



Élio Tiago
Sousa Coelho

Desenvolvimento de Heurísticas para o
Dimensionamento de Redes Óticas Opacas

Development of Heuristics for Opaque Optical
Networks Dimensioning

DOCUMENTO PROVISÓRIO



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 do Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro e coorientação empresarial do Doutor Rui Manuel Dias Moraes, Doutor em Engenharia Eletrotécnica pela Universidade de Aveiro, coordenador de atividades de investigação em optimização de redes na Infinera Portugal. Tendo como instituição de acolhimento o Instituto de Telecomunicações - Pólo de Aveiro.

DOCUMENTO
PROVISÓRIO



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

Adicionar palavras-chave...

Resumo

Adicionar resumo...

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 Rede Referência	9
2.3.1 Topologia Física	9
2.3.2 Topologia Lógica	10
2.3.3 Matrizes de Tráfego	10
2.4 Rede Real	14
2.4.1 Topologia Física e Topologia Lógica	15
2.4.2 Matrizes de Tráfego	16
2.5 Custo da Rede	18
2.5.1 Custo das Ligações	18
2.5.2 Custo dos Nós	19
2.5.3 Custo do Equipamento	20

2.5.4	Modelo Analítico	20
2.5.5	Modelo ILP	22
2.5.6	Modelo Heurístico	23
2.6	Conclusões	23
3	Heurísticas	25
3.1	Escalonamento	25
3.2	Encaminhamento	27
3.3	Atribuição do Comprimento de Onda	28
3.4	Agregação	29
3.5	Conclusões	29
4	Implementação NetXPTO	31
4.1	Diagrama do Sistema	31
4.2	Blocos do Sistema	32
4.2.1	Scheduler	32
4.2.2	LogicalTopologyGenerator	33
4.2.3	PhysicalTopologyGenerator	33
4.2.4	LogicalTopologyManager	33
4.2.5	PhysicalTopologyManager	34
4.3	Parâmetros de Entrada do Sistema	35
4.3.1	Formato do Ficheiro de Entrada	37
4.4	Estrutura dos Tipos de Sinais do Sistema	38
4.4.1	LogicalTopology	38
4.4.2	PhysicalTopology	39
4.4.3	DemandRequest	40
4.4.4	PathRequest	41
4.4.5	PathRequestRouted	41
4.4.6	DemandRequestRouted	42
4.5	Relatório	44
4.6	Conclusões	44
5	Resultados	45
5.1	Rede Referência	45
5.1.1	Modelo Analítico	46
5.1.2	Modelo ILP	49
5.1.3	Modelo Heurístico	51
5.1.4	Análise Comparativa	59
5.2	Rede Real	61

5.2.1	Modelo Analítico	61
5.2.2	Modelo Heurístico	62
5.2.3	Análise Comparativa	64
5.3	Conclusões	64
6	Conclusões e Trabalho Futuro	65
6.1	Conclusões	65
6.2	Trabalho Futuro	65
	Referências	67

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.	8
2.6	Topologia lógica para o modo de transporte transparente.	8
2.7	Topologia lógica para o modo de transporte translúcido.	9
2.8	Topologia física da rede referência.	9
2.9	Topologia lógica da rede referência.	10
2.10	National Science Foundation Network (NSFNET) [3].	14
2.11	Topologia física e lógica da rede realista NSFNET.	15
3.1	Fluxograma do algoritmo de escalonamento	26
3.2	Ordem que é seguida na ordenação das demandas.	27
3.3	Descrição do algoritmo de encaminhamento.	28
4.1	Diagrama de alto nível do sistema implementado no simulador NetXPTO-NetPlanner.	32
4.2	Fluxograma do bloco LogicalTopologyManager.	34
4.3	Fluxograma do bloco PhysicalTopologyManager.	35
5.1	Topologia física da rede referência para o cenário de tráfego baixo após o dimensionamento utilizando o modelo heurístico.	52
5.2	Topologia ótica da rede referência para o cenário de tráfego baixo após o dimensionamento utilizando o modelo heurístico.	52
5.3	Topologia física da rede referência para o cenário de tráfego médio após o dimensionamento utilizando o modelo heurístico.	54
5.4	Topologia ótica da rede referência para o cenário de tráfego médio após o dimensionamento utilizando o modelo heurístico.	55

5.5	Topologia física da rede referência para o cenário de tráfego elevado após o dimensionamento utilizando o modelo heurístico.	57
5.6	Topologia ótica da rede referência para o cenário de tráfego elevado após o dimensionamento utilizando o modelo heurístico.	57

Lista de tabelas

2.1	Tabela com o tráfego	11
2.2	Tabela com a divisão do tráfego	12
2.3	Tabela com o tráfego	13
2.4	Parâmetros da rede real NSFNET [3].	15
2.5	Tabela com o tráfego	17
2.6	Tabela com os índices e as taxas de transmissão de bit correspondente.	20
2.7	Tabela dos custos do equipamento [4].	20
4.1	Parâmetros de entrada do sistema.	36
4.2	path	38
4.3	lightPath	39
4.4	opticalChannel	39
4.5	opticalMultiplexSection	40
4.6	DemandRequest	40
4.7	PathRequest	41
4.8	pathInformation	41
4.9	lightPathsTable	42
4.10	DemandRequestRouted	42
4.11	Parâmetros de entrada e variáveis de estado de cada bloco	43
4.12	Sinais de entrada e de saída de cada bloco	44
5.1	Tabela com a informação detalhada para o CAPEX para o cenário de tráfego baixo utilizando o modelo ILP.	50
5.2	Tabela com a informação detalhada para o CAPEX para o cenário de tráfego médio utilizando o modelo ILP.	50
5.3	Tabela com a informação detalhada para o CAPEX para o cenário de tráfego elevado utilizando o modelo ILP.	51
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.	53

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.	53
5.6	Tabela com a informação detalhada para o CAPEX para o cenário de tráfego baixo utilizando o modelo heurístico.	54
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.	55
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.	56
5.9	Tabela com a informação detalhada para o CAPEX para o cenário de tráfego médio utilizando o modelo heurístico.	56
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.	58
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.	58
5.12	Tabela com a informação detalhada para o CAPEX para o cenário de tráfego elevado utilizando o modelo heurístico.	59
5.13	Comparação dos valores do CAPEX entre os diferentes modelos para os diferentes cenários de tráfego.	59
5.14	CAPEX para o rede real no modo de transporte opaco com ordenação de demandas descendente e critério de encaminhamento os saltos.	62
5.15	CAPEX para o rede real no modo de transporte opaco com ordenação de demandas ascendente e critério de encaminhamento os saltos.	63
5.16	CAPEX para o rede real no modo de transporte opaco com ordenação de demandas descendente e critério de encaminhamento a distância entre os nós. . .	63
5.17	CAPEX para o rede real no modo de transporte opaco com ordenação de demandas ascendente e critério de encaminhamento a distância entre os nós. . .	64
5.18	Comparação entre as resultados das heurísticas para as diferentes formas de ordenação das demandas com os resultados do modelo analítico.	64

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 2.3 é definida uma rede referência e são criados três cenários de tráfego para posteriormente testar as heurísticas que serão desenvolvidas nesta dissertação. Na secção 2.4 é escolhida uma rede realista (NSFNET) para aplicar as heurísticas e para tal é definido um cenário de tráfego. Na última secção 2.5 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.

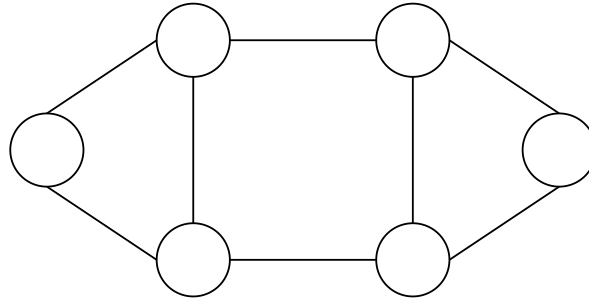


Figura 2.1: Exemplo de uma rede de transporte.

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.

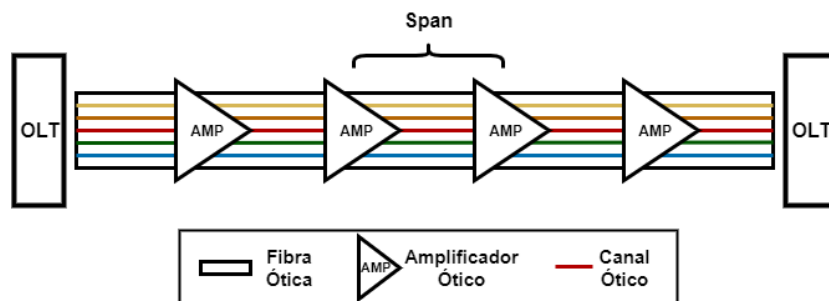


Figura 2.2: Arquitetura de uma ligação [2].

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.

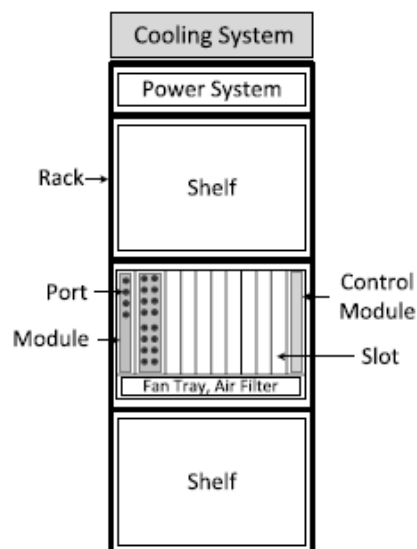


Figura 2.3: Arquitetura do nó [2].

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.

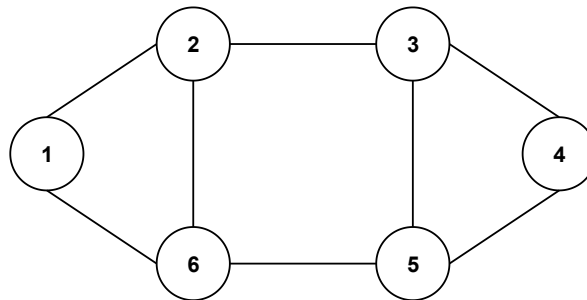


Figura 2.4: Exemplo de uma topologia física de uma rede.

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.

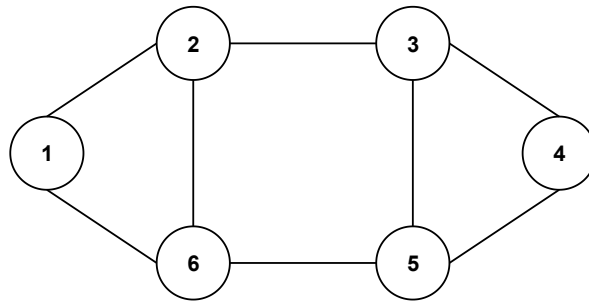


Figura 2.5: Topologia lógica para o modo de transporte opaco.

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.

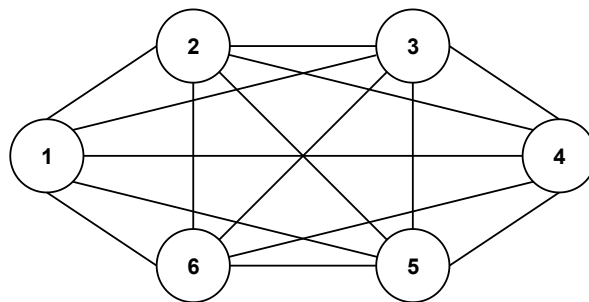


Figura 2.6: Topologia lógica para o modo de transporte transparente.

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.

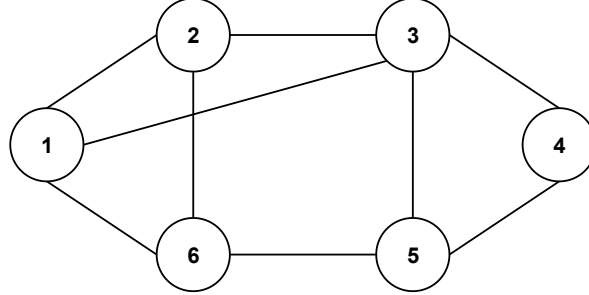


Figura 2.7: Topologia lógica para o modo de transporte translúcido.

Nesta dissertação apenas o modo de transporte opaco foi estudado.

2.3 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.

2.3.1 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.

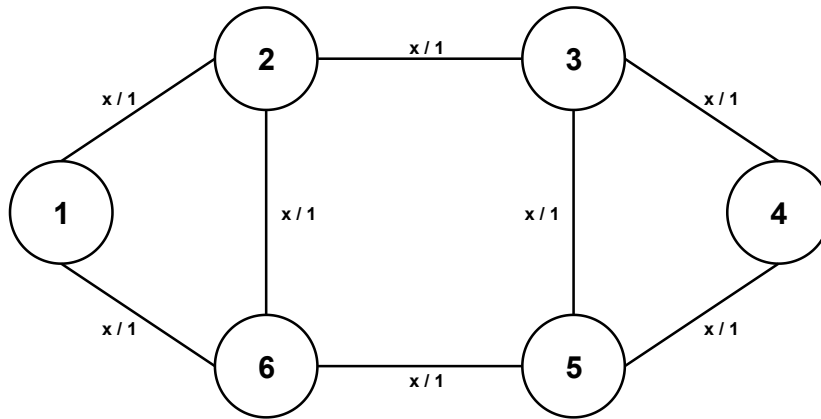


Figura 2.8: Topologia física da rede referência.

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

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

2.3.2 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.

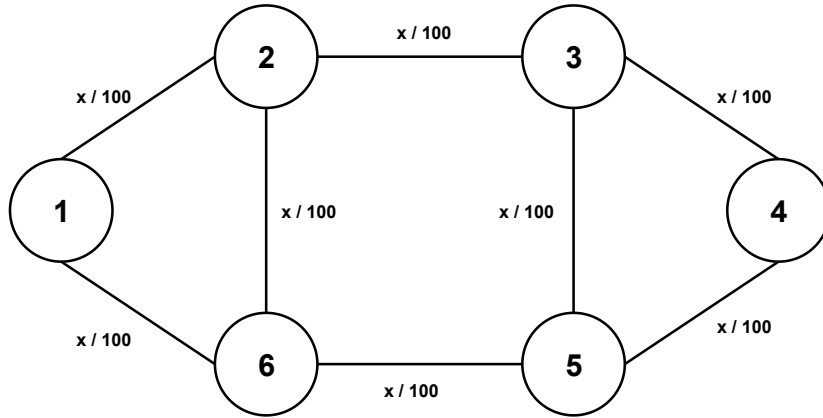


Figura 2.9: Topologia lógica da rede referência.

2.3.3 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 ODUs	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 2.1: 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 2.2: 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 2.3: Tabela com o tráfego

2.4 Rede Real

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) que foi um programa de financiamento da internet, patrocinado pela National Science Foundation entre 1985 e 1995, para promover uma rede de educação e pesquisa nos Estados Unidos. Esta rede é frequentemente usada em estudos de dimensionamento de redes de transporte. A topologia desta rede pode ser vista na figura 2.10.

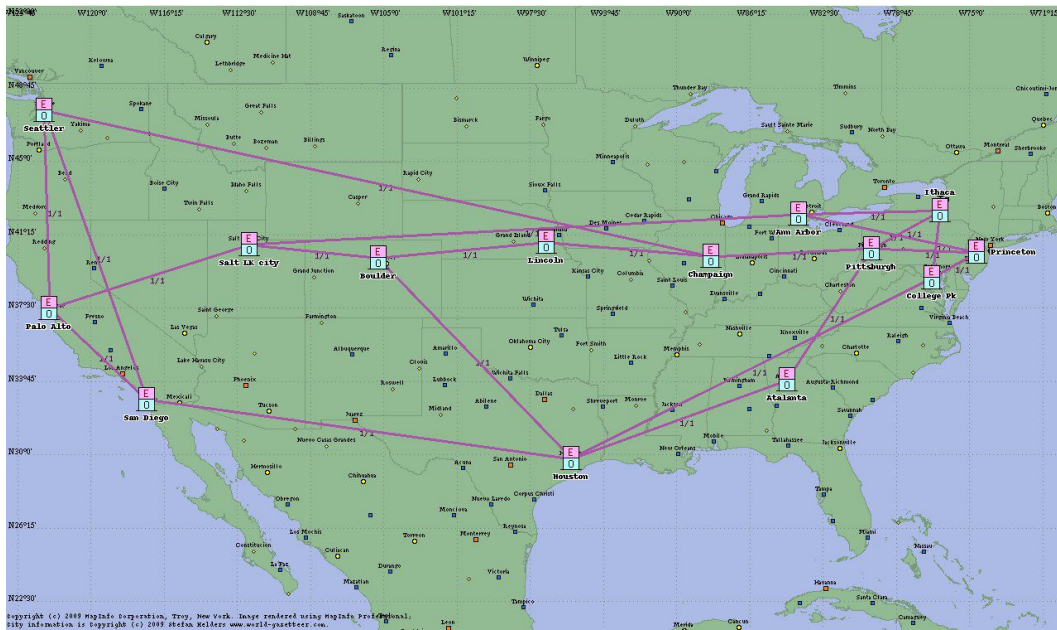


Figura 2.10: National Science Foundation Network (NSFNET) [3].

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 2.4.

Variável	Descrição	Valor
N	Número de Nós	14
L	Número de Ligações Bidireccionais	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 2.4: Parâmetros da rede real NSFNET [3].

2.4.1 Topologia Física e Topologia Lógica

Dado que se considerou o modo de transporte opaco, a topologia física e a topologia lógica vão ser iguais, como referido em 2.2.3. A representação da topologia física e lógica pode ser vista na figura 2.11, bem como a atribuição dos seus 14 nós.

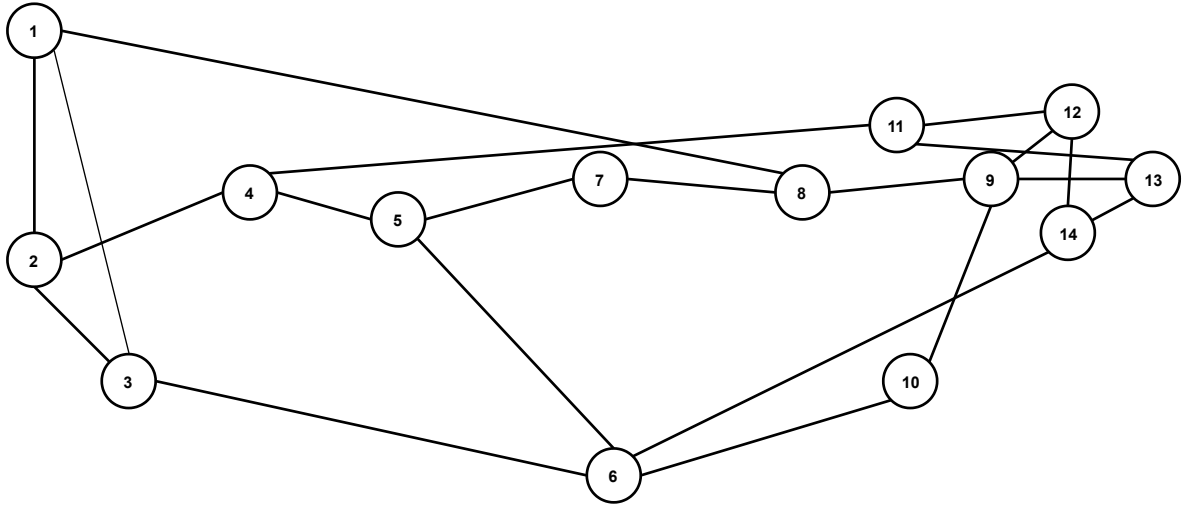


Figura 2.11: Topologia física e lógica da rede realista NSFNET.

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.

2.4.2 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.

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

$$\begin{aligned}
 ODU2 = & \begin{bmatrix} 0 & 2 & 0 & 2 & 2 & 4 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 4 & 2 & 2 \\ 2 & 0 & 2 & 2 & 0 & 2 & 4 & 4 & 2 & 0 & 2 & 4 & 0 & 2 \\ 0 & 2 & 0 & 2 & 2 & 2 & 2 & 4 & 2 & 2 & 4 & 4 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 0 & 4 & 4 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 4 & 2 & 2 \\ 2 & 0 & 2 & 4 & 0 & 2 & 2 & 2 & 4 & 2 & 2 & 4 & 2 & 2 \\ 4 & 2 & 2 & 4 & 2 & 0 & 2 & 4 & 2 & 2 & 4 & 2 & 4 & 4 \\ 2 & 4 & 2 & 2 & 2 & 2 & 0 & 4 & 4 & 2 & 2 & 2 & 2 & 4 \\ 2 & 4 & 4 & 2 & 2 & 4 & 4 & 0 & 2 & 4 & 2 & 4 & 4 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 4 & 2 & 4 & 2 & 0 & 2 & 2 & 4 & 2 & 0 \\ 2 & 0 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 4 & 2 & 0 & 0 & 2 & 2 & 4 \\ 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 2 & 2 & 4 & 4 & 2 & 2 & 0 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 4 & 4 & 2 & 0 & 4 & 2 & 2 & 2 & 0 \end{bmatrix} \\
\\
ODU3 = & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 3 & 2 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 2 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 2 & 0 & 4 \\ 2 & 2 & 0 & 2 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 4 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 2 & 4 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

Matrizes de tráfego ODU0, ODU2 e ODU3 definidas..

ODUs	Número de ODUs	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 2.5: Tabela com o tráfego

2.5 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.

2.5.1 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.

2.5.2 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 2.6

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.

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

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, $D_{nn,c} = 0$

2.5.3 Custo do Equipamento

A tabela 2.7 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 2.7: Tabela dos custos do equipamento [4].

2.5.4 Modelo Analítico

Nesta secção é apresentado os cálculos para o modelo analítico, que serão utilizados no capítulo 5, para servirem de comparação com os resultados obtidos através dos modelos heurísticos.

O custo total do CAPEX da rede em euros, C_C , é dado pela equação 2.1.

Para o cálculo do custo das ligações, C_L , é usado a equação 2.9

$$C_L = (2L\gamma_0^{OLT}) + (2L\gamma_1^{OLT} < w >) + (2N^R c^R) \quad (2.9)$$

onde:

- $\gamma_0^{OLT} \rightarrow$ Custo do OLT em euros
- $L \rightarrow$ Número de ligações bidirecionais
- $\gamma_1^{OLT} \rightarrow$ Custo do transponder em euros
- $< w > \rightarrow$ Número médio de canais óticos
- $N^R \rightarrow$ Número total de amplificadores óticos unidirecionais
- $c^R \rightarrow$ Custo dos amplificadores óticos unidirecionais em euros

Para calcular o número de amplificadores óticos, N^R , utiliza-se a equação 2.10

$$N^R = \sum_{l=1}^L \left(\left\lceil \frac{len_l}{span} \right\rceil - 1 \right) \quad (2.10)$$

onde len_l é o comprimento da ligação l e $span$ é a distância entre amplificadores.

O número médio de canais óticos pode ser calculado, através da equação 2.11

$$< w > = \left(\frac{\lceil D < h > \rceil}{L_u} \right) (1 + < k >) \quad (2.11)$$

onde D é o número de demandas unidirecionais, L_u é o número de ligações unidirecionais e $< k >$ é coeficiente de sobrevivência. O número de demandas unidirecionais, D , pode ser calculado pela equação 2.12

$$D = \left(\frac{1}{2} \right) (1 + \xi) \left(\frac{T_1}{\tau} \right) \quad (2.12)$$

onde ξ é o coeficiente de agregação, T_1 é o tráfego unidirecional total e τ é bit rate de linha[1]. 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 $< k >$ é 0.

Como referido anteriormente no modo de transporte opaco, para o cálculo do custo dos nós C_N , só se considera o custo da parte elétrica, C_{exc} , resultando a equação 2.13.

$$C_N = C_{exc} = N (\gamma_{e0} + (\gamma_{e1}\tau < P_{exc} >)) + \gamma_{e1} P_{trib} \quad (2.13)$$

onde:

- $N \rightarrow$ Número de nós
- $\gamma_{e0} \rightarrow$ Custo base do EXC em euros
- $\gamma_{e1} \rightarrow$ Custo base das portas EXC em euros
- $\tau \rightarrow$ Bit rate da linha
- $< P_{exc} > \rightarrow$ Número médio de portas do comutador elétrico
- $P_{trib} \rightarrow$ Número total de portas tributárias

Em que o número total de portas tributárias, P_{trib} , é calculado através das matrizes de tráfego referidas em 2.3.3 para a rede referência e em 2.4.2 para a rede real NSFNET, e o número médio de portas do comutador elétrico, $< P_{exc} >$, é calculado pela equação 2.14

$$< P_{exc} > = < d > < h > \quad (2.14)$$

onde $< d >$ é o número médio de demandas, calculado pela equação 2.15, e $< h >$ é o número médio de saltos.

$$< d > = \frac{D}{N} \quad (2.15)$$

2.5.5 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 e desigualdades. 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.

Com o intuito de validar as heurísticas desenvolvidas nesta dissertação recorreu-se a modelos ILP desenvolvidos em uma dissertação anterior. Para minimização do custo da rede, estes modelos 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 propostas nestes modelos ILP podem ser consultadas no trabalho de dissertação referido [1]. Nesse trabalho, foi assumido que o encaminhamento das

demandas é realizado pelo modelo ILP em vez de alimentado com caminhos candidatos para o encaminhamento.

Para os cálculos do CAPEX da rede para o modelo ILP são utilizados as equações apresentadas nas subsecções 2.5.1 e 2.5.2 deste capítulo. As soluções para os modelos ILP foram obtidas através do software MATLAB em conjunto com o pacote de software de otimização LPSOLVE.

2.5.6 Modelo Heurístico

Neste modelo, a minimização do custo da rede, minimizando os elementos de rede instalados, vão depender das estratégias e decisões tomadas para o encaminhamento das demandas de tráfego. Utilizando o modelo heurístico temos uma solução aproximada, dependendo da qualidade das tais estratégias, o que difere do modelo ILP em que se obtém a solução ótima. As equações apresentadas nas subsecções 2.5.1 e 2.5.2 deste capítulo são utilizadas para os cálculos do CAPEX da rede usando este modelo. O modelo heurístico proposto neste trabalho é apresentado no capítulo 3.

2.6 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

Heurísticas

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 reais, 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, assim, 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 secção 3.1 é proposto o algoritmo de escalonamento onde são abordadas as estratégias escolhidas para a ordenação das demandas, na secção 3.2 é definido o algoritmo de encaminhamento em que é explicado qual o método de encaminhamento escolhido, na secção 3.3 é explicado como é feita a atribuição do comprimento de onda e finalmente na secção ?? é proposta a estratégia de agregação das demandas.

3.1 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 3.2.

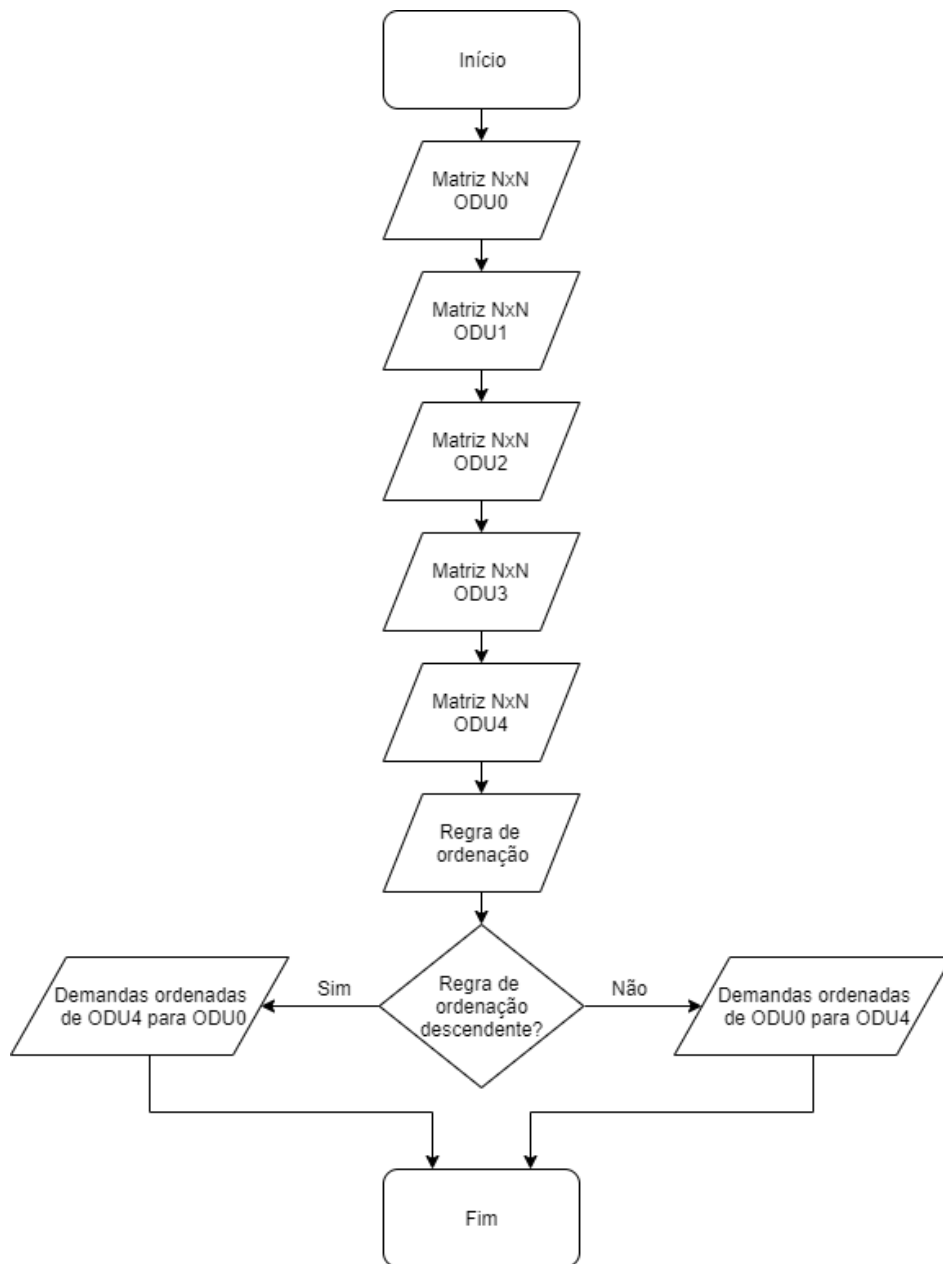


Figura 3.1: Fluxograma do algoritmo de escalonamento

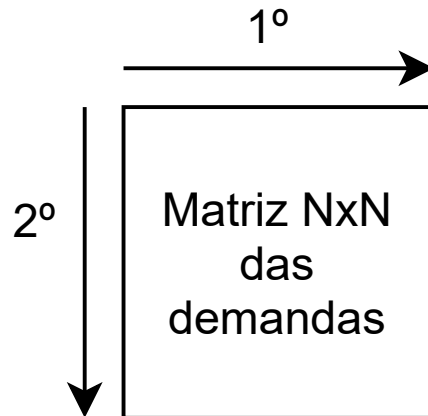


Figura 3.2: Ordem que é seguida na ordenação das demandas.

3.2 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.

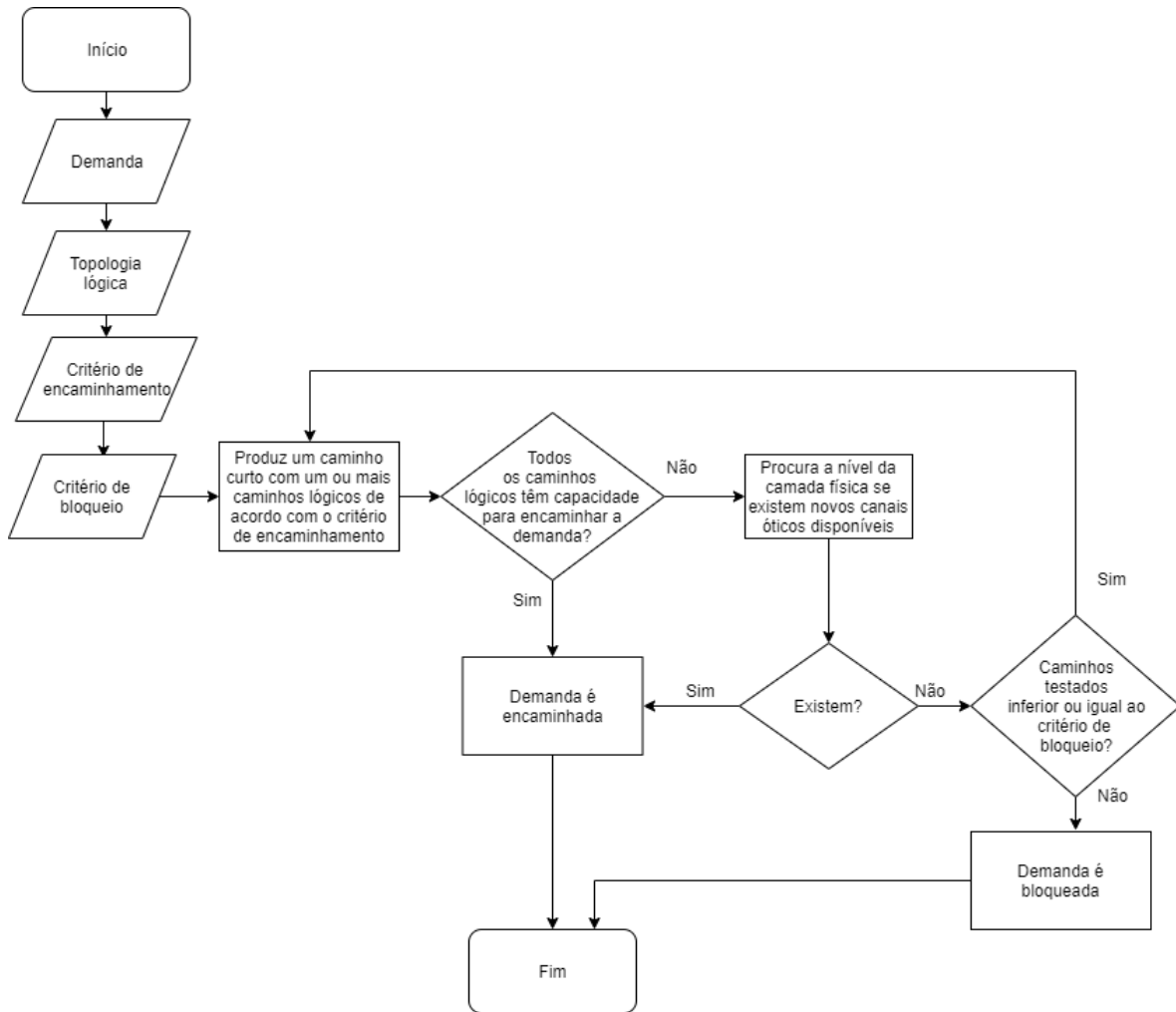


Figura 3.3: Descrição do algoritmo de encaminhamento.

3.3 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 seleccionado 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.

3.4 Agregação

3.5 Conclusões

Capítulo 4

Implementação NetXPTO

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

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 Diagrama do Sistema

Na figura 4.1 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.

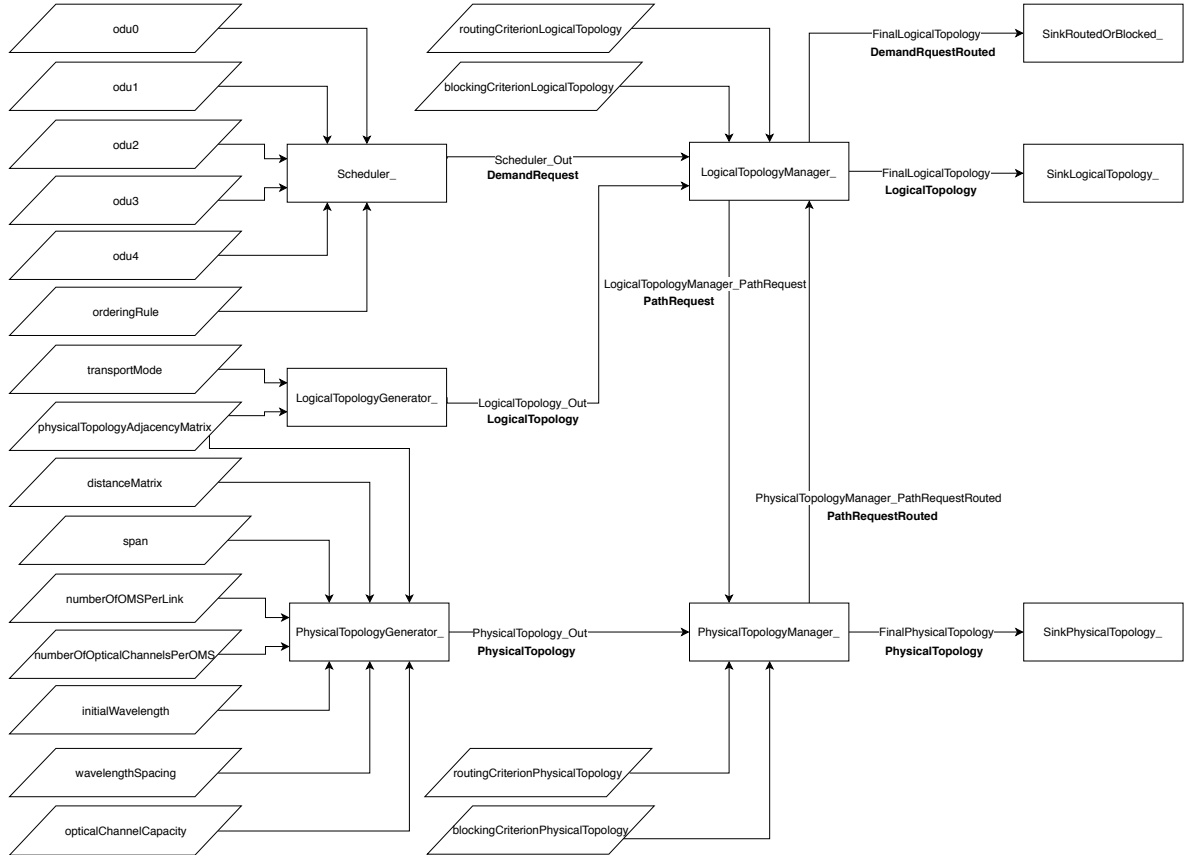


Figura 4.1: Diagrama de alto nível do sistema implementado no simulador NetXPTO-NetPlanner.

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.

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.

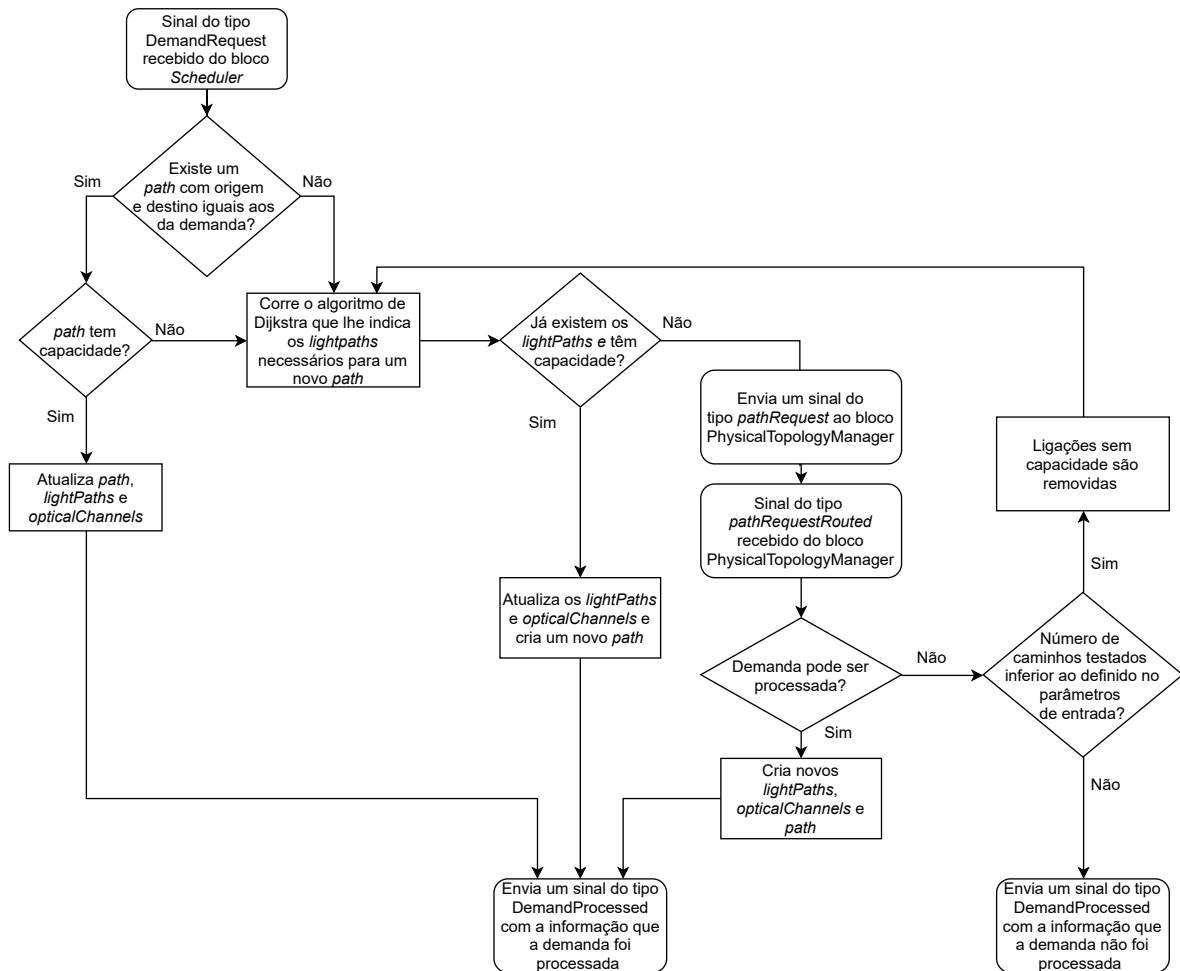


Figura 4.2: Fluxograma do bloco LogicalTopologyManager.

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.

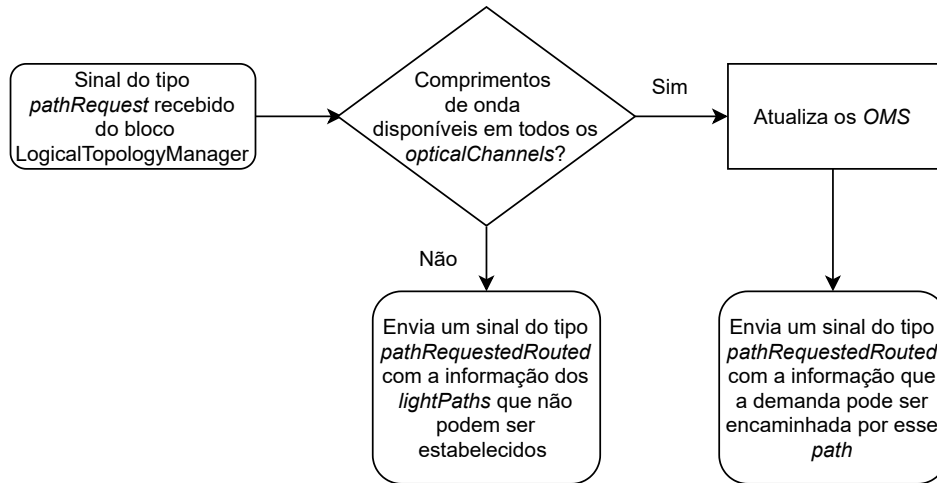


Figura 4.3: Fluxograma do bloco PhysicalTopologyManager.

4.3 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.

4.3.1 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
```

4.4 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.

4.4.1 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 nanômetros (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

4.4.2 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

4.4.3 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

4.4.4 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

4.4.5 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
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots

Tabela 4.9: lightPathsTable

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

4.4.6 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

A tabela 4.11 apresenta os parâmetros de entrada e as variáveis de estado de cada bloco do sistema e a tabela 4.12 apresenta os sinais de entrada e de saída de cada bloco que compõe o sistema.

Bloco	Parâmetros de entrada	Variáveis de estado
Scheduler_	odu0 odu1 odu2 odu3 odu4 orderingRule	odu0 odu1 odu2 odu3 odu4 demandIndex numberOfDemands
LogicalTopologyGenerator_	transportMode physicalTopologyAdjacencyMatrix distanceMatrix	generate
PhysicalTopologyGenerator_	physicalTopologyAdjacencyMatrix distanceMatrix span numberOfOMSPerLink numberOfOpticalChannelsPerOMS initialWavelength wavelengthSpacing opticalChannelCapacity	generate
LogicalTopologyManager_	routingCriterionLogicalTopology blockingCriterionLogicalTopology	logicalTopology demand requestIndex pathDij tryAnotherPath temporaryLogicalMatrix
PhysicalTopologyManager_	routingCriterionPhysicalTopology blockingCriterionPhysicalTopology	physicalTopology
SinkRoutedOrBlocked_	nenhum	nenhum
SinkLogicalTopology_	nenhum	nenhum
SinkPhysicalTopology_	nenhum	nenhum

Tabela 4.11: Parâmetros de entrada e variáveis de estado de cada bloco

Bloco	Sinais de entrada	Sinais de saída
Scheduler _	nenhum	Scheduler _Out
LogicalTopologyGenerator _	nenhum	LogicalTopologyGenerator _Out
PhysicalTopologyGenerator _	nenhum	PhysicalTopologyGenerator _Out
LogicalTopologyManager _	LogicalTopologyGenerator _Out Scheduler _Out PhysicalTopologyManager _PathRequestRouted	LogicalTopologyManager _PathRequest FinalLogicalTopology ProcessedDemand
PhysicalTopologyManager _	PhysicalTopologyGenerator _Out LogicalTopologyManager _PathRequest	PhysicalTopologyManager _PathRequestRouted FinalPhysicalTopology
SinkRoutedOrBlocked _	ProcessedDemand	nenhum
SinkLogicalTopology _	FinalLogicalTopology	nenhum
SinkPhysicalTopology _	FinalPhysicalTopology	nenhum

Tabela 4.12: Sinais de entrada e de saída de cada bloco

4.5 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.

4.6 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.

Capítulo 5

Resultados

O propósito deste capítulo é apresentar e analisar os resultados obtidos para o CAPEX após o dimensionamento da rede referência e da rede realista NSFNET. Foram obtidos resultados para três diferentes modelos: modelo analítico, modelo ILP e modelo heurístico. 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 no trabalho desenvolvido na dissertação anterior do Tiago [1]. Para o cálculo do CAPEX foi considerando o modelo de custos apresentado na tabela 2.7. Nesta dissertação apenas foram obtidos resultados para o modo de transporte opaco sem sobrevivência.

O capítulo está dividido em duas secções. A primeira secção, 5.1, é referente à rede referência, enquanto que a segunda secção, 5.2, é referente à rede realista NSFNET. Ambas as secções iniciam-se com a apresentação dos resultados obtidos para os diferentes modelos e terminam com uma análise comparativa aos mesmos. De realçar que na secção referente à rede realista não são apresentados resultados para o modelo ILP, porque mesmo após quatro semanas de simulação não foi suficiente para obter resultados.

5.1 Rede Referência

Nesta secção são apresentados os resultados obtidos para a rede referência, definida na secção 2.3, para os três cenários de tráfego descritos na secção 2.3.3, utilizando os três modelos: o modelo analítico, o modelo ILP e o modelo heurístico. No final é feita uma análise comparativa entre os resultados obtidos para os diferentes modelos.

5.1.1 Modelo Analítico

Para este modelo foram utilizadas as equações que foram apresentadas na secção 2.5.4 para o cálculo do valor do CAPEX. O coeficiente de sobrevivência é zero e foi assumido que o coeficiente de agregação toma o valor 1.

Tráfego Baixo

Para este cenário considerou-se o tráfego apresentado em 2.3.3.

Usando a equação 2.12:

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

Substituindo na equação 2.11:

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

Usando a equação 2.10:

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

$$N^R = 16$$

Finalmente, substituindo todos estes valores na equação 2.9, o custo da ligação é:

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

Em relação ao custo do nó, primeiro é calculado o número médio de demandas:

$$< d > = \frac{20}{6} \quad < d > = 3.333$$

Substituindo na equação 2.14:

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

Finalmente, substituindo todos os valores na equação 2.13, o custo do nó é:

$$C_N = (6 \times (10000 + (100 \times 100 \times 5.1095))) + (100 \times 1.25 \times 120) + (100 \times 2.5 \times 100) +$$

$$(100 \times 10 \times 32) + (100 \times 40 \times 12) + (100 \times 100 \times 8)))$$

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

O CAPEX é:

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

Tráfego Médio

Para este cenário considerou-se o tráfego apresentado em 2.3.3.

Usando a equação 2.12:

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

Substituindo na equação 2.11:

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

Usando a equação 2.10:

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

$$N^R = 16$$

Finalmente, substituindo todos estes valores na equação 2.9, o custo da ligação é:

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

Em relação ao custo do nó, primeiro é calculado o número médio de demandas:

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

Substituindo na equação 2.14:

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

Finalmente, substituindo todos os valores na equação 2.13, o custo do nó é:

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

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

O CAPEX é:

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

Tráfego Elevado

Para este cenário considerou-se o tráfego apresentado em 2.3.3.

Usando a equação 2.12:

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

Substituindo na equação 2.11:

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

Usando a equação 2.10:

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

$$N^R = 16$$

Finalmente, substituindo todos estes valores na equação 2.9, o custo da ligação é:

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

Em relação ao custo do nó, primeiro é calculado o número médio de demandas:

$$< d > = \frac{200}{6} \quad < d > = 33.3333$$

Substituindo na equação 2.14:

$$< P_{exc} > = 33.3333 \times 1.533 \qquad < P_{exc} > = 51.0999$$

Finalmente, substituindo todos os valores na equação 2.13, o custo do nó é:

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

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

O CAPEX é:

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

5.1.2 Modelo ILP

Nesta secção são apresentados os resultados obtidos para o CAPEX para a rede referência utilizando o modelo ILP desenvolvido na dissertação anterior do Tiago [1]. Os resultados são para os três cenários de tráfego definidos em 2.3.3. 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	OXC's	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	OXC's	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.

5.1.3 Modelo Heurístico

Resultados obtidos para o modo de transporte opaco sem sobrevivência, através da implementação dos algoritmos das heurísticas no simulador NetXPTO-NetPlanner.

Tráfego Baixo

Após o dimensionamento, para este cenário de tráfego, temos como resultado a topologia física da figura 5.5 e a topologia ótica da figura 5.2. Pode-se observar que todas as ligações físicas foram utilizadas para este cenário.

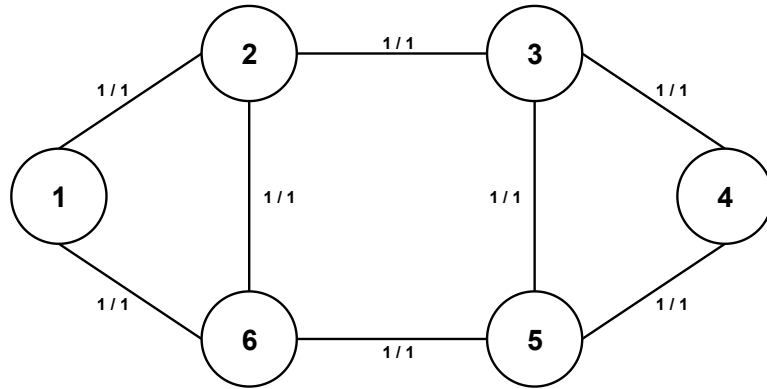


Figura 5.1: Topologia física da rede referencial para o cenário de tráfego baixo após o dimensionamento utilizando o modelo heurístico.

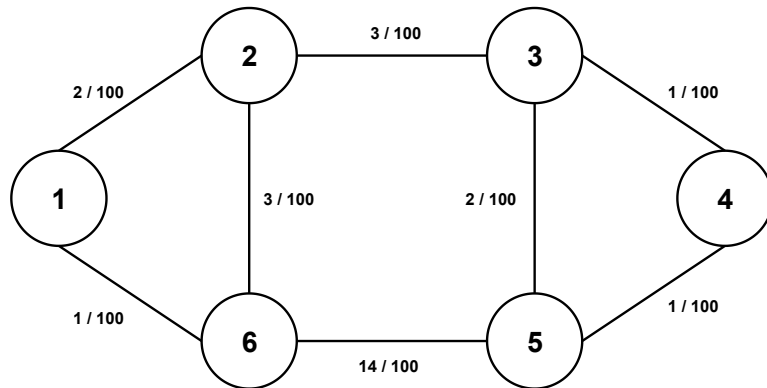


Figura 5.2: Topologia ótica da rede referencial para o cenário de tráfego baixo após o dimensionamento utilizando o modelo heurístico.

Na tabela 5.4 podemos ver a informação sobre as ligações que constituem a rede referencial após o dimensionamento. O número de canais óticos foram calculados através da equação 2.2 e o número de amplificadores por cada ligação foram calculados 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 grau de cada nó foi calculado através da equação ??, o número de portas tributárias foi calculado através da equação 2.7 e o número de portas de linha de longo alcance foi calculado através da equação 2.8.

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. Todos os valores foram calculados através das equações ??.

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	40	100 €/Gbit/s	400 000 €	
	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 5.5 e a topologia ótica da figura 5.4. Pode-se observar que todas as ligações físicas foram utilizadas para este cenário.

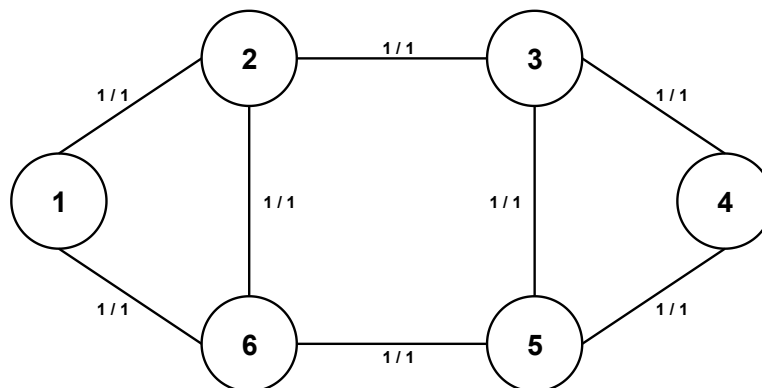


Figura 5.3: Topologia física da rede referencial para o cenário de tráfego médio após o dimensionamento utilizando o modelo heurístico.

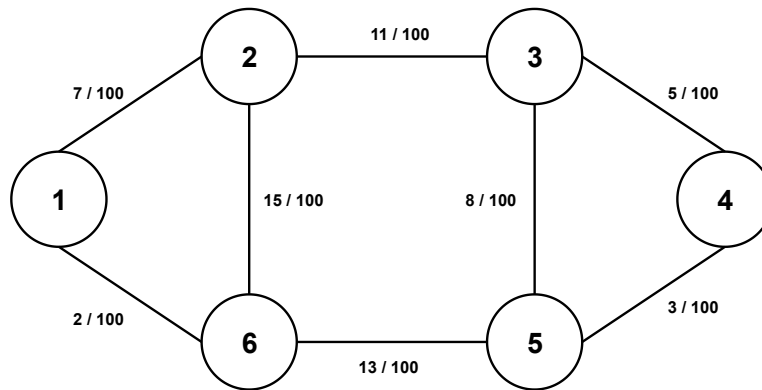


Figura 5.4: Topologia ótica da rede referênciada para o cenário de tráfego médio após o dimensionamento utilizando o modelo heurístico.

Na tabela 5.7 podemos ver a informação sobre as ligações que constituem a rede referênciada após o dimensionamento. O número de canais óticos foram calculados através da equação 2.2 e o número de amplificadores por cada ligação foram calculados 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 referênciada 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 referênciada após o dimensionamento. O grau de cada nó foi calculado através da equação ??, o número de portas tributárias foi calculado através da equação 2.7 e o número de portas de linha de longo alcance foi calculado através da equação 2.8.

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 5.6 podemos ver os resultados obtidos para o CAPEX para este cenário de tráfego baixo. Todos os valores foram calculados através das equações ??.

CAPEX						
		Quantidade	Preço Unitário	Custo	Total	
Custo das Ligações	OLTs		16	15 000 €	240 000 €	944 000 €
	Canais Óticos		128	5000 €	640 000 €	
	Amplificadores		32	2000 €	64 000 €	
Custo dos Nós	Parte Elétrica	EXCs	6	10 000 €	60 000 €	2 340 000 €
		Portas ODU0	600	100 €/Gbit/s	15 000 €	
		Portas ODU1	500	100 €/Gbit/s	25 000 €	
		Portas ODU2	160	100 €/Gbit/s	32 000 €	
		Portas ODU3	60	100 €/Gbit/s	48 000 €	
		Portas ODU4	40	100 €/Gbit/s	80 000 €	
		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.

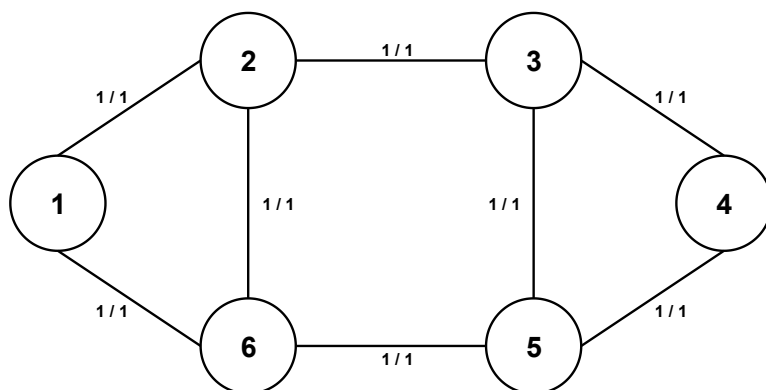


Figura 5.5: Topologia física da rede referencial para o cenário de tráfego elevado após o dimensionamento utilizando o modelo heurístico.

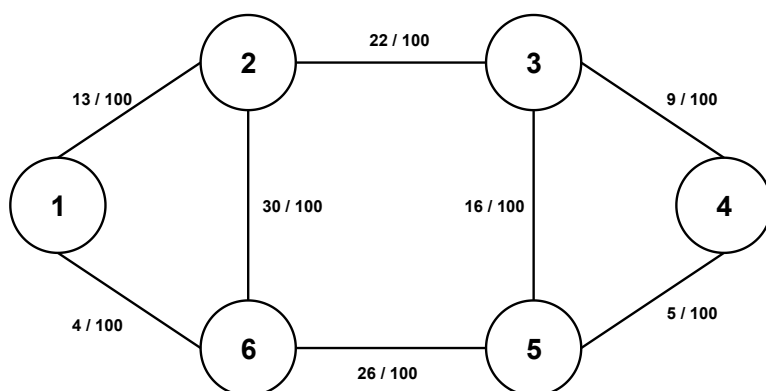


Figura 5.6: Topologia ótica da rede referencial para o cenário de tráfego elevado após o dimensionamento utilizando o modelo heurístico.

Na tabela 5.10 podemos ver a informação sobre as ligações que constituem a rede referencial após o dimensionamento. O número de canais óticos foram calculados através da equação 2.2 e o número de amplificadores por cada ligação foram calculados 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 grau de cada nó foi calculado através da equação ??, o número de portas tributárias foi calculado através da equação 2.7 e o número de portas de linha de longo alcance foi calculado através da equação 2.8.

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. Todos os valores foram calculados através das equações ??.

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.

		Heurísticas	Modelo Analítico	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, 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

5.2 Rede Real

Nesta secção são apresentados os resultados obtidos após o dimensionamento da rede realista NSFNET, definida em 2.4, para o cenário de tráfego considerado em 2.4.2. 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 foram utilizadas as equações que foram apresentadas na secção 2.5.4 para o cálculo do valor do CAPEX. O coeficiente de sobrevivência é zero e foi assumido que o coeficiente de agregação toma o valor 1.

Usando a equação 2.12:

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

Substituindo na equação 2.11:

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

Usando a equação 2.10:

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

$$N^R = 206$$

Finalmente, substituindo todos estes valores na equação 2.9, o custo da ligação é:

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

Em relação ao custo do nó, primeiro é calculado o número médio de demandas:

$$< d > = \frac{100}{14} \quad < d > = 7.1429$$

Substituindo na equação 2.14:

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

Finalmente, substituindo todos os valores na equação 2.13, o custo do nó é:

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

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

O CAPEX é:

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

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 €	
	Parte Ótica	Transponders	234	100 €/Gbit/s	2 340 000 €	
		OXCs	0	20 000 €	0 €	
		Portas OXC	0	2 500 €	0 €	
Custo Total da Rede					6 104 000 €	

Tabela 5.14: CAPEX para o rede real no modo de transporte opaco com ordenação de demandas descendente e critério de encaminhamento os saltos.

CAPEX						
		Quantidade	Preço Unitário	Custo	Total	
Custo das Ligações	OLTs		42	15 000 €	2 669 000 €	
	Canais Óticos		243	5000 €		
	Amplificadores		412	2000 €		
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 5.15: 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 5.16: 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 €	630 000 €	2 809 000 €
	Canais Óticos		271	5000 €	1 355 000 €	
	Amplificadores		412	2000 €	824 000 €	
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 5.17: CAPEX para o rede real no modo de transporte opaco com ordenação de demandas ascendente e critério de encaminhamento a distância entre os nós.

5.2.3 Análise Comparativa

	Heurísticas (descendente)	Heurísticas (ascendente)	Modelo Analítico
Custo Ligações	2 624 000 €	2 669 000 € (+1,7%)	2 523 392 € (-8,3%)
Custo Nós	3 480 000 €	3 570 000 € (+2,6%)	3 280 012 € (-5,7%)
CAPEX	6 104 000 €	6 239 000 € (+2,2%)	5 804 004 € (-4,9%)

Tabela 5.18: Comparação entre as resultados das heurísticas para as diferentes formas de ordenação das demandas com os resultados do modelo analítico.

5.3 Conclusões

Capítulo 6

Conclusões e Trabalho Futuro

6.1 Conclusões

6.2 Trabalho Futuro

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] *National Science Foundation Network (NSFNET)*. URL: <http://www.av.it.pt/anp/on/refnet2.html> (acedido em 31/10/2019).
- [4] Armando N. Pinto. "*Design of Optical Transport Networks*" em *aulas de Redes Ópticas 2018/19*. 2018.