



Élio Tiago
Sousa Coelho

Desenvolvimento de Heurísticas para o
Dimensionamento de Redes Óticas Opacas

Development of Heuristics for Opaque Optical
Networks Dimensioning



**Élio Tiago
Sousa Coelho**

Desenvolvimento de Heurísticas para o Dimensionamento de Redes Óticas Opacas

Development of Heuristics for Opaque Optical Networks Dimensioning

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Armando Humberto Moreira Nolasco Pinto, Professor Associado com Agregação do Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro e coorientação empresarial do Doutor Rui Manuel Dias Morais, Engenheiro Líder em optimização de redes na Infinera Portugal. Tendo como instituição de acolhimento o Instituto de Telecomunicações - Pólo de Aveiro.



instituto de
telecomunicações

o júri / the jury

presidente / president

Professor Doutor Aníbal Manuel de Oliveira Duarte

Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

vogais / examiners committee

Professor Doutor João Lopes Rebola

Professor Auxiliar do ISCTE - Instituto Universitário de Lisboa

Professor Doutor Armando Humberto Moreira Nolasco Pinto

Professor Associado com Agregação da Universidade de Aveiro

agradecimientos /
acknowledgements

Adicionar agradecimentos...

Palavras-chave

CAPEX, redes óticas de transporte opacas, topologia física, topologia lógica, modelo heurístico, modelo analítico, programação linear inteira

Resumo

Nesta dissertação foram desenvolvidos algoritmos heurísticos para o dimensionamento de redes óticas de transporte opacas. Os algoritmos heurísticos desenvolvidos pretendem resolver os problemas no escalonamento, encaminhamento, atribuição do comprimento de onda e agregação de tráfego cliente. O objetivo é minimizar o número de elementos físicos da rede, e portanto, minimizar o CAPEX da rede. Os algoritmos propostos foram implementados num software livre e validados por modelos de programação linear. O modelo analítico foi também considerado.

Keywords

Add keywords...

Abstract

Add abstract...

Índice

| | |
|--|------------|
| Índice | i |
| Lista de figuras | v |
| Lista de tabelas | vii |
| 1 Introdução | 1 |
| 1.1 Objetivos | 2 |
| 1.2 Estrutura da Dissertação | 3 |
| 1.3 Principais Resultados | 3 |
| 2 Dimensionamento de Redes Óticas Opacas | 4 |
| 2.1 Arquitetura da Rede | 4 |
| 2.1.1 Ligações | 5 |
| 2.1.2 Nós | 6 |
| 2.2 Topologias da Rede | 7 |
| 2.2.1 Topologia Física | 7 |
| 2.2.2 Topologia Lógica | 7 |
| 2.2.3 Modos de Transporte | 7 |
| 2.3 Custo da Rede | 9 |
| 2.3.1 Custo das Ligações | 9 |
| 2.3.2 Custo dos Nós | 10 |
| 2.4 Ferramentas de planeamento e dimensionamento | 12 |
| 2.4.1 Modelo ILP | 12 |
| 2.4.2 Modelo Analítico | 13 |
| 2.4.3 Modelo Heurístico | 14 |
| 2.5 Rede Referência | 14 |
| 2.5.1 Topologia Física | 14 |
| 2.5.2 Topologia Lógica | 16 |
| 2.5.3 Matrizes de Tráfego | 16 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 2.6 | Rede Realista | 20 |
| 2.6.1 | Topologia Física | 21 |
| 2.6.2 | Topologia Lógica | 22 |
| 2.6.3 | Matrizes de Tráfego | 22 |
| 2.7 | Custo do Equipamento | 24 |
| 2.8 | Conclusões | 25 |
| 3 | Modelo Heurístico | 27 |
| 3.1 | Visão Geral do Modelo Heurístico | 27 |
| 3.2 | Escalonamento | 28 |
| 3.3 | Encaminhamento | 29 |
| 3.4 | Atribuição do Comprimento de Onda | 30 |
| 3.5 | Agregação | 31 |
| 3.6 | Conclusões | 31 |
| 4 | Implementação NetXPTO | 33 |
| 4.1 | Simulador NetXPTO | 33 |
| 4.2 | Blocos do Sistema | 33 |
| 4.2.1 | Scheduler | 34 |
| 4.2.2 | LogicalTopologyGenerator | 34 |
| 4.2.3 | PhysicalTopologyGenerator | 34 |
| 4.2.4 | LogicalTopologyManager | 35 |
| 4.2.5 | PhysicalTopologyManager | 36 |
| 4.3 | Diagrama do Sistema | 36 |
| 4.4 | Parâmetros de Entrada do Sistema | 37 |
| 4.4.1 | Formato do Ficheiro de Entrada | 39 |
| 4.5 | Estrutura dos Tipos de Sinais do Sistema | 40 |
| 4.5.1 | LogicalTopology | 40 |
| 4.5.2 | PhysicalTopology | 41 |
| 4.5.3 | DemandRequest | 42 |
| 4.5.4 | PathRequest | 43 |
| 4.5.5 | PathRequestRouted | 43 |
| 4.5.6 | DemandRequestRouted | 44 |
| 4.6 | Relatório | 44 |
| 4.7 | Conclusões | 44 |
| 5 | Resultados | 47 |
| 5.1 | Rede Referência | 47 |
| 5.1.1 | Modelo ILP | 48 |

| | | |
|----------|-------------------------------------|-----------|
| 5.1.2 | Modelo Analítico | 50 |
| 5.1.3 | Modelo Heurístico | 53 |
| 5.1.4 | Análise Comparativa | 61 |
| 5.2 | Rede Realista | 64 |
| 5.2.1 | Modelo Analítico | 64 |
| 5.2.2 | Modelo Heurístico | 65 |
| 5.2.3 | Análise Comparativa | 66 |
| 5.3 | Conclusões | 67 |
| 6 | Conclusões e Trabalho Futuro | 69 |
| 6.1 | Conclusões | 69 |
| 6.2 | Trabalho Futuro | 69 |
| | Referências | 71 |

Lista de figuras

| | | |
|------|--|----|
| 2.1 | Exemplo de uma rede de transporte. | 5 |
| 2.2 | Arquitetura de uma ligação [2]. | 5 |
| 2.3 | Arquitetura do nó [2]. | 6 |
| 2.4 | Exemplo de uma topologia física de uma rede. | 7 |
| 2.5 | Topologia lógica para o modo de transporte opaco, considerando a topologia física apresentada na figura 2.4. | 8 |
| 2.6 | Topologia lógica para o modo de transporte transparente, considerando a topologia física apresentada na figura 2.4. | 8 |
| 2.7 | Topologia lógica para o modo de transporte translúcido, considerando a topologia física apresentada na figura 2.4. | 9 |
| 2.8 | Topologia física da rede referência. | 15 |
| 2.9 | Topologia lógica da rede referência. | 16 |
| 2.10 | National Science Foundation Network (NSFNET) [4]. | 20 |
| 2.11 | Topologia física da rede realista NSFNET. | 21 |
| 2.12 | Topologia lógica da rede realista NSFNET. | 22 |
| 3.1 | Visão geral dos algoritmos heurísticos. | 28 |
| 3.2 | Fluxograma do algoritmo de escalonamento | 28 |
| 3.3 | Ordem que é seguida na ordenação das demandas. | 29 |
| 3.4 | Descrição do algoritmo de encaminhamento. | 30 |
| 4.1 | Fluxograma do bloco LogicallTopologyManager. | 35 |
| 4.2 | Fluxograma do bloco PhysicalTopologyManager. | 36 |
| 4.3 | Diagrama de alto nível do sistema implementado no simulador NetXPTO-NetPlanner. | 37 |
| 5.1 | Topologia física da rede referência para o cenário de tráfego baixo após o dimensionamento utilizando o modelo heurístico. | 54 |
| 5.2 | Topologia ótica da rede referência para o cenário de tráfego baixo após o dimensionamento utilizando o modelo heurístico. | 54 |

| | | |
|-----|--|----|
| 5.3 | Topologia física da rede referência para o cenário de tráfego médio após o dimensionamento utilizando o modelo heurístico. | 56 |
| 5.4 | Topologia ótica da rede referência para o cenário de tráfego médio após o dimensionamento utilizando o modelo heurístico. | 57 |
| 5.5 | Topologia física da rede referência para o cenário de tráfego elevado após o dimensionamento utilizando o modelo heurístico. | 59 |
| 5.6 | Topologia ótica da rede referência para o cenário de tráfego elevado após o dimensionamento utilizando o modelo heurístico. | 59 |

Lista de tabelas

| | | |
|------|--|----|
| 2.1 | Tabela com os índices e as taxas de transmissão de bit correspondente. | 11 |
| 2.2 | Parâmetros da rede referência. | 15 |
| 2.3 | Tabela com o tráfego | 17 |
| 2.4 | Tabela com a divisão do tráfego | 18 |
| 2.5 | Tabela com o tráfego | 19 |
| 2.6 | Parâmetros da rede real NSFNET [4]. | 20 |
| 2.7 | Tabela com o tráfego | 24 |
| 2.8 | Tabela dos custos do equipamento [3]. | 24 |
| 4.1 | Parâmetros de entrada do sistema. | 38 |
| 4.2 | path | 40 |
| 4.3 | lightPath | 41 |
| 4.4 | opticalChannel | 41 |
| 4.5 | opticalMultiplexSection | 42 |
| 4.6 | DemandRequest | 42 |
| 4.7 | PathRequest | 43 |
| 4.8 | pathInformation | 43 |
| 4.9 | lightPathsTable | 44 |
| 4.10 | DemandRequestRouted | 44 |
| 5.1 | Tabela com a informação detalhada para o CAPEX para o cenário de tráfego baixo utilizando o modelo ILP. | 48 |
| 5.2 | Tabela com a informação detalhada para o CAPEX para o cenário de tráfego médio utilizando o modelo ILP. | 49 |
| 5.3 | Tabela com a informação detalhada para o CAPEX para o cenário de tráfego elevado utilizando o modelo ILP. | 49 |
| 5.4 | Tabela com a informação sobre as ligações da rede referência para o cenário de tráfego baixo após o dimensionamento utilizando o modelo heurístico. | 55 |
| 5.5 | Tabela com a informação sobre os nós da rede referência para o cenário de tráfego baixo após o dimensionamento utilizando o modelo heurístico. | 55 |

| | | |
|------|---|----|
| 5.6 | Tabela com a informação detalhada para o CAPEX para o cenário de tráfego baixo utilizando o modelo heurístico. | 56 |
| 5.7 | Tabela com a informação sobre as ligações da rede referência para o cenário de tráfego médio após o dimensionamento utilizando o modelo heurístico. | 57 |
| 5.8 | Tabela com a informação sobre os nós da rede referência para o cenário de tráfego médio após o dimensionamento utilizando o modelo heurístico. | 58 |
| 5.9 | Tabela com a informação detalhada para o CAPEX para o cenário de tráfego médio utilizando o modelo heurístico. | 58 |
| 5.10 | Tabela com a informação sobre as ligações da rede referência para o cenário de tráfego elevado após o dimensionamento utilizando o modelo heurístico. | 60 |
| 5.11 | Tabela com a informação sobre os nós da rede referência para o cenário de tráfego elevado após o dimensionamento utilizando o modelo heurístico. | 60 |
| 5.12 | Tabela com a informação detalhada para o CAPEX para o cenário de tráfego elevado utilizando o modelo heurístico. | 61 |
| 5.13 | Comparação dos valores do CAPEX entre os diferentes modelos para os diferentes cenários de tráfego. | 61 |
| 5.14 | Comparação dos valores do CAPEX para o modelo heurístico entre os diferentes cenários de tráfego. | 62 |
| 5.15 | CAPEX para o rede real no modo de transporte opaco com ordenação de demandas descendente e critério de encaminhamento os saltos. | 65 |
| 5.16 | Comparação dos valores do CAPEX entre o modelo heurístico e o modelo analítico para a rede realista. | 66 |
| 5.17 | CAPEX para o rede real no modo de transporte opaco com ordenação de demandas ascendente e critério de encaminhamento os saltos. | 66 |
| 5.18 | CAPEX para o rede real no modo de transporte opaco com ordenação de demandas descendente e critério de encaminhamento a distância entre os nós. | 67 |
| 5.19 | CAPEX para o rede real no modo de transporte opaco com ordenação de demandas ascendente e critério de encaminhamento a distância entre os nós. | 67 |

Capítulo 1

Introdução

As redes de telecomunicações têm sofrido significativas alterações ao longo das últimas décadas. O volume de tráfego, em particular o tráfego IP, tem vindo a aumentar ano após ano. Isso deve-se ao aumento do número de dispositivos ligados à Internet, ao aumento da largura de banda das tecnologias móveis de acesso, ao aumento do tráfego de vídeo ou à expansão da fibra ótica até casa dos clientes. O tráfego em rápido crescimento exige cada vez mais capacidade das redes.

Os operadores de telecomunicações têm que ser capazes de lidar com o crescimento do tráfego e procuram continuamente por avanços tecnológicos que possam melhorar as redes. Um dos primeiros avanços tecnológicos foi a capacidade de transportar vários comprimentos de onda em um único cabo de fibra ótica. Cada comprimento de onda é transportado em uma frequência ótica diferente e combinado em uma única fibra, dando origem à multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM). Ao longo dos anos, o número de comprimentos de onda que os sistemas WDM suportam em uma única fibra tem crescido rapidamente, proporcionando um tremendo crescimento da capacidade da rede para lidar com as demandas cada vez maiores de largura de banda dos utilizadores da rede. Surgiu também a possibilidade de implementar redes WDM complexas em topologias em malha, enquanto no início da tecnologia eram usadas topologias em anel. Para transferência de dados entre dois nós da rede uma ligação ótica necessita de ser configurada para realizar o encaminhamento dos dados a nível ótico. Com o aumento do tamanho das redes, o número de equipamento necessário também aumentou, representando para os operadores de telecomunicações desafios em termos de custo de rede, consumo de energia, dissipação de calor, espaço físico e manutenção. Para os operadores é necessário reduzir o custo por bit transportado o máximo possível sem comprometer a qualidade do serviço.

O aumento da complexidade da tecnologia WDM trouxe a necessidade de estratégias para o planeamento e dimensionamento de redes de transporte adequadas. Em arquiteturas de rede complexas, os problemas não podem ser resolvidos manualmente. São necessárias ferramentas computacionais que possam determinar como utilizar os recursos da rede de forma eficiente.

Investigação científica em ambientes acadêmicos tem vindo a ser realizada com o intuito de desenvolver ferramentas para o dimensionamento das redes de transporte. Usualmente, as ferramentas de planeamento têm como objetivo minimizar o custo com a instalação física das infraestruturas (CAPEX) e reduzir o custo de manutenção da rede (OPEX). Uma das possíveis metodologias passa pela utilização de modelos de programação linear inteira (ILP) que produzem soluções ótimas, mas que para problemas computacionalmente complexos requerem imenso tempo. Outra das possíveis metodologias passa pela utilização de algoritmos heurísticos. Os algoritmos heurísticos costumam ser usados de forma a obter soluções aproximadas para um problema em um tempo computacional razoável.

Esta dissertação propõe uma estrutura baseada em algoritmos heurísticos para o dimensionamento de redes óticas. Os algoritmos propostos foram implementados num simulador com o objetivo de oferecerem soluções muito próximas dos modelos ILP, mas com tempos de processamento inferiores para problemas mais complexos. Dado os modelos de ILP serem capazes de identificar a solução ótima, foram utilizados nesta dissertação como forma de validar os métodos heurísticos.

1.1 Objetivos

Esta dissertação pretendeu alcançar três objetivos principais:

1. Desenvolver algoritmos heurísticos para o dimensionamento de redes de transporte opacas.
2. Implementar os algoritmos heurísticos no simulador NetXPTO-NetPlanner.
3. Validar os modelos heurísticos com o recurso a modelos baseados em ILPs e em modelos analíticos.

1.2 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está organizada em seis capítulos. Neste capítulo foi definido o problema, foram enunciados os principais objetivos do trabalho e foi apresentada a estrutura da dissertação. No capítulo 2 são apresentadas as arquiteturas dos elementos que constituem as redes de transporte, as ligações e os nós. São identificadas as topologias que a rede pode tomar. É definido uma rede referência com três cenários de tráfego e uma rede realista em que se definiu um cenário de tráfego. E no final, é apresentado os métodos de calcular o custo de uma rede utilizando o modelo analítico, o modelo ILP e o modelo heurístico. No capítulo 3 são propostos os algoritmos heurísticos para o dimensionamento de redes de transporte. No capítulo 4 é mostrado como as heurísticas foram implementadas no simulador NetXPTO-NetPlanner. É apresentado o diagrama do sistema de alto nível, os blocos do sistema, os parâmetros de entrada e a estrutura dos tipos de sinais. No capítulo 5 são apresentados e analisados os resultados tecno-econômicos. Inicialmente para os três cenários de tráfego definidos para a rede referência com o intuito de testar e validar as heurísticas desenvolvidas nesta dissertação, através dos modelos analíticos e ILPs. E posteriormente, para o cenário de tráfego definido para uma rede realista. Ter em conta que para os modelos ILPs recorreu-se a um trabalho de uma dissertação de mestrado anterior[1]. Os resultados foram obtidos para o modo de transporte opaco sem sobrevivência. Finalmente, no capítulo 6 é apresentado as conclusões ao trabalho, bem como sugestões para trabalho futuro.

1.3 Principais Resultados

Os principais resultados obtidos durante a realização desta dissertação foram:

1. Implementação das heurísticas no simulador NetXPTO-NetPlanner.
2. Teste e validação bem sucedidos dos algoritmos heurísticos desenvolvidos, através dos modelos ILP e analítico, usando uma rede referência.
3. Utilização dos métodos heurísticos no dimensionamento de uma rede de transporte realista.

Capítulo 2

Dimensionamento de Redes Óticas Opacas

O propósito deste capítulo é introduzir o problema do dimensionamento em redes óticas opacas. O volume de tráfego IP tem vindo a aumentar ano após ano. Os operadores de telecomunicações têm que ser capazes de lidar com o crescimento do tráfego, necessitando de reduzir o custo por bit transportado sem comprometer a qualidade do serviço. É necessário determinar como utilizar os recursos da rede de forma eficiente. As ferramentas de planeamento e dimensionamento da rede tornam-se bastante importantes para minimizar os elementos da rede e assim minimizar o CAPEX da rede. São exemplos dessas ferramentas o modelo heurístico, o modelo ILP e o modelo analítico.

Este capítulo está organizado em cinco secções. Na secção 2.1 são apresentadas as arquiteturas das ligações e dos nós que compõem a rede de transporte ótica. Na secção 2.2 são apresentadas as topologias de rede possíveis e os modos de operação da rede. Na secção 2.5 é definida uma rede referência e são criados três cenários de tráfego para posteriormente testar as heurísticas que serão desenvolvidas nesta dissertação. Na secção 2.6 é escolhida uma rede realista (NSFNET) para aplicar as heurísticas e para tal é definido um cenário de tráfego. Na última secção 2.3 são apresentados os métodos de calcular o CAPEX de uma rede.

2.1 Arquitetura da Rede

Nesta secção é apresentada a arquitetura de uma rede de transporte ótica. Uma rede é constituída por ligações e nós, sendo que a gestão de largura de banda é efetuada nos nós da rede e a transmissão entre nós é efetuada nas ligações da rede. Na figura abaixo, 2.1, podemos ver um exemplo de uma representação de uma rede de transporte. Os nós são representados por círculos e as ligações por linhas.

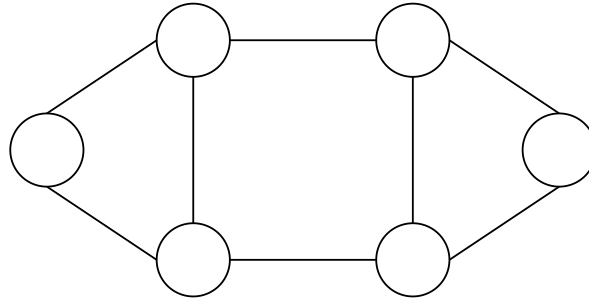


Figura 2.1: Exemplo de uma rede de transporte.

2.1.1 Ligações

Nas redes de transporte ligações são tipicamente conexões físicas ponto-a-ponto. Uma ligação interliga dois nós adjacentes de uma rede de transporte, isto é, nós conectados diretamente. Ligações podem ser compostas por um ou mais sistemas de transmissão, que têm a função de transportar um sinal WDM. Sinais são transmitidos através de um par de fibras unidirecionais garantindo uma comunicação bidirecional entre os nós. A fibra ótica é capaz de transportar os dados em comprimentos de onda. Como o sinal é propagado na fibra ótica, sofre com a atenuação da fibra. Para compensar essa atenuação e garantir a qualidade do sinal, amplificadores óticos são incorporados no sistema de transmissão. O mesmo amplificador permite amplificar simultaneamente todos os comprimentos de onda da fibra. Os amplificadores óticos são colocados a uma distância, *span*, tipicamente entre 80 e 120 km. Normalmente estes amplificadores incluem dois blocos de amplificação EDFA e um compensador de dispersão situado entre esses blocos. A arquitetura do sistema de transmissão de uma rede de transporte é apresentada na figura 2.2. O sistema de transmissão representado é um sistema bidirecional. Cada sistema de transmissão inicia e termina sempre num OLT. E cada linha colorida corresponde a um canal ótico ao qual é associado um comprimento de onda.

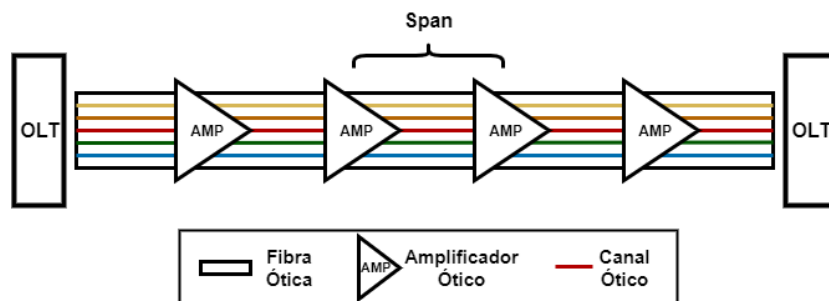


Figura 2.2: Arquitetura de uma ligação [2].

2.1.2 Nós

A estrutura de um nó requer vários equipamentos e é onde são executados as operações mais significativas do sinal ótico, fazendo dos nós o elemento mais caro de uma rede de transporte ótica.

Nas redes óticas um nó é constituído por três estruturas essenciais: um armário, mais conhecido por *rack*, as prateleiras, conhecidas por *shelves* e as cartas, conhecidas por *modules*. Uma *rack* é a estrutura base do nó que contém o sistema de alimentação, o sistema de refrigeração e tem espaço para montar um número de *shelves*. A figura 2.3 apresenta o esquema de um nó que suporta três *shelves*. As *shelves* são equipamentos associados a uma tecnologia e cada *shelf* tem um número limitado de unidades de espaço, denominado *slots*. Os *slots* permitem conectar cartas com diferentes características. Alguns *slots* são reservados para cartas de controlo que são necessários para funções de OAM (operação, administração e gestão). Um carta contém componentes elétricas e óticas, para desempenhar funções bem definidas como encapsulamento, agregação de sinais com taxas de transmissão mais baixas em um com taxa de transmissão mais alta (*grooming*) e atribuição de comprimento de onda. Uma carta é constituída por um número de portas bidirecionais, utilizadas para transmitir e receber informação a uma velocidade determinada pela sua capacidade máxima. Para isso necessita da adaptação de um *transceiver* apropriado.

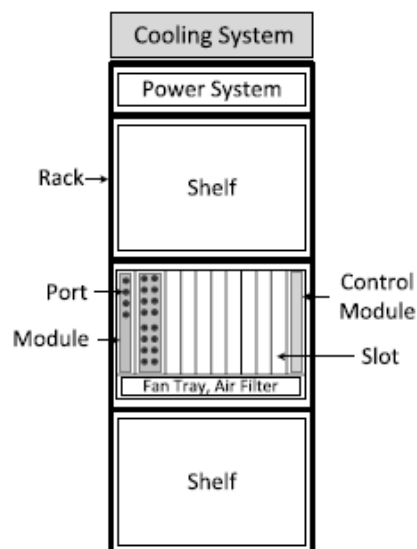


Figura 2.3: Arquitetura do nó [2].

2.2 Topologias da Rede

Em termos de topologias da rede podemos definir dois níveis distintos, um que corresponde à topologia física e outro que corresponde à topologia lógica.

2.2.1 Topologia Física

A topologia física pode ser vista como a disposição de uma rede ótica real. A disposição física dos nós e as conexões entre os nós através de ligações. Em redes óticas, no caso da topologia física, uma ligação corresponde a uma fibra ótica. A topologia física pode ser representada por grafos. Um grafo providencia-nos um modelo matemático constituído por um conjunto de vértices (nós) e um conjunto de arestas (ligações). Os grafos podem ser representados por matrizes de adjacência. Uma matriz de adjacência é uma matriz composta por uns e zeros. Os uns representam que os nós estão diretamente ligados.

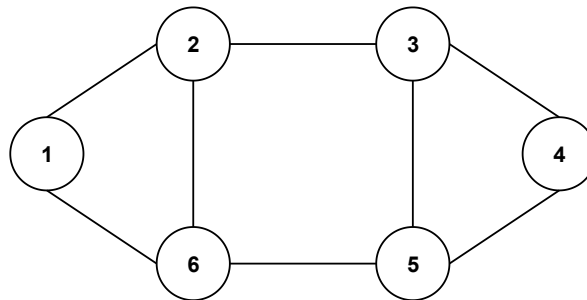


Figura 2.4: Exemplo de uma topologia física de uma rede.

2.2.2 Topologia Lógica

A topologia lógica representa como os componentes estão conectados entre si a nível ótico. Neste caso, uma ligação representa um caminho ótico (lightpath). A topologia lógica vai depender do modo de transporte. Cada nó pode estar conectado apenas aos nós adjacentes (modo de transporte opaco), ou pode estar conectado a todos os outros nós da rede (modo de transporte transparente), ou pode estar conectado a adequados nós (modo de transporte translúcido). A topologia lógica também pode ser representada por matrizes de adjacência composta por uns e zeros, como a topologia física. Neste caso os uns representam as ligações lógicas.

2.2.3 Modos de Transporte

Uma rede ótica de transporte pode operar no modo opaco, transparente ou translúcido. O modo de transporte é identificado em função do número de conversões de um sinal ótico no domínio elétrico.

No modo de transporte opaco ocorrem conversões OEO (ótico-elétrico-ótico) em todos os nós intermédios desde o nó origem até ao nó destino. Tem a vantagem de os sinais serem regenerados em todos os nós, eliminando a acumulação de deficiências físicas. Uma rede ótica no modo de transporte opaco pode permitir uma melhor utilização dos canais óticos pelo facto da agregação do tráfego ser feita em todos os nós e não necessitar da continuidade do comprimento de onda. Em termos de topologia, a topologia física e lógica são iguais. Cada caminho ótico é definido entre cada nó intermédio desde a origem ao destino, correspondendo a uma ligação física imposta pela fibra ótica.

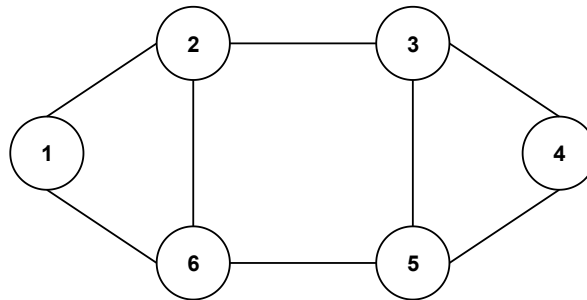


Figura 2.5: Topologia lógica para o modo de transporte opaco, considerando a topologia física apresentada na figura 2.4.

No modo de transporte transparente apenas ocorrem conversões OEO nos nós finais do caminho, isto é, no nó origem e no nó destino. Na agregação do tráfego apenas sinais clientes com a mesma origem e destino podem ser agregados no mesmo comprimento de onda. É necessário garantir a continuidade do comprimento de onda. Isto leva a que a utilização de canais óticos neste modo de transporte seja pior que no modo de transporte opaco. Em termos de topologia, a topologia física e lógica são diferentes.

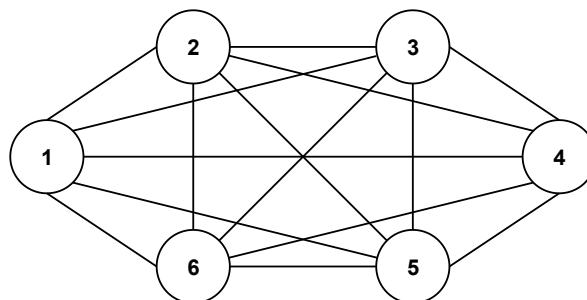


Figura 2.6: Topologia lógica para o modo de transporte transparente, considerando a topologia física apresentada na figura 2.4.

O modo de transporte translúcido é uma combinação dos modos de transporte

anteriormente referidos. Neste caso as conversões OEO são feitas em alguns nós intermédios antes de chegar ao nó destino. Em termos de agregação os sinais clientes com diferentes nós origem e destino podem partilhar o mesmo caminho ótico. Em termos de topologia, a topologia física e a topologia lógica são diferentes, tendo esta última diferentes soluções.

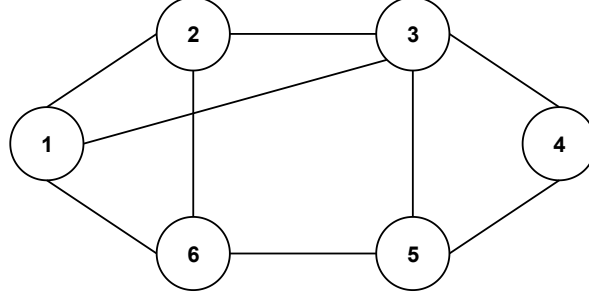


Figura 2.7: Topologia lógica para o modo de transporte translúcido, considerando a topologia física apresentada na figura 2.4.

2.3 Custo da Rede

Para os operadores de telecomunicações é necessário minimizar o custo da rede. O custo de uma rede de telecomunicações pode ser dividido entre o CAPEX, que corresponde ao custo de instalação das infraestruturas e o OPEX, que corresponde ao custo de manutenção da rede. Nesta dissertação apenas nos vamos focar no CAPEX. Como vimos anteriormente na secção 2.1, as redes de telecomunicações são constituídas por ligações e nós, então podemos definir o CAPEX como a soma dos custos das ligações com os custos dos nós. Assim, o custo total de instalação CAPEX em unidades monetárias, C_C , é dado pela equação 2.1

$$C_C = C_L + C_N \quad (2.1)$$

onde C_L é o custo de instalação das ligações e C_N é o custo de instalação dos nós.

2.3.1 Custo das Ligações

Como apresentado na secção 2.1.1, uma ligação consiste em dois terminais de linha óticos, um em cada extremidade, em vários amplificadores, dependentes do comprimento da ligação, colocados a uma certa distância (span) e vários canais óticos. Então, o custo das ligações em unidades monetárias, C_L , é dado pela equação 2.2

$$C_L = \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N L_{ij} \left(2\gamma_0^{OLT} + 2\gamma_1^{OLT} W_{ij} + 2N_{ij}^R c^R \right) \quad (2.2)$$

onde:

- $i \rightarrow$ Índice do nó origem da ligação física
- $j \rightarrow$ Índice do nó destino da ligação física
- $N \rightarrow$ Número total de nós, $N \in \mathbb{N}$
- $L_{ij} \rightarrow$ Variável binária indicando se a ligação entre os nós i e j é usada, $L_{ij} \in \{0, 1\}$
- $\gamma_0^{OLT} \rightarrow$ Custo de cada OLT em unidades monetárias
- $\gamma_1^{OLT} \rightarrow$ Custo do cada transponder em unidades monetárias
- $W_{ij} \rightarrow$ Número de canais óticos na ligação $i j$
- $N_{ij}^R \rightarrow$ Número amplificadores óticos na ligação $i j$
- $c^R \rightarrow$ Custo de cada amplificador ótico unidirecional em unidades monetárias

O número de amplificadores por cada ligação é calculado pela equação 2.3

$$N_{ij}^R = \left(\left\lceil \frac{len_{ij}}{span} \right\rceil - 1 \right) \quad (2.3)$$

onde a variável len_{ij} é o comprimento da ligação ij em quilómetros e $span$ é a distância entre amplificadores também em quilómetros.

2.3.2 Custo dos Nós

Como referido na secção 2.1.2, os nós têm uma parte elétrica e uma parte ótica. Assim, o custo dos nós em unidades monetárias, C_N , é dado pelo soma da parte elétrica, C_{EXC} , com a parte ótica, C_{OXC} , obtendo-se a equação 2.4.

$$C_N = C_{EXC} + C_{OXC} \quad (2.4)$$

Como esta dissertação só aborda o modo de transporte opaco, apenas se considera a parte elétrica dos nós, resultando na equação 2.5

$$C_N = C_{EXC} \quad (2.5)$$

O custo da parte elétrica é a soma do custo fixo da conexão elétrica com o custo total de todas as portas elétricas. Assim, o custo elétrico em unidades monetárias, C_{EXC} , é dado pela equação 2.6,

$$C_{EXC} = \sum_{n=1}^N N_{exc,n} \left(\gamma_{e0} + \sum_{c=-1}^B \gamma_{e1,c} P_{exc,c,n} \right) \quad (2.6)$$

onde:

- $N \rightarrow$ Número total de nós, $N \in \mathbb{N}$
- $N_{exc,n} \rightarrow$ Variável binária indicando se o nó n é usado, $N_{exc,n} \in \{0, 1\}$
- $\gamma_{e0} \rightarrow$ Custo de cada EXC em unidades monetárias
- $\gamma_{e1,c} \rightarrow$ Custo de cada porta EXC em unidade monetárias com bit-rate B e com um dado alcance do transceiver
- $P_{exc,c,n} \rightarrow$ Número de portas do comutador elétrico
- $B \rightarrow$ Número natural correspondente ao índice máximo das portas de curta distância, ver tabela 2.1

| Índice | Taxa de transmissão de bit |
|--------|--|
| -1 | 100 Gbits/s (porta de linha de longo alcance) |
| 0 | 1.25 Gbits/s (porta tributária de curto alcance) |
| 1 | 2.5 Gbits/s (porta tributária de curto alcance) |
| 2 | 10 Gbits/s (porta tributária de curto alcance) |
| 3 | 40 Gbits/s (porta tributária de curto alcance) |
| 4 | 100 Gbits/s (porta tributária de curto alcance) |

Tabela 2.1: Tabela com os índices e as taxas de transmissão de bit correspondente.

Em que o número de portas do comutador elétrico, $P_{exc,c,n}$, é obtido através da equação 2.7 para portas de longo alcance e através da equação 2.8 para portas de curto alcance.

Para o cálculo de portas de longo alcance usamos

$$P_{exc,-1,n} = \sum_{j=1}^N \lambda_{nj} \quad (2.7)$$

onde λ_{nj} é o número de canais óticos entre o nó n e o nó j .

E para o cálculo de portas de curto alcance usamos

$$P_{exc,c,n} = \sum_{d=1}^N D_{nd,c} \quad (2.8)$$

onde $D_{nd,c}$ são as demandas entre o nó n e o nó d com bit rate c . Quando $n=d$ o valor das demandas é zero, i.e, $D_{nn,c} = 0$

2.4 Ferramentas de planeamento e dimensionamento

Com o intuito de minimizar o custo da rede são necessárias ferramentas para o planeamento e dimensionamento da rede. As ferramentas são muito importantes para os operadores de telecomunicações, pois afetam diretamente a competitividade dos fornecedores de sistemas e operadores de rede. [3]. Uma das possíveis ferramentas é o modelo ILP que produz soluções ótimas, mas que para problemas computacionalmente complexos requer imenso tempo. Outra das ferramentas é o modelo analítico que é usado quando é necessário uma estimativa dos resultados. E outra das possíveis ferramentas é o modelo heurístico, que costuma ser usado para obter soluções aproximadas para um problema em um tempo computacional razoável.

O desenvolvimento de um modelo requer primeiro a definição das entradas, saídas e variáveis do problema em uma representação matemática. Vamos considerar uma rede, que consiste em um conjunto de nós e um conjunto de links bidirecionais que conectam os nós. As ligações entre os nós da rede são representadas por uma matriz de adjacência. As demandas de tráfego cliente estão também na forma de uma matriz de adjacência. Para cada tipo de tráfego de cliente deve ser criada uma matriz de demandas bidirecional. Nós vamos assumir que o tráfego é estático, ou seja, não varia com o tempo. As demandas de tráfego passam por um ou mais links para alcançar o seu destino. A demanda de tráfego requer uma capacidade reservada em cada sistema de transmissão, dependendo do tipo de tráfego cliente. Nesta dissertação são consideradas portas de linha de 100 Gb/s. Cada sinal ótico é composto por vários canais óticos e a cada canal ótico corresponde um comprimento de onda.

2.4.1 Modelo ILP

O modelo ILP é um modelo de otimização que possui um número específico de variáveis e restrições. Em telecomunicações, os modelos ILP são usados para projetar redes que descrevem componentes reais e as suas capacidades através de um conjunto de equações lineares. Apesar de obtermos soluções ótimas com os modelos ILP, os resultados podem levar dias, meses ou até anos a serem obtidos, dependendo do número de variáveis e dos recursos computacionais.

O modelo ILP considerado nesta dissertação foi desenvolvido em [2]. Para minimização do custo da rede, este modelo ILP propõe minimizar a soma de duas variáveis: o número total de fluxos que atravessam uma ligação e o número total de canais óticos em cada ligação. As restrições de conservação de fluxo deste modelos ILP podem ser consultadas em [1].

O objetivo principal é determinar os valores das variáveis de decisão, para que todas as equações lineares sejam satisfeitas e o valor da função objetivo seja minimizado. Para conseguir obter a solução ótima, o modelo ILP vai testar todos os cenários possíveis para a resolução do problema.

Para os cálculos do CAPEX da rede para o modelo ILP são utilizados as equações apresentadas nas subsecções 2.3.1 e 2.3.2 deste capítulo, tendo em conta os valores finais

das variáveis obtidas através da execução deste modelo.

Os resultados para o modelo ILP foram obtidos através do software MATLAB em conjunto com o pacote de software de otimização LPSOLVE.

2.4.2 Modelo Analítico

O modelo analítico é usado quando é necessário uma estimativa de valores. É importante quando existe falta de alguma informação. Para colmatar essa falta de informação este modelo utiliza valores médios. Olhando a equação para o cálculo do custo das ligações 2.2 verificamos que das variáveis necessárias não é conhecido o número de canais óticos.

O número médio de canais óticos pode ser calculado, através da equação 2.9

$$\langle w \rangle = \left(\frac{[D \langle h \rangle]}{L_u} \right) (1 + \langle k \rangle) \quad (2.9)$$

onde:

- $D \rightarrow$ Número de demandas unidirecionais
- $L_u \rightarrow$ Número de ligações unidirecionais
- $\langle k \rangle \rightarrow$ Coeficiente de sobrevivência

O número de demandas unidirecionais, D , pode ser calculado pela equação 2.10

$$D = \left(\frac{1}{2} \right) (1 + \xi) \left(\frac{T_1}{\tau} \right) \quad (2.10)$$

onde:

- $\xi \rightarrow$ Coeficiente de agregação
- $T_1 \rightarrow$ Tráfego unidirecional total
- $\tau \rightarrow$ Bit rate de linha

Como esta dissertação aborda o modo de transporte opaco sem sobrevivência, é assumido que o coeficiente de agregação ξ é 1 e que o coeficiente de sobrevivência $\langle k \rangle$ é 0.

No que diz respeito ao custo dos nós, olhando a equação 2.6, verificamos que não é conhecido o número de portas do comutador elétrico.

O número médio de portas do comutador elétrico, $\langle P_{exc} \rangle$, é calculado pela equação 2.11

$$\langle P_{exc} \rangle = \langle d \rangle \langle h \rangle \quad (2.11)$$

onde:

- $\langle d \rangle \rightarrow$ Número médio de demandas
- $\langle h \rangle \rightarrow$ Número médio de saltos

O número médio de demandas, $\langle d \rangle$, é calculado pela equação 2.12

$$\langle d \rangle = \frac{D}{N} \quad (2.12)$$

Tendo em conta todas estas equações, substituindo nas equações 2.3.1 e 2.3.2 é possível calcular os valores aproximados para o CAPEX da rede.

2.4.3 Modelo Heurístico

O modelo heurístico é utilizado quando se pretende obter uma solução aproximada mais rápida que os métodos ótimos, como os modelos ILP. Nesta dissertação serão desenvolvidos algoritmos baseados em heurísticas. A minimização do custo da rede vai depender das estratégias e decisões tomadas para o encaminhamento e agregação das demandas de tráfego. Os algoritmos propostos pretendem minimizar o número de comprimentos de onda necessários para carregar todo o tráfego. O modelo heurístico proposto neste trabalho é apresentado com mais detalhe no capítulo 3. E no capítulo 4 é apresentado como o modelo heurístico foi implementado no simulador NetXPTO-NetPlanner. Utilizando o modelo heurístico temos uma solução aproximada, dependendo da qualidade das tais estratégias. Vai diferir do modelo ILP no facto de não serem considerados todos os cenários possíveis. As equações apresentadas nas subsecções 2.3.1 e 2.3.2 deste capítulo são utilizadas para os cálculos do CAPEX da rede usando este modelo.

2.5 Rede Referência

Nesta secção é apresentada a rede referência que irá servir para testar os algoritmos desenvolvidos. A sua topologia física, bem como a sua topologia lógica para o modo de transporte opaco e as matrizes de tráfego para três cenários de tráfego diferentes.

2.5.1 Topologia Física

Na figura 2.8 pode se ver a topologia física da rede referência escolhida. Esta rede suporta um sistema de transmissão bidireccional entre nós adjacentes. A rede consiste em seis nós e em oito ligações bidireccionais. Abaixo é apresentada a matriz com o comprimento, em quilómetros, de cada ligação entre os respetivos nós.

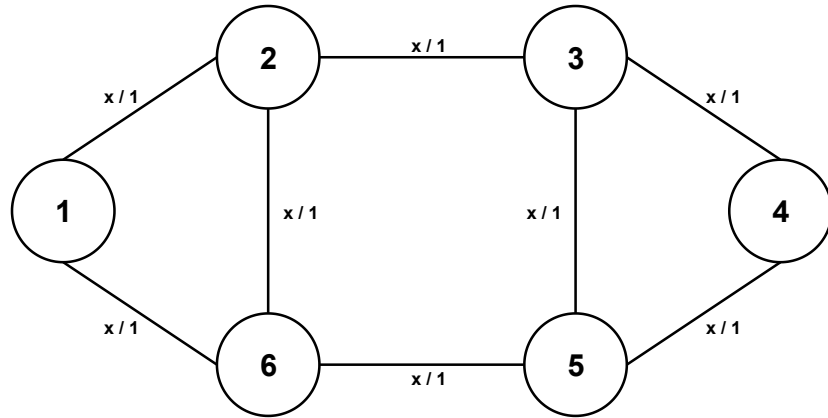


Figura 2.8: Topologia física da rede referêcia.

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Matriz adjacência da topologia física da rede referêcia.

$$Dist = \begin{bmatrix} 0 & 350 & 0 & 0 & 0 & 150 \\ 350 & 0 & 400 & 0 & 0 & 120 \\ 0 & 400 & 0 & 250 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 250 & 0 & 200 & 0 \\ 0 & 0 & 100 & 200 & 0 & 600 \\ 150 & 120 & 0 & 0 & 600 & 0 \end{bmatrix}$$

Matriz com a distância, em quilómetros, entre nós adjacentes, da rede referêcia.

| Variável | Descrição | Valor |
|--------------------------|-----------------------------------|-------|
| N | Número de Nós | 6 |
| L | Número de Ligações Bidireccionais | 8 |
| $\langle \delta \rangle$ | Grau Médio do Nó | 2.667 |
| $\langle h \rangle$ | Número Médio de Saltos | 1.533 |
| $\langle len \rangle$ | Comprimento Médio da Ligação (km) | 315 |

Tabela 2.2: Parâmetros da rede referêcia.

2.5.2 Topologia Lógica

Na figura 2.9 pode se ver a topologia lógica da rede referência para o modo de transporte opaco. É assumido que cada sistema de transmissão suporta até 100 canais óticos.

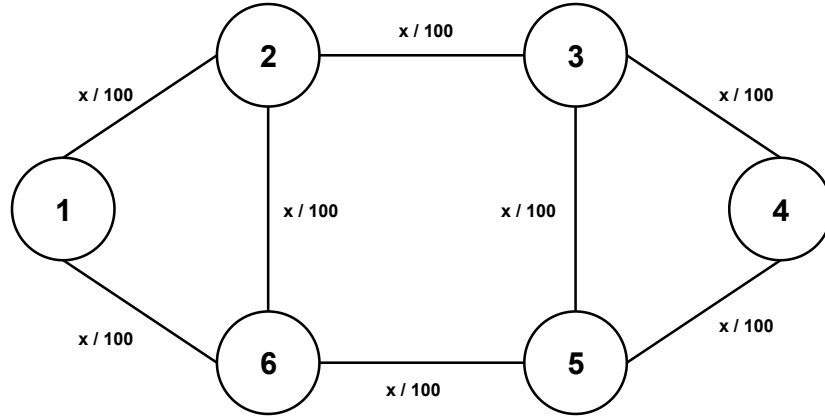


Figura 2.9: Topologia lógica da rede referência.

2.5.3 Matrizes de Tráfego

Para testar as heurísticas desenvolvidas nesta dissertação na rede referência apresentada anteriormente foram assumidos três cenários de tráfego. Um primeiro cenário com tráfego baixo (1 Tbit/s), um segundo cenário com tráfego médio (5 Tbits/s) e um terceiro cenário com tráfego elevado (10 Tbits/s). Para a obtenção desse tráfego foram criadas 5 matrizes de tráfego que correspondem às matrizes das demandas ODU0, ODU1, ODU2, ODU3 e ODU4 com diferentes taxas de transmissão de bit. A ODU0 com 1.25 Gbits/s, a ODU1 com 2.5 Gbit/s, a ODU2 com 10 Gbits/s, a ODU3 com 40 Gbits/s e a ODU4 com 100 Gbits/s. Foi assumido que não existe tráfego quando a origem e o destino são o mesmo nó. Foi também assumido que o tráfego é estático, ou seja, não varia com o tempo. Devemos ainda realçar que as matrizes são simétricas dado que considerou-se que o tráfego é bidirecional.

Tráfego Baixo

Para este cenário considerou-se que o tráfego total é de 1 Tbit/s. Abaixo encontram-se as matrizes das ODUs para a obtenção desse tráfego.

$$\begin{aligned}
 ODU0 &= \begin{bmatrix} 0 & 10 & 2 & 6 & 2 & 6 \\ 10 & 0 & 0 & 2 & 10 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 2 & 8 & 2 \\ 6 & 2 & 2 & 0 & 2 & 2 \\ 2 & 10 & 8 & 2 & 0 & 6 \\ 6 & 0 & 2 & 2 & 6 & 0 \end{bmatrix} & ODU1 &= \begin{bmatrix} 0 & 4 & 8 & 4 & 0 & 10 \\ 4 & 0 & 0 & 6 & 2 & 2 \\ 8 & 0 & 0 & 2 & 2 & 0 \\ 4 & 6 & 2 & 0 & 2 & 6 \\ 0 & 2 & 2 & 2 & 0 & 2 \\ 10 & 2 & 0 & 6 & 2 & 0 \end{bmatrix} \\
 ODU2 &= \begin{bmatrix} 0 & 2 & 2 & 2 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 2 & 2 & 0 \\ 2 & 0 & 2 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 2 & 2 & 2 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \end{bmatrix} & ODU3 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 ODU4 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 2 & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Matrizes de tráfego ODU0, ODU1, ODU2, ODU3 e ODU4 definidas para tráfego baixo.

| ODUs | Número de ODU's | Taxa de transmissão | Tráfego unidirecional |
|-----------------------------|-----------------|---------------------|-----------------------|
| ODU0 | 120 | 1.25 Gbit/s | 150 Gbit/s |
| ODU1 | 100 | 2.5 Gbit/s | 250 Gbit/s |
| ODU2 | 32 | 10 Gbit/s | 320 Gbit/s |
| ODU3 | 12 | 40 Gbit/s | 480 Gbit/s |
| ODU4 | 8 | 100 Gbit/s | 800 Gbit/s |
| Tráfego unidirecional total | | | 2000 Gbit/s |

Tabela 2.3: Tabela com o tráfego

Tráfego Médio

Para este cenário considerou-se que o tráfego total é de 5 Tbits/s. Abaixo encontram-se as matrizes das ODUs para a obtenção desse tráfego.

$$\begin{aligned}
 ODU0 &= \begin{bmatrix} 0 & 50 & 10 & 30 & 10 & 30 \\ 50 & 0 & 0 & 10 & 50 & 0 \\ 10 & 0 & 0 & 10 & 40 & 10 \\ 30 & 10 & 10 & 0 & 10 & 10 \\ 10 & 50 & 40 & 10 & 0 & 30 \\ 30 & 0 & 10 & 10 & 30 & 0 \end{bmatrix} & ODU1 &= \begin{bmatrix} 0 & 20 & 40 & 20 & 0 & 50 \\ 20 & 0 & 0 & 30 & 10 & 10 \\ 40 & 0 & 0 & 10 & 10 & 0 \\ 20 & 30 & 10 & 0 & 10 & 30 \\ 0 & 10 & 10 & 10 & 0 & 10 \\ 50 & 10 & 0 & 30 & 10 & 0 \end{bmatrix} \\
 ODU2 &= \begin{bmatrix} 0 & 10 & 10 & 10 & 0 & 0 \\ 10 & 0 & 0 & 0 & 10 & 0 \\ 10 & 0 & 0 & 10 & 10 & 0 \\ 10 & 0 & 10 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 10 & 10 & 10 & 0 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 10 & 0 \end{bmatrix} & ODU3 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 & 0 & 10 \\ 0 & 10 & 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 ODU4 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 \\ 0 & 10 & 0 & 0 & 10 & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Matrizes de tráfego ODU0, ODU1, ODU2, ODU3 e ODU4 definidas para tráfego médio.

| ODUs | Número de ODUs | Taxa de transmissão | Tráfego unidirecional |
|-----------------------------|----------------|---------------------|-----------------------|
| ODU0 | 600 | 1.25 Gbit/s | 750 Gbit/s |
| ODU1 | 500 | 2.5 Gbit/s | 1250 Gbit/s |
| ODU2 | 160 | 10 Gbit/s | 1600 Gbit/s |
| ODU3 | 60 | 40 Gbit/s | 2400 Gbit/s |
| ODU4 | 40 | 100 Gbit/s | 4000 Gbit/s |
| Tráfego unidirecional total | | | 10000 Gbit/s |

Tabela 2.4: Tabela com a divisão do tráfego

Tráfego Elevado

Para este cenário considerou-se que o tráfego total é de 10 Tbits/s. Abaixo encontram-se as matrizes das ODUs para a obtenção desse tráfego.

$$\begin{aligned}
 ODU0 &= \begin{bmatrix} 0 & 100 & 20 & 60 & 20 & 60 \\ 100 & 0 & 0 & 20 & 100 & 0 \\ 20 & 0 & 0 & 20 & 80 & 20 \\ 60 & 20 & 20 & 0 & 20 & 20 \\ 20 & 100 & 80 & 20 & 0 & 60 \\ 60 & 0 & 20 & 20 & 60 & 0 \end{bmatrix} & ODU1 &= \begin{bmatrix} 0 & 40 & 80 & 40 & 0 & 100 \\ 40 & 0 & 0 & 60 & 20 & 20 \\ 80 & 0 & 0 & 20 & 20 & 0 \\ 40 & 60 & 20 & 0 & 20 & 60 \\ 0 & 20 & 20 & 20 & 0 & 20 \\ 100 & 20 & 0 & 60 & 20 & 0 \end{bmatrix} \\
 ODU2 &= \begin{bmatrix} 0 & 20 & 20 & 20 & 0 & 0 \\ 20 & 0 & 0 & 0 & 20 & 0 \\ 20 & 0 & 0 & 20 & 20 & 0 \\ 20 & 0 & 20 & 0 & 20 & 0 \\ 0 & 20 & 20 & 20 & 0 & 20 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 20 & 0 \end{bmatrix} & ODU3 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 20 & 0 & 0 & 20 \\ 0 & 20 & 0 & 0 & 20 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 20 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 20 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 ODU4 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 20 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 20 \\ 0 & 20 & 0 & 0 & 20 & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Matrizes de tráfego ODU0, ODU1, ODU2, ODU3 e ODU4 definidas para tráfego elevado.

| ODUs | Número de ODUs | Taxa de transmissão | Tráfego unidirecional |
|-----------------------------|----------------|---------------------|-----------------------|
| ODU0 | 1200 | 1.25 Gbit/s | 1500 Gbit/s |
| ODU1 | 1000 | 2.5 Gbit/s | 2500 Gbit/s |
| ODU2 | 320 | 10 Gbit/s | 3200 Gbit/s |
| ODU3 | 120 | 40 Gbit/s | 4800 Gbit/s |
| ODU4 | 80 | 100 Gbit/s | 8000 Gbit/s |
| Tráfego unidirecional total | | | 20000 Gbit/s |

Tabela 2.5: Tabela com o tráfego

2.6 Rede Realista

Depois da validação dos modelos heurísticos na rede referência pretende-se aplicá-los a uma rede realista. A rede escolhida foi a NSFNET (National Science Foundation Network). Esta rede é frequentemente usada em estudos de dimensionamento de redes de transporte. A topologia desta rede pode ser vista na figura 2.10.

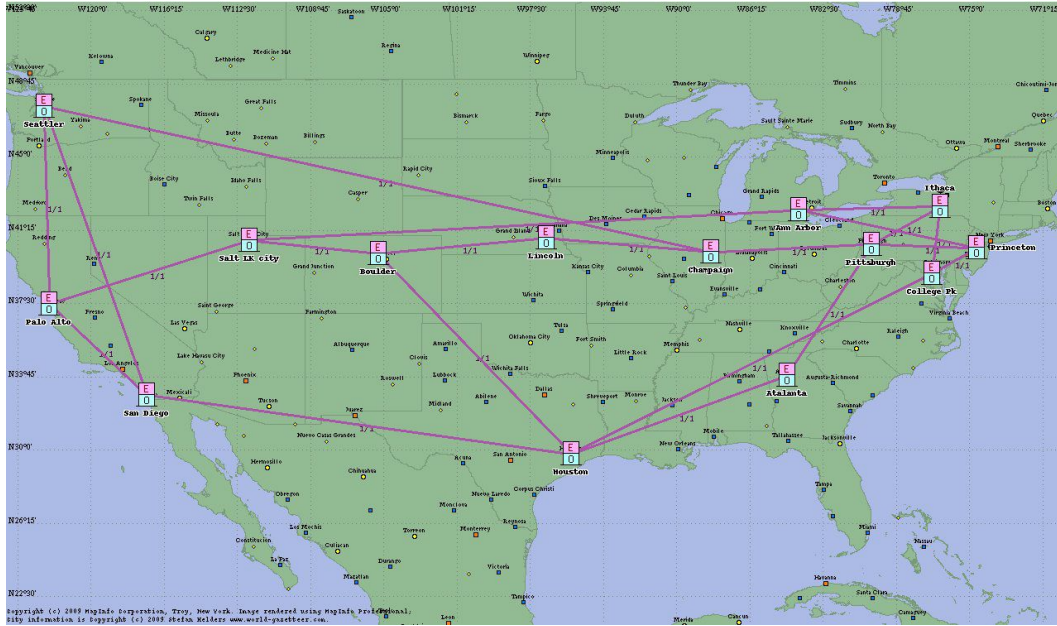


Figura 2.10: National Science Foundation Network (NSFNET) [4].

Esta rede é composta por catorze nós e vinte e uma ligações bidirecionais. Como cada nó tem no máximo quatro ligações e no mínimo duas, o valor do grau médio do nó nesta rede tem o valor 3, que é o resultado da divisão do número de ligações por nó pelo número total de nós. Estes parâmetros podem ser consultados na tabela 2.6.

| Variável | Descrição | Valor |
|--------------------------|---|-------|
| N | Número de Nós | 14 |
| L | Número de Ligações Bidirecionais | 21 |
| $\langle \delta \rangle$ | Grau Médio do Nó | 3.00 |
| $\langle h \rangle$ | Número Médio de Saltos por Caminhos de Trabalho | 2.14 |
| $\langle h' \rangle$ | Número Médio de Saltos por Caminhos de Backup | 3.60 |
| $\langle len \rangle$ | Comprimento Médio da Ligação (km) | 1086 |

Tabela 2.6: Parâmetros da rede real NSFNET [4].

2.6.1 Topologia Física

A representação da topologia física da rede realista pode ser vista na figura 2.12, bem como a atribuição dos seus 14 nós.

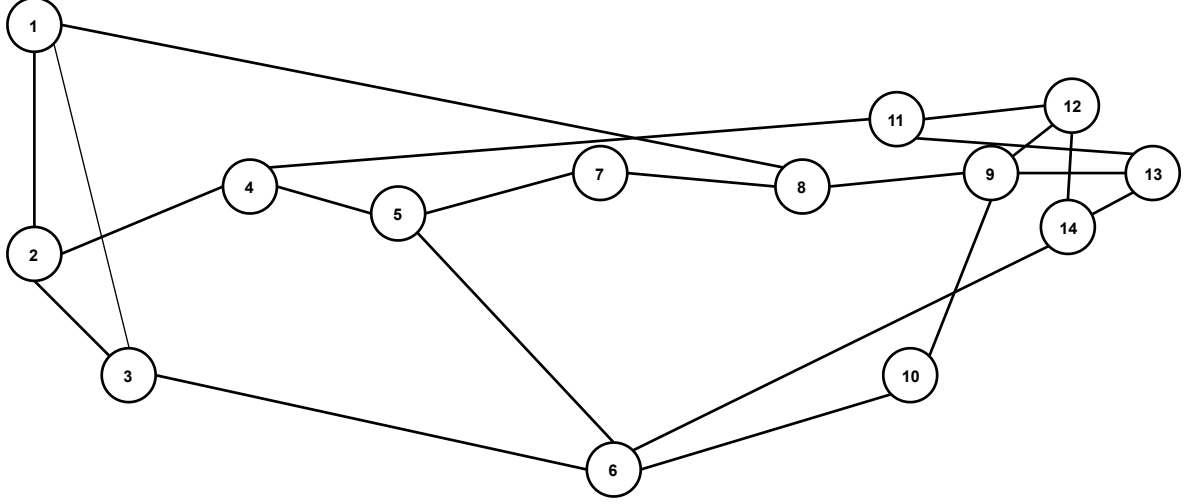


Figura 2.11: Topologia física da rede realista NSFNET.

A rede é composta por 21 ligações bidirecionais, com o comprimento, em quilómetros, das ligações entre nós adjacentes a serem representados na matriz abaixo.

$$Dist = \begin{bmatrix} 0 & 1100 & 1600 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2800 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1100 & 0 & 600 & 1000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1600 & 600 & 0 & 0 & 0 & 2000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1000 & 0 & 0 & 600 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2400 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 600 & 0 & 1100 & 800 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2000 & 0 & 1100 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1200 & 0 & 0 & 0 & 2000 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 800 & 0 & 0 & 700 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2800 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 700 & 0 & 700 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 700 & 0 & 900 & 0 & 500 & 500 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1200 & 0 & 0 & 900 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2400 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 800 & 800 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 500 & 0 & 800 & 0 & 0 & 300 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 500 & 0 & 800 & 0 & 0 & 300 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 300 & 300 & 0 \end{bmatrix}$$

Matriz com a distância, em quilómetros, entre nós adjacentes, da rede realista.

2.6.2 Topologia Lógica

Dado que se considerou o modo de transporte opaco, a topologia lógica é igual à topologia física, como referido em 2.2.3. A representação da topologia lógica pode ser vista na figura 2.12.

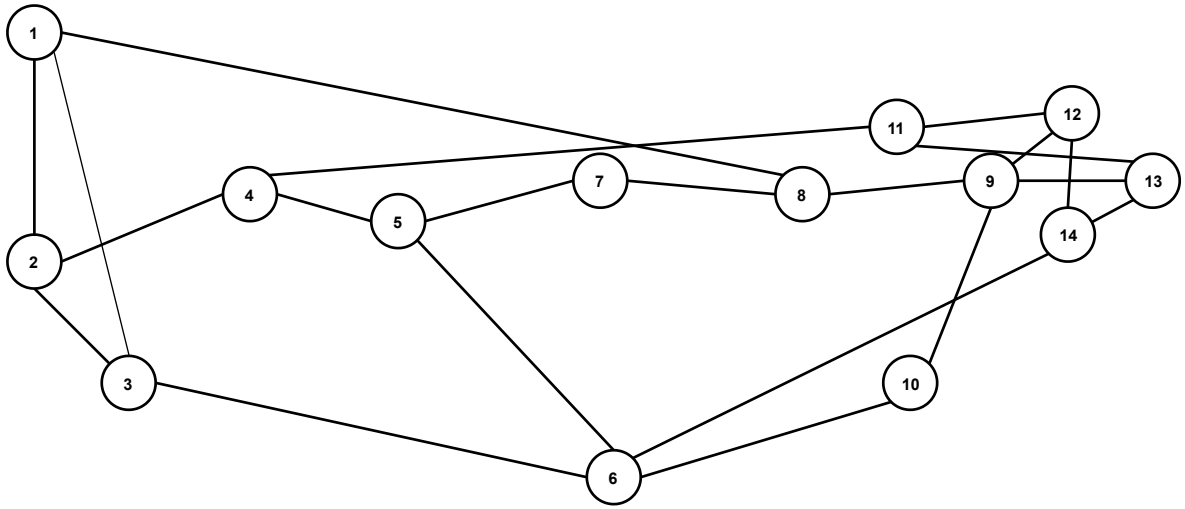


Figura 2.12: Topologia lógica da rede realista NSFNET.

2.6.3 Matrizes de Tráfego

Para validar as heurísticas considerou-se um cenário com tráfego de 5 Tbits/s para a rede realista. Abaixo é apresentado as matrizes das demandas ODU para a obtenção desse tráfego. Foram consideradas 1536 ODU0, 0 ODU1, 440 ODU2, 92 ODU3 e 0 ODU4. Tal como na rede referência, foi assumido que não existe tráfego quando a origem e o destino são o mesmo nó. Foi também assumido que o tráfego é estático, ou seja, não varia com o tempo. E mais uma

vez as matrizes são simétricas dado que considerou-se que o tráfego é bidirecional.

$$ODU0 = \begin{bmatrix} 0 & 8 & 4 & 14 & 4 & 12 & 8 & 8 & 6 & 8 & 8 & 14 & 8 & 6 \\ 8 & 0 & 8 & 8 & 6 & 16 & 14 & 8 & 8 & 8 & 8 & 14 & 2 & 20 \\ 4 & 8 & 0 & 14 & 8 & 8 & 8 & 4 & 12 & 8 & 10 & 14 & 8 & 8 \\ 14 & 8 & 14 & 0 & 10 & 4 & 8 & 8 & 6 & 8 & 8 & 14 & 8 & 6 \\ 8 & 6 & 8 & 10 & 0 & 8 & 8 & 8 & 10 & 8 & 8 & 4 & 8 & 14 \\ 12 & 16 & 8 & 4 & 8 & 0 & 4 & 12 & 8 & 8 & 10 & 8 & 12 & 8 \\ 8 & 14 & 8 & 8 & 8 & 4 & 0 & 12 & 0 & 8 & 8 & 12 & 2 & 12 \\ 8 & 8 & 4 & 8 & 8 & 12 & 12 & 0 & 8 & 0 & 8 & 8 & 12 & 0 \\ 6 & 8 & 12 & 6 & 10 & 8 & 0 & 8 & 0 & 8 & 8 & 12 & 8 & 4 \\ 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 0 & 8 & 0 & 4 & 8 & 8 & 14 \\ 8 & 8 & 10 & 8 & 8 & 10 & 8 & 8 & 8 & 4 & 0 & 8 & 8 & 8 \\ 14 & 14 & 14 & 14 & 4 & 8 & 12 & 8 & 12 & 8 & 8 & 0 & 8 & 8 \\ 8 & 2 & 8 & 8 & 8 & 12 & 2 & 12 & 8 & 8 & 8 & 8 & 0 & 6 \\ 6 & 20 & 8 & 6 & 14 & 8 & 12 & 0 & 4 & 14 & 8 & 8 & 6 & 0 \end{bmatrix}$$

$$ODU2 = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 0 & 2 & 2 & 4 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 4 & 2 & 2 \\ 2 & 0 & 2 & 2 & 0 & 2 & 4 & 4 & 2 & 0 & 2 & 4 & 0 & 2 \\ 0 & 2 & 0 & 2 & 2 & 2 & 2 & 4 & 2 & 2 & 4 & 4 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 0 & 4 & 4 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 4 & 2 & 2 \\ 2 & 0 & 2 & 4 & 0 & 2 & 2 & 2 & 4 & 2 & 2 & 4 & 2 & 2 \\ 4 & 2 & 2 & 4 & 2 & 0 & 2 & 4 & 2 & 2 & 4 & 2 & 4 & 4 \\ 2 & 4 & 2 & 2 & 2 & 2 & 0 & 4 & 4 & 2 & 2 & 2 & 2 & 4 \\ 2 & 4 & 4 & 2 & 2 & 4 & 4 & 0 & 2 & 4 & 2 & 4 & 4 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 4 & 2 & 4 & 2 & 0 & 2 & 2 & 4 & 2 & 0 \\ 2 & 0 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 4 & 2 & 0 & 0 & 2 & 2 & 4 \\ 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 2 & 2 & 4 & 4 & 2 & 2 & 0 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 4 & 4 & 2 & 0 & 4 & 2 & 2 & 2 & 0 \end{bmatrix}$$

$$ODU3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 3 & 2 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 2 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 2 & 0 & 4 \\ 2 & 2 & 0 & 2 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 4 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 2 & 4 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Matrizes de tráfego ODU0, ODU2 e ODU3 definidas..

| ODUs | Número de ODU's | Taxa de transmissão | Tráfego unidirecional |
|-----------------------------|-----------------|---------------------|-----------------------|
| ODU0 | 1536 | 1.25 Gbit/s | 1920 Gbit/s |
| ODU1 | 0 | 2.5 Gbit/s | 0 Gbit/s |
| ODU2 | 440 | 10 Gbit/s | 4400 Gbit/s |
| ODU3 | 92 | 40 Gbit/s | 3680 Gbit/s |
| ODU4 | 0 | 100 Gbit/s | 0 Gbit/s |
| Tráfego unidirecional total | | | 10000 Gbit/s |

Tabela 2.7: Tabela com o tráfego

2.7 Custo do Equipamento

A tabela 2.8 representa os custos dos equipamentos assumidos no âmbito desta dissertação.

| Equipamento | Símbolo | Custo |
|----------------------------------|------------------|--------------|
| OLT sem transponderes | γ_0^{OLT} | 15 000 € |
| Transponder | γ_1^{OLT} | 5 000 € |
| Amplificador ótico unidirecional | c^R | 2 000 € |
| EXC | γ_{e0} | 10 000 € |
| Portas EXC | γ_{e1} | 100 €/Gbit/s |

Tabela 2.8: Tabela dos custos do equipamento [3].

2.8 Conclusões

Uma rede de transporte ótica é constituída por nós que fazem a gestão da largura de banda e por ligações onde são efetuadas as transmissões entre os nós. Em termos de topologias de rede podemos definir dois níveis distintos. A topologia física que pode ser vista como a disposição de uma rede ótica real e a topologia lógica que representa como os componentes estão conectados entre si a nível ótico. Uma rede de transporte ótica pode operar no modo de transporte opaco, transparente ou translúcido, dependendo do número de conversões OEO. Neste capítulo foi definido uma rede referência e uma rede real para dimensionamento. Para o cálculo do CAPEX da rede podemos utilizar o modelo analítico, o modelo heurístico e o modelo ILP.

Capítulo 3

Modelo Heurístico

Os algoritmos heurísticos são uma solução rápida para resolver um problema de otimização. Costumam ser usados para resolver problemas NP-completos, uma classe de problemas de decisão, em que não há uma maneira eficiente conhecida de encontrar uma solução com rapidez e precisão. Para redes muito grandes, como as redes realistas, os modelos ILP são computacionalmente complexos e requerem imenso tempo para produzir uma solução exata. Assim, algoritmos heurísticos costumam ser usados de forma a obter soluções aproximadas em um tempo razoável.

Nesta dissertação é proposto um modelo baseado em algoritmos heurísticos. Esses algoritmos heurísticos têm que ter em vista a minimização do custo de instalação da rede, ou seja, minimizar os elementos físicos de rede necessários. Para tal, os algoritmos heurísticos propostos comprometem-se a resolver problemas no escalonamento, encaminhamento, atribuição do comprimento de onda e agregação das demandas de tráfego. A forma como esses problemas serão resolvidos dependem das estratégias e decisões tomadas na criação dos algoritmos. São assim propostos, neste capítulo, algoritmos com o mesmo nome dos problemas descritos anteriormente. Na seção 3.2 é proposto o algoritmo de escalonamento onde são abordadas as estratégias escolhidas para a ordenação das demandas, na seção 3.3 é definido o algoritmo de encaminhamento em que é explicado qual o método de encaminhamento escolhido, na seção 3.4 é explicado como é feita a atribuição do comprimento de onda e finalmente na seção 3.5 é proposta a estratégia de agregação das demandas.

3.1 Visão Geral do Modelo Heurístico

Na figura 3.1 podemos ver o diagrama que representa uma visão geral do modelo heurístico proposto. Neste diagrama, os retângulos representam os algoritmos heurísticos que serão desenvolvidos. Inicialmente as demandas são ordenadas através de um algoritmo de escalonamento e depois serão processadas uma a uma. Segue-se o algoritmo de encaminhamento que produz um caminho lógico mais curto e encaminha a demanda caso

exista capacidade. Caso exista capacidade é atribuído um comprimento de onda através do algoritmo de atribuição de comprimento de onda e o algoritmo de agregação responsabiliza-se por agregar o tráfego da demanda no comprimento de onda.



Figura 3.1: Visão geral dos algoritmos heurísticos.

3.2 Escalonamento

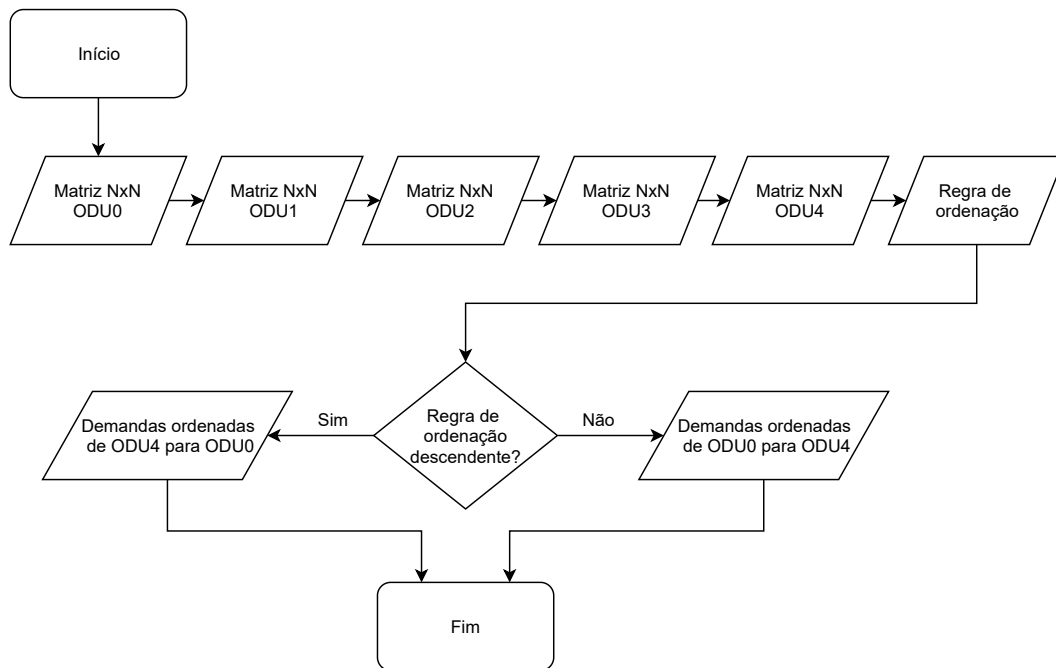


Figura 3.2: Fluxograma do algoritmo de escalonamento

O algoritmo de escalonamento é o que vai determinar em que ordem é que as demandas vão ser processadas. Para a ordenação das demandas são comuns estratégias baseadas no comprimento dos caminhos mais curtos para as demandas ou baseadas na qualidade do caminho. Outras estratégias são possíveis, sem que exista uma que apresente os melhores resultados. Nesta dissertação, o algoritmo foi desenhado para duas estratégias de ordenação das demandas, que será definido pelo utilizador. As demandas podem ser ordenadas de forma descendente ou de forma ascendente em termos de capacidade. Isto é, na forma descendente as

demandas vão ser ordenadas do tipo ODU4, seguido do ODU3, ODU2, ODU1 e por fim ODU0 ou na forma ascendente do tipo ODU0 para ODU4. Em ambas as ordenações, o algoritmo começa por procurar nas matrizes de tráfego da esquerda para a direita, ou seja, do primeiro nó até ao último nó da rede, como nos mostra a figura 3.3.

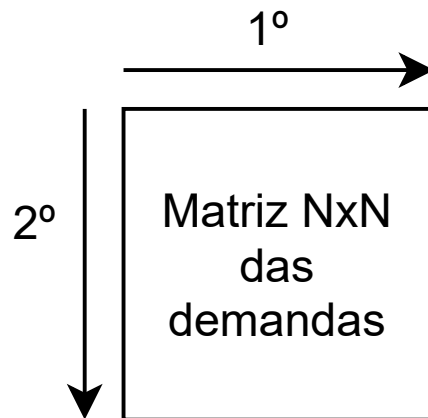


Figura 3.3: Ordem que é seguida na ordenação das demandas.

3.3 Encaminhamento

Encaminhamento é o processo de selecionar na rede um caminho entre um nó origem e um nó destino para a demanda. Nosso algoritmo determina que as demandas serão encaminhadas sempre pelo caminho mais curto possível, dependendo do atual estado da topologia de rede. O algoritmo utilizado para encontrar o caminho mais curto foi o algoritmo de Dijkstra. E duas estratégias foram definidas, das quais o utilizador escolhe uma delas: encontrar o caminho com menos saltos ou encontrar o caminho com a distância mais curta.

O algoritmo de encaminhamento começa por receber uma demanda, procura ao nível da topologia lógica se já existe um caminho com o nó origem e o nó destino da demanda. Se existir o caminho, verifica se o mesmo tem capacidade para encaminhar a demanda. Se o caminho tiver capacidade, a demanda é encaminhada pelo mesmo. Caso o caminho não exista, o algoritmo de Dijkstra através da topologia da rede e da estratégia escolhida pelo utilizador, vai lhe fornecer os caminhos óticos (que podem ser um ou mais) que constituem o caminho mais curto. De seguida, é verificado se já existem esses caminhos óticos e com capacidade suficiente para encaminhar a demanda. Se isso se verificar a demanda é encaminhada por um novo caminho, que é constituído por caminhos óticos já existentes. No caso de não existirem os caminhos óticos ou não terem capacidade, o algoritmo vai verificar se ao nível da topologia física existe capacidade de estabelecer novos caminhos. Se for possível, um novo caminho

composto por novos caminhos óticos são criados e a demanda é encaminhada pelos mesmos. Senão é identificado quais as ligações físicas que não têm capacidade e o algoritmo de Dijkstra é implementado novamente, repetindo-se o processo. O número de máximo de caminhos testados é dado pelo utilizador. Se não for possível estabelecer um novo caminho a demanda é bloqueada.

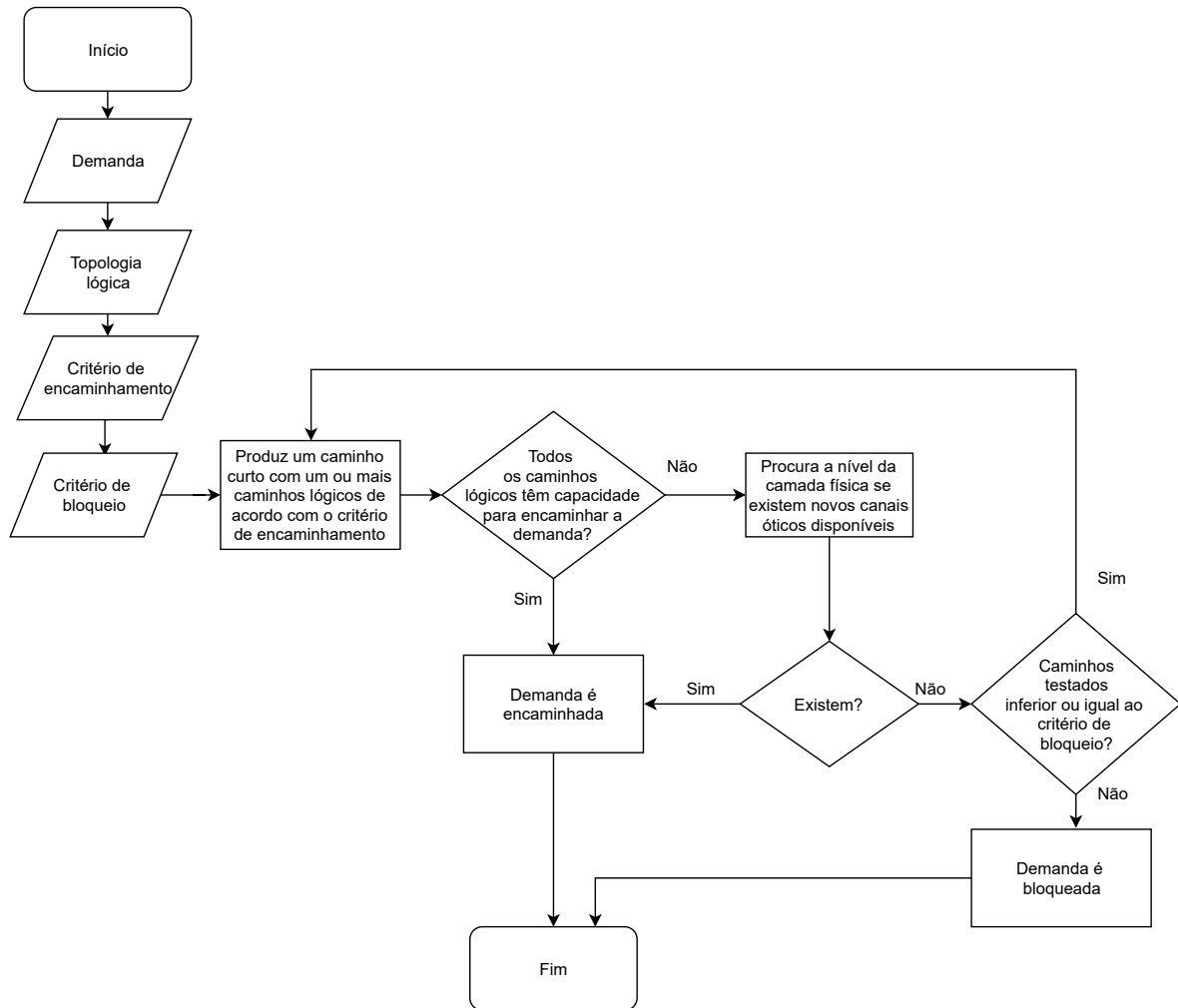


Figura 3.4: Descrição do algoritmo de encaminhamento.

3.4 Atribuição do Comprimento de Onda

Várias heurísticas foram propostas na literatura para a atribuição de comprimento de onda aos caminhos óticos. A heurística adoptada nesta dissertação foi a *first-fit*, pela sua simplicidade. Nesta estratégia todos os comprimentos de onda são numerados. Quando se

procura por um comprimento de onda disponível, é selecionado o primeiro comprimento de onda disponível com o número mais baixo. Na prática esta estratégia é preferida pela sua baixa complexidade e menor tempo computacional, onde não requer necessidade de conhecimento global da rede.

O algoritmo proposto só é possível aplicar ao modo de transporte opaco, visto que não garante continuidade de comprimento de onda.

3.5 Agregação

Agregação é o processo de agregar fluxos de tráfego com bit rate mais baixo em um comprimento de onda com bit rate mais alto. Este processo permite diminuir a percentagem desperdiçada da capacidade do comprimento de onda, fazendo a utilização da rede mais eficiente. No modo de transporte opaco, como são realizadas conversões OEO em todos os nós, a agregação de tráfego é realizada em todos os nós, o que permite uma melhor utilização da capacidade dos canais óticos.

No modelo heurístico proposto, a agregação vai acontecer quando a demanda a ser processada vai procurar por caminhos óticos já estabelecidos anteriormente que tenham capacidade suficiente para a armazenar.

3.6 Conclusões

Neste capítulo foram propostos os algoritmos do modelo heurístico: escalonamento, encaminhamento, atribuição do comprimento de onda e agregação. Para o algoritmo de escalonamento foram definidas duas estratégias para a ordenação das demandas. Para o algoritmo de encaminhamento é considerado o caminho mais curto possível para o encaminhamento da demanda. Para determinar o caminho mais curto é utilizado o algoritmo de Dijkstra e duas estratégias podem ser escolhidas: obter o caminho mais curto em termos de saltos ou em distância entre os nós. Considerando apenas o modo de transporte opaco, os algoritmos propostos não garantem continuidade do comprimento de onda e a agregação é realizada em todos os nós.

Capítulo 4

Implementação NetXPTO

Os algoritmos das heurísticas desenvolvidos nesta dissertação e apresentados no capítulo 3 foram implementados num simulador designado NetXPTO-NetPlanner.

Este capítulo está dividido em cinco secções. Na primeira secção é apresentado o diagrama do sistema completo que foi desenvolvido para implementação dos algoritmos das heurísticas. A segunda secção descreve todos os parâmetros de entrada do sistema que foram estabelecidos e como são introduzidos no sistema através de um ficheiro de texto. A terceira secção detalha a estrutura dos sinais do sistema desenvolvidos e a quarta secção dos blocos do sistema. Por fim, na quarta secção é apresentado o relatório final que é criado automaticamente num outro ficheiro de texto, após execução do sistema.

4.1 Simulador NetXPTO

Este simulador consiste num conjunto de blocos que interagem entre si através de sinais. O simulador é de código livre e encontra-se no site GitHub <https://github.com/netxpto/NetPlanner>. Todos os algoritmos desenvolvidos foram implementados na linguagem de programação C++ no software Microsoft Visual Studio.

4.2 Blocos do Sistema

O simulador NetXPTO-NetPlanner é constituído por blocos e é neles que os algoritmos heurísticos desenvolvidos nesta dissertação foram implementados. O algoritmo de escalonamento no bloco designado Scheduler, os algoritmos de encaminhamento e agregação no bloco designado LogicalTopologyManager e o algoritmo de atribuição do comprimento de onda no bloco designado PhysicalTopologyManager.

4.2.1 Scheduler

O primeiro bloco a ser executado no nosso sistema é o bloco Scheduler. É neste bloco que é implementado o algoritmo de escalonamento proposto no capítulo 3. É responsável pela criação de uma fila ordenada de demandas. É pela ordem que é criada que as demandas vão ser processadas. Tem como parâmetros de entrada as matrizes de tráfego e a ordem pela qual o utilizador definiu que as demandas sejam processadas. Este bloco cria o sinal do tipo DemandRequest, com a informação das demandas, que envia para bloco LogicalTopologyManager.

4.2.2 LogicalTopologyGenerator

O bloco LogicalTopologyGenerator tem como parâmetros de entrada o modo de transporte e a matriz de adjacência da topologia física. É responsável pela criação da matriz de adjacência da topologia lógica, que será enviada através de um sinal do tipo LogicalTopology para o bloco LogicalTopologyManager. Neste trabalho o bloco só foi implementado para o modo de transporte opaco, resultando numa matriz de adjacência lógica igual à matriz de adjacência física. No entanto, o intuito é que o bloco seja aproveitado no futuro para implementação dos modos de transporte transparente e translúcido.

4.2.3 PhysicalTopologyGenerator

O bloco PhysicalTopologyGenerator, como o nome indica, é quem gera a camada física da rede. Tem como parâmetros de entrada a matriz de adjacência da topologia física, a matriz de distâncias entre nós adjacentes, a distância entre amplificadores (em quilómetros), o número de sistemas de transmissão por ligação, o número máximo de canais óticos suportado por cada sistema de transmissão, o valor do comprimento de onda (em nanómetros) inicial que será atribuído ao primeiro caminho ótico estabelecido em cada ligação, o espaçamento para o comprimento de onda seguinte (em nm) e por fim a capacidade de cada canal ótico em ODU0s.

Neste bloco são criadas as ligações físicas da rede, ou seja, as ligações entre nós adjacentes, que podem ser unidirecionais ou bidirecionais de acordo com as matrizes introduzidas pelo utilizador. Para cada ligação é estabelecido quais os valores dos comprimentos de onda disponíveis. Inicialmente todos os comprimentos de onda estão disponíveis. O número de comprimentos de onda é igual ao número de canais óticos que o utilizador definiu que cada ligação suporta. Cada ligação tem também a informação do número de amplificadores necessários. Neste trabalho apenas um sistema de transmissão é suportado por cada ligação. Toda esta informação gerada neste bloco é enviada através de um sinal do tipo PhysicalTopology para o bloco PhysicalTopologyManager que a vai gerir.

4.2.4 LogicalTopologyManager

É neste bloco que as demandas são processadas. As demandas são processadas uma a uma. É feito o encaminhamento, a atribuição do comprimento de onda e a agregação das demandas. Caso não seja possível por falta de capacidade da rede a demanda é bloqueada.

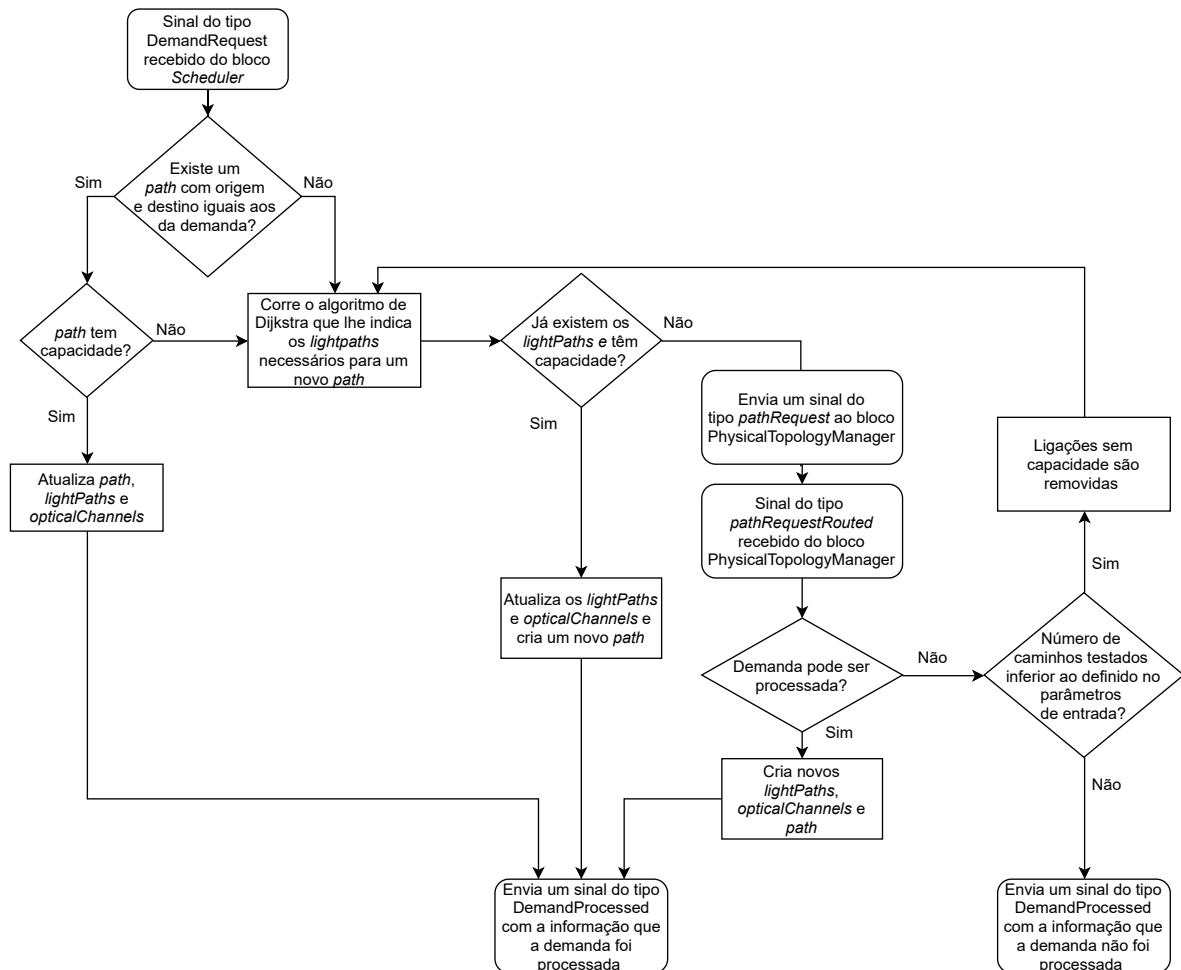


Figura 4.1: Fluxograma do bloco LogicalTopologyManager.

O bloco recebe uma demanda. Verifica se existe um path com nó origem e nó destino iguais aos da demanda com capacidade suficiente para a demanda. Se existir, atualiza o sinal LogicalTopology, ou seja, atualiza a capacidade do path, atualiza a capacidade dos lightPaths e atualiza a capacidade dos opticalChannels. Se não existir o path, o algoritmo de Dijkstra é executado e obtêm-se os lightPaths que constituem o caminho mais curto. É, então, verificado se existem esses lightPaths e com capacidade para transportar a demanda. Se existir, atualiza os lightPaths e os opticalChannels e cria um novo path com capacidade igual à do lightPath com

menor capacidade. Se não existirem, este bloco envia um sinal do tipo *PathRequest* ao bloco *PhysicalTopologyManager* só para os *lightPaths*, que constituem o path, que não existam ou não tenham capacidade.

4.2.5 PhysicalTopologyManager

O bloco *PhysicalTopologyManager* é responsável por gerir a camada física da rede. O bloco verifica se a nível físico existem canais óticos/comprimentos de onda disponíveis para estabelecerem novas ligações. Comunica com o bloco responsável pela camada lógica, o bloco *LogicalTopologyManager*.

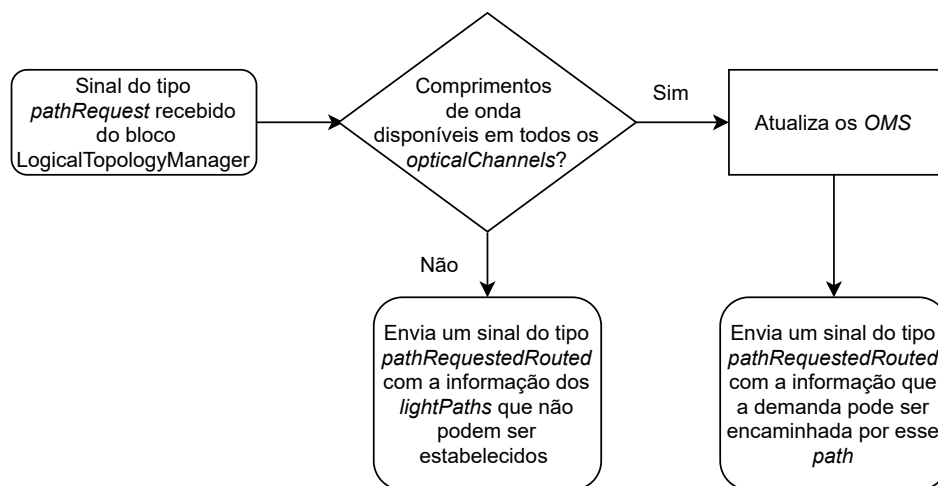


Figura 4.2: Fluxograma do bloco *PhysicalTopologyManager*.

4.3 Diagrama do Sistema

Na figura 4.3 é apresentado o diagrama de alto nível do sistema que foi implementado no simulador NetXPTO. Os parâmetros de entrada do sistema estão representados por paralelogramos, os blocos do sistema por retângulos e os sinais do sistema por linhas de fluxo, com o seu respetivo tipo de sinal identificado por baixo.

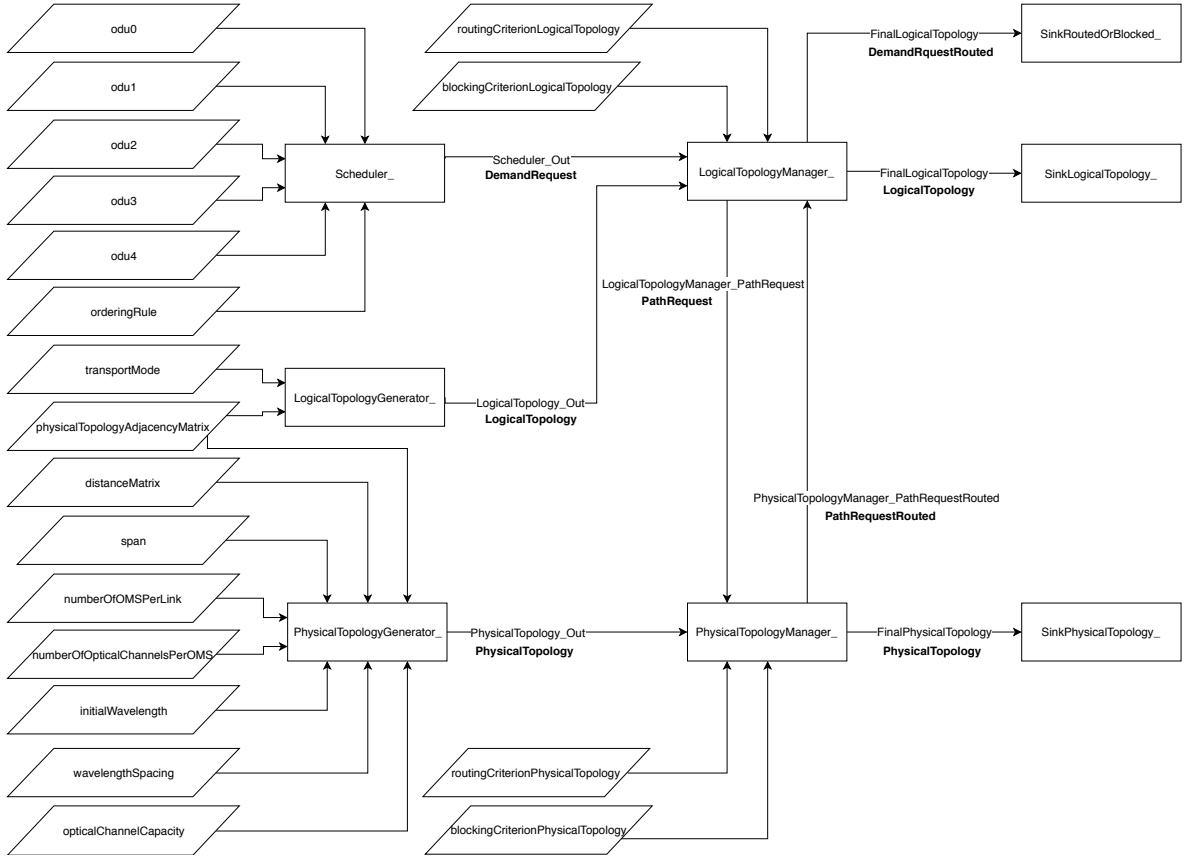


Figura 4.3: Diagrama de alto nível do sistema implementado no simulador NetXPTO-NetPlanner.

4.4 Parâmetros de Entrada do Sistema

Na tabela 4.1 é apresentado todos os parâmetros de entrada do sistema e a sua descrição. É também referido o valor padrão que tomam se os parâmetros de entrada não forem lidos do ficheiro de texto de entrada.

Os algoritmos heurísticos implementados permitem que as demandas sejam processadas de uma forma descendente de capacidade, ou seja, das demandas ODU4 para as ODU0, ou de uma forma ascendente de capacidade, ou seja, das demandas ODU0 para as demandas ODU4. A escolha do caminho que uma demanda toma é sempre o caminho disponível mais curto, determinado pelo algoritmo de Dijkstra, mas o utilizador pode escolher se quer que esse caminho seja obtido pelo número mínimo de saltos, ou seja, o menor número de ligações necessárias, ou que seja obtido através do menor comprimento das ligações entre 2 nós. O utilizador também pode escolher o número máximo de caminhos que são testados até se

encontrar o caminho mais curto. Por outro lado, nesta dissertação os algoritmos apenas implementam o modo de transporte opaco sem sobrevivência e apenas permitem 1 sistema de transmissão por ligação.

| Parâmetro de entrada | Valor padrão | Descrição |
|-----------------------------------|-----------------|--|
| odu0 | [0] | Matriz das demandas ODU0 |
| odu1 | [0] | Matriz das demandas ODU1 |
| odu2 | [0] | Matriz das demandas ODU2 |
| odu3 | [0] | Matriz das demandas ODU3 |
| odu4 | [0] | Matriz das demandas ODU4 |
| orderingRule | descendingOrder | Ordenação das demandas: descendingOrder - ODU4 para ODU0 ascendingOrder - ODU0 para ODU4 |
| transportMode | opaque | Modo de transporte opaco |
| physicalTopologyAdjacencyMatrix | [0] | Matriz adjacência da topologia física |
| distanceMatrix | [0] | Matriz com a distância entre nós adjacentes (km) |
| span | 100 | Comprimento da fibra entre dois amplificadores (km) |
| numberOfOMSPerLink | 1 | Número de sistemas de transmissão por ligação |
| numberOfOpticalChannelsPerOMS | 100 | Número de canais óticos por sistema de transmissão |
| initialWavelength | 1550 | Valor do comprimento de onda inicial (nm) |
| wavelengthSpacing | 0.8 | Espaçamento entre comprimentos de onda (nm) |
| opticalChannelCapacity | 80 | Capacidade de cada canal ótico em ODU0s |
| routingCriterionLogicalTopology | hops | Tipo do Caminho mais curto: hops km |
| blockingCriterionLogicalTopology | 3 | Número máximo de caminhos curtos testados entre um par de nós |
| routingCriterionPhysicalTopology | hops | Tipo do caminho curto: hops km |
| blockingCriterionPhysicalTopology | 3 | Número máximo de caminhos curtos testados entre um par de nós |

Tabela 4.1: Parâmetros de entrada do sistema.

4.4.1 Formato do Ficheiro de Entrada

Os parâmetros de entrada que foram referidos na tabela 4.1 devem ser introduzidos num ficheiro de texto e o seu formato deve seguir as seguintes regras:

- A linha deve começar com o nome do parâmetro de entrada de acordo com a tabela 4.1.
- Segue-se o sinal `=`.
- À frente é colocado o valor do parâmetro de entrada, no caso de se tratar de um número inteiro, de um número real ou de uma string. No caso de se tratar de uma matriz é colocado por baixo do nome do parâmetro respetivo, com os valores da matriz a serem introduzidos linha a linha.
- Se qualquer parâmetro de entrada não for introduzido, ele toma o valor padrão referido na tabela 4.1.
- Caso não sejam introduzidos da forma descrita acima, ou o tipo do valor não corresponder ao parâmetro de entrada, o sistema não é executado, dando informação que ocorreu uma exceção.
- O ficheiro aceita comentários desde que a linha seja iniciada com os caracteres `//`.

Como é apresentado de seguida:

```
// Exemplo de parâmetros de entrada aceites pelo sistema

// Matriz de tráfego ODU0 (matriz NxN)
odu0 =
0 5 1 3 1 3
5 0 0 1 5 0
1 0 0 1 4 1
3 1 1 0 1 1
1 5 4 1 0 3
3 0 1 1 3 0

// Modo de transporte opaco (string)
transportMode = opaque

// Número de canais óticos por ligação (inteiro)
numberOfOpticalChannelsPerOMS = 100

// Espaçamento de comprimentos de onda (real)
wavelengthSpacing = 0.8
```

4.5 Estrutura dos Tipos de Sinais do Sistema

Nesta secção é apresentado em detalhe a estrutura de dados de todos os tipos de sinais do sistema que foram criados. É feita uma descrição dos tipos dos sinais e são referidas as variáveis que o constituem, o seu tipo e que valores podem tomar.

4.5.1 LogicalTopology

O tipo de sinal LogicalTopology é referente à camada lógica da rede. É composto por quatro estruturas de dados. Pela matriz (NxN) logicalTopologyAdjacencyMatrix e pelos vetores path, lightPath e opticalChannel.

logicalTopologyAdjacencyMatrix

Matriz adjacência da topologia lógica da rede. É obtida através da matriz adjacência da topologia física introduzida nos parâmetros de entrada e depende do modo de transporte. Dado que neste trabalho apenas foi implementado o modo de transporte opaco, esta matriz é igual à matriz física da rede e é constituída por 0 quando não existe uma ligação direta entre nós e 1 quando existe essa ligação. O seu tamanho é proporcional ao número de nós da rede.

$$\begin{bmatrix} 0 & 0/1 & \cdots & 0/1 \\ 0/1 & 0 & \cdots & 0/1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0/1 & 0/1 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

path

Caminho constituído pelas ligações pelo qual a demanda é encaminhada desde o nó origem até ao nó destino. É identificado por um índice, é composto por 1 vetor com 1 ou mais lightPaths e a sua capacidade é definida em ODU0s. Capacidade essa que depende da capacidade dos lightPaths que por sua vez dependem da capacidade dos respectivos canais óticos.

| pathIndex | sourceNode | destinationNode | capacity (ODU0s) | numberOfLightPaths | lightPathsIndex |
|-----------|------------|-----------------|---------------------|--------------------|---|
| 0...∞ | 1...N | 1...N | 0...80 | 1...L-1 | [LP ₀ , LP ₁ , ...] |

Tabela 4.2: path

- $N \rightarrow$ Número de nós da rede
- $L \rightarrow$ Número máximo de ligações da rede
- $LP_x \rightarrow$ Índice do lightPath

lightPath

Ligação lógica entre 2 nós adjacentes. Cada lightPath é identificado por um índice. No caso do modo de transporte opaco, a cada lightPath corresponde 1 canal ótico ao nível da camada física. E é a capacidade do canal ótico que determina a capacidade do lightPath, sendo definida em ODU0s.

| lightPathIndex | sourceNode | destinationNode | capacity (ODU0s) | numberOfOpticalChannels | opticalChannelsIndex |
|----------------|------------|-----------------|---------------------|-------------------------|---|
| 0... ∞ | 1...N | 1...N | 0...80 | 1...OC | [OCH ₀ , OCH ₁ , ...] |

Tabela 4.3: lightPath

- $N \rightarrow$ Número de nós da rede
- $OC \rightarrow$ Número máximo de canais óticos por sistema de transmissão
- $OCH_x \rightarrow$ Índice do opticalChannel

opticalChannel

Ligação física entre 2 nós adjacentes. Cada canal ótico é identificado por um índice e a cada um corresponde 1 comprimento de onda expresso em nanómetros (nm). É constituído pelo número de demandas que o atravessam, identificadas num vetor pelos seus índices.

| opticalChannelIndex | sourceNode | destinationNode | wavelength (nm) | capacity (ODU0s) | numberOfDemands | demandsIndex |
|---------------------|------------|-----------------|--------------------|---------------------|-----------------|---|
| 0... ∞ | 1...N | 1...N | W | 0...80 | 1...D | [D ₀ , D ₁ , ...] |

Tabela 4.4: opticalChannel

- $N \rightarrow$ Número de nós da rede
- $W \rightarrow$ Valor do comprimento de onda
- $D \rightarrow$ Número de demandas
- $D_x \rightarrow$ Índice da demanda

4.5.2 PhysicalTopology

O tipo de sinal PhysicalTopology é referente à camada física da rede. É composto por 2 estruturas de dados. Pela matriz (NxN) physicalTopologyAdjacencyMatrix e pela estrutura opticalMultiplexSection.

physicalTopologyAdjacencyMatrix

Matriz adjacência da topologia física da rede. É criada através da matriz adjacência da topologia física introduzida nos parâmetros de entrada. É constituída por 0 quando não existe uma ligação direta entre nós e 1 quando existe essa ligação. O seu tamanho é proporcional ao número de nós da rede.

$$\begin{bmatrix} 0 & 0/1 & \dots & 0/1 \\ 0/1 & 0 & \dots & 0/1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0/1 & 0/1 & & 0 \end{bmatrix}$$

opticalMultiplexSection

Estrutura de dados com todas as ligações físicas. É criada a partir da matriz de adjacência da topologia física da rede. A cada ligação física corresponde um índice. O número máximo de comprimentos de onda é igual ao número de canais óticos por cada ligação. Inicialmente todos os comprimentos de onda estão disponíveis, sendo representados pelo valor 1, e à medida que os canais óticos são utilizados, tomam o valor 0. O número de amplificadores é calculado através da matriz de distância entre nós adjacentes e de acordo com o span definido nos parâmetros de entrada.

| OmsIndex | sourceNode | destinationNode | maximumNumberOfWavelengths | wavelengths | availableWavelengths | numberOfAmplifiers |
|----------|------------|-----------------|----------------------------|---------------------|----------------------|--------------------|
| 0 | 1...N | 1...N | OC | [1550, 1550.8, ...] | [0/1, ...] | 0...∞ |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| L-1 | 1...N | 1...N | OC | [1550 1550.8, ...] | [0/1, ...] | 0...∞ |

Tabela 4.5: opticalMultiplexSection

- $L \rightarrow$ Número total de ligações unidirecionais da rede
- $N \rightarrow$ Número de nós da rede
- $OC \rightarrow$ Número máximo de canais óticos suportados por cada ligação

4.5.3 DemandRequest

O tipo de sinal DemandRequest refere-se a cada demanda de tráfego que vai ser processada. Cada demanda é identificada por um índice. Nesta dissertação não foi utilizado nenhum método de sobrevivência.

| demandIndex | sourceNode | destinationNode | oduType | survivabilityMethod |
|-------------|------------|-----------------|---------|---|
| 0...D-1 | 1...N | 1...N | 0...4 | nenhum proteção 1 + 1 restauração |

Tabela 4.6: DemandRequest

- $D \rightarrow$ Número de demandas
- $N \rightarrow$ Número de nós da rede

4.5.4 PathRequest

Tipo de sinal enviado pelo bloco LogicalTopologyManager ao bloco PhysicalTopologyManager quando necessita de estabelecer um caminho novo, entre um nó origem e um nó destino. O bloco pode necessitar de apenas 1 ligação direta entre 2 nós adjacentes ou de todas as ligações que constituem o caminho. Cada pathRequest é identificado por um índice.

| requestIndex | sourceNode | destinationNode | numberOfIntermediateNodes | intermediateNodes |
|------------------|-------------|-----------------|---------------------------|-------------------|
| $0 \dots \infty$ | $1 \dots N$ | $1 \dots N$ | $0 \dots N-2$ | [1, 2, ...] |

Tabela 4.7: PathRequest

- $N \rightarrow$ Número de nós da rede

4.5.5 PathRequestRouted

O sinal do tipo PathRequestRouted é enviado pelo bloco PhysicalTopologyManager ao bloco LogicalTopologyManager como resposta ao sinal do tipo pathRequest. É constituído pelas estruturas de dados pathInformation e lightPathsTable.

pathInformation

Variável que contém a informação se é possível encaminhar ou não a demanda.

| requestIndex | routed | numberOfLightPaths |
|------------------|---------------|--------------------|
| $0 \dots \infty$ | true ou false | $1 \dots \infty$ |

Tabela 4.8: pathInformation

lightPathsTable

Variável que contém os lightPaths que podem ser estabelecidos. Contém a informação do novo comprimento de onda usado por cada lightPath para transmitir a demanda de tráfego. No caso do modo de transporte opaco, o número de nós intermédios é sempre 0, pois os lightPaths são estabelecidos entre nós adjacentes.

| sourceNode | destinationNode | numberOfIntermediateNodes | intermediateNodes | wavelength |
|------------|-----------------|---------------------------|-------------------|------------|
| 1...N | 1...N | 0...N-2 | [1, 2, ...] | W |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |

Tabela 4.9: lightPathsTable

- $N \rightarrow$ Número de nós da rede
- $W \rightarrow$ Valor do comprimento de onda atribuído ao caminho ótico

4.5.6 DemandRequestRouted

O tipo de sinal DemandRequest informa se as demandas de tráfego foram encaminhadas ou não. Caso tenham sido encaminhadas informa que caminho tomou.

| demandIndex | routed | pathIndex |
|-------------|---------------|-----------|
| 0...D-1 | true ou false | 0...P-1 |

Tabela 4.10: DemandRequestRouted

- $D \rightarrow$ Número total de demandas
- $P \rightarrow$ Número total de caminhos

4.6 Relatório

No final da simulação um ficheiro de texto é criado com o nome FinalReport.txt, no mesmo diretório do projeto. Este contém informação sobre as ligações estabelecidas, como quantos canais óticos e amplificadores foram necessários a cada ligação. Contém também informação sobre a parte elétrica dos nós, como o grau de cada um deles, as portas tributárias e as portas de linha necessárias. Tratando-se apenas do modo de transporte opaco, a parte ótica não existe. Neste relatório está também a informação do CAPEX, que será analisado no capítulo 5.

4.7 Conclusões

Neste capítulo é descrito como os algoritmos heurísticos propostos nesta dissertação e apresentados no capítulo 3 foram implementados no simulador NetXPTO-Netplanner. O simulador é constituído por um conjunto de blocos que interagem entre si através de sinais. Então, foram aqui descritos que blocos e sinais foram desenvolvidos neste trabalho. O intuito é também este capítulo servir como guia para a utilização por outros utilizadores. Assim, foi

apresentado como é feita a introdução dos parâmetros de entrada no sistema e o relatório que é criado pelo simulador com a informação das ligações e dos nós da rede, bem como o custo total da rede. É com base no relatório final que serão apresentados e discutidos no capítulo 5 os resultados obtidos nesta dissertação para o modelo heurístico.

Capítulo 5

Resultados

O propósito deste capítulo é apresentar e analisar os resultados obtidos após o dimensionamento da rede referência e da rede realista NSFNET. Para a rede referência foram obtidos resultados para o modelo ILP, o modelo analítico e para o modelo heurístico. Enquanto que para a rede realista só foram obtidos resultados para o modelo analítico e o modelo heurístico. Para o modelo ILP, não foi possível obter resultados após quatro semanas de simulação. Os resultados para o modelo heurístico foram obtidos através do simulador NetXPTO-NetPlanner, onde foram implementados os algoritmos heurísticos propostos nesta dissertação. Enquanto que, os resultados para o modelo ILP foram obtidos utilizando o software MATLAB com base em [1]. Para o cálculo do CAPEX foi considerando o modelo de custos apresentado na tabela 2.8. Nesta dissertação apenas foram obtidos resultados para o modo de transporte opaco sem sobrevivência.

O capítulo está dividido em duas seções. A primeira seção, 5.1, é referente ao dimensionamento da rede referência, enquanto que a segunda seção, 5.2, é referente ao dimensionamento da rede realista. Ambas as seções iniciam-se com a apresentação dos resultados obtidos para os diferentes modelos e terminam com uma análise comparativa aos mesmos.

5.1 Rede Referência

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos para a rede referência, definida na seção 2.5, para os três cenários de tráfego descritos na seção 2.5.3, utilizando os três modelos: o modelo ILP, o modelo analítico e o modelo heurístico. No final é feita uma análise comparativa entre os resultados obtidos para os diferentes modelos.

5.1.1 Modelo ILP

Nesta secção são apresentados os resultados obtidos para o CAPEX para a rede referência utilizando o modelo ILP desenvolvido em [1]. Os resultados são para os três cenários de tráfego definidos em 2.5.3. Estes resultados serão importantes para posteriormente comparar-mos com os obtidos através do modelo heurístico desenvolvido, como forma de validação.

Tráfego Baixo

Na tabela 5.1 podemos ver os resultados obtidos para o CAPEX para este cenário de tráfego baixo.

| CAPEX | | | | | | |
|---------------------|----------------|-----------------|------------|----------------|-----------|-----------|
| | | | Quantidade | Preço Unitário | Custo | Total |
| Custo das Ligações | OLTs | | 16 | 15 000 € | 240 000 € | 444 000 € |
| | Canais Óticos | | 28 | 5000 € | 140 000 € | |
| | Amplificadores | | 32 | 2000 € | 64 000 € | |
| Custo dos Nós | Parte Elétrica | EXCs | 6 | 10 000 € | 60 000 € | 540 000 € |
| | | Portas ODU0 | 120 | 100 €/Gbit/s | 15 000 € | |
| | | Portas ODU1 | 100 | 100 €/Gbit/s | 25 000 € | |
| | | Portas ODU2 | 32 | 100 €/Gbit/s | 32 000 € | |
| | | Portas ODU3 | 12 | 100 €/Gbit/s | 48 000 € | |
| | | Portas ODU4 | 8 | 100 €/Gbit/s | 80 000 € | |
| | | Portas de Linha | 28 | 100 €/Gbit/s | 280 000 € | |
| | Parte Ótica | OXCs | 0 | 20 000 € | 0 € | |
| | | Portas OXC | 0 | 2 500 € | 0 € | |
| Custo Total da Rede | | | | | | 984 000 € |

Tabela 5.1: Tabela com a informação detalhada para o CAPEX para o cenário de tráfego baixo utilizando o modelo ILP.

Tráfego Médio

Na tabela 5.2 podemos ver os resultados obtidos para o CAPEX para este cenário de tráfego médio.

| CAPEX | | | | | | |
|---------------------|----------------|-----------------|------------|----------------|-------------|-------------|
| | | | Quantidade | Preço Unitário | Custo | Total |
| Custo das Ligações | OLTs | | 16 | 15 000 € | 240 000 € | 934 000 € |
| | Canais Óticos | | 126 | 5000 € | 630 000 € | |
| | Amplificadores | | 32 | 2000 € | 64 000 € | |
| Custo dos Nós | Parte Elétrica | EXCs | 6 | 10 000 € | 60 000 € | 2 320 000 € |
| | | Portas ODU0 | 600 | 100 €/Gbit/s | 75 000 € | |
| | | Portas ODU1 | 500 | 100 €/Gbit/s | 125 000 € | |
| | | Portas ODU2 | 160 | 100 €/Gbit/s | 160 000 € | |
| | | Portas ODU3 | 60 | 100 €/Gbit/s | 240 000 € | |
| | | Portas ODU4 | 40 | 100 €/Gbit/s | 400 000 € | |
| | | Portas de Linha | 126 | 100 €/Gbit/s | 1 260 000 € | |
| | Parte Ótica | OXCs | 0 | 20 000 € | 0 € | |
| | | Portas OXC | 0 | 2 500 € | 0 € | |
| Custo Total da Rede | | | | | | 3 254 000 € |

Tabela 5.2: Tabela com a informação detalhada para o CAPEX para o cenário de tráfego médio utilizando o modelo ILP.

Tráfego Elevado

Na tabela 5.3 podemos ver os resultados obtidos para o CAPEX para este cenário de tráfego elevado.

| CAPEX | | | | | | |
|---------------------|----------------|-----------------|------------|----------------|-------------|-------------|
| | | | Quantidade | Preço Unitário | Custo | Total |
| Custo das Ligações | OLTs | | 16 | 15 000 € | 240 000 € | 1 524 000 € |
| | Canais Óticos | | 244 | 5000 € | 1 220 000 € | |
| | Amplificadores | | 32 | 2000 € | 64 000 € | |
| Custo dos Nós | Parte Elétrica | EXCs | 6 | 10 000 € | 60 000 € | 4 500 000 € |
| | | Portas ODU0 | 1200 | 100 €/Gbit/s | 150 000 € | |
| | | Portas ODU1 | 1000 | 100 €/Gbit/s | 250 000 € | |
| | | Portas ODU2 | 320 | 100 €/Gbit/s | 320 000 € | |
| | | Portas ODU3 | 120 | 100 €/Gbit/s | 480 000 € | |
| | | Portas ODU4 | 80 | 100 €/Gbit/s | 800 000 € | |
| | | Portas de Linha | 244 | 100 €/Gbit/s | 2 440 000 € | |
| | Parte Ótica | OXCs | 0 | 20 000 € | 0 € | |
| | | Portas OXC | 0 | 2 500 € | 0 € | |
| Custo Total da Rede | | | | | | 6 024 000 € |

Tabela 5.3: Tabela com a informação detalhada para o CAPEX para o cenário de tráfego elevado utilizando o modelo ILP.

5.1.2 Modelo Analítico

Para este modelo, para o cálculo do valor do CAPEX foram utilizadas as equações que foram apresentadas na secção 2.3 substituindo com os valores médios obtidos através das equações apresentadas na secção 2.4.2. Para o modo de transporte opaco sem sobrevivência o coeficiente de sobrevivência $\langle k \rangle$ é 0 e vamos assumir que o coeficiente de agregação ξ é 1 para todos os cenários de tráfego.

Tráfego Baixo

Usando a equação 2.10, o número de demandas é:

$$D = \frac{1}{2} \times (1 + 1) \times \left(\frac{2000}{100}\right) \quad D = 20$$

Substituindo na equação 2.9, o número médio de canais óticos é:

$$\langle w \rangle = \left(\frac{20 \times 1.533}{16}\right) \times (1 + 0) \quad \langle w \rangle = 1.916$$

Usando a equação 2.3, o número de amplificadores total é:

$$N^R = \left(\frac{350}{100} - 1\right) + \left(\frac{150}{100} - 1\right) + \left(\frac{350}{100} - 1\right) + \left(\frac{150}{100} - 1\right) + \left(\frac{250}{100} - 1\right) + \left(\frac{50}{100} - 1\right) + \left(\frac{150}{100} - 1\right) + \left(\frac{550}{100} - 1\right)$$

$$N^R = 16$$

Finalmente, substituindo todos estes valores na equação 2.2, o custo das ligações é:

$$C_L = (2 \times 8 \times 15000) + (2 \times 8 \times 5000 \times 1.916) + (2 \times 16 \times 2000) = 457\,280 \text{ €}$$

Em relação ao custo dos nós, primeiro é calculado o número médio de demandas, através da equação 2.12:

$$\langle d \rangle = \frac{20}{6} \quad \langle d \rangle = 3.333$$

Substituindo na equação 2.11, o número médio de portas no comutador elétrico é:

$$\langle P_{exc} \rangle = 3.333 \times 1.533 \times (1 + 0) \quad \langle P_{exc} \rangle = 5.1095$$

Finalmente, substituindo todos os valores na equação 2.6, o custo dos nós é:

$$C_N = (6 \times (10000 + (100 \times 100 \times 5.1095)) + (100 \times 1.25 \times 120) + (100 \times 2.5 \times 100) + (100 \times 10 \times 32) + (100 \times 40 \times 12) + (100 \times 100 \times 8))$$

$$C_N = 366\,570 + 200\,000 = 566\,570 \text{ €}$$

Por fim, somando o custo das ligações com o custo dos nós, o valor do CAPEX para o cenário de tráfego baixo é:

$$CAPEX = 457\,280 + 566\,570 \quad CAPEX = 1\,023\,850 \text{ €}$$

Tráfego Médio

Usando a equação 2.10, o número de demandas é:

$$D = \frac{1}{2} \times (1 + 1) \times \left(\frac{10000}{100}\right) \quad D = 100$$

Substituindo na equação 2.9, o número médio de canais óticos é:

$$< w > = \left(\frac{100 \times 1.533}{16}\right) \times (1 + 0) \quad < w > = 9.581$$

Usando a equação 2.3, o número de amplificadores total é:

$$N^R = \left(\frac{350}{100} - 1\right) + \left(\frac{150}{100} - 1\right) + \left(\frac{350}{100} - 1\right) + \left(\frac{150}{100} - 1\right) + \left(\frac{250}{100} - 1\right) + \left(\frac{50}{100} - 1\right) + \left(\frac{150}{100} - 1\right) + \left(\frac{550}{100} - 1\right)$$

$$N^R = 16$$

Finalmente, substituindo todos estes valores na equação 2.2, o custo das ligações é:

$$C_L = (2 \times 8 \times 15000) + (2 \times 8 \times 5000 \times 9.581) + (2 \times 16 \times 2000) = 1\,070\,480 \text{ €}$$

Em relação ao custo dos nós, primeiro é calculado o número médio de demandas, através da equação 2.12:

$$< d > = \frac{100}{6} \quad < d > = 16.6667$$

Substituindo na equação 2.11, o número médio de portas no comutador elétrico é:

$$< P_{exc} > = 16.6667 \times 1.533 \qquad < P_{exc} > = 25.5501$$

Finalmente, substituindo todos os valores na equação 2.6, o custo dos nós é:

$$C_N = (6 \times (10000 + (100 \times 100 \times 22.5501)) + (100 \times 1.25 \times 600) + (100 \times 2.5 \times 500) + (100 \times 10 \times 160) + (100 \times 40 \times 60) + (100 \times 100 \times 40))$$

$$C_N = 1\,539\,006 + 1\,000\,000 = 2\,539\,006 \text{ €}$$

Por fim, somando o custo das ligações com o custo dos nós, o valor do CAPEX para o cenário de tráfego médio é:

$$CAPEX = 1\,070\,480 + 2\,539\,006 \qquad CAPEX = 3\,609\,486 \text{ €}$$

Tráfego Elevado

Usando a equação 2.10, o número de demandas é:

$$D = \frac{1}{2} \times (1 + 1) \times \left(\frac{20000}{100}\right) \qquad D = 200$$

Substituindo na equação 2.9, o número médio de canais óticos é:

$$< w > = \left(\frac{200 \times 1.533}{16}\right) \times (1 + 0) \qquad < w > = 19.1625$$

Usando a equação 2.3, o número de amplificadores total é:

$$N^R = \left(\frac{350}{100} - 1\right) + \left(\frac{150}{100} - 1\right) + \left(\frac{350}{100} - 1\right) + \left(\frac{150}{100} - 1\right) + \left(\frac{250}{100} - 1\right) + \left(\frac{50}{100} - 1\right) + \left(\frac{150}{100} - 1\right) + \left(\frac{550}{100} - 1\right)$$

$$N^R = 16$$

Finalmente, substituindo todos estes valores na equação 2.2, o custo das ligações é:

$$C_L = (2 \times 8 \times 15000) + (2 \times 8 \times 5000 \times 19.1625) + (2 \times 16 \times 2000) = 1\,837\,000 \text{ €}$$

Em relação ao custo dos nós, primeiro é calculado o número médio de demandas, através da equação 2.12:

$$\langle d \rangle = \frac{200}{6} \qquad \langle d \rangle = 33.3333$$

Substituindo na equação 2.11, o número médio de portas no comutador elétrico é:

$$\langle P_{exc} \rangle = 33.3333 \times 1.533 \qquad \langle P_{exc} \rangle = 51.0999$$

Finalmente, substituindo todos os valores na equação 2.6, o custo dos nós é:

$$C_N = (6 \times (10000 + (100 \times 100 \times 51.0999)) + (100 \times 1.25 \times 1200) + (100 \times 2.5 \times 1000) + (100 \times 10 \times 320) + (100 \times 40 \times 120) + (100 \times 100 \times 80))$$

$$C_N = 3\,125\,994 + 2\,000\,000 = 5\,125\,994 \text{ €}$$

Por fim, somando o custo das ligações com o custo dos nós, o valor do CAPEX para o cenário de tráfego baixo é:

$$CAPEX = 1\,837\,000 + 5\,125\,994 \qquad CAPEX = 6\,962\,994 \text{ €}$$

5.1.3 Modelo Heurístico

Secção com os resultados obtidos após dimensionamento da rede referência utilizando o modelo heurístico desenvolvido nesta dissertação implementado no simulador NetXPTPO-NetPlanner e considerando o modo de transporte opaco sem sobrevivência. Para os valores dos parâmetros de entrada foram utilizados os valores padrão apresentados na tabela 4.1, com exceção das matrizes das demandas, da matriz adjacência da topologia física e da matriz com a distância entre os nós adjacentes. As matrizes das demandas utilizadas foram as apresentadas em 2.5.3 e as matrizes adjacência da topologia física e distância entre nós adjacentes utilizadas foram as apresentadas em 2.5.1.

Tráfego Baixo

Após o dimensionamento, para este cenário de tráfego, temos como resultado a topologia física da figura 5.1 e a topologia ótica da figura 5.2. Pode-se observar que todas as ligações físicas foram utilizadas para este cenário.

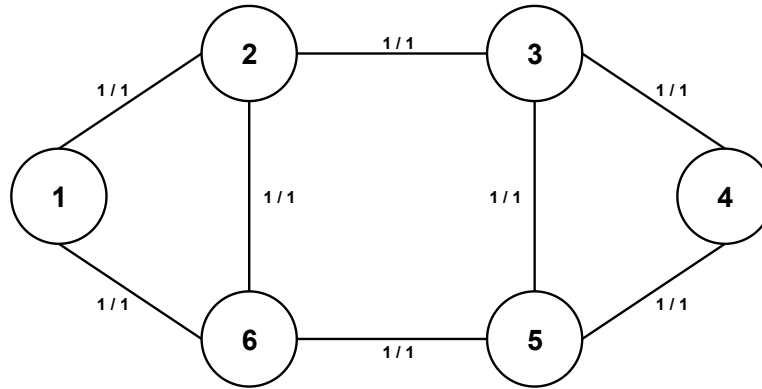


Figura 5.1: Topologia física da rede referencial para o cenário de tráfego baixo após o dimensionamento utilizando o modelo heurístico.

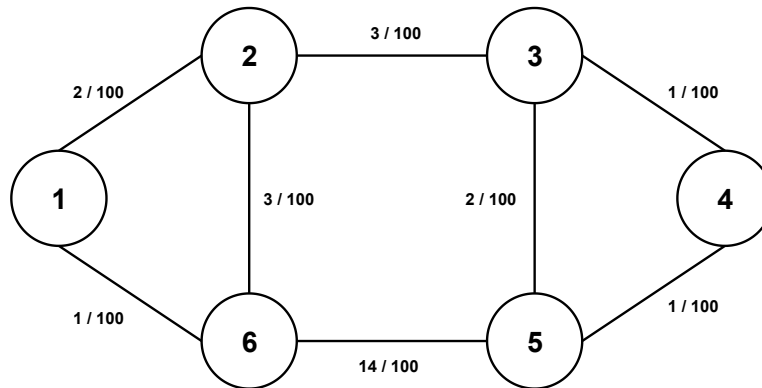


Figura 5.2: Topologia ótica da rede referencial para o cenário de tráfego baixo após o dimensionamento utilizando o modelo heurístico.

Na tabela 5.4 podemos ver a informação sobre as ligações que constituem a rede referencial após o dimensionamento. O número de amplificadores necessários para cada ligação foi calculado usando a equação 2.3.

| Informação sobre as ligações | | |
|------------------------------|---------------|----------------|
| Ligação bidireccional | Canais óticos | Amplificadores |
| Nó 1 <->Nó 2 | 2 | 3 |
| Nó 1 <->Nó 6 | 1 | 1 |
| Nó 2 <->Nó 3 | 3 | 3 |
| Nó 2 <->Nó 6 | 3 | 1 |
| Nó 3 <->Nó 4 | 1 | 2 |
| Nó 3 <->Nó 5 | 2 | 0 |
| Nó 4 <->Nó 5 | 1 | 1 |
| Nó 5 <->Nó 6 | 3 | 5 |

Tabela 5.4: Tabela com a informação sobre as ligações da rede referência para o cenário de tráfego baixo após o dimensionamento utilizando o modelo heurístico.

Na tabela 5.5 podemos ver a informação sobre os nós que constituem a rede referência após o dimensionamento. O número de portas tributárias foi calculado através da equação 2.8 e o número de portas de linha de longo alcance foi calculado através da equação 2.7.

| Informação sobre os nós | | | |
|-------------------------|------------|--------------------|-----------------|
| Nó | Grau do nó | Portas tributárias | Portas de linha |
| 1 | 2 | 58 | 3 |
| 2 | 3 | 46 | 8 |
| 3 | 3 | 36 | 6 |
| 4 | 2 | 40 | 2 |
| 5 | 3 | 48 | 6 |
| 6 | 3 | 44 | 7 |

Tabela 5.5: Tabela com a informação sobre os nós da rede referência para o cenário de tráfego baixo após o dimensionamento utilizando o modelo heurístico.

E finalmente, na tabela 5.6 podemos ver os resultados obtidos para o CAPEX para este cenário de tráfego baixo.

| CAPEX | | | | | | |
|---------------------|----------------|--------------|------------|----------------|-----------|-------------|
| | | | Quantidade | Preço Unitário | Custo | Total |
| Custo das Ligações | OLTs | | 16 | 15 000 € | 240 000 € | 464 000 € |
| | Canais Óticos | | 32 | 5000 € | 160 000 € | |
| | Amplificadores | | 32 | 2000 € | 64 000 € | |
| Custo dos Nós | Parte Elétrica | EXCs | 6 | 10 000 € | 60 000 € | 580 000 € |
| | | Portas ODU0 | 120 | 100 €/Gbit/s | 15 000 € | |
| | | Portas ODU1 | 100 | 100 €/Gbit/s | 25 000 € | |
| | | Portas ODU2 | 32 | 100 €/Gbit/s | 32 000 € | |
| | | Portas ODU3 | 12 | 100 €/Gbit/s | 48 000 € | |
| | | Portas ODU4 | 8 | 100 €/Gbit/s | 80 000 € | |
| | | Transponders | 32 | 100 €/Gbit/s | 320 000 € | |
| | Parte Ótica | OXCs | 0 | 20 000 € | 0 € | |
| | | Portas OXC | 0 | 2 500 € | 0 € | |
| Custo Total da Rede | | | | | | 1 044 000 € |

Tabela 5.6: Tabela com a informação detalhada para o CAPEX para o cenário de tráfego baixo utilizando o modelo heurístico.

Tráfego Médio

Após o dimensionamento, para este cenário de tráfego, temos como resultado a topologia física da figura 5.3 e a topologia ótica da figura 5.4. Pode-se observar que todas as ligações físicas foram utilizadas para este cenário.

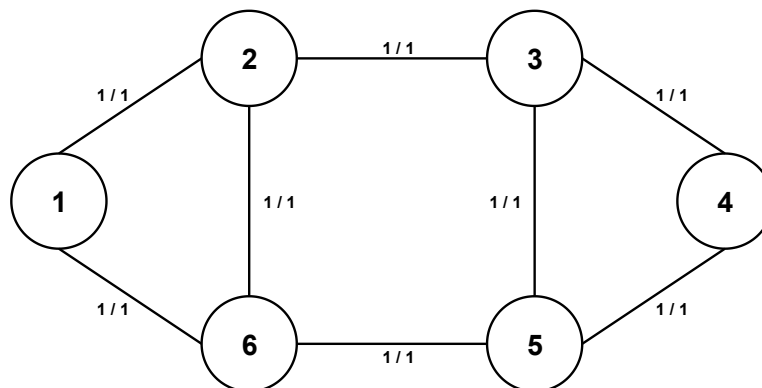


Figura 5.3: Topologia física da rede referencial para o cenário de tráfego médio após o dimensionamento utilizando o modelo heurístico.

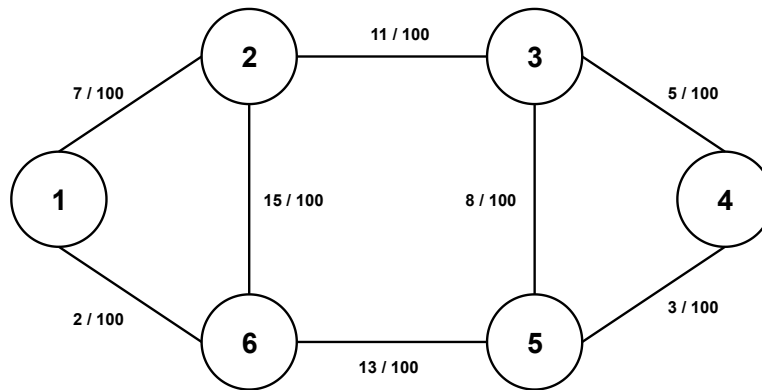


Figura 5.4: Topologia ótica da rede referêncica para o cenário de tráfego médio após o dimensionamento utilizando o modelo heurístico.

Na tabela 5.7 podemos ver a informação sobre as ligações que constituem a rede referêncica após o dimensionamento. O número de amplificadores necessários para cada ligação foi calculado usando a equação 2.3.

| Informação sobre as ligações | | |
|------------------------------|---------------|----------------|
| Ligação bidireccional | Canais óticos | Amplificadores |
| Nó 1 <-> Nó 2 | 7 | 3 |
| Nó 1 <-> Nó 6 | 2 | 1 |
| Nó 2 <-> Nó 3 | 11 | 3 |
| Nó 2 <-> Nó 6 | 15 | 1 |
| Nó 3 <-> Nó 4 | 5 | 2 |
| Nó 3 <-> Nó 5 | 8 | 0 |
| Nó 4 <-> Nó 5 | 3 | 1 |
| Nó 5 <-> Nó 6 | 13 | 5 |

Tabela 5.7: Tabela com a informação sobre as ligações da rede referêncica para o cenário de tráfego médio após o dimensionamento utilizando o modelo heurístico.

Na tabela 5.8 podemos ver a informação sobre os nós que constituem a rede referêncica após o dimensionamento. O número de portas tributárias foi calculado através da equação 2.8 e o número de portas de linha de longo alcance foi calculado através da equação 2.7.

| Informação sobre os nós | | | |
|-------------------------|------------|--------------------|-----------------|
| Nó | Grau do nó | Portas tributárias | Portas de linha |
| 1 | 2 | 290 | 9 |
| 2 | 3 | 230 | 33 |
| 3 | 3 | 180 | 24 |
| 4 | 2 | 200 | 8 |
| 5 | 3 | 240 | 24 |
| 6 | 3 | 220 | 30 |

Tabela 5.8: Tabela com a informação sobre os nós da rede referência para o cenário de tráfego médio após o dimensionamento utilizando o modelo heurístico.

E finalmente, na tabela 5.9 podemos ver os resultados obtidos para o CAPEX para este cenário de tráfego médio.

| CAPEX | | | | | | |
|---------------------|----------------|-------------|----------------|--------------|-------------|-----|
| | | Quantidade | Preço Unitário | Custo | Total | |
| Custo das Ligações | OLTs | | 16 | 15 000 € | 944 000 € | |
| | Canais Óticos | | 128 | 5000 € | | |
| | Amplificadores | | 32 | 2000 € | | |
| Custo dos Nós | Parte Elétrica | EXCs | 6 | 10 000 € | 2 340 000 € | |
| | | Portas ODU0 | 600 | 100 €/Gbit/s | | |
| | | Portas ODU1 | 500 | 100 €/Gbit/s | | |
| | | Portas ODU2 | 160 | 100 €/Gbit/s | | |
| | | Portas ODU3 | 60 | 100 €/Gbit/s | | |
| | | Portas ODU4 | 40 | 100 €/Gbit/s | | |
| | Transponders | 128 | 100 €/Gbit/s | 1 280 000 € | | |
| | Parte Ótica | OXCs | 0 | 20 000 € | | 0 € |
| | | Portas OXC | 0 | 2 500 € | | 0 € |
| Custo Total da Rede | | | | | 3 284 000 € | |

Tabela 5.9: Tabela com a informação detalhada para o CAPEX para o cenário de tráfego médio utilizando o modelo heurístico.

Tráfego Elevado

Após o dimensionamento, para este cenário de tráfego, temos como resultado a topologia física da figura 5.5 e a topologia ótica da figura 5.6. Pode-se observar que todas as ligações físicas foram utilizadas para este cenário.

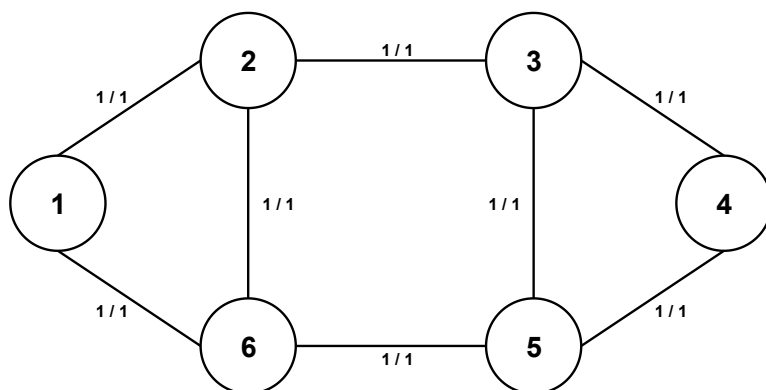


Figura 5.5: Topologia física da rede referêcia para o cenário de tráfego elevado após o dimensionamento utilizando o modelo heurístico.

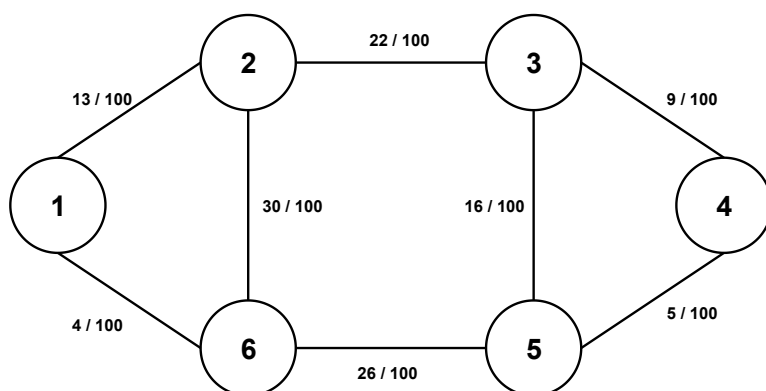


Figura 5.6: Topologia ótica da rede referêcia para o cenário de tráfego elevado após o dimensionamento utilizando o modelo heurístico.

Na tabela 5.10 podemos ver a informação sobre as ligações que constituem a rede referêcia após o dimensionamento. O número de amplificadores necessários para cada ligação foi calculado usando a equação 2.3.

| Informação sobre as ligações | | |
|------------------------------|---------------|----------------|
| Ligação bidireccional | Canais óticos | Amplificadores |
| Nó 1 <->Nó 2 | 13 | 3 |
| Nó 1 <->Nó 6 | 4 | 1 |
| Nó 2 <->Nó 3 | 22 | 3 |
| Nó 2 <->Nó 6 | 30 | 1 |
| Nó 3 <->Nó 4 | 9 | 2 |
| Nó 3 <->Nó 5 | 16 | 0 |
| Nó 4 <->Nó 5 | 5 | 1 |
| Nó 5 <->Nó 6 | 26 | 5 |

Tabela 5.10: Tabela com a informação sobre as ligações da rede referência para o cenário de tráfego elevado após o dimensionamento utilizando o modelo heurístico.

Na tabela 5.11 podemos ver a informação sobre os nós que constituem a rede referência após o dimensionamento. O número de portas tributárias foi calculado através da equação 2.8 e o número de portas de linha de longo alcance foi calculado através da equação 2.7.

| Informação sobre os nós | | | |
|-------------------------|------------|--------------------|-----------------|
| Nó | Grau do nó | Portas tributárias | Portas de linha |
| 1 | 2 | 580 | 17 |
| 2 | 3 | 460 | 65 |
| 3 | 3 | 360 | 47 |
| 4 | 2 | 400 | 14 |
| 5 | 3 | 480 | 47 |
| 6 | 3 | 440 | 60 |

Tabela 5.11: Tabela com a informação sobre os nós da rede referência para o cenário de tráfego elevado após o dimensionamento utilizando o modelo heurístico.

E finalmente, na tabela 5.12 podemos ver os resultados obtidos para o CAPEX para este cenário de tráfego elevado.

| CAPEX | | | | | | |
|---------------------|----------------|--------------|------------|----------------|-------------|-------------|
| | | | Quantidade | Preço Unitário | Custo | Total |
| Custo das Ligações | OLTs | | 16 | 15 000 € | 240 000 € | 1 554 000 € |
| | Canais Óticos | | 250 | 5000 € | 1 250 000 € | |
| | Amplificadores | | 32 | 2000 € | 64 000 € | |
| Custo dos Nós | Parte Elétrica | EXCs | 6 | 10 000 € | 60 000 € | 4 560 000 € |
| | | Portas ODU0 | 1200 | 100 €/Gbit/s | 15 000 € | |
| | | Portas ODU1 | 1000 | 100 €/Gbit/s | 25 000 € | |
| | | Portas ODU2 | 320 | 100 €/Gbit/s | 32 000 € | |
| | | Portas ODU3 | 120 | 100 €/Gbit/s | 48 000 € | |
| | | Portas ODU4 | 80 | 100 €/Gbit/s | 80 000 € | |
| | | Transponders | 250 | 100 €/Gbit/s | 2 500 000 € | |
| | Parte Ótica | OXCs | 0 | 20 000 € | 0 € | |
| | | Portas OXC | 0 | 2 500 € | 0 € | |
| Custo Total da Rede | | | | | | 6 114 000 € |

Tabela 5.12: Tabela com a informação detalhada para o CAPEX para o cenário de tráfego elevado utilizando o modelo heurístico.

5.1.4 Análise Comparativa

Após a apresentação dos resultados para o CAPEX da rede referência nas secções anteriores para os diferentes modelos de dimensionamento, vamos agora fazer uma análise aos mesmos. Para isso, foi criada a tabela 5.13. De forma a validar os resultados do modelo heurístico desenvolvido nesta dissertação, primeiro são apresentados os resultados para o modelo heurístico e depois os resultados do modelo ILP e do modelo analítico, mostrando a percentagem de diferença do valor dos custos destes últimos modelos para o modelo heurístico.

| | | Heurísticas | Modelo Analítico | Modelo ILP |
|-----------------|----------------|-------------|----------------------|---------------------|
| Tráfego Baixo | Custo Ligações | 464 000 € | 457 280 € (-1,4%) | 444 000 € (-4,3%) |
| | Custo Nós | 580 000 € | 566 570 € (-2,3%) | 540 000 € (-6,7%) |
| | CAPEX | 1 044 000 € | 1 023 850 € (-1,9%) | 984 000 € (-5,7%) |
| Tráfego Médio | Custo Ligações | 944 000 € | 1 070 480 € (+13,4%) | 934 000 € (-1,1%) |
| | Custo Nós | 2 340 000 € | 2 539 006 € (+8,5%) | 2 320 000 € (-0,9%) |
| | CAPEX | 3 284 000 € | 3 609 486 € (+9,9%) | 3 254 000 € (-0,9%) |
| Tráfego Elevado | Custo Ligações | 1 554 000 € | 1 837 000 € (+18,2%) | 1 524 000 € (-1,9%) |
| | Custo Nós | 4 560 000 € | 5 125 994 € (+12,4%) | 4 500 000 € (-1,3%) |
| | CAPEX | 6 114 000 € | 6 962 994 € (+13,9%) | 6 024 000 € (-1,5%) |

Tabela 5.13: Comparação dos valores do CAPEX entre os diferentes modelos para os diferentes cenários de tráfego.

Através da tabela acima, comparando os resultados do modelo heurístico com o modelo analítico, para o cenário de tráfego baixo os resultados do CAPEX são um pouco piores, mas com o aumento do tráfego tornam-se bem melhores. Dado que o modelo analítico utiliza valores médios é natural que os resultados sejam mais baixos ou mais altos que o modelo heurístico, ainda para mais quando inicialmente se definiu um valor para o coeficiente de agregação igual para todos os cenários de tráfego.

Comparando os resultados do modelo heurístico com o modelo ILP, podemos verificar que em todos os três cenários os resultados para o CAPEX obtidos através do modelo heurístico são mais altos, ou seja piores, que os resultados obtidos através do modelo ILP. Como esperado, dado que com o modelo ILP obtemos sempre a solução ótima e com o modelo heurístico obtemos uma solução aproximada. A maior diferença dos valores do CAPEX entre o modelo heurístico e o modelo ILP verifica-se no cenário de tráfego baixo (5,7%), mas com o aumento do tráfego a maior diferença é de 1,5%. Tendo em conta a proximidade destes valores e sabendo que através do modelo ILP obtemos valores ótimos, é possível concluir que obteve-se a validação dos modelos heurísticos desenvolvidos nesta dissertação.

Análise Tecno-Económica

Após a validação do modelo heurístico através da comparação dos resultados do CAPEX para os diferentes cenários de tráfego usando os diferentes modelos, podemos agora analisar os resultados obtidos para este modelo. A tabela 5.14 apresenta vários importantes valores para uma melhor análise aos resultados do CAPEX nos diferentes cenários de tráfego.

| | Tráfego Baixo | Tráfego Médio | Tráfego Elevado |
|---|---------------|---------------|-----------------|
| Tráfego Bidirecional (Gbit/s) | 1 000 | 5 000 | 10 000 |
| Número de Ligações Bidirecionais usadas | 8 | 8 | 8 |
| Número de Amplificadores Bidirecionais | 16 | 16 | 16 |
| Número de Portas de Linha | 32 | 128 | 250 |
| Número de Portas Tributárias | 272 | 1 360 | 2 720 |
| Número de Transceivers | 32 | 128 | 250 |
| Custo das Ligações | 464 000 € | 944 000 € | 1 554 000 € |
| Custo dos Nós | 580 000 € | 2 340 000 € | 4 560 000 € |
| CAPEX | 1 044 000 € | 3 284 000 € | 6 114 000 € |
| CAPEX/Gbit/s | 1 044 € | 657 € | 611 € |

Tabela 5.14: Comparação dos valores do CAPEX para o modelo heurístico entre os diferentes cenários de tráfego.

Através da tabela 5.14 podemos fazer algumas conclusões para os diferentes cenários de

tráfego:

- Em todos os cenários de tráfego foram utilizadas todas as ligações bidirecionais da rede.
- Devido ao ponto anterior, todos os cenários de tráfego necessitam do mesmo número de amplificadores.
- Em relação aos custos, podemos verificar que o custo por bit é muito maior no cenário de tráfego baixo do que nos cenários de tráfego médio ou elevado.
- Comparando o custo por bit do cenário de tráfego médio com o cenário de tráfego elevado, verifica-se um custo próximo, mas com vantagem para o tráfego elevado.
- Analisando os dois pontos anteriores, conclui-se que com o aumento do tráfego, o custo por bit diminui. Isto deve-se ao facto de quanto maior é o tráfego mais eficientemente a agregação do tráfego é realizada, minimizando o desperdício de largura de banda. Outro factor é que, e como pode ser visto pelos primeiros dois pontos enunciados, o mesmo número de recursos é necessário para os diferentes cenários de tráfego, fazendo do cenário de tráfego mais baixo um cenário mais caro que os outros.

5.2 Rede Realista

Nesta secção são apresentados os resultados obtidos após o dimensionamento da rede realista NSFNET, definida em 2.6, para o cenário de tráfego bidirecional de 5 Tbit/s considerado em 2.6.3. Inicialmente são apresentados os resultados obtidos para o modelo analítico e depois para o modelo heurístico. No final é feita uma análise comparativa entre os resultados obtidos para os diferentes modelos.

5.2.1 Modelo Analítico

Para este modelo, para o cálculo do valor do CAPEX foram utilizadas as equações que foram apresentadas na secção 2.3 substituindo com os valores médios obtidos através das equações apresentadas na secção 2.4.2. Para o modo de transporte opaco sem sobrevivência o coeficiente de sobrevivência $\langle k \rangle$ é 0 e vamos assumir que o coeficiente de agregação ξ é 1.

Usando a equação 2.10, o número de demandas é:

$$D = \frac{1}{2} \times (1 + 1) \times \left(\frac{10000}{100}\right) \quad D = 100$$

Substituindo na equação 2.9, o número médio de canais óticos é:

$$\langle w \rangle = \left(\frac{100 \times 2.14}{42}\right) \times (1 + 0) \quad \langle w \rangle = 5.0952$$

Usando a equação 2.3, o número de amplificadores total é:

$$N^R = \left(\frac{1100}{100} - 1\right) + \left(\frac{1600}{100} - 1\right) + \left(\frac{2800}{100} - 1\right) + \left(\frac{600}{100} - 1\right) + \left(\frac{1000}{100} - 1\right) + \left(\frac{2000}{100} - 1\right) + \left(\frac{600}{100} - 1\right) + \left(\frac{2400}{100} - 1\right) + \left(\frac{1100}{100} - 1\right) + \left(\frac{800}{100} - 1\right) + \left(\frac{1200}{100} - 1\right) + \left(\frac{2000}{100} - 1\right) + \left(\frac{700}{100} - 1\right) + \left(\frac{700}{100} - 1\right) + \left(\frac{900}{100} - 1\right) + \left(\frac{500}{100} - 1\right) + \left(\frac{500}{100} - 1\right) + \left(\frac{800}{100} - 1\right) + \left(\frac{800}{100} - 1\right) + \left(\frac{300}{100} - 1\right) + \left(\frac{300}{100} - 1\right)$$

$$N^R = 206$$

Finalmente, substituindo todos estes valores na equação 2.2, o custo das ligações é:

$$C_L = (2 \times 21 \times 15000) + (2 \times 21 \times 5000 \times 5.0952) + (2 \times 206 \times 2000) = 2\,523\,992 \text{ €}$$

Em relação ao custo dos nós, primeiro é calculado o número médio de demandas, através da equação 2.12:

$$\langle d \rangle = \frac{100}{14} \quad \langle d \rangle = 7.1429$$

Substituindo na equação 2.11, o número médio de portas no comutador elétrico é:

$$\langle P_{exc} \rangle = 7.1429 \times 2.14 \quad \langle P_{exc} \rangle = 15.2858$$

Finalmente, substituindo todos os valores na equação 2.6, o custo dos nós é:

$$C_N = (14 \times (10000 + (100 \times 100 \times 15.2858)) + (100 \times 1.25 \times 1536) + (100 \times 2.5 \times 0) + (100 \times 10 \times 440) + (100 \times 40 \times 92) + (100 \times 100 \times 00))$$

$$C_N = 2\,280\,012 + 1\,000\,000 = 3\,280\,012 \text{ €}$$

Por fim, somando o custo das ligações com o custo dos nós, o valor do CAPEX é:

$$CAPEX = 2\,523\,992 + 3\,280\,012 \quad CAPEX = 5\,804\,004 \text{ €}$$

5.2.2 Modelo Heurístico

| CAPEX | | | | | | |
|---------------------|----------------|--------------|------------|----------------|-------------|-------------|
| | | | Quantidade | Preço Unitário | Custo | Total |
| Custo das Ligações | OLTs | | 42 | 15 000 € | 630 000 € | 2 624 000 € |
| | Canais Óticos | | 234 | 5000 € | 1 170 000 € | |
| | Amplificadores | | 412 | 2000 € | 824 000 € | |
| Custo dos Nós | Parte Elétrica | EXCs | 14 | 10 000 € | 140 000 € | 3 480 000 € |
| | | Portas ODU0 | 1536 | 100 €/Gbit/s | 192 000 € | |
| | | Portas ODU1 | 0 | 100 €/Gbit/s | 0 € | |
| | | Portas ODU2 | 440 | 100 €/Gbit/s | 440 000 € | |
| | | Portas ODU3 | 92 | 100 €/Gbit/s | 368 000 € | |
| | | Portas ODU4 | 0 | 100 €/Gbit/s | 0 € | |
| | | Transponders | 234 | 100 €/Gbit/s | 2 340 000 € | |
| | Parte Ótica | OXCs | 0 | 20 000 € | 0 € | |
| | | Portas OXC | 0 | 2 500 € | 0 € | |
| Custo Total da Rede | | | | | | 6 104 000 € |

Tabela 5.15: CAPEX para o rede real no modo de transporte opaco com ordenação de demandas descendente e critério de encaminhamento os saltos.

5.2.3 Análise Comparativa

| | Modelo Heurístico | Modelo Analítico |
|----------------|----------------------|---------------------|
| Custo Ligações | 2 624 000 € | 2 523 392 € (-4,0%) |
| Custo Nós | 3 480 000 € | 3 280 012 € (-5,7%) |
| CAPEX | 6 104 000 € | 5 804 004 € (-4,9%) |

Tabela 5.16: Comparação dos valores do CAPEX entre o modelo heurístico e o modelo analítico para a rede realista.

| CAPEX | | | | | | |
|-----------------------|-------------------|--------------|----------------|--------------|-------------|-------------|
| | | Quantidade | Preço Unitário | Custo | Total | |
| Custo das Ligações | OLTs | | 42 | 15 000 € | 630 000 € | 2 669 000 € |
| | Canais Óticos | | 243 | 5000 € | 1 215 000 € | |
| | Amplificadores | | 412 | 2000 € | 824 000 € | |
| Custo dos Nós | Parte Elétrica | EXCs | 14 | 10 000 € | 140 000 € | 3 570 000 € |
| | | Portas ODU0 | 1536 | 100 €/Gbit/s | 192 000 € | |
| | | Portas ODU1 | 0 | 100 €/Gbit/s | 0 € | |
| | | Portas ODU2 | 440 | 100 €/Gbit/s | 440 000 € | |
| | | Portas ODU3 | 92 | 100 €/Gbit/s | 368 000 € | |
| | | Portas ODU4 | 0 | 100 €/Gbit/s | 0 € | |
| | Parte Ótica | Transponders | 243 | 100 €/Gbit/s | 2 430 000 € | |
| | | OXCs | 0 | 20 000 € | 0 € | |
| | | Portas OXC | 0 | 2 500 € | 0 € | |
| Custo Total da Rede | | | | | 6 239 000 € | |

Tabela 5.17: CAPEX para o rede real no modo de transporte opaco com ordenação de demandas ascendente e critério de encaminhamento os saltos.

| CAPEX | | | | | | |
|---------------------|----------------|-------------|----------------|--------------|-------------|-------------|
| | | Quantidade | Preço Unitário | Custo | Total | |
| Custo das Ligações | OLTs | | 42 | 15 000 € | 2 754 000 € | |
| | Canais Óticos | | 260 | 5000 € | | |
| | Amplificadores | | 412 | 2000 € | | |
| Custo dos Nós | Parte Elétrica | EXCs | 14 | 10 000 € | 140 000 € | 3 740 000 € |
| | | Portas ODU0 | 1536 | 100 €/Gbit/s | 192 000 € | |
| | | Portas ODU1 | 0 | 100 €/Gbit/s | 0 € | |
| | | Portas ODU2 | 440 | 100 €/Gbit/s | 440 000 € | |
| | | Portas ODU3 | 92 | 100 €/Gbit/s | 368 000 € | |
| | | Portas ODU4 | 0 | 100 €/Gbit/s | 0 € | |
| | Transponders | 260 | 100 €/Gbit/s | 2 600 000 € | | |
| | Parte Ótica | OXCs | 0 | 20 000 € | 0 € | |
| | | Portas OXC | 0 | 2 500 € | 0 € | |
| Custo Total da Rede | | | | | 6 494 000 € | |

Tabela 5.18: CAPEX para o rede real no modo de transporte opaco com ordenação de demandas descendente e critério de encaminhamento a distância entre os nós.

| CAPEX | | | | | | |
|---------------------|----------------|-------------|----------------|--------------|-------------|-------------|
| | | Quantidade | Preço Unitário | Custo | Total | |
| Custo das Ligações | OLTs | | 42 | 15 000 € | 2 809 000 € | |
| | Canais Óticos | | 271 | 5000 € | | |
| | Amplificadores | | 412 | 2000 € | | |
| Custo dos Nós | Parte Elétrica | EXCs | 14 | 10 000 € | 140 000 € | 3 850 000 € |
| | | Portas ODU0 | 1536 | 100 €/Gbit/s | 192 000 € | |
| | | Portas ODU1 | 0 | 100 €/Gbit/s | 0 € | |
| | | Portas ODU2 | 440 | 100 €/Gbit/s | 440 000 € | |
| | | Portas ODU3 | 92 | 100 €/Gbit/s | 368 000 € | |
| | | Portas ODU4 | 0 | 100 €/Gbit/s | 0 € | |
| | Transponders | 271 | 100 €/Gbit/s | 2 710 000 € | | |
| | Parte Ótica | OXCs | 0 | 20 000 € | 0 € | |
| | | Portas OXC | 0 | 2 500 € | 0 € | |
| Custo Total da Rede | | | | | 6 659 000 € | |

Tabela 5.19: CAPEX para o rede real no modo de transporte opaco com ordenação de demandas ascendente e critério de encaminhamento a distância entre os nós.

5.3 Conclusões

Capítulo 6

Conclusões e Trabalho Futuro

Este capítulo está dividido em duas secções.

6.1 Conclusões

6.2 Trabalho Futuro

- Implementar os modos de transporte transparente e translúcido.
- Considerar os métodos de sobrevivência: proteção 1+1 e restauração.
- Permitir vários sistemas de transmissão em cada ligação.
- Considerar outras estratégias para o algoritmo de escalonamento das demandas, tais como o comprimento dos caminhos lógicos ou físicos mais curtos.
- Dar continuidade ao repositório GIT, onde se encontra o código e a documentação desenvolvidos nesta dissertação bem como de trabalhos anteriores na mesma área.

Referências

- [1] T. Esteves. *Dimensionamento e Optimização em Redes Ópticas de Transporte*. 2018.
- [2] R.M.D. Morais. «Planning and Dimensioning of Multilayer Optical Transport Networks». Tese de doutoramento. Universidade de Aveiro, 2015.
- [3] Armando N. Pinto. "*Design of Optical Transport Networks*" em *aulas de Redes Óticas 2018/19*. 2018.
- [4] *National Science Foundation Network (NSFNET)*. URL: <http://www.av.it.pt/anp/on/refnet2.html> (acedido em 31/10/2019).