



Élio Tiago  
Sousa Coelho

Desenvolvimento de Heurísticas para o  
Dimensionamento de Redes Óticas Opacas e  
Transparentes

Development of Heuristics for Opaque and  
Transparent Optical Networks Dimensioning





**Élio Tiago  
Sousa Coelho**

**Desenvolvimento de Heurísticas para o  
Dimensionamento de Redes Óticas Opacas e  
Transparentes**

**Development of Heuristics for Opaque and  
Transparent 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.





presidente / president

vogais / examiners committee

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









agradecimientos /  
acknowledgements



Palavras-chave

Resumo



**Keywords**

**Abstract**



# Índice

<b>Índice</b>	<b>i</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>iii</b>
<b>Lista de tabelas</b>	<b>v</b>
<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 e Transparentes</b>	<b>4</b>
2.1 Arquitetura da Rede . . . . .	4
2.1.1 Nós . . . . .	4
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 Modos de Transporte . . . . .	6
2.3.1 Modo de Transporte Opaco . . . . .	6
2.3.2 Modo de Transporte Transparente . . . . .	6
2.4 Rede Referência . . . . .	6
2.4.1 Topologia Física . . . . .	6
2.4.2 Topologia Lógica . . . . .	7
2.4.3 Matrizes de Tráfego . . . . .	7
2.5 Rede Real . . . . .	10
2.5.1 Topologia Física . . . . .	11
2.5.2 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 . . . . .	20
4.2	Parâmetros de Entrada do Sistema . . . . .	20
4.2.1	Formato do Ficheiro de Entrada . . . . .	20
4.3	Estrutura dos Sinais do Sistema . . . . .	20
4.3.1	<i>LogicalTopology</i> . . . . .	20
4.3.2	<i>PhysicalTopology</i> . . . . .	20
4.3.3	<i>DemandRequest</i> . . . . .	20
4.3.4	<i>PathRequest</i> . . . . .	20
4.3.5	<i>PathRequestRouted</i> . . . . .	20
4.3.6	<i>DemandRequestRouted</i> . . . . .	20
4.4	Blocos do Sistema . . . . .	20
4.4.1	<i>Scheduler</i> . . . . .	20
4.4.2	<i>LogicalTopologyGenerator</i> . . . . .	20
4.4.3	<i>PhysicalTopologyGenerator</i> . . . . .	20
4.4.4	<i>LogicalTopologyManager</i> . . . . .	20
4.4.5	<i>PhysicalTopologyManager</i> . . . . .	20
4.5	Relatório Final . . . . .	20
<b>5</b>	<b>Resultados</b>	<b>21</b>
5.1	Rede Referência . . . . .	21
5.1.1	Modelo Analítico . . . . .	21
5.1.2	ILP . . . . .	23
5.1.3	Heurísticas . . . . .	25
5.1.4	Análise Comparativa . . . . .	29
5.2	Rede Real . . . . .	30
5.2.1	Modelo Analítico . . . . .	30
5.2.2	Heurísticas . . . . .	31
5.2.3	Análise Comparativa . . . . .	31
<b>6</b>	<b>Conclusões e trabalho futuro</b>	<b>33</b>
6.1	Conclusões . . . . .	33
6.2	Trabalho futuro . . . . .	33



# Lista de figuras

2.1	Arquitetura do nó. [].	4
2.2	Topologia física da rede referência.	6
2.3	National Science Foundation Network (NSFNET) [].	10
2.4	Topologia Física.	11



# Lista de tabelas

2.1	Matriz adjacência da topologia física da rede referência. . . . .	6
2.2	Matriz adjacência da topologia física. . . . .	12
2.3	Parâmetros da rede real MSFNET. . . . .	12
2.4	Matriz de tráfego ODU0 para a rede real MSFNET. . . . .	13
2.5	Matriz de tráfego ODU2 para a rede real MSFNET. . . . .	14
2.6	Matriz de tráfego ODU3 para a rede real MSFNET. . . . .	14
5.1	CAPEX para o cenário de tráfego baixo usando ILPs. . . . .	23
5.2	CAPEX para o cenário de tráfego médio usando ILPs. . . . .	24
5.3	CAPEX para o cenário de tráfego elevado usando ILPs. . . . .	24
5.4	Informação sobre as ligações para o cenário de baixo tráfego. . . . .	25
5.5	Informação sobre os nós para o cenário de baixo tráfego. . . . .	25
5.6	CAPEX para o cenário de baixo tráfego. . . . .	26
5.7	Informação sobre as ligações para o cenário de médio tráfego. . . . .	26
5.8	Informação sobre os nós para o cenário de médio tráfego. . . . .	27
5.9	CAPEX para o cenário de médio tráfego. . . . .	27
5.10	Informação sobre as ligações para o cenário de elevado tráfego. . . . .	28
5.11	Informação sobre os nós para o cenário de elevado tráfego. . . . .	28
5.12	CAPEX para o cenário de elevado tráfego. . . . .	29
5.13	Comparação dos valores do CAPEX entre os diferentes modelos para os diferentes cenários de tráfego. . . . .	29
5.14	CAPEX para o rede real no modo de transporte opaco. . . . .	31





## Chapter 1

# Introdução

## 1.1 Motivação

## 1.2 Objetivos

## 1.3 Estrutura da dissertação

## Chapter 2

# Dimensionamento de Redes Óticas Opacas e Transparentes

### 2.1 Arquitetura da Rede

#### 2.1.1 Nós

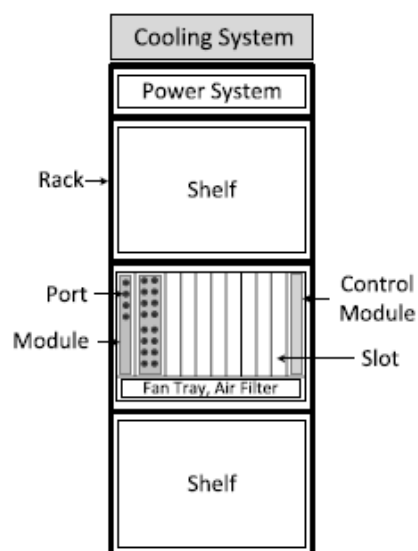
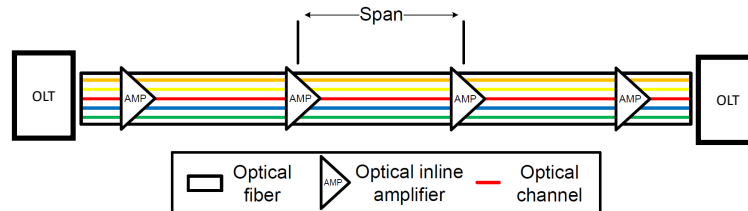


Figure 2.1: Arquitetura do nó. [].



### 2.1.2 Ligações



## 2.2 Topologias da Rede

### 2.2.1 Topologia Física

### 2.2.2 Topologia Lógica

## 2.3 Modos de Transporte

### 2.3.1 Modo de Transporte Opaco

### 2.3.2 Modo de Transporte Transparente

## 2.4 Rede Referência

### 2.4.1 Topologia Física

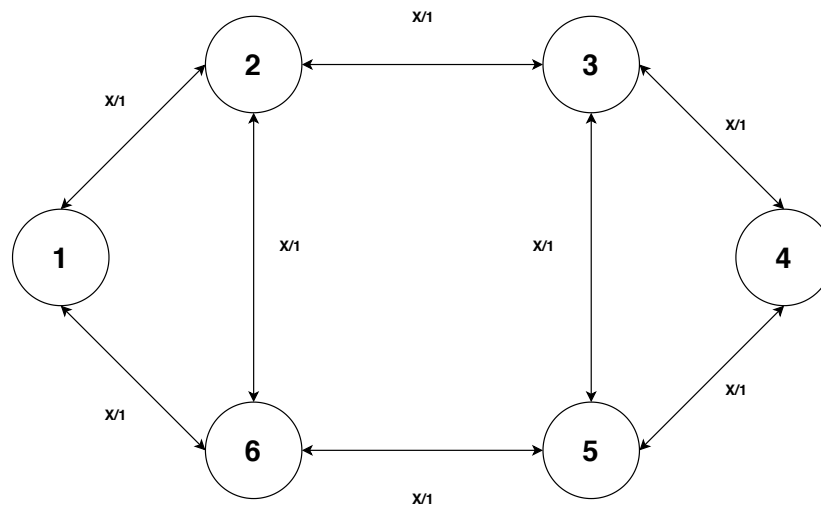


Figure 2.2: Topologia física da rede referência.

Nó	1	2	3	4	5	6
1	0	1	0	0	0	1
2	1	0	1	0	0	1
3	0	1	0	1	1	0
4	0	0	1	0	1	0
5	0	0	1	1	0	1
6	1	1	0	0	1	0

Table 2.1: Matriz adjacência da topologia física da rede referência.

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

### 2.4.2 Topologia Lógica

### 2.4.3 Matrizes de Tráfego

Tráfego Baixo

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

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

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

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

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

$$T_1 = 150 + 250 + 320 + 480 + 800 = 2000 \text{ Gbits/s} \quad T = 1000/2 = \mathbf{1 \text{ Tbits/s}}$$

Tráfego Médio

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

$$T_1^0 = 600 \times 1.25 = 750 \text{ Gbits/s} \quad T_1^1 = 500 \times 2.5 = 1205 \text{ Gbits/s} \quad T_1^2 = 160 \times 10 = 1600 \text{ Gbits/s}$$

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

$$T_1 = 750 + 1250 + 1600 + 2400 + 4000 = 10000 \text{ Gbits/s} \quad T = 10000/2 = \mathbf{5 \text{ Tbits/s}}$$

### Tráfego Elevado

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

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

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

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

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

$$T_1^4 = 80 \times 100 = 8000 \text{ Gbits/s} \quad T_1 = 20000 \text{ Gbits/s}$$

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

## 2.5 Rede Real

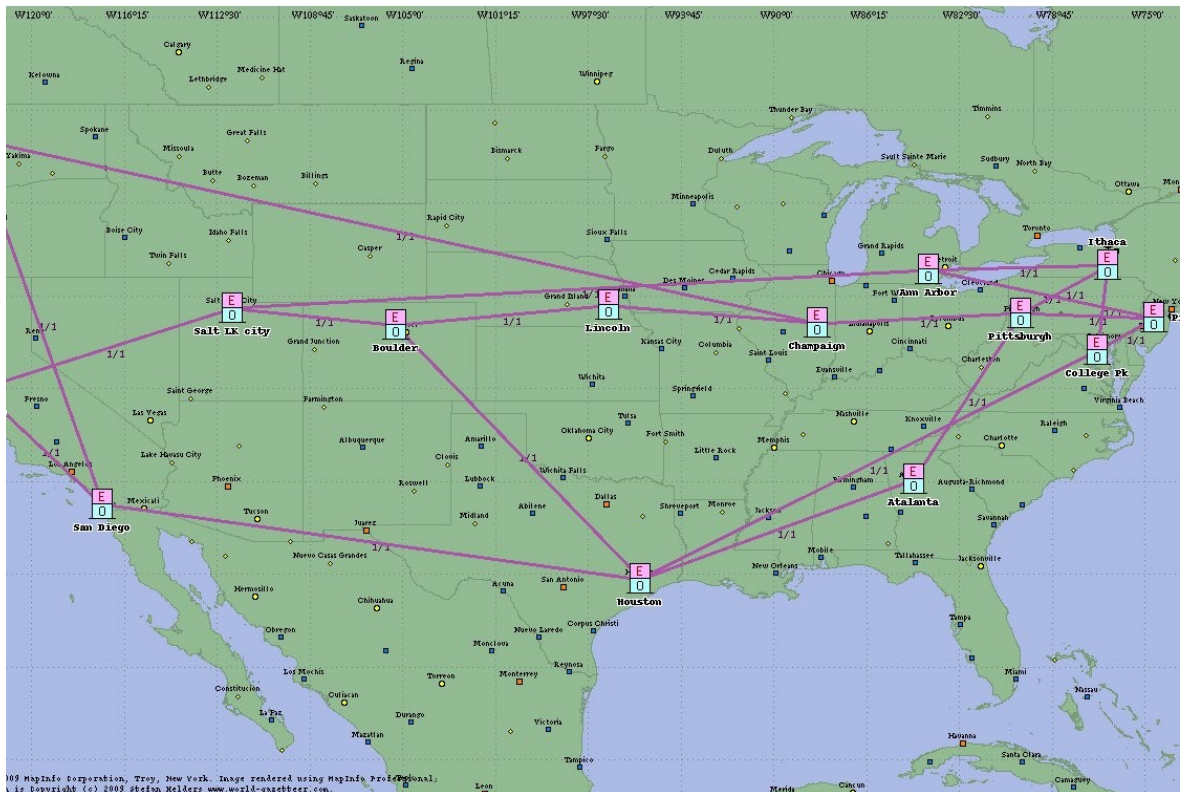


Figure 2.3: National Science Foundation Network (NSFNET) [1].

### 2.5.1 Topologia Física

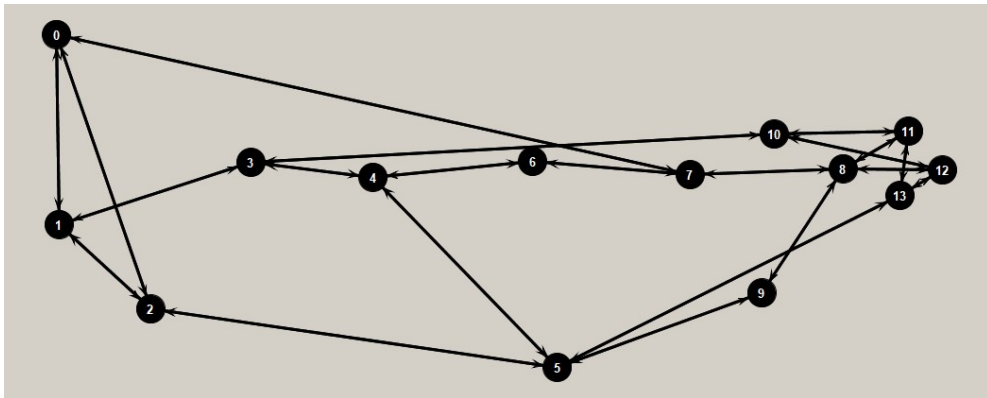


Figure 2.4: Topologia Física.

Nó	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
2	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
5	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1
7	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
8	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0
10	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
11	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1
13	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1
14	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0

Table 2.2: Matriz adjacência da topologia física.

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 2.3: Parâmetros da rede real MSFNET.



### 2.5.2 Matrizes de Tráfego

ODU0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1														
2														
3														
4														
5														
6														
7														
8														
9														
10														
11														
12														
13														
14														

Table 2.4: Matriz de tráfego ODU0 para a rede real MSFNET.

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

vspace11pt

ODU2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1														
2														
3														
4														
5														
6														
7														
8														
9														
10														
11														
12														
13														
14														

Table 2.5: Matriz de tráfego ODU2 para a rede real MSFNET.

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

ODU3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1														
2														
3														
4														
5														
6														
7														
8														
9														
10														
11														
12														
13														
14														

Table 2.6: Matriz de tráfego ODU3 para a rede real MSFNET.

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

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

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



## 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

### 4.1 Diagrama do Sistema

### 4.2 Parâmetros de Entrada do Sistema

#### 4.2.1 Formato do Ficheiro de Entrada

### 4.3 Estrutura dos Sinais do Sistema

#### 4.3.1 *LogicalTopology*

#### 4.3.2 *PhysicalTopology*

#### 4.3.3 *DemandRequest*

#### 4.3.4 *PathRequest*

#### 4.3.5 *PathRequestRouted*

#### 4.3.6 *DemandRequestRouted*

### 4.4 Blocos do Sistema

#### 4.4.1 *Scheduler*

#### 4.4.2 *LogicalTopologyGenerator*

#### 4.4.3 *PhysicalTopologyGenerator*

#### 4.4.4 *LogicalTopologyManager*

#### 4.4.5 *PhysicalTopologyManager*

### 4.5 Relatório Final



## Chapter 5

# Resultados

### 5.1 Rede Referência

#### 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

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

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

$$N^R = 16$$

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

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

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

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

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

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

### Tráfego Elevado

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

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

$$N^R = 16$$

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

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

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

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

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

$$CAPEX = 1\,837\,000 + 5\,125\,994$$

$$CAPEX = \mathbf{6\,962\,994\,€}$$

### 5.1.2 ILP

#### 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 €	240 000 €	1 524 000 €
	Canais Óticos		244	5000 €	1 220 000 €	
	Amplificadores		32	2000 €	64 000 €	
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 €	
	Ótco	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

#### 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					
		Parte Elétrica		Parte Ótica	
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	Elétrica	EXCs	6	10 000 €	60 000 €	580 000 €
		Portas ODU0	120	100 €/Gbit/s	15 000 €	
		Portas ODU1	100	100 €/Gbit/s	25 000 €	
		Portas ODU2	32	100 €/Gbit/s	32 000 €	
		Portas ODU3	12	100 €/Gbit/s	48 000 €	
		Portas ODU4	8	100 €/Gbit/s	80 000 €	
		<i>Transponders</i>	40	100 €/Gbit/s	400 000 €	
	Ótica	OXCs	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					
		Parte Elétrica		Parte Ótica	
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	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 €	
		<i>Transponders</i>	128	100 €/Gbit/s	1 280 000 €	
	Ótica	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					
		Parte Elétrica		Parte Ótica	
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	Élétrica	EXCs	6	10 000 €	60 000 €	4 560 000 €
		Portas ODU0	1200	100 €/Gbit/s	15 000 €	
		Portas ODU1	1000	100 €/Gbit/s	25 000 €	
		Portas ODU2	320	100 €/Gbit/s	32 000 €	
		Portas ODU3	120	100 €/Gbit/s	48 000 €	
		Portas ODU4	80	100 €/Gbit/s	80 000 €	
		Transponders	250	100 €/Gbit/s	2 500 000 €	
	Ótcia	OXCs	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

### 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 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	Élétrica	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 €	
	Ótcia	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.

## 5.2.3 Análise Comparativa



## Chapter 6

# Conclusões e trabalho futuro

### 6.1 Conclusões

### 6.2 Trabalho futuro

