

Algoritmo de Otimização da Camada Ótica Intercambiável para Redes em Malha

Tiago Pires Lameiras

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientadores:

Professor Paulo Sérgio de Brito André

Engenheiro Bruno Jorge Ramos Pereira

Júri

Presidente: Professor José Eduardo Charters Ribeiro da Cunha Sanguino

Orientador: Professor Paulo Sérgio de Brito André

Vogal: Professora Maria do Carmo Raposo de Medeiros

Novembro 2018

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa

AGRADECIMENTOS

A realização da presente dissertação apenas foi possível graças à intervenção e apoio de diversas pessoas, às quais gostaria de expressar o meu mais sincero agradecimento.

Aos meus orientadores, Professor Paulo André e ao Engenheiro Bruno Pereira, pela oportunidade concedida tanto a nível pessoal como a nível académico, por todo o apoio, incentivo, disponibilidade e troca de ideias, que contribuíram não só para o desenvolvimento da presente dissertação, mas também para minha formação profissional enquanto futuro engenheiro.

Aos meus colegas de trabalho na Coriant Portugal, Unipessoal, Lda., em especial ao Marco Mussolin e ao Mladen Milev por todo o apoio, incentivo e contributo dado durante o desenvolvimento desta dissertação.

À minha família, em especial aos meus pais, pelo exemplo que são, pelo seu apoio incondicional, incentivo, carinho, paciência e ajuda, que possibilitaram a superação de todos os obstáculos que foram surgindo ao longo deste percurso.

À Catarina, por tudo. Pela presença constante, amor e amizade nos últimos anos, pelas palavras encorajadoras e pelo contributo fundamental na minha formação pessoal e académica.

Aos meus amigos e colegas de faculdade, Artur, Diogo, Eduardo, João e Nuno, pela paciência, amizade e contributo para o meu sucesso académico e para a realização da presente dissertação.

Aos meus amigos, Bárbara, Catarina, Duarte e João, por toda a amizade e apoio.

Por fim, ao Instituto de Telecomunicações e à Coriant Portugal, Unipessoal, Lda. por terem proporcionado as melhores condições para a realização da presente dissertação.

RESUMO

O crescente aumento de requisitos de tráfego que se tem registado nas redes óticas nestes últimos anos, associado aos novos serviços e aplicações e aos mais recentes hábitos de partilha de vídeo, têm originado uma procura de soluções mais eficientes do ponto de vista energético e económico.

Nesta dissertação apresenta-se como solução o conceito da desagregação da camada ótica. Deste modo, utilizando pequenos elementos óticos intercambiáveis é possível personalizar a rede conforme as necessidades dos operadores de rede, evitando que se pague por funcionalidades indesejáveis ou desnecessárias. Nessa solução são utilizadas estruturas de adição/remoção fixas, que apesar de dificultarem a tarefa de planeamento, são economicamente mais viáveis.

Para suprimir o problema do planeamento, foi proposto um conjunto de algoritmos de roteamento e atribuição de comprimentos de onda, adaptados às características e limitações introduzidas pelos componentes fixos utilizados. Da mesma forma, foi desenvolvido um algoritmo que permite escolher as configurações adequadas para cada direção do nó, tendo em vista a otimização da rede. Estes métodos foram integrados numa ferramenta de planeamento, inteiramente desenvolvida durante esta investigação, e testados em diferentes tipos de redes.

Neste sentido, foram analisadas redes em cadeia e em anel, segundo o método de Monte Carlo, tendo em conta os resultados obtidos para um elevado número de simulações aleatórias. Foram ainda planeadas duas redes em malha reais suportando um conjunto de serviços típicos de redes metro. Em ambos os cenários foi garantida uma redução superior a 45% no custo da rede, quando comparado com a solução reconfigurável.

Palavras-chave: camada ótica intercambiável, roteamento ótico, atribuição de comprimentos de onda, planeamento de redes.

ABSTRACT

The increasing traffic requirements for optical networks in recent years, coupled with new services and applications and the latest video sharing habits, have led to a search for more energy-efficient and cost-effective solutions.

This dissertation presents as a solution the concept of optical layer disaggregation. In this way, by using small interchangeable optical elements it is possible to customize the network according to the needs of the network operators, avoiding to pay for undesirable or unnecessary features. In this solution, fixed addition / removal structures are used, which, although may difficult the planning process, are economically more feasible.

In order to suppress the planning problem, a set of algorithms for routing and assigning wavelengths was proposed, adapted to the characteristics and limitations introduced by the fixed components used. Similarly, an algorithm that allows to choose the appropriate configurations for each direction of the node, in order to optimize the network, was developed. These methods were integrated into a planning tool, fully developed during this research, and tested on different types of networks.

In this way, a set of chain and ring networks were analyzed according to the Monte Carlo method, considering the results obtained for a large number of random simulations. Two real mesh networks were also planned, supporting a set of typical metro network services. In both scenarios, a reduction of more than 45% in network cost was guaranteed when compared to the reconfigurable solution.

Key-words: pluggable optical layer, optical routing, wavelength assignment, network planning.

TABELA DE CONTEÚDOS

1. Introdução	1
1.1. Motivação	1
1.2. Estado da Arte	3
1.3. Objetivos e Estrutura	13
2. Análise Teórica	15
2.1. Nota Introdutória	15
2.2. Problema de Roteamento e Atribuição de Comprimentos de Onda	16
2.2.1. Roteamento	17
2.2.2. Atribuição de Comprimentos de Onda	19
2.3. Filtros Fixos DWDM	21
2.4. Métodos Heurísticos de RWA Propostos	25
2.4.1. Métodos de Roteamento	26
2.4.2. Métodos de Atribuição de comprimentos de onda	28
3. Ferramenta de Planeamento	33
3.1. Nota Introdutória	33
3.2. Caracterização da Rede, dos Serviços e do Equipamento	35
3.3. Escolha dos Caminhos	38
3.4. Atribuição dos Comprimentos de Onda	39
3.5. Determinação dos Canais de Adição/Remoção e Expresso	41
3.6. Seleção dos Filtros por Nó	48
4. Análise de Resultados	57
4.1. Nota Introdutória	57
4.2. Análise a Redes com Topologia em Cadeia e em Anel	57
4.3. Análise a Redes com Topologia em Malha	65
5. Conclusão	71
5.1. Conclusões Gerais	71
5.2. Trabalho Futuro	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Número de utilizadores de Internet da população mundial, entre 2001 e 2017, obtido segundo os dados estatísticos de [7].....	2
Figura 1.2 - (a) Gráfico da atenuação da fibra em função do comprimento de onda com identificação das várias gerações dos sistemas óticos, adaptado de [16]. (b) Gráfico da dispersão cromática em função do comprimento de onda para fibras SMF e DSF, adaptado de [13]	4
Figura 1.3 - Sistema WDM com 4 comprimentos de onda e amplificação ótica	5
Figura 1.4 – (a) Divisor Ótico. (b) Divisor de Comprimentos de Onda	6
Figura 1.5 - (a) 1XN WSS (c/ N=4). (b) KxN WSS (c/ K=3 e N=4)	7
Figura 1.6 – ROADM de grau 3 com arquitetura Broadcast-and-Select baseada em WSS.....	8
Figura 1.7 – ROADM Colorless, Directionless, 2-Contentionless (CDC) de grau 3	9
Figura 1.8 – Alocação de espetro utilizando grelha fixa e grelha flexível	10
Figura 1.9 - Funções da camada ótica que podem ser implementadas utilizando elementos pluggable, adaptado de [35]	11
Figura 1.10 – Conjunto de funcionalidades da Pluggable Optical Layer, adaptado de [35]	12
Figura 2.1 – Classificação Funcional dos Algoritmos de RWA	17
Figura 2.2 – (a) Rede c/ 6 caminhos roteados. (b) Grafo auxiliar $G'(V, E)$ dos caminhos apresentados em (a).....	20
Figura 2.3 – Estrutura de um filtro fixo pluggable DWDM de 4 canais	21
Figura 2.4 – (a) Possíveis direções de expresso utilizando uma ROADM de grau 4. (b) Três possíveis configurações, de direções de expresso, definidas utilizando filtros fixos DWDM, num nó de grau 4	22
Figura 2.5 – Problema das múltiplas direções de expresso. (a) Solução Drop & Re-add. (b) Solução c/ introdução de uma direção ROADM	23
Figura 2.6 – Exemplo de uma cascata de filtros de grau 2	24
Figura 2.7 – Problema dos comprimentos de onda indevidamente removidos: Solução Drop & Re-add	24
Figura 2.8 – Solução de Drop & Re-add: (a) problema das múltiplas direções de expresso. (b) problema dos comprimentos de onda indevidamente removidos.....	25
Figura 2.9 – Algoritmo de Roteamento para redes em Anel	26
Figura 2.10 – Algoritmo de Roteamento para redes em Malha	27
Figura 2.11 – Algoritmo de WA (Longest-first + Largest-first)	29
Figura 2.12 – Algoritmo utilizado para construir grafo $G'(V,E)$ para o método de graph-coloring	30
Figura 2.13 – Algoritmo de WA (graph-coloring).....	31
Figura 2.14 – Algoritmo de WA (graph-coloring adaptativo)	31
Figura 3.1 – (a) Matriz de adjacências. (b) Topologia física da rede.....	35
Figura 3.2 – Condição responsável pela Seleção do Algoritmo de Roteamento	38

Figura 3.3 – Representação, sob a rede de teste, dos caminhos já roteados e dos possíveis caminhos para o serviço de ID 3	39
Figura 3.4 – (a) Atribuição de comprimentos de onda consecutivos (genérico). (b) Atribuição de comprimentos de onda tendo em conta o número mínimo de canais que podem ser filtrados em cada direção do nó	40
Figura 3.5 – Representação da rede, dos serviços e do grafo $G'(V, E)$ com os comprimentos de onda já atribuídos, gerado pelo método de graph-coloring adaptativo	41
Figura 3.6 – Algoritmo de Identificação das direções e comprimentos de onda de Adição/Remoção	43
Figura 3.7 - Algoritmo de Identificação das direções e comprimentos de onda de Pass Through	44
Figura 3.8 – Algoritmo de identificação das direções e comprimentos de onda de Expresso	45
Figura 3.9 – Algoritmo de validação de direções de expresso	46
Figura 3.10 – Algoritmo de identificação das direções passadas por Drop & Re-add com Regeneração	47
Figura 3.11 – Algoritmo de identificação das direções dos nós servidas por direções ROADM	47
Figura 3.12 – Algoritmo de Seleção de Filtros e Direções ROADM	48
Figura 3.13- Algoritmo de Seleção dos Filtros Simples baseado nos comprimentos de onda que é necessário adicionar/remover em cada direção	49
Figura 3.14 - Algoritmo de Seleção de Cascatas de Filtros de grau 2, baseado nos comprimentos de onda que é necessário adicionar/remover em cada direção	51
Figura 3.15 - Algoritmo de Seleção de Cascatas de Filtros de grau 3, baseado nos comprimentos de onda que é necessário adicionar/remover em cada direção	52
Figura 3.16 – Algoritmo de Identificação dos Filtros compatíveis com as Ligações de Expresso	54
Figura 3.17 – Algoritmo de identificação da melhor solução de Drop & Re-add	55
Figura 4.1 – Rede em anel, com topologia lógica em malha com 25 serviços. Histogramas: (a) número de filtros utilizados. (b) número de canais passados por Drop & Re-add	58
Figura 4.2 – Topologia Física da rede em cadeia analisada	59
Figura 4.3 – Topologia Lógica Horseshoe	59
Figura 4.4 – Evolução do número de filtros utilizados com o aumento do número de serviços suportados, utilizando como parâmetro de minimização: (a) o custo da rede. (b) o número de filtros.....	60
Figura 4.5 - Evolução do número de canais passados por Drop & Re-add com o aumento do número de serviços	61
Figura 4.6 - Evolução do fator de custo da solução final com o aumento do número de serviços suportados, utilizando como parâmetro de minimização o custo da rede (azul) e o número de filtros (verde)	61
Figura 4.7 – Topologia Lógica: (a) com um nó Hub. (b) em malha (todos os nós a trocarem serviços entre si) ...	62
Figura 4.8 - Evolução do número de filtros utilizados com o aumento do número de serviços suportados, utilizando a topologia lógica: (a) com um nó hub. (b) em malha	63
Figura 4.9 - Evolução do número de canais passados por Drop & Re-add com o aumento do número de serviços, utilizando a topologia lógica com um nó hub (verde) e a topologia lógica em malha (azul)	64

Figura 4.10 - Evolução do fator de custo da solução final com o aumento do número de serviços suportados, utilizando a topologia lógica com um nó hub (verde) e a topologia lógica em malha (azul)	64
Figura 4.11 – Topologia Física da rede CalREN	65
Figura 4.12 – Topologia Lógica da rede CalREN.....	66
Figura 4.13 – Resultados do método de RWA proposto e do método de RWA tradicional, para a rede CalREN, quando selecionada a solução: (a) Drop & Re-add com Regeneração. (b) Direções ROADM.....	66
Figura 4.14 – Fator de custo da solução final para os vários métodos testados, para a rede CalREN	67
Figura 4.15 – (a) Topologia Física da rede RedIRIS. (b) Topologia Lógica da rede RedIRIS	68
Figura 4.16 - Resultados do método de RWA proposto e do método de RWA tradicional, para a rede RedIRIS, quando selecionada a solução: (a) Drop & Re-add com Regeneração. (b) Direções ROADM.....	68
Figura 4.17 - Fator de custo da solução final para os vários métodos testados, para a rede RedIRIS.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Número de direções de expresso que as arquiteturas baseadas em filtros fixos e direções ROADM conseguem suportar para nós com diferentes graus	22
Tabela 3.1 – Tabela de serviços, importado do ficheiro services.xlsx	36
Tabela 3.2 – Tabela de Pré-Configurações, importada do ficheiro preconfiguration.xlsx	37
Tabela 3.3 – Evolução da tabela de serviços durante a aplicação do método graph-coloring adaptativo à rede de teste	40
Tabela 3.4 – Tabela com as características dos serviços depois da execução dos algoritmos de roteamento e de atribuição de comprimentos de onda	41
Tabela 3.5 – Tabela de Add/Drop da rede de teste	43
Tabela 3.6 – Tabela de PasshThrough da rede de teste	44
Tabela 3.7 – Tabela Match gerada para o nó 1 na direção 2, antes e depois de serem removidos os filtros que não verificam nenhuma correspondência e os filtros que verificam correspondência total	50
Tabela 3.8 – Tabela Cascade2, antes dos filtros com correspondência total serem removidos (para o nó 1, direção 2)	51
Tabela 3.9 – Tabela Cascade2 (para o nó 1, direção 2).....	52
Tabela 3.10 – Parte da Tabela Solution contendo apenas as soluções para o nó 1, direção 2	53

LISTA DE SIGLAS/ACRÓNIMOS

AWG	<i>Arrayed Waveguide Grating</i>
BVT	<i>Bandwidth Variable Transceivers</i>
BTS	<i>Base Transceiver Station</i>
CapEx	<i>Capital Expenditure</i>
CFP	<i>C Form-factor Pluggable</i>
CWDM	<i>Coarse Wavelength Division Multiplexing</i>
DCF	<i>Dispersion-Compensating Fiber</i>
DSF	<i>Dispersion-Shifted Fiber</i>
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>
EB	<i>Exabyte</i>
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplification</i>
EO	<i>Electrical to Optical</i>
EOL	<i>End of Life</i>
EVOA	<i>Electronically Variable Optical Attenuators</i>
FOADM	<i>Fixed Optical Add and Drop Multiplexer</i>
FRA	<i>Fiber Raman Amplifier</i>
GBIC	<i>Gigabit Interface Converter</i>
ID	<i>Identity</i>
NVC	<i>Número de vizinhos coloridos</i>
OADM	<i>Optical Add and Drop Multiplexer</i>
OEO	<i>Optical to Electrical</i>
OCM	<i>Optical per Channel Monitoring</i>
OFP	<i>Optical Form-factor Pluggable</i>
OpEx	<i>Operational Expenditure</i>
OSC	<i>Optical Supervisory Channel</i>
OSNR	<i>Optical Signal-To-Noise Ratio</i>
OTDR	<i>Optical Time-Domain Reflectometer</i>
POL	<i>Pluggable Optical Layer</i>
ROADM	<i>Reconfigurable Optical Add and Drop Multiplexer</i>
RSA	<i>Routing and Spectrum Assignment</i>
RWA	<i>Routing and Wavelength Assignment</i>
SFP	<i>Small Form-factor Pluggable</i>
SLE	<i>Static Lightpath Establishment</i>
SMF	<i>Single-Mode fibre</i>
SOA	<i>Semiconductor Optical Amplifier</i>
STM-n	<i>Synchronous Transport Module level-n</i>

TAD	Tabela de <i>Add/Drop</i>
TC2	Tabela <i>Cascade2</i>
TC3	Tabela <i>Cascade3</i>
TCS	Tabela <i>CriticalSolutions</i>
TE	Tabela de <i>Express</i>
TES	Tabela <i>Express Solution</i>
TF	Tabela <i>Filters</i>
TM	Tabela <i>Match</i>
TNE	Tabela de Novos Expressos
TOF	Tabela de Ocupação das Fibras
TPT	Tabela de <i>PassThrough</i>
TR	Tabela de <i>Regens</i>
TROADM	Tabela de <i>ROADM directions</i>
TS	Tabela de Serviços
TSC	Tabela dos Serviços Caracterizados
TSF	Tabela de Serviços por Fibra
TSol	Tabela <i>Solution</i>
TTSF	Tabela de Tráfego por Secção de Fibra
VCOD	Vetor de Comprimentos de Onda Disponíveis
VPCOD	Vetor dos Primeiros Comprimentos de Onda Disponíveis
XFP	<i>10 Gigabit Small Form-factor Pluggable</i>
WB	<i>Wavelength Bloocker</i>
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>
WSS	<i>Wavelength Selective Switch</i>

1. INTRODUÇÃO

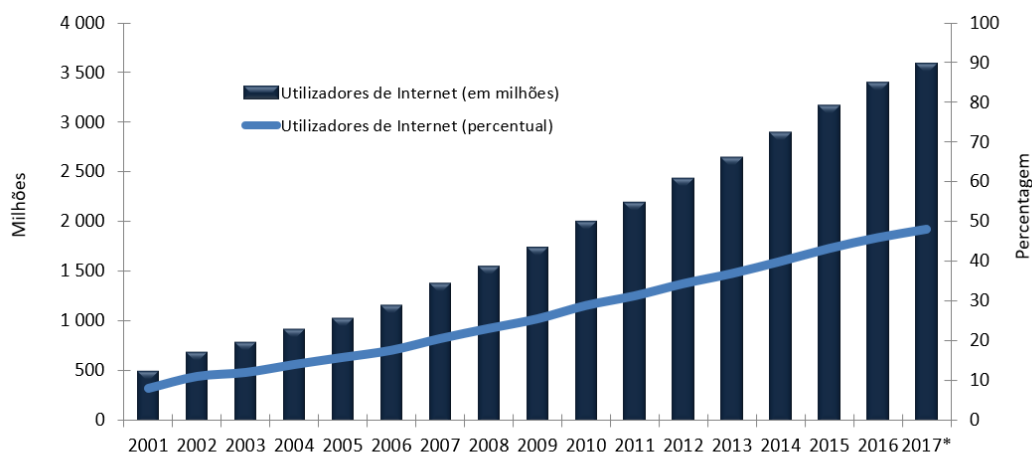
1.1. MOTIVAÇÃO

Os sistemas de comunicação por fibra ótica começaram a ser implementados em meados da década de 70, século XX, para comunicações telefônicas terrestres entre as principais cidades do mundo. Posteriormente, no início da década de 1980, os principais operadores já dispunham de vastos quilômetros de fibra ótica nas suas redes de transporte e, em 1988, num período em que as comunicações eram sobretudo do tipo telefónico e em que apenas as empresas de maiores dimensões dispunham de comunicações de dados, entra em funcionamento o primeiro cabo submarino ótico transatlântico [1] [2]. Mais tarde, na década de 1990, com o despontar da Internet começam-se a registar avanços significativos na fibra e nos dispositivos óticos, impulsionando a expansão em larga escala dos sistemas de comunicação ótica para as redes metropolitanas e *backbone*. Na atualidade, as redes óticas, utilizando sistemas de multiplexagem por divisão de comprimentos de onda, garantem elevados ritmos de transmissão e são capazes de assegurar funcionalidades como provisionamento (configuração e gestão da rede), roteamento (*routing* em terminologia anglo-saxónica), agregação (*grooming* em terminologia anglo saxónica) e mecanismos de proteção e recuperação ao nível do comprimento de onda. Através do aumento da capacidade obteve-se significativas reduções no custo por bit e expandiu-se o uso de fibra ótica também para as redes de acesso [3].

Conforme se pode constatar na Figura 1.1, desde o início do século XXI que o número de utilizadores de internet a nível global tem vindo a aumentar e, segundo a *Cisco Visual Networking Index* [4] [5], essa tendência deverá manter-se entre 2016 e 2021, prevendo-se um aumento de 44 % para 58 % no número de utilizadores de Internet, da população mundial. O tráfego médio de Internet mensal de cada utilizador também deverá aumentar de 24 GB, em 2016, para 61 GB, em 2021 [4].

À medida que a tecnologia evolui, as redes têm de estar preparadas para lidar com os novos requisitos de serviços e aplicações. O crescimento dramático da largura de banda tem intensificado o desafio de fornecer o melhor desempenho com o menor custo possível. Os centros de dados (*data centers* em terminologia anglo-saxónica), que suportam aplicações como a computação na nuvem (*cloud computing* em terminologia anglo-saxónica) ou o

armazenamento e visualização em *stream*, são os principais responsáveis pela elevada quantidade de tráfego que é atualmente gerado na rede (6 819 EB/ano), prevendo-se ainda que, entre 2016 e 2021, o tráfego total gerado pelos centros de dados cresça a uma taxa anual composta de aproximadamente 25 %, ultrapassando em 2021 os 20 000 EB/ano [6]. Por sua vez, no mesmo período de tempo, prevê-se um crescimento de 27 % no tráfego da IPTv (*Internet Protocol Television*) e de 32 % no tráfego de vídeo generalizado. Prevê-se ainda que em 2021, 80% do tráfego de Internet seja vídeo [5].



* Estimativa
 Fonte: ITU World Telecommunication /ICT Indicators database

Figura 1.1 - Número de utilizadores de Internet da população mundial, entre 2001 e 2017, obtido segundo os dados estatísticos de [7]

Uma vez que o crescimento de tráfego não se traduz num aumento de receitas, as redes de transporte óticas tradicionais necessitam de evoluir e tornar-se cada vez mais flexíveis e economicamente mais viáveis. Deste modo, é crucial reduzir o investimento de capital (CapEx em terminologia anglo-saxónica *Capital Expenditure*) e o investimento operacional (OpEx em terminologia anglo-saxónica *Operational Expenditure*), bem como reduzir o consumo energético e a pegada espacial dos vários elementos da rede, enquanto em simultâneo se melhora a qualidade do serviço e aumenta a capacidade da rede [8].

Nesse sentido, nos últimos anos, surge uma nova solução assente no conceito de desagregação dos vários elementos que compõem a camada ótica. Com esta solução, os diferentes componentes funcionais, ativos ou passivos, devem ser combinados e misturados, passando a ser possível personalizar a rede de acordo com os serviços que se pretende implementar, deixando de ser necessário pagar por funcionalidades indesejáveis ou desnecessárias. Passa também a ser possível introduzir novas funcionalidades através da troca ou adição de novos componentes, preservando o investimento realizado nos componentes inalterados. Garante-se, deste modo, uma flexibilidade de *design* notável, permitindo a adaptação e otimização de cada aplicação, um baixo investimento de escalabilidade, *pay-as-you-grow*, e uma redução de custo, material e energético, acima dos 30% face às abordagens tradicionais [9].

Numa fase em que as tecnologias intercambiáveis (*pluggable* em terminologia anglo-saxónica) reconfiguráveis ainda estão a ser desenvolvidas, o foco de interesse recai sobre as tecnologias fixas, já disponíveis e de baixo

custo. O uso de elementos como os filtros fixos, obrigam que a configuração de cada nó seja definida *a priori*, tendo em conta o tráfego que se pretende passar no fim de vida da rede. A forte interdependência existente entre a escolha dos caminhos e dos comprimentos de onda dos vários serviços e a consequente escolha dos filtros adequados, fazem do planeamento da rede uma tarefa complicada, pouco otimizada e com uma elevada propensão de erros, intensificando-se para redes com topologia em malha (*mesh* em terminologia anglo-saxónica) ou quando o número de nós e serviços aumenta [10]. Com a presente dissertação pretende-se analisar e desenvolver um conjunto de modelos heurísticos, computacionalmente eficientes, que possam ser utilizados no planeamento de uma rede metro, utilizando sobretudo componentes *pluggable* fixos.

1.2. ESTADO DA ARTE

No século XIX, Alexander Graham Bell dá início às primeiras experiências documentadas onde a luz era utilizada para comunicar, contudo só no século XX é que se começam a registar avanços mais significativos nas comunicações óticas [11]. O início da década de 1960 fica marcado pela invenção do laser e pelo estudo realizado por Elias Snitzer, em 1961, que viabilizava a utilização da fibra ótica monomodo enquanto meio de transmissão, caso se viessem a garantir atenuações inferiores a 10 ou 20 dB/km. Em 1966, Charles Kao em conjunto com George Hockman, estudando as propriedades de transparência do vidro, conseguiram prever atenuações inferiores a 20 dB/km na fibra. Na década de 70, o interesse pelos sistemas de comunicações por fibra ótica intensificam-se e, em 1970, um grupo de investigadores da *Corning Glass Works*, produziu uma fibra monomodo, de sílica fundida, com uma atenuação de 17 dB/km. Dois anos mais tarde, os mesmos investigadores concebem uma fibra multimodo dopada com germânio com uma atenuação de 4 dB/km. A partir desta data, o interesse pelos sistemas de comunicações óticas não cessou, ficando a década de 1970 marcada pela fibra de baixa atenuação e pelos primeiros estudos das diferentes bandas de operação dos sistemas óticos [12] [13].

A década de 80, século XX, inicia-se com a comercialização da primeira geração dos sistemas óticos que operavam em torno dos 850 nm. A janela de operação era limitada pela banda de funcionamento das fontes óticas e dos fotodetetores disponíveis e pelo facto de a fibra da época apresentar um mínimo de atenuação para esses comprimentos de onda. Deste modo, utilizando fibra multimodo, foram garantidos ritmos de transmissão de 45 Mb/s com um espaçamento entre regeneradores de cerca de 10 km [12].

Os regeneradores, também conhecidos como 3R's (*reamplification, reshaping e retiming*), são os elementos da rede responsáveis pela regeneração do sinal emitido. Uma vez que operam no domínio elétrico, necessitam de utilizar conversores OE/EO (*Optical to Electrical / Electrical to Optical*), introduzindo custos significativos na rede. O aumento do espaçamento entre regeneradores foi atingido utilizando fibra com menor atenuação, contudo o aumento das distâncias das secções óticas introduziu o problema da dispersão, que acabou por levar ao abandono da fibra multimodo, devido à elevada dispersão intermodal a que estava sujeita.

Em 1987, inicia-se a comercialização da segunda geração dos sistemas óticos que operavam em torno dos 1310 nm. Nesta banda, utilizando fibra monomodo conseguiu-se garantir dispersão cromática nula e uma

reduzida atenuação (na ordem dos 0.5 dB/km), conforme se constata pela Figura 1.2. Desta forma, passou a ser possível obter ritmos de transmissão entre os 155.52 Mb/s (STM-1) e os 2.5 Gb/s (STM-16), com um espaçamento entre regeneradores de 50 km [13].

Em 1989, impulsionado pelo aparecimento dos amplificadores óticos baseados em fibra dopada a érbio (EDFA em terminologia anglo-saxónica *Erbium Doped Fiber Amplification*), inicia-se a comercialização da terceira geração dos sistemas óticos, a operar em torno dos 1550 nm. Nessa banda, registam-se as atenuações mínimas da fibra (na ordem dos 0.2 dB/km), contudo, conforme se pode constatar pela Figura 1.2, a fibra monomodo padrão (SMF em terminologia anglo-saxónica *Single-Mode fibre*) apresenta uma dispersão cromática elevada (na ordem dos 17 ps / (nm km)) [13]. Esta limitação foi ultrapassada, numa primeira fase, em 1988, com a criação da fibra de dispersão deslocada (DSF em terminologia anglo-saxónica *Dispersion-Shifted Fiber*) [14], que, apesar de apresentar um custo mais elevado que a fibra SMF, garante dispersão nula em torno dos 1550 nm. Mais tarde, em 1992, uma equipa de investigadores da *Corning* fez as primeiras simulações da fibra de compensação de dispersão (DCF em terminologia anglo-saxónica *Dispersion-Compensating Fiber*) [15]. Deste modo, passa a ser possível garantir um ritmo de transmissão de 10 Gb/s e espaçamento entre regeneradores de 100 km.

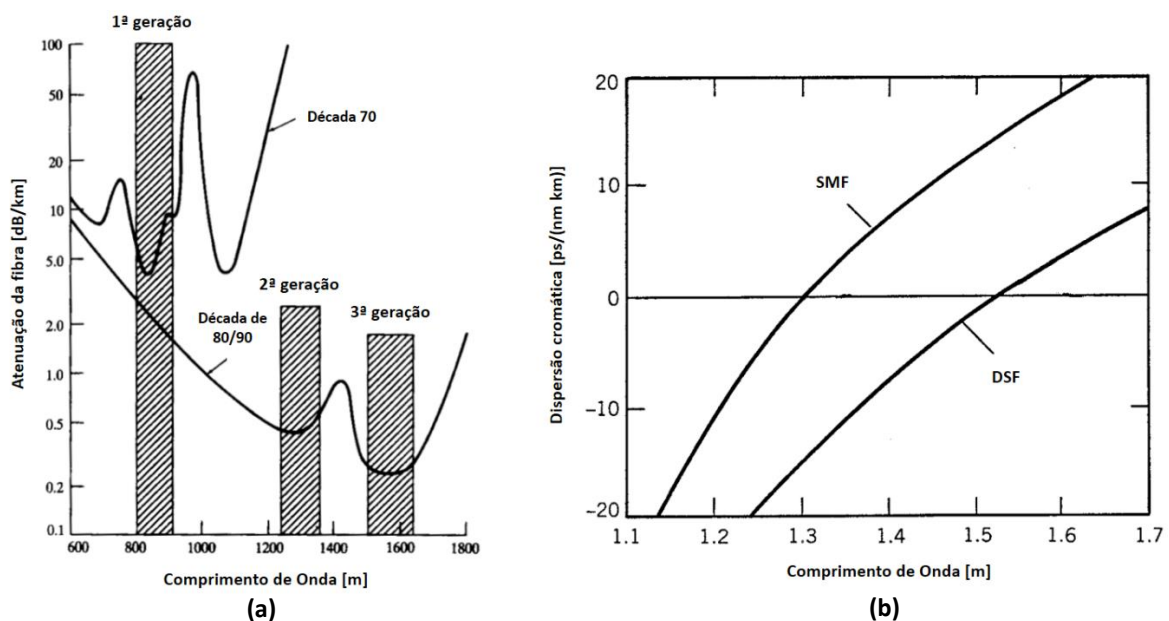


Figura 1.2 - (a) Gráfico da atenuação da fibra em função do comprimento de onda com identificação das várias gerações dos sistemas óticos, adaptado de [16]. (b) Gráfico da dispersão cromática em função do comprimento de onda para fibras SMF e DSF, adaptado de [13]

Na década de 1990, o crescente número de utilizadores das redes de dados, associado ao despontar da Internet, levou à procura de maiores larguras de banda, servindo de premissa para o aparecimento de redes com multiplexagem por divisão de comprimentos de onda (WDM em terminologia anglo-saxónica *Wavelength Division Multiplexing*), onde sinais com múltiplos comprimentos de onda são combinados (multiplexados) e transmitidos numa única fibra, tal como se ilustra na Figura 1.3 [17]. Na atualidade, os sistemas WDM operam em torno dos 1550 nm, uma vez que esta é a banda que oferece menor atenuação e permite o uso de EDFAs. Um único EDFA, como é o caso do amplificador de banda espectral ultra-larga, permite amplificar vários comprimentos de onda em toda a banda C (1530 – 1565 nm) e L (1565 – 1625 nm), compensando a atenuação sofrida pela fibra

[18]. Como alternativa podem ser utilizados os amplificadores óticos semicondutores (SOA em terminologia anglo-saxónica *Semiconductor Optical Amplifier*), caracterizados por terem um baixo consumo energético e um custo reduzido, quando comparado com as restantes soluções de amplificação, ou os amplificadores de linha de Raman (FRA em terminologia anglo-saxónica *Fiber Raman Amplifiers*), que compensam a atenuação e eliminam a acumulação de ruído. Os amplificadores de Raman melhoram ainda o fator de ruído e reduzem a penalidade não linear dos sistemas óticos, levando a melhorias generalizadas na performance do sistema, que se traduzem em spans de amplificação de maiores dimensões, ritmos de transmissão mais elevados e menores espaçamentos de canais [19].

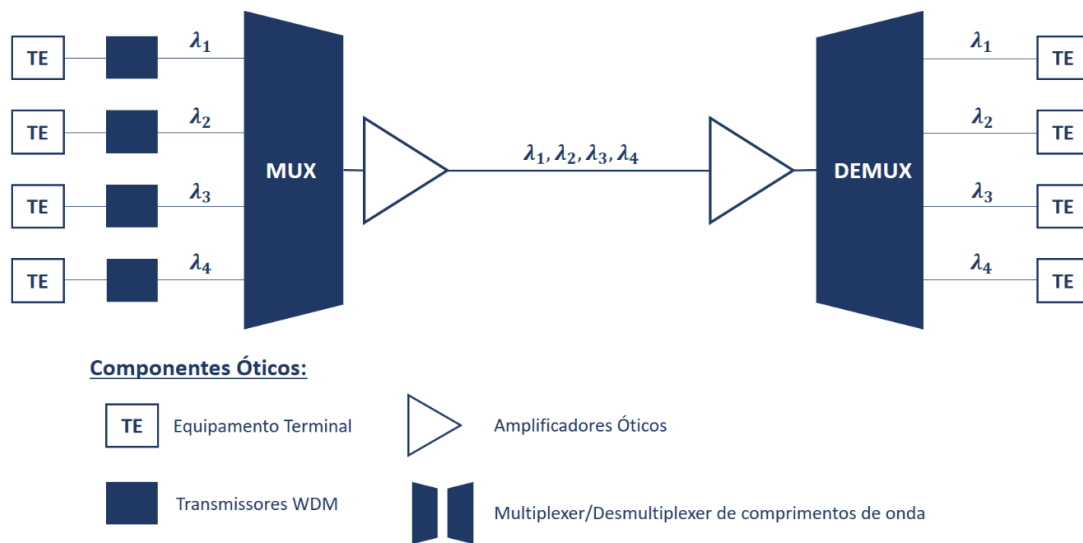


Figura 1.3 - Sistema WDM com 4 comprimentos de onda e amplificação ótica

Os sistemas WDM podem ser categorizados como esparsos (CWDM em terminologia anglo-saxónica *Coarse Wavelength Division Multiplexing*) ou densos (DWDM em terminologia anglo-saxónica *Dense Wavelength Division Multiplexing*). Os sistemas CWDM fornecem tipicamente entre 4 a 16 comprimentos de onda, espaçados de no mínimo 20 nanómetros [20]. Como os canais são esparsos é possível utilizar transmissores e filtros mais económicos, no entanto estes sistemas não são compatíveis com as larguras de banda dos EDFAs. Por estas razões o CWDM é uma boa solução para aplicações de baixo custo, curta distância e cujo ritmo de transmissão é mais baixo [18]. Em contrapartida, os sistemas DWDM fornecem centenas de comprimentos de onda, espaçados de 12.5 GHz, 25 GHz, 50 GHz ou 100 GHz [21], garantindo elevados ritmos de transmissão, necessários para as redes metro e de longo curso, bem como para a interligação dos centros de dados [18]. Para fazer a seleção dos diferentes sinais podem ser utilizados divisores de comprimentos de onda (*Wavelength Splitter* em terminologia anglo-saxónica), também denominados por *multiplexers/demultiplexers*, capazes de separar os canais óticos com diferentes comprimentos de onda, introduzindo uma atenuação fixa. O AWG (*Arrayed Waveguide Grating*) é um exemplo deste tipo de tecnologia, sendo capaz de separar um grupo de canais DWDM provenientes de uma fibra, num conjunto de fibras com um único canal. A este procedimento dá-se o nome de multiplexagem seletiva. Alternativamente, pode ser utilizado um divisor ótico, também denominado por *splitters/combiners*, seguido de um conjunto de filtros óticos. Um 1 x N *splitter* tem a capacidade de distribuir a potência ótica proveniente da porta de entrada pelo conjunto das N portas de saída. A razão de divisão de potência ao longo das portas de saída

varia consoante o dispositivo que está a ser utilizado. Um *splitter* é também denominado por *combiner* quando utilizado na direção contrária, ou seja, quando combina um conjunto de sinais numa única fibra. Este procedimento é conhecido por multiplexagem não seletiva, sendo que a atenuação imposta varia consoante número de comprimentos de onda do sistema [22]. O divisor ótico e o divisor de comprimentos de onda são ilustrados na Figura 1.4.

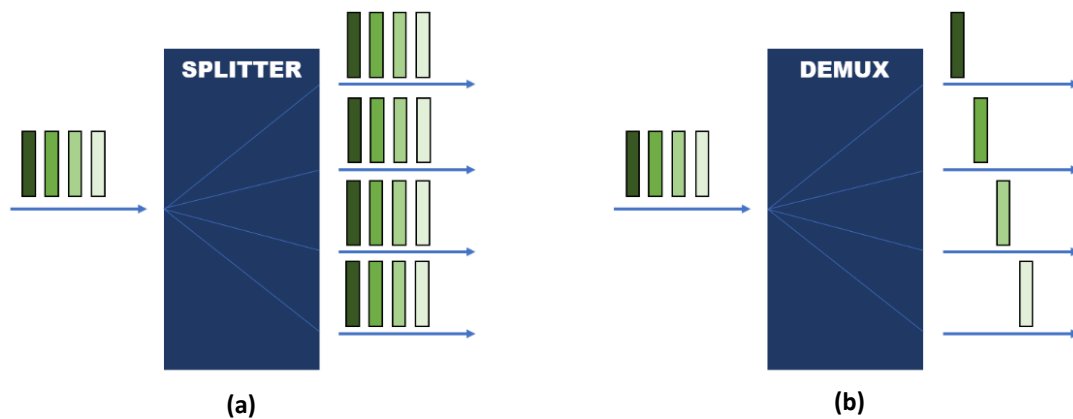


Figura 1.4 – (a) Divisor Ótico. (b) Divisor de Comprimentos de Onda

O desenvolvimento de lasers ajustáveis e os avanços na tecnologia dos filtros passivos DWDM foram a base tecnológica responsável pela expansão eficiente da capacidade da rede. Conjugando o WDM com a amplificação ótica obteve-se aumentos significativos na largura de banda para ligações a longa distância, evitando o recurso aos regeneradores, traduzindo-se isso numa elevada redução do custo por bit [23].

As redes WDM deram origem ao multiplexador ótico de adição e remoção de comprimentos de onda (OADM do inglês *Optical Add and Drop Multiplexer*), elemento da rede ótica onde determinados comprimentos de onda podem ser adicionados (*add* em terminologia anglo-saxónica) e removidos (*drop* em terminologia anglo-saxónica), enquanto os restantes passam opticamente (*pass through* em terminologia anglo-saxónica). Uma vez que opera no domínio ótico, o OADM evita que se utilizem conversores OE/EO, reduzindo significativamente o custo da rede. Os primeiros OADMs eram dispositivos de configuração fixa, também denominados por FOADMs (*Fixed Optical Add and Drop Multiplexer*). Esta solução obrigava a definir *a priori* o conjunto de comprimentos de onda que tinham de ser adicionados/removidos, de modo a escolher e implementar os filtros fixos apropriados para cada direção do nó. Utilizando elementos fixos e passivos, conseguiu-se obter despesas de capitais relativamente reduzidas, contudo tarefas como o balanceamento manual da potência ou o planeamento e reconfiguração da rede conduziam a elevados custos operacionais, dado que pequenas alterações na topologia da rede se traduziam em severas reconfigurações manuais que implicavam gastos com pessoal e material, diminuição do tempo de resposta em caso de avarias e uma maior propensão de erros [18] [24].

Posteriormente surgiram os OADMs reconfiguráveis, denominados por ROADMs (*Reconfigurable Optical Add and Drop Multiplexer*), cuja principal característica é a configuração remota dos comprimentos de onda que se pretende adicionar ou remover, sem que para isso seja necessário instalar novos lasers e filtros ou realizar reconfigurações manuais ao equipamento já existente [24]. O aparecimento dos ROADMs está diretamente ligado

com o desenvolvimento de tecnologias bloqueadoras de comprimentos de onda (WB em terminologia anglo-saxónica *Wavelength Blocker*), onde se destaca o interruptor seletivo de comprimentos de onda (WSS em terminologia anglo-saxónica *Wavelength Selective Switch*) [25]. O WSS começa por separar e encaminhar os vários comprimentos de onda de entrada para um interruptor ótico (*switch* em terminologia anglo-saxónica) responsável por definir como é que estes devem ser novamente recombinados para as portas de saída. Deste modo, um 1xN WSS, composto por uma entrada e N portas de saída, tem a capacidade de rotear independentemente os canais WDM da entrada pelas várias N fibras da saída. O mesmo conceito pode ser generalizado para um KxN WSS, com K fibras de entrada e N de saída, conforme é ilustrado na Figura 1.5. Adicionalmente, o WSS tem a capacidade de, automaticamente, controlar e equalizar os níveis de potência dos diferentes canais, evitando os problemas de balanceamento de potência, presentes nas tecnologias fixas [26].

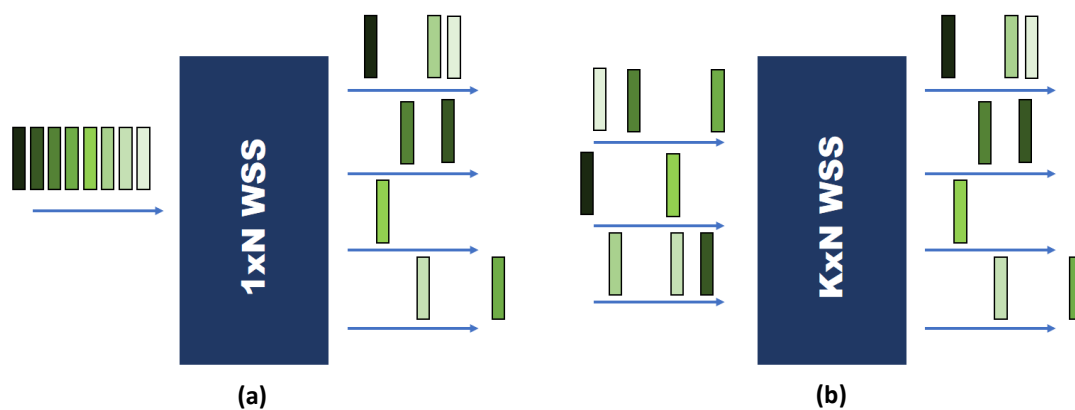


Figura 1.5 - (a) 1xN WSS ($c/N=4$). (b) KxN WSS ($c/K=3$ e $N=4$)

Na Figura 1.6 encontra-se ilustrado o esquema estrutural da primeira geração de ROADMs que utilizavam uma arquitetura de transmissão e seleção (*Broadcast and Select* em terminologia anglo-saxónica) baseada em WSS e com recurso a *splitters* e *multiplexers*. Quando comparada com a tecnologia fixa, esta arquitetura permite que novos caminhos de expresso sejam atribuídos remotamente entre as várias direções do nó, garantindo, simultaneamente, a equalização da potência dos vários canais contudo, esta estrutura ainda apresenta algumas limitações. Em primeiro lugar, os *transponders*, utilizados na adição/remoção dos canais nas várias direções do nó, estavam ligados a *multiplexers/demultiplexers* fixos, fazendo com que alterações nos comprimentos de onda adicionados/removidos só fossem possíveis ligando manualmente o *transponder* à porta de *mux/demux* correta. Em segundo lugar, cada *mux* responsável pela adição de novos canais estava ligado a uma direção de saída específica, obrigando a uma intervenção manual sempre que fosse necessário alterar as direções de saída dos canais adicionados [27]. Atualmente, a maioria dos transmissores óticos são equipados com lasers de comprimento de onda ajustável, e a maioria dos recetores são equipados com fotodetetores de banda larga, sendo as limitações provenientes das estruturas de adição/remoção [22].

Nos últimos anos, foram desenvolvidas novas arquiteturas de ROADM que incorporavam um conjunto de novas funcionalidades. Com a introdução do *Colorless* passa a ser possível atribuir diferentes comprimentos de onda a qualquer direção de adição/remoção. Uma das formas de introduzir esta nova funcionalidade passa por substituir os *muxs* por *couplers* e os *demuxs* por WSS's. Com o WSS adicional garante-se, durante a remoção dos canais, o

controlo da potência e a filtragem do ruído, mas, por sua vez, o *coupler* pode introduzir problemas de *crosstalk*, durante a adição dos canais. A reconfiguração dos comprimentos de onda é realizada remotamente utilizando *software* inerente ao plano de gestão. Como cada direção do nó continua a ter a sua própria estrutura de adição/remoção, a direção de saída dos comprimentos de onda continua a ser fixa [22] [27].

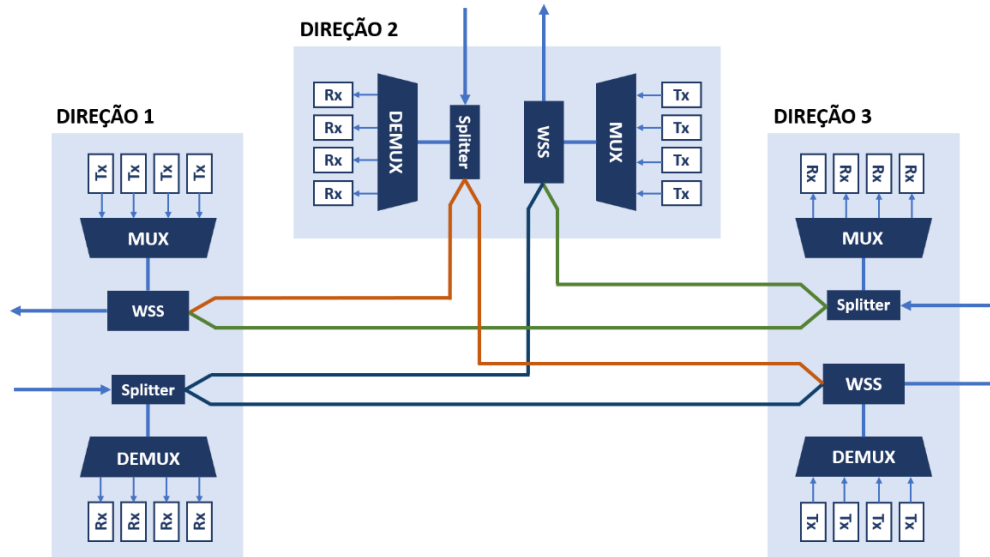


Figura 1.6 – ROADM de grau 3 com arquitetura Broadcast-and-Select baseada em WSS

Esta limitação foi ultrapassada com a introdução da funcionalidade *Directionless*, que permite o encaminhamento dos vários comprimentos de onda para qualquer direção servida pelo nó. A adição/remoção dos comprimentos de onda deixa de ser realizada em cada direção, passando a existir uma estrutura de adição/remoção específica para esse efeito, ligada a todas as direções do ROADM. Na remoção dos canais são combinados dois WSS, costas com costas, enquanto na adição é utilizado um *combiner*, seguido de um *splitter*. Deste modo, cada direção do nó passa a ser composta apenas por um *splitter* e um WSS, para os sinais de entrada e saída, respetivamente [22].

A funcionalidade *Contentionless* permite que múltiplas cópias do mesmo comprimento de onda possam ser utilizadas numa única estrutura de adição/extração, evitando que haja um bloqueio de comprimentos de onda quando, por exemplo, dois comprimentos de onda iguais convergem simultaneamente para a mesma direção. A sua implementação requer a introdução de tantos módulos de adição/remoção quanto o grau de contenção que se pretende ter [28] [29]. Na Figura 1.7 é apresentado o esquema estrutural de um ROADM CDC (*colorless, directionless, contentionless*) de grau 3.

Atualmente, os ROADMs CDC beneficiam de ferramentas de planeamento, monitorização e controlo de rede, recorrendo somente a *software*, assegurando uma maior flexibilidade e adaptabilidade a possíveis mudanças na rede, e uma diminuição do tempo e do trabalho associado à manutenção e supervisão manual da rede, garantindo deste modo, uma substancial redução nos OpEx, quando comparado com a solução fixa. Apesar da solução reconfigurável apresentar um CapEx mais elevado, a sua produção em massa tem conduzido a uma

redução no seu custo de fabrico, tornando a solução reconfigurável mais aliciente para redes metropolitanas densas e em expansão [18].

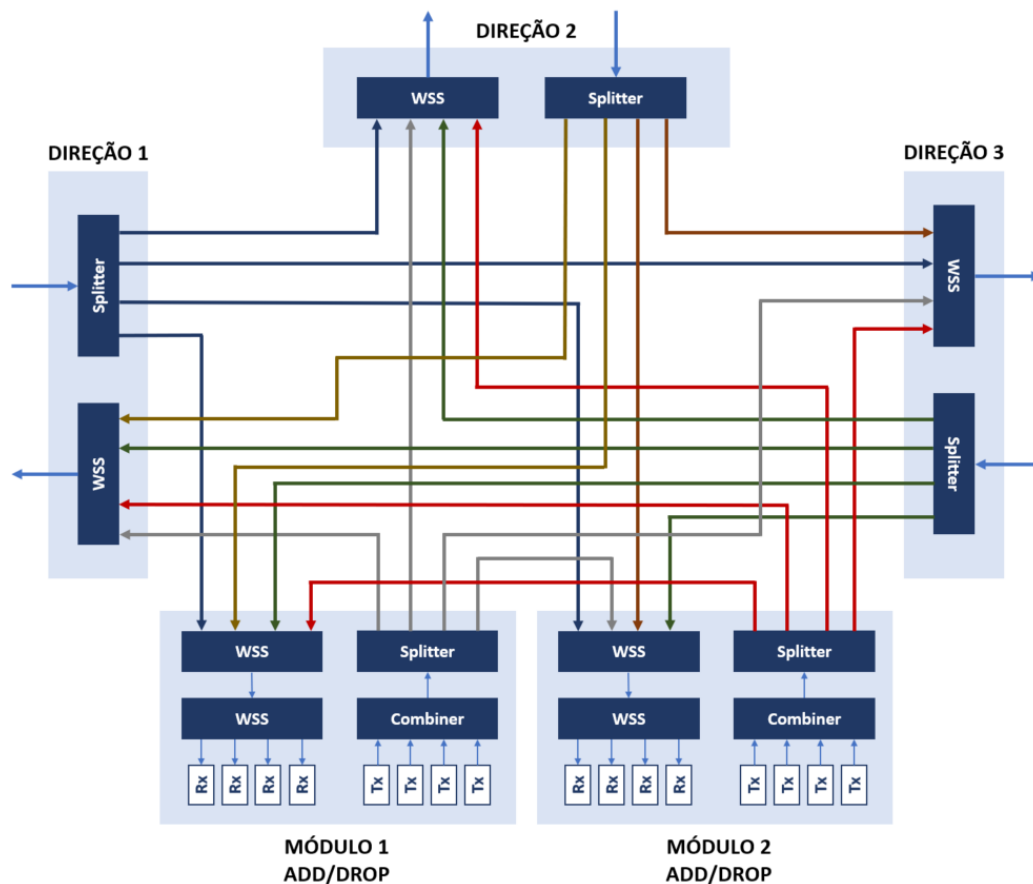


Figura 1.7 – ROADM Colorless, Directionless, 2-Contentionless (CDC) de grau 3

O rápido progresso dos sistemas WDM e dos amplificadores óticos interromperam os primeiros desenvolvimentos nos sistemas óticos coerentes durante a década de 1980. Somente em 2005, motivado pela necessidade de se aumentar a eficiência espectral através de técnicas de modulação mais eficazes, é realizada a primeira demonstração da estimativa da fase da transportadora digital em recetores coerentes, ressurgindo o interesse generalizado pelos sistemas óticos coerentes. A capacidade de codificação da informação em fase e o aumento da sensibilidade na receção nos sistemas coerentes permitem que se transmita sobre distâncias superiores com uma maior eficiência espectral, comparativamente com os sistemas baseados em modulação de intensidade [30]. Com o contínuo aumento dos ritmos de transmissão dos canais óticos, foram utilizadas modulações avançadas para comprimir canais de 40 Gb/s, 100 Gb/s e 200 Gb/s em espaçamentos de 50 GHz, originalmente projetados para canais de 10 Gb/s [22].

De modo a dar resposta aos fluxos de tráfego cada vez mais elevados, nos últimos anos, têm-se verificado significativos avanços inerentes ao conceito de rede ótica elástica (EON da terminologia anglo-saxónica *Elastic Optical Networks*), desenvolvida com o objetivo de melhorar a eficiência espectral, com especial foco nas redes de longa distância, também denominadas por *long haul* ou *backbone* [31]. Enquanto as redes óticas convencionais dividiam o seu espectro de canais segundo uma grelha fixa de comprimentos de onda (*fixed-grid*

em terminologia anglo-saxónica), espaçados por 50 GHz ou 100 GHz [21], as redes EON recorrem a uma grelha flexível (*flexible-grid* em terminologia anglo-saxónica), com espaçamento variável, alocando apenas a largura de banda necessária para cada serviço, garantindo uma maior eficiência espectral [32] [33]. Na Figura 1.8 é realizada uma comparação entre o espectro consumido utilizando *fixed-grid* e *flexible-grid*. Para além da largura espectral que é alcançada, a *flexible-grid* permite ainda que sejam utilizados ritmos de transmissão mais elevados, 400 Gb/s e 1 Tb/s, não suportados pela grelha fixa de 50 GHz [34].

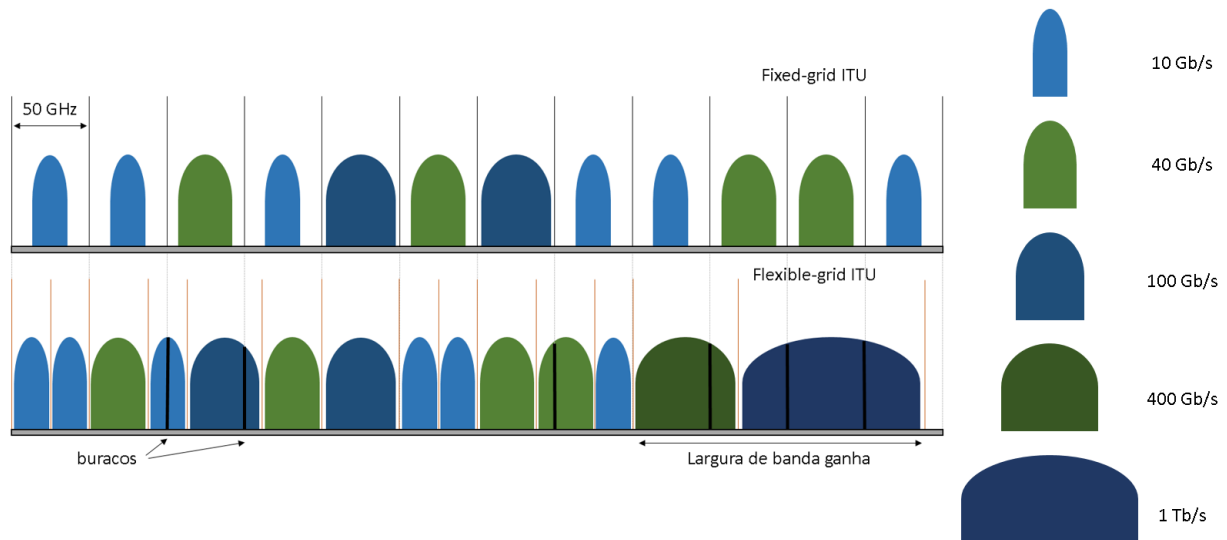


Figura 1.8 – Alocação de espectro utilizando grelha fixa e grelha flexível

Se forem utilizados ROADMs tradicionais, os espectros que coincidem com os limites da grelha da ITU, identificados na Figura 1.8 como buracos, não são transmitidos. Deste modo, para se construir uma rede flexível, é necessário recorrer a um novo tipo de ROADMs, que utilizam WSS's de espectro flexível, em conjunto com *transponders* de largura de banda variável (BVT da terminologia anglo-saxónica *Bandwidth Variable Transceivers*), capazes de gerar caminhos óticos elásticos, com ritmos de transmissão variáveis [31] [34]. Contudo o desempenho de uma EON depende também do modo como os recursos são utilizados e controlados. Para tal, têm sido estudados algoritmos de alocação e controlo de recursos, capazes de lidar com o problema de RSA (*Routing and Spectrum Assignment*), tendo em vista aspetos como a modulação, qualidade da transmissão e a minimização dos custos energéticos e de capital da rede. Em suma, a EON visa permitir a agregação ou segmentação da largura de banda, uma acomodação eficiente dos diferentes ritmos de transmissão e uma alocação flexível dos recursos [33].

O atual aumento de utilizadores de Internet, aliado ao crescimento de novas aplicações, como o *streaming* de vídeo ou o armazenamento na *cloud*, tem impulsionado a demanda por novas tecnologias, capazes de garantir elevadas capacidade ao menor custo possível [8]. No âmbito desta problemática, especialmente direcionado para as redes metropolitanas e para a interligação de centros de dados (DCI em terminologia anglo-saxónica *Data Center Interconnect*), tem sido proposta como possível solução a Camada Ótica Intercambiável, doravante denominada por POL (*Pluggable Optical Layer*), baseada no conceito da desagregação das estruturas óticas da rede, em pequenos elementos *pluggable* compactos.

A ideia de se começar a utilizar elementos *pluggable* compactos em redes de telecomunicações tem mais de 20 anos. O primeiro componente desenvolvido foi o GBIC (*Gigabit Interface Converter*), um *transponder* que convertia um sinal do tipo Gigabit Ethernet proveniente da interface de cliente, num sinal ótico, tipicamente na banda C (1530-1565 nm), da interface linha. O GBIC, criado em 1995, foi recorrentemente utilizado em equipamentos de rede durante a década de 2000, até se tornar obsoleto com o aparecimento dos SFPs (*Small Form-factor Pluggable*), usualmente denominado como mini-GBIC, pela primeira vez definidos no ano 2000. Em 2002 surgem os XFPs (*10 Gigabit Small Form-factor Pluggable*) que, apesar de apresentarem maiores dimensões que os SFPs, garantiam a conversão de sinais 10 Gigabit Ethernet. Só mais tarde são desenvolvidos os CFPs (*C Form-factor Pluggable*), para serviços a 40G e 100G, e os SFP+, uma solução mais compacta para serviços a 10 Gigabit Ethernet. O primeiro SFP+ WDM fixo foi implementado em 2011 seguido pelo primeiro SFP+ ajustável, introduzido dois anos mais tarde, em 2013. Estes elementos começaram por ser utilizados no lado do cliente, uma vez que garantiam maior flexibilidade de protocolos, eram mais económicos, ocupavam menos espaço e consumiam menos energia [35] [36].

A POL propõe que os elementos *pluggable* compactos, já utilizados no lado do cliente, passem também a ser utilizados do lado da camada ótica estrutural. Deste modo, recorrendo aos já standerizados SFPs e XFPs, e aos mais recentes OFP1 e OFP2 (*Optical Form-factor Pluggable*), é possível implementar funcionalidades como a amplificação fixa ou variável dos EDFAs, EVOAs (*Electronically Variable Optical Attenuators*), OCM (*Optical per Channel Monitoring*), OSC (*Optical Supervisory Channel*), WSS de transmissão e seleção e OTDR (*Optical Time-Domain Reflectometer*), Figura 1.9. São também utilizados componentes passivos como os filtros fixos CWDM e DWDM, com reduzidas perdas de inserção. A longo prazo, tecnologias mais avançadas da camada ótica, como a amplificação de Raman ou WSS de roteamento e seleção, poderão também ser implementadas de um modo *pluggable* [9] [35] [37].



Figura 1.9 - Funções da camada ótica que podem ser implementadas utilizando elementos pluggable, adaptado de [35]

A POL permite combinar os diferentes componentes funcionais, ativos ou passivos, personalizando cada implementação conforme as necessidades dos operadores da rede, sem ser necessário pagar por funcionalidades indesejáveis ou desnecessárias, garantindo, deste modo, uma redução, acima dos 30 % do seu CapEx [9], quando comparada com as abordagens tradicionais. A título exemplificativo, uma solução que utilize filtros fixos conjugados com *transponders* mais eficientes permite que se utilize uma arquitetura de rede passiva, reduzindo a necessidade de amplificação e de equalização de canal, que se traduz na eliminação do custo associado a EVOAs, WSSs e OCM para monitorização de canal. A POL permite também uma redução dos custos operacionais, garantindo uma redução na pegada espacial e no consumo energético na ordem dos 50 % e dos 70 % [35], respetivamente, em comparação com as alternativas tradicionais. Mais difíceis de quantificar são as reduções de OpEx relacionadas com a instalação, operação e manutenção dos vários elementos que compõem a rede ótica. Às vantagens já enumeradas junta-se a flexibilidade de soluções que é possível obter com a POL, misturando e combinando um vasto leque de funcionalidades, descritas na Figura 1.10, inerentes aos diferentes elementos *pluggable* compactos que a constituem. Desta forma, é possível obter soluções passivas de baixo custo, soluções com elevada funcionalidade ou soluções mistas que, de uma maneira eficiente, cumpram com as necessidades da rede. Passa assim a ser possível introduzir novas funcionalidades através da troca ou adição de novos componentes, preservando o investimento realizado nos componentes inalterados. Deste modo garante-se a otimização de cada aplicação, com um baixo investimento de escalabilidade, pagando por novas funcionalidades apenas à medida que a rede cresce, *pay-as-you-grow* [9] [35].



Figura 1.10 – Conjunto de funcionalidades da Pluggable Optical Layer, adaptado de [35]

De modo sucinto, a *Pluggable Optical Layer* é o mais recente e inovador conceito capaz de combinar o baixo custo inicial, o baixo consumo energético e a pequena pegada ambiental e espacial típicos da solução fixa, com os menores custos operacionais, maior flexibilidade e adaptabilidade, característicos da solução reconfigurável. Por estas razões, a POL é vista como a solução de futuro para redes metropolitanas com topologia em cadeia, em anel e em malha, bem como para ligações ponto-a-ponto e DCI [9] [35].

1.3. OBJETIVOS E ESTRUTURA

Com a presente dissertação pretende-se desenvolver uma ferramenta de planeamento computacionalmente eficiente, baseada em modelos heurísticos, implementada e testada em MatLab, que permita realizar o planeamento, em tempo útil, de uma rede baseada em elementos *pluggable*, com o posterior intuito de ser adaptada e implementada numa plataforma de planeamento profissional já existente, desenvolvida em C++, sob a forma de um *plug-in* desenvolvido em python.

A ferramenta de planeamento deverá ser capaz de selecionar o conjunto de filtros *pluggable*, tendo como objetivo a minimização de um dado parâmetro previamente definido, como o número de filtros utilizados ou o custo da rede. A qualidade dos resultados obtidos está diretamente relacionada com os modelos heurísticos de roteamento e de atribuição de comprimentos de onda desenvolvidos.

Tendo em vista os objetivos anteriormente definidos, a dissertação divide-se em cinco capítulos.

No primeiro capítulo será realizada, através do estado da arte, uma introdução e contextualização do conceito de desagregação da camada ótica no atual panorama das redes óticas.

Primeiramente no Capítulo 2, em serão apresentados os conceitos e metodologias fundamentais, relacionados com o roteamento e com a atribuição de comprimentos de onda. De seguida será feita uma descrição das características e limitações dos filtros fixos *pluggable* que influenciam o processo de planeamento deste tipo de redes. No final, serão propostos um conjunto de novos métodos heurísticos de RWA, que entram em linha de conta com as limitações introduzidas pelos filtros.

No Capítulo 3 será apresentado passo a passo, a ferramenta de planeamento e os algoritmos e métodos desenvolvidos. Esta análise é acompanhada pela aplicação dos vários métodos uma rede em malha simples.

No Capítulo 4 serão analisados os resultados obtidos pela ferramenta de planeamento, testando um conjunto de redes com diferentes características e topologias, segundo diferentes tipos de abordagens.

No Capítulo 5, efetuar-se-á uma síntese geral do trabalho desenvolvido.

2. ANÁLISE TEÓRICA

2.1. NOTA INTRODUTÓRIA

A desagregação da camada ótica é o inovador e disruptivo conceito que prevê a introdução de componentes *pluggable* compactos do lado da camada ótica estrutural tendo como objetivo a desagregação das estruturas óticas mais complexas que compõe as redes metropolitanas atuais.

Construindo uma rede assente em tecnologia *pluggable*, é possível misturar e combinar os diferentes componentes funcionais, ativos ou passivos, personalizando cada implementação conforme as necessidades da rede. Deste modo, deixa de ser necessário pagar por funcionalidades indesejáveis ou desnecessárias. Passa também a ser possível introduzir novas funcionalidades através da troca ou adição de novos componentes, preservando o investimento realizado nos componentes inalterados.

Os elementos reconfiguráveis tradicionais, como os ROADMs, oferecem uma maior flexibilidade e adaptabilidade a futuras mudanças, um planeamento simplificado e baixos custos operacionais, contudo introduzem um elevado CapEx, bem como um maior consumo energético e pegada espacial. Combinando os filtros fixos DWDM com os amplificadores de ganho variável com OSC, EVOAs e componentes como o OCM, é possível construir uma rede baseada em componentes *pluggable* com uma elevada capacidade de tráfego, um baixo custo e um reduzido consumo energético. Contudo, o uso de filtros fixos faz com que parte da flexibilidade da rede seja perdida, aumentando severamente a complexidade das tarefas de planeamento e gestão da rede.

No âmbito desta problemática, no presente capítulo começa-se por apresentar, de um modo genérico, o problema do roteamento e atribuição de comprimentos de onda em redes óticas. De seguida é feita uma análise às principais características e limitações, introduzidas pelos filtros fixos *pluggable* DWDM, que têm influência no planeamento de uma rede ótica. Excluídos de análise estão os filtros fixos CWDM, destinados a um lote limitado de aplicações. Por fim, é proposto um conjunto de métodos heurísticos de roteamento e atribuição de comprimentos de onda, que entrando em consideração com as limitações impostas pelos filtros fixos *pluggable*, são uma adaptação dos conceitos fundamentais de roteamento e atribuição de comprimentos de onda. Os

métodos propostos visam permitir o planeamento eficiente e economicamente viável de uma rede baseada no conceito da desagregação da camada ótica.

2.2. PROBLEMA DE ROTEAMENTO E ATRIBUIÇÃO DE COMPRIMENTOS DE ONDA

Numa rede ótica DWDM o processo de atribuição de comprimentos de onda está diretamente relacionado com o processo de roteamento. Quando se pretende configurar um dado serviço é necessário determinar o caminho (*lightpath* em terminologia anglo-saxónica), entre o nó de origem e o nó de destino da rede ótica, e atribuir um conjunto de comprimentos de onda a cada conexão ótica. Esta tarefa é denominada por problema de roteamento e atribuição de comprimentos de onda (RWA em terminologia anglo-saxónica *Routing and Wavelength Assignment*) [38]. O planeamento de uma rede ótica é realizado tendo em conta a minimização de algum recurso da rede previamente definido, como por exemplo, o custo da rede ou o número de componentes óticos utilizados.

Durante o processo de RWA devem ser atribuídos comprimentos de onda diferentes a todas as conexões que partilhem o mesmo troço de fibra. Esta regra é também denominada por restrição de comprimentos de onda distintos (*Distinct Wavelengths constrain* em terminologia anglo-saxónica). Por sua vez, caso se pretenda planear uma rede sem se recorrer a conversores de comprimentos de onda tem de se considerar que, uma vez atribuído um comprimento de onda a uma dada conexão, este deve ser utilizado em todas as ligações que compõem o caminho, desde o nó de origem até ao nó de destino. Esta restrição é também denominada por continuidade de comprimentos de onda (*Wavelength-Continuity constrain* em terminologia anglo-saxónica) [39].

Tipicamente, as conexões óticas podem ser classificadas como estáticas, incrementais ou dinâmicas. No caso do planeamento de uma rede baseada em filtros fixos DWDM, cada nó deve ser definido de acordo com o tráfego que se pretende passar no fim de vida da rede (EOL em terminologia anglo-saxónica *End-of-Life*). Assim, as conexões que se pretendem planear devem ser conhecidas *a priori* e o tráfego associado a cada conexão deve ser estático. Um problema de RWA aplicado a tráfego estático é também denominado por estabelecimento de caminhos estáticos (SLE em terminologia anglo-saxónica *Static Lightpath Establishment*) [38]. Um problema SLE complexo pode ser dividido em dois sub-problemas menores, cada um resolvido em separado, de um modo eficiente. Primeiramente, os caminhos devem ser definidos segundo técnicas de roteamento (*routing* em terminologia anglo-saxónica), e só depois os comprimentos de onda devem ser atribuídos a cada caminho segundo técnicas de atribuição de comprimentos de onda (*wavelength assignment* em terminologia anglo-saxónica) [40]. Cada uma destas fases pode ainda ser dividida em duas etapas diferentes: a pesquisa e a seleção. Por sua vez, o processo de seleção pode ser realizado segundo duas abordagens algorítmicas distintas: a sequencial e a combinatória [41]. Estas ideias encontram-se esquematizadas na Figura 2.1.

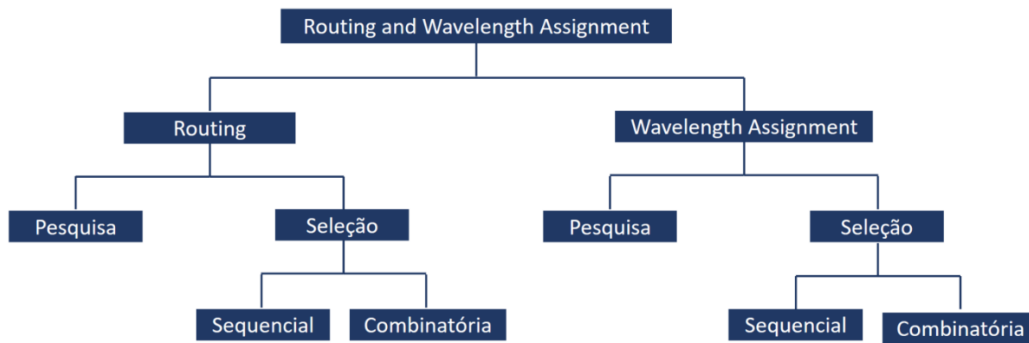


Figura 2.1 – Classificação Funcional dos Algoritmos de RWA

Para planejar uma rede é necessário conhecer a sua topologia física e a quantidade de tráfego que se pretende passar entre os vários nós da rede. Tipicamente esta informação é dada, respetivamente, pela matriz de adjacências e pela matriz de tráfego da rede.

2.2.1. ROTEAMENTO

O objetivo do roteamento é determinar o conjunto de caminhos que suportam o tráfego pedido, tendo como objetivo a minimização de um dado parâmetro da rede, previamente definido. Tipicamente pretende-se minimizar a distância dos vários caminhos, o tráfego a passar na ligação mais carregada, o custo da rede, o número de equipamento utilizado ou o número de secções de fibra que o caminho atravessa, também denominado por número de saltos (*hops* em terminologia anglo-saxónica). Para cenários de tráfego estático em que a adição e remoção de comprimentos de onda é realizada recorrendo a filtros fixos DWDM, devem ser consideradas técnicas de *roteamento* fixas. Assim sendo, uma vez definido o caminho de um dado serviço, este será fixo, não sendo por isso passível de sofrer alterações.

Seguindo a metodologia apresentada na Figura 2.1, o problema de *roteamento* subdivide-se nas etapas de pesquisa e seleção. Durante a etapa de pesquisa são identificados os possíveis caminhos que podem ser atribuídos a cada um dos serviços não roteados. Tipicamente este processo é realizado segundo técnicas de determinação do caminho mais curto (*shortest-path* em terminologia anglo-saxónica) ou dos *k*-caminhos mais curtos, recorrendo a algoritmos conhecidos como o algoritmo de *Dijkstra*, de *Bellman-Ford* ou de *Floyd* [38] [41] [42].

A etapa de Seleção pode ser realizada segundo algoritmos de otimização sequencial ou combinatória. O algoritmo sequencial, também denominado por algoritmo de *greedy*, é mais simples e computacionalmente eficiente, sendo o processo de seleção, como o próprio nome indica, realizado de um modo sequencial. Neste caso, a escolha de um novo caminho é influenciada pelos resultados anteriores (caminhos já atribuídos), contudo esses caminhos, uma vez definidos, não podem ser alterados. Seguindo a abordagem sequencial, a etapa de Seleção subdivide-se ainda em duas fases: a ordem de seleção, responsável por definir a ordem com que os caminhos devem ser roteados, e a regra de decisão, responsável por definir o critério de decisão, ou seja, qual o caminho que deve ser escolhido para cada serviço, quando existe mais do que um caminho possível [41].

De entre as várias métricas utilizadas como ordem de seleção destacam-se [41]:

- *Shortest-first* – os caminhos devem ser analisados por ordem crescente do seu tamanho, ou seja, caminhos mais curtos são analisados primeiro. O tamanho de um caminho pode ser definido como sendo o número de quilómetros de fibra das várias ligações que compõem o caminho ou como sendo o número de *hops* de cada caminho.
- *Longest-first* – define o oposto, ou seja, caminhos mais longos têm prioridade em detrimento dos caminhos mais curtos.
- *Largest-first* – os caminhos devem ser analisados de acordo com a quantidade de tráfego que transportam, dando prioridade aos caminhos mais carregados.
- *Random* – a ordem de seleção dos vários caminhos deve ser aleatória.

Quando existe mais do que um caminho possível, cabe à regra de decisão seleccionar qual dos caminhos deve ser escolhido. As abordagens tradicionais recorrem sobretudo a métricas de balanceamento de tráfego como o método do caminho menos carregado. Nesse caso, de entre possíveis caminhos, deve ser escolhido o caminho composto pelas ligações menos carregadas, ou seja, por onde passa uma menor quantidade de tráfego. Alternativamente, o caminho pode ser escolhido de um modo aleatório utilizando o método *Random*.

Se o *roteamento* for realizado segundo técnicas de seleção combinatória, durante o processo de atribuição dos caminhos aos vários serviços, deve ser tida em conta a interdependência existente entre os vários caminhos. Neste caso podem ser utilizadas duas abordagens distintas: os mecanismos ótimos, com elevada complexidade computacional, e os mecanismos heurísticos, que reduzindo o espaço de combinações é capaz de atingir resultados próximos do ótimo mantendo a complexidade computacional sob níveis aceitáveis. Na abordagem heurística, o algoritmo de *roteamento* é repetidamente executado para diferentes conjuntos de caminhos possíveis, enquanto o número máximo de ligações em todos os caminhos é diminuído através de uma seleção de caminhos alternativos. O processo é repetido até que não haja mais melhorias possíveis [41].

Durante o processo de roteamento dos vários serviços da rede pode se pretender criar mecanismos de proteção contra possíveis falhas nas ligações ou nos nós. Nesse sentido, sempre que for necessário rotear serviços com proteção deve ser reservado um segundo caminho, doravante denominado como caminho de proteção ou *backup*, disjunto do caminho primário, ou seja, que não passe por nenhuma ligação do caminho primário. Este segundo caminho só será utilizado caso alguma ligação do caminho primário falhe. Deste modo, a rede fica protegida contra falhas nas ligações e o seu funcionamento não fica condicionado. Este conceito pode ser estendido para garantir a proteção contra falhas nos nós, sendo nesse caso necessário que o caminho primário e o caminho de *backup* sejam também compostos por nós disjuntos [38].

2.2.2. ATRIBUIÇÃO DE COMPRIMENTOS DE ONDA

Quando se recorre a filtros fixos, o problema de atribuição de comprimentos de onda passa a ser estático. Assim, dado um conjunto de caminhos previamente definidos, os comprimentos de onda devem ser atribuídos garantindo que caminhos que partilhem as mesmas ligações sejam compostos por comprimentos de onda distintos. Tipicamente a atribuição é realizada com o objetivo de se minimizar o número de diferentes comprimentos de onda utilizados [38]. O problema da atribuição de comprimentos de onda pode ser dividido em fase de pesquisa, onde se definem os comprimentos de onda disponíveis para atribuição, e em fase de seleção, que se divide entre a ordem de seleção e a regra de decisão.

A ordem de seleção é responsável por determinar a ordem de atribuição de comprimentos de onda às várias conexões. Tipicamente, as métricas utilizadas neste processo são idênticas às do *roteamento*: *Shortest-first*, *Longest-first*, *Largest traffic-first* e *Random*.

A regra de decisão é responsável por selecionar os comprimentos de onda que devem ser atribuídos aos vários caminhos. De entre as várias regras de decisão destacam-se [41]:

- *First-fit* – os comprimentos de onda são atribuídos de um modo sequencial, do menor para o maior. Sempre que um comprimento de onda não pode ser utilizado é analisado o comprimento de onda seguinte.
- *Most used* – os comprimentos de onda são atribuídos de acordo com o nível da sua atribuição, ou seja, os comprimentos de onda mais atribuídos estão no topo dos candidatos na lista de atribuições. Normalmente este método é utilizado para redes onde já existem comprimentos de onda previamente atribuídos.
- *Least used* – é o oposto, ou seja, os comprimentos de onda menos atribuídos estão no topo dos candidatos na lista de atribuições.
- *Random* – a ordem com que os comprimentos de onda são atribuídos é aleatória.

O problema de atribuição de comprimentos de onda pode também ser resolvido de um modo ótimo, tendo em conta a interdependência de cada seleção. A abordagem mais conhecida é o *graph-coloring* [43]. Também neste cenário a rede e respetivos caminhos têm de ser conhecidos *a priori*, tal como é apresentado na Figura 2.2 (a). Seguidamente deve ser construído um grafo auxiliar $G'(V,E)$, onde cada conexão da rede passa a ser representado como um nó desse mesmo grafo. Caso duas conexões utilizem uma ligação comum, os dois nós do grafo G' que representam esses caminhos devem ser unidos. Depois do grafo estar devidamente preenchido deve-se começar a colorir os nós do grafo, ou seja, deve-se começar a atribuir comprimentos de onda a cada caminho, impondo-se como condição que dois nós adjacentes não podem ser coloridos com a mesma cor, ou por outras palavras, não podem ser atribuídos os mesmos comprimentos de onda [38] [40]. Na Figura 2.2 (b) é ilustrado o grafo auxiliar $G'(V, E)$ gerado tendo em conta a rede e caminhos apresentados em (a).

O *graph-coloring* é um problema NP-completo, sendo por isso o número mínimo de cores necessárias para colorir o grafo $G'(V,E)$ difícil de determinar. Contudo uma abordagem sequencial é capaz de gerar resultados próximos do ótimo. Nesse caso a ordem com que os nós do grafo $G'(V, E)$ são coloridos pode afetar o resultado final [38]. Este tipo de solução é tipicamente implementado recorrendo a um algoritmo de *Greedy*. Nesse caso, os nós são ordenados e sequencialmente coloridos, garantindo-se sempre que nós adjacentes não podem ser coloridos com a mesma cor [42]. O algoritmo tradicional usa como ordem de seleção *Largest number of neighbors-first*, em que os nós com um maior grau, ou seja, maior número de vizinhos, devem ser coloridos primeiro. Contudo podem ser utilizadas outras métricas de seleção, tal como as já apresentadas *Largest-first*, *Longest-first* ou o *shortest-first*. Os critérios ou regras de decisão/atribuição continuam a ser o *First-fit*, *Must used*, *Least used* ou o *Random*.

No exemplo da Figura 2.2, foi utilizada a métrica *Largest number of neighbors-first*, para definir a ordem de seleção, e a métrica *First-fit*, para definir a regra de atribuição.

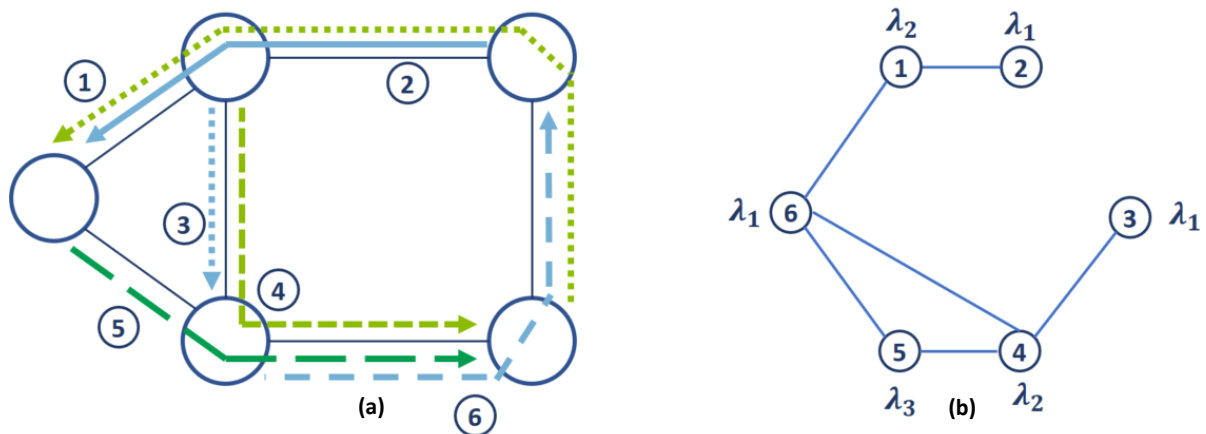


Figura 2.2 – (a) Rede $c/6$ caminhos roteados. (b) Grafo auxiliar $G'(V, E)$ dos caminhos apresentados em (a)

Existe também uma variação do algoritmo de Greedy, denominada DSATUR, em que a escolha do próximo nó a colorir é feita de um modo dinâmico, sendo dada prioridade aos nós que tenham um maior número de vizinhos já coloridos. O DSATUR foi sugerido pela primeira vez em 1979, no contexto de teoria de grafos [44], não existindo referências de que alguma vez tenha sido utilizado e adaptado no contexto das redes óticas.

Deve ainda ser tido em conta que, tanto nos algoritmos de *roteamento* como nos algoritmos de atribuição de comprimentos de onda, é possível combinar mais do que uma ordem de seleção. Por exemplo no caso do *roteamento* pode ser utilizado como métrica principal *Longest-first*, e como métrica secundária *Largest-first*. Assim sendo, caso dois caminhos tenham o mesmo tamanho, é dada prioridade àquele que transportar uma maior quantidade de tráfego.

2.3. FILTROS FIXOS DWDM

Os filtros fixos DWDM são as estruturas mais básicas de adição e remoção de canais de uma rede ótica. Tipicamente, são estruturas passivas e de baixo custo cuja sua funcionalidade é adicionar/remover um conjunto de comprimentos de onda numa dada direção de um nó da rede.

Dada a crescente procura de soluções cada vez mais eficientes, economicamente mais viáveis e assentes no conceito da desagregação da camada ótica, começaram a ser desenvolvidos novos filtros que, sendo compostos por um menor número de portas de adição/remoção de comprimentos de onda, são capazes de filtrar um menor número de canais com reduzidas perdas de inserção. Estes filtros fixos *pluggable* são ainda equipados com um divisor de banda (*band splitter* em terminologia anglo-saxónica) responsável por dividir o sinal de entrada entre as portas de adição/remoção e a porta de expresso. Desta forma, os canais que não são adicionados/removidos pelo filtro fixo, podem ser passados de uma direção do nó para outra, sempre no domínio ótico, com baixas atenuações. Assim, ainda que de um modo limitado, é garantida a capacidade de se estabelecer expressos óticos entre as várias direções do nó utilizando somente estruturas fixas. Na Figura 2.3 é apresentado um esquema ilustrativo de um filtro fixo *pluggable* DWDM capaz de adicionar/remover quatro comprimentos de ondas. Doravante estes filtros serão denominados por *OMD_{x-y}*, sendo *x* o número de comprimentos de onda que são adicionados/removidos e *y* o ID (identificação) de cada filtro. Deste modo é possível distinguir quais os comprimentos de onda que são filtrados pelos diferentes filtros.



Figura 2.3 – Estrutura de um filtro fixo *pluggable* DWDM de 4 canais

Num nó composto exclusivamente por filtros fixos o número de direções de expressos óticos que é possível realizar é limitado e necessita de ser definido *a priori*. Uma vez que estes filtros dispõem de um único porto expresso, cada direção pode estabelecer uma e uma só ligação de expresso com uma outra direção do nó. Dada esta limitação, o número de diferentes direções de expressos óticos que podem ser definidos, utilizando exclusivamente o porto de expresso, num nó composto unicamente por filtros fixos *pluggable* é dado pela expressão (2.1), onde *x* representa o número de direções do nó, doravante denominado como grau do nó.

$$\# \text{ Expressos Óticos} = \frac{\lfloor x \rfloor}{2} \quad (2.1)$$

Por sua vez, as direções ROADM tradicionais permitem que sejam estabelecidos expressos óticos entre todas as direções do nó. Assim, num nó de grau *x*, composto unicamente por direções ROADM, o número de diferentes direções de expressos óticos que é possível estabelecer é dado pela expressão (2.2).

$$\# \text{ Expressos Óticos} = C_2^x \quad (2.2)$$

Na Tabela 2.1 é calculado o número de direções de expresso que é possível estabelecer num nó composto exclusivamente por direções ROADM e o número de direções de expresso que é possível estabelecer, utilizando os portos de expresso dos filtro, num nó composto somente por filtros fixos *pluggable*, variando, entre 2 e 8, o número de direções do nó. Comparando os resultados obtidos, conclui-se que a diferença entre o número de direções de expresso que estas duas arquiteturas conseguem suportar, aumenta à medida que o grau do nó também aumenta.

Tabela 2.1 – Número de direções de expresso que as arquiteturas baseadas em filtros fixos e direções ROADM conseguem suportar para nós com diferentes graus

Grau do Nó		2	3	4	5	6	7	8
Tipo de Arquitectura	Direções ROADM	1	3	6	10	15	21	28
	Filtros Fixos	1	1	2	2	3	3	4

Na Figura 2.4 é apresentado um exemplo que ilustra o diferente número de expressos óticos que é possível estabelecer, em nós de quatro direções, comparando nós composto unicamente por direções ROADM com nós compostos unicamente por filtros fixos.

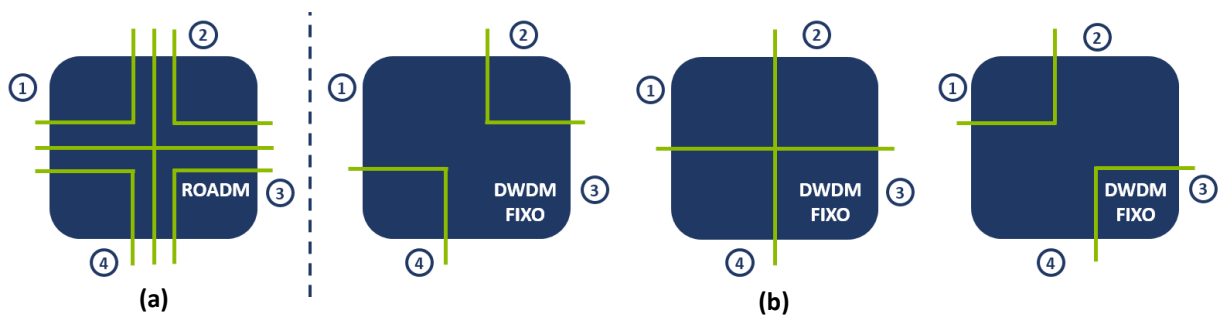


Figura 2.4 – (a) Possíveis direções de expresso utilizando uma ROADM de grau 4. (b) Três possíveis configurações, de direções de expresso, definidas utilizando filtros fixos DWDM, num nó de grau 4

O interesse nos filtros fixos *pluggable* recai no seu baixo custo, contudo à medida que o número de direções do nó aumenta, os filtros fixos podem deixar de ser capazes de estabelecer todas as direções de expresso requeridas. Sempre que pelo menos uma direção do nó necessitar de estabelecer direções de expresso com duas ou mais direções do mesmo nó, o uso de filtros fixos deve ser analisado. Nestes casos diz-se que existe pelo menos uma direção de expresso inválida, isto é, que há pelo menos um par de direções em que, recorrendo exclusivamente ao porto de expresso dos filtros fixos, é impossível estabelecer uma ligação de expresso. Este problema limita o modo como os caminhos dos vários serviços da rede devem ser escolhidos, tornando o problema de roteamento ainda mais complexo. Nestas situações a direção com a qual se necessita de passar um maior número de canais é denominada como direção principal, enquanto as restantes direções são denominadas por direções secundárias.

A primeira solução passa pela Remoção e Readição (*Drop & Re-add* em terminologia anglo-saxónica) dos canais que necessitam de ser passados para as direções secundárias. Neste caso, é estabelecida utilizando o porto

expresso do filtro, uma ligação de expresso com a direção principal, enquanto a ligação com as direções secundárias é realizada através da remoção dos canais no filtro da direção de chegada, seguido da respetiva readição desses canais nos filtros das direções secundárias. Do ponto de vista económico esta é a solução mais eficiente, uma vez que apenas é introduzido o custo dos filtros adicionais que possam ter de ser utilizados para adicionar e remover os canais passados por *Drop & Re-add*. Contudo, sempre que se procede à remoção e readição de um canal estão a ser introduzidas perdas acentuadas nesse canal específico, o que pode originar problemas relacionados com o balanceamento das potências dos canais do sistema, comprometendo, nesses casos, o correto funcionamento da rede. Na Figura 2.5 (a) apresenta-se uma aplicação da solução de *Drop & Re-add*. Neste exemplo pretende-se passar um conjunto de canais provenientes da direção 1 (direção de chegada) para a direção 2 (direção principal) e a direção 3 (direção secundária).

A segunda solução consiste em utilizar uma direção reconfigurável (ROADM), em vez dos filtros fixos *pluggable*, nas direções do nó que necessitem de estabelecer mais do que uma ligação de expresso. Esta alteração introduz custos significativos, contudo é a solução que garante uma melhor adaptabilidade a possíveis modificações na rede. Uma vez realizado o investimento inicial numa direção ROADM, novos canais e ligações expressos podem ser definidos sem que com isso se aumente o custo da rede. Esta solução é ilustrada na Figura 2.5 (b). As direções que não estabeleçam duas ou mais direções de expresso podem continuar a utilizar filtros fixos, sendo possível combinar num nó direções ROADM com direções que utilizem filtros fixos *pluggable*.

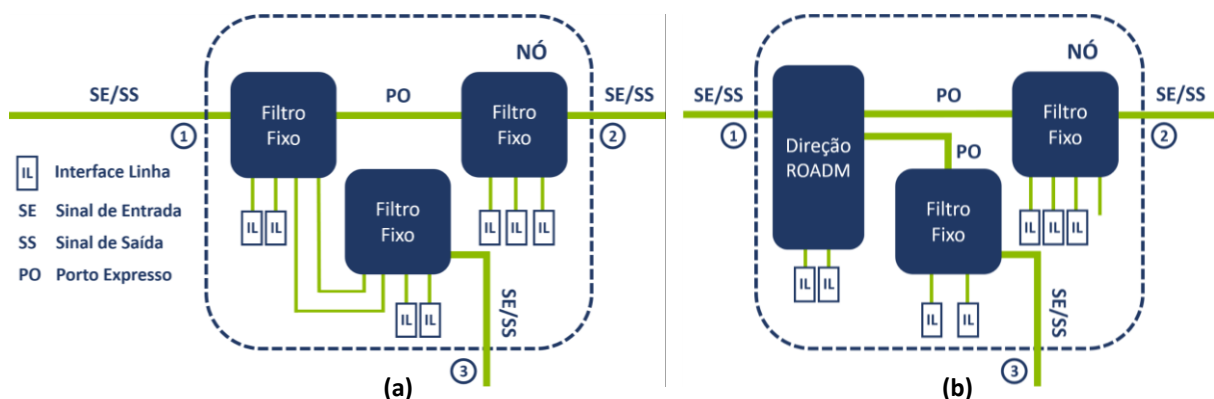


Figura 2.5 – Problema das múltiplas direções de expresso. (a) Solução *Drop & Re-add*.
 (b) Solução c/ introdução de uma direção ROADM

Os filtros fixos *pluggable* podem ainda ser combinados em cascata, permitindo deste modo que se adicione/remova apenas os canais necessários em cada direção. As cascatas de filtros são realizadas ligando a porta de expresso à porta de entrada/saída do filtro seguinte, conforme se ilustra na Figura 2.6. Contudo, quanto maior o número de filtros da cascata, doravante denominado como grau da cascata, maiores serão as atenuações introduzidas. Por outro lado, canais inseridos e removidos em diferentes filtros da cascata estão sujeitos a diferentes atenuações, podendo causar problemas de balanceamento da potência dos canais. Por este motivo o número de filtros que é possível combinar numa cascata, ou seja, o grau da cascata, deve ser limitado.

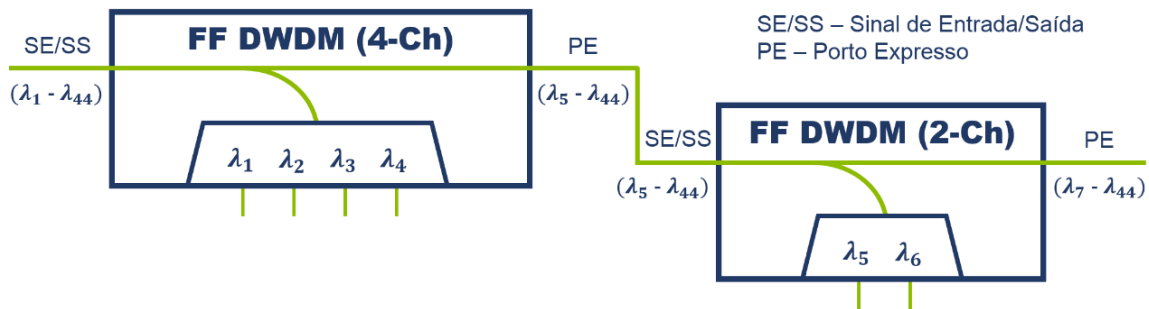


Figura 2.6 – Exemplo de uma cascata de filtros de grau 2

O maior desafio relacionado com o problema da atribuição de comprimentos de onda, numa rede construída utilizando maioritariamente filtros fixos *pluggable*, passa por conseguir escolher, para cada serviço, um comprimento de onda que, uma vez adicionado no nó de partida, seja apenas removido no nó de chegada. Dado que o número de filtros que podem ser combinados em cascata é limitado, a atribuição dos comprimentos de onda deve ser feita de tal modo que exista uma combinação de filtros, capaz de adicionar/remover todos os canais pretendidos numa dada direção do nó, sem que com isso sejam bloqueados canais que deveriam ser passados pelas ligações de expresso. Sempre que isto não seja possível, ou seja, sempre que num dado nó um comprimento de onda seja indevidamente removido deve-se aplicar uma das duas soluções mencionadas aquando do problema das múltiplas direções de expresso.

Assim, recorrendo à solução de *Drop & Re-add*, os canais indevidamente removidos devem ser posteriormente adicionados na outra direção do nó, enquanto os restantes comprimentos de onda devem continuar a ser passados pelo expresso ótico. Na Figura 2.7 apresenta-se uma esquematização o método descrito.

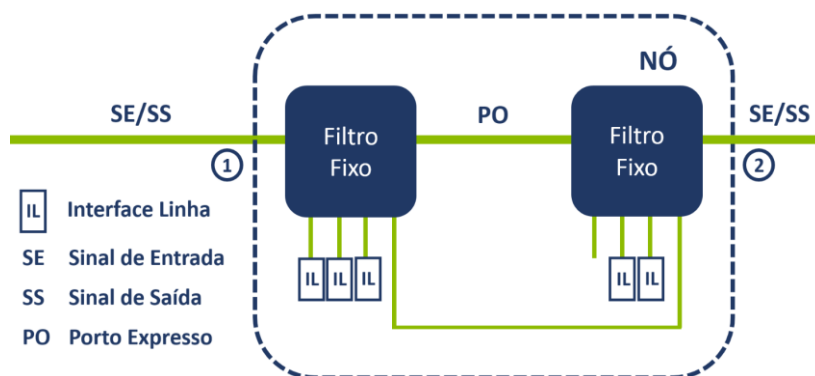


Figura 2.7 – Problema dos comprimentos de onda indevidamente removidos: Solução *Drop & Re-add*

Alternativamente, na direção onde ocorre a indevida remoção de comprimentos de onda, os filtros fixos podem também ser substituídos por uma direção ROADM.

Ainda que no presente trabalho não sejam realizados cálculos de performance ótica que validem as soluções escolhidas, considerou-se como solução alternativa o *Drop & Re-add* com Regeneração. Neste caso, depois da remoção do canal na direção de chegada, este deve ser regenerado antes de ser readicionado na direção de saída, passando assim a ser necessário introduzir duas interfaces linha adicionais por canal (equivalente a um 3R). Esta solução foi aplicada ao problema das múltiplas direções de expresso, de modo a garantir a equalização dos vários

canais, e ao problema dos comprimentos de onda indevidamente removidos, de modo a melhorar a performance dos canais removidos e readicionados. Os resultados são apresentados na Figura 2.8.

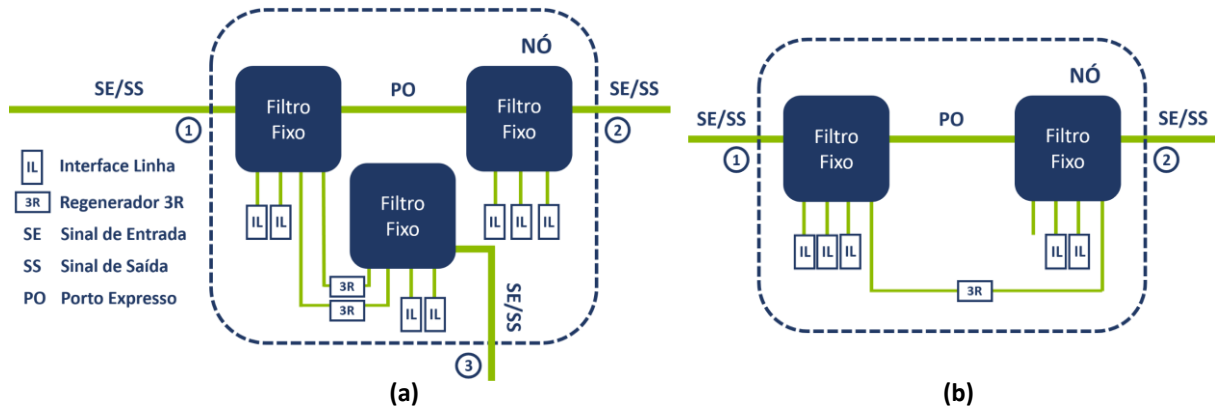


Figura 2.8 – Solução de Drop & Re-add: (a) problema das múltiplas direções de expresso. (b) problema dos comprimentos de onda indevidamente removidos

Contudo, deve ser tido em conta que o custo adicional de uma solução que use regeneração varia com o tipo de *transponders* e ritmos de transmissão utilizados, bem como com o número de canais que têm de ser regenerados, contudo, deste modo passa a ser possível assegurar melhores performances óticas, enquanto os problemas relacionados com o balanceamento de potências são também evitados.

2.4. MÉTODOS HEURÍSTICOS DE RWA PROPOSTOS

Baseada no conceito de desagregação das estruturas óticas complexas, a *Pluggable Optical Layer* tem como objetivo fornecer soluções economicamente viáveis, capazes de suportar elevadas capacidades de tráfego, com um baixo consumo energético e uma reduzida pegada espacial. Sempre que possível, a adição e remoção dos diferentes canais da rede deve ser feita recorrendo a filtros fixos, passivos e de baixo custo, em vez dos tradicionais módulos reconfiguráveis.

Contudo, conforme foi apresentado na secção 2.3, os filtros fixos introduzem um novo conjunto de limitações ao nível do roteamento e da atribuição de comprimentos de onda, fazendo com que as metodologias tradicionais apresentadas na secção 2.2, quando aplicadas a este tipo de redes, gerem soluções pouco eficientes, que recorrem a um número excessivo de regeneradores, direções ROADM e/ou de ligações de *Drop & Re-add*.

Nesta secção são apresentadas um conjunto de heurísticas desenvolvidas tendo em vista a minimização do número de direções inválidas de expresso e do número de diferentes comprimentos de onda utilizados. Deste modo, é possível gerar soluções eficazes, que garantam uma maior eficiência económica.

Durante a análise dos métodos de *roteamento*, o comprimento do caminho corresponderá ao número de *hops* e não ao comprimento de fibra. Assim, o caminho mais curto é aquele que é composto por um menor número de *hops*. Analogamente, o caminho mais longo é aquele que é composto por um maior número de *hops*.

2.4.1. MÉTODOS DE ROTEAMENTO

Em redes com topologia em anel todos os nós são de grau 2 logo, independentemente do tipo de método *roteamento* utilizado, nunca serão definidas direções de expresso inválidas. Neste caso, o algoritmo de *roteamento* tem por objetivo gerar a solução que garanta o melhor balanceamento de tráfego possível, ou seja, os caminhos devem ser escolhidos de modo a minimizar a diferença entre a quantidade de tráfego que passa na secção de fibra mais e menos carregada da rede.

De modo a contabilizar a quantidade de tráfego que passa por cada secção de fibra, é criada uma tabela auxiliar, doravante denominada por tabela de tráfego por secção de fibra (TTSF), constituída por 3 colunas e tantas linhas quanto o número de secções de fibra da rede. Nesta tabela, as duas primeiras colunas são utilizadas para identificar a fibra, armazenando o ID dos nós finais de cada secção de fibra, enquanto a terceira coluna guarda o número de canais que passam em cada secção fibra. Caso existam serviços previamente roteados a TTSF deve ser inicializada tendo em conta os caminhos previamente escolhidos. A partir desta fase, sempre que se proceder ao roteamento de um novo serviço, a TTSF deve ser atualizada de acordo com o caminho escolhido.

Durante a fase de roteamento os serviços devem ser roteados pelo caminho mais curto. Caso os dois caminhos existentes tenham o mesmo comprimento, de modo a balancear o tráfego da rede, o serviço deve ser encaminhado pelo caminho menos carregado. A ordem com que os serviços são roteados é definida pela métrica *shortest-first*. Deste modo, serviços com caminhos mais curtos são encaminhados primeiro.

Caso o serviço tenha proteção, o caminho não atribuído fica reservado como caminho de *backup*. O algoritmo proposto está detalhado na Figura 2.9.

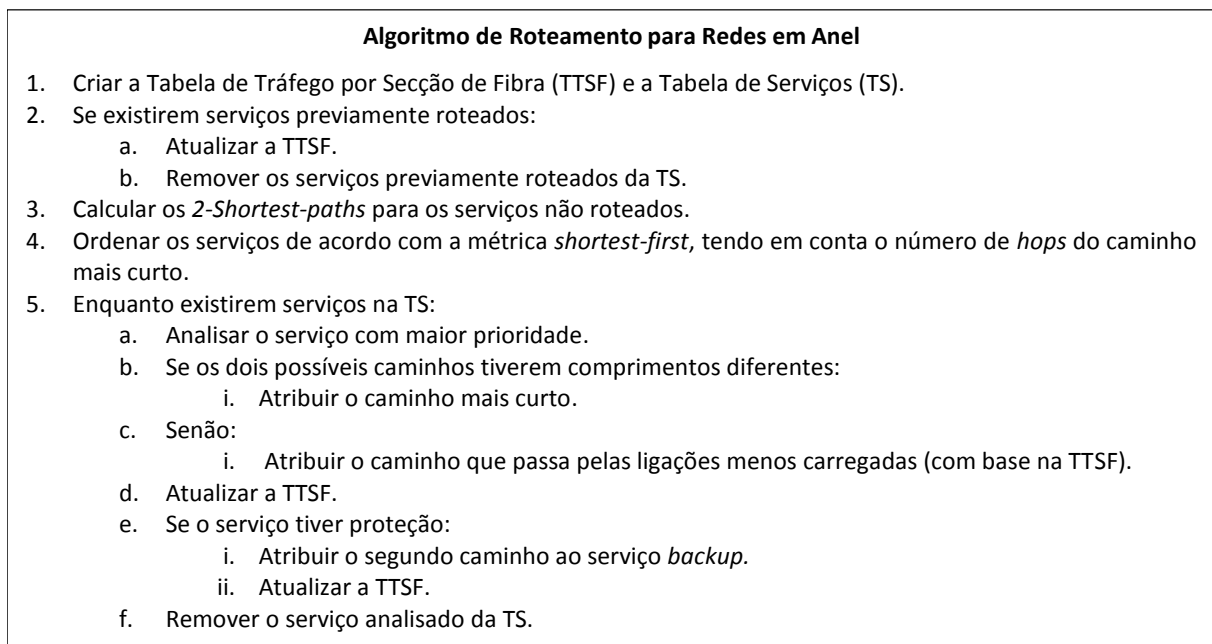


Figura 2.9 – Algoritmo de Roteamento para redes em Anel

Em redes com topologia em malha os métodos de *roteamento* baseados no caminho mais curto e no balanceamento de tráfego conduzem geralmente a soluções pouco eficientes. Como os filtros fixos limitam o

número de direções de expresso que é possível estabelecer, os serviços devem ser encaminhados com o objetivo de minimizar o número de diferentes direções de expresso que são estabelecidas e conseqüentemente minimizar o número de direções de expresso inválidas criadas. Assim, é preferível escolher um caminho mais longo que utilize somente direções de expresso já definidas, do que escolher um caminho mais curto que necessite de estabelecer novas direções de expresso. Com base na ideia apresentada foi desenvolvido o modelo heurístico descrito na Figura 2.10.

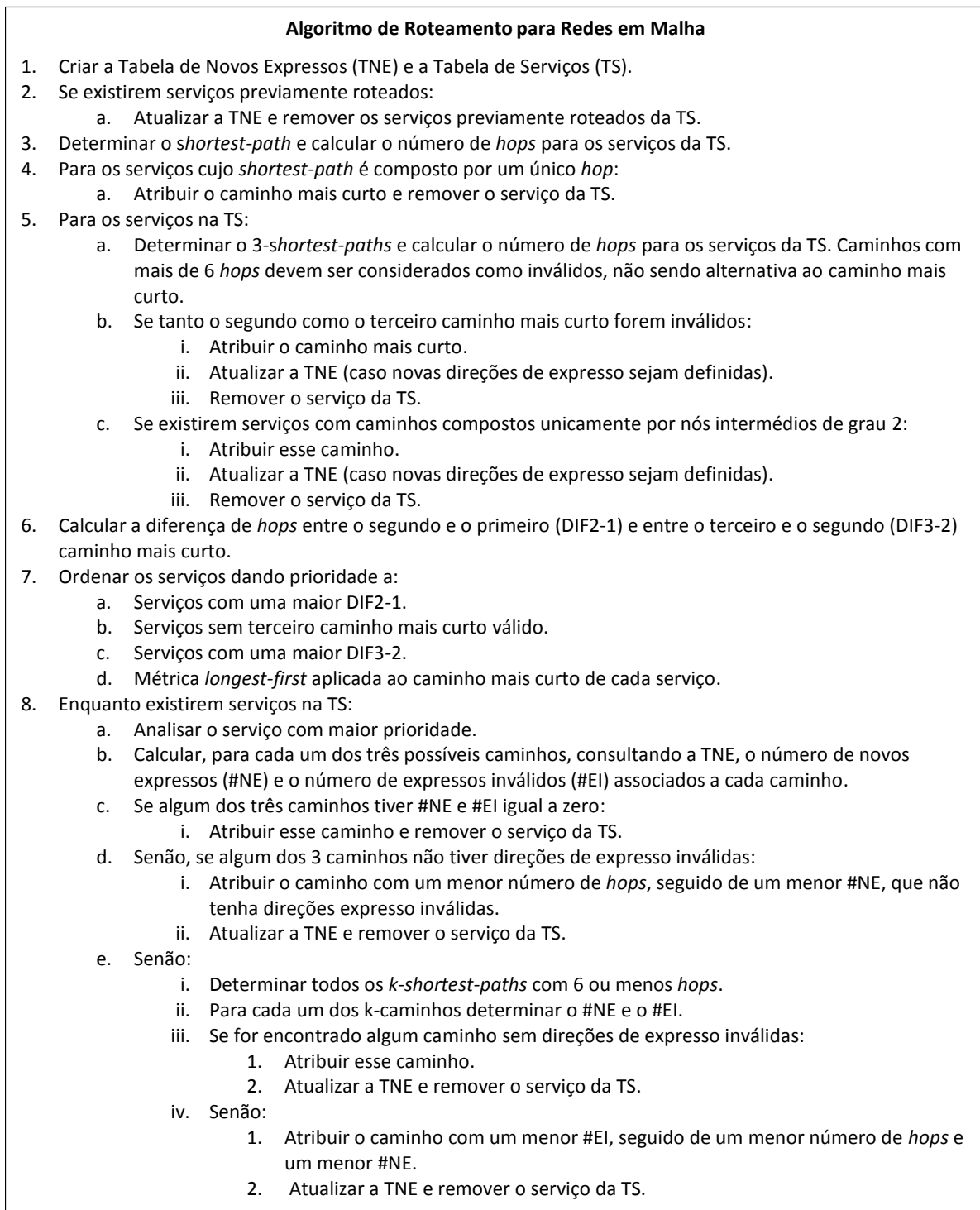


Figura 2.10 – Algoritmo de Roteamento para redes em Malha

Neste algoritmo, a primeira fase passa por calcular o caminho mais curto para cada serviço. Todos os serviços que tiverem caminhos compostos por um único *hop* devem ser os primeiros a ser atribuídos, uma vez que estes caminhos não necessitam de estabelecer nenhuma direção de expresso. Numa segunda fase, deve ser calculado, para cada um dos serviços não roteados, os 3 caminhos mais curtos. Todos os serviços que tiverem um caminho em que todos os nós intermédios tenham apenas duas direções devem também ser atribuídos, isto porque, em nós de grau 2, apenas uma direção de expresso pode ser definida, não existindo o risco de se vir a definir direções inválidas de expresso. Depois desta fase, os serviços ainda não roteados devem ser ordenados tendo em conta a diferença entre o comprimento do caminho mais curto e o comprimento dos restantes caminhos existentes. Assim, um serviço que possa ser roteado por um caminho de 3 *hops* ou por um caminho de 5 *hops*, tem prioridade face a um serviço que pode ser roteado por dois caminhos distintos, ambos compostos por 3 *hops*. Deste modo, são criadas as primeiras direções de expresso que garantem que, serviços que poderiam vir a ser roteados por caminhos longos sejam roteados pelos caminhos mais curtos. Os serviços em que a diferença de comprimento dos vários caminhos não é significativa, podem ser mais tarde roteados, com base no conjunto de direções de expresso já criadas, uma vez que, mesmo que não seja possível rotear o serviço pelo caminho mais curto, como os caminhos alternativos têm aproximadamente o mesmo tamanho que o caminho mais curto, nunca são introduzidas grandes implicações do ponto de vista de planeamento da rede.

O método apresentado usa uma tabela auxiliar, doravante denominada como Tabela de Novos Expressos (TNE), responsável por guardar as novas direções de expresso que são estabelecidas à medida que os serviços vão sendo roteados. A TNE é composta por 3 colunas. A primeira coluna guarda o ID do nó onde ocorre o expresso e a segunda e terceira coluna guardam a direção de entrada/saída do expresso.

Caso se pretenda planejar uma rede em que pelo menos um dos serviços tenha proteção, o algoritmo de *roteamento* para redes em malha deve ser aplicado uma primeira vez para determinar os caminhos primários dos vários serviços e só depois repetido para os serviços com proteção, de modo a determinar os respetivos caminhos de *backup*. Da segunda vez que o algoritmo é corrido, é necessário introduzir uma nova condição que garanta que os caminhos de proteção sejam disjuntos dos caminhos primários, previamente definidos. Nestes cenários, em vez de se ser criada uma nova tabela para as novas direções de expresso, deve ser utilizada a TNE gerada durante o *roteamento* dos caminhos primários.

2.4.2. MÉTODOS DE ATRIBUIÇÃO DE COMPRIMENTOS DE ONDA

Para realizar a atribuição de comprimentos de onda são propostos três métodos diferentes. Em ambos os métodos foi aplicada a regra de decisão de *first-fit*, pelo que, é sempre atribuído o menor comprimento de onda disponível. No entanto esta métrica não é mandatária, podendo os algoritmos ser adaptados a uma regra de decisão diferente.

O primeiro método utilizado na atribuição de comprimentos de onda recorre às tradicionais métricas *longest-first*, para ordenar os serviços do mais longo para o mais curto, e *largest-first*, para, sempre que houver

mais do que um serviço com o mesmo número de *hops*, ordená-los tendo em conta a quantidade de tráfego que transportam. Nesta análise, a quantidade de tráfego é medida tendo em conta o número de canais reservados para cada serviço. Quando os serviços estiverem ordenados, os comprimentos de onda começam a ser atribuídos de um modo sequencial, do serviço mais prioritário para o menos prioritário. Caso um serviço tenha proteção, durante o processo de atribuição, é necessário escolher um comprimento de onda que possa ser encaminhado tanto pelo caminho primário como pelo caminho de *backup*. A cada serviço devem ser atribuídos tantos comprimentos de onda, quanto o número de canais reservados.

De modo a garantir que todos os serviços que partilham a mesma ligação física têm comprimentos de onda distintos, é necessário utilizar uma tabela auxiliar, doravante denominada como Tabela de Ocupação das Fibras (TOF), responsável por contabilizar os comprimentos de onda que passam em cada secção de fibra. Nesta tabela, as duas primeiras colunas são utilizadas para identificar o troço de fibra, armazenando o ID dos nós de extremidade, enquanto as restantes colunas guardam o ID dos comprimentos de onda que passam nesse respetivo troço. Os comprimentos de onda que podem ser atribuídos a cada serviço são determinados pelo vetor dos comprimentos de onda disponíveis (VCOD).

Na Figura 2.11 é apresentado de um modo detalhado o algoritmo heurístico desenvolvido tendo em conta as características descritas.

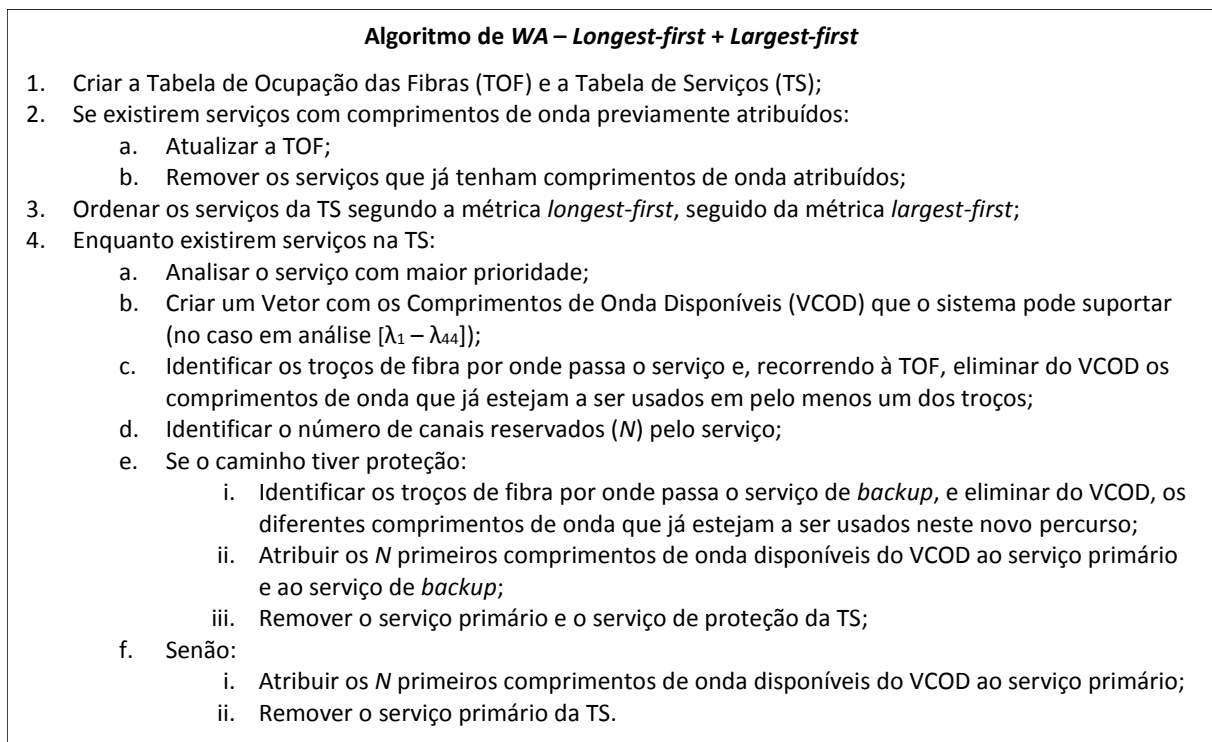


Figura 2.11 – Algoritmo de WA (Longest-first + Largest-first)

Tanto o segundo como o terceiro método proposto para a atribuição de comprimentos de onda baseiam-se na metodologia de *graph-coloring*, apresentada na secção 2.2.

Ambos os métodos recorrem a um grafo auxiliar $G'(V,E)$ que permite identificar as dependências existentes entre os vários serviços. Cada nó deste grafo corresponde a um diferente serviço, havendo uma associação direta entre o ID do nó e o ID do serviço. Desta forma, o nó 3 do grafo corresponde ao serviço de ID 3. Assim, dois nós do grafo devem estar ligados se e só se os respetivos serviços que representam utilizarem pelo menos uma secção comum de fibra. Na Figura 2.12 vem detalhado o algoritmo desenvolvido para construir o grafo auxiliar $G'(V,E)$. Este algoritmo utiliza uma tabela auxiliar idêntica à TOF, denominada por Tabela de Serviços por Fibra (TSF), que em vez de guardar os comprimentos de onda que passam em cada secção de fibra, guarda apenas o ID desses mesmos serviços. Durante a fase de construção do grafo $G'(V,E)$ não é feita qualquer distinção entre os serviços com ou sem comprimentos de onda previamente definidos.

A diferença entre o segundo e o terceiro método propostos, prende-se pelo modo como os comprimentos são depois atribuídos aos vários serviços. Ambos os métodos baseiam-se em algoritmos heurísticos, aplicados de um modo sequencial, tendo em conta um conjunto de métricas responsáveis por definir a ordem pela qual os serviços devem ser coloridos. Serviços com proteção são tratados como dois serviços diferentes, sendo por isso representados no grafo $G'(V,E)$ por dois nós distintos. Um desses nós está associado ao caminho primário e outro ao caminho de *backup*, contudo estes dois nós devem ser atribuídos simultaneamente, servindo esta distinção apenas para melhor identificar as dependências dos vários caminhos. O comprimento de onda escolhido tem de ser válido para ambos os caminhos.

Construção do $G'(V,E)$ para o <i>Graph-Coloring</i>
<ol style="list-style-type: none"> 1. Receber a Tabela de Serviços (TS) e a Tabela de Serviços por Fibra (TSF) devidamente preenchida. 2. Criar uma matriz de adjacências (A), inicializada a 0, de dimensões $n \times n$ em n corresponde ao número de serviços. 3. Criar um ponteiro (P1) para a primeira entrada da TS. 4. Enquanto o P1 apontar para uma entrada válida da TS: <ol style="list-style-type: none"> a. Criar um ponteiro (P2) para a primeira entrada da TSF. b. Enquanto o P2 apontar para uma entrada válida da TSF: <ol style="list-style-type: none"> i. Se o serviço apontado por P1 passar na fibra apontada por P2: <ol style="list-style-type: none"> 1. Criar um ponteiro (P3) para a entrada seguinte à apontada por P1 na TSF. 2. Se o serviço apontado por P3 também passar na fibra apontada por P2: <ol style="list-style-type: none"> a. Atualizar a matriz A, marcando os serviços apontados por P1 e P3 como adjacentes. 3. Incrementar P3. ii. Incrementar P2. c. Incrementar P1. 5. Construir o grafo $G'(V,E)$ usando a matriz de adjacências.

Figura 2.12 – Algoritmo utilizado para construir grafo $G'(V,E)$ para o método de *graph-coloring*

No segundo método a prioridade dos vários serviços é definida pelas métricas: *largest number of neighbors-first*, *largest-first* e *longest-first*. O algoritmo desenvolvido vem detalhado na Figura 2.13.

No terceiro método a atribuição deixa de ser feita de um modo estático, para passar a ser dinâmica. Neste método é dada prioridade ao serviço composto por um maior número de vizinhos já coloridos (métrica *largest number of neighbors-first*). Assim, após cada atribuição, o número de vizinhos já coloridos é atualizado e os serviços voltam a ser ordenados. O algoritmo proposto vem detalhado na Figura 2.14.

Algoritmo de WA – *Graph-coloring*

1. Receber a Tabela de Serviços (TS) e o Grafo $G'(V,E)$.
2. Se existirem serviços que tenham os comprimentos de onda previamente definidos:
 - a. Remover esses serviços da TS.
3. Calcular o número de vizinhos de cada serviço, ou seja, o grau de cada nó do grafo $G'(V,E)$.
4. Ordenar os serviços da TS dando prioridade a:
 - a. Métrica *largest number of neighbors-first*.
 - b. Métrica *largest-first*.
 - c. Métrica *longest-first*.
5. Enquanto existirem serviços na TS:
 - a. Analisar o serviço com maior prioridade.
 - b. Criar um Vetor com os Comprimentos de Onda Disponíveis (VCOD) que o sistema pode suportar (no caso em análise $[\lambda_1 - \lambda_{44}]$).
 - c. Identificar o número de canais reservados (N) pelo serviço.
 - d. Remover os comprimentos de onda do VCOD que já tenham sido atribuídos aos serviços vizinhos.
 - e. Se o serviço tiver proteção:
 - i. Remover os comprimentos de onda do VCOD que já tenham sido atribuídos aos serviços vizinhos.
 - ii. Atribuir os N primeiros comprimentos de onda disponíveis do VCOD ao serviço primário e ao serviço de *backup*.
 - iii. Remover o serviço primário e o serviço de *backup* da TS.
 - f. Senão:
 - i. Atribuir os N primeiros comprimentos de onda disponíveis do VCOD ao serviço primário.
 - ii. Remover o serviço primário da TS.

Figura 2.13 – Algoritmo de WA (*graph-coloring*)

Algoritmo de WA – *Graph-coloring adaptativo*

1. Receber a Tabela de Serviços (TS) e o Grafo $G'(V,E)$.
2. Se existirem serviços que tenham os comprimentos de onda previamente definidos:
 - a. Remover esses serviços da TS.
3. Calcular o número de vizinhos de cada serviço, ou seja, o grau de cada nó do grafo $G'(V,E)$.
4. Calcular o número de vizinhos já coloridos de cada serviço.
5. Enquanto existirem serviços na TS:
 - a. Ordenar os serviços da TS dando prioridade a:
 - i. Métrica *largest number of colored neighbors-first*.
 - ii. Métrica *largest number of neighbors-first*.
 - iii. Métrica *largest-first*.
 - iv. Métrica *longest-first*.
 - b. Analisar o serviço com maior prioridade.
 - c. Criar um Vetor com os Comprimentos de Onda Disponíveis (VCOD) que o sistema pode suportar (no caso em análise $[\lambda_1 - \lambda_{44}]$).
 - d. Identificar o número de canais reservados (N) pelo serviço.
 - e. Remover os comprimentos de onda do VCOD que já tenham sido atribuídos aos serviços vizinhos.
 - f. Se o serviço tiver proteção:
 - i. Remover os comprimentos de onda do VCOD que já tenham sido atribuídos aos serviços vizinhos.
 - ii. Atribuir os N primeiros comprimentos de onda disponíveis do VCOD ao serviço primário e ao serviço de *backup*.
 - iii. Remover o serviço primário e o serviço de *backup* da TS.
 - g. Senão:
 - i. Atribuir os N primeiros comprimentos de onda disponíveis do VCOD ao serviço primário.
 - ii. Remover o serviço primário da TS.
 - h. Atualizar o número de vizinhos já coloridos de cada serviço.

Figura 2.14 – Algoritmo de WA (*graph-coloring adaptativo*)

Se em vez da regra de decisão *first-fit* se pretendesse utilizar uma outra métrica, antes da atribuição dos comprimentos de onda aos respetivos serviços, seria necessário ordenar o vetor com os comprimentos de onda disponíveis (VCOD), de acordo com a métrica escolhida.

3. FERRAMENTA DE PLANEAMENTO

3.1. NOTA INTRODUTÓRIA

Combinando o conceito da desagregação da camada ótica com os filtros fixos *pluggable* de baixo custo é possível construir redes com elevada capacidade e um reduzido custo e consumo energético. Contudo, a forte interdependência existente entre os caminhos que são escolhidos, os comprimentos de onda que são atribuídos e a consequente escolha dos filtros apropriados, faz do planeamento uma tarefa complexa, pouco otimizada e com uma elevada propensão de erros, intensificando-se para redes com topologia em malha.

De modo a dar resposta a esta problemática, foi desenvolvida e implementada em *Matlab* uma ferramenta de planeamento computacionalmente eficiente, baseada nos modelos heurísticos de RWA apresentados na secção 2.4, capaz de determinar os caminhos e os comprimentos de onda de cada serviço, e de escolher os filtros adequados aos vários nós da rede, garantindo, em tempo útil, uma solução ótima ou próximo do ótimo. A ferramenta foi desenvolvida por blocos lógicos, doravante denominados como camadas, que implementam diferentes funcionalidades. No presente capítulo é feita uma análise detalhada às várias camadas implementadas, sendo a explicação das mesmas acompanhada de uma aplicação prática a uma rede em malha pouco complexa. No Anexo 1, Figura A1.1, é apresentado o fluxograma genérico, contendo apenas as camadas implementadas da ferramenta de planeamento.

De modo a agilizar o processo de planeamento, durante o desenvolvimento da ferramenta, foram assumidos um conjunto de pressupostos e premissas. As suposições tomadas estão diretamente relacionadas com as limitações físicas impostas pelo portefólio de equipamento (elementos de rede) considerado. O facto de a própria ferramenta de planeamento ter um âmbito (*scope* em terminologia anglo-saxónica) muito específico e bem definido, permitiu adaptar e simplificar o modo como os algoritmos foram desenvolvidos e aplicados, contudo, uma vez que não são executados cálculos óticos, não é possível verificar que, tendo em conta a configuração escolhida para cada nó (nomeadamente as combinações de filtros fixos *pluggable*) os caminhos atribuídos a cada serviço são válidos do ponto de vista ótico. Com o objetivo de evitar que soluções com elevada probabilidade de

serem óticamente inválidas sejam escolhidas, durante o processo de seleção de caminhos, comprimentos de onda e filtros fixos *pluggable*, foi limitado o lote de opções e combinações que podem ser realizadas.

Todos os filtros fixos *pluggable* introduzem atenuação logo, sempre que são utilizados em cascata, o aumento do número de filtros traduz-se num conseqüente aumento das perdas introduzidas. Uma vez que a atenuação introduzida durante a adição/remoção de canais é diferente da atenuação que é introduzida na porta de expresso, os canais adicionados/removidos em diferentes níveis da cascata estão sujeitos a diferentes atenuações. Deste modo, quanto maior for o grau da cascata, maior o desbalanceamento de potência dos canais. Por esse motivo, no decorrer do planeamento, só serão consideradas soluções utilizando cascatas com um máximo de 3 graus.

Limitar o número de filtros que podem ser combinados em cascata pode levar a que, para um dado cenário, não exista nenhuma combinação de filtros capaz de assegurar a adição e remoção de todos os canais pretendidos sem com isso bloquear canais que deveriam ser passados por expresso. Neste tipo de problemas será seguido por padrão (*default* em terminologia anglo-saxónica) a abordagem de *Drop & Re-add*. Posteriormente, caso se verifique que a remoção dos canais na direção de chegada e a conseqüente adição na direção de partida conduza a um desbalanceamento de potência que comprometa, do ponto de vista ótico, a viabilidade do serviço, deve ser considerado o uso de regeneração ou de direções ROADM. Em termos conceptuais, as três soluções foram apresentadas na secção 2.3.

Devido às limitações físicas dos filtros fixos *pluggable*, cada direção do nó pode estabelecer uma e uma única direção de expresso. Por *default* considera-se que, sempre que uma direção do nó necessitar de realizar mais do que uma direção de expresso, a direção que transportar um maior número de canais será considerada válida e enquanto as restantes serão consideradas inválidas. As direções de expresso inválidas devem ser estabelecidas por *Drop & Re-add* com regeneração. Caso se pretenda que todos os caminhos, desde o momento em que são adicionados até ao momento em que são removidos, sejam passados no domínio ótico, ou seja, que a rede continue a ser transparente, pode ser utilizada uma direção ROADM em substituição dos filtros fixos e conseqüentes regeneradores, nas direções dos nós que necessitem de estabelecer mais do que uma ligação de expresso. Pode ainda ser escolhida uma solução mista. Nesse caso, todos os nós da rede onde forem definidas direções de expresso inválidas serão analisados de modo independente, devendo ser escolhida a solução que, caso a caso, seja economicamente mais viável. De notar que, enquanto o custo das direções ROADM é independente da largura de banda dos vários serviços, o custo dos *transponders* de 10 G e 100 G variam bastante. Os fatores de custo dos diferentes componentes considerados na ferramenta de planeamento são apresentados no Anexo 2.

De modo a evitar soluções inválidas, foi ainda definido um limite máximo para o comprimento dos caminhos que poderiam ser atribuídos a cada serviço. Assim todos os caminhos com mais de 6 *hops* foram excluídos de análise, isto porque, quanto maior for o número de secções de fibra que um dado sinal necessitar de atravessar, pior será a relação sinal ruído ótica (OSNR em terminologia anglo-saxónica *Optical Signal-To-Noise Ratio*) e mais significativos serão os efeitos não lineares.

A ferramenta de planeamento foi projetada para funcionar de um modo iterativo, assim, sempre que no fim do planeamento existirem canais a serem passados por *Drop & Re-add*, o algoritmo de atribuição de comprimentos de onda deve ser repetido, sendo dada, na iteração seguinte, prioridade de atribuição a esses mesmos serviços. O processo iterativo termina quando for encontrada uma solução que utilize somente filtros fixos sem *Drop & Re-add* ou quando forem feitas tantas iterações quanto o número máximo definido no início do planeamento.

3.2. CARACTERIZAÇÃO DA REDE, DOS SERVIÇOS E DO EQUIPAMENTO

A primeira camada da ferramenta de planeamento é responsável por tratar e armazenar os dados provenientes de um conjunto de ficheiros de entrada, com formato *xlsx* (folha de cálculo, *Excel*), a partir dos quais é possível caracterizar a rede e os serviços que se pretende planear.

A topologia física da rede vem descrita no ficheiro de entrada *topology.xlsx*, através da matriz de adjacências da rede, de dimensões $n \times n$, em que n representa o número de nós da rede. Os vários elementos da matriz de adjacências representam-se por a_{ij} , em que i e j são nós da rede. Então, caso exista conexão física entre o nó i e o nó j , $a_{ij} = 1$, caso contrário, $a_{ij} = 0$. A representação da topologia física da rede é realizada através de um grafo $G(V, E)$, em que:

- V (em terminologia anglo-saxónica *vertices*) designa o conjunto de vértices ou nós da rede.
- E (em terminologia anglo-saxónica *edges*) designa o conjunto de arestas ou ligações entre os vários nós da rede.

Na Figura 3.1 apresenta-se a título exemplificativo uma matriz de adjacências provenientes do ficheiro *topology.xlsx* e respetiva topologia física da rede. Doravante esta rede será utilizada e denominada como rede de teste.

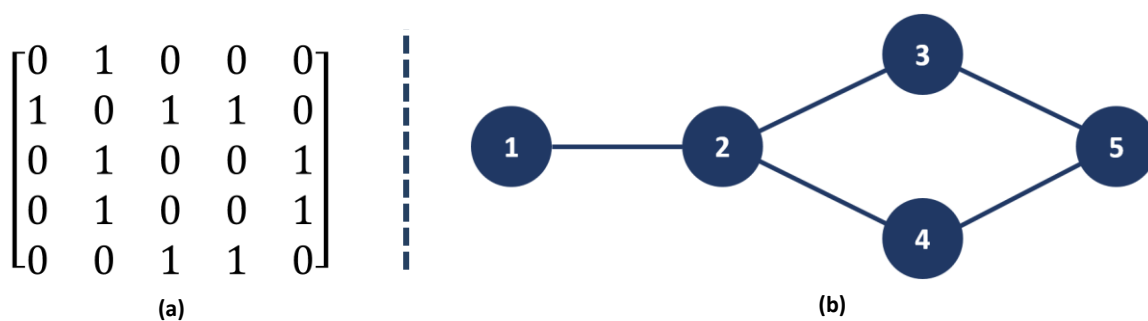


Figura 3.1 – (a) Matriz de adjacências. (b) Topologia física da rede

Os equipamentos disponíveis para planeamento são descritos no ficheiro de entrada *equipment.xlsx*. As diferentes famílias de componentes vêm divididas pelas diferentes folhas do ficheiro. Todos os equipamentos têm associado um nome, que os identifica, e um fator de custo. O fator custo, apresentado na expressão (3.1), visa comparar o preço de cada equipamento tendo em conta o preço de um dado equipamento de referência, neste caso definido como sendo o filtro OMD2- γ . Adicionalmente, os filtros são também caracterizados pelos parâmetros de atenuação, número de canais filtrados e os respetivos IDs desses canais.

$$\text{Fator de Custo de } x = \frac{\text{Preço do equipamento } x}{\text{Preço do equipamento de referência}}, x: \text{nome do equipamento} \quad (3.1)$$

Para o desenvolvimento da ferramenta de planeamento foi considerado o seguinte portefólio de equipamento:

- Filtros Fixo *pluggable* DWDM das subfamílias OMD2-y, OMD4-y, OMD8-y e OMD44-y. Estes filtros têm um espaçamento entre canais de 100 GHz e conseguem garantir ritmos de transmissão de até 400 GB/s.
- Direção ROADM genérica, capaz de estabelecer ligações de expresso ótico com todas as outras direções do nó. As características e a performance ótica deste componente não foram modeladas.
- Dois *Transponders* genéricos, um com uma interface linha de 10 Gb/s e outro com uma interface linha de 100 Gb/s.

No Anexo 2, são apresentadas as tabelas importadas do ficheiro *equipment.xlsx* com as informações do portefólio de equipamento acima descrito. Novas famílias de componentes, como amplificadores, EVOAs e WSS, poderão ser posteriormente adicionadas.

Para descrever cada serviço é necessário identificar os nós finais (*end-nodes* em terminologia anglo-saxónica) da conexão, a largura de banda da interface linha utilizada e o número de canais reservados. Um serviço com este nível de caracterização é mapeado na ferramenta de planeamento como um serviço de *Tipo_A = 0* e *Tipo_B = 0*. Caso o serviço seja de *Tipo_A = 1*, em vez dos *end-nodes*, vem definido o caminho completo do serviço. Se o serviço for de *Tipo_B = 1*, os comprimentos de onda dos canais reservados vêm previamente definidos. No caso de existirem serviços com proteção, o caminho primário e o caminho de *backup* são interpretados como dois serviços distintos associados através da coluna denominada por Proteção. Assim, tanto o serviço do caminho primário como o serviço do caminho de *backup* são identificados pelo mesmo código numérico, correspondente ao ID do serviço primário. Na Tabela 3.1 apresentam-se, a título exemplificativo, algumas configurações de serviços, tal como estes são importados pelo ficheiro *services.xlsx*.

Tabela 3.1 – Tabela de serviços, importado do ficheiro *services.xlsx*

ID	Tipo_A	Caminho				Tipo_B	Interface	Canais	Comprimentos de Onda			Proteção
1	1	1	2	4		0	10G	3				0
2	1	1	2	4	5	1	10G	2	1	2		0
3	0	1	3			1	10G	1	1			0
4	1	2	4	5		0	10G	1				4
5	0	2	3			0	10G	1				5
6	1	2	3	5		0	10G	1				4
7	0	2	3			0	10G	1				5

De referir que, cada linha da tabela corresponde a um diferente serviço e que, tal como é representado na Tabela 3.1, é possível combinar na mesma tabela serviços com diferentes níveis de caracterização e/ou proteção. Neste mesmo exemplo, analisando a coluna de Proteção, é possível aferir que os serviços com ID 4 e 6 são respetivamente o serviço do caminho primário e serviço do caminho de *backup*. Esta mesma análise pode ser também aplicada aos serviços com ID 5 e 7.

Os parâmetros que regem o modo como o planeamento é executado são definidos no ficheiro *metrics.xlsx*. Os parâmetros que podem ser definidos são:

- Algoritmo de Atribuição de Comprimentos de onda: *Graph Coloring* adaptativo (*Graph Coloring Tradicional, Greedy Longest+Largest-first*).
- Regra de Decisão dos métodos de WA: *First-fit (Most-used, Least-Used, Random)*.
- Solução para direções de Expresso Inválidas: Regeneração (Direções ROADM, melhor custo).
- Solução para a remoção indevida de comprimentos de onda: *Drop & Re-add* (Regeneração, Direções ROADM).
- Parâmetro a minimizar: Custo total (número de filtros utilizados).
- Número máximo de iterações: 10 (de 1 – 30).

A primeira hipótese apresentada para cada parâmetro é a definida por *default*. O utilizador pode, contudo, optar por uma das hipóteses alternativas apresentadas dentro dos parênteses. No caso de não ser definido nenhum ficheiro *metrics.xlsx*, são utilizados os valores de *default* de cada parâmetro.

Opcionalmente, os nós da rede podem ser pré-configurados através do ficheiro de entrada *preconfiguration.xlsx*. Nesse caso, depois de realizado o planeamento é realizada uma validação das várias pré-configurações definidas, podendo estas serem identificadas como válidas e otimizadas, válidas mas não otimizadas ou inválidas. Nos últimos dois casos, depois de executado o planeamento, deve ser ainda identificada a configuração que otimizaria a rede. Na Tabela 3.2 é apresentado um exemplo de um conjunto de nós pré-configurados, no mesmo formato com que são importados a partir do ficheiro *preconfiguration.xlsx*. Sempre que uma direção tiver mais do que um filtro definido, considera-se que se está perante uma cascata de filtros.

Tabela 3.2 – Tabela de Pré-Configurações, importada do ficheiro *preconfiguration.xlsx*

Nó	Direção	Filtro1	Filtro2	Filtro3
1	2	OMD2-1		
1	3	OMD4-1	OMD2-3	
3	2	OMD8-1	OMD2-5	OMD2-6

Durante a execução da primeira camada da ferramenta planeamento alguns dos ficheiros de entrada são analisados com o intuito de se verificar que estes se encontram corretamente preenchidos. Nesse sentido, para o ficheiro *topology.txt* é aferido se a matriz de adjacências é quadrada e composta apenas pelos números 0 e 1. Para o ficheiro *services.xlsx* é verificado se todos os serviços descritos são implementáveis, ou seja, se os *end-nodes* dos vários serviços existem e se é possível estabelecer uma conexão física entre eles. Por sua vez, no ficheiro *equipment.xlsx* é aferido se existe pelo menos um filtro fixo *pluggable*, uma direção ROADM e um *transponder* definido.

A ferramenta de planeamento é interrompida caso seja encontrado algum problema num destes ficheiros de entrada.

3.3. ESCOLHA DOS CAMINHOS

A segunda camada da ferramenta de planeamento é responsável por determinar os caminhos que devem ser atribuídos aos serviços em que apenas os *end-nodes* são conhecidos. Os métodos de *roteamento* utilizados dependem da topologia da rede que está a ser analisada. Na Figura 3.2 é apresentada a condição criada para identificar o algoritmo que deve ser utilizado, tendo em conta o número de direções dos vários nós da rede.

Seleção do Algoritmo de Roteamento	
1.	Identificar o número de direções (grau) de cada nó.
2.	Se todos os nós tiverem grau = 2: <ol style="list-style-type: none">Aplicar o Algoritmo de Roteamento para redes em anel.
3.	Senão, se existir pelo menos um nó com grau maior que 2: <ol style="list-style-type: none">Aplicar o Algoritmo de Roteamento para redes em malha.
4.	Senão: <ol style="list-style-type: none">Aplicar o Algoritmo de Roteamento para redes em cadeia.

Figura 3.2 – Condição responsável pela Seleção do Algoritmo de Roteamento

Nas redes com topologia em cadeia, independentemente do serviço que se pretende rotear, existe um e só um caminho possível de atribuir. Neste tipo de redes o processo de roteamento é simples e inequívoco.

No caso das redes com topologia em anel é necessário escolher para cada serviço, um de entre dois possíveis caminhos. A escolha é feita com base nos conceitos de caminho mais curto e balanceamento de tráfego, recorrendo ao algoritmo de *roteamento* para redes em anel apresentado na secção 2.4.1, Figura 2.9.

Nas redes com topologia em malha, a existência de nós com mais do que duas direções introduz a possibilidade de serem escolhidos caminhos que recorram a direções de expresso inválidas. Por essa razão, a escolha dos caminhos tem de deixar de ser feita tendo em conta o número de *hops*, para passar a ser feita com base na minimização do número de expressos inválidos. Estas redes são roteadas utilizando o algoritmo de *roteamento* para redes em malha, apresentado na secção 2.4.1, Figura 2.10.

No caso da rede de teste, já apresentada na Figura 3.1, foi aplicado o algoritmo de *roteamento* para redes em malha. Quatro dos sete serviços apresentados na Tabela 3.1 estão previamente roteados. De entre os 3 serviços por rotear (ID 3, 5 e 7), o serviço de ID 5 é o primeiro a ser roteado, uma vez que o caminho mais curto deste serviço é composto por um único *hop*. De seguida analisa-se o serviço de ID 3 (*end-nodes* 1 e 3), que pode ser roteado por um de dois possíveis caminhos, ambos representados na Figura 3.3 a vermelho.

O caminho mais curto (assinalado a tracejado vermelho) é composto por apenas dois *hops* mas necessita de estabelecer uma direção de expresso inválida. Por outro lado, o caminho alternativo (assinalado a vermelho) é composto por 4 *hops* e recorre apenas a direções de expresso já definidas, nenhuma das quais inválidas. Como para redes em malha o objetivo do *roteamento* é minimizar o número de direções expresso inválidas, deve ser escolhido o caminho alternativo (mais longo) em detrimento do caminho mais curto.

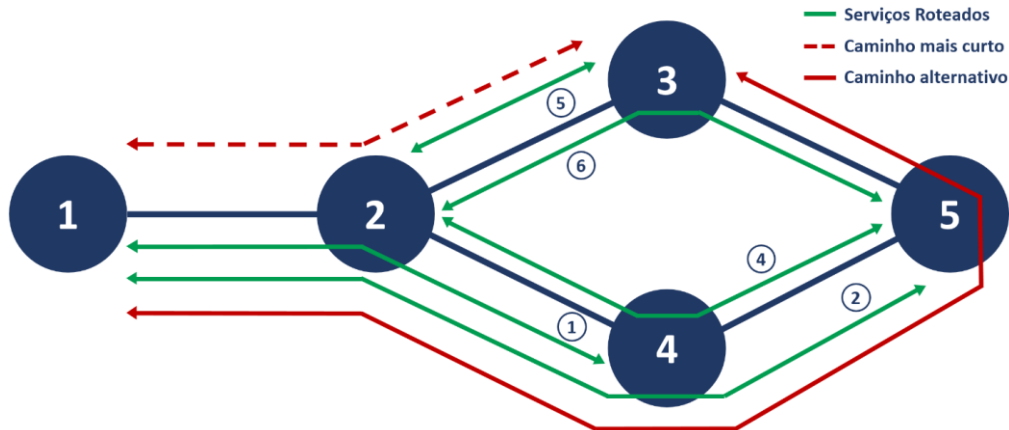


Figura 3.3 – Representação, sob a rede de teste, dos caminhos já roteados e dos possíveis caminhos para o serviço de ID 3

O serviço de ID 7 representa o caminho de *backup* do serviço de ID 5, devendo, por isso, ser encaminhado pelo único caminho existente (nós 2 – 4 – 5 – 3), disjuncto do caminho primário.

3.4. ATRIBUIÇÃO DOS COMPRIMENTOS DE ONDA

A terceira camada da ferramenta de planeamento tem como função atribuir, a cada serviço roteado, tantos comprimentos de onda quanto o número de canais que estiverem reservados. Tipicamente a atribuição é realizada com o objetivo de se minimizar o número de diferentes comprimentos de onda utilizados, ou seja, reaproveitar, tanto quanto possível, cada comprimento de onda.

Na ferramenta de planeamento são implementados os três métodos heurísticos de atribuição de comprimentos de onda propostos na secção 2.4.2, devendo vir explicitado no ficheiro *metrics.xlsx* o método escolhido para cada simulação. Os algoritmos apresentados foram conceptualmente descritos de um modo genérico podendo estes necessitarem de ser sujeitos, tendo em conta equipamento disponível, a algum tipo de adaptação.

Neste caso, como só foram considerados filtros com 2, 4, 8 e 44 canais, é no mínimo possível remover ou adicionar 2 canais em cada direcção do nó. Esta limitação implica que seja realizada uma adaptação ao modo como os comprimentos são atribuídos. De modo a evitar que comprimentos de onda que necessitem de ser passados por expresso sejam indevidamente removidos num nó intermédio do caminho, é necessário definir que o primeiro comprimento de onda a atribuir a cada serviço, corresponda ao primeiro comprimento filtrado por um dos filtros de 2 canais existentes no portefólio de equipamento.

Esta condição adicional pode ser acrescentada aos algoritmos de atribuição de comprimentos de onda, através da introdução do vetor dos primeiros comprimentos de onda disponíveis (VPCOD). Este vetor deve ser criado em simultâneo com o VCOD e deve ser inicializado com o primeiro comprimento de onda de cada um dos filtros de 2 canais existentes, neste caso os canais [1, 3, 5, 7, 10, 12, 14, 16, 19, 21, 23, 25, 28, 30, 32, 34, 47, 39, 41, 43]. Assim, sempre que forem identificados comprimentos de onda que não podem ser atribuídos a um dado serviço, estes devem ser removidos do VCOD e do VPCOD. Mais tarde, deve ser atribuído, ao primeiro canal de cada serviço, o primeiro comprimento de onda disponível do VPCOD (em vez do VCOD).

No caso de existirem serviços que necessitem de mais do que um canal, depois de atribuído o primeiro comprimento de onda, devem ser atribuídos os comprimentos de onda do VCOD que sucedem o comprimento de onda já escolhido.

Se esta precaução não fosse tomada, canais que deveriam ser passados pelo porto de expresso de uma direção poderiam ser indevidamente removidos. Na Figura 3.4 é ilustrado um caso prático do problema descrito. Neste exemplo pretende-se remover/adicionar um canal na direção 1 do nó e passar um outro canal entre a direção 1 e 2.

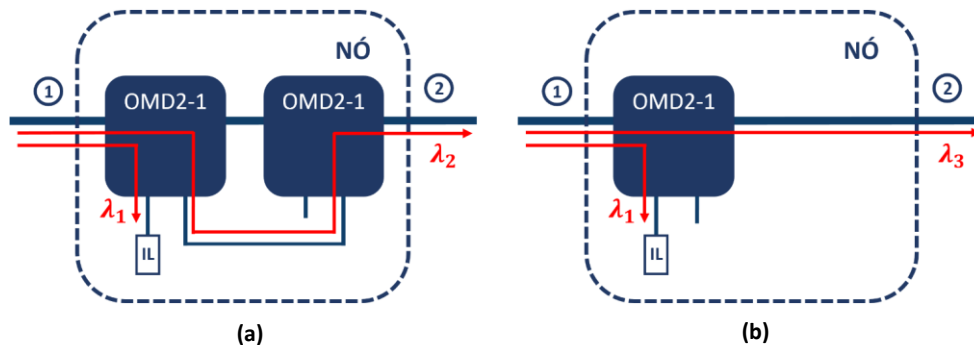


Figura 3.4 – (a) Atribuição de comprimentos de onda consecutivos (genérico). (b) Atribuição de comprimentos de onda tendo em conta o número mínimo de canais que podem ser filtrados em cada direção do nó

Antes de se iniciar a atribuição de comprimentos de onda, caso existam serviços que tenham comprimentos de onda previamente atribuídos, é necessário verificar se esses serviços cumprem com a restrição dos comprimentos de onda distintos, ou seja, que todos os serviços cujos caminhos partilham a mesma ligação física têm pré-atribuídos comprimentos de onda diferentes. A pré-atribuição realizada pelo utilizador deixa de ser válida caso esta condição não seja cumprida.

Este caso verifica-se para os serviços com ID 2 e 3 da Tabela 3.1. Ambos os serviços passam na mesma secção de fibra e têm pré-atribuídos o mesmo comprimento de onda. Nestes casos a atribuição previamente realizada é anulada e estes serviços juntam-se ao lote de serviços sem comprimentos de onda atribuídos.

Para fazer a atribuição de comprimentos de onda aos serviços da rede de teste, foi escolhido o método de *graph-coloring* adaptativo, apresentado na secção 2.4.2, Figura 2.14. Na Tabela 3.3 é apresentada a evolução da tabela de serviços (TS) ao longo do processo de atribuição de comprimentos de onda. A TS está ordenada do serviço mais prioritário para o menos prioritário, sendo feita em cada iteração a atribuição ao primeiro serviço da tabela (assinalado a cinzento) e do respetivo serviço de *backup*, caso este exista. Depois de cada iteração, o número de vizinhos coloridos (NVC) é atualizado e os serviços são reordenados.

Tabela 3.3 – Evolução da tabela de serviços durante a aplicação do método *graph-coloring* adaptativo à rede de teste

ID	NVC	NV	#H	#λ	ID	NVC	NV	#H	#λ	ID	NVC	NV	#H	#λ	ID	NVC	NV	#H	#λ	ID	NVC	NV	#H	#λ
3	0	5	4	1	7	1	5	3	1	6	3	3	2	1	2	3	4	3	2	1	3	4	2	3
7	0	5	3	1	2	1	4	3	2	2	2	4	3	2	1	3	4	2	3					
2	0	4	3	2	1	1	4	2	3	1	2	4	2	3										
1	0	4	2	3	4	1	4	2	1	4	2	4	2	1										
4	0	4	2	1	6	1	3	2	1															
6	0	3	2	1	5	0	1	1	1															
5	0	1	1	1																				

NVC - Número de vizinhos coloridos
 NV - Número de vizinhos
 #H - Número de hops
 #λ - Número de canais

A rede com os serviços roteados que deu origem ao grafo auxiliar $G'(V,E)$ e os respectivos comprimentos de onda atribuídos a cada serviço são apresentados na Figura 3.5.

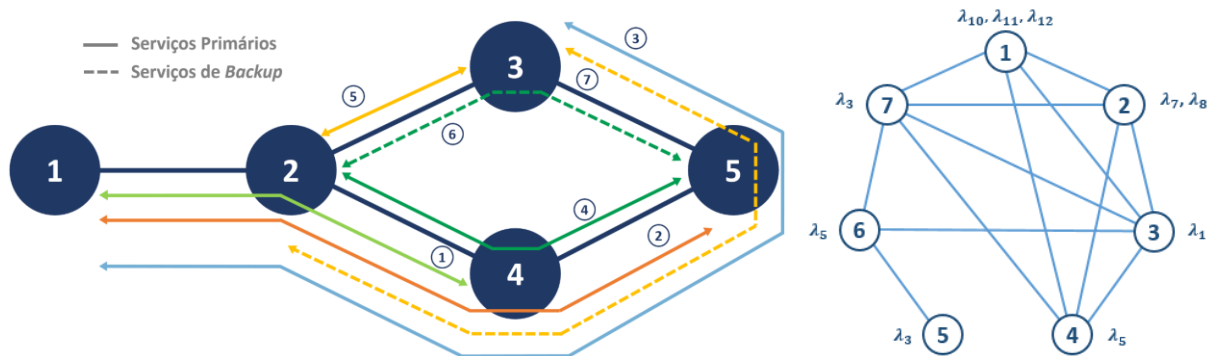


Figura 3.5 – Representação da rede, dos serviços e do grafo $G'(V, E)$ com os comprimentos de onda já atribuídos, gerado pelo método de *graph-coloring adaptativo*

No final desta camada todos os serviços passam a estar totalmente caracterizados, ou seja, o caminho e os comprimentos de onda associados a cada serviço ficam definidos. Na Tabela 3.4 é apresentada a tabela com as características dos serviços da rede de teste depois de serem executadas as camadas de *roteamento* e de atribuição de comprimentos de onda.

Tabela 3.4 – Tabela com as características dos serviços depois da execução dos algoritmos de roteamento e de atribuição de comprimentos de onda

ID	Tipo_A	Caminho					Tipo_B	Interface	Canais	Comprimentos de Onda				Proteção
1	1	1	2	4			1	10G	3	10	11	12		0
2	1	1	2	4	5		1	10G	2	7	8			0
3	1	1	2	4	5	3	1	10G	1	1				0
4	1	2	4	5			1	10G	1	5				4
5	1	2	3				1	10G	1	3				5
6	1	2	3	5			1	10G	1	5				4
7	1	2	4	5	3		1	10G	1	3				5

Por predefinição os comprimentos de onda vão sendo atribuídos do menor para o maior (*First-fit*), contudo através do ficheiro de métricas é possível alterar a regra de decisão. Este aspeto pode ser importante para fazer o planeamento de extensões de redes já existentes. Nestes casos pode ser benéfico fazer a atribuição priorizando os comprimentos de onda mais utilizados (métrica *Most-used*).

A ferramenta de planeamento deve ser interrompida caso exista pelo menos um serviço onde não haja nenhum comprimento de onda disponível para ser atribuído.

3.5. DETERMINAÇÃO DOS CANAIS DE ADIÇÃO/REMOÇÃO E EXPRESSO

Uma vez realizado o roteamento e a atribuição de comprimentos de onda, cada serviço passa a ser caracterizado por um caminho e por um ou mais comprimentos de onda, dependendo do número de canais reservados. Estes dados são obtidos após a execução da camada 2 e 3 da ferramenta de planeamento, sendo posteriormente armazenados numa tabela, doravante denominada como Tabela dos Serviços Caracterizados (TSC), Tabela 3.4. Todos os serviços são bidirecionais, não existindo por isso distinção entre a adição e a remoção de comprimentos de onda. Com base nestes pressupostos, a quarta camada da ferramenta de planeamento é responsável por

identificar quais os comprimentos de onda que são adicionados/removidos nas várias direções de cada nó e por determinar quais os comprimentos de onda que devem de ser passados óticamente entre duas direções. Se a rede que estiver a ser planeada tiver uma topologia em malha, é necessário identificar, de entre todas as direções de passagem (*pass through* em terminologia anglo-saxónica), quais as ligações de expresso que são válidas. Estes dados são guardados em cinco tabelas específicas:

- Tabela de *Add/Drop* (TAD) – guarda para cada direção de cada nó os comprimentos de onda que são adicionados/removidos.
- Tabela de *PassThrough* (TPT) – guarda para cada nó os comprimentos de onda que são passados entre cada par de direções, numa fase em que ainda não está definido se essas direções podem ser estabelecidas por ligações de expresso.
- Tabela de *Express* (TE) – guarda para cada nó os comprimentos de onda que são passados através de expressos óticos válidos.
- Tabela de *Regens* (TR) - guarda para cada nó os canais que tiveram de ser removidos, regenerados e posteriormente adicionados entre duas direções.
- Tabela de *ROADM directions* (TROADM) – guarda para cada nó as direções que, em vez de utilizarem filtros fixos, têm de utilizar direções ROADM.

As duas primeiras colunas da tabela de *Add/Drop* (TAD) identificam, respetivamente, o nó e a direção em que se realiza a adição/remoção dos comprimentos de onda. Por sua vez, a terceira coluna da tabela guarda o número de canais adicionados/removidos em cada direção, enquanto as restantes colunas especificam o ID dos comprimentos de onda associados a esses mesmos canais. Sempre que é definida uma nova direção de adição/remoção, é adicionada uma nova linha à tabela. Quando ocorre uma adição/remoção numa direção já existente, apenas a coluna do número de canais e as colunas com os IDs dos respetivos comprimentos de onda são atualizadas. No final, a TAD terá tantas linhas quanto o número de diferentes direções onde ocorra a adição/remoção de comprimentos de onda.

Para se identificar todos os comprimentos de onda adicionados/removidos nas várias direções dos nós da rede, é necessário analisar todos os serviços. As direções dos nós da rede são identificadas pelo ID do nó adjacente a que estão ligadas. Assim, no caso da rede de teste (Figura 3.5), o nó 2 é composto pelas direções 1, 3 e 4. Os caminhos dos vários serviços são também descritos pelos nós da rede. Deste modo, quando se define que o serviço de ID 1, da rede de teste, tem o caminho 1 – 2 – 4, está-se a indicar que o sinal é adicionado no nó 1, passa pelo nó intermédio 2 e é removido no nó 4. Uma vez que todos os serviços são bidirecionais, apesar do caminho ter sido interpretado da esquerda para a direita, o sinal é adicionado e removido em ambos os nós finais do caminho.

A adição/remoção dos vários comprimentos de onda é realizada no primeiro e no último nó de cada serviço, servindo o segundo e o penúltimo nó do caminho para identificar as respetivas direções de adição/remoção. Com base nestes factos, foi desenvolvido e implementado na ferramenta de planeamento um algoritmo capaz de

identificar as direções e os comprimentos de onda de adição/remoção. Este algoritmo vem detalhado na Figura 3.6.

Algoritmo de Identificação das direções e comprimentos de onda de Adição/Remoção	
1.	Receber a Tabela dos Serviços Caracterizados (TSC), criar a Tabela de Add/Drop (TAD) e criar um ponteiro (<i>i_service</i>) para a primeira linha da TSC, ou seja, para o primeiro serviço da TSC.
2.	Enquanto <i>i_service</i> apontar para uma entrada válida da tabela TSC: <ol style="list-style-type: none"> a. Identificar o primeiro e segundo nó do caminho, do serviço apontado por <i>i_service</i>, que correspondem respetivamente ao nó e à direção de adição. b. Se o nó e respetiva direção não existirem na TAD: <ol style="list-style-type: none"> i. Criar uma nova entrada na TAD e adicionar o nó, a direção, o número de canais adicionados removidos e os IDs dos comprimentos de onda desses mesmos canais. c. Senão: <ol style="list-style-type: none"> i. Ao conjunto nó / direção já existente na TAD, somar o número de canais adicionados/removidos já existentes com o número dos novos canais adicionados/removidos e adicionar os IDs dos respetivos comprimentos de onda. d. Identificar o último e penúltimo nó do caminho, do serviço apontado por <i>i_service</i>, que correspondem respetivamente ao nó e à direção de remoção. e. Se o nó e respetiva direção não existirem na TAD: <ol style="list-style-type: none"> i. Criar uma nova entrada na TAD e adicionar o nó, a direção, o número de canais adicionados removidos e os IDs dos comprimentos de onda desses mesmos canais. f. Senão: <ol style="list-style-type: none"> i. Ao conjunto nó / direção já existente na TAD, somar o número de canais adicionados/removidos já existentes com o número dos novos canais adicionados/removidos e adicionar os IDs dos respetivos comprimentos de onda. g. Incrementar o ponteiro <i>i_service</i>, passando este a apontar para a próxima entrada da TSC.

Figura 3.6 – Algoritmo de Identificação das direções e comprimentos de onda de Adição/Remoção

Na Tabela 3.5 é apresentada a TAD da rede de teste, obtida após a aplicação do algoritmo acima proposto. Contabilizando o número de linhas da tabela é possível identificar o número, neste caso oito, de diferentes pares nó/direção onde se procede à adição de comprimentos de onda. A primeira linha da tabela indica que no nó 1, na direção do nó 2, são adicionados/removidos 6 canais com os comprimentos de onda λ_1 , λ_7 , λ_8 , λ_{10} , λ_{11} e λ_{12} . A mesma análise pode ser realizada para as restantes linhas da tabela.

Tabela 3.5 – Tabela de Add/Drop da rede de teste

Nó	Direção	Canais	Comprimentos de Onda					
1	2	6	1	7	8	10	11	12
2	3	2	3	5				
2	4	2	3	5				
3	2	1	3					
3	5	2	1	3				
4	2	3	10	11	12			
5	3	1	5					
5	4	3	5	7	8			

No caso da tabela de *PassThrough* (TPT), a primeira coluna identifica o nó e a segunda e terceira coluna identificam o par de direções por onde passam os comprimentos de onda. Por fim, a quarta coluna guarda o número de canais que são passados, enquanto as restantes colunas especificam o ID dos comprimentos de onda desses mesmos canais. De modo análogo ao que acontece com a TAD, quando é identificada uma nova direção

de *pass through* é gerada uma nova linha na tabela, caso contrário apenas o número de canais e respetivos IDs dos comprimentos de onda são atualizados.

As direções de *pass through* são estabelecidas apenas nos nós intermédios do caminho logo, os serviços compostos por caminhos com um único *hop* (2 nós) estão excluídos de análise por não terem nós intermédios. Para os restantes serviços, todos os nós intermédios têm de ser analisados, sendo as direções de *pass through* identificadas, para cada nó intermédio, pelos nós que antecedem e sucedem esse mesmo nó. Na Figura 3.7 é apresentado o algoritmo de identificação das direções e comprimentos de onda de *pass through*, desenvolvido e implementado na ferramenta de planeamento.

Algoritmo de Identificação das direções e comprimentos de onda de *Pass Through*

1. Receber a Tabela dos Serviços Caracterizados (TSC), criar a Tabela de *PassThrough* (TPT) e criar um ponteiro (*i_service*) para a primeira linha da TSC, ou seja, para o primeiro serviço da TSC.
2. Enquanto *i_service* apontar para uma entrada válida da tabela TSC:
 - a. Se o caminho do serviço apontado por *i_service* for formado por mais do que 3 nós, ou seja, se o caminho tiver no mínimo 2 *hops*:
 - i. Inicializar um ponteiro (*j_service*) que aponta para a coluna da TPT onde está guardado o ID do 2º nó do caminho (primeiro nó intermédio).
 - ii. Enquanto *j_service* apontar para um nó intermédio do caminho:
 1. Se o nó e respetivas direções (identificadas pelo ID dos nós anteriores e posteriores ao nó apontado por *j_service*) não existirem na TPT:
 - a. Criar uma nova entrada na TPT e adicionar o nó, as respetivas direções, o número de canais que são passados e os IDs dos comprimentos de onda desses mesmos canais.
 - b. Incrementar o ponteiro *j_service*, passando este a apontar para o próximo nó do caminho.
 2. Senão:
 - a. Ao conjunto nó / par de direções já existente na TPT, somar o número de canais que já eram passados com o número dos novos canais que necessitam de ser passados e adicionar os IDs dos respetivos comprimentos de onda.
 - b. Incrementar o ponteiro *j_service*, passando este a apontar para o próximo nó do caminho.
 - b. Incrementar o ponteiro *i_service*, passando este a apontar para a próxima entrada da TSC.

Figura 3.7 - Algoritmo de Identificação das direções e comprimentos de onda de *Pass Through*

Na Tabela 3.6 é apresentada a TPT da rede de teste, obtida após a aplicação do algoritmo acima proposto. Para esta rede foram identificadas 4 diferentes direções de *pass through*, a primeira das quais ocorre no nó de ID 2, entre as direções 1 e 4, sendo passados 6 comprimentos de onda ($\lambda_1, \lambda_7, \lambda_8, \lambda_{10}, \lambda_{11}, \lambda_{12}$).

Tabela 3.6 – Tabela de *PassThrough* da rede de teste

Nó	Direção 1	Direção 2	Canais	Comprimentos de Onda					
2	1	4	6	1	7	8	10	11	12
3	2	5	1	5					
4	2	5	5	1	3	5	7	8	
5	3	4	2	1	3				

Uma vez conhecidas as direções de *pass through*, é necessário identificar quais destas direções correspondem a ligações de expresso válidas. Essas direções devem então ser armazenadas na tabela de *Express*, que tem o

mesmo formato da TPT. No caso das redes com topologia em cadeia ou em anel, como não existem nós com mais do que dois graus, todas as direções de *pass through* correspondem a ligações válidas de expresso. Por este motivo, o conteúdo da TPT deve ser integralmente copiado para a TE.

Para as redes em malha, foi desenvolvido um algoritmo, apresentado na Figura 3.8, que permite identificar, de entre as várias direções de *pass through* existentes, quais dessas correspondem a ligações de expresso válidas.

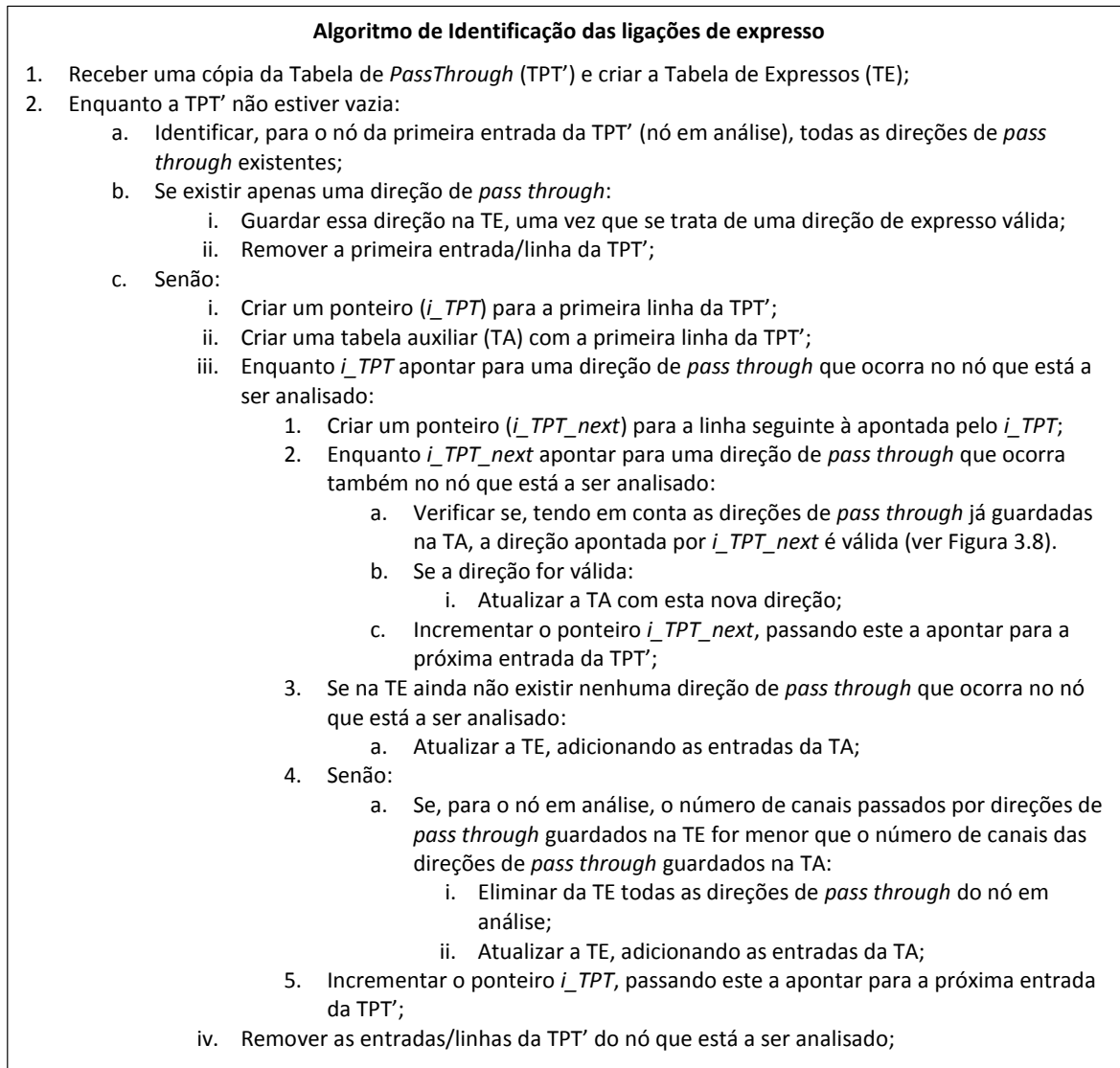


Figura 3.8 – Algoritmo de identificação das direções e comprimentos de onda de Expresso

A necessidade de se identificar as ligações de expresso válidas e inválidas é imposta pelas limitações físicas dos filtros fixos *pluggable*, mais nomeadamente pelo facto destes componentes terem uma única porta de expresso. Por este motivo, num nó composto exclusivamente por filtros fixos, cada direção do nó pode estabelecer uma e uma só ligação de expresso. Assim, considera-se uma direção de *pass through* como uma ligação de expresso inválida, caso esta ocorra numa direção do nó que já estabeleça uma ligação de expresso válida. Esta condição é verificada pelo algoritmo de validação de direções de expresso, apresentado na Figura 3.9. Dado este facto, todos os nós com mais do que uma direção de *pass through* são analisados, com o intuito de se determinar o conjunto de ligações de expresso válidas que maximizam o número de canais que são passados opticamente. Este critério

foi definido com o intuito de se minimizar o número de *transponders* utilizados para regenerar os canais das ligações de expresso inválidas.

Algoritmo de validação de direções de expresso

1. Receber a direção de *pass through* que está a ser analisada (direção de *pass through* apontada por i_TPT_next), receber a Tabela Auxiliar (TA), criar um ponteiro (i_TA) para a primeira linha da TA e criar a *flag* (*invalid_direction*) que será 1, caso a direção de expresso que está a ser analisada for inválida, e 0, caso contrário.
2. Inicializar o *invalid_direction* = 0.
3. Enquanto i_TA apontar para uma entrada válida da TA:
 - a. Se pelo menos uma das direções, da direção de *pass through* apontada por i_TA , for igual a uma das direções, da direção de *pass through* que está a ser analisada (apontada por i_TPT_next):
 - i. Actualizar *invalid_direction* = 1.
 - b. Incrementar o ponteiro i_TA , passando este a apontar para a próxima entrada da TA.
4. Retornar a *flag* *invalid_direction*.

Figura 3.9 – Algoritmo de validação de direções de expresso

No caso da rede de teste, após a aplicação do algoritmo de identificação das ligações de expresso, Figura 3.8, verificou-se que todas as direções de *pass through* correspondiam a ligações de expresso válidas e, por esse motivo, a TE é igual à TPT apresentada na Tabela 3.6.

Depois de serem identificadas e guardadas na TE, as direções de *pass through* que podem ser implementadas por ligações de expresso válidas devem ser removidas da TPT. Se depois deste processo a TPT não se encontrar vazia, é porque existe pelo menos uma direção de *pass through* que não pode ser estabelecida por expresso recorrendo somente a filtros fixos *pluggable*. Nestas situações é necessário identificar qual a solução escolhida pelo utilizador, no ficheiro *metrics.xlsx*, para passar as direções de Expresso inválidas.

Caso seja escolhida a opção de *default* (*Drop & Re-add* com regeneração) é necessário atualizar a tabela de *Add/drop*, criando ou introduzindo às direções adição/remoção já existentes, os respetivos comprimentos de onda que não podem ser passados por expresso. No final, cada uma das entradas da TPT deve ser copiada para a Tabela de *Regens* e posteriormente apagada da TPT. Deste modo, é possível identificar os canais que necessitam de ser regenerados. Na Figura 3.10 é apresentado o algoritmo de identificação das direções passadas por *Drop & Re-add* com Regeneração, desenvolvido e implementado na ferramenta de planeamento.

Caso seja escolhida a opção alternativa (direções ROADM) é necessário identificar, através de uma comparação entre a TE e a TPT, as direções dos vários nós que necessitam de estabelecer mais do que uma ligação de expresso. Depois de identificadas, essas direções devem ser guardadas na Tabela de *ROADM directions*, composta exclusivamente por duas colunas, que identificam, respetivamente, o nó e a direção onde é necessário introduzir uma direção ROADM. Depois deste passo, deve-se proceder à remoção das entradas da TAD, e da TPT, onde estes pares nós/direções apareçam descritas. Na Figura 3.11 é apresentado o algoritmo de identificação das direções dos nós servidas por direções ROADM, desenvolvido e implementado na ferramenta de planeamento.

Caso se opte pela solução de melhor custo é necessário determinar, para cada um dos nós onde seja identificado pelo menos uma ligação de expresso inválida, se é preferível, do ponto de vista económico, introduzir as

interfaces linha necessárias para regenerar os canais passados por *Drop & Re-add*, ou introduzir as direções ROADM necessárias para estabelecer todas as ligações de expresso requeridas. Depois desse passo, dependendo do método selecionado para cada nó, devem ser utilizadas adaptações dos algoritmos acima descritos, Figura 3.10 e Figura 3.11, de tal modo que estes, em vez de serem executados para toda a TPT, sejam executados apenas para as entradas da TPT do nó em análise.

Algoritmo de identificação das direções de *Drop & Re-add* com Regeneração

1. Receber a Tabela de *PassThrough* (TPT) e a Tabela de *Add/Drop* (TAD), e criar a Tabela de *Regens* (TR).
2. Enquanto a TPT não estiver vazia:
 - a. Apontar para a primeira entrada da TPT.
 - b. Criar um ponteiro (j_node) para o nó onde ocorre *pass through* (1ª coluna da TPT) e um ponteiro ($j_directions$) para a primeira direção do nó (2ª coluna da TPT).
 - c. Enquanto $j_directions$ apontar para uma coluna de direção da TPT:
 - i. Criar um ponteiro ($j_wavelengths$) para o primeiro comprimento de onda da direção de *pass through* que está a ser analisada (5ª coluna da TPT).
 - ii. Se o par nó/direção, apontado respetivamente por j_node e $j_directions$, já existir na TAD:
 1. Enquanto $j_wavelengths$ apontar para um comprimento de onda:
 - a. Adicionar esse comprimento de onda à respetiva entrada da TAD.
 - b. Incrementar o ponteiro $j_wavelengths$, passando este a apontar para o próximo comprimento de onda.
 - iii. Senão:
 1. Criar uma nova entrada na TAD com o nó e direção apontados por j_node e $j_directions$.
 2. Enquanto $j_wavelengths$ apontar para um comprimento de onda:
 - a. Adicionar esse comprimento de onda à respetiva entrada da TAD.
 - b. Incrementar o ponteiro $j_wavelengths$, passando este a apontar para o próximo comprimento de onda.
 - iv. Incrementar o ponteiro $j_directions$, passando este a apontar para a direção seguinte.
 - d. Copiar a entrada da TPT que está a ser analisada para a TR.
 - e. Remover a entrada analisada da TPT.

Figura 3.10 – Algoritmo de identificação das direções passadas por *Drop & Re-add* com Regeneração

Algoritmo de identificação das direções ROADM

1. Receber a Tabela de *PassThrough* (TPT), a Tabela de *Express* (TE) e a Tabela de *Add/Drop* (TAD), e criar a Tabela de *ROADM directions* (TROADM).
2. Enquanto a TPT não estiver vazia:
 - a. Apontar para a primeira entrada da TPT.
 - b. Criar um ponteiro (j_node) para o nó onde ocorre *pass through* (1ª coluna da TPT) e um ponteiro ($j_directions$) para a primeira direção do nó (2ª coluna da TPT).
 - c. Enquanto $j_directions$ apontar para uma coluna de direção da TPT:
 - i. Se existir alguma ligação de expresso na TE que se realize no nó apontado por j_node e que tenha uma das direções de passagem igual à direção apontada por $j_directions$:
 1. Guardar na TROADM, caso ainda não exista, o nó e direções apontados por j_node e $j_directions$.
 - ii. Incrementar o ponteiro $j_directions$, passando este a apontar para a direção seguinte.
 - d. Remover a entrada analisada da TPT.
 3. Criar um ponteiro (i_TROADM) para a primeira entrada da TROADM.
 4. Enquanto i_TROADM apontar para uma entrada válida da TROADM:
 - a. Se o par nó/direção da entrada apontada i_TROADM existir na TAD:
 - i. Remover essa entrada da TAD.
 - b. Incrementar o ponteiro i_TROADM , passando este a apontar para a entrada seguinte da TROADM.

Figura 3.11 – Algoritmo de identificação das direções dos nós servidas por direções ROADM

3.6. SELEÇÃO DOS FILTROS POR NÓ

A quinta camada da ferramenta de planeamento é responsável por identificar, combinar e selecionar o conjunto de filtros fixos *pluggable*, que devem ser utilizados em cada direção dos vários nós da rede, de modo a otimizar a rede que está ser planeada. Este processo subdivide-se em duas fases, ambas executadas de um modo sequencial, analisando-se nó a nó, direção a direção. Considera-se que um nó está completamente configurado quando todas as direções tiverem devidamente caracterizadas, ou seja, quando tiver sido atribuído um conjunto de equipamentos válidos (filtros fixos ou direções ROADM) a todas as direções do nó. Na Figura 3.12 é apresentado, de um modo sucinto, o Algoritmo de Seleção de Filtros e Direções ROADM desenvolvido e implementado na ferramenta de planeamento. De seguida, será explicado cada passo deste algoritmo.

Algoritmo de Seleção de Filtros e Direções ROADM

1. Receber a tabela de *Add/Drop* (TAD), a tabela *Filters* e a tabela de *Express*, criar a tabela *Solution* (TSol) e criar um ponteiro (*i_Add/Drop*) para a primeira linha da TAD.
2. Enquanto não tiverem sido analisados todas as direções de adição/remoção:
 - a. Correr, para a entrada da TAD apontada por *i_Add/Drop*, o Algoritmo de Seleção de Filtros Simples (ver Figura 3.13) que devolve a TSol com a lista de todos os filtros simples que garantem a adição/remoção de todos os comprimentos de onda necessário.
 - b. Correr, para a entrada da TAD apontada por *i_Add/Drop*, o Algoritmo de Seleção de Cascatas de Filtros, Grau 2 e Grau 3 (ver Figura 3.14 e Figura 3.15), que adiciona à TSol as cascatas de filtros que garantem a adição/remoção de todos os comprimentos de onda necessário.
 - c. Incrementar o ponteiro *i_Add/Drop*, passando este a apontar para a próxima entrada da TAD.
3. Correr, sobre a lista de filtros pré selecionados, o Algoritmo de Identificação das Soluções com Expresso (ver Figura 3.16) que devolve a tabela *Express Solution* (TES) com a lista de filtros ou combinações de filtros da TSol que não conseguem estabelecer as ligações de expresso requeridas.
4. Caso, comparando a TSol com a TES, se verifique que existem nós que tenham direções sem nenhuma solução:
 - a. Criar uma tabela auxiliar denominada por *CriticalSolutions* (TCS) com as soluções das direções que não aparecem na TES.
 - b. Identificar para cada uma dessas soluções quais e quantos comprimentos de onda que estão a ser bloqueados na ligação de expresso.
 - c. Para cada diferente direção representada na TCS, ficar apenas com a solução que bloqueie o menor número de canais:
 - d. Se a solução escolhida for a de *default* (*Drop & Re-add*):
 - i. Correr o algoritmo das soluções de *Drop & Re-add* (ver Figura 3.17), para identificar a melhor solução para as direções que necessitam de passar canais por *Drop & Re-add*.
 - e. Senão, se a solução escolhida for a *Drop & Re-add* com regeneração:
 - i. Correr uma adaptação do algoritmo das soluções de *Drop & Re-add* (ver Figura 3.16), que contabilize as interfaces linha adicionais que têm de ser usadas para regenerar os canais de *Drop & Re-add*.
 - f. Senão:
 - i. Usar direções ROADM em todas as direções guardadas na TSC, acrescentando essas mesmas direções à tabela de *ROADM directions* (TROADM).

Figura 3.12 – Algoritmo de Seleção de Filtros e Direções ROADM

Numa primeira fase, recorrendo somente à tabela de *Add/Drop*, são identificados todos os filtros ou combinações de filtros que garantem a correta adição/remoção dos comprimentos de onda para todas as direções dos nós. De modo a identificar, de entre os comprimentos de onda que precisam de ser adicionados/removidos, aqueles que são devidamente filtrados por cada filtro, criou-se o conceito de correspondências (*Matches* em terminologia anglo-saxónica). Assim, considera-se que existe correspondência entre o comprimento de onda filtrado e o

comprimento de onda adicionado/removido caso estes sejam iguais. De modo análogo, considera-se que um filtro faz correspondência total se conseguir filtrar todos os comprimentos de onda que necessitam de ser adicionados/removidos. As informações dos filtros fixos que podem ser utilizados estão armazenadas na tabela *Filters* (TF). Esta tabela é criada durante a importação da biblioteca de equipamento, logo na primeira camada da ferramenta de planeamento. A primeira coluna da TF guarda o ID do filtro, enquanto a segunda e terceira coluna guardam, respetivamente, o valor das atenuações introduzidas pelas portas de adição/remoção e pela porta de expresso. Por sua vez, na quarta e quinta coluna vem identificado o fator de custo e o número de canais filtrados. Por fim, da sexta coluna em diante, vêm detalhados os IDs dos comprimentos de onda filtrados por cada filtro.

Por outro lado, as informações das correspondências de cada filtro são guardadas numa tabela auxiliar denominada por Tabela *Match* (TM). Tal como na TF, cada linha desta tabela corresponde a um filtro diferente. Assim a TM e a TF terão tantas linhas quanto o número de filtros descritos na biblioteca de equipamento. As duas primeiras colunas da TM guardam, respetivamente, o ID do filtro e o número total de correspondências que este realiza. Da terceira coluna em diante, são identificadas as correspondências dos vários comprimentos de onda filtrados. Estas entradas podem ser 1 ou 0, dependendo se existe ou não correspondência entre o comprimento de onda filtrado com um dos comprimentos de onda que necessita de ser adicionado/removido.

Na Figura 3.13 é descrito o algoritmo que identifica todos os filtros que verificam correspondência total, ou seja, todos os filtros simples capazes de adicionar/remover os comprimentos de onda necessários para cada direção.

Algoritmo de Seleção de Filtros Simples

1. Receber a tabela *Filters* (TF) e criar a tabela *Match* (TM) e a tabela *Solution* (TSol).
2. Receber a direção da Tabela de *Add/Drop* (TAD) apontada pelo ponteiro (i_TAD), criar um ponteiro ($j_Add/Drop$) para a coluna com o ID do primeiro comprimento de onda (4ª coluna da TAD), um ponteiro ($i_Filters$) para a primeira linha da tabela *Filters* e um ponteiro ($j_Filters$) para a coluna com o ID do primeiro comprimento de onda filtrado (6ª coluna da TF).
3. Enquanto $j_Add/Drop$ apontar para uma entrada válida da TAD:
 - a. Enquanto não tiverem sido analisados todos os filtros:
 - i. Enquanto não tiverem sido analisados todos os comprimentos de onda filtrados pelo filtro apontado por $i_Filters$:
 1. Se o comprimento de onda apontado por $j_Filters$ for igual ao apontado por $j_Add/Drop$:
 - a. Incrementar na TM o número de correspondências do filtro apontado por $i_Filters$.
 - b. Atualizar na TM, de 0 para 1, a coluna correspondente ao comprimento de onda que é devidamente adicionado/removido pelo filtro apontado por $i_Filters$.
 - c. Incrementar o ponteiro $j_Filters$, passando este a apontar para o comprimento de onda seguinte do filtro apontado por $i_Filters$.
 - ii. Incrementar o ponteiro $i_Filters$, passando este a apontar para o filtro seguinte da TF.
 - b. Incrementar o ponteiro $j_Add/Drop$, passando este a apontar para o comprimento de onda seguinte da direção apontada por $i_Add/Drop$.
4. Guardar na TSol todos os filtros onde se verifique correspondência total.
5. Remover da TM os filtros que não realizam nenhuma correspondência e os filtros onde se verifica correspondência total.

Figura 3.13- Algoritmo de Seleção dos Filtros Simples baseado nos comprimentos de onda que é necessário adicionar/remover em cada direção

Depois de todos os filtros serem analisados, a tabela *Solution* (TSol) é atualizada com os dados de todos os filtros que façam correspondência total. Por outro lado, os filtros que não façam nenhuma correspondência e os filtros que façam correspondência total são removidos da TM.

Na Tabela 3.7 é apresentada a TM gerada após a aplicação do algoritmo da Figura 3.13, à primeira entrada da TAD. Pretendia-se assim identificar, de entre os comprimentos de onda que são necessários adicionar/remover (λ_1 , λ_7 , λ_8 , λ_{10} , λ_{11} e λ_{12}) no nó 1 na direção 2, aqueles que cada filtro conseguia filtrar.

Tabela 3.7 – Tabela Match gerada para o nó 1 na direção 2, antes e depois de serem removidos os filtros que não verificam nenhuma correspondência e os filtros que verificam correspondência total

ID Filtro	Número de Correspondências	Correspondências dos Comprimentos de onda					
		λ_1	λ_7	λ_8	λ_{10}	λ_{11}	λ_{12}
OMD44-1	6	1	1	1	1	1	1
OMD8-1	3	1	1	1	0	0	0
OMD8-2	3	0	0	0	1	1	1
OMD8-3	0	0	0	0	0	0	0
(...)							
OMD4-1	1	1	0	0	0	0	0
OMD4-2	2	0	1	1	0	0	0
OMD4-3	3	0	0	0	1	1	1
OMD4-4	0	0	0	0	0	0	0
(...)							
OMD2-1	1	1	0	0	0	0	0
OMD2-2	0	0	0	0	0	0	0
OMD2-3	0	0	0	0	0	0	0
OMD2-4	2	0	1	1	0	0	0
OMD2-5	2	0	0	0	1	1	0
OMD2-6	1	0	0	0	0	0	1
OMD2-7	0	0	0	0	0	0	0
(...)							
ID Filtro	Número de Correspondências	Correspondências dos Comprimentos de onda					
		λ_1	λ_7	λ_8	λ_{10}	λ_{11}	λ_{12}
OMD8-1	3	1	1	1	0	0	0
OMD8-2	3	0	0	0	1	1	1
OMD4-1	1	1	0	0	0	0	0
OMD4-2	2	0	1	1	0	0	0
OMD4-3	3	0	0	0	1	1	1
OMD2-1	1	1	0	0	0	0	0
OMD2-4	2	0	1	1	0	0	0
OMD2-5	2	0	0	0	1	1	0
OMD2-6	1	0	0	0	0	0	1

A tabela *Match* gerada pelo Algoritmo de Seleção de Filtros Simples (Figura 3.13) é depois utilizada nos algoritmos de seleção de cascatas de filtros de grau 2 e 3, com o intuito de se determinar todas as combinações de filtros que façam correspondência total com os comprimentos de onda que necessitam de ser adicionados/removidos.

No caso das cascatas de grau 2, as várias entradas da TM são combinadas entre si, sendo que uma combinação de dois filtros só é guardada na tabela auxiliar *Cascade2* (TC2) se e só se, depois da combinação, o número de correspondências realizadas aumentar. No final, todas as combinações de dois filtros que façam correspondência total são guardados na TSol e só depois removidos da TC2. Na Figura 3.14 pode ser consultado o algoritmo de

Seleção de Cascatas de Filtros de grau 2, onde se explica detalhadamente os passos seguidos para se identificar todas as combinações de dois filtros válidas.

Algoritmo de Seleção de Cascatas de Filtros de Grau 2	
1.	Receber a tabela <i>Match</i> (TM) e a tabela <i>Solution</i> (TSol) e criar a tabela <i>Cascade2</i> (TC2).
2.	Criar um ponteiro (<i>i_Match</i>) para a primeira linha da TM e um ponteiro (<i>i_Cascade2</i>) para a primeira linha da TC2.
3.	Enquanto <i>i_Match</i> apontar para uma entrada válida da TM: <ol style="list-style-type: none"> a. Criar um ponteiro (<i>i_Match2</i>) para a linha seguinte à apontada por <i>i_Match</i> (i.e. $i_Match2 = i_Match + 1$). b. Enquanto <i>i_Match2</i> apontar para uma entrada válida da TM: <ol style="list-style-type: none"> i. Se, combinando os filtros identificado pelos ponteiros <i>i_Match</i> e <i>i_Match2</i>, se aumentar o número de correspondências: <ol style="list-style-type: none"> 1. Atualizar a TC2. 2. Incrementar o <i>i_Cascade2</i>, passando este a apontar para a próxima linha da TC2. ii. Incrementar o <i>i_Match2</i>, passando este a apontar para a próxima linha da TM. c. Incrementar o <i>i_Match</i>, passando este a apontar para a próxima linha da TM.
4.	Guardar na TSol todas as cascatas com 2 filtros que façam correspondência total.
5.	Remover as entradas da TC2 que façam correspondência total.

Figura 3.14 - Algoritmo de Seleção de Cascatas de Filtros de grau 2, baseado nos comprimentos de onda que é necessário adicionar/remover em cada direção

Na Tabela 3.8 é apresentada a tabela gerada após a aplicação do algoritmo da Figura 3.14, antes das combinações de filtros com correspondência total serem removidos.

Tabela 3.8 – Tabela *Cascade2*, antes dos filtros com correspondência total serem removidos (para o nó 1, direção 2)

ID Filtro	ID Filtro	Número de Correspondências	Correspondências dos Comprimentos de onda					
			$\lambda 1$	$\lambda 7$	$\lambda 8$	$\lambda 10$	$\lambda 11$	$\lambda 12$
OMD8-1	OMD8-2	6	1	1	1	1	1	1
OMD8-1	OMD4-3	6	1	1	1	1	1	1
OMD8-1	OMD2-5	5	1	1	1	1	1	0
OMD8-1	OMD2-6	4	1	1	1	0	0	1
OMD8-2	OMD4-1	4	1	0	0	1	1	1
OMD8-2	OMD4-2	5	0	1	1	1	1	1
OMD8-2	OMD2-1	4	1	0	0	1	1	1
OMD8-2	OMD2-4	5	0	1	1	1	1	1
OMD4-1	OMD4-2	3	1	1	1	0	0	0
OMD4-1	OMD4-3	4	1	0	0	1	1	1
OMD4-1	OMD2-4	3	1	1	1	0	0	0
OMD4-1	OMD2-5	3	1	0	0	1	1	0
OMD4-1	OMD2-6	2	1	0	0	0	0	1
OMD4-2	OMD4-3	5	0	1	1	1	1	1
OMD4-2	OMD2-1	3	1	1	1	0	0	0
OMD4-2	OMD2-5	4	0	1	1	1	1	0
OMD4-2	OMD2-6	3	0	1	1	0	0	1
OMD4-3	OMD2-1	4	1	0	0	1	1	1
OMD4-3	OMD2-4	5	0	1	1	1	1	1
OMD2-1	OMD2-4	3	1	1	1	0	0	0
OMD2-1	OMD2-5	3	1	0	0	1	1	0
OMD2-1	OMD2-6	2	1	0	0	0	0	1
OMD2-4	OMD2-5	4	0	1	1	1	1	0
OMD2-4	OMD2-6	3	0	1	1	0	0	1
OMD2-5	OMD2-6	3	0	0	0	1	1	1

Estruturalmente, à exceção da nova coluna com o ID do segundo filtro, introduzida entre a coluna com ID do primeiro filtro e a coluna com o número de correspondências, a TC2 e a TM são iguais.

No caso das cascatas de grau 3, as várias entradas da TC2 são combinadas com as entradas da TM, com o objetivo de se identificar combinações de 3 filtros onde se verifique correspondência total. O algoritmo de Seleção de Cascatas de Filtros de grau 3, desenvolvido é apresentado na Figura 3.15.

Algoritmo de Seleção para Cascatas de Filtros Grau 3

1. Receber a tabela Match (TM), a tabela *Solution* (TSol) e a tabela *Cascade2* (TC2) e criar a tabela *Cascade3* (TC3).
2. Criar um ponteiro ($i_Cascade2$) para a primeira linha da TC2 e um ponteiro ($i_Cascade3$) para a primeira linha da TC3.
3. Enquanto $i_Cascade2$ apontar para uma entrada válida da TC2:
 - a. Criar um ponteiro (i_Match) para a primeira linha da TM.
 - b. Enquanto i_Match apontar para uma entrada válida da TM:
 - i. Se, combinando o filtro da TM apontado pelo i_Match , com a cascata de filtros da TC2 apontado por $i_Cascade2$, o número de correspondências aumentar:
 1. Atualizar a tabela TC3.
 2. Incrementar o $i_Cascade3$, passando este a apontar para a próxima linha da TC3.
 - ii. Incrementar o i_Match , passando este a apontar para a próxima linha da TM.
 - c. Incrementar o $i_Cascade2$, passando este a apontar para a próxima linha da TC2.
4. Guardar na TS todas as cascatas com 3 filtros que façam correspondência total.

Figura 3.15 - Algoritmo de Seleção de Cascatas de Filtros de grau 3, baseado nos comprimentos de onda que é necessário adicionar/remover em cada direção

Este algoritmo recorre a uma nova tabela auxiliar denominada por *Cascade3* (TC3). A única diferença entre esta tabela e a TC2 é a coluna adicional utilizada para guardar o ID do terceiro filtro da cascata. Na Tabela 3.9 é apresentada a TC3 gerada após a aplicação do algoritmo de seleção de cascatas de filtros de grau 3, Figura 3.15. No final, todas as combinações de três filtros que façam correspondência total são guardados na TSol.

Tabela 3.9 – Tabela *Cascade2* (para o nó 1, direção 2).

ID Filtro	ID Filtro	ID Filtro	Número de Correspondências	Correspondências dos Comprimentos de onda					
				$\lambda 1$	$\lambda 7$	$\lambda 8$	$\lambda 10$	$\lambda 11$	$\lambda 12$
OMD8-1	OMD2-5	OMD2-6	6	1	1	1	1	1	1
OMD8-2	OMD4-1	OMD4-2	6	1	1	1	1	1	1
OMD8-2	OMD4-1	OMD2-4	6	1	1	1	1	1	1
OMD8-2	OMD4-2	OMD2-1	6	1	1	1	1	1	1
OMD8-2	OMD2-1	OMD2-4	6	1	1	1	1	1	1
OMD4-1	OMD4-2	OMD2-5	5	1	1	1	1	1	0
OMD4-1	OMD4-2	OMD2-6	4	1	1	1	0	0	1
OMD4-1	OMD4-3	OMD2-4	6	1	1	1	1	1	1
OMD4-1	OMD2-4	OMD2-5	5	1	1	1	1	1	0
OMD4-1	OMD2-4	OMD2-6	4	1	1	1	0	0	1
OMD4-1	OMD2-5	OMD2-6	4	1	0	0	1	1	1
OMD4-2	OMD4-3	OMD2-1	6	1	1	1	1	1	1
OMD4-2	OMD2-1	OMD2-5	5	1	1	1	1	1	0
OMD4-2	OMD2-1	OMD2-6	4	1	1	1	0	0	1
OMD4-2	OMD2-5	OMD2-6	5	0	1	1	1	1	1
OMD4-3	OMD2-1	OMD2-4	6	1	1	1	1	1	1
OMD2-1	OMD2-4	OMD2-5	5	1	1	1	1	1	0
OMD2-1	OMD2-4	OMD2-6	4	1	1	1	0	0	1
OMD2-1	OMD2-5	OMD2-6	4	1	0	0	1	1	1
OMD2-4	OMD2-5	OMD2-6	5	0	1	1	1	1	1

Ao contrário da TM, TC2 e TC3, que são tabelas auxiliares criadas e inicializadas sempre que se analisa um novo par nó/direção de adição/remoção, a Tabela *Solution* (TSol) é criada logo no início da camada, antes ainda de ser analisada qualquer tipo de direção, sendo depois apenas atualizada com os resultados obtidos para as várias direções de adição/remoção que vão sendo analisadas. Deste modo, no final desta camada esta tabela deverá guardar todos os filtros e combinações de filtros válidos para cada par nó/direção.

A TSol é composta por um total de 7 colunas. A primeira e segunda coluna identificam respetivamente o nó e direção da solução apresentada. Por sua vez, a terceira coluna identifica o número de filtros utilizados, enquanto a quarta coluna guarda o fator de custo da solução apresentada. Este Fator de custo corresponde ao somatório dos fatores de custo dos vários filtros utilizados. As três últimas colunas guardam os IDs dos filtros utilizados em cada solução. Na Tabela 3.10 são apresentadas as entradas da TSol obtidas após a aplicação dos algoritmos de seleção da Figura 3.13, Figura 3.14 e Figura 3.15, tendo em conta apenas os comprimentos de onda que têm de ser adicionados/removidos em cada direção do nó.

Tabela 3.10 – Parte da Tabela *Solution* contendo apenas as soluções para o nó 1, direção 2

Nó	Direção	Nº de Filtros	Fator de Custo	ID Filtro	ID Filtro	ID Filtro
1	2	1	8	OMD44-1		
1	2	2	12	OMD8-1	OMD8-2	
1	2	2	9	OMD8-1	OMD4-3	
1	2	3	8	OMD8-1	OMD2-5	OMD2-6
1	2	3	12	OMD8-2	OMD4-1	OMD4-2
1	2	3	10	OMD8-2	OMD4-1	OMD2-4
1	2	3	10	OMD8-2	OMD4-2	OMD2-1
1	2	3	8	OMD8-2	OMD2-1	OMD2-4
1	2	3	7	OMD4-1	OMD4-3	OMD2-4
1	2	3	7	OMD4-2	OMD4-3	OMD2-1
1	2	3	5	OMD4-3	OMD2-1	OMD2-4
(...) Soluções para os outros nós/direções (...)						

Depois deste passo, é necessário identificar quais das entradas da TSol que, para além de permitirem a correta adição/remoção dos comprimentos de onda requeridos, não removem, indevidamente, os comprimentos de onda que têm de ser passados por ligações de expresso através do porto de expresso do filtro. Na Figura 3.16 é apresentado o Algoritmo de Identificação dos filtros compatíveis com as ligações de expresso que necessitam de ser estabelecidas.

Em suma, este algoritmo verifica, tendo em conta o par nó/direção de cada solução, se é necessário realizar alguma ligação de expresso que aconteça nesse mesmo nó/direção. Caso isso se verifique é necessário confirmar para os vários filtros de cada solução, se não é filtrado nenhum comprimento de onda que deveria ser passado por expresso. Somente as soluções válidas devem ser guardadas na tabela *Express Solution* (TES). A TES tem a mesma estrutura da TSol.

Algoritmo de Identificação dos Filtros compatíveis com as Ligações de Expresso

1. Receber a tabela *Filters* (TF), a tabela de *Express* (TE) e uma cópia da tabela *Solution* (TSol), denominada por tabela *Express Solution* (TES), e criar um ponteiro (i_TES) para a primeira linha da TES.
2. Enquanto i_TES apontar para uma entrada válida da TES:
 - a. Criar um ponteiro (i_exp) para a primeira linha da TE.
 - b. Enquanto i_exp apontar para uma entrada válida da TE:
 - i. Se i_exp apontar para uma direção de expresso que ocorra no par nó/direção da entrada apontada por i_TES :
 1. Criar um ponteiro j_TES para o primeiro filtro da solução apontada por i_TES (5ª coluna da TES).
 2. Enquanto não forem analisados todos os filtros da solução apontada por i_TES :
 - a. Criar um ponteiro ($j_filters$) para o primeiro comprimento de onda filtrado por cada filtro (5ª coluna da TF).
 - i. Enquanto j_filter apontar para um comprimento de onda válido do filtro apontado por j_TES :
 1. Criar um ponteiro (j_exp) para o primeiro comprimento de onda passado por expresso (5ª coluna da TE).
 2. Enquanto j_exp apontar para um comprimento de onda da direção de expresso apontada por i_exp :
 - a. Se o comprimento de onda filtrado for igual ao comprimento de onda que deve ser passado por expresso, ou seja, se $j_filter = j_exp$:
 - i. Remover da TES a entrada apontada por i_TES .
 - ii. Voltar ao segundo ponto do código.
 - b. Incrementar j_exp , passando este a apontar para o próximo comprimento de onda da TE.
 3. Incrementar o ponteiro $j_filters$, passando este a apontar para o próximo comprimento de onda da TF.
 - b. Incrementar o ponteiro j_TES , passando este a apontar para o próximo filtro da TES.
 - ii. Incrementar o i_exp , passando este a apontar para a próxima entrada da TE.
 - c. Incrementar o i_TES , passando este a apontar para a próxima entrada da TES.

Figura 3.16 – Algoritmo de Identificação dos Filtros compatíveis com as Ligações de Expresso

Recuperando o exemplo que tem vindo a ser acompanhado (nó 1, direção 2 da rede de teste), como não existe nenhuma direção de expresso definida na TE que passe nesse par nó/direção, todas as soluções da TSol descritas na Tabela 3.10 continuam a ser válidas, estando por isso também guardadas na TES.

Dado que a TSol guarda todas as possíveis configurações, para cada par nó/direção, que garantam a adição/remoção dos comprimentos de onda requeridos, e que a TES guarda, de entre essas configurações, aquelas que conseguem passar todos os canais necessários pela porta de expresso do filtro, comparando estas duas tabelas é possível identificar, caso existam, os pares nó/direção onde ocorra o problema da remoção dos comprimentos de onda indevidos. As soluções da TSol destes pares nó/direção devem ser guardados numa tabela auxiliar denominada por *CriticalSolutions* (TCS). Depois, devem ser identificados, para cada uma das soluções, o número de comprimentos de onda que estão a ser bloqueados. No final, a TCS deve atualizada passando apenas guardar a solução, para cada par nó/direção, que garanta o bloqueio de um menor número de comprimentos de onda. Estes dados devem também passar a ser guardados na TCS.

O problema da remoção indevida de comprimentos de onda pode ser resolvido estabelecendo ligações por *Drop & Re-add*, com ou sem regeneração, para os canais bloqueados. Nesse caso deve ser aplicado o algoritmo da Figura 3.17. No caso do *Drop & Re-add* com regeneração à medida que vão sendo identificados os canais bloqueados deve-se ir contabilizando os *transponders* adicionais necessários.

Algoritmo de identificação da melhor solução de *Drop & Re-add*

1. Receber a tabela *CriticalSolutions* (TCS), a tabela de *Express Solution* (TES), a tabela de *Express* (TE), a tabela de *Add/Drop* (TAD) e a tabela *Filters* (TF).
2. Criar um ponteiro (i_TCS) para a primeira linha da TCS.
3. Enquanto i_TCS apontar para uma entrada válida da TCS:
 - a. Identificar na TE qual é a outra direção do nó (doravante denominada por direção adjacente) com que o par nó/direção apontado por i_TCS necessita de estabelecer a ligação de expresso.
 - b. Eliminar da TES e da TCS todas as soluções, caso existam, da direção adjacente.
 - c. Identificar na TAD os canais que têm de ser adicionados/removidos na direção adjacente e acrescentar a essa direção os comprimentos de onda que necessitam de ser passados por *Drop & Re-add*.
 - d. Correr, para a direção adjacente, o algoritmo de seleção de filtros baseado nos comprimentos de onda que é necessário adicionar/remover (ver Figura 3.13, Figura 3.14 e Figura 3.15).
 - e. Correr, para a direção adjacente, o algoritmo de identificação dos filtros compatíveis com as ligações de expresso (ver Figura 3.16).
 - f. Guardar, na TES, a melhor configuração da direção adjacente, tendo em conta o parâmetro que se pretende minimizar (custo/número de filtros).
 - g. Incrementar o ponteiro i_TCS , passando este a apontar para a próxima entrada da TCS.

Figura 3.17 – Algoritmo de identificação da melhor solução de Drop & Re-add

Alternativamente podem ser utilizadas direções ROADM, em vez dos filtros fixos, em todas as direções guardadas na TCS. Nesse caso é necessário atualizar a TROADM de modo a contabilizar as direções ROADM adicionadas.

Depois deste passo, todas as direções da rede estão configuradas. Os seguintes dados são então guardados num ficheiro *excel*, denominado por *output.xlsx*:

- Caminho e comprimentos de onda atribuídos a cada serviço.
- Número de direções de expresso inválidas e número de canais passados por *Drop & Re-add*.
- Todas as possíveis configurações para as várias direções de cada nó.
- Lista com a melhor configuração para cada nó/direção (dependendo do parâmetro de minimização escolhido).
- Lista de equipamento (Filtros Fixos, direções ROADM e *transponders*) utilizado na melhor solução.
- Custo total da melhor solução gerada pela ferramenta de planeamento.
- Custo da solução reconfigurável.

No anexo 3 é apresentado um exemplo do ficheiro de *output* gerado pela ferramenta de planeamento.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1. NOTA INTRODUTÓRIA

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos pela ferramenta de planeamento, apresentada na secção 3, utilizando os algoritmos de RWA e de seleção de filtros, apresentados na secção 2.4 e na secção 3.6, respetivamente. Neste sentido, foram testadas redes com diferentes topologias segundo diferentes tipos de abordagens. Na secção 4.2 são analisadas um conjunto de redes em cadeia e em anel segundo o método de Monte Carlo, tendo em conta os resultados obtidos para um elevado número de simulações aleatórias, enquanto na secção 4.3 são planeadas duas redes reais com topologia em malha, suportando um conjunto de serviços, com e sem proteção, típicos dos cenários metro.

Nas várias análises realizadas foram consideradas as diversas alternativas apresentadas como solução para o problema das direções de expresso inválidas e para o problema da remoção indevida de comprimentos de onda. O método de atribuição de comprimentos de onda escolhido foi o algoritmo de *graph-coloring* adaptativo, Figura 2.14, utilizando a regra de decisão de *first-fit*. Foram utilizados como parâmetros de minimização o número de filtros utilizados e o custo da solução final, onde se contabilizou o custo dos filtros, direções ROADM e *transponders* adicionais utilizados.

4.2. ANÁLISE A REDES COM TOPOLOGIA EM CADEIA E EM ANEL

O primeiro passo na análise das redes com topologia em cadeia e em anel é definir o número de nós da rede que se pretende analisar. De seguida, é necessário definir o modo como os serviços são gerados, bem como o tipo e número de serviços que é necessário planejar. Por fim, é necessário definir o número de simulações a realizar para cada cenário testado, bem como os parâmetros que devem ser analisados.

Para identificar a tendência de evolução das redes analisadas causada pelo aumento do número de serviços planeados, foram considerados sete cenários de planeamento diferente, variando, entre cada cenário, o número

de serviços que estão por planear. Para o cenário mais simples é necessário planear 10 serviços, sendo acrescentados 5 novos serviços por cada novo cenário. Deste modo, são simulados cenários com 10, 15, 20, 25, 30, 35 e 40 serviços, sendo realizadas 1000 simulações para cada cenário. Em todas as simulações os serviços são gerados de um modo aleatório.

No final de cada simulação são recolhidos os seguintes parâmetros:

- Número de filtros utilizados.
- Número de canais passados por *Drop & Re-add*.
- Custo total da solução final.

Considera-se nesta análise que os canais que necessitem de ser passados por Drop & Re-add devem ser regenerados antes de serem readicionados. A regeneração do sinal é possível através da introdução de dois *transponders* adicionais.

Uma vez que são realizadas um elevado número de simulações aleatórias, é possível calcular heurísticamente as probabilidades dos vários acontecimentos segundo o método estatístico de Monte Carlo. Deste modo são construídos para cada parâmetro, de cada cenário, os histogramas com a distribuição dos resultados, tendo em conta o seu número de ocorrências.

A título exemplificativo, na Figura 4.1, são apresentados dois histogramas. No primeiro histograma, Figura 4.1 (a), vem contabilizado o número de filtros fixos utilizados e respetivo número de ocorrências, tendo em conta as 1000 simulações realizadas. De modo análogo, no segundo histograma, Figura 4.1 (b), vem contabilizado o número de canais passados por *Drop & Re-add* e o respetivo número de ocorrências. Os histogramas apresentados foram gerados tendo em conta os resultados obtidos para a rede com topologia física em anel (topologia lógica em malha) de 25 serviços, cenário mais à frente analisado.

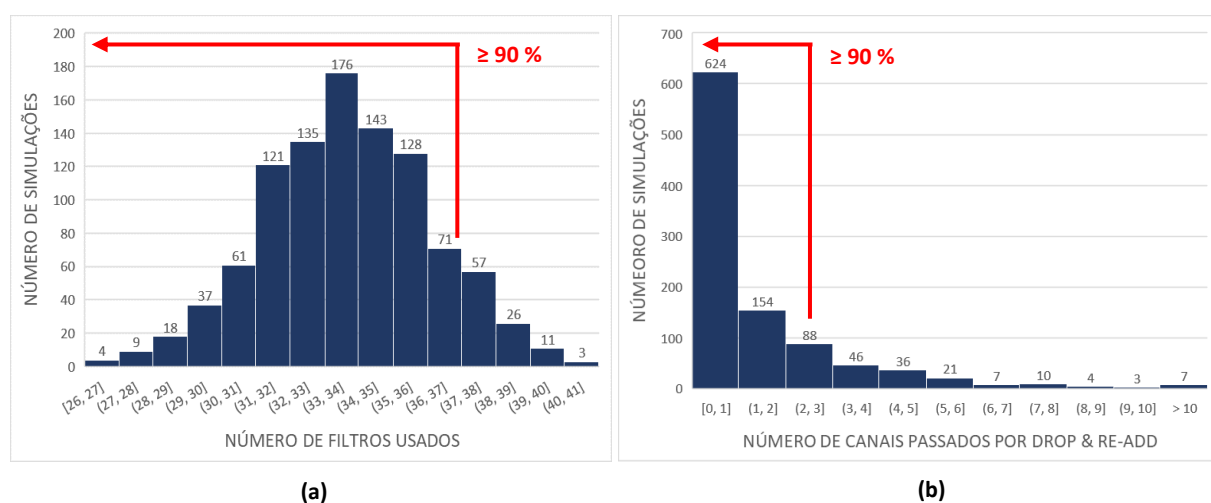


Figura 4.1 – Rede em anel, com topologia lógica em malha com 25 serviços. Histogramas: (a) número de filtros utilizados. (b) número de canais passados por Drop & Re-add

Após a construção do histograma, será considerado para análise o resultado mais pessimista que estiver dentro de um intervalo de confiança de 90 %, garantindo-se deste modo que, no mínimo, 90 % das simulações realizadas têm resultados melhores ou iguais aos considerados para análise.

Assim, para o cenário ilustrado na Figura 4.1 (a), segundo este critério o valor do parâmetro do número de filtros utilizados a considerar para análise é 37, isto porque, em 90% das simulações realizadas nunca foram utilizados mais do que 37 filtros. Alternativamente, poderia ter sido utilizado o valor médio ou mediana das várias simulações obtidas, que neste caso corresponderia a 34 filtros, contudo preferiu-se seguir uma abordagem mais conservadora, mas que, simultaneamente, conferisse uma maior confiança sobre os resultados apresentados.

A rede em cadeia analisada é composta por 8 nós, sendo a sua topologia física apresentada na Figura 4.2.



Figura 4.2 – Topologia Física da rede em cadeia analisada

Todas as simulações realizadas nesta rede utilizaram serviços gerados de um modo aleatório, segundo uma topologia lógica em ferradura (*Horseshoe* em terminologia anglo-saxónica), apresentada na Figura 4.3. Tipicamente, esta topologia lógica é utilizada para realizar extensões de redes em malha já implementadas. Nestes casos, o primeiro e o último nó da cadeia (neste exemplo os nós 1 e 8), fazem também parte de uma rede *core* já existente. Por sua vez, na rede em cadeia estes nós funcionam como concentradores de tráfego (*hubs* em terminologia anglo-saxónica), estabelecendo conexões lógicas com os restantes nós [45]. Por este motivo, os serviços são sempre estabelecidos entre um destes dois nós (nó 1 e o nó 8) e um outro nó intermédio da cadeia (neste caso do nó 2 ao nó 7). Ambos os nós finais de cada serviço são escolhidos de um modo aleatório. Todos os serviços considerados são de um único canal, utilizando uma largura de banda de 10 G, contudo sempre que for definido mais do que um serviço com os mesmos nós finais, ou seja, sempre que são definidos dois serviços iguais, o número de canais do primeiro serviço deve ser incrementado e o serviço repetido deve ser eliminado.

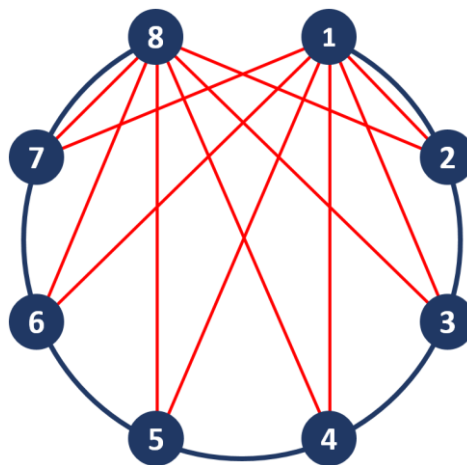


Figura 4.3 – Topologia Lógica Horseshoe

Esta rede foi analisada utilizando dois parâmetros de minimização, sendo apresentados na Figura 4.4 os gráficos com a evolução do número de filtros utilizados, tendo em conta o número de serviços suportados por cada cenário.

Na Figura 4.4 (a) são apresentados os resultados obtidos utilizando como parâmetro de minimização o custo da solução final. Neste caso são necessários 14 filtros para suportar 10 serviços e 26 filtros para suportar 40 serviços, sendo, em média, acrescentados 2 filtros à solução final, por cada 5 novos serviços planeados. Utilizando este parâmetro de minimização, são utilizados sobretudo filtros do tipo OMD2-y, isto porque, do ponto de vista económico, é preferível utilizar dois filtros OMD2-y em cascata do que um filtro simples do tipo OMD4-y. Na Tabela A2.1 é apresentado o fator de custo de todos os filtros considerados nesta análise. A partir do cenário com 20 serviços, começam a ser utilizados dois filtros OMD44-1, um em cada nó com funções de *hub* (nó 1 e 8).

Na Figura 4.4 (b) são apresentados os resultados obtidos utilizando como parâmetro de minimização o número de filtros da solução final. Neste caso são necessários apenas 10 filtros para suportar 10 serviços e 22 filtros para suportar 40 serviços. Dependendo do número de serviços planeados, este parâmetro de minimização levou a uma diminuição, de 10 % a 30 %, do número de filtros utilizados. Esta redução do número total de filtros está diretamente ligada com a utilização de um maior número de filtros OMD4-y, em detrimento das cascatas de OMD2-y.

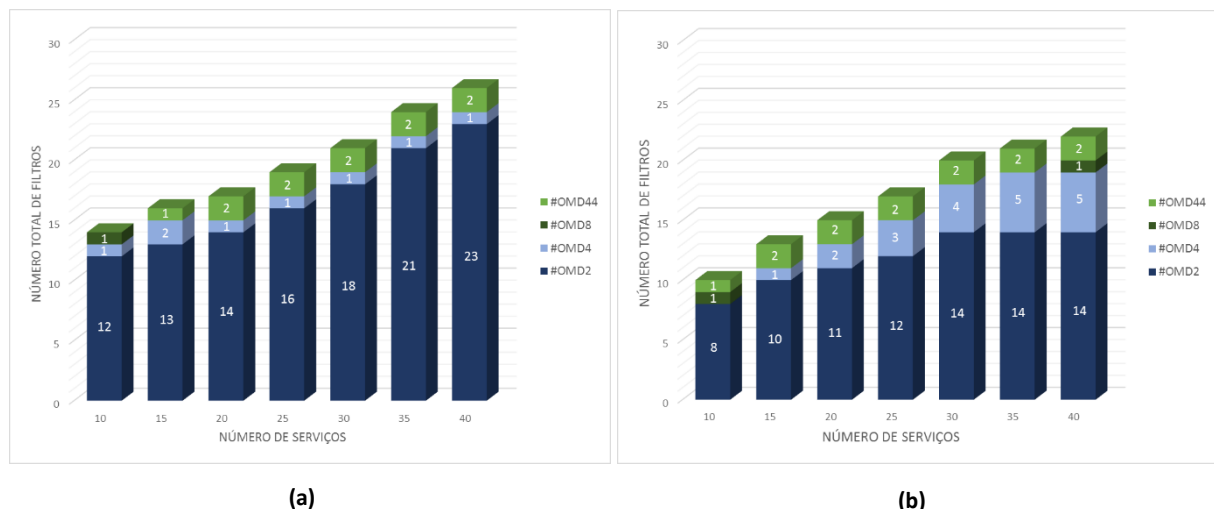


Figura 4.4 – Evolução do número de filtros utilizados com o aumento do número de serviços suportados, utilizando como parâmetro de minimização: (a) o custo da rede. (b) o número de filtros

Na Figura 4.5 é apresentado o gráfico com a evolução do número de canais passados por *Drop & Re-add*, tendo em conta o número de serviços suportados.

A ferramenta de planeamento foi desenhada para, na existência de direções com canais indevidamente adicionados/removidos, minimizar primeiro esse número de canais, e só depois escolher os filtros adequados, tendo em conta o parâmetro que se pretende minimizar. Por este motivo o número de canais passados por *Drop & Re-add* não varia com o parâmetro de minimização escolhido.

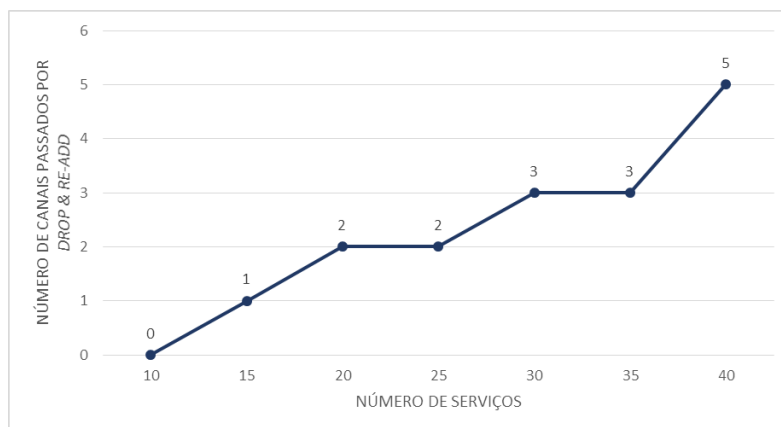


Figura 4.5 - Evolução do número de canais passados por Drop & Re-add com o aumento do número de serviços

Na Figura 4.6 é apresentada a evolução do fator de custo da solução final, tendo em conta o aumento do número de serviços suportados. Os resultados obtidos utilizando o custo da solução final como parâmetro de minimização são representados a azul, enquanto os resultados obtidos utilizando o número de filtros como parâmetro de minimização são representados a verde. Em ambos os casos foi considerado um intervalo de confiança de 90 %.

Comparando a tendência de evolução do gráfico da Figura 4.5 com o gráfico da Figura 4.6 é possível concluir que existe uma ligação direta entre o custo da solução final e o aumento de canais passados por Drop & Re-add, isto porque, segundo a abordagem seguida nesta análise, esses canais precisam de ser regenerados antes de serem readicionados na direção correta. O fator de custo dos *transponders* 10G é apresentado na Tabela A2.3.

Há medida que o número de canais que necessitam de ser passados por Drop & Re-add começa a aumentar, o custo associado aos filtros começa a perder importância. Analisando o cenário com 40 serviços, onde 5 desses 40 canais necessitam de ser regenerados, 30 % do fator de custo da solução final está relacionado com os filtros escolhidos, enquanto os 70 % restantes está relacionado com os *transponders* adicionais que necessitam de ser utilizados.

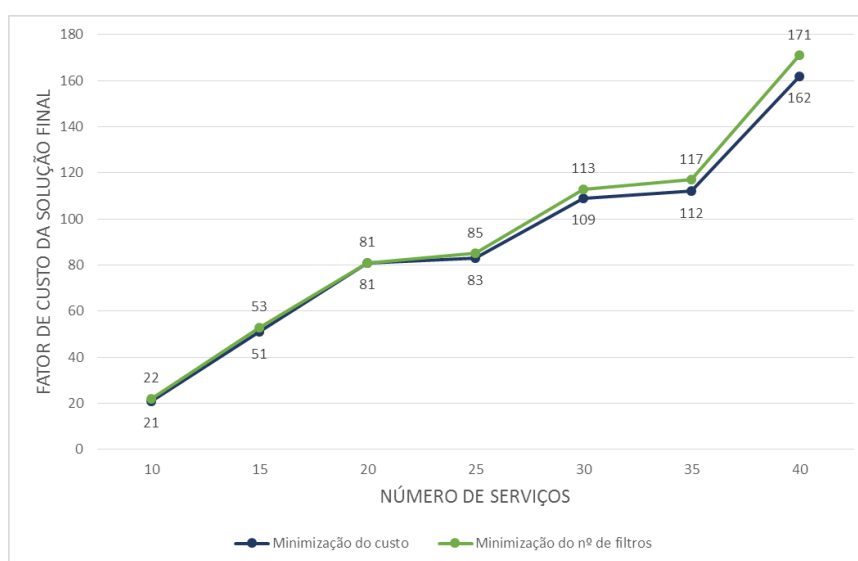


Figura 4.6 - Evolução do fator de custo da solução final com o aumento do número de serviços suportados, utilizando como parâmetro de minimização o custo da rede (azul) e o número de filtros (verde)

Tal como seria de esperar, utilizando o parâmetro de minimização do custo da rede, é possível obter, do ponto de vista económico, resultados melhores contudo, a diferença entre as duas soluções propostas não é significativa.

No caso da solução reconfigurável, todas as direções dos nós seriam equipadas com direções ROADM. No total, independentemente do número de serviços considerados, seriam necessárias 14 direções ROADM, 2 para cada nó intermédio e uma para cada nó *hub*. Tendo em conta os valores apresentados na Tabela A2.2, a solução reconfigurável teria um fator de custo igual a 1120. Assim, comparando o custo da solução reconfigurável com o custo obtido para o cenário de 40 serviços utilizando filtros fixos, é possível concluir que, independentemente do parâmetro de minimização escolhido, a solução proposta garante uma redução no fator de custo na ordem dos 85 %.

O mesmo tipo de análise foi aplicado a uma rede com topologia em anel, utilizando apenas como parâmetro de minimização o custo da solução final. Também neste caso, todas as simulações realizadas utilizaram serviços gerados de um modo aleatório. A rede em anel utilizada é composta por 8 nós, tendo sido realizadas simulações para duas topologias lógicas distintas.

Na primeira topologia lógica analisada, apresentada na Figura 4.7 (a), um dos nós (neste exemplo o nó 1) funciona como *hub*, estabelecendo conexões com todos os restantes nós da rede. Este tipo de topologia é normalmente utilizado para interligar antenas de comunicações móveis. O nó de *hub* executa as funções de estação base transceptor (BTS em terminologia anglo-saxónica *Base Transceiver Station*) de agregação de tráfego, estando conectada a uma outra rede ótica já existente. Neste tipo de redes, os serviços são sempre estabelecidos entre um nó de *hub* (nó 1) e um outro nó do anel (neste caso do nó 2 ao nó 8). Uma vez mais, foram considerados serviços de único-canal com uma largura de banda de 10G.

Na segunda topologia lógica, apresentada na Figura 4.7 (b), não foi definido nenhum tipo de limitação no estabelecimento de serviços, ou seja, podem ser estabelecidos serviços entre todos os nós da rede. Por este motivo, todos os nós do anel podem ser escolhidos aleatoriamente como nós finais do serviço. Apesar desta rede ter uma topologia física em anel, a sua topologia lógica é em malha completa.

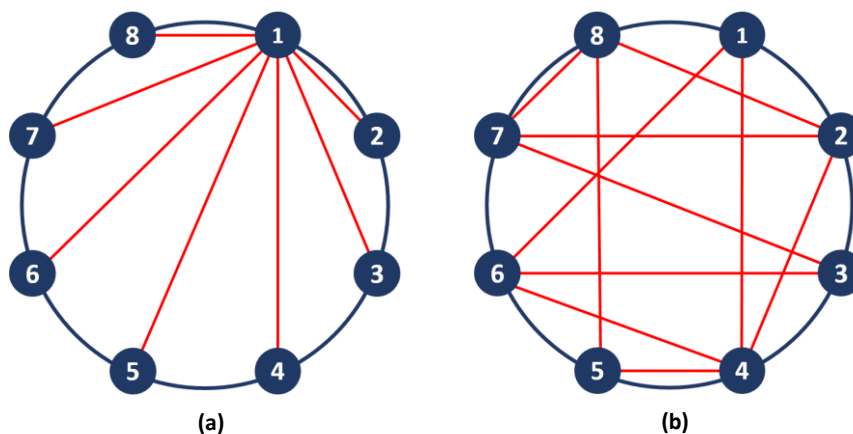


Figura 4.7 – Topologia Lógica: (a) com um nó Hub. (b) em malha (todos os nós a trocarem serviços entre si)

Na Figura 4.8 é apresentado o gráfico com a evolução do número de filtros utilizados, tendo em conta o número de serviços suportados, utilizando uma topologia lógica com um único nó *hub* e utilizando uma topologia lógica em malha.

No primeiro caso, Figura 4.8 (a), são necessários 13 filtros para suportar 10 serviços e 21 filtros para suportar 40 serviços. Devido ao parâmetro de minimização escolhido, os OMD2-y são os filtros dominantes, contudo, em cenários com 25 ou mais serviços, começam a ser utilizados dois filtros OMD44-1, um em cada direção do nó com funções de *hub*. Nesta topologia lógica foi possível quadruplicar o número de serviços suportados aumentando o número de filtros em apenas 61.5 %.

No segundo caso, Figura 4.8 (b), utilizando a topologia lógica em malha, são necessários 20 filtros para suportar 10 serviços e 45 filtros para suportar 40 serviços. Comparando os resultados obtidos com os resultados da topologia com um nó *hub*, na maioria dos cenários, o número de filtros utilizados duplicou. Este aumento é justificado pela maior complexidade do problema, causado pelo maior grau de liberdade dado ao processo de escolha de serviços. Neste caso, como nenhum nó da rede funciona como *hub*, quando se utilizam filtros OMD44-1 é porque já não existem cascatas de filtros compatíveis com os comprimentos de onda que têm de ser adicionados/removidos numa dada direção do nó. Como estes filtros não dispõem de nenhuma porta expresso é expectável que o uso de OMD44-1 se traduza num aumento do número de canais passados por *Drop & Re-add*.

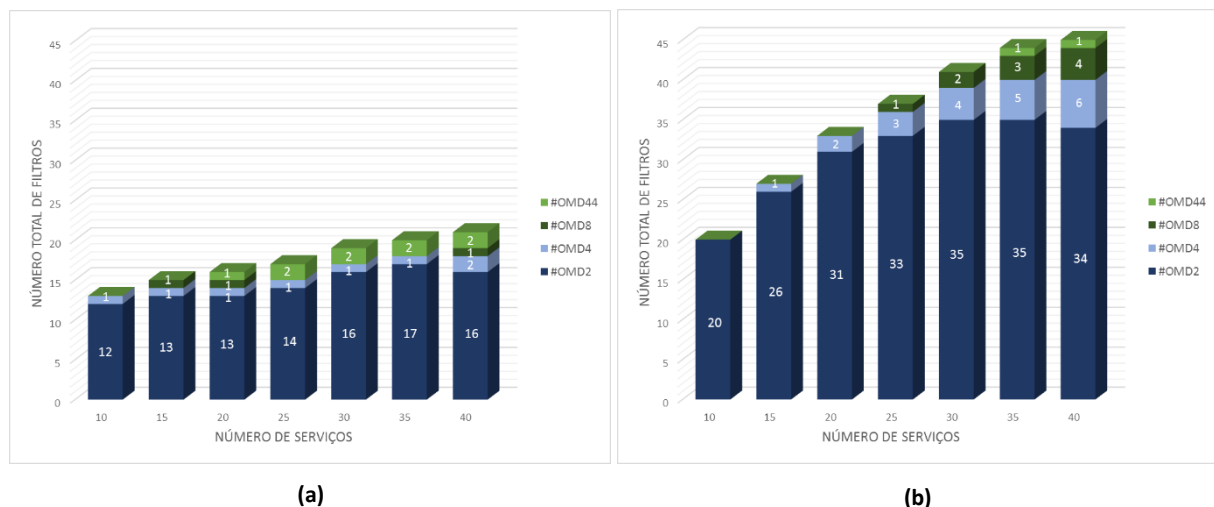


Figura 4.8 - Evolução do número de filtros utilizados com o aumento do número de serviços suportados, utilizando a topologia lógica: (a) com um nó *hub*. (b) em malha

Na Figura 4.10 são apresentados os gráficos com a evolução do número de canais passados por *Drop & Re-add*, tendo em conta o número de serviços suportados, utilizando as duas topologias em análise.

No caso da topologia com um nó *hub*, independentemente da quantidade de serviços suportados, nenhum canal precisa de ser passado por *Drop & Re-add*. Por sua vez, no caso da topologia lógica em malha começa a ser necessário passar canais por *Drop & Re-add* para cenários com mais de 10 serviços. A partir desse ponto, a adição de 5 novos serviços acaba por se traduzir, aproximadamente, numa duplicação do número de canais passados por *Drop & Re-add*.

Na Figura 4.10 é apresentada a evolução do fator de custo da solução final, tendo em conta o aumento do número de serviços suportados, utilizando a topologia lógica com um nó *hub*, representado a verde, e a topologia lógica em malha, representado a azul.

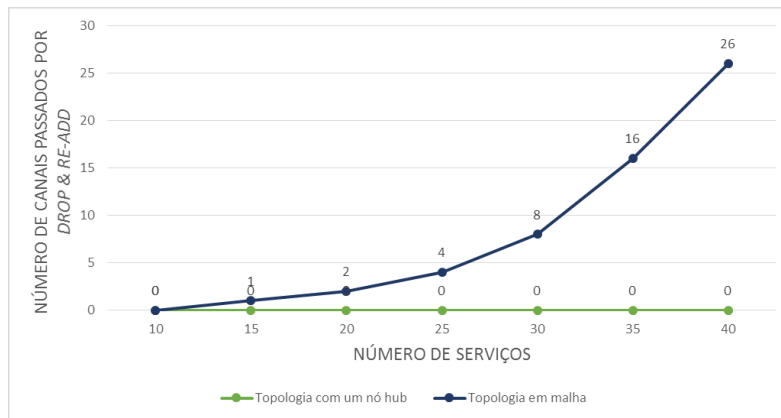


Figura 4.9 - Evolução do número de canais passados por Drop & Re-add com o aumento do número de serviços, utilizando a topologia lógica com um nó *hub* (verde) e a topologia lógica em malha (azul)

Enquanto no caso da topologia lógica com um nó *hub*, o aumento do número de filtros não conduz a uma variação significativa do fator de custo, no caso da topologia lógica em malha, o aumento do número de serviços leva ao aumento do número de canais passados por *Drop & Re-add*, que acaba por se traduzir num aumento do fator de custo da solução final, causado pela introdução dos *transponders* adicionais. Assim, para o cenário de 40 serviços, a solução da topologia lógica em malha custa 16 vezes mais que a solução da topologia lógica com um nó *hub*.

No caso da solução reconfigurável seriam necessárias 16 direções ROADM (duas por nó), o que corresponderia a um fator de custo igual a 1280. Assim, comparando este resultado com os obtidos para o cenário de 40 serviços, pode-se concluir que, mesmo para topologia lógica em malha, utilizando filtros fixos *pluggable*, é possível obter-se uma redução no fator de custo na ordem dos 45 %.

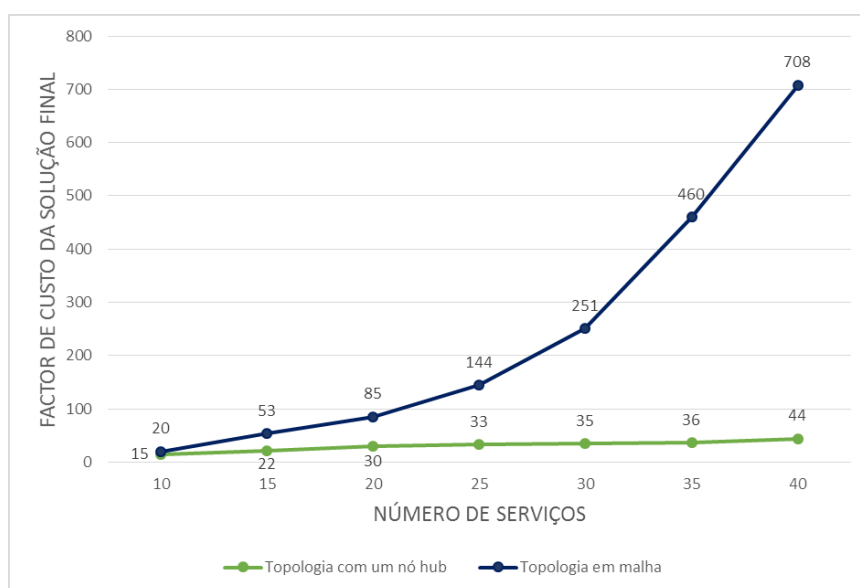


Figura 4.10 - Evolução do fator de custo da solução final com o aumento do número de serviços suportados, utilizando a topologia lógica com um nó *hub* (verde) e a topologia lógica em malha (azul)

No Anexo 4 são apresentados alguns histogramas exemplificativos, que demonstram a obtenção dos resultados para os vários cenários, enquanto no Anexo 5 podem ser encontradas as tabelas com os dados utilizados na construção dos gráficos apresentados.

4.3. ANÁLISE A REDES COM TOPOLOGIA EM MALHA

Uma vez que as redes com topologia em malha podem diferir bastante umas das outras, em vez de se definir uma rede e proceder a uma análise estatística, tal como foi feito para as redes em cadeia e em anel, decidiu-se proceder ao planeamento de duas redes reais, descritas em [46], considerando um conjunto de serviços típicos de redes metropolitanas, com e sem proteção.

Os resultados obtidos pela ferramenta de planeamento utilizando o Algoritmo de *Roteamento* para Redes em Malha, Figura 2.10, e o Algoritmo de atribuição de comprimentos de onda através de *graph coloring* adaptativo, Figura 2.14, foram comparados com os resultados que seriam obtidos caso se utilizasse os métodos de RWA tradicionais, apresentados na secção 2.2, com o *roteamento* a ser realizado segundo a métrica de *shortest-path* e a atribuição de comprimentos de onda segundo a métrica *longest-first*. Foi ainda utilizado como comparação os resultados de uma solução cem por cento reconfigurável, onde todas as direcções dos nós são configuradas utilizando direcções ROADM.

Ambas as redes em malha apresentadas foram planeadas duas vezes. Na primeira vez que as redes foram planeadas definiu-se que os canais passados por direcções de expresso inválidas e/ou indevidamente removidos seriam passados por ligações de *Drop & Re-add* com regeneração, enquanto na segunda vez definiu-se que estes problemas seriam resolvidos através da introdução de direcções ROADM.

A primeira rede testada foi a *California Research and Education Network* (CalREN) [47]. A CalREN é uma rede em malha esparsa com um número médio de direcções nodais (*mean nodal degree* em terminologia anglo-saxónica) igual a 2.32, composta por 17 nós, e 22 secções de fibras. A sua topologia física desta é apresentada na Figura 4.11.

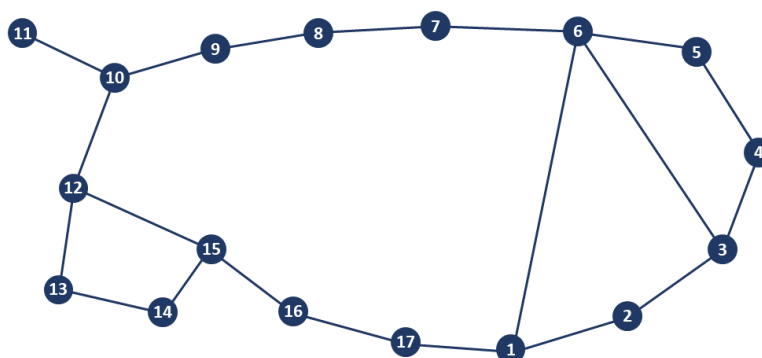


Figura 4.11 – Topologia Física da rede CalREN

Para esta rede foram considerados 37 serviços sem proteção, todos eles compostos por um único canal, utilizando interfaces linha de 100 G. Três dos dezassete nós da rede, mais especificamente os nós 1, 3 e 15, são responsáveis

por gerar e receber uma grande parte do tráfego da rede. Na Figura 4.12 é apresentada a topologia lógica desta rede.

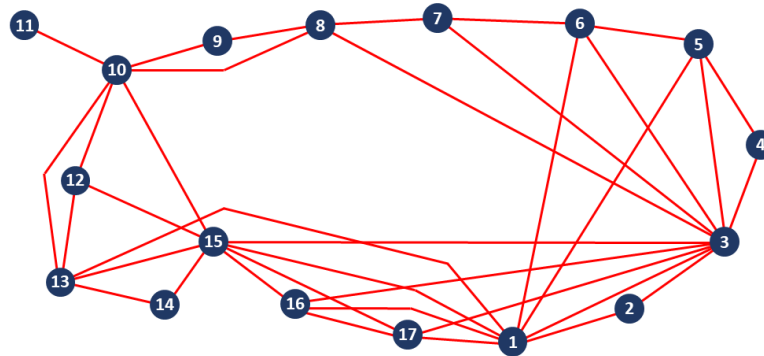


Figura 4.12 – Topologia Lógica da rede CalREN

Utilizando os métodos de RWA propostos, foi possível gerar uma solução que, baseada somente em filtros fixos *pluggable*, é capaz de garantir a correta adição/remoção dos comprimentos de onda em todas as direções dos nós da rede, e de assegurar o estabelecimento das ligações de expresso necessárias, sem com isso definir direções de expresso inválidas (não suportadas pelos filtros utilizados) ou adicionar/remover indevidamente algum canal que deveria ser passado pela porta de expresso. No total, nesta solução foram utilizados 80 filtros, sem ser necessário utilizar qualquer *transponder* ou direção ROADM adicional.

Utilizando os métodos de RWA tradicionais, na primeira simulação foram utilizados 71 filtros em conjunto com 8 *transponders* adicionais, para regenerar os 4 canais passados por *Drop & Re-add*. Na segunda simulação, as direções de expresso inválidas são resolvidas através da introdução de 6 direções ROADM. Com estas novas estruturas, passaram a ser necessários apenas 57 filtros.

Os resultados obtidos segundo o método de RWA proposto e o método de RWA tradicional, utilizando a abordagem de *Drop & Re-add* com regeneração e a abordagem das direções ROADM, são apresentados na Figura 4.13.

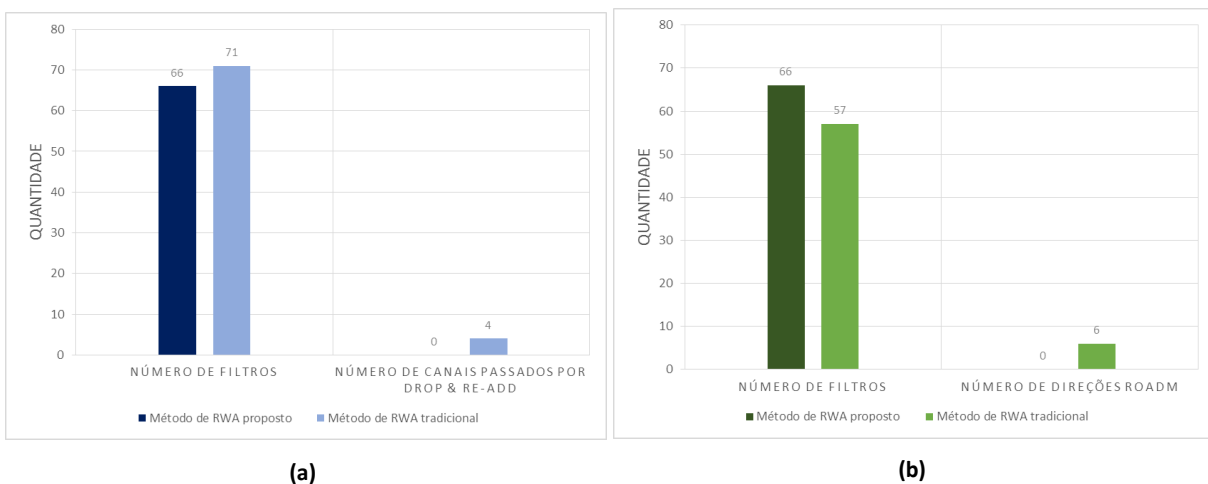


Figura 4.13 – Resultados do método de RWA proposto e do método de RWA tradicional, para a rede CalREN, quando selecionada a solução: (a) Drop & Re-add com Regeneração. (b) Direções ROADM

No caso da solução reconfigurável são utilizadas direções ROADM, em vez dos propostos filtros fixos *pluggable*, em todas as direções dos nós da rede onde seja adicionado/removido tráfego. No total são necessárias 40 direções ROADM, que perfazem um fator de custo total de 3200. Na Figura 4.14 são apresentados os fatores de custo dos vários métodos e abordagens analisados.

Independentemente do tipo de abordagem escolhida, utilizando o método de RWA proposto a solução gerada é a mesma, não variando, por isso, o fator de custo. Já para o método de RWA tradicional, a abordagem onde são utilizadas direções ROADM gera uma solução com um fator de custo inferior à da solução obtida utilizando a abordagem de regeneração.

Comparando o custo da solução obtida utilizando o método de RWA proposto com a solução reconfigurável, obteve-se uma redução no fator de custo da solução final de 97.5 %. Comparando o custo da solução obtida utilizando o método de RWA proposto e o método de RWA tradicional com direções ROADM, obteve-se uma redução no fator de custo de 85.4 %.

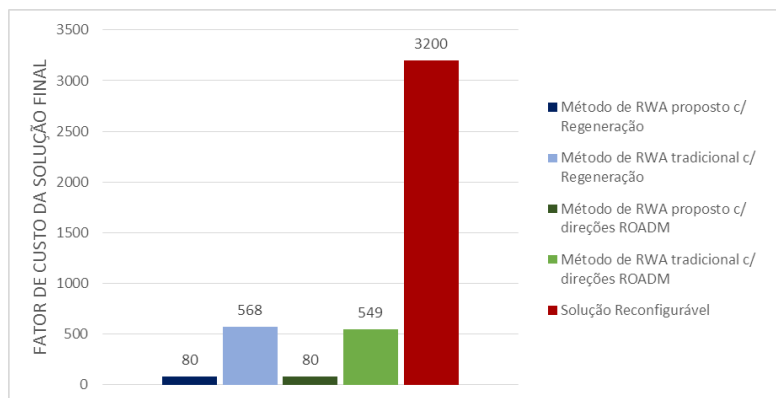


Figura 4.14 – Fator de custo da solução final para os vários métodos testados, para a rede CalREN

A segunda rede testada foi a RedIRIS, uma rede académica e de pesquisa espanhola [48]. Esta rede é composta por 17 nós, 28 secções de fibra e tem uma topologia física em malha mais densa que a CalREN, com um número médio de direções por nó igual a 3.29. A sua topologia física é apresentada na Figura 4.15 (a). Sobre esta rede foram planeados 38 serviços, 18 dos quais serviços com proteção. Os serviços com proteção têm de ser roteados por dois caminhos disjuntos, utilizando o mesmo comprimento de onda que o serviço primário. Todos os serviços são de um único canal com 100 GB de largura de banda. A topologia lógica da rede é apresentada na Figura 4.15 (b), correspondendo as ligações assinaladas a tracejado aos serviços que têm proteção.

Utilizando o método de RWA proposto, foram identificadas duas direções de expresso inválidas e um canal a ser indevidamente adicionado/removido. Aplicando a abordagem de *Drop & Re-add* com regeneração, foi gerada uma solução com 106 filtros com 3 canais a necessitarem de ser regenerados, utilizando 6 *transponders* adicionais. Aplicando a abordagem das direções ROADM, estes problemas foram evitados através do uso de 103 filtros em conjunto com uma única direção ROADM. O uso do novo algoritmo de *roteamento* para redes em malha, apresentado na Figura 2.10, permitiu que se obtivessem melhorias, face aos resultados que já tinham sido apresentados em [49].

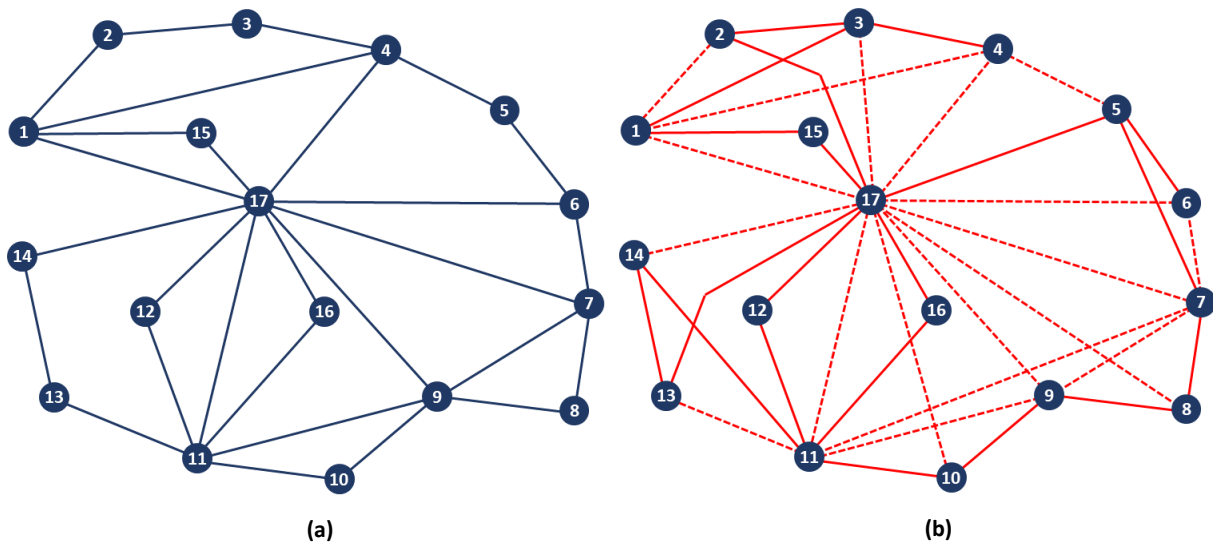


Figura 4.15 – (a) Topologia Física da rede RedIRIS. (b) Topologia Lógica da rede RedIRIS

No caso do método de RWA tradicional, utilizando a abordagem de *Drop & Re-add* com regeneração, foi gerada uma solução com 115 filtros e com 8 canais a necessitarem de ser regenerados, enquanto utilizando a abordagem das direções ROADM, foram utilizados 89 filtros e 9 direções ROADM.

Na Figura 4.16 apresentam-se os resultados obtidos para os vários métodos e abordagens considerados.

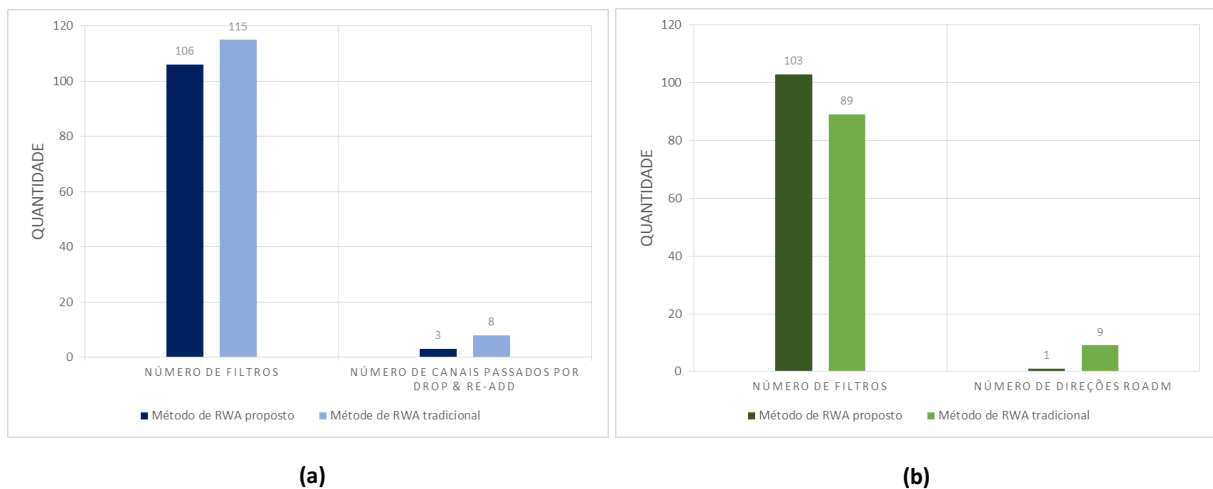


Figura 4.16 - Resultados do método de RWA proposto e do método de RWA tradicional, para a rede RedIRIS, quando selecionada a solução: (a) Drop & Re-add com Regeneração. (b) Direções ROADM

Na Figura 4.14 são apresentados os fatores de custo dos vários métodos e abordagens analisados.

Tanto para o método de RWA proposto como para o método de RWA tradicional a solução economicamente mais viável gerada recorre às direções ROADM. Ainda assim, o método de RWA proposto garante uma redução no fator de custo na ordem dos 25 %, quando comparado com a solução obtida segundo o método de RWA tradicional considerado.

No caso da solução reconfigurável seria necessário utilizar 56 direções ROADM, perfazendo um fator de custo total de 4480. Por este motivo, a solução obtida segundo o método de RWA proposto apresenta redução no fator de custo de 95.5 %, quando comparada com a solução reconfigurável.

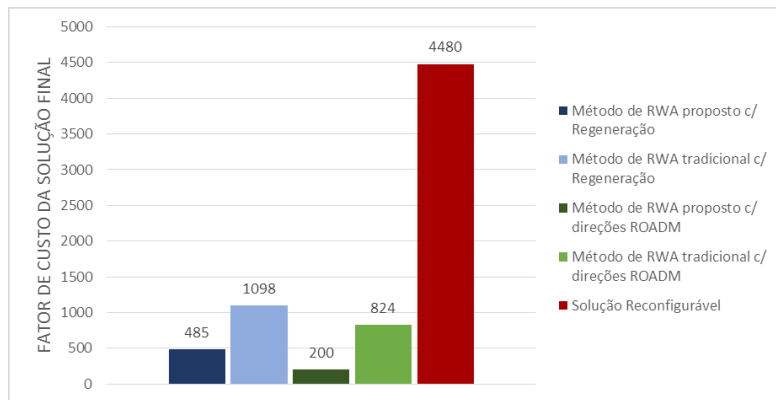


Figura 4.17 - Fator de custo da solução final para os vários métodos testados, para a rede RedIRIS

No Anexo 5 são apresentadas as tabelas com os dados utilizados nesta secção, enquanto no Anexo 6 são apresentadas as redes com os caminhos e comprimentos de onda escolhidos utilizando o método de RWA proposto.

5. CONCLUSÃO

5.1. CONCLUSÕES GERAIS

Nesta dissertação, foi desenvolvida uma ferramenta de planeamento computacionalmente eficiente, implementada e testada em MatLab, capaz de planear redes óticas metropolitanas construídas segundo o recente e disruptivo conceito da desagregação da camada ótica, utilizando estruturas *pluggable* de adição/remoção fixas, passivas e de baixos custo.

A ferramenta de planeamento recorre a um conjunto de métodos heurísticos de roteamento e atribuição de comprimentos de onda, desenvolvidos tendo em conta limitações introduzidas pelos filtros fixos *pluggable* considerados. Foi ainda desenvolvido um novo algoritmo responsável por realizar a seleção dos filtros adequados às várias direções da rede, considerando os comprimentos de onda que precisam de ser adicionados/removidos, passados por expresso e/ou regenerados.

A ferramenta de planeamento foi aplicada a um conjunto de redes em cadeia e em anel. Estas redes foram sujeitas a um elevado número de simulações aleatórias, sendo os resultados obtidos, posteriormente analisados, segundo o método estatístico de Monte Carlo. Nesta análise foi utilizado um intervalo de confiança de 90%, sendo que os resultados foram comparados com os resultados da solução reconfigurável.

No caso da rede em cadeia, os serviços foram definidos segundo uma topologia lógica *horseshoe*. Para este cenário, foi garantido uma redução na ordem dos 85% no custo da solução final. Por sua vez, a rede em anel foi analisada segundo duas topologias lógicas distintas. Para a topologia lógica com um nó *hub*, foi possível planear até 40 serviços sem ser necessário passar um único canal por Drop & Re-add. Por este motivo, foi garantida uma redução superior a 96% no custo da rede. Para a topologia lógica em malha, no cenário em que foram planeados 40 serviços, foi necessário recorrer 26 vezes a regeneração. Ainda assim, quando comparada com a solução reconfigurável, o resultado obtido garante uma redução de aproximadamente 45% no custo da rede.

Foram ainda planeadas duas redes reais com topologia em malha (CaIREN e REIRIS), considerando um conjunto de serviços típicos de redes metropolitanas. A CaIREN é uma rede malha esparsa com 37 serviços, todos eles sem

proteção. Utilizando os métodos de roteamento e atribuição de comprimentos de onda propostos, os serviços foram configurados de tal modo que nenhum canal necessitou de ser regenerado nem nenhuma direção ROADM precisou de ser utilizada. Quando comparada com a solução reconfigurável, esta solução garantia uma redução no custo da rede de 97.5%. A segunda rede analisada foi a RedIRIS. Esta rede é uma rede em malha densa composta por 17 nós. No caso analisado foram criados 38 serviços, 18 dos quais com proteção. Utilizando os métodos propostos foi gerada uma solução com 103 filtros e uma direção de expresso. Deste modo reduziu-se o número de direções ROADM utilizadas em mais de 98% e o custo da rede em 95%.

5.2. TRABALHO FUTURO

A ferramenta de planeamento desenvolvida pode ainda ser melhorada através da introdução de novas funcionalidades.

Nesse sentido, podia ser desenvolvido um algoritmo de agregação de tráfego (*grooming* em terminologia anglo-saxónica), tendo em vista um aumento da eficiência espectral e consequentemente do número de serviços suportados. Assim, seria possível agregar vários serviços, de por exemplo 10 G, num único comprimento de onda, com largura de banda de 100 G. Em [28], são analisadas várias técnicas e algoritmos de agregação ponto-a-ponto e agregação intermédia.

Podiam ainda ser introduzidos conversores de comprimentos de onda em nós intermédios do caminho, tendo em vista a diminuição da probabilidade de bloqueio dos serviços. Desta forma, introduzir-se-ia a possibilidade de um serviço ter, ao longo do seu caminho, mais do que um comprimento de onda. Em [38], são estudadas metodologias que analisam quais as melhores localizações da rede para se utilizar conversores de comprimento de onda e é feita uma comparação entre os conversores de alcance completo e limitado.

Por fim, poderia ser introduzida uma camada de validação ótica, onde seriam calculados os parâmetros óticos da rede planeada. Esta camada permitiria validar as soluções determinadas pelos métodos atualmente implementados. Adicionalmente, com base nos parâmetros calculados, poderia ser feita a escolha dos amplificadores e EVOAs necessários.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Núcleo de Cabos Submarinos, “O Cabo Submarino Num Mar de Conectividades,” 2017. [Online]. Available: http://www.fpc.pt/wp-content/uploads/2017/08/brochura_Cabo_port_2017.pdf. [Acedido em 16 Outubro 2017].
- [2] D. Burnett, R. Beckman e T. Davenport, *Submarine Cables: Handbook of Law and Policy*, Boston: Martins Nijhoff Publishers, 2014.
- [3] I. Tomkos, B. Mukherjee, S. Korotky, R. Tucker e L. Lunardi, “The Evolution of Optical Networking,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, pp. 1017-1022, 2012.
- [4] Cisco VNI, “By the numbers: projecting the future of digital transformation (2016-2021),” 2017. [Online]. Available: <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/service-provider/vni-network-traffic-forecast/infographic.html>. [Acedido em 20 Julho 2017].
- [5] Cisco, “Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2016-2021,” Cisco Public White Paper, 2017.
- [6] Cisco, “Cisco Global Cloud Index: Forecast and Methodology, 2016-2021,” Cisco Public White Paper, 2018.
- [7] International Telecommunication Union, “Global ICT Development (excel),” 2017. [Online]. Available: <http://www.itu.int/en/ITU-D/statistics/pages/facts/default.aspx>. [Acedido em 2017 Setembro 16].
- [8] A. Niepel, “Impacting the Optical Core: Technology Trends and Evolution - Part 1,” 2016. [Online]. Available: <http://www.coriant.com/blog/2016/12/14/impacting-the-optical-core-technology-trends-and-evolution/>. [Acedido em 21 Setembro 2017].
- [9] Coriant, “Coriant Pluggable Optical Layer: Datasheet,” 2016. [Online]. Available: http://www.coriant.com/solutions/innovation/documents/DS_Pluggable_Optical_Layer_74COO34.pdf. [Acedido em 10 Julho 2017].
- [10] J. Pedro, “Think Outside the Box: Planning a Pluggable Optical Mesh Network,” 2017. [Online]. Available: <http://www.coriant.com/blog/2017/03/16/think-outside-the-box-planning-a-pluggable-optical-mesh-network/>. [Acedido em 28 Novembro 2017].
- [11] H. Dutton, *Understanding Optical Communications*, IBM, International Technical Support Organization, 1998.
- [12] G. Keiser, *Optical Communications Essentials*, McGraw-Hill, 2003.
- [13] G. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [14] ITU-T Recommendation G.653, “Characteristics of a Dispersion-Shifted Optical Fiber Cable,” 1998.
- [15] S. Ramachandran, *Fiber Based Dispersion Compensation*, Springer Science & Business Media, 2007.
- [16] G. Keiser, *Optical Fiber Communications*, McGraw-Hill, 1991.
- [17] B. Mukherjee, “WDM Optical Communication Networks: Progress and Challenges,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 18, n.º 10, pp. 1810-1824, 2000.
- [18] R. Ramaswami, “Optical Networking Technologies: What worked and what didn't,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 44, n.º 9, pp. 132-139, 2006.
- [19] S. Singh, A. Singh e R. Kaler, “Performance evaluation of EDFA, RAMAN and SOA optical amplifier,” *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 124, n.º 2, pp. 95-101, 2011.
- [20] ITU-T Recommendation G.694.2, “Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid,” 2003.

- [21] ITU-T Recommendation G.694.1, "Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid," 2012.
- [22] S. Gringeri, B. Basch, V. Shukla, R. Egorov e T. Xia, "Flexible Architectures for Optical Transport Nodes and Networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, nº 7, pp. 40-50, 2010.
- [23] Coriant, "Optical Express: The Key to Facilitating Cost-Effective and Efficient Network Grow," Coriant White Paper, 2014.
- [24] T. Strasser e J. Taylor, "ROADMS Unlock the Edge of the Network," *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, nº 7, pp. 146-149, 2008.
- [25] Y. Sakurai, M. Kawasugi, Y. Hotta e et al., "LCOS-Based Wavelength Blocker Array With Channel-by-Channel Variable Center Wavelength and Bandwidth," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 23, nº 14, pp. 989-991, 2011.
- [26] T. Strasser e J. Wagener, "Wavelength-Selective Switches for ROADM Applications," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 16, nº 5, pp. 1150-1157, 2010.
- [27] P. Roorda e B. Collings, "Evolution to Colorless and Directionless ROADM Architectures," em *Optical Fiber communication/National Fiber Optic Engineers Conference, 2008. OFC/NFOEC 2008*, San Diego, USA, 2008.
- [28] M. Loureiro, *Planeamento de rede e análise de custos para redes de transporte ópticas com diferentes soluções de comutação*, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, 2014.
- [29] D. Farinha, *Cost Optimization Strategies for Multi-Layer Telecommunications Networks*, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, 2017.
- [30] K. Kikuchi, "Fundamentals of Coherent Optical Fiber Communications," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, nº 1, pp. 157-179, 2016.
- [31] M. Filer, J. Gaudette, M. Ghobadi e Et al., "Elastic Optical Networking in the Microsoft Cloud," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 8, nº 7, pp. A45-A54, 2016.
- [32] B. Chatterjee, N. Sarma e E. Oki, "Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks: A Tutorial," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, nº 3, pp. 1776-1800, 2015.
- [33] E. Oki e B. Chatterjee, "Design and Control in Elastic Optical Networks: Issues, Challenges, and Research Directions," *Computing, Networking and Communications (ICNC), 2017 International Conference*, 2017.
- [34] O. Gerstel, M. Jinno, A. Lord e S. Yoo, "Elastic Optical Networking: a new dawn for the optical layer?," *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, nº 2, pp. S12-S20, 2012.
- [35] Coriant, "Optical Layer Pluggables: The End of Hard Choices in the Metro?," Coriant White Paper, 2016.
- [36] Datacom, "Compatibilidade entre XFP e SFP+," Datacom White Paper, 2013.
- [37] S. Perrin, "Bringing Disaggregation to Transport Network," Fujitsu White Paper, 2015.
- [38] H. Zang, *WDM Mesh Networks: Management and Survivability*, Springer Science + Business Media, LLC, 2003.
- [39] R. Randhawa e J. Sohal, "Static and Dynamic Routing and Wavelength Assignment Algorithms for Future Transport Networks," *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 121, nº 8, pp. 702-710, 2010.
- [40] H. Zang, J. Jue e B. Mukherjee, "A Review of Routing and Wavelength Assignment Approaches for Wavelength-Routed Optical WDM Networks," *Optical Networks Magazine*, vol. 1, pp. 47-60, 2000.
- [41] J. Choi, N. Golmie, F. Lapeyrere, F. Mouveaux e D. Su, "A Functional Classification of Routing and Wavelength Assignment Schemes in DWDM networks: Static Case," *Proc. of the 7th International Conference on Optical Communications and Networks, OPNET 2000*, pp. 1109-1115, 2000.

- [42] E. Hyttiä e J. Virtamo, "Wavelength Assignment and Routing in WDM Networks," em *Fourteenth Nordic Teletraffic Seminar, NTS-14*, 1998.
- [43] D. Banerjee e B. Mukherjee, "A practical approach for routing and wavelength assignment in large wavelength-routed optical networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 14, nº 5, pp. 903-908, 1996.
- [44] D. Brélaz, "New Methods to Colour the Vertices of a Graph," *Communications of the ACM*, vol. 22, nº 4, 1979.
- [45] Juniper Networks, "Supported Network Configurations," 2018. [Online]. Available: https://www.juniper.net/documentation/en_US/release-independent/tcx/topics/concept/tcx1000-rdm20-network-configurations.html. [Acedido em 10 Setembro 2018].
- [46] A. Pinto, "Real-world Optical Transport Network Topologies," [Online]. Available: <http://www.av.it.pt/anp/on/refnet2.html>. [Acedido em 14 Março 2018].
- [47] CENIC, "CaIREN - Network Overview," [Online]. Available: <https://cenic.org/network/network-overview>. [Acedido em 14 Março 2018].
- [48] RedIRIS, "The RedIRIS Network," [Online]. Available: <http://www.rediris.es/lared/>. [Acedido em 3 Março 2018].
- [49] T. Lameiras, M. Mussolin, A. Paulo e B. Pereira, "Disaggregation of the Optical Layer for More Cost-Effective Metro Networks," em *20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Bucharest, 2018.

ANEXOS

ANEXO 1

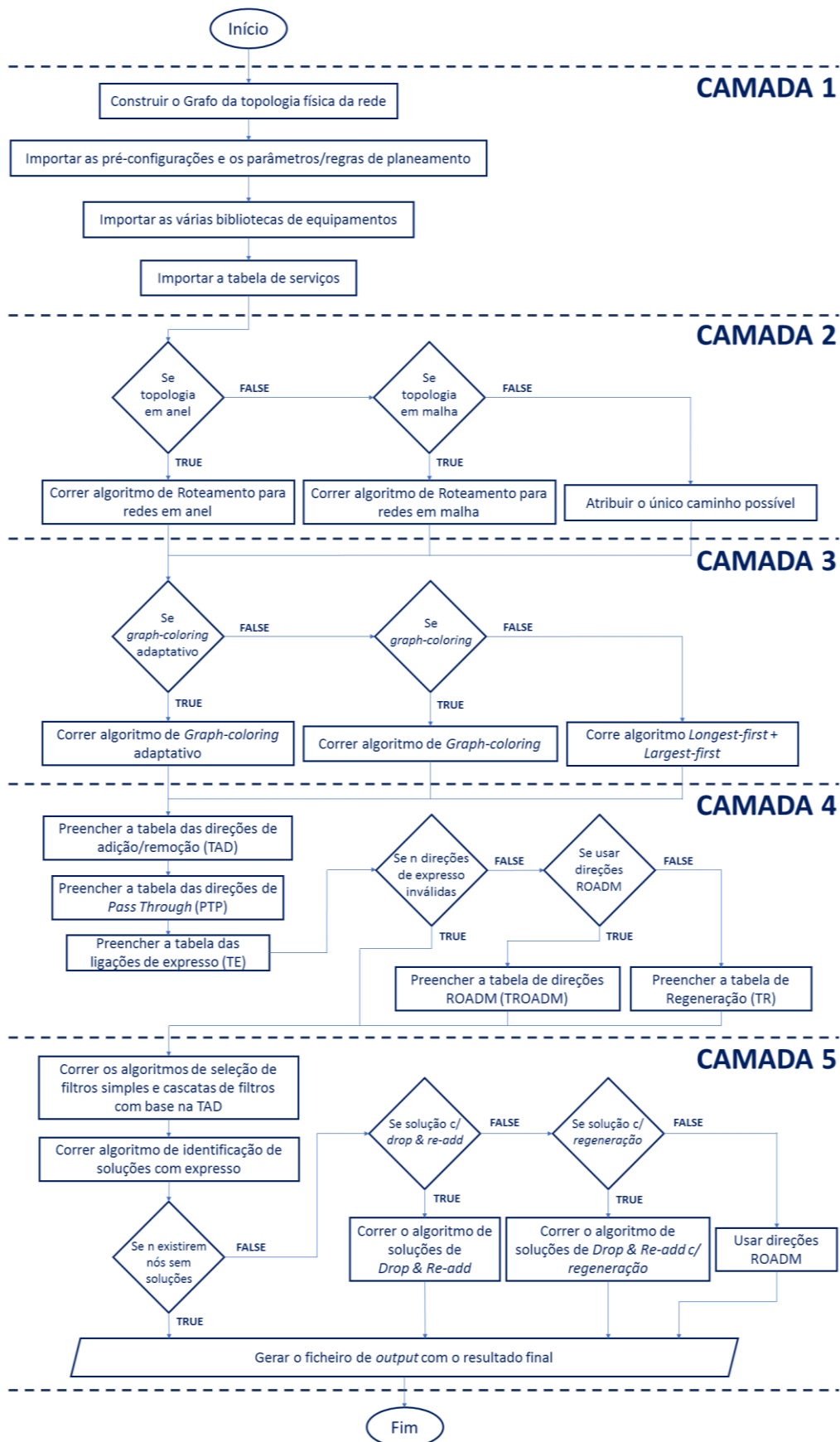


Figura A1.1 - Fluxograma geral da ferramenta de planeamento

ANEXO 2

Tabela A2.1 – Portefólio de filtros fixos DWDM da Pluggable Optical Layer [9]

Nome do Filtro	Perdas Máximas de Inserção (add/drop) [dB]	Perdas máximas de inserção (pass through) [dB] *	Número de canais de add/drop	Frequências de add/drop [THz]	Fator de Custo**
Filtro DWDM Add/Drop de 44 Canais					
OMD44-1	5.5	-	44	191.7 - 196.0	8
Filtro DWDM Add/Drop de 8 Canais					
OMD8-1	3.6	1.0	8	191.7 - 192.4	6
OMD8-2	3.6	1.0	8	192.6 - 193.3	6
OMD8-3	3.6	1.0	8	193.5 - 194.2	6
OMD8-4	3.6	1.0	8	194.4 - 195.1	6
OMD8-5	3.6	1.0	8	195.3 - 196.0	6
Filtro DWDM Add/Drop de 4 Canais					
OMD4-1	2.9	1.0	4	191.7 - 192.0	3
OMD4-2	2.9	1.0	4	192.1 - 192.4	3
OMD4-3	2.9	1.0	4	192.6 - 192.9	3
OMD4-4	2.9	1.0	4	193.0 - 193.3	3
OMD4-5	2.9	1.0	4	193.5 - 193.8	3
OMD4-6	2.9	1.0	4	193.9 - 194.2	3
OMD4-7	2.9	1.0	4	194.4 - 194.7	3
OMD4-8	2.9	1.0	4	194.8 - 195.1	3
OMD4-9	2.9	1.0	4	195.3 - 195.6	3
OMD4-10	2.9	1.0	4	195.7 - 196.0	3
Filtro DWDM Add/Drop de 2 Canais					
OMD2-1	1.9	1.0	2	191.7 - 191.8	1
OMD2-2	1.9	1.0	2	191.8 - 192.0	1
OMD2-3	1.9	1.0	2	192.1 - 192.2	1
OMD2-4	1.9	1.0	2	192.3 - 192.4	1
OMD2-5	1.9	1.0	2	192.6 - 192.7	1
OMD2-6	1.9	1.0	2	192.8 - 192.9	1
OMD2-7	1.9	1.0	2	193.0 - 193.1	1
OMD2-8	1.9	1.0	2	193.2 - 193.3	1
OMD2-9	1.9	1.0	2	193.5 - 193.6	1
OMD2-10	1.9	1.0	2	193.7 - 193.8	1
OMD2-11	1.9	1.0	2	193.9 - 194.0	1
OMD2-12	1.9	1.0	2	194.1 - 194.2	1
OMD2-13	1.9	1.0	2	194.3 - 194.4	1
OMD2-14	1.9	1.0	2	194.6 - 194.7	1
OMD2-15	1.9	1.0	2	194.8 - 194.9	1
OMD2-16	1.9	1.0	2	195.0 - 195.1	1
OMD2-17	1.9	1.0	2	195.3 - 195.4	1
OMD2-18	1.9	1.0	2	195.5 - 195.6	1
OMD2-19	1.9	1.0	2	195.7 - 195.8	1
OMD2-20	1.9	1.0	2	195.9 - 196.0	1

*Valores máximos disponibilizados em [9]

**Valores hipotéticos.

Tabela A2.2 – Fator de custo de uma Direção ROADM genérica

Nome do Componente	Fator de Custo**
Direção ROADM Genérica	80

Tabela A2.3 – Fator de Custo dos Transponders genéricos de 10G e 100G

Nome do Componente	Fator de Custo**
Transponder 10 G	12
Transponder 100 G	60

**Valores hipotéticos.

ANEXO 3

Resultados Finais

Tipo de Rede: Malha

Número de nós: 17

Número de serviços: 37

Métrica de Planeamento: Menor Custo

Resultados obtidos recorrendo a POL:

- Número de interfaces de linha usadas: 74
 - Fator de Custo: 3700
- Número de filtros usados: 66
 - Fator de Custo: 78
- Número de direções de ROADM usadas: 0
 - Fator de Custo: 0

- Fator de Custo Total: 3778

Resultados da solução reconfigurável:

- Número de interfaces de linha usadas: 74
 - Fator de Custo: 3700
- Número de direções de ROADM usadas: 40
 - Fator de Custo: 3000

- Fator de Custo Total: 6700

- Número de canais Expressos Bloqueados: 0
- Número de canais passados por Drop and Re-Add: 0

Inventário de Filtros:

1x OMD8-1
1x OMD8-2
1x OMD4-2
1x OMD4-3
17x OMD2-1
21x OMD2-2
10x OMD2-3
6x OMD2-4
4x OMD2-5
1x OMD2-7
3x OMD2-8

Inventário de Interfaces Linha:

18x Canal1
22x Canal3
12x Canal5
8x Canal7
6x Canal10
2x Canal12
2x Canal14
4x Canal16

Figura A3.1 – Primeira página do ficheiro output.xlsx, gerado para a rede CalREN

Melhor Solução:

Nó	Direção	Nº Filtros	Fator de Custo	ID Filtro1	ID Filtro2	ID Filtro3
1	2	2	2	OMD2-2	OMD2-5	
1	6	2	2	OMD2-1	OMD2-2	
1	17	2	6	OMD8-2	OMD2-2	
2	1	1	1	OMD2-5		
2	3	1	1	OMD2-5		
3	2	2	6	OMD8-1	OMD2-5	
3	4	2	2	OMD2-1	OMD2-2	
3	6	3	3	OMD2-1	OMD2-2	OMD2-3
4	3	1	1	OMD2-2		
4	5	1	1	OMD2-2		
5	4	2	2	OMD2-1	OMD2-2	
5	6	2	2	OMD2-1	OMD2-2	
6	1	1	1	OMD2-2		
6	3	1	1	OMD2-3		
6	5	1	1	OMD2-2		
6	7	1	1	OMD2-3		
7	6	2	2	OMD2-2	OMD2-3	
7	8	1	1	OMD2-2		
8	7	2	2	OMD2-1	OMD2-2	
8	9	2	2	OMD2-1	OMD2-2	
9	8	1	1	OMD2-2		
9	10	1	1	OMD2-2		
10	9	2	2	OMD2-1	OMD2-2	
10	11	1	1	OMD2-1		
10	12	3	3	OMD2-1	OMD2-2	OMD2-3
11	10	1	1	OMD2-1		
12	10	1	1	OMD2-3		
12	13	1	1	OMD2-3		
12	15	1	1	OMD2-1		
13	12	2	2	OMD2-2	OMD2-3	
13	14	3	3	OMD2-2	OMD2-3	OMD2-4
14	13	1	1	OMD2-4		
14	15	1	1	OMD2-4		
15	12	1	1	OMD2-1		
15	14	3	3	OMD2-1	OMD2-3	OMD2-4
15	16	3	7	OMD4-2	OMD4-3	OMD2-1
16	15	1	1	OMD2-4		
16	17	3	3	OMD2-4	OMD2-7	OMD2-8
17	1	2	2	OMD2-1	OMD2-8	
17	16	2	2	OMD2-1	OMD2-8	

Figura A3.2 – Segunda página do ficheiro output.xlsx, gerado para a rede CalREN

Caminhos dos Serviços						Canais dos Serviços				Canais Adicionados e Removidos (Add/Drop)							
ID	Caminho					ID	LB	Nº λs	λs	Nó	Direção	Nº λs	λs				
1	1	2				0	10	1	10	1	2	2	3	10	0	0	0
1	2	3				0	10	1	10	1	6	2	1	3	0	0	0
1	3	4				0	10	1	3	1	17	5	3	10	12	14	16
1	4	5				0	10	1	3	2	1	1	10	0	0	0	0
1	5	6				0	10	1	3	2	3	1	10	0	0	0	0
1	6	7				0	10	1	5	3	2	5	1	3	5	7	10
1	7	8				0	10	1	3	3	4	2	1	3	0	0	0
1	8	9				0	10	1	3	3	6	3	1	3	5	0	0
1	9	10				0	10	1	3	4	3	1	3	0	0	0	0
1	10	11				0	10	1	1	4	5	1	3	0	0	0	0
1	10	12				0	10	1	5	5	4	2	1	3	0	0	0
1	12	13				0	10	1	5	5	6	2	1	3	0	0	0
1	13	14				0	10	1	7	6	1	1	3	0	0	0	0
1	14	15				0	10	1	7	6	3	1	5	0	0	0	0
1	15	16				0	10	1	7	6	5	1	3	0	0	0	0
1	16	17				0	10	1	16	6	7	1	5	0	0	0	0
1	17	1				0	10	1	16	7	8	1	3	0	0	0	0
1	1	6				0	10	1	3	8	7	2	1	3	0	0	0
1	3	6				0	10	1	5	8	9	2	1	3	0	0	0
1	12	15				0	10	1	1	9	8	1	3	0	0	0	0
1	1	2	3			0	10	1	3	9	10	1	3	0	0	0	0
1	16	17	1			0	10	1	14	9	10	1	3	0	0	0	0
1	15	16	17			0	10	1	1	10	9	2	1	3	0	0	0
1	10	12	13			0	10	1	3	10	11	1	1	0	0	0	0
1	8	9	10			0	10	1	1	10	12	3	1	3	5	0	0
1	13	14	15			0	10	1	5	11	10	1	1	0	0	0	0
1	3	4	5			0	10	1	1	12	10	1	5	0	0	0	0
1	3	6	7			0	10	1	3	12	13	1	5	0	0	0	0
1	3	6	7	8		0	10	1	1	12	15	1	1	0	0	0	0
1	1	6	5			0	10	1	1	13	12	2	3	5	0	0	0
1	1	17	16	15		0	10	1	10	13	14	3	3	5	7	0	0
1	10	12	13	14	15		0	10	1	14	13	1	7	0	0	0	0
1	13	14	15	16	17	1		0	10	1	14	15	1	7	0	0	0
1	15	16	17	1			0	10	1	12	15	12	1	1	0	0	0
1	15	16	17	1	2	3		0	10	1	15	14	3	1	5	7	0
1	16	17	1	2	3			0	10	1	15	16	5	1	5	7	10
1	17	1	2	3				2	10	1	1	1	1	7	0	0	0
											16	17	3	7	14	16	0
											17	1	2	1	16	0	0
											17	16	2	1	16	0	0

Conjunto de Soluções para cada direção do nó						
Nó	Direção	Nº Filtros	Fator de Custo	ID Filtro1	ID Filtro2	ID Filtro3
1	2	2	2	18	21	0
1	2	2	4	9	18	0
1	2	2	6	3	18	0
1	6	2	2	17	18	0
1	6	1	3	7	0	0
1	6	1	5	2	0	0
1	6	1	8	1	0	0
1	17	2	6	3	18	0
1	17	3	7	9	10	18
2	1	1	1	21	0	0
2	1	1	3	9	0	0
2	1	1	5	3	0	0
2	3	1	1	21	0	0
2	3	1	3	9	0	0
2	3	1	5	3	0	0
3	2	2	6	2	21	0
3	2	3	7	7	8	21
3	2	1	8	1	0	0
3	2	2	8	2	9	0
3	2	3	9	7	8	9
3	2	2	10	2	3	0
3	2	3	11	3	7	8
3	4	2	2	17	18	0
3	4	1	3	7	0	0
3	4	1	5	2	0	0
3	4	1	8	1	0	0
3	6	3	3	17	18	19
3	6	2	4	7	19	0
3	6	1	5	2	0	0
3	6	3	5	8	17	18
3	6	2	6	7	8	0
3	6	1	8	1	0	0
4	3	1	1	18	0	0
4	5	1	1	18	0	0
5	4	2	2	17	18	0
5	4	1	3	7	0	0
5	4	1	5	2	0	0
5	4	1	8	1	0	0
5	6	2	2	17	18	0
5	6	1	3	7	0	0
5	6	1	5	2	0	0
5	6	1	8	1	0	0
6	1	1	1	18	0	0
6	3	1	1	19	0	0
6	3	1	3	8	0	0
6	5	1	1	18	0	0

Canais de Expresso							
Nó	Direção1	Direção2	Nº λs	λs			
1	17	2	3	1	5	7	0
2	1	3	4	1	3	5	7
4	3	5	1	1	0	0	0
6	3	7	2	1	3	0	0
6	1	5	1	1	0	0	0
7	6	8	1	1	0	0	0
9	8	10	1	1	0	0	0
12	10	13	2	1	3	0	0
13	12	14	1	1	0	0	0
14	13	15	3	1	3	5	0
15	14	16	1	3	0	0	0
16	15	17	5	1	3	5	10
17	16	1	6	3	5	7	10

Canais de Drop and Re-Add				Direções ROADM usadas	
Nó	Direção	Nº λs	λs	Nó	Direção

Figura A3.3 – Conjunto de tabelas auxiliares do ficheiro output.xlsx, gerado para a rede CalREN

ANEXO 4

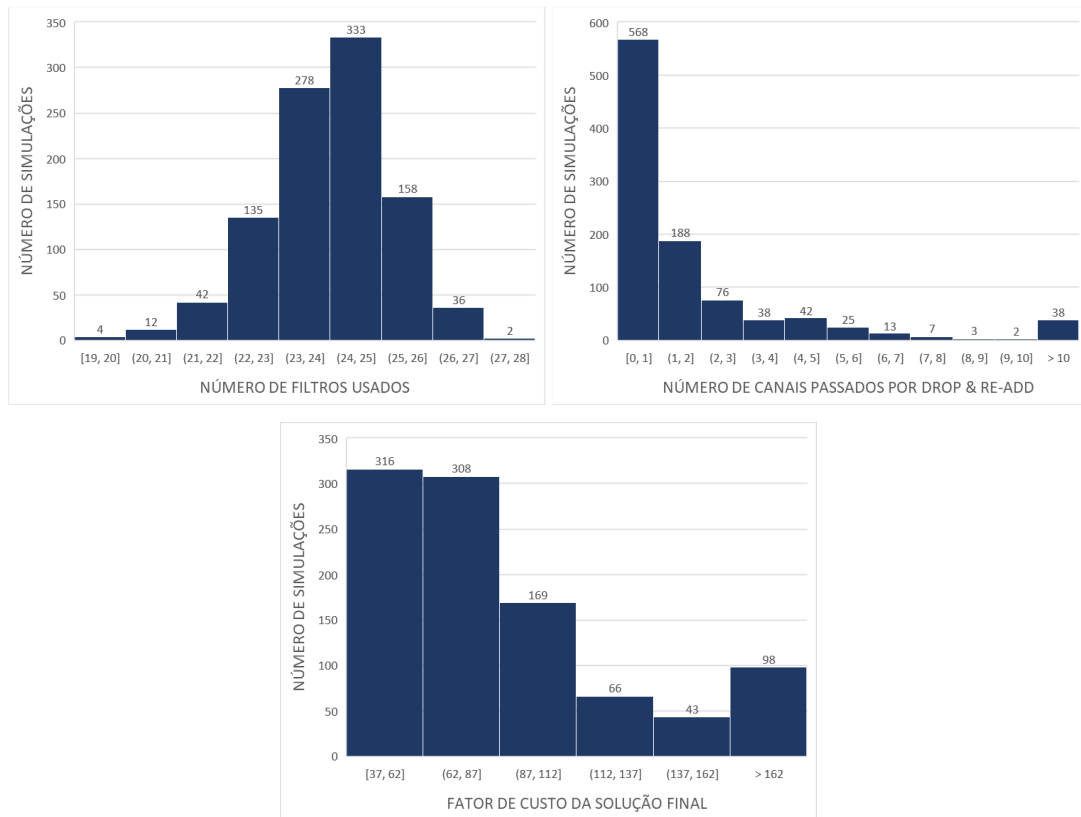


Figura A4.1 – Histogramas obtidos para a rede em cadeia usando o custo como parâmetro de minimização (cenário 40 serviços)

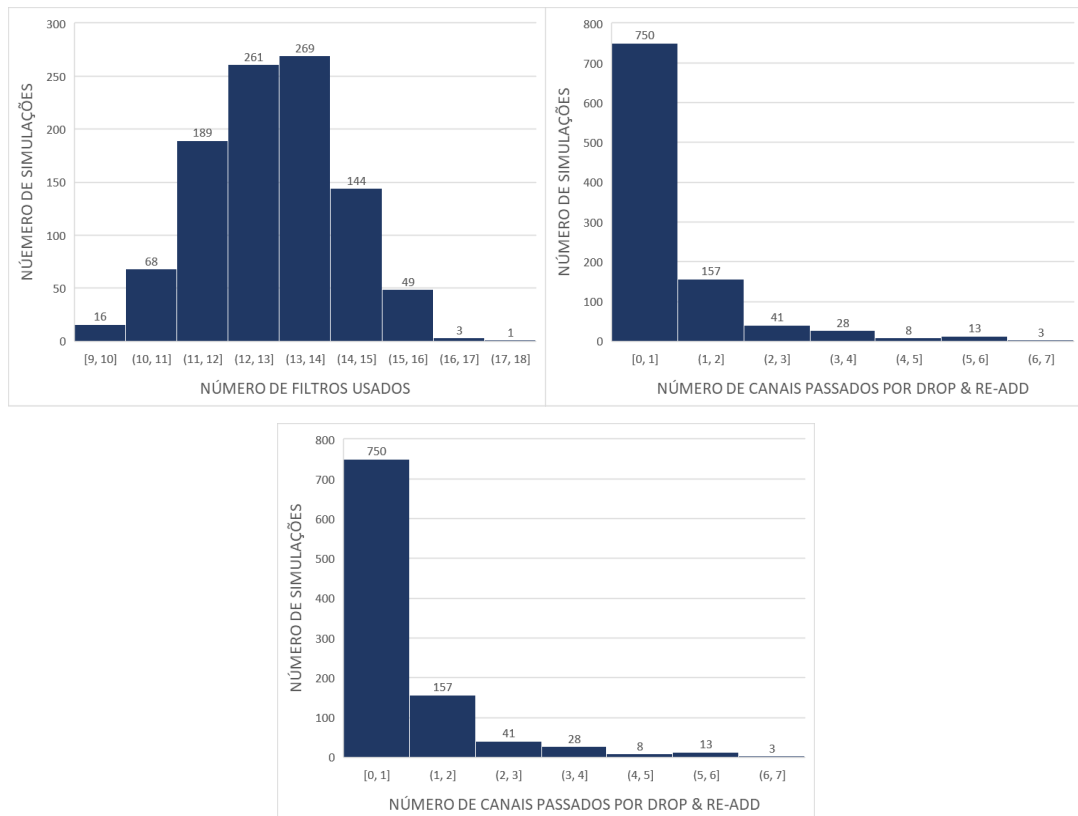


Figura A4.2 – Histogramas obtidos para a rede em cadeia usando o número de filtros como parâmetro de minimização (cenário com 20 serviços)

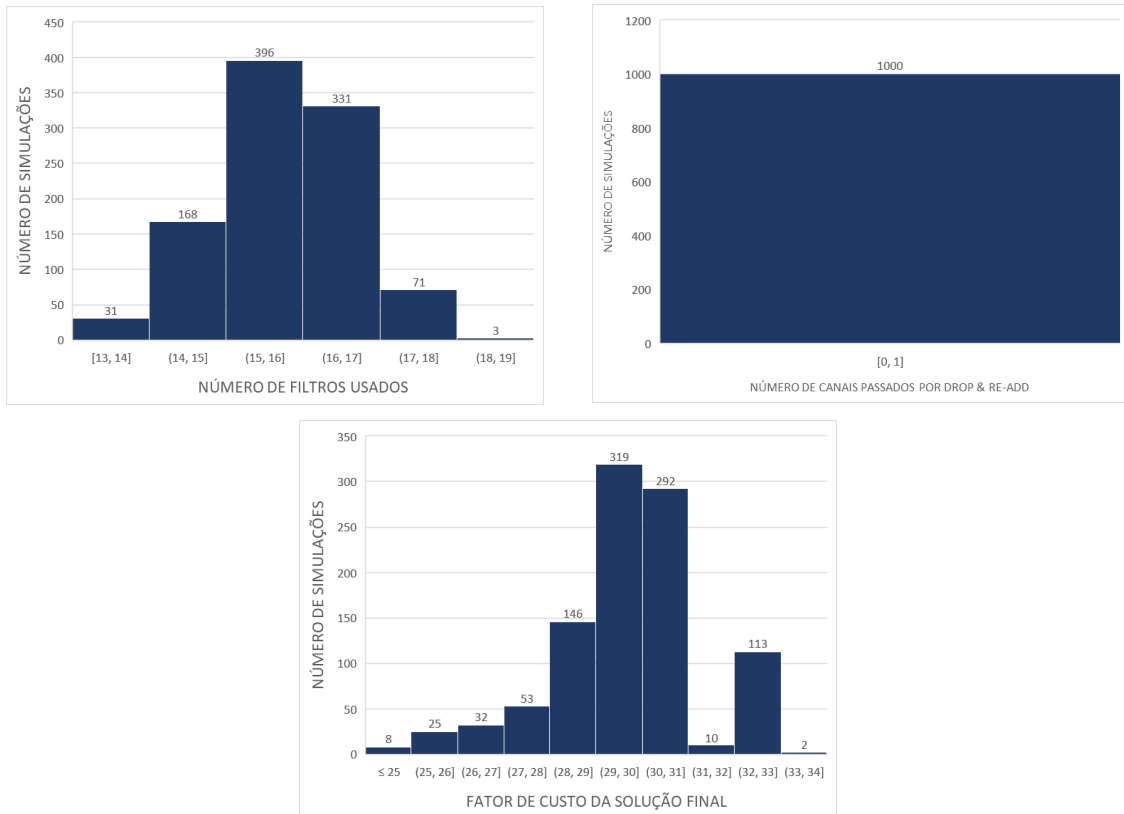


Figura A4.3 – Histogramas obtidos para a rede em anel usando a topologia lógica um nó hub (cenário com 25 serviços)

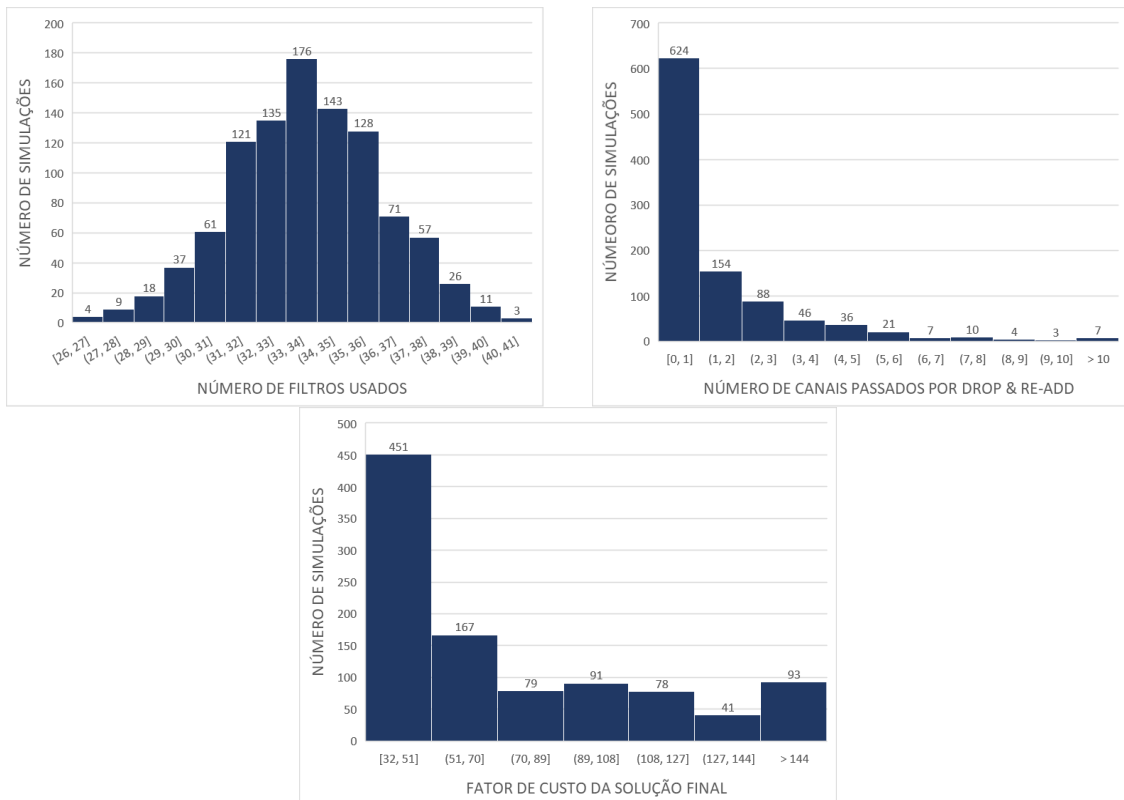


Figura A4.4 – Histogramas obtidos para a rede em anel usando a topologia lógica em malha (cenário com 25 serviços)

ANEXO 5

Tabela A5.1 – Resultados da rede em cadeia utilizando como parâmetro de minimização o custo da rede

Quantidade de Serviços	Nº de Filtros					Custo c/ Filtros	Nº Drop & Re-add	Custo c/ Transponders	Custo Final	Custo da Solução Reconfigurável
	Nº OMD2-y	Nº OMD4-y	Nº OMD8-y	Nº OMD44-y	Total					
10	12	1	1	0	14	21	0	0	21	1120
15	13	2	0	1	16	27	1	24	51	1120
20	14	1	0	2	17	33	2	48	81	1120
25	16	1	0	2	19	35	2	48	83	1120
30	18	1	0	2	21	37	3	72	109	1120
35	21	1	0	2	24	40	3	72	112	1120
40	23	1	0	2	26	42	5	120	162	1120

Tabela A5.2 - Resultados da rede em cadeia utilizando como parâmetro de minimização o número de filtros

Quantidade de Serviços	Nº de Filtros					Custo c/ Filtros	Nº Drop & Re-add	Custo c/ Transponders	Custo Final	Custo da Solução Reconfigurável
	Nº OMD2-y	Nº OMD4-y	Nº OMD8-y	Nº OMD44-y	Total					
10	8	0	1	1	10	22	0	0	22	1120
15	10	1	0	2	13	29	1	24	53	1120
20	11	2	0	2	15	33	2	48	81	1120
25	12	3	0	2	17	37	2	48	85	1120
30	13	4	0	2	19	41	3	72	113	1120
35	14	5	0	2	21	45	3	72	117	1120
40	14	5	1	2	22	51	5	120	171	1120

Tabela A5.3 - Resultados da rede em anel com a topologia lógica de um nó hub

Quantidade de Serviços	Nº de Filtros					Custo c/ Filtros	Nº Drop & Re-add	Custo c/ Transponders	Custo Final	Custo da Solução Reconfigurável
	Nº OMD2-y	Nº OMD4-y	Nº OMD8-y	Nº OMD44-y	Total					
10	12	1	0	0	13	15	0	0	15	1280
15	13	1	1	0	15	22	0	0	22	1280
20	13	1	1	1	16	30	0	0	30	1280
25	14	1	0	2	17	33	0	0	33	1280
30	16	1	0	2	19	35	0	0	35	1280
35	17	1	0	2	20	36	0	0	36	1280
40	16	2	1	2	21	44	0	0	44	1280

Tabela A5.4 - Resultados da rede em anel com a topologia lógica em malha

Quantidade de Serviços	Nº de Filtros					Custo c/ Filtros	Nº Drop & Re-add	Custo c/ Transponders	Custo Final	Custo da Solução Reconfigurável
	Nº OMD2-y	Nº OMD4-y	Nº OMD8-y	Nº OMD44-y	Total					
10	20	0	0	0	20	20	0	0	20	1280
15	26	1	0	0	27	29	1	24	53	1280
20	31	2	0	0	33	37	2	48	85	1280
25	33	3	1	0	37	48	4	96	144	1280
30	35	4	2	0	41	59	8	192	251	1280
35	35	5	3	1	44	76	16	384	460	1280
40	34	6	4	1	45	84	26	624	708	1280

Tabela A5.5 – Resultados da rede CalREN

	1ª Abordagem			2ª Abordagem		
	Nº Filtros	Nº Drop & Re-add	Factor de Custo	Nº de Filtros	Nº Direções ROADM	Factor de Custo
Solução Reconfigurável	-	-	-	0	40	3200
Métodos de RWA tradicionais	71	4	568	57	6	549
Métodos de RWA Propostos	66	0	80	66	0	80

Tabela A5.6 – Resultados da rede RedIRIS

	1ª Abordagem			2ª Abordagem		
	Nº Filtros	Nº Drop & Re-add	Factor de Custo	Nº de Filtros	Nº Direções ROADM	Factor de Custo
Solução Reconfigurável	-	-	-	0	56	4480
Métodos de RWA tradicionais	115	8	1098	89	9	824
Métodos de RWA Propostos	106	3	485	103	1	200

ANEXO 6

Tabela A6.1 – Caminhos e comprimentos de onda atribuídos a cada serviço para a rede CalREN

ID do Serviço	Caminho						Comprimentos de onda	
	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5	Nó 6	Nº λ s	λ
1	1	2					1	10
2	2	3					1	10
3	3	4					1	3
4	4	5					1	3
5	5	6					1	3
6	6	7					1	5
7	7	8					1	3
8	8	9					1	3
9	9	10					1	3
10	10	11					1	1
11	10	12					1	5
12	12	13					1	5
13	13	14					1	7
14	14	15					1	7
15	15	16					1	7
16	16	17					1	16
17	17	1					1	16
18	1	6					1	3
19	3	6					1	5
20	12	15					1	1
21	1	2	3				1	3
22	16	17	1				1	14
23	15	16	17				1	1
24	10	12	13				1	3
25	8	9	10				1	1
26	13	14	15				1	5
27	3	4	5				1	1
28	3	6	7				1	3
29	3	6	7	8			1	1
30	1	6	5				1	1
31	1	17	16	15			1	10
32	10	12	13	14	15		1	1
33	13	14	15	16	17	1	1	3
34	15	16	17	1			1	12
35	15	16	17	1	2	3	1	5
36	16	17	1	2	3		1	7
37	17	1	2	3			1	1

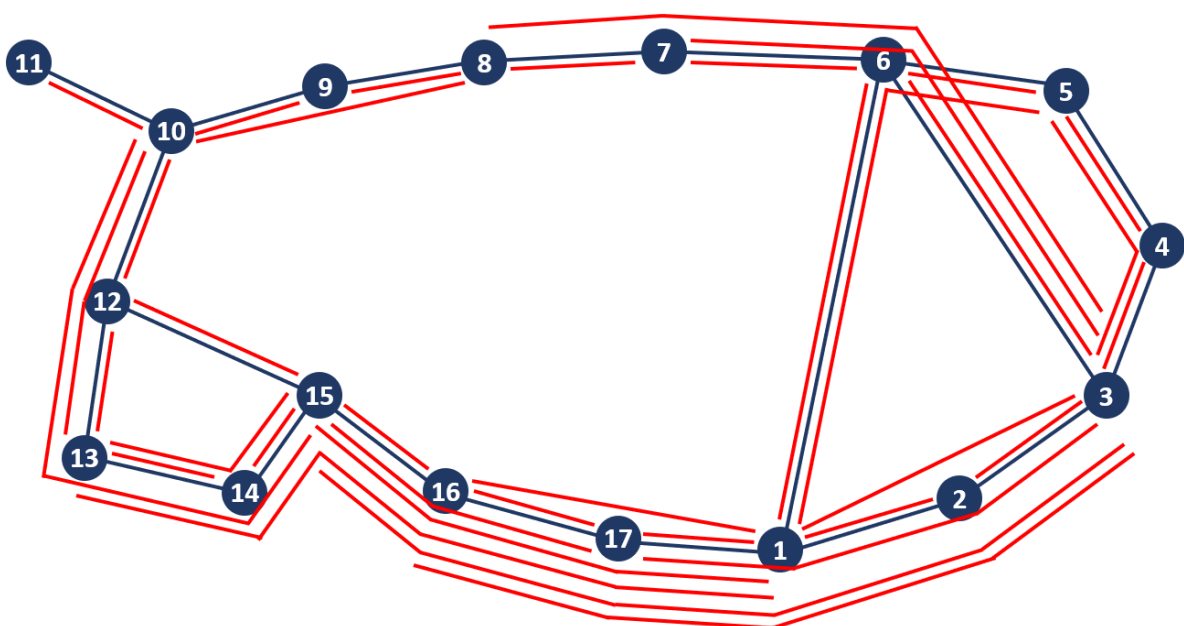


Figura A6.1 – Representação dos serviços roteados sobre a rede CalREN utilizando o algoritmo de roteamento da Figura 2.10

Tabela A6.2 - Caminhos e comprimentos de onda atribuídos a cada serviço para a rede RedIRIS

ID do Serviço	Caminho						Comprimentos de onda	
	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5	Nó 6	Nº λs	λ
1	1	2					1	10
1	2	3					1	7
1	3	4					1	7
1	4	5					1	3
1	5	6					1	3
1	6	7					1	3
1	7	8					1	14
1	8	9					1	14
1	9	10					1	10
1	10	11					1	10
1	11	13					1	3
1	13	14					1	12
1	14	17					1	1
1	17	1					1	3
1	11	12					1	5
1	12	17					1	5
1	11	16					1	1
1	16	17					1	1
1	9	11					1	3
1	7	9					1	3
1	6	17					1	1
1	4	17					1	3
1	1	4					1	7
1	1	15					1	7
1	15	17					1	7
1	7	17					1	5
1	9	17					1	1
1	11	17					1	10
1	1	2	3				1	5
1	11	13	14				1	7
1	13	14	17				1	10
1	5	6	7				1	1
1	2	1	17				1	7
1	3	2	1	17			1	1
1	5	4	17				1	1
1	10	11	17				1	1
1	8	9	17				1	12
1	11	9	7				1	1
1	11	12	17				1	3
1	9	10	11				1	5
1	7	8	9				1	10
1	1	15	17				1	5
1	1	2	3	4			1	3
1	3	4	1	15	17		1	1
1	8	7	17				1	12
1	1	4	3				1	5
1	6	17	7				1	3
1	4	1	15	17			1	3
1	17	12	11	13	14		1	1
1	11	17	14	13			1	3
1	11	17	14	13			1	5
1	7	8	9	17			1	7
1	9	10	11	17			1	7
1	10	9	8	7	17		1	1
1	5	4	17	9	8	7	1	5
1	7	8	9	10	11		1	3

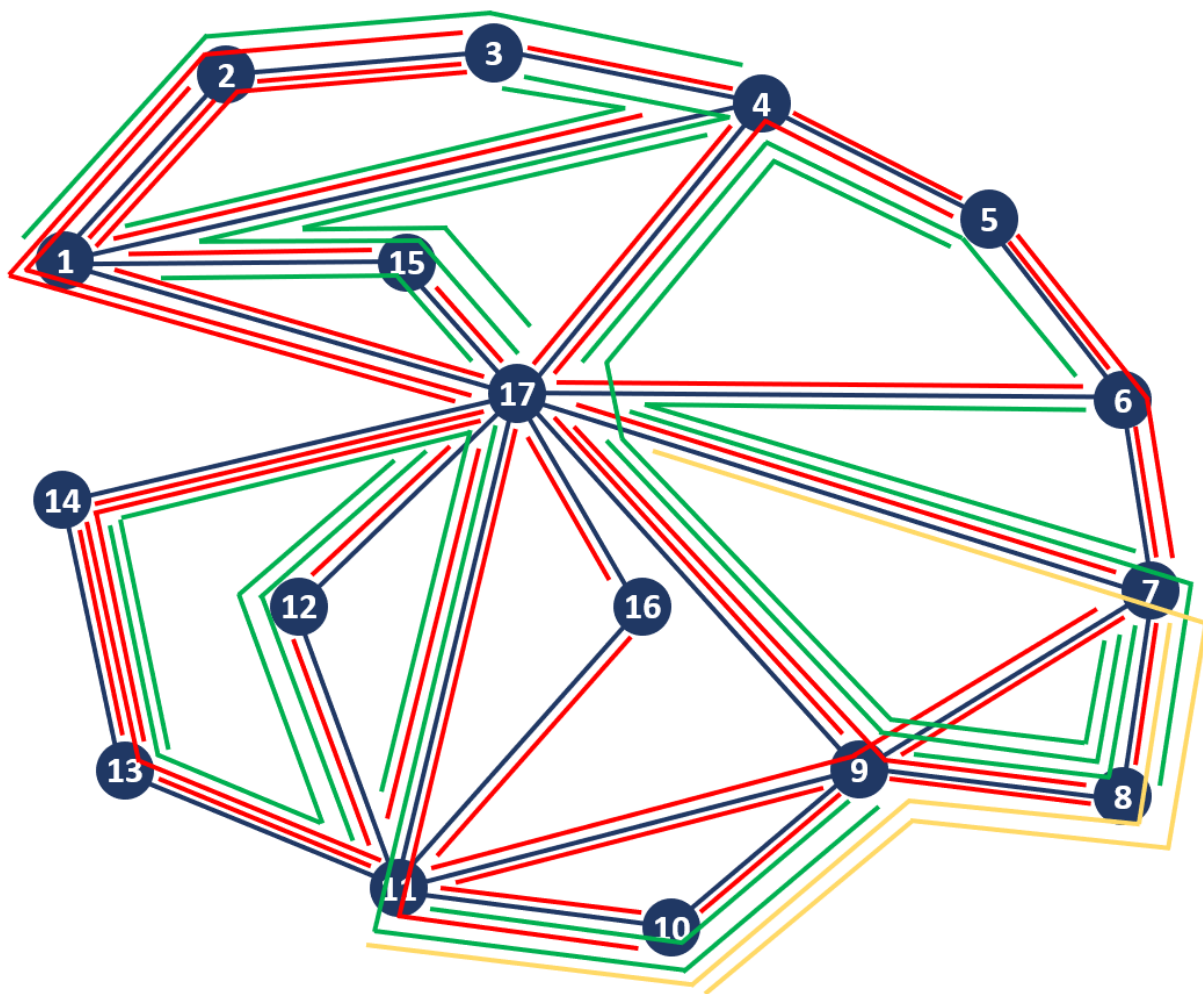


Figura A6.2 - Representação dos serviços roteados sobre a rede RedIRIS utilizando a algoritmo de roteamento da Figura 2.10 (vermelho: caminhos principais, verde: caminhos de proteção, amarelo: caminhos que usam ligações de expresso inválidas)

