



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

**ABC**  
ABC

vogais / examiners committee

**DEF**  
DEF

**Professor Doutor Armando Humberto Moreira Nolasco Pinto**  
Professor Associado com Agregação da Universidade de Aveiro (orientador)



agradecimientos /  
acknowledgements

Adicionar agradecimentos...





**Palavras-chave**

Adicionar palavras-chave...

**Resumo**

Adicionar resumo...



**Keywords**

Add keywords...

**Abstract**

Add abstract...



# Índice

<b>Índice</b>	<b>i</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>v</b>
<b>Lista de tabelas</b>	<b>vii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos . . . . .	1
1.2 Estrutura da Dissertação . . . . .	2
1.3 Principais Conquistas . . . . .	2
<b>2 Dimensionamento de Redes Óticas Opacas</b>	<b>3</b>
2.1 Arquitetura da Rede . . . . .	3
2.1.1 Ligações . . . . .	3
2.1.2 Nós . . . . .	4
2.2 Topologias da Rede . . . . .	5
2.2.1 Topologia Física . . . . .	5
2.2.2 Topologia Lógica . . . . .	5
2.2.3 Modos de Transporte . . . . .	6
2.3 Rede Referência . . . . .	6
2.3.1 Topologia Física . . . . .	6
2.3.2 Topologia Lógica . . . . .	7
2.3.3 Matrizes de Tráfego . . . . .	8
2.4 Rede Real . . . . .	11
2.4.1 Topologia Física e Topologia Lógica . . . . .	12
2.4.2 Matrizes de Tráfego . . . . .	13
2.5 Custo da Rede . . . . .	15
2.5.1 Custo das Ligações . . . . .	15
2.5.2 Custo dos Nós . . . . .	16
2.5.3 Custo do Equipamento . . . . .	17

2.5.4	Modelo Analítico . . . . .	17
<b>3</b>	<b>Heurísticas</b>	<b>21</b>
3.1	Escalonamento ( <i>Scheduling</i> ) . . . . .	21
3.2	Encaminhamento ( <i>Routing</i> ) . . . . .	22
3.3	Atribuição do Comprimento de Onda ( <i>Wavelength Assignment</i> ) . . . . .	23
3.3.1	Agregação ( <i>Grooming</i> ) . . . . .	23
<b>4</b>	<b>Implementação NetXPTO</b>	<b>25</b>
4.1	Diagrama do Sistema . . . . .	25
4.2	Parâmetros de Entrada do Sistema . . . . .	26
4.2.1	Formato do Ficheiro de Entrada . . . . .	28
4.3	Estrutura dos Tipos de Sinais do Sistema . . . . .	29
4.3.1	LogicalTopology . . . . .	29
4.3.2	PhysicalTopology . . . . .	30
4.3.3	DemandRequest . . . . .	31
4.3.4	PathRequest . . . . .	31
4.3.5	PathRequestRouted . . . . .	31
4.3.6	DemandRequestRouted . . . . .	32
4.4	Blocos do Sistema . . . . .	32
4.4.1	Scheduler . . . . .	32
4.4.2	LogicalTopologyGenerator . . . . .	33
4.4.3	PhysicalTopologyGenerator . . . . .	33
4.4.4	LogicalTopologyManager . . . . .	33
4.4.5	PhysicalTopologyManager . . . . .	34
4.5	Relatório Final . . . . .	36
<b>5</b>	<b>Resultados</b>	<b>37</b>
5.1	Rede Referência . . . . .	37
5.1.1	Modelo Analítico . . . . .	37
5.1.2	ILP . . . . .	39
5.1.3	Heurísticas . . . . .	41
5.1.4	Análise Comparativa . . . . .	46
5.2	Rede Real . . . . .	47
5.2.1	Modelo Analítico . . . . .	47
5.2.2	ILP . . . . .	48
5.2.3	Heurísticas . . . . .	48
5.2.4	Análise Comparativa . . . . .	50

<b>6</b>	<b>Conclusões e Trabalho Futuro</b>	<b>51</b>
6.1	Conclusões . . . . .	51
6.2	Trabalho Futuro . . . . .	51
	<b>Referências</b>	<b>53</b>





# Lista de figuras

2.1	Arquitetura das ligações [2]. . . . .	4
2.2	Arquitetura do nó [2]. . . . .	5
2.3	Topologia física da rede referência. . . . .	7
2.4	Topologia lógica da rede referência. . . . .	7
2.5	National Science Foundation Network (NSFNET) [3]. . . . .	11
2.6	Topologia física e lógica da rede real NSFNET. . . . .	12
3.1	Ordem que é seguida na ordenação das demandas. . . . .	22
3.2	Descrição do algoritmo de encaminhamento. . . . .	23
4.1	Diagrama de alto nível do sistema implementado no simulador NetXPTO-NetPlanner. . . . .	26
4.2	Ordem que é seguida na ordenação das demandas. . . . .	32
4.3	Fluxograma do bloco LogicalTopologyManager. . . . .	33
4.4	Fluxograma do bloco PhysicalTopologyManager. . . . .	34



# Lista de tabelas

2.1	Parâmetros da rede real NSFNET [3]. . . . .	12
2.2	Tabela com os índices e as taxas de transmissão de bit correspondente. . . . .	17
2.3	Tabela dos custos do equipamento [4]. . . . .	17
4.1	Parâmetros de entrada do sistema. . . . .	27
4.2	path . . . . .	29
4.3	lightPath . . . . .	30
4.4	opticalChannel . . . . .	30
4.5	opticalMultiplexSection . . . . .	31
4.6	DemandRequest . . . . .	31
4.7	PathRequest . . . . .	31
4.8	pathInformation . . . . .	32
4.9	lightPathsTable . . . . .	32
4.10	DemandRequestRouted . . . . .	32
4.11	Parâmetros de entrada e variáveis de estado de cada bloco . . . . .	35
4.12	Sinais de entrada e de saída de cada bloco . . . . .	36
5.1	CAPEX para o cenário de tráfego baixo usando ILPs. . . . .	40
5.2	CAPEX para o cenário de tráfego médio usando ILPs. . . . .	40
5.3	CAPEX para o cenário de tráfego elevado usando ILPs. . . . .	41
5.4	Informação sobre as ligações para o cenário de baixo tráfego. . . . .	41
5.5	Informação sobre os nós para o cenário de baixo tráfego. . . . .	42
5.6	CAPEX para o cenário de baixo tráfego. . . . .	42
5.7	Informação sobre as ligações para o cenário de médio tráfego. . . . .	43
5.8	Informação sobre os nós para o cenário de médio tráfego. . . . .	43
5.9	CAPEX para o cenário de médio tráfego. . . . .	44
5.10	Informação sobre as ligações para o cenário de elevado tráfego. . . . .	44
5.11	Informação sobre os nós para o cenário de elevado tráfego. . . . .	45
5.12	CAPEX para o cenário de elevado tráfego. . . . .	45

5.13	Comparação dos valores do CAPEX entre os diferentes modelos para os diferentes cenários de tráfego. . . . .	46
5.14	CAPEX para o rede real no modo de transporte opaco com ordenação de demandas descendente e critério de encaminhamento os saltos. . . . .	48
5.15	CAPEX para o rede real no modo de transporte opaco com ordenação de demandas ascendente e critério de encaminhamento os saltos. . . . .	48
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. .	49
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. .	49
5.18	Comparação dos resultados das heurísticas com o modelo analítico e o ILP . . .	50
5.19	Comparação do tempo de execução das heurísticas com o ILP. . . . .	50

# 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, o aumento da largura de banda das tecnologias móveis de acesso, o aumento do tráfego de vídeo ou à expansão da fibra ótica até casa dos clientes. Tendo em conta isto, 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. Para os operadores é necessário reduzir o custo por bit transportado o máximo possível sem comprometer a qualidade do serviço. É assim importante o planeamento e 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). Investigação científica em ambientes académicos tem vindo a ser realizada com o intuito de desenvolver ferramentas para o dimensionamento das redes de transporte. 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 razoável. Por isto, nesta dissertação foram implementados e validados alguns algoritmos heurísticos com o objetivo de oferecerem soluções muito próximas dos modelos ILP, mas com tempos de processamento inferiores para problemas mais complexos.

### 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 de sinais 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 é apresentado o estado da arte no dimensionamento de redes óticas, com particularidade no modo de transporte opaco. 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 definida uma rede referência com três cenários de tráfego diferentes e uma rede real em que se definiu um cenário de tráfego para testar. E no final, é apresentado os métodos de calcular o custo de uma rede. No capítulo 3 é descrito os algoritmos das heurísticas. No capítulo 4 é mostrado como as heurísticas foram implementadas no simulador de sinais NetXPTO-NetPlanner. É apresentado o diagrama do sistema de alto nível, os parâmetros de entrada, a estrutura dos tipos de sinais e os blocos do sistema. No capítulo 5 é apresentado os resultados tecno-económicos, para as duas redes definidas com os três cenários de tráfego, para os modelos heurísticos desenvolvidos nesta dissertação, para os modelos analíticos e para os ILPs. No caso dos ILPs foi utilizado o trabalho de uma dissertação de mestrado anterior[1]. Os resultados foram obtidos para o modo de transporte opaco sem sobrevivência e foram comparados posteriormente. Finalmente, no capítulo 6 é apresentado as conclusões ao trabalho, bem como sugestões para trabalho futuro.

## 1.3 Principais Conquistas

As principais conquistas obtidas durante a realização desta dissertação foram:

1. Desenvolvimento de algoritmos heurísticos para o dimensionamento de redes óticas opacas.
2. Implementação das heurísticas no simulador de sinais NetXPTO-NetPlanner.
3. Teste e validação bem sucedidos dos algoritmos heurísticos desenvolvidos.

## Capítulo 2

# Dimensionamento de Redes Óticas Opacas

O propósito deste capítulo é introduzir o problema do dimensionamento em redes óticas opacas e definir redes nas quais possam ser testadas as heurísticas desenvolvidas neste trabalho. O capítulo começa com a apresentação das arquiteturas dos nós e das ligações que compõem a rede de transporte ótica. Segue-se a apresentação das topologias de rede possíveis. Posteriormente, é definida uma rede referência e uma rede real (NSFNET) e os seus cenários de tráfego, que serão testados mais à frente. E por fim, é apresentado 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. A gestão de largura de banda é efetuada nos nós da rede. A transmissão entre nós é efetuada nas ligações da rede.

#### 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 apresentado na figura 2.1. 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.

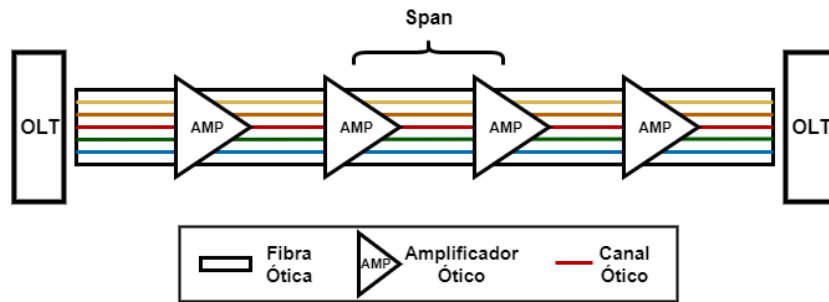


Figura 2.1: Arquitetura das ligações [2].

### 2.1.2 Nós

A estrutura de um nó requer vários equipamentos e é onde são executadas 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: uma *rack*, os *shelves* e os *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 2.2 apresenta o esquema de uma rede 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 modules com diferentes características. Alguns *slots* são reservados para modules de controlo que são necessários para funções de OAM (operação, administração e gestão). Um module contém componente elétricos e óticos, para desempenhar funções bem definidas como encapsulamento, agregação (*grooming*) e atribuição de comprimento de onda. Um module é constituído 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.



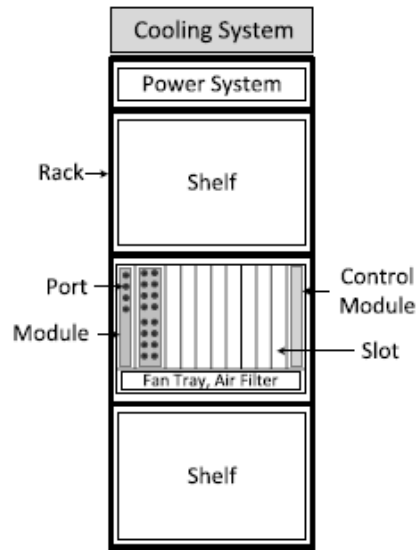


Figura 2.2: Arquitetura do nó [2].

## 2.2 Topologias da Rede

Em termos de dimensionamento de redes óticas existem dois conceitos principais, as topologias física e lógica da rede.

### 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.

### 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). Nesta dissertação apenas se considerou o modo de transporte opaco em que os nós apenas estão conectados aos nós adjacentes. 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 caso do modo de transporte opaco, estudado nesta dissertação, ocorrem conversões OEO (ótico-elétrico-ótico) em todos os nós intermédios desde a origem até ao 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 e o destino, correspondendo a uma ligação física imposta pela fibra ótica.

## 2.3 Rede Referência

Nesta secção é apresentada a rede referência que serviu para testar os algoritmos das heurísticas. 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 2.3 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.

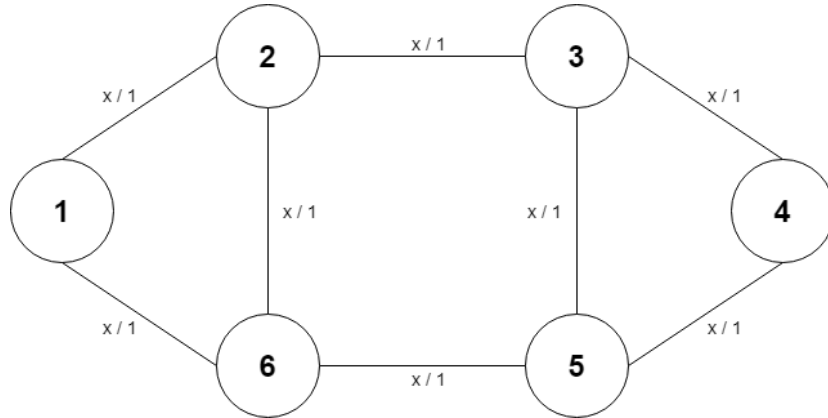


Figura 2.3: Topologia física da rede referência.

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

### 2.3.2 Topologia Lógica

Na figura 2.4 pode se ver a topologia lógica da rede referência para o modo de transporte opaco. É assumido que cada sistema de transmissão suporta 100 canais óticos.

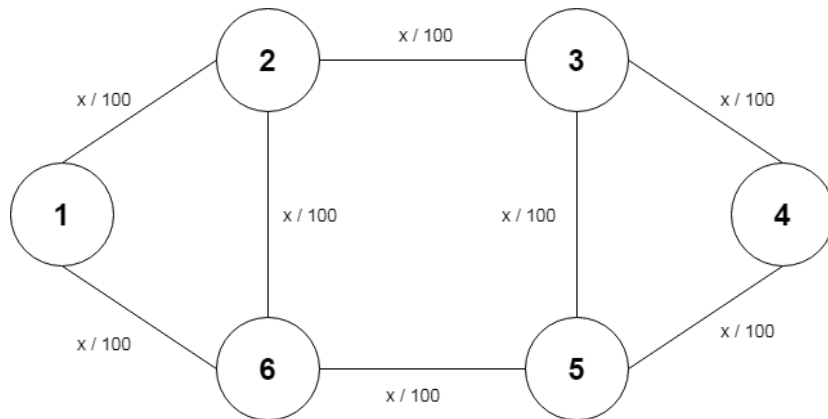


Figura 2.4: Topologia lógica da rede referência.

### 2.3.3 Matrizes de Tráfego

Para testar as heurísticas na rede referência foram assumidos três diferentes 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 obter o 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. E 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.

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

Foram utilizadas 120 ODU0s, 100 ODU1s, 32 ODU2s, 12 ODU3s e 8 ODU4s para este cenário de tráfego baixo.

$$T_1^0 = 120 \times 1.25 = 150 \text{ Gbits/s} \quad T_1^1 = 100 \times 2.5 = 250 \text{ Gbits/s} \quad T_1^2 = 32 \times 10 = 320 \text{ Gbits/s}$$

$$T_1^3 = 12 \times 40 = 480 \text{ Gbits/s} \quad T_1^4 = 8 \times 100 = 800 \text{ Gbits/s}$$

$$T_1 = 150 + 250 + 320 + 480 + 800 = 2000 \text{ Gbits/s}$$

$$T = 1000/2 = \mathbf{1 \text{ Tbit/s}}$$

Em que a variável  $T_1^x$  representa o tráfego unidirecional de cada ODUx, a variável  $T_1$  o tráfego unidirecional total e a variável  $T$  representa o tráfego bidirecional total.

### 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.

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

Foram utilizadas 600 ODU0s, 500 ODU1s, 160 ODU2s, 60 ODU3s e 40 ODU4s para este cenário de tráfego médio.

$$T_1^0 = 600 \times 1.25 = 750 \text{ Gbits/s} \quad T_1^1 = 500 \times 2.5 = 1250 \text{ Gbits/s} \quad T_1^2 = 160 \times 10 = 1600 \text{ Gbits/s}$$

$$T_1^3 = 60 \times 40 = 2400 \text{ Gbits/s} \quad T_1^4 = 40 \times 100 = 4000 \text{ Gbits/s}$$

$$T_1 = 750 + 1250 + 1600 + 2400 + 4000 = 10000 \text{ Gbits/s}$$

$$T = 10000/2 = \mathbf{5 \text{ Tbits/s}}$$

Em que a variável  $T_1^x$  representa o tráfego unidirecional de cada ODU $_x$ , a variável  $T_1$  o tráfego unidirecional total e a variável  $T$  representa o tráfego bidirecional total.

### 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.

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

Foram utilizadas 1200 ODU0s, 1000 ODU1s, 320 ODU2s, 120 ODU3s e 80 ODU4s para este cenário de tráfego elevado.

$$T_1^0 = 1200 \times 1.25 = 1500 \text{ Gbits/s} \quad T_1^1 = 1000 \times 2.5 = 2500 \text{ Gbits/s}$$

$$T_1^2 = 320 \times 10 = 3200 \text{ Gbits/s} \quad T_1^3 = 120 \times 40 = 4800 \text{ Gbits/s}$$

$$T_1^4 = 80 \times 100 = 8000 \text{ Gbits/s}$$

$$T_1 = 1500 + 2500 + 3200 + 4800 + 8000 = 20000 \text{ Gbits/s}$$

$$T = 20000/2 = 10 \text{ Tbits/s}$$

Em que a variável  $T_1^x$  representa o tráfego unidirecional de cada ODUx, a variável  $T_1$  o tráfego unidirecional total e a variável  $T$  representa o tráfego bidirecional total.

## 2.4 Rede Real

Nesta secção é apresentada a rede real à qual foram aplicados os algoritmos das heurísticas para o modo de transporte opaco sem sobrevivência. 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. A topologia desta rede pode ser vista na figura 2.5.

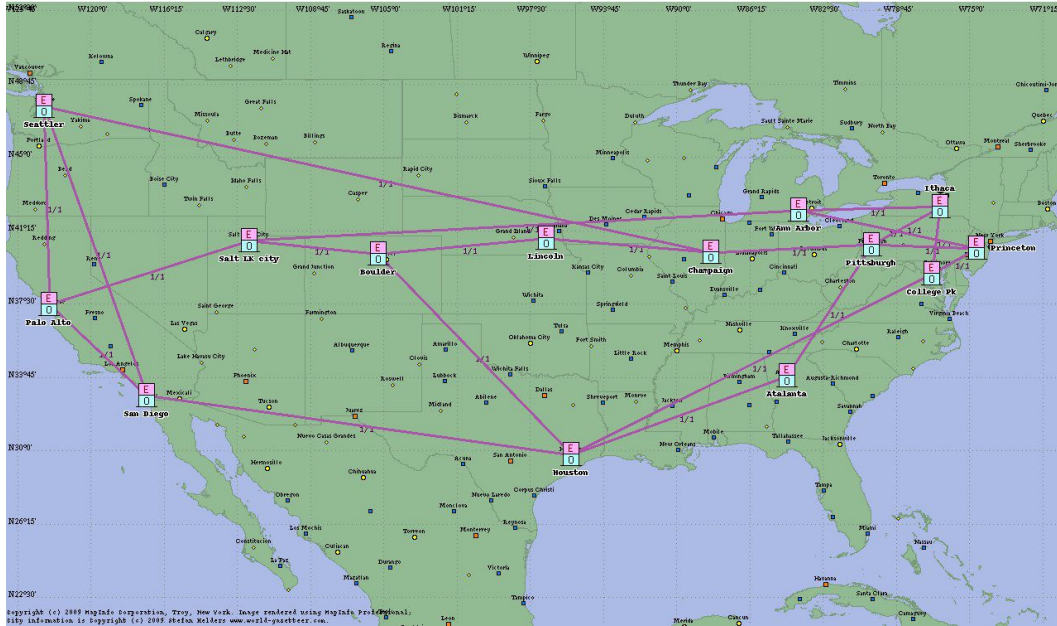


Figura 2.5: National Science Foundation Network (NSFNET) [3].

Esta rede é composta por 14 nós e 21 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, resultando da divisão do número de ligações por nó pelo número total de nós. Estes parâmetros podem ser consultados na tabela 2.1.

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
$\langle \text{len} \rangle$	Comprimento Médio da Ligação (km)	1086

Tabela 2.1: 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 2.6, bem como a atribuição dos seus 14 nós.

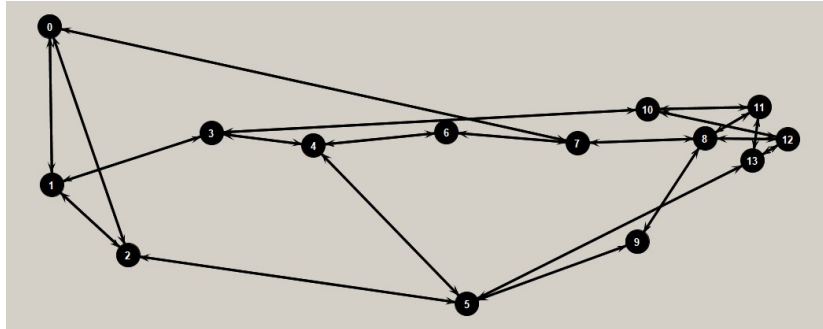


Figura 2.6: Topologia física e lógica da rede real NSFNET.

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



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

### 2.4.2 Matrizes de Tráfego

Para validar as heurísticas considerou-se um cenário com tráfego de 5 Tbits/s para a rede real. 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.

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

$$T_1^1 = 1536 \times 1.25 = 1920 \text{ Gbits/s}$$

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

$$T_1^2 = 440 \times 10 = 4\,400 \text{ Gbits/s}$$

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

$$T_1^3 = 92 \times 40 = 3\,680 \text{ Gbits/s}$$

$$T_1 = 1920 + 0 + 4\,400 + 3\,680 + 0 = 10 \text{ Tbits/s}$$

$$T = 10000/2 = \mathbf{5 \text{ Tbits/s}}$$

Em que a variável  $T_1^x$  representa o tráfego unidirecional de cada ODUx, a variável  $T_1$  o tráfego unidirecional total e a variável  $T$  representa o tráfego bidirecional total.

## 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 2.2

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 2.2: 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  $\lambda_{nj}$  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 2.3 representa os custos dos equipamentos assumidos no âmbito desta dissertação.

Equipamento	Símbolo	Custo
OLT sem transponderes	$\gamma_0^{OLT}$	15 000 €
Transponder	$\gamma_1^{OLT}$	5 000 €
Amplificador ótico unidirecional	$c^R$	2 000 €
EXC	$\gamma_{e0}$	10 000 €
Portas EXC	$\gamma_{e1}$	100 €/Gbit/s

Tabela 2.3: 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  $\xi$  é o coeficiente de agregação (grooming),  $T_1$  é o tráfego unidirecional total e  $\tau$  é bit rate de linha[1].

Como esta dissertação aborda o modo de transporte opaco sem sobrevivência, é assumido que o coeficiente de agregação (grooming)  $\xi$  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 do EXC em euros
- $\gamma_{e1} \rightarrow$  Custo 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.

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





## Capítulo 3

# Heurísticas

Os algoritmos heurísticos são uma solução rápida para resolver um problema. 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. Portanto, neste capítulo, algoritmos heurísticos são propostos com o objetivo de minimizar os custos totais da rede. 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 3.3.1 é proposta a estratégia de agregação das demandas.

### 3.1 Escalonamento (*Scheduling*)

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 e na forma ascendente do tipo ODU0 para ODU4. Em ambas as ordenações, o algoritmo começa por procurar nas matrizes das demandas ODU, da esquerda para a direita, ou seja do primeiro nó até ao último nó da rede.

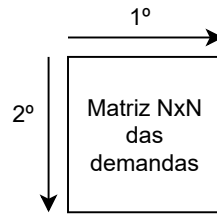


Figura 3.1: Ordem que é seguida na ordenação das demandas.

### 3.2 Encaminhamento (*Routing*)

Encaminhamento é o processo de selecionar na rede um caminho entre um nó origem e um nó destino para a demanda. Para selecionar o caminho é importante minimizar o custo da rede. Com esse objetivo foi determinado neste algoritmo que as demandas seriam encaminhadas sempre pelo caminho mais curto possível. 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.

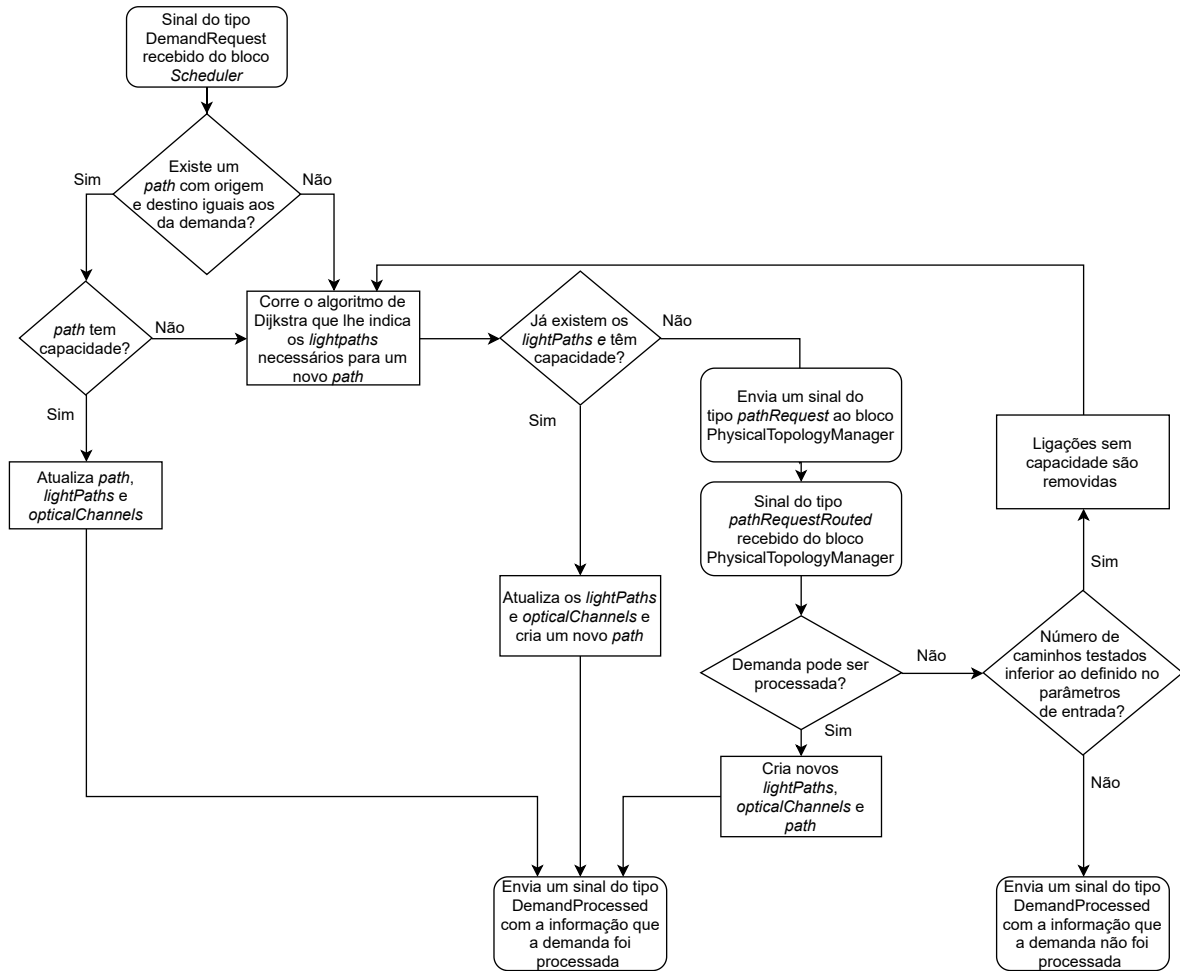


Figura 3.2: Descrição do algoritmo de encaminhamento.

### 3.3 Atribuição do Comprimento de Onda (*Wavelength Assignment*)

#### 3.3.1 Agregação (*Grooming*)



## Capítulo 4

# Implementação NetXPTO

Os algoritmos das heurísticas foram implementados num simulador de sinais 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>.

Este capítulo está dividido em 5 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.

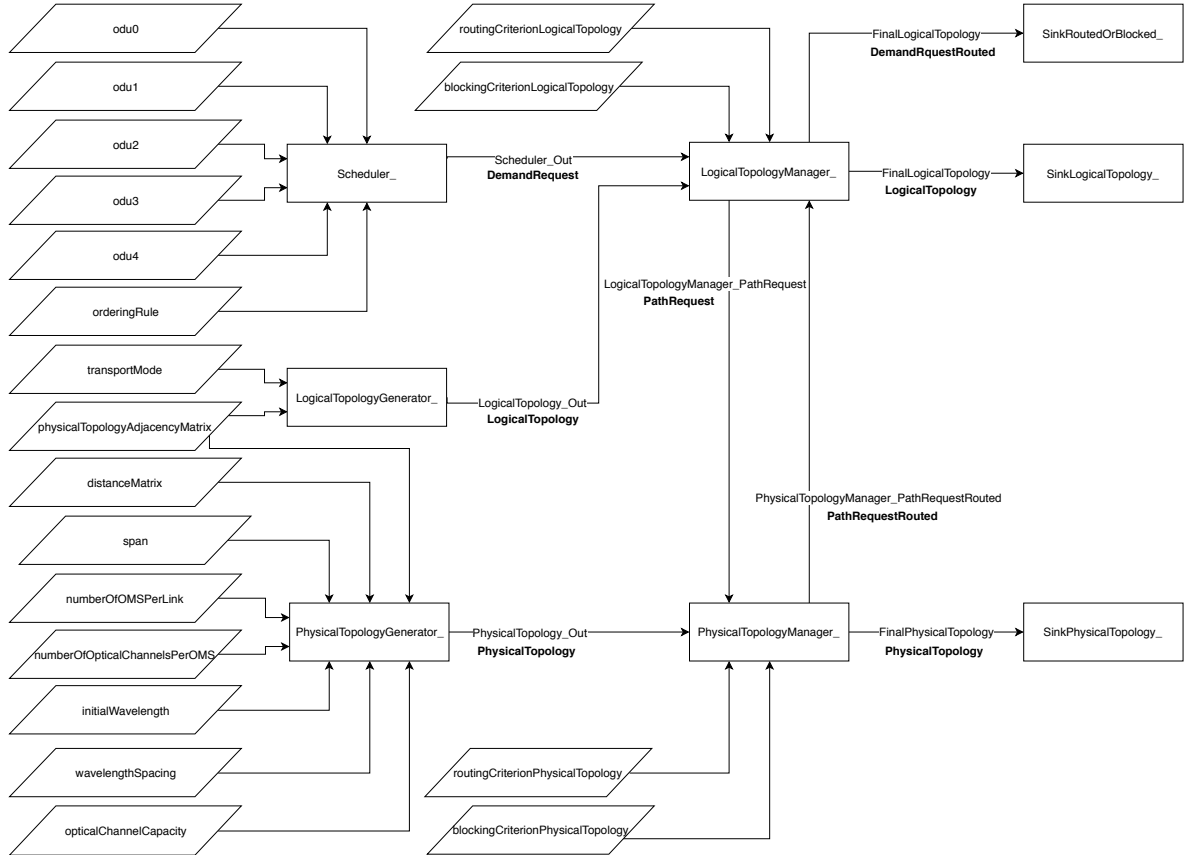


Figura 4.1: Diagrama de alto nível do sistema implementado no simulador NetXPTO-NetPlanner.

## 4.2 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.

### 4.2.1 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
```



### 4.3 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.

#### 4.3.1 LogicalTopology

O tipo de sinal LogicalTopology é referente à camada lógica da rede. É composto por 4 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...P-1	1...N	1...N	0...OC	1...LP	[lp <sub>0</sub> , lp <sub>1</sub> , ...]

Tabela 4.2: path

##### 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...LP-1	1...N	1...N	1...OC	1...OCH	[och <sub>0</sub> , och <sub>1</sub> , ...]

Tabela 4.3: `lightPath`

#### **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...Och-1	1...N	1...N	1...W	1...OC	0...D	[d <sub>0</sub> , d <sub>1</sub> , ...]

Tabela 4.4: `opticalChannel`

### 4.3.2 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.

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

#### **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	OchL	[1550, 1550.8, ...]	[0/1, ...]	0...A
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
L-1	1...N	1...N	OchL	[1550 1550.8, ...]	[0/1, ...]	0...A

Tabela 4.5: opticalMultiplexSection

### 4.3.3 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

### 4.3.4 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...R-1	1...N	1...N	0...N-2	[1, 2, ...]

Tabela 4.7: PathRequest

### 4.3.5 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...R-1	true ou false	1...LP

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, ...]	1...W
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Tabela 4.9: lightPathsTable

### 4.3.6 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	pathsIndex
0...D-1	true ou false	0...P-1

Tabela 4.10: DemandRequestRouted

## 4.4 Blocos do Sistema

### 4.4.1 Scheduler

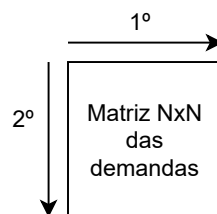


Figura 4.2: Ordem que é seguida na ordenação das demandas.

## 4.4.2 LogicalTopologyGenerator

## 4.4.3 PhysicalTopologyGenerator

## 4.4.4 LogicalTopologyManager

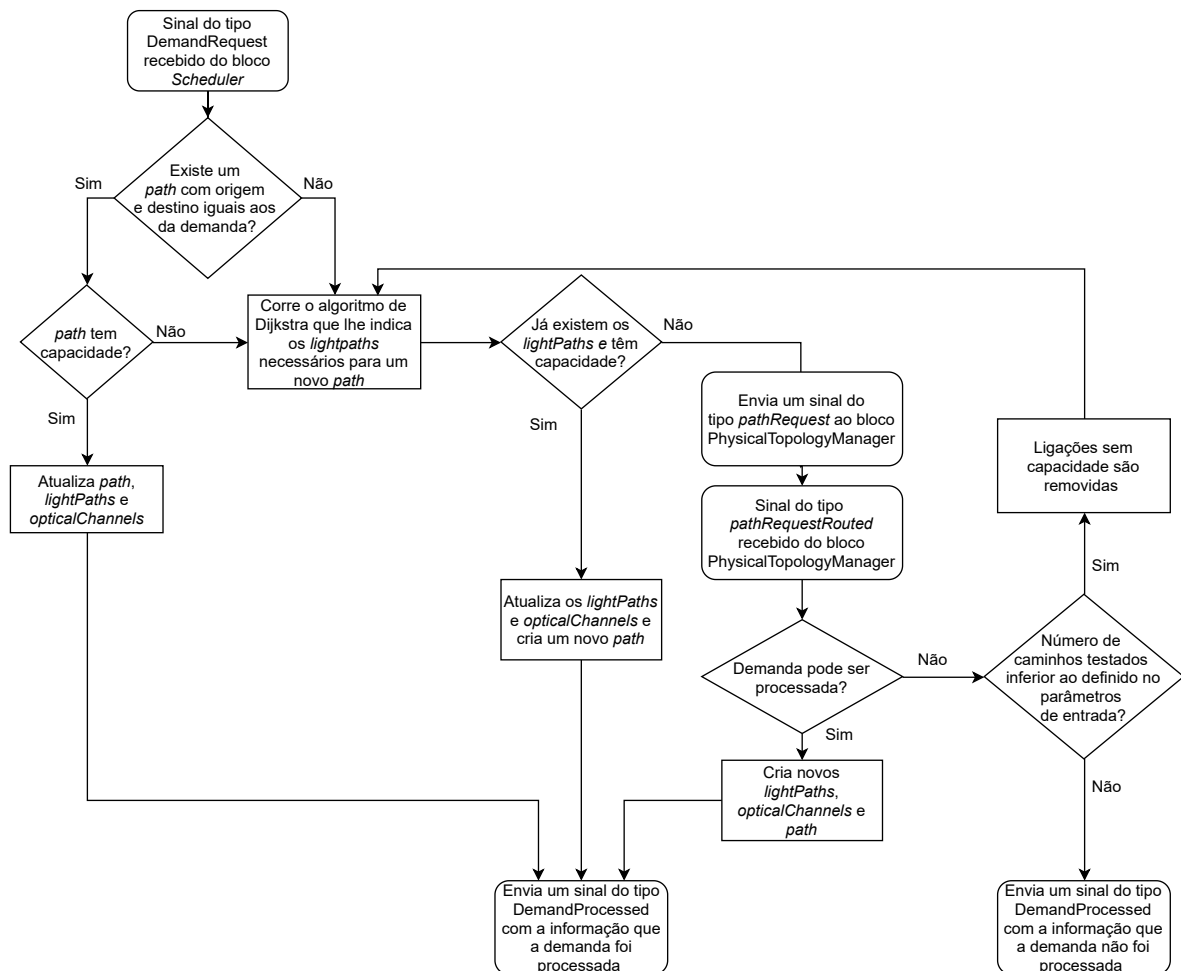


Figura 4.3: Fluxograma do bloco LogicalTopologyManager.

#### 4.4.5 PhysicalTopologyManager

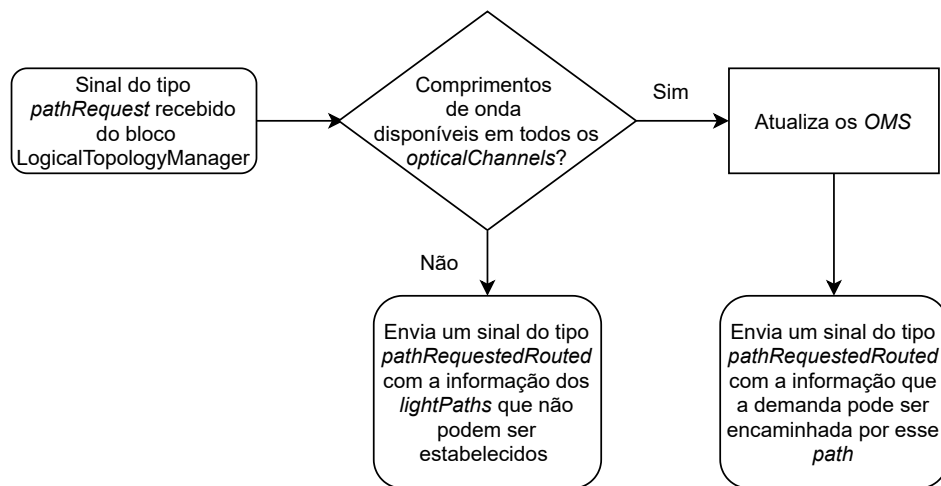


Figura 4.4: Fluxograma do bloco PhysicalTopologyManager.

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 Final

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.



## Capítulo 5

# Resultados

O propósito deste capítulo é apresentar e analisar os resultados obtidos para o CAPEX, considerando o modo de transporte opaco e sem sobrevivência, que foi motivo de estudo nesta dissertação. Foram obtidos resultados para três diferentes modelos: modelo analítico, ILP e heurísticas. Enquanto que os resultados para as heurísticas foram obtidos através dos algoritmos desenvolvidos nesta dissertação, os resultados dos ILPs foram obtidos com base num trabalho de dissertação anterior [1].

O capítulo está dividido em duas secções. A primeira secção é referente à rede referência, enquanto que a segunda secção é referente à rede real. Ambas as secções iniciam-se com a apresentação dos resultados obtidos para os diferentes modelos e considerando os três tráfegos apresentados no capítulo 2 e terminam com uma análise comparativa aos mesmos.

### 5.1 Rede Referência

Nesta secção são apresentados os resultados obtidos para a rede referência apresentada no capítulo 2, para os diferentes tráfegos considerados e é realizada uma análise comparativa aos mesmos.

#### 5.1.1 Modelo Analítico

##### Tráfego Baixo

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

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

$$N^R = 16$$

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

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

$$< P_{exc} > = 3.333 \times 1.533 \quad < P_{exc} > = 5.1095$$

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

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

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

### Tráfego Médio

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

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

$$N^R = 16$$

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

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

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

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

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

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

**Tráfego Elevado**

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

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

$$N^R = 16$$

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

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

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

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

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

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

**5.1.2 ILP**

Resultados obtidos através do modelo ILP, desenvolvido numa dissertação anterior [1], para o modo de transporte opaco sem sobrevivência, para os três cenários de tráfego e considerando o modelo de custos apresentados no capítulo 2.

**Tráfego Baixo**

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

Tabela 5.1: CAPEX para o cenário de tráfego baixo usando ILPs.

**Tráfego Médio**

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

Tabela 5.2: CAPEX para o cenário de tráfego médio usando ILPs.

**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: CAPEX para o cenário de tráfego elevado usando ILPs.

**5.1.3 Heurísticas**

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

**Tráfego Baixo**

Informação sobre as ligações		
Ligação Bidireccional	Canais Óticos	Amplificadores
Node 1 <->Node 2	2	3
Node 1 <->Node 6	1	1
Node 2 <->Node 3	3	3
Node 2 <->Node 6	3	1
Node 3 <->Node 4	1	2
Node 3 <->Node 5	2	0
Node 4 <->Node 5	1	1
Node 5 <->Node 6	3	5

Tabela 5.4: Informação sobre as ligações para o cenário de baixo tráfego.

Informação sobre os nós					
		Parte Elétrica		Parte Ótica	
Nó	Grau do nó	Portas tributárias	Transponders	Portas Add	Portas de linha
1	2	58	3	0	0
2	3	46	8	0	0
3	3	36	6	0	0
4	2	40	2	0	0
5	3	48	6	0	0
6	3	44	7	0	0

Tabela 5.5: Informação sobre os nós para o cenário de baixo tráfego.

CAPEX					
		Quantidade	Preço Unitário	Custo	Total
Custo das Ligações	OLTs		16	15 000 €	464 000 €
	Canais Óticos		32	5000 €	
	Amplificadores		32	2000 €	
Custo dos Nós	Parte Elétrica	EXCs	6	10 000 €	580 000 €
		Portas ODU0	120	100 €/Gbit/s	
		Portas ODU1	100	100 €/Gbit/s	
		Portas ODU2	32	100 €/Gbit/s	
		Portas ODU3	12	100 €/Gbit/s	
		Portas ODU4	8	100 €/Gbit/s	
	Transponders	40	100 €/Gbit/s		
	Parte Ótica	OXC's	0	20 000 €	
		Portas OXC	0	2 500 €	
Custo Total da Rede					1 044 000 €

Tabela 5.6: CAPEX para o cenário de baixo tráfego.

## Tráfego Médio

Informação sobre as ligações		
Ligação Bidireccional	Canais Óticos	Amplificadores
Node 1 <->Node 2	7	3
Node 1 <->Node 6	2	1
Node 2 <->Node 3	11	3
Node 2 <->Node 6	15	1
Node 3 <->Node 4	5	2
Node 3 <->Node 5	8	0
Node 4 <->Node 5	3	1
Node 5 <->Node 6	13	5

Tabela 5.7: Informação sobre as ligações para o cenário de médio tráfego.

Informação sobre os nós					
		Parte Elétrica		Parte Ótica	
Nó	Grau do nó	Portas tributárias	Transponders	Portas Add	Portas de linha
1	2	290	9	0	0
2	3	230	33	0	0
3	3	180	24	0	0
4	2	200	8	0	0
5	3	240	24	0	0
6	3	220	30	0	0

Tabela 5.8: Informação sobre os nós para o cenário de médio tráfego.

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: CAPEX para o cenário de médio tráfego.

### Tráfego Elevado

Informação sobre as ligações		
Ligação Bidireccional	Canais Óticos	Amplificadores
Node 1 <->Node 2	13	3
Node 1 <->Node 6	4	1
Node 2 <->Node 3	22	3
Node 2 <->Node 6	30	1
Node 3 <->Node 4	9	2
Node 3 <->Node 5	16	0
Node 4 <->Node 5	5	1
Node 5 <->Node 6	26	5

Tabela 5.10: Informação sobre as ligações para o cenário de elevado tráfego.



Informação sobre os nós					
		Parte Elétrica		Parte Ótica	
Nó	Grau do nó	Portas tributárias	Transponders	Portas Add	Portas de Linha
1	2	580	17	0	0
2	3	460	65	0	0
3	3	360	47	0	0
4	2	400	14	0	0
5	3	480	47	0	0
6	3	440	60	0	0

Tabela 5.11: Informação sobre os nós para o cenário de elevado tráfego.

CAPEX						
		Quantidade	Preço Unitário	Custo	Total	
Custo das Ligações	OLTs		16	15 000 €	1 554 000 €	
	Canais Óticos		250	5000 €		
	Amplificadores		32	2000 €		
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 €	
	Parte Ótica	Transponders	250	100 €/Gbit/s	2 500 000 €	
		OXCs	0	20 000 €	0 €	
		Portas OXC	0	2 500 €	0 €	
Custo Total da Rede					6 114 000 €	

Tabela 5.12: CAPEX para o cenário de elevado tráfego.

**5.1.4 Análise Comparativa**

		Heurísticas	Modelo Analítico	ILP
<b>Tráfego Baixo</b>	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%)
<b>Tráfego Médio</b>	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%)
<b>Tráfego Elevado</b>	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.

## 5.2 Rede Real

Nesta secção são apresentados os resultados obtidos para a rede real NSFNET apresentada no capítulo 2, para os diferentes tráfegos considerados e é realizada uma análise comparativa aos mesmos.

### 5.2.1 Modelo Analítico

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

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

$$N^R = 206$$

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

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

$$< P_{exc} > = 7.1429 \times 2.14 \quad < P_{exc} > = 15.2858$$

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

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

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

## 5.2.2 ILP

## 5.2.3 Heurísticas

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

Tabela 5.14: 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 €	630 000 €	2 669 000 €
	Canais Óticos		243	5000 €	1 215 000 €	
	Amplificadores		412	2000 €	824 000 €	
Custo dos Nós	Parte Elétrica	EXCs	14	10 000 €	140 000 €	3 570 000 €
		Portas ODU0	1536	100 €/Gbit/s	192 000 €	
		Portas ODU1	0	100 €/Gbit/s	0 €	
		Portas ODU2	440	100 €/Gbit/s	440 000 €	
		Portas ODU3	92	100 €/Gbit/s	368 000 €	
		Portas ODU4	0	100 €/Gbit/s	0 €	
	Transponders	243	100 €/Gbit/s	2 430 000 €		
	Parte Ótica	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 €	630 000 €	2 754 000 €
	Canais Óticos		260	5000 €	1 300 000 €	
	Amplificadores		412	2000 €	824 000 €	
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 €	
	Parte Ótica	Transponders	260	100 €/Gbit/s	2 600 000 €	
		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 €	
	Parte Ótica	Transponders	271	100 €/Gbit/s	2 710 000 €	
		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.

### 5.2.4 Análise Comparativa

#### Custo económico

		Heurísticas (descendente)	Heurísticas (ascendente)	Modelo Analítico	ILP
<b>Tráfego Baixo</b>	Custo Ligações	2 624 000 €	2 669 000 € (+1,7%)	2 523 392 € (-8,3%)	Não obtido
	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 dos resultados das heurísticas com o modelo analítico e o ILP .

#### Tempo de execução

	Heurísticas	ILP
<b>Tráfego Baixo</b>	15 s	Sem resultados após 2 semanas em execução

Tabela 5.19: Comparação do tempo de execução das heurísticas com o ILP.

## 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.