



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
1 Introdução	2
1.1 Motivação	3
1.2 Objetivos	3
1.3 Estrutura da dissertação	3
2 Dimensionamento de Redes Óticas Opacas	4
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 Modo de Transporte Opaco	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
3 Heurísticas	17
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
4	Implementação NetXPTO	19
4.1	Diagrama do Sistema	19
4.2	Parâmetros de Entrada do Sistema	20
4.2.1	Formato do Ficheiro de Entrada	21
4.3	Estrutura dos Sinais do Sistema	22
4.3.1	LogicalTopology	22
4.3.2	PhysicalTopology	23
4.3.3	DemandRequest	24
4.3.4	PathRequest	24
4.3.5	PathRequestRouted	24
4.3.6	DemandRequestRouted	25
4.4	Blocos do Sistema	25
4.4.1	Scheduler	25
4.4.2	LogicalTopologyGenerator	26
4.4.3	PhysicalTopologyGenerator	26
4.4.4	LogicalTopologyManager	26
4.4.5	PhysicalTopologyManager	27
4.5	Relatório Final	29
5	Resultados	31
5.1	Rede Referência	31
5.1.1	Modelo Analítico	31
5.1.2	ILP	33
5.1.3	Heurísticas	35
5.1.4	Análise Comparativa	39
5.2	Rede Real	40
5.2.1	Modelo Analítico	40
5.2.2	ILP	41
5.2.3	Heurísticas	41
5.2.4	Análise Comparativa	43
6	Conclusões e trabalho futuro	45
6.1	Conclusões	45
6.2	Trabalho futuro	45

Lista de figuras

2.1	Arquitetura do nó. [].	4
2.2	Topologia física da rede referência.	6
2.3	Topologia lógica da rede referência.	7
2.4	National Science Foundation Network (NSFNET) [].	10
2.5	Topologia Física.	11
4.1	Diagrama do Sistema.	19
4.2	Exemplo do ficheiro de entrada.	21
4.3	Ordem que é seguida na ordenação das demandas.	25
4.4	Fluxograma do bloco LogicalTopologyManager.	26
4.5	Fluxograma do bloco PhysicalTopologyManager.	27
4.6	Exemplo de informação sobre as ligações no relatório final.	29
4.7	Exemplo de informação sobre os nós no relatório final.	30

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
4.1	Parâmetros de entrada do sistema	20
4.2	logicalTopologyAdjacencyMatrix	22
4.3	path	22
4.4	lightPath	22
4.5	opticalChannel	23
4.6	physicalTopologyAdjacencyMatrix	23
4.7	opticalMultiplexSection	24
4.8	DemandRequest variable	24
4.9	PathRequest	24
4.10	pathInformation	25
4.11	lightPathsTable	25
4.12	DemandRequestRouted	25
4.13	Parâmetros de entrada e variáveis de estado de cada bloco	28
4.14	Sinais de entrada e de saída de cada bloco	29
5.1	CAPEX para o cenário de tráfego baixo usando ILPs.	33
5.2	CAPEX para o cenário de tráfego médio usando ILPs.	34
5.3	CAPEX para o cenário de tráfego elevado usando ILPs.	34
5.4	Informação sobre as ligações para o cenário de baixo tráfego.	35
5.5	Informação sobre os nós para o cenário de baixo tráfego.	35
5.6	CAPEX para o cenário de baixo tráfego.	36
5.7	Informação sobre as ligações para o cenário de médio tráfego.	36
5.8	Informação sobre os nós para o cenário de médio tráfego.	37

5.9	CAPEX para o cenário de médio tráfego.	37
5.10	Informação sobre as ligações para o cenário de elevado tráfego.	38
5.11	Informação sobre os nós para o cenário de elevado tráfego.	38
5.12	CAPEX para o cenário de elevado tráfego.	39
5.13	Comparação dos valores do CAPEX entre os diferentes modelos para os diferentes cenários de tráfego.	39
5.14	CAPEX para o rede real no modo de transporte opaco com ordenação descendente e critério de routing saltos.	41
5.15	CAPEX para o rede real no modo de transporte opaco com ordenação ascendente critério de routing	41
5.16	CAPEX para o rede real no modo de transporte opaco com ordenação descendente e critério de routing km.	42
5.17	CAPEX para o rede real no modo de transporte opaco com ordenação ascendente e critério de routing km.	42
5.18	Comparação dos resultados das heurísticas com o modelo analítico e o ILP . . .	43
5.19	Comparação do tempo de execução das heurísticas com o ILP.	43

Chapter 1

Introdução

1.1 Motivação

1.2 Objetivos

1.3 Estrutura da dissertação

Chapter 2

Dimensionamento de Redes Óticas Opacas

2.1 Arquitetura da Rede

2.1.1 Nós

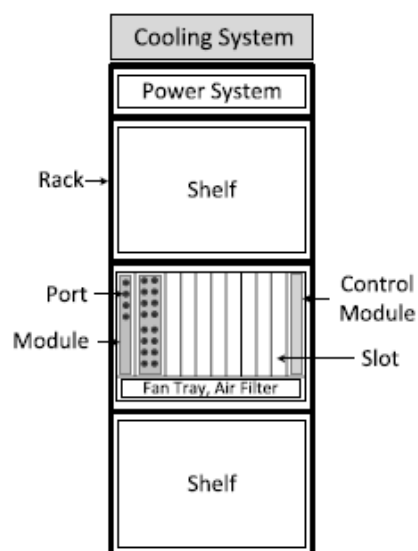
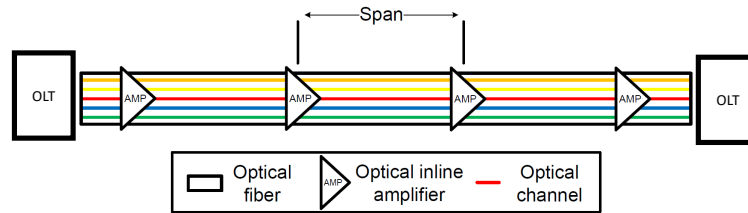


Figure 2.1: Arquitetura do nó. [].

2.1.2 Ligações



2.2 Topologias da Rede

2.2.1 Topologia Física

2.2.2 Topologia Lógica

2.3 Modo de Transporte Opaco

2.4 Rede Referência

2.4.1 Topologia Física

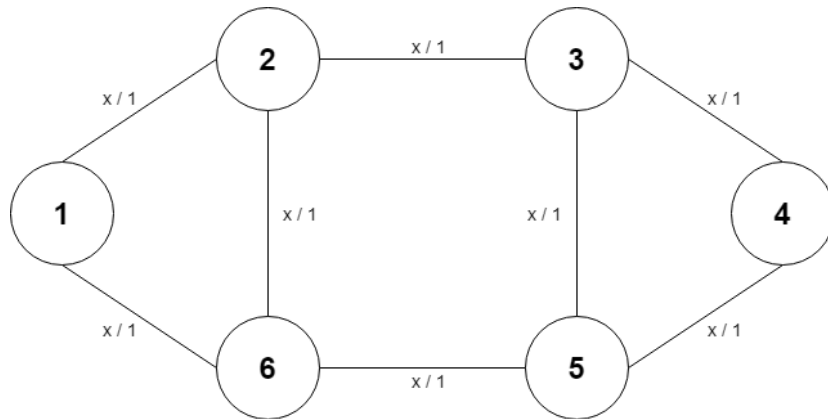


Figure 2.2: Topologia física da rede referência.

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

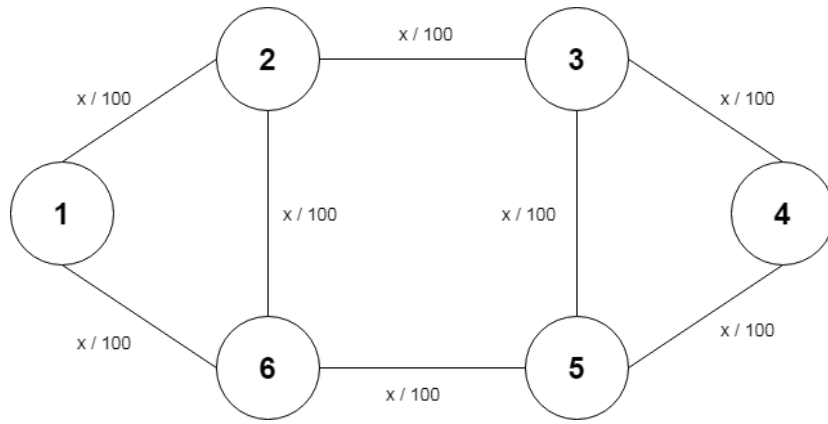


Figure 2.3: Topologia lógica da rede referêcia.

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

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

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

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

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

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

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

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

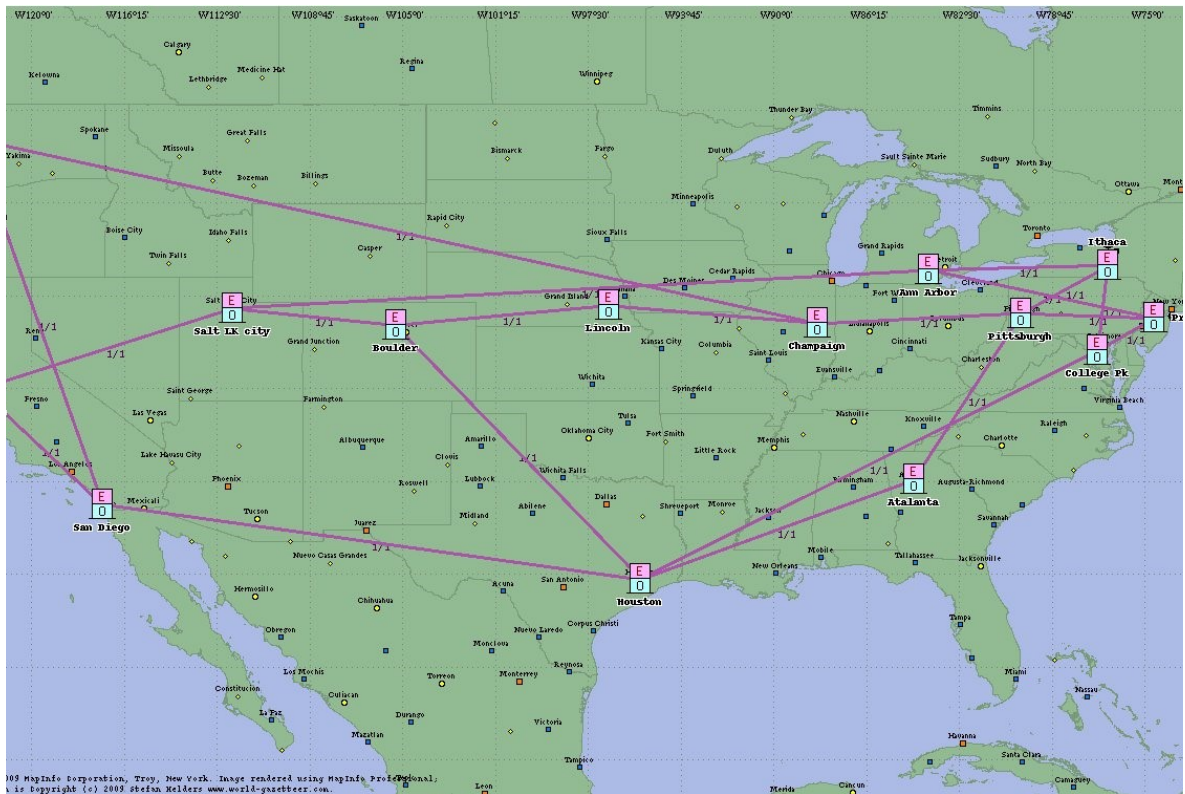


Figure 2.4: National Science Foundation Network (NSFNET) [1].

2.5.1 Topologia Física

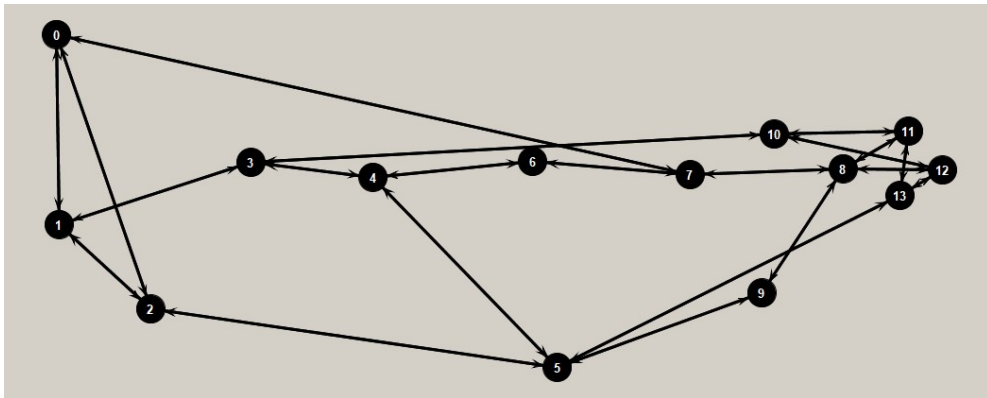


Figure 2.5: Topologia Física.

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	0	8	4	14	4	12	8	8	6	8	8	14	8	6
2	8	0	8	8	6	16	14	8	8	8	8	14	2	20
3	4	8	0	14	8	8	8	4	12	8	10	14	8	8
4	14	8	14	0	10	4	8	8	6	8	8	14	8	6
5	8	6	8	10	0	8	8	8	10	8	8	4	8	14
6	12	16	8	4	8	0	4	12	8	8	10	8	12	8
7	8	14	8	8	8	4	0	12	0	8	8	12	2	12
8	8	8	4	8	8	12	12	0	8	0	8	8	12	0
9	6	8	12	6	10	8	0	8	0	8	8	12	8	4
10	8	8	8	8	8	8	8	0	8	0	4	8	8	14
11	8	8	10	8	8	10	8	8	8	4	0	8	8	8
12	14	14	14	14	4	8	12	8	12	8	8	0	8	8
13	8	2	8	8	8	12	2	12	8	8	8	8	0	6
14	6	20	8	6	14	8	12	0	4	14	8	8	6	0

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

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

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

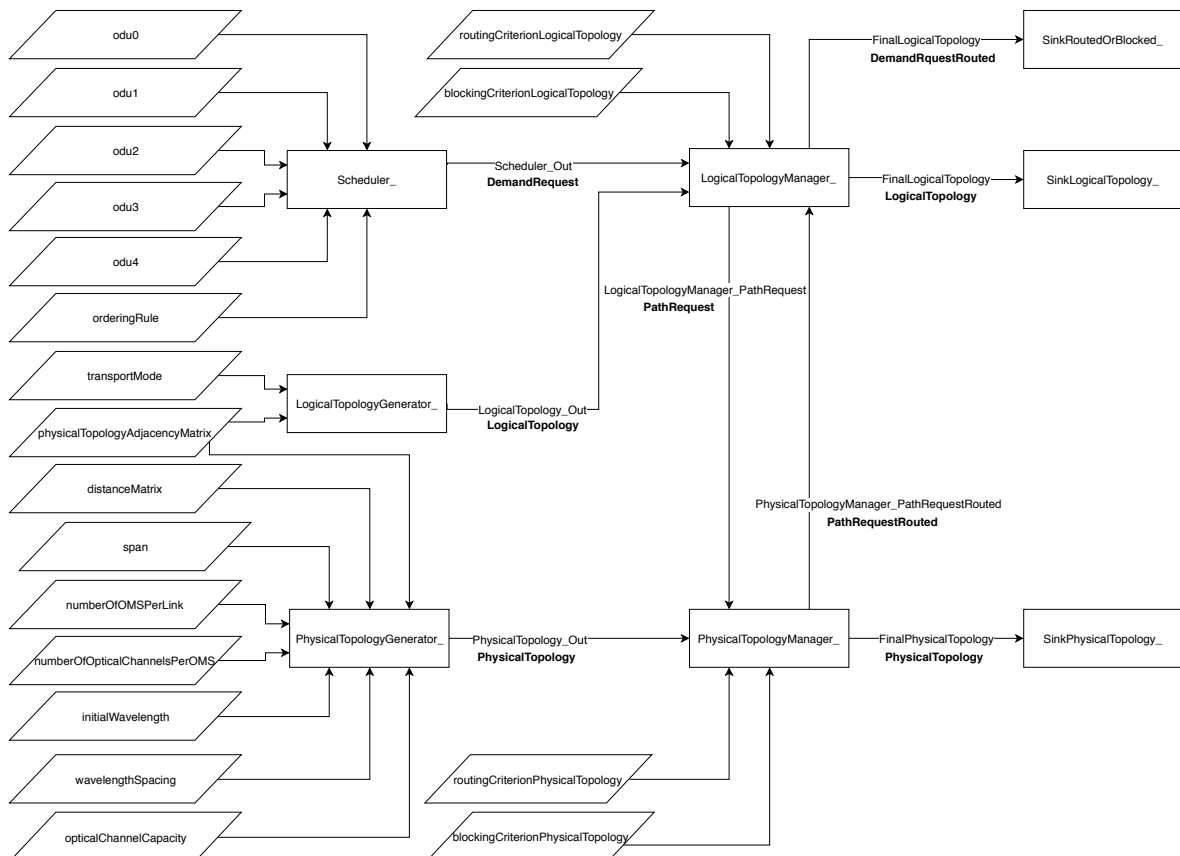


Figure 4.1: Diagrama do Sistema.

4.2 Parâmetros de Entrada do Sistema

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

```

// 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 Sinais do Sistema

4.3.1 LogicalTopology

matriz NxN logicalTopologyAdjacencyMatrix

matriz distanceMatrix

vetor paths

vetor lightPaths

vetor opticalChannels

Nó	1	N
1	0	0/1	0/1	0/1
...	0/1	0	0/1	0/1
...	0/1	0/1	0	0/1
N	0/1	0/1	0/1	0

Table 4.2: logicalTopologyAdjacencyMatrix

N = numberOfNodes

0 => not logical link or 1 => logical link

paths

pathIndex	sourceNode	destinationNode	capacity (ODU0s)	numberOfLightPaths	lightPathsIndex
0...P-1	1...N	1...N	0...OC	1...LP	[lp0,lp1,...]

Table 4.3: path

P = numberOfPaths

N = numberOfNodes

OC = opticalChannelCapacity

LP = numberOfLightPaths

lightPaths

lightPathIndex	sourceNode	destinationNode	capacity (ODU0s)	numberOfOpticalChannels	opticalChannelsIndex
0...LP-1	1...N	1...N	1...OC	1...Och	[och0,och1,...]

Table 4.4: lightPath

LP = numberOfLightPaths
N = numberOfNodes
OC = opticalChannelCapacity
Och = numberOfOpticalChannels

opticalChannels

opticalChannelIndex	sourceNode	destinationNode	wavelength	capacity (ODU0s)	numberOfDemands	demandsIndex
0...Och-1	1...N	1...N	1...W	1...OC	0...D	[d0,d1,...]

Table 4.5: opticalChannel

Och = numberOfOpticalChannels
N = numberOfNodes
OC = opticalChannelCapacity
D = numberOfDemands
W = numberOfWavelengths

4.3.2 PhysicalTopology

matriz NxN physicalTopologyAdjacencyMatrix
vetor opticalMultiplexSection

Nó	1	N
1	0	0/1	0/1	0/1
...	0/1	0	0/1	0/1
...	0/1	0/1	0	0/1
N	0/1	0/1	0/1	0

Table 4.6: physicalTopologyAdjacencyMatrix

N = numberOfNodes
0 => not physical link or 1 => physical link

opticalMultiplexSection

OMSIndex	sourceNode	destinationNode	maximumNumberOfWavelengths	wavelengths	availableWavelengths
0	1...N	1...N	OchL	[1550 1550.8 ...]	[0/1 0/1 ...]
...	1...N	1...N	OchL	[1550 1550.8 ...]	[0/1 0/1 ...]
L-1	1...N	1...N	OchL	[1550 1550.8 ...]	[0/1 0/1 ...]

Table 4.7: opticalMultiplexSection

L = numberOfLinks

N = numberOfNodes

OchL = numberOfOpticalChannelsPerLink

W = numberOfWavelengths

4.3.3 DemandRequest

demandIndex	sourceNode	destinationNode	oduType	survivabilityMethod
0...D-1	1...N	1...N	0...4	none protection_1_plus_1 restoration

Table 4.8: DemandRequest variable

D = numberOfDemands

N = numberOfNodes

4.3.4 PathRequest

requestIndex	sourceNode	destinationNode	numberOfIntermediateNodes	intermediateNodes
0...R-1	1...N	1...N	0...N-2	[1, 2, ...]

Table 4.9: PathRequest

R = numberOfRequests

N = numberOfNodes

4.3.5 PathRequestRouted

pathInformation

vector lightPathsTable

requestIndex	routed	numberOfLightPaths
0...R-1	true or false	1...LP

Table 4.10: pathInformation

R = numberOfRequests

LP = numberOfLightPaths

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

Table 4.11: lightPathsTable

R = numberOfRequests

W = numberOfWavelength

4.3.6 DemandRequestRouted

demandIndex	routed	pathsIndex
0...D-1	true or false	0...P-1

Table 4.12: DemandRequestRouted

D = numberOfDemands

P = numberOfPaths

4.4 Blocos do Sistema

4.4.1 Scheduler

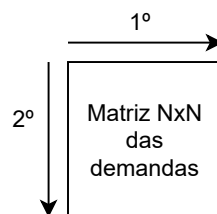


Figure 4.3: Ordem que é seguida na ordenação das demandas.

4.4.2 LogicalTopologyGenerator

4.4.3 PhysicalTopologyGenerator

4.4.4 LogicalTopologyManager

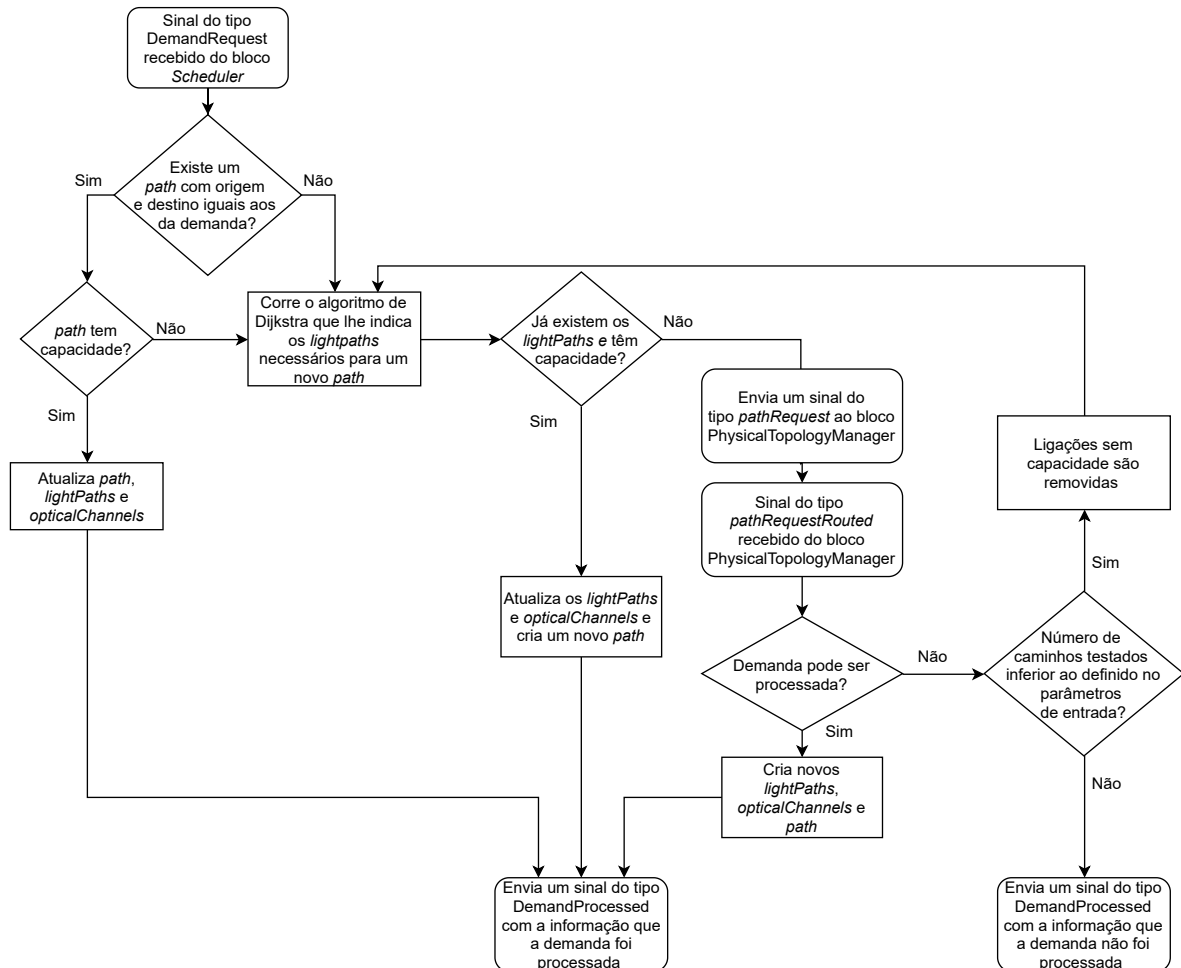


Figure 4.4: Fluxograma do bloco LogicalTopologyManager.

4.4.5 PhysicalTopologyManager

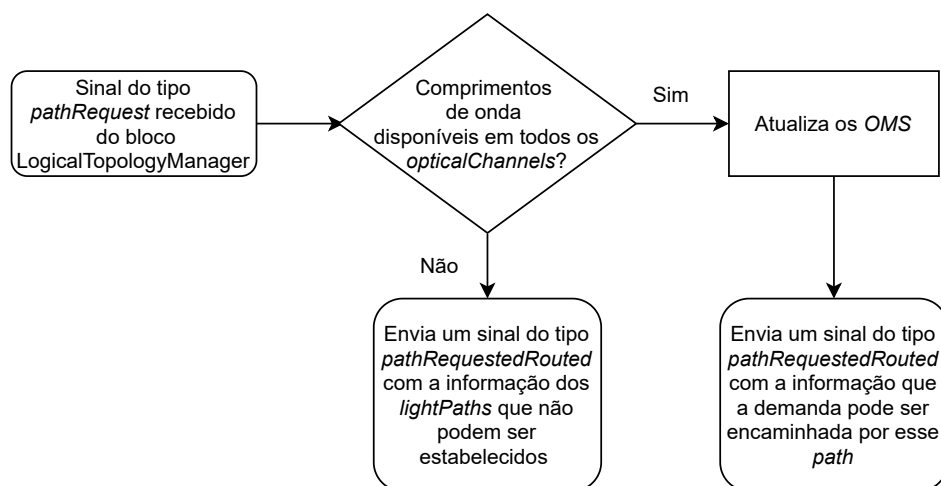


Figure 4.5: Fluxograma do bloco PhysicalTopologyManager.

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 4.13: 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 4.14: Sinais de entrada e de saída de cada bloco

4.5 Relatório Final

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

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 €	
	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

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 €
	Canais Óticos		128	5000 €	
	Amplificadores		32	2000 €	
Custo do Nó	Elétrica	EXCs	6	10 000 €	60 000 €
		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 €
	Ótica	OXC's	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	Elétrica	EXCs	6	10 000 €	60 000 €	4 560 000 €
		Portas ODU0	1200	100 €/Gbit/s	15 000 €	
		Portas ODU1	1000	100 €/Gbit/s	25 000 €	
		Portas ODU2	320	100 €/Gbit/s	32 000 €	
		Portas ODU3	120	100 €/Gbit/s	48 000 €	
		Portas ODU4	80	100 €/Gbit/s	80 000 €	
		Transponders	250	100 €/Gbit/s	2 500 000 €	
	Ótica	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
Tráfego Baixo	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%)
Tráfego Médio	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%)
Tráfego Elevado	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 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	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 €	
		Transponders	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 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	Élétrica	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 €	
	Ótcia	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	Élétrica	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 €	
	Ótcia	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	Élétrica	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 €	
		<i>Transponders</i>	271	100 €/Gbit/s	2 710 000 €	
	Ótcia	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)	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

