



Élio Tiago  
Sousa Coelho

Desenvolvimento de Heurísticas para o  
Dimensionamento de Redes Óticas Opacas

Development of Heuristics for Opaque Optical  
Networks Dimensioning





**Élio Tiago  
Sousa Coelho**

## **Desenvolvimento de Heurísticas para o Dimensionamento de Redes Óticas Opacas**

### **Development of Heuristics for Opaque Optical Networks Dimensioning**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do 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 Morais, 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.





o júri / the jury

presidente / president

???? ???? ???? ????  
 ????? ????? ?????

vogais / examiners committee

???? ???? ????  
 ???? ???? ???? ????

**Armando Humberto Moreira Nolasco Pinto**  
Professor Associado da Universidade de Aveiro









agradecimientos /  
acknowledgements



Palavras-chave

Resumo



**Keywords**

**Abstract**



# Índice

Índice	i
Lista de figuras	iii
Lista de tabelas	v
<b>1 Introdução</b>	<b>2</b>
1.1 Motivação . . . . .	3
1.2 Objetivos . . . . .	3
1.3 Estrutura da dissertação . . . . .	3
<b>2 Dimensionamento de Redes Óticas Opacas</b>	<b>4</b>
2.1 Arquitetura da Rede . . . . .	4
2.1.1 Nós . . . . .	5
2.1.2 Ligações . . . . .	5
2.2 Topologias da Rede . . . . .	6
2.2.1 Topologia Física . . . . .	6
2.2.2 Topologia Lógica . . . . .	6
2.3 Rede Referência . . . . .	6
2.3.1 Topologia Física . . . . .	6
2.3.2 Topologia Lógica . . . . .	7
2.3.3 Matrizes de Tráfego . . . . .	7
2.4 Rede Real . . . . .	10
2.4.1 Topologia Física . . . . .	11
2.4.2 Matrizes de Tráfego . . . . .	13
<b>3 Heurísticas</b>	<b>17</b>
3.1 Algoritmos das Heurísticas . . . . .	17
3.1.1 Escalonamento ( <i>Scheduling</i> ) . . . . .	17
3.1.2 Topologia Lógica . . . . .	17
3.1.3 Roteamento ( <i>Routing</i> ) . . . . .	17

3.1.4	Atribuição de Comprimento de Onda ( <i>Wavelength Assignment</i> ) . . . . .	17
3.1.5	Encaminhamento ( <i>Grooming</i> ) . . . . .	17
<b>4</b>	<b>Implementação NetXPTO</b>	<b>19</b>
4.1	Diagrama do Sistema . . . . .	19
4.2	Parâmetros de Entrada do Sistema . . . . .	20
4.2.1	Formato do Ficheiro de Entrada . . . . .	22
4.3	Estrutura dos Tipos de Sinais do Sistema . . . . .	24
4.3.1	LogicalTopology . . . . .	24
4.3.2	PhysicalTopology . . . . .	25
4.3.3	DemandRequest . . . . .	26
4.3.4	PathRequest . . . . .	26
4.3.5	PathRequestRouted . . . . .	26
4.3.6	DemandRequestRouted . . . . .	27
4.4	Blocos do Sistema . . . . .	27
4.4.1	Scheduler . . . . .	27
4.4.2	LogicalTopologyGenerator . . . . .	28
4.4.3	PhysicalTopologyGenerator . . . . .	28
4.4.4	LogicalTopologyManager . . . . .	28
4.4.5	PhysicalTopologyManager . . . . .	29
4.5	Relatório Final . . . . .	31
<b>5</b>	<b>Resultados</b>	<b>33</b>
5.1	Rede Referência . . . . .	33
5.1.1	Modelo Analítico . . . . .	33
5.1.2	ILP . . . . .	35
5.1.3	Heurísticas . . . . .	37
5.1.4	Análise Comparativa . . . . .	42
5.2	Rede Real . . . . .	43
5.2.1	Modelo Analítico . . . . .	43
5.2.2	ILP . . . . .	44
5.2.3	Heurísticas . . . . .	44
5.2.4	Análise Comparativa . . . . .	46
<b>6</b>	<b>Conclusões e trabalho futuro</b>	<b>47</b>
6.1	Conclusões . . . . .	47
6.2	Trabalho futuro . . . . .	47



# Lista de figuras

2.1	Arquitetura do nó. [] . . . . .	5
2.2	Topologia física da rede referência. . . . .	6
2.3	Topologia lógica da rede referência. . . . .	7
2.4	National Science Foundation Network (NSFNET) []. . . . .	11
2.5	Topologia Física. . . . .	12
4.1	Diagrama do Sistema. . . . .	20
4.2	Exemplo do ficheiro de entrada. . . . .	23
4.3	Ordem que é seguida na ordenação das demandas. . . . .	27
4.4	Fluxograma do bloco LogicalTopologyManager. . . . .	28
4.5	Fluxograma do bloco PhysicalTopologyManager. . . . .	29
4.6	Exemplo de informação sobre as ligações no relatório final. . . . .	32
4.7	Exemplo de informação sobre os nós no relatório final. . . . .	32



# Lista de tabelas

2.1	Parâmetros da rede real MSFNET. . . . .	13
4.1	Parâmetros de entrada do sistema . . . . .	21
4.2	path . . . . .	24
4.3	lightPath . . . . .	25
4.4	opticalChannel . . . . .	25
4.5	opticalMultiplexSection . . . . .	26
4.6	DemandRequest . . . . .	26
4.7	PathRequest . . . . .	26
4.8	pathInformation . . . . .	27
4.9	lightPathsTable . . . . .	27
4.10	DemandRequestRouted . . . . .	27
4.11	Parâmetros de entrada e variáveis de estado de cada bloco . . . . .	30
4.12	Sinais de entrada e de saída de cada bloco . . . . .	31
5.1	CAPEX para o cenário de tráfego baixo usando ILPs. . . . .	36
5.2	CAPEX para o cenário de tráfego médio usando ILPs. . . . .	36
5.3	CAPEX para o cenário de tráfego elevado usando ILPs. . . . .	37
5.4	Informação sobre as ligações para o cenário de baixo tráfego. . . . .	37
5.5	Informação sobre os nós para o cenário de baixo tráfego. . . . .	38
5.6	CAPEX para o cenário de baixo tráfego. . . . .	38
5.7	Informação sobre as ligações para o cenário de médio tráfego. . . . .	39
5.8	Informação sobre os nós para o cenário de médio tráfego. . . . .	39
5.9	CAPEX para o cenário de médio tráfego. . . . .	40
5.10	Informação sobre as ligações para o cenário de elevado tráfego. . . . .	40
5.11	Informação sobre os nós para o cenário de elevado tráfego. . . . .	41
5.12	CAPEX para o cenário de elevado tráfego. . . . .	41
5.13	Comparação dos valores do CAPEX entre os diferentes modelos para os diferentes cenários de tráfego. . . . .	42

5.14 CAPEX para o rede real no modo de transporte opaco com ordenação descendente e critério de routing saltos. . . . .	44
5.15 CAPEX para o rede real no modo de transporte opaco com ordenação ascendente critério de routing . . . . .	44
5.16 CAPEX para o rede real no modo de transporte opaco com ordenação descendente e critério de routing km. . . . .	45
5.17 CAPEX para o rede real no modo de transporte opaco com ordenação ascendente e critério de routing km. . . . .	45
5.18 Comparação dos resultados das heurísticas com o modelo analítico e o ILP . . .	46
5.19 Comparação do tempo de execução das heurísticas com o ILP. . . . .	46



## Chapter 1

# Introdução

## 1.1 Motivação

## 1.2 Objetivos

Esta dissertação pretendeu alcançar cinco objetivos principais:

1. Definir uma rede referência e três cenários de tráfego para testes.
2. Definir uma rede real e três cenários de tráfego para testes.
3. Desenvolver algoritmos heurísticos para as redes de transporte opacas e sem sobrevivência.
4. Implementar no simulador de sinais NetXPTO-NetPlanner.
5. Realizar comparações tecno-económicas entre os modelos heurísticos, os modelos analíticos e os ILPs.

## 1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está organizada em seis capítulos. 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 e as topologias da rede. É definido uma rede referência e uma rede real, ambas com três cenários de tráfego diferentes. No capítulo 3, é descrito os algoritmos das heurísticas. No capítulo 4, foi mostrado como as heurísticas foram implementadas no simulador de sinais NetXPTO-NetPlanner. É apresentado o diagrama do sistema de uma forma global, os parâmetros de entrada, a estrutura dos tipos de sinais e os blocos do sistema. No capítulo 5, foi 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 anterior. Os resultados foram obtidos para o modo de transporte opaco sem sobrevivência e foram comparados posteriormente neste capítulo. Finalmente, no capítulo 6, é apresentado as conclusões ao trabalho, bem como sugestões para trabalho futuro.

## Chapter 2

# Dimensionamento de Redes Óticas Opacas

O propósito deste capítulo é apresentar o estado da arte no dimensionamento de redes óticas 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. E por fim, é definido uma rede referência e uma rede real (NSFNET) e os seus cenários de tráfego, para serem testados mais à frente.

### 2.1 Arquitetura da Rede

Nesta secção é apresentada a arquitetura de uma rede de transporte ótica.



### 2.1.1 Nós

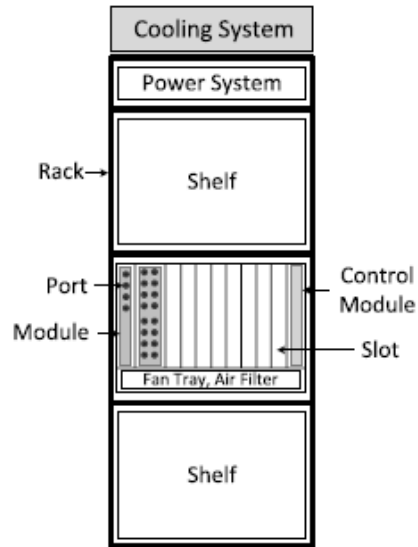
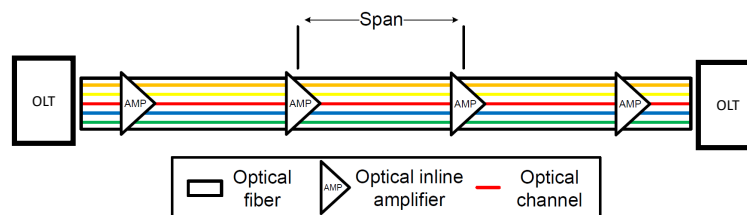


Figure 2.1: Arquitetura do nó. [1].

### 2.1.2 Ligações



## 2.2 Topologias da Rede

### 2.2.1 Topologia Física

### 2.2.2 Topologia Lógica

## 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 2.2 pode se ver a topologia física da rede referência escolhida. Esta rede suporta 1 sistema de transmissão bidirecional entre nós adjacentes. A rede consiste em 6 nós e em 8 ligações bidireccionais. Abaixo é apresentada a matriz com o comprimento de cada ligação entre os respetivos nós.

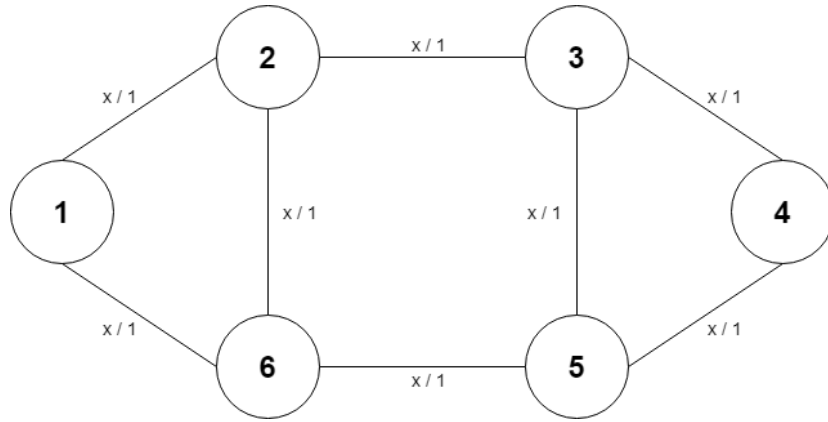


Figure 2.2: Topologia física da rede referência.

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

### 2.3.2 Topologia Lógica

Na figura 2.3 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.

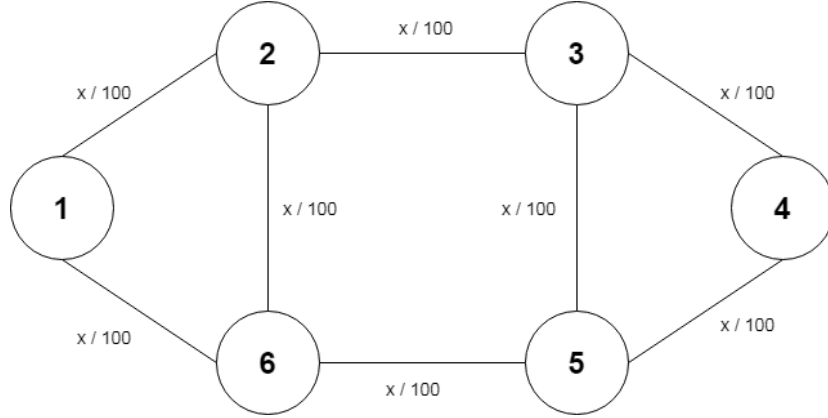


Figure 2.3: Topologia lógica da rede referência.

### 2.3.3 Matrizes de Tráfego

Foram assumidos três diferentes cenários de tráfego para a rede referência. 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 à ODU0, ODU1, ODU2, ODU3 e ODU4 com diferentes taxas de bits. 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. De 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.

$$ODU0 = \begin{bmatrix} 0 & 10 & 2 & 6 & 2 & 6 \\ 10 & 0 & 0 & 2 & 10 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 2 & 8 & 2 \\ 6 & 2 & 2 & 0 & 2 & 2 \\ 2 & 10 & 8 & 2 & 0 & 6 \\ 6 & 0 & 2 & 2 & 6 & 0 \end{bmatrix} \quad ODU1 = \begin{bmatrix} 0 & 4 & 8 & 4 & 0 & 10 \\ 4 & 0 & 0 & 6 & 2 & 2 \\ 8 & 0 & 0 & 2 & 2 & 0 \\ 4 & 6 & 2 & 0 & 2 & 6 \\ 0 & 2 & 2 & 2 & 0 & 2 \\ 10 & 2 & 0 & 6 & 2 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 ODU2 &= \begin{bmatrix} 0 & 2 & 2 & 2 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 2 & 2 & 0 \\ 2 & 0 & 2 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 2 & 2 & 2 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \end{bmatrix} & ODU3 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 ODU4 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 2 & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

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.

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

$$\begin{aligned}
 ODU2 &= \begin{bmatrix} 0 & 10 & 10 & 10 & 0 & 0 \\ 10 & 0 & 0 & 0 & 10 & 0 \\ 10 & 0 & 0 & 10 & 10 & 0 \\ 10 & 0 & 10 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 10 & 10 & 10 & 0 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 10 & 0 \end{bmatrix} & ODU3 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 & 0 & 10 \\ 0 & 10 & 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 ODU4 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 \\ 0 & 10 & 0 & 0 & 10 & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

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.

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

$$\begin{aligned}
 ODU2 &= \begin{bmatrix} 0 & 20 & 20 & 20 & 0 & 0 \\ 20 & 0 & 0 & 0 & 20 & 0 \\ 20 & 0 & 0 & 20 & 20 & 0 \\ 20 & 0 & 20 & 0 & 20 & 0 \\ 0 & 20 & 20 & 20 & 0 & 20 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 20 & 0 \end{bmatrix} & ODU3 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 20 & 0 & 0 & 20 \\ 0 & 20 & 0 & 0 & 20 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 20 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 20 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 ODU4 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 20 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 20 \\ 0 & 20 & 0 & 0 & 20 & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

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

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

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

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

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

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

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 MSFNET (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 2.4.

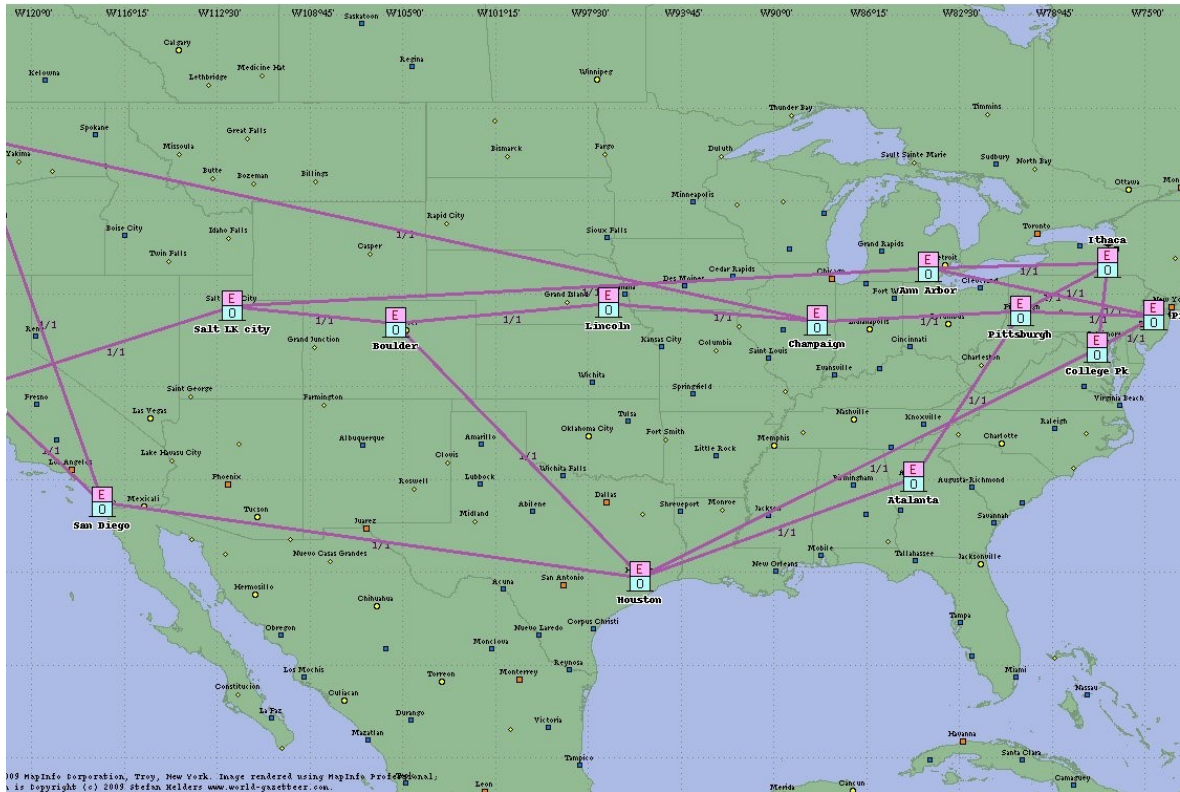


Figure 2.4: National Science Foundation Network (NSFNET) [].

### 2.4.1 Topologia Física

Na figura 2.5 pode-se ver a topologia física da rede NSFNET e como foram atribuídos os seus 14 nós.

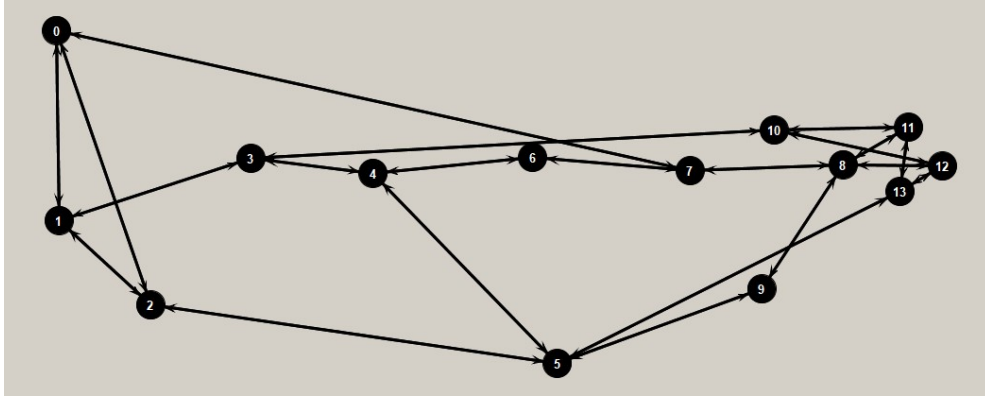


Figure 2.5: Topologia Física.

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

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



Na tabela 2.1 são apresentados todos os parâmetros da rede.

Variável	Descrição	Valor
N	Número de Nós	14
L	Número de Ligações Bidireccionais	21
$\langle \delta \rangle$	Grau 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 <i>Backup</i>	3.60
$\langle len \rangle$	Comprimento médio da ligação (km)	1086

Table 2.1: Parâmetros da rede real MSFNET.

## 2.4.2 Matrizes de Tráfego

Para testar a rede real, foram considerados três diferentes cenários de tráfego. Um primeiro cenário com tráfego baixo (5 Tbits/s).

### Tráfego Baixo

Para este cenário considerou-se que o tráfego total é de 5 Tbits/s. Abaixo é apresentado as matrizes das ODU's para a obtenção desse tráfego. Foram consideradas 1536 ODU0, 0 ODU1, 440 ODU2, 92 ODU3 e 0 ODU4. Dado tratar-se de tráfego bidirecional, as matrizes são simétricas.

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

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

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

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

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

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

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

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

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.

**Tráfego Médio**

**Tráfego Elevado**



## Chapter 3

# Heurísticas

### 3.1 Algoritmos das Heurísticas

#### 3.1.1 Escalonamento (*Scheduling*)

#### 3.1.2 Topologia Lógica

#### 3.1.3 Roteamento (*Routing*)

#### 3.1.4 Atribuição de Comprimento de Onda ( *Wavelength Assignment* )

#### 3.1.5 Encaminhamento ( *Grooming* )



## Chapter 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 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.

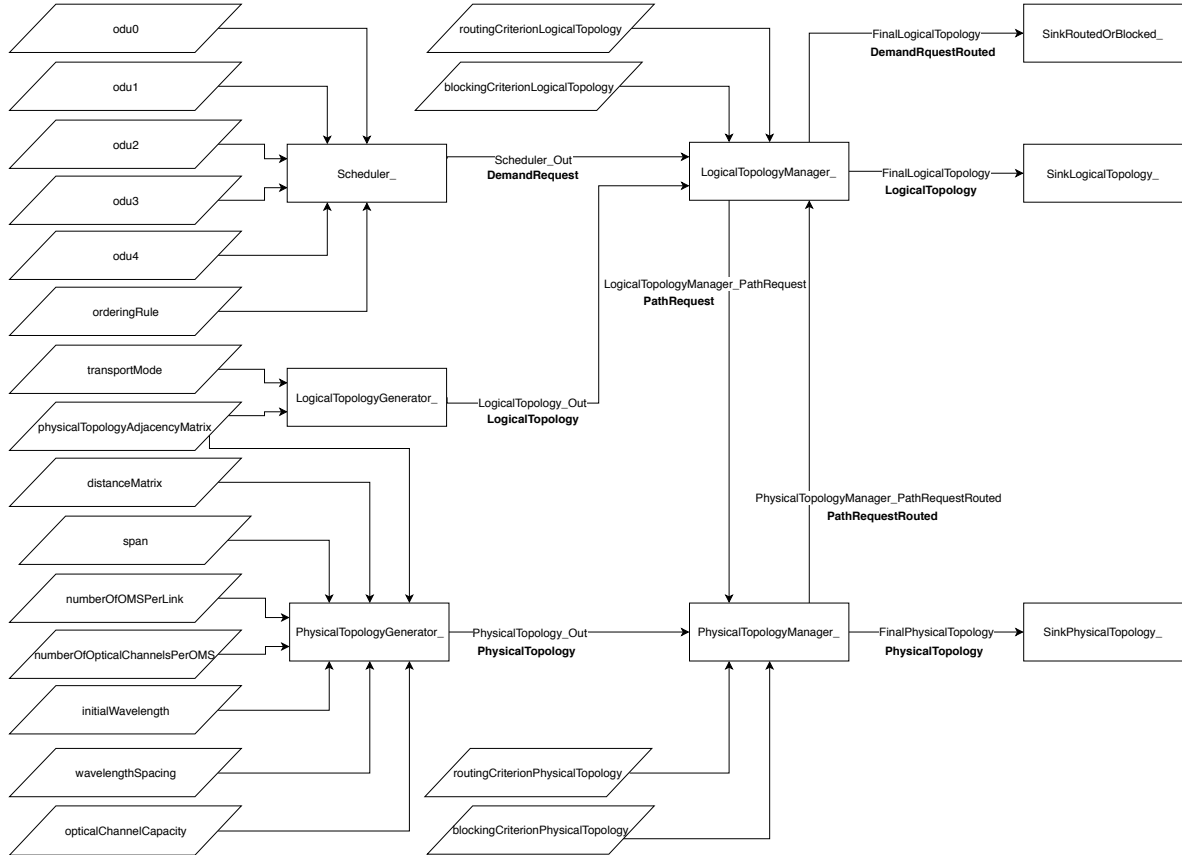


Figure 4.1: Diagrama do Sistema.

## 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

Table 4.1: Parâmetros de entrada do sistema

### 4.2.1 Formato do Ficheiro de Entrada

O formato do ficheiro de entrada deve seguir as regras seguintes:

- 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 palavra. 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 //.

A figura 4.2 apresenta um exemplo de um ficheiro de entrada que contém os parâmetros de entrada do sistema implementado para o modo de transporte opaco de uma rede com 6 nós, 1 sistema de transmissão por ligação e com as demandas com mais capacidade a terem prioridade no processamento.

```

// Input parameters for opaque transport mode example

odu0 =
0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0
odu1 =
0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0
odu2 =
0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 1 0
odu3 =
0 0 0 0 0 0
0 0 1 0 0 0
0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0
0 2 1 0 0 0
odu4 =
0 3 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0
orderingRule = descendingOrder
transportMode = opaque
physicalTopologyAdjacencyMatrix =
0 1 0 0 0 1
0 0 1 0 0 0
0 0 0 0 1 0
0 0 1 0 0 0
0 0 0 1 0 1
0 1 0 0 0 0
distanceMatrix =
0 460 663 0 0 0
460 0 75 684 0 0
663 75 0 0 890 0
0 684 0 0 103 764
0 0 890 103 0 361
0 0 0 764 361 0
span = 100
numberOfOMSPerLink = 1
numberOfOpticalChannelsPerOMS = 2
initialWavelength = 1550
wavelengthSpacing = 0.8
opticalChannelCapacity = 80
routingCriterionLogicalTopology = hops
blockingCriterionLogicalTopology = 3
routingCriterionPhysicalTopology = hops
blockingCriterionPhysicalTopology = 3

```

Figure 4.2: Exemplo do ficheiro de entrada.

### 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.

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

##### 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> , ...]

Table 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> , ...]

Table 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> , ...]

Table 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

Table 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

Table 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, ...]

Table 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

Table 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
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Table 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

Table 4.10: DemandRequestRouted

## 4.4 Blocos do Sistema

### 4.4.1 Scheduler

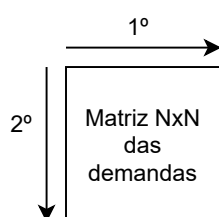


Figure 4.3: Ordem que é seguida na ordenação das demandas.

## 4.4.2 LogicalTopologyGenerator

## 4.4.3 PhysicalTopologyGenerator

## 4.4.4 LogicalTopologyManager

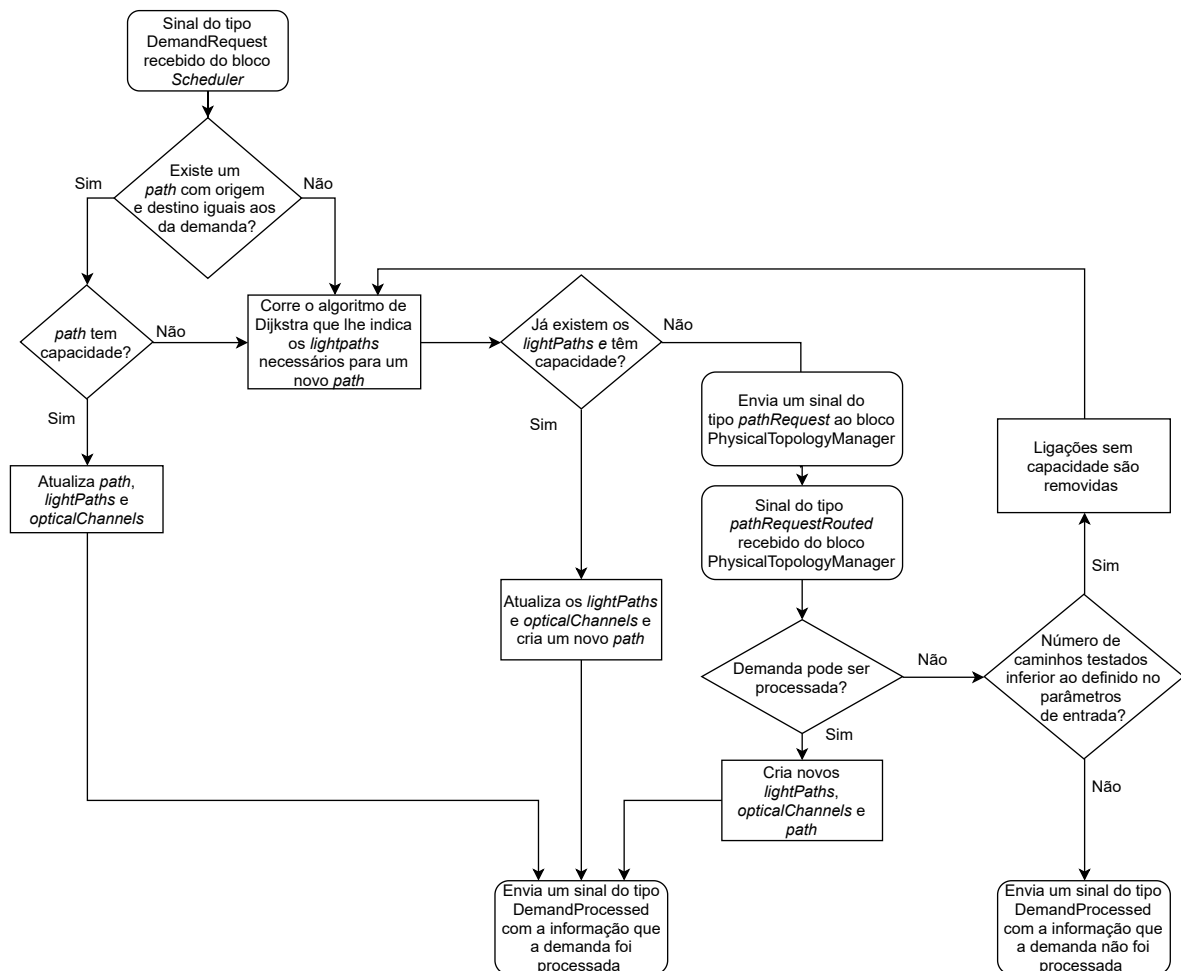


Figure 4.4: Fluxograma do bloco LogicalTopologyManager.



## 4.4.5 PhysicalTopologyManager

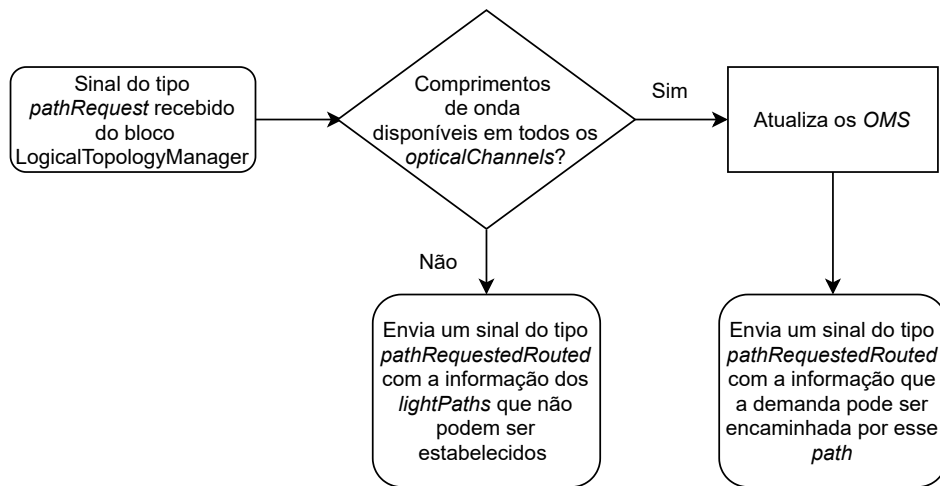


Figure 4.5: Fluxograma do bloco PhysicalTopologyManager.

As tabelas abaixo apresentam os parâmetros de entrada, variáveis de estado, 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

Table 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

Table 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, como se pode ver no exemplo da figura 4.6. 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. Um exemplo da informação sobre os nós é apresentado na figura 4.7. Neste relatório está também a informação do CAPEX, que será analisado no capítulo seguinte.

Information regarding links		
Unidirectional link	Optical channels	Amplifiers
Node 1 -> 2	1	3
Node 1 -> 6	1	1
Node 2 -> 1	1	3
Node 2 -> 3	2	3
Node 2 -> 6	2	1
Node 3 -> 2	2	3
Node 3 -> 4	1	2
Node 3 -> 5	1	0
Node 4 -> 3	1	2
Node 4 -> 5	1	1
Node 5 -> 3	1	0
Node 5 -> 4	1	1
Node 5 -> 6	2	5
Node 6 -> 1	1	1
Node 6 -> 2	2	1
Node 6 -> 5	2	5

Figure 4.6: Exemplo de informação sobre as ligações no relatório final.

Information regarding nodes					
		Electrical part		Optical part	
Node	Nodal degree	Tributary ports	Line ports	Add ports	Line ports
1	2	29	2	0	0
2	3	23	5	0	0
3	3	18	4	0	0
4	2	20	2	0	0
5	3	24	4	0	0
6	3	22	5	0	0

Figure 4.7: Exemplo de informação sobre os nós no relatório final.

## Chapter 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.

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, 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 Ligação	OLTs		16	15 000 €	240 000 €	444 000 €
	Canais Óticos		28	5000 €	140 000 €	
	Amplificadores		32	2000 €	64 000 €	
Custo Nó	Elétrico	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 €	
	Ótico	OXCs	0	20 000 €	0 €	
		Portas OXC	0	2 500 €	0 €	
Custo Total da Rede						984 000 €

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

**Tráfego Médio**

CAPEX						
			Quantidade	Preço Unitário	Custo	Total
Custo Ligação	OLTs		16	15 000 €	240 000 €	934 000 €
	Canais Óticos		126	5000 €	630 000 €	
	Amplificadores		32	2000 €	64 000 €	
Custo Nó	Elétrico	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 €	
	Ótico	OXCs	0	20 000 €	0 €	
		Portas OXC	0	2 500 €	0 €	
Custo Total da Rede						3 254 000 €

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



**Tráfego Elevado**

CAPEX						
		Quantidade	Preço Unitário	Custo	Total	
Custo Ligação	OLTs		16	15 000 €	1 524 000 €	
	Canais Óticos		244	5000 €		
	Amplificadores		32	2000 €		
Custo Nó	Elétrico	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 €	
	Ótico	OXCs	0	20 000 €	0 €	
		Portas OXC	0	2 500 €	0 €	
Custo Total da Rede					6 024 000 €	

Table 5.3: CAPEX para o cenário de tráfego elevado usando ILPs.

**5.1.3 Heurísticas**

Resultados obtidos através da implementação dos algoritmos das heurísticas no NetXPTO.

**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

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

Informação sobre os nós					
		Elétrico		Ótico	
Nó	Grau do Nó	Portas Tributárias	<i>Transponders</i>	Portas <i>Add</i>	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

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

CAPEX						
			Quantidade	Preço Unitário	Custo	Total
Custo da Ligação	OLTs		16	15 000 €	240 000 €	464 000 €
	Canais Óticos		32	5000 €	160 000 €	
	Amplificadores		32	2000 €	64 000 €	
Custo do Nó	Elétrico	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 €	
		<i>Transponders</i>	40	100 €/Gbit/s	400 000 €	
	Ótico	OXC	0	20 000 €	0 €	
		Portas OXC	0	2 500 €	0 €	
Custo Total da Rede						1 044 000 €

Table 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

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

Informação sobre os nós					
		Elétrico		Ótico	
Nó	Grau do Nó	Portas Tributárias	<i>Transponders</i>	Portas <i>Add</i>	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

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

CAPEX						
			Quantidade	Preço Unitário	Custo	Total
Custo da Ligação	OLTs		16	15 000 €	240 000 €	944 000 €
	Canais Óticos		128	5000 €	640 000 €	
	Amplificadores		32	2000 €	64 000 €	
Custo do Nó	Elétrico	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 €	
		<i>Transponders</i>	128	100 €/Gbit/s	1 280 000 €	
	Ótico	OXCs	0	20 000 €	0 €	
		Portas OXC	0	2 500 €	0 €	
Custo Total da Rede						3 284 000 €

Table 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

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

Informação sobre os nós					
		Elétrico		Ótico	
Nó	Grau do Nó	Portas Tributárias	<i>Transponders</i>	Portas <i>Add</i>	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

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

CAPEX						
			Quantidade	Preço Unitário	Custo	Total
Custo da Ligação	OLTs		16	15 000 €	240 000 €	1 554 000 €
	Canais Óticos		250	5000 €	1 250 000 €	
	Amplificadores		32	2000 €	64 000 €	
Custo do Nó	Elétrico	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 €	
		<i>Transponders</i>	250	100 €/Gbit/s	2 500 000 €	
	Ótico	OXC's	0	20 000 €	0 €	
		Portas OXC	0	2 500 €	0 €	
Custo Total da Rede						6 114 000 €

Table 5.12: CAPEX para o cenário de elevado tráfego.

### 5.1.4 Análise Comparativa

		Heurísticas	Analítico	ILP
<b>Tráfego Baixo</b>	Custo da Ligação	464 000 €	457 280 € (-1,4%)	444 000 € (-4,3%)
	Custo do Nó	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 da Ligação	944 000 €	1 070 480 € (+13,4%)	934 000 € (-1,1%)
	Custo do Nó	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 da Ligação	1 554 000 €	1 837 000 € (+18,2%)	1 524 000 € (-1,9%)
	Custo do Nó	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%)

Table 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 da Ligação	OLTs		42	15 000 €	630 000 €	2 624 000 €
	Canais Óticos		234	5000 €	1 170 000 €	
	Amplificadores		412	2000 €	824 000 €	
Custo do Nó	Elétrico	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 €	
		<i>Transponders</i>	234	100 €/Gbit/s	2 340 000 €	
	Ótico	OXCs	0	20 000 €	0 €	
		Portas OXC	0	2 500 €	0 €	
Custo Total da Rede						6 104 000 €

Table 5.14: CAPEX para o rede real no modo de transporte opaco com ordenação descendente e critério de routing saltos.

CAPEX						
			Quantidade	Preço Unitário	Custo	Total
Custo da Ligação	OLTs		42	15 000 €	630 000 €	2 669 000 €
	Canais Óticos		243	5000 €	1 215 000 €	
	Amplificadores		412	2000 €	824 000 €	
Custo do Nó	Elétrico	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 €	
		<i>Transponders</i>	243	100 €/Gbit/s	2 430 000 €	
	Ótico	OXCs	0	20 000 €	0 €	
		Portas OXC	0	2 500 €	0 €	
Custo Total da Rede						6 239 000 €

Table 5.15: CAPEX para o rede real no modo de transporte opaco com ordenação ascendente critério de routing .



CAPEX						
			Quantidade	Preço Unitário	Custo	Total
Custo da Ligação	OLTs		42	15 000 €	630 000 €	2 754 000 €
	Canais Óticos		260	5000 €	1 300 000 €	
	Amplificadores		412	2000 €	824 000 €	
Custo do Nó	Elétrico	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 €	
		<i>Transponders</i>	260	100 €/Gbit/s	2 600 000 €	
	Ótico	OXCs	0	20 000 €	0 €	
		Portas OXC	0	2 500 €	0 €	
Custo Total da Rede						6 494 000 €

Table 5.16: CAPEX para o rede real no modo de transporte opaco com ordenação descendente e critério de routing km.

CAPEX						
			Quantidade	Preço Unitário	Custo	Total
Custo da Ligação	OLTs		42	15 000 €	630 000 €	2 809 000 €
	Canais Óticos		271	5000 €	1 355 000 €	
	Amplificadores		412	2000 €	824 000 €	
Custo do Nó	Elétrico	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 €	
	Ótico	OXCs	0	20 000 €	0 €	
		Portas OXC	0	2 500 €	0 €	
Custo Total da Rede						6 659 000 €

Table 5.17: CAPEX para o rede real no modo de transporte opaco com ordenação ascendente e critério de routing km.

### 5.2.4 Análise Comparativa

#### Custo económico

		Heurísticas (ordem descendente)	Heurísticas (ordem ascendente)	Modelo Analítico	ILP
Rede real	Custo ligação	2 624 000 €	2 669 000 € (+1,7%)	2 523 392 € (-8,3%)	Em execução
	Custo nó	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%)	

Table 5.18: Comparação dos resultados das heurísticas com o modelo analítico e o ILP .

#### Tempo de execução

		Heurísticas	ILP
Rede real	Tempo de execução	15 s	Em execução

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

## Chapter 6

# Conclusões e trabalho futuro

### 6.1 Conclusões

### 6.2 Trabalho futuro

