consumo por parte da camada WDM é um pouco superior face ao

modelo *fixed-grid* tendo em conta técnicas de encaminhamento com base no menor consumo, apresentado na secção 4.1.1, isto porque este modelo também tem em consideração o caminho mais curto e assim por vezes é necessário introduzir mais fibras óticas para transportar o mesmo volume tráfego pelo caminho mais curto.

O consumo energético neste cenário de rede prevê um aumento 512.1% desde o ano de 2010 até ao ano de 2019 sendo a causa para este aumento de consumo energético o aumento do volume de tráfego.

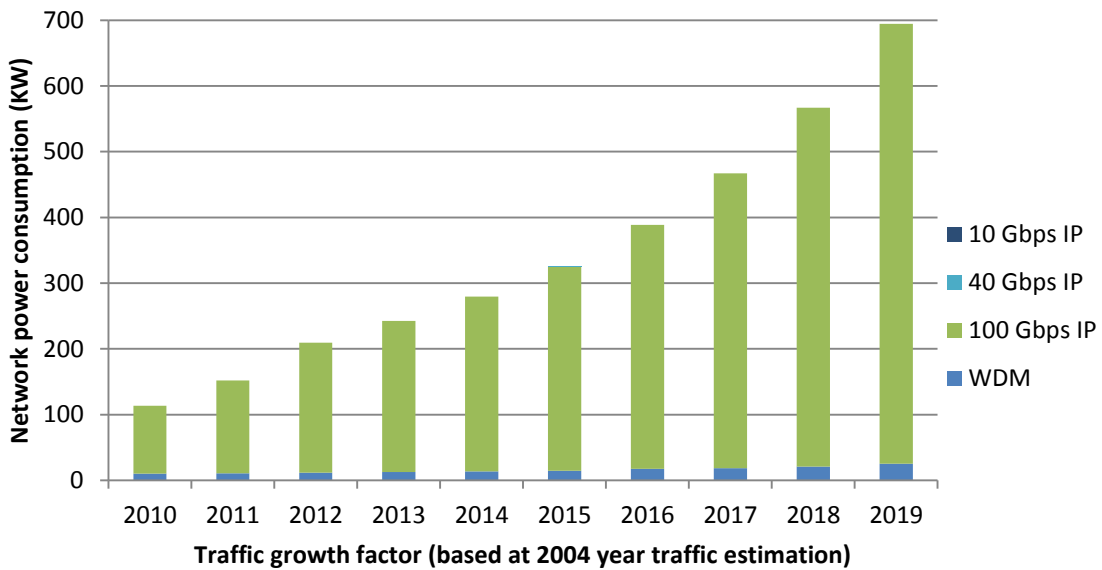


Figura 4.3 – Consumo energético do modelo *fixed-grid*, considerando menor consumo energético e caminho mais curto.

4.2. Resultados Modelos Flex-grid

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

4.2.1. Modelo Flex-grid com modulação DP-QPSK – Menor consumo energético

É de salientar que o consumo percentual da camada IP baixou em média 8% face ao modelo *fixed-grid* com a mesma técnica de encaminhamento, menor consumo energético, sendo agora a camada IP responsável por 88.1% do consumo total da rede e a camada WDM responsável por 11.9%, como apresentado na figura 4.4. Isto deve-se ao facto de as interfaces utilizadas nas redes *flex-grid* possuírem uma maior capacidade e também uma maior eficiência energética 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 o consumo geral da rede. Quanto ao aumento percentual do consumo 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 óticas necessárias para transportar o tráfego da rede e/ou número de direções de transmissão. Assim, com o aumento do volume de tráfego ao longo dos anos, aumenta o número de canais e fibras óticas necessários 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 consumo energético neste cenário de rede prevê um aumento de 458.5% desde o ano de 2010 até ao ano de 2019, sendo a causa para este aumento de consumo energético o aumento do volume de tráfego.

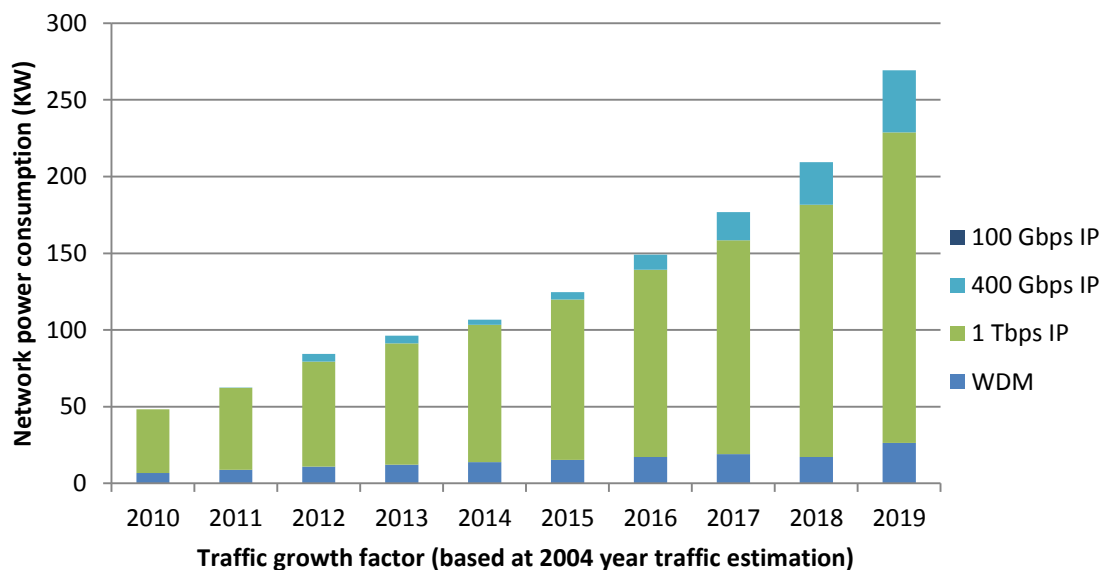


Figura 4.4 – Consumo energético do modelo *flex-grid* com modulação DP-QPSK, considerando menor consumo energético.

4.2.2. Modelo Flex-grid com modulação 16-QAM – Menor consumo energético

Neste modelo a camada IP é responsável por 91.7% do consumo total da rede e a camada WDM responsável por 8.3%, como apresentado na figura 4.5. 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 óticas necessárias entre nós para o transporte de tráfego.

O consumo energético neste cenário de rede prevê um aumento de 398.4% desde o ano de 2010 até ao ano de 2019 sendo a causa para este aumento de consumo energético o aumento do volume de tráfego. No entanto verifica-se que para o mesmo modelo, menor consumo energético, com modulação DP-QPSK o aumento foi de 458.5%, o que demonstra que a médio-longo prazo os modelo *flex-grid* com modulação 16-QAM se torna mais eficiente energeticamente. No entanto esta modulação apresenta limitações adicionais, tal como um menor alcance dos canais óticos, o que pode limitar a sua implementação em redes de longo alcance.

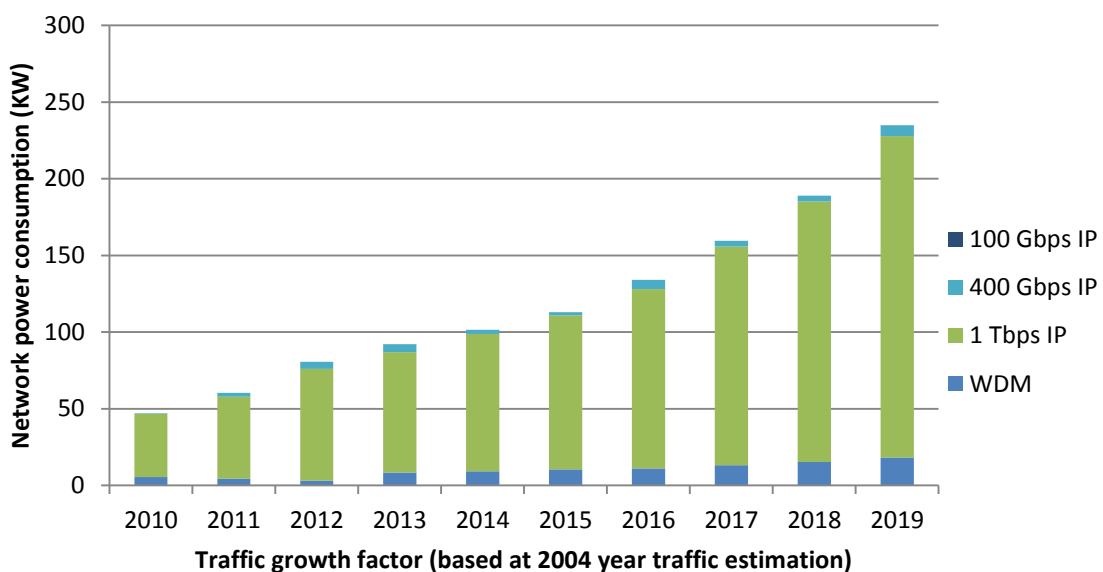


Figura 4.5 – Consumo energético do modelo *flex-grid* com modulação 16-QAM, considerando menor consumo energético.

4.2.3. Modelo Flex-grid com modulação DP-QPSK – Menor consumo energético e caminho mais curto

Tendo por base os resultados de simulação apresentados na figura 4.6 face ao modelo *flex-grid* apresentado na secção 4.2.1, verificou-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 *fixed-grid* com encaminhamento segundo o menor consumo. 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 em média 87.4% do consumo total da rede é devido à camada IP e apenas 12.6% à camada WDM. Aqui, o consumo energético total da rede aumentou 412.4% desde o ano de 2010 até ao ano de 2019, sendo a causa para este aumento de consumo energético 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 óticos.

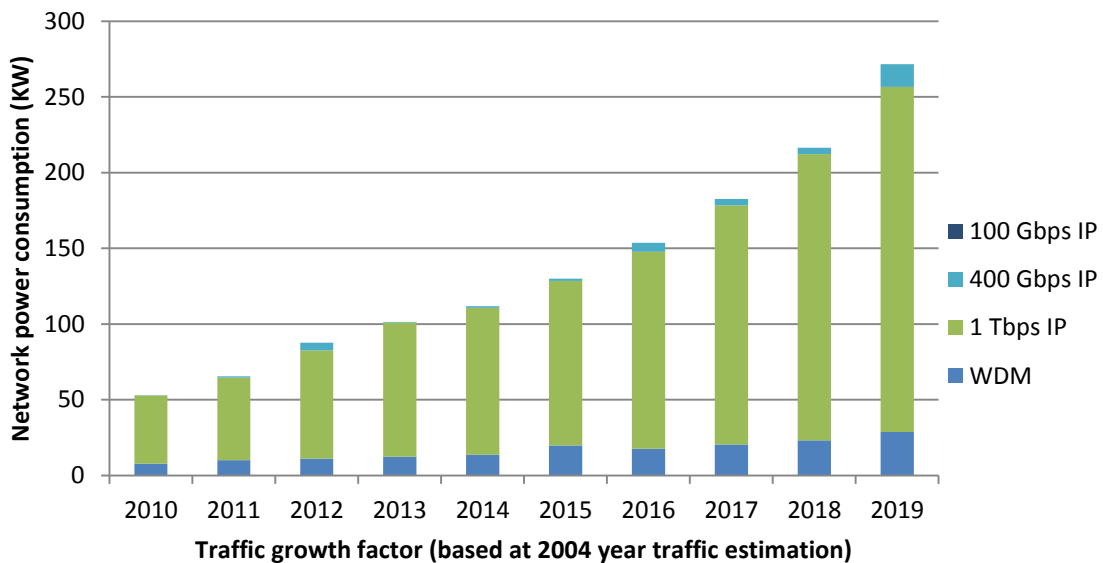


Figura 4.6 – Consumo energético do modelo *flex-grid* com modulação DP-QPSK, considerando menor consumo energético e caminho mais curto.

4.2.4. Modelo Flex-grid com modulação 16-QAM – Menor consumo energético e caminho mais curto

Neste modelo a camada IP é responsável por 89.9% do consumo total da rede e a camada WDM responsável por 10.1%, como apresentado na figura 4.7. Verificou-se que o consumo na camada

WDM diminuiu em percentagem uma média de 2%, isto porque como com a modulação 16-QAM, tal como foi verificado para os modelos com técnicas de encaminhamento segundo o menor consumo, os canais têm uma menor largura espectral reduzindo assim o número de fibras óticas necessárias entre nós para transporte do tráfego e consequentemente o número de MCS e WSS necessários.

O consumo energético neste cenário de rede aumentou 389.6% desde o ano de 2010 até ao ano de 2019 sendo a causa para este aumento de consumo energético o aumento do volume de tráfego. É também possível verificar que para o mesmo modelo, menor caminho e menor consumo energético, com modulação DP-QPSK o aumento foi de 412.4%, o que demonstra novamente que a longo prazo os modelo *flex-grid* com modulação 16-QAM tornam-se mais energeticamente eficiente. No entanto como já foi mencionado é sempre necessário ter em atenção a distância da ligação neste tipo de modulação, que pode inviabilizar a utilização da mesma.

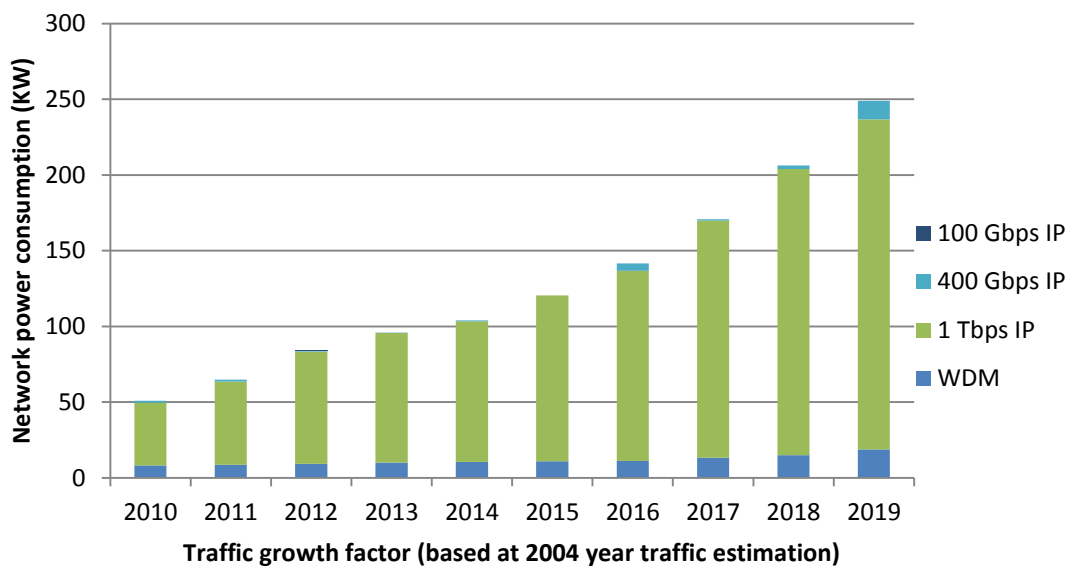


Figura 4.7 – Consumo energético do modelo *flex-grid* com modulação 16-QAM, considerando menor consumo energético e caminho mais curto.

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.

Inicialmente será avaliado o desempenho das redes os resultados das redes *fixed-grid* e comparado com as redes *flex-grid* com modulação DP-QPSK por utilizarem o mesmo formato de modulação. Posteriormente será avaliado o impacto da modulação utilizada nas redes *flex-grid*. No final será analisada a eficiência energética de todos os modelos.

4.3.1. Consumo total de Potência

A figura 4.8 apresenta o consumo energético por parte das redes IP sobre WDM *fixed-grid* e *flex-grid* com modulação DP-QPSK, tanto para o encaminhamento de menor consumo bem como o menor consumo com o caminho mais curto. Como espectável verificou-se um menor consumo por parte das redes *flex-grid* face às redes *fixed-grid*. É visível que para o ano de 2010 quando o volume de tráfego é menor a diferença entre o consumo total energético entre as redes *flex-grid* e *fixed-grid* é menor. Tendo-se assim inicialmente uma diferença de menos 53.4% do consumo em redes *flex-grid* para o encaminhamento com base no menor consumo e uma diferença de menos 53.2% para o encaminhamento com base no caminho mais curto e menor consumo energético. No entanto, à medida que os anos passam a diferença em termos de consumo tende a aumentar. Conseguindo-se no ano de 2019 uma redução energética de 61% com as redes *flex-grid* face às redes *fixed-grid* para o encaminhamento de menor consumo e uma redução de 60,9% para as redes para o encaminhamento com menor caminho e menor consumo. Isto porque com como os modelos são MLR utilizam a interface de transmissão mais eficiente em cada cenário e como nas redes *flex-grid* existe a possibilidade de utilização de interfaces de 1 Tbps, o número de interfaces utilizadas reduz consideravelmente o que se traduz no total consumo energético.

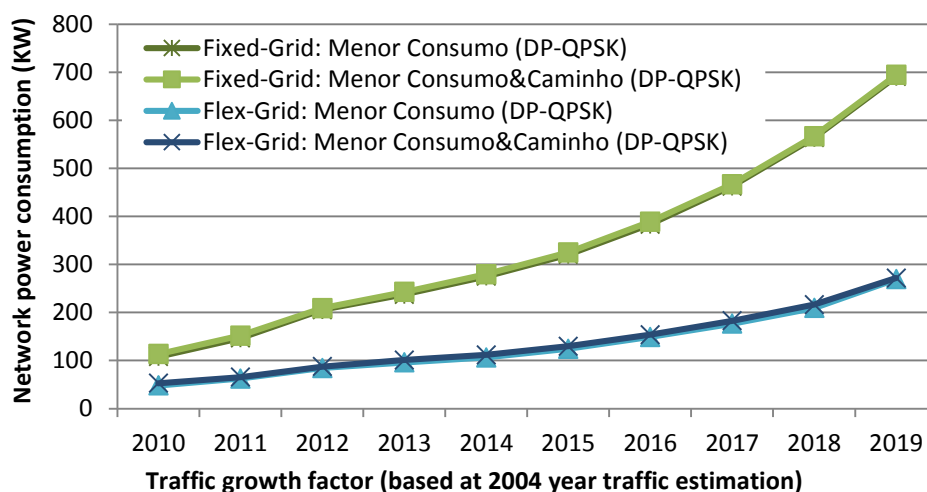


Figura 4.8 – Consumo total energético da rede MLR IP sobre WDM *fixed-grid* e *flex-grid* com modulação DP-QPSK.

De modo a analisar o impacto do tipo de modulação utilizada nas redes *flex-grid* a figura 4.9. apresenta o consumo energético das redes *flex-grid* com modulação DP-QPSK e 16-QAM, para o encaminhamento segundo o menor consumo energético, bem como caminho mais curto e menor consumo energético. É visível que os modelos com modulação 16-QAM apresentam sempre menores consumos energéticos 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 conseqüentemente mais MCS e WSS que os modelos 16-QAM aumentando conseqüentemente o consumo total da rede.

Inicialmente para o ano de 2010 o consumo energético geral da rede em cenários *flex-grid* com modulação 16-QAM é 2.3% inferior ao consumo para o mesmo modelo com modulação DP-QPSK e para o encaminhamento com base no caminho mais curto e menor consumo energético de 4%. À medida que os anos passam essa diferença em termos de consumo tende a aumentar. Conseguindo-se no ano de 2019 uma redução energética de 12.8% utilizando modulação 16-QAM face à modulação DP-QPSK para o encaminhamento segundo o menor consumo e uma redução de 8.3% para as redes com para o encaminhamento com menor caminho e menor consumo. Verificando-se assim que o modelo *flex-grid* com modulação 16-QAM e técnicas de encaminhamento segundo o menor consumo energético é o modelo energeticamente mais eficiente.

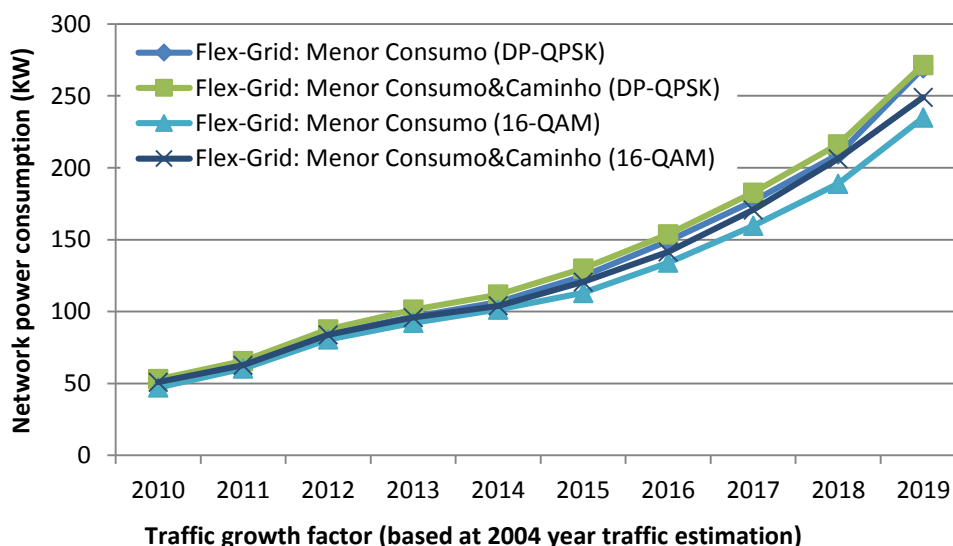


Figura 4.9 – Consumo total energético da rede IP sobre WDM *flex-grid* com modulação DP-QPSK e 16-QAM.

De forma a avaliar-se o modo como o aumento do volume de tráfego IP influencia o consumo energético global da rede é apresentado na figura 4.10 a evolução percentual do consumo total da rede para todos os modelos, bem como a evolução percentual do tráfego IP (linha amarela). O aumento percentual do consumo energético e do volume de tráfego foi calculado com base nos resultados obtidos no primeiro ano de simulação, ano de 2010.

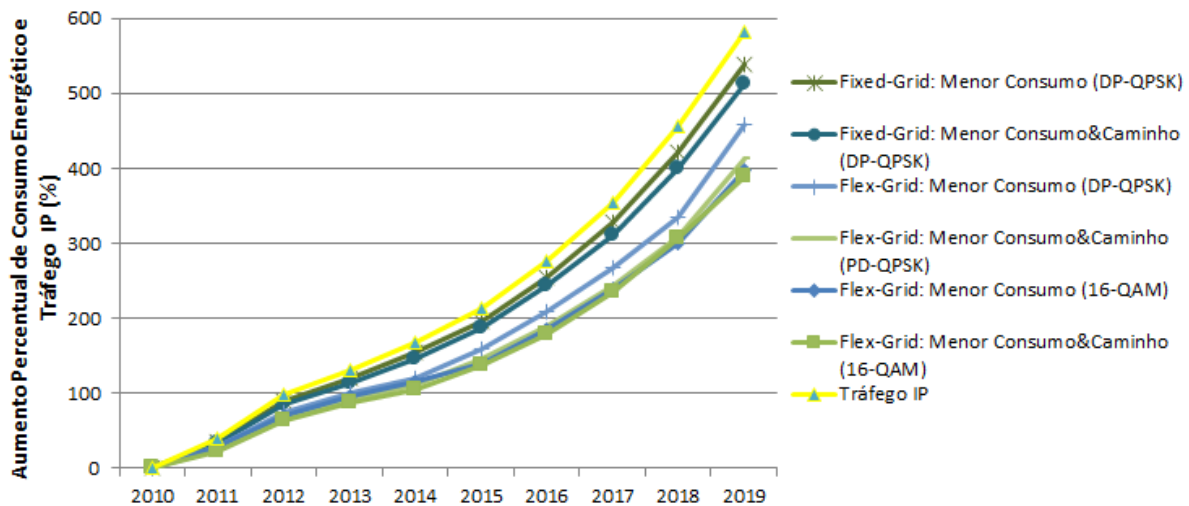


Figura 4.10 – Aumento percentual do consumo energético em redes *fixed-grid* e *flex-grid* e volume de tráfego IP.

Na figura 4.10 é visível que o aumento do consumo energético está diretamente relacionado com o aumento do volume de tráfego ao longo dos anos, sendo que os modelos *fixed-grid* apresentam um andamento do aumento percentual muito semelhante ao aumento percentual do volume de tráfego. Já nos modelos *flex-grid* o aumento percentual do consumo energético apresenta um declive menos acentuado e tende a distanciar-se do aumento do volume de tráfego ao longo dos anos, principalmente quando utilizada modulação 16-QAM nos canais óticos. Assim desde o ano de 2010 até ao ano de 2019 o volume de tráfego aumentou em 582%, os consumos energéticos associados as redes *fixed-grid* aumentou em 538.3% para o encaminhamento segundo o menor consumo e 512.1% para o encaminhamento segundo o caminho mais curto e menor consumo. Nas redes *flex-grid* para modulação de canal ótico com DP-QSPK o aumento é de 458.5% para o encaminhamento segundo o menor consumo e de 412.4% para o encaminhamento segundo o caminho mais curto e menor consumo. Já nas redes *flex-grid* para modulação de canal ótico com 16-QAM o aumento face ao ano de 2010 é de 398.4% para encaminhamento segundo o menor consumo e de 389.4% para o encaminhamento segundo o caminho mais curto e menor consumo.

Concluindo-se assim que com o previsto crescente aumento do volume de tráfego para os próximos anos as redes *flex-grid* serão uma opção energeticamente mais eficiente que as redes *fixed-grid*.

4.3.2. Eficiência Energética

De acordo com o objetivo desta dissertação, que consiste em avaliar o desempenho de redes *fixed-grid* e *flex-grid*, estimou-se a eficiência energética para os diferentes modelos, figura 4.11. A eficiência energética foi calculada com base no volume total de tráfego acomodado pela rede ao longo dos anos, dividido pelo consumo energético da rede para os anos correspondentes. Assim, a métrica define o quão eficiente é cada unidade de potência de modo a transportar o tráfego.

A figura 4.11, mostra claramente uma maior eficiência energética por parte dos modelos *flex-grid* comparando com os modelos *fixed-grid*, isto porque com a introdução de redes *flex-grid* o número de interfaces IP é inferior devido à introdução de interfaces de 400Gbps e 1Tbps que conseguem acomodar maior volume de tráfego, conseguindo assim baixar-se o consumo de forma considerável na camada IP uma vez que as mesmas interfaces possui uma eficiência espectral superior.

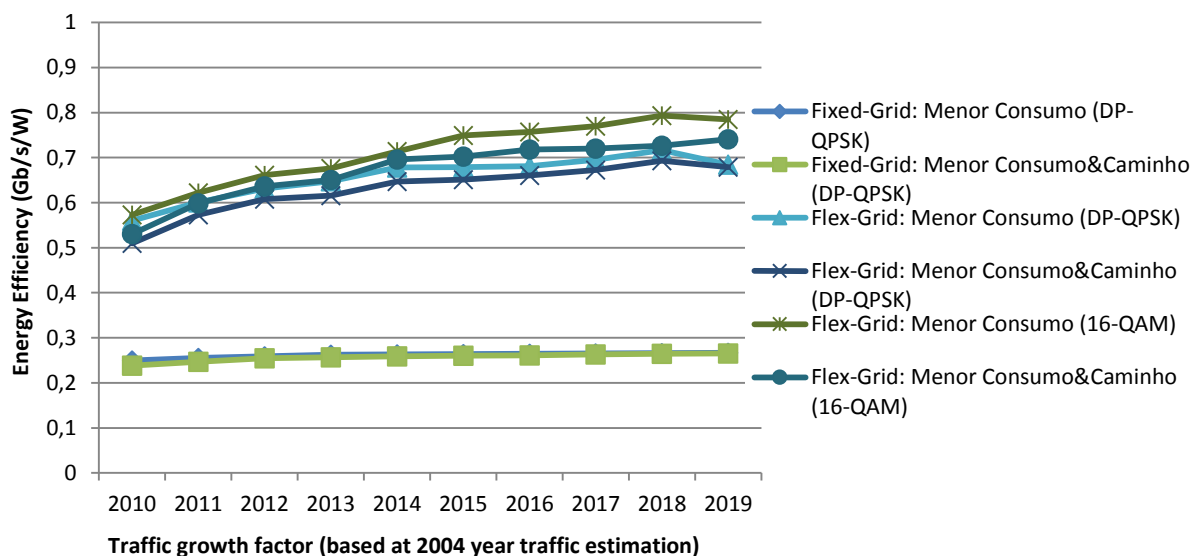


Figura 4.11 – Eficiência energética da rede MLR IP sobre WDM *fixed-grid* e *flex-grid*.

4.4. Tempo de Simulação

Ao longo desta dissertação foram encontrados alguns obstáculos que limitaram de certa forma os resultados obtidos, o mais relevante deve-se à elevada complexidade dos modelos considerados, principalmente os modelos *flex-grid*. Devido à elevada quantidade de variáveis e maior possibilidade de encaminhamento, leva a que seja necessário adicionar maior número de restrições o que torna 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.

Esta foi também a razão pela qual não se considerou a restrição de continuidade do espectro no caminho ótico ao longo do percurso, porque acrescia complexidade ao modelo e este não corria por falta de memória da máquina de simulação, no entanto como referido na secção 2.4.2 a forma como é atribuído o espectro não afeta o desempenho de transmissão

Capítulo 5

Considerações Finais

5.1. Conclusões

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

A convergência dos serviços de telecomunicações para tecnologias de transmissão baseada em comutação de pacotes, como é o caso do protocolo de internet, leva a que se torne cada vez mais importante aumentar a eficiência dos equipamentos usados nas redes de transmissão IP. Para além da eficiência dos próprios equipamentos, existem ainda outras possibilidades para a redução do consumo total da rede, nomeadamente o uso de diferentes arquiteturas de redes, como a introdução de redes *flex-grid*. É necessário também 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 o estudo no âmbito desta dissertação, mais especificamente em redes *fixed-grid* e *flex-grid* de transporte IP sobre WDM.

O estudo foi efetuado tendo por base a topologia de uma rede da Alemanha com 17 nós. Para analisar a evolução do consumo energético desde o ano de 2010 até ao ano de 2019, efetuou-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 resultados apresentados tiveram por base modelos MILP. Considerou-se dois modelos de rede MLR IP sobre WDM com *bypass* ótico, para arquiteturas de rede *fixed-grid* e *flex-grid* respetivamente. 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 objetivos:

- Minimização do consumo total da rede;
- Minimização do consumo total da rede considerando o caminho mais curto.

Das simulações realizadas verificou-se que o maior responsável pelo consumo total da rede nas redes *core* IP sobre WDM é a camada IP, sendo que é nesta camada que se poderá investir de modo a tornar a rede energeticamente mais eficiente.

Nos dois modelos *fixed-grid* verificou-se uma forte necessidade de aumentar a capacidade das interfaces IP de modo a dar vazão aos requisitos de tráfego, uma vez que apenas foram utilizadas interfaces de 100 Gbps por constituírem as interfaces com maior capacidade nestas redes. As redes *flex-grid* surgem assim para tentar colmatar as necessidades intentes às redes *fixed-grid*, com objetivo de permitir o aumento da capacidade das interfaces IP de forma espectral e energeticamente eficiente.

Nos modelos *flex-grid*, tal como esperado, devido a necessidade de aumento da capacidade das interfaces IP utilizaram-se maioritariamente interfaces de 1 Tbps. Sendo que as interfaces de 100 Gbps que traduziam a máxima capacidade das interfaces IP em redes *fixed-grid* já não são utilizadas. Comprovando assim a verdadeira necessidade das redes *flex-grid* em redes IP sobre WDM de modo a suportar o volume de tráfego das redes atuais e de futuro de forma espectral e energeticamente eficiente.

Relativamente aos consumos energéticos verificou-se que os modelos com encaminhamento segundo o menor consumo apresentam sempre consumos energéticos mais baixos que os modelos segundo o caminho mais curto com menor consumo energético.

Comparando os modelos *flex-grid* com os modelos *fixed-grid* com modulação DP-QPSK foi possível verificar uma redução do consumo energético para o ano de 2019 de 61% para o encaminhamento segundo o menor consumo e de 60% para o encaminhamento segundo o caminho mais curto com menor consumo energético. Esta redução no consumo deve-se essencialmente à possibilidade de existência de canais de transmissão com maior capacidade nas redes *flex-grid*, diminuindo o número de interfaces necessárias.

Verificou-se que a utilização da modulação 16-QAM nas redes *flex-grid* é mais eficiente, reduzindo-se o consumo da rede no ano de 2019 em 12.8% para o encaminhamento segundo o menor consumo e 8.3% para o encaminhamento segundo o caminho mais curto com menor consumo energético.

Concluindo-se que as redes MLR IP sobre WDM *flex-grid* possibilitam uma maior flexibilidade da atribuição de espectro, que se traduz numa maior eficiência espectral e consequentemente numa redução do consumo energético da rede. Assim estas redes conseguem acomodar volumes de tráfego elevados de forma energeticamente mais eficiente, conseguindo reduzir o OPEX da total da rede e consequentemente as emissões de CO₂.

5.2. Trabalho futuro

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

Por forma a se poder evoluir neste tema utilizando redes de maior dimensão, arquitetura de rede mais complexas e até mesmo obter o resultado ótimo 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.

Nesta dissertação os modelos desenvolvidos para as redes *flex-grid* consideraram dois tipos de modulação, DP-QPSK e 16-QAM, sendo que se estipulou a largura de banda associada a cada canal com um valor fixo. É sabido que 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 decidir qual a modulação a utilizar e consequente 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] Cisco and/or its affiliates, White Paper: “Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2014–2019”, USA, Maio 2015.
- [2] Cisco and/or its affiliates, White Paper: “The Zettabyte Era: Trends and Analysis”, USA, Maio 2015.
- [3] R. Ramaswami e K. N. Sivarajan, “Optical Networks – A Practical Perspective”, Second Edition, Morgan Kaufmann Publishers, USA, 2012.
- [4] A. Pattavina, F. Musumeci, J. L. Vizcaino e Y. Ye, “Energy Efficient Resilient Optical Transport Networks”, TREND Meeting, Bruxelas, Outubro 2013.
- [5] M. Gupta e S. Singh, “Greening of the Internet”, Portland: Portland State University, SIGCOMM, 2003.
- [6] Y. Zhang et al., “Energy Efficiency in Telecom Optical Networks”, IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 12, issue 4, 2010.
- [7] X. Dong et al., “IP Over WDM Networks Employing Renewable Energy Sources”, Journal of Lightwave Technology, vol. 29, issue 1, 2010.
- [8] P. Wright, A. Lord e L. Velasco, “The Network Capacity Benefits of Flexgrid”, ONDM 2013 Brest, França, 2013.
- [9] Ethernet Alliance, “2015 Ethernet Roadmap”, Ethernet Alliance, 2015.
- [10] P. Soumplis, P. Papanikolaou, K. Christodoulopoulos, G. Papadimitriou e E. Varvarigos, “Energy Minimization Design of Fixed- and Flex-Grid Optical Networks”, IEEE 19th International Workshop, CAMAD, 2014.
- [11] P. Papanikolaou, P. Soumplis, K. Manousakis, G. Papadimitriou, G. Ellinas, K. Christodoulopoulos e E. Varvarigos, “Minimizing Energy and Cost in Fixed-grid and Flex-Grid Networks”, Journal Optical Communication Network, Vol. 7, No. 4, Abril 2011.
- [12] A. Betker, C. Gerlach, R. Hülsermann, M. Jäger, M. Barry, S. Bodamer, J. Späth, C. Gauger, e M. Köhn, “Reference Transport Network Scenarios”, Multi Tera Net Report, July 2003.

- [13] R. Hülsermann, S. Bodamer, M. Barry, A. Betker, C. Gauger, M. Jäger, M. Köhn e J. Späth, “A Set of Typical Transport Network Scenarios for Network Modelling” ITG-Fachtagung Photonische Netze 2004, Leipzig.
- [14] Visual Networking Index (VNI), [Online].Available: <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/service-provider/visual-networking-index-vni/index.html>. [Acedido em 25 maio 2015]
- [15] International Telecommunication Union, “Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers”, Recommendation ITU-T G692, ITU, 1999.
- [16] R. Ramaswami, K. N. Sivarajan, e G. H. Sasaki, “Optical Networks, a practical perspective”, 3^a ed., USA: Elsevier, 2010.
- [17] R. Kashyap e M. L. Rocha, “On the group delay characteristics of chirped fibre gratings”, Optics Communications, n. 153, 1998.
- [18] M. L. Rocha e R. Kashyap, “Repeatability in the characterization of chirped Bragg gratings”, Proceedings of Optical Fibers Measurements Conference 1998 (OFMC’1998).
- [19] A. Castro, L. Velasco, J. Comellas e G. Junyent, “Dynamic Restoration in Multi-layer IP/MPLS-over-Flexgrid Networks”, IEEE, Design of Reliable Communication Networks (DRCN), 2013.
- [20] International Telecommunication Union, “Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid”, Recommendation ITU-T G694.1, ITU, 2012.
- [21] Wiley Publishing, Inc., “CCNA: Cisco Certified Network Associate”, 6th Edition, Novembro 2007.
- [22] Cisco and/or its affiliates, “The Internet Protocol Journal”, vol.9, nº3, Setembro 2006.
- [23] Fujitsu Network Communications Inc., “Path to 400G”, 2013.
- [24] Mukherjee, B, “Optical WDM Networks”, USA: Springer, Heidelberg, 2006.
- [25] Cisco Systems, Inc., “Cost Comparison Between IP-over-DWDM and Other Core Transport Architectures”, USA, Janeiro 2007.
- [26] Cisco Systems, Inc, Data Sheet: “Cisco NCS 2000 Contentionless Add/Drop Line Cards”, USA, Maio 2015.
- [27] G. Bosco, V. Curri, A. Carena, P. Poggiolini e F. Forghieri, “On the Performance of Nyquist-WDM Terabit Superchannels Based on PM-BPSK, PM-QPSK, PM-8QAM or

- PM-16QAM Subcarriers”, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 29, No. 1, Janeiro 2011.
- [28] A. Mitra, A. Lord, S. Kar e P. Wright, “Effect of link margin and frequency granularity on the performance of a flexgrid optical network”, *Optics Express* 46, Vol. 22, No. 1, Janeiro 2014.
- [29] C. Colombo e S. Morganti, “Reconfigurable DP-16QAM/QPSK Transponders for the Transmission of Coherent 200G Carriers in a Flexgrid Super-Channel Arrangement”, 19th European Conference on Networks and Optical Communications (NOC), IEEE, Milão, Junho 2014.
- [30] K. D. R. Assis, R. C. Almeida e A.V.T. Cartaxo, “Flexgrid Optical Networks Design under Multiple Modulation Formats”, 2014 International Telecommunications Symposium, Agosto 2014.
- [31] H. Takara, K. Yonenaga e M. Jinno, “Spectrally-efficient Elastic Optical Path Networks Toward 1 Tbps Era”, *OFC/NFOEC Technical Digest*, 2012.
- [32] A. Autenrieth, J.-P. Elbers, M. Eiselt, K. Grobe, B. Teipen e H. Griebner, “Evaluation of Technology Options for Software-Defined Transceivers in Fixed WDM Grid versus Flexible WDM Grid Optical Transport Networks”, *Photonische Netze* 06, May 2013.
- [33] E. Palkopoulou, M. Angelou, D. Klonidis, K. Christodoulopoulos, A. Klekamp, F. Buchali, E. Varvarigos, I. Tomkos, “Quantifying Spectrum, Cost, and Energy Efficiency in Fixed-Grid and Flex-Grid Networks”, *Journal Optical Communication Network (JCON)*, Vol. 4, No. 11, November 2012.
- [34] L. Velasco, M. Klinkowski, M. Ruiz e J. Comellas, “Modeling the routing and spectrum allocation problem for flexgrid optical networks”, *Photon Netw Commun*, 2012.
- [35] L. Zong, G. N. Liu, A. Lord, Y. R. Zhou e T. Ma, “40/100/400 Gb/s Mixed Line Rate Transmission Performance in Flexgrid Optical Networks”, *OFC/NFOEC Technical Digest*, 2013.
- [36] G. Shen e R. S. Tucker, “Energy-Minimized Design for IP Over WDM Networks”, *Optical Society of America, Journal Optical Communication Network (JCON)*, Vol. 1, 2009.
- [37] M. Henriques, P. Pinho e A. Teixeira, “Energy-Aware routing and grooming for IP transport over WDM MLR networks”, *IEEE*, Novembro 2014.

- [38] A. N. Patel, P. N. Ji, J.P. Jue e T. Wang, “Routing, wavelength assignment, and spectrum allocation algorithms in transparent flexible optical WDM networks”, *Optical Switching and Networking* 9, 2012.
- [39] David M. Gay, “IBM ILOG CPLEX Optimization Studio CPLEX User’s Manual”, IBM, 2013.
- [40] A. Udalcovs, P. Monti, V. Bobrovs, R. Schatz, L. Wosinska e G. Ivanovs, “Spectral and Energy Efficiency Considerations in Mixed-Line Rate WDM Networks with Signal Quality Guarantee”, *ICTON*, 2013.
- [41] Cisco Systems Inc, White Paper: “Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2007– 2012”, USA, Junho 2008.
- [42] Cisco and/or its affiliates, White Paper: “Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2012–2017”, USA, Maio 2013.
- [43] Cisco Systems, Inc, Data Sheet: “Optical Amplifier Cards for the Cisco ONS 15454 Multiservice Transport Platform”, USA, Janeiro 2007.
- [44] Cisco Systems, Inc, Data Sheet: “40-Channel Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexing Portfolio for the Cisco ONS 15454 Multiservice Transport Platform”, USA, Fevereiro 2007.
- [45] Cisco Systems, Inc, Data Sheet: “Cisco NCS 2000 Flex Spectrum Single Module ROADM Line Cards”, USA, Julho 2015.
- [46] Cisco Systems, Inc, Data Sheet: “Cisco CRS 4-Port 10GE Tunable WDMPHY Interface Module”, USA, Novembro 2010.
- [47] Cisco Systems, Inc, Data Sheet: “Cisco CRS 1-Port OC-768C/STM-256C DPSK+Tunable WDMPOS Interface Module”, USA, Novembro 2010.
- [48] Cisco Systems, Inc, Data Sheet: “Cisco CRS 1-Port 100 Gigabit Ethernet Coherent DWDM Interface Module”, USA, Dezembro 2012.
- [49] W. V. Heddeghem, F. Idzikowski, W. Vereecken, D. Colle, M. Pickavet e P. Demeester, “Power consumption modeling in optical multilayer networks”, *Photonic Network Communications*, January 2012.