



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

Índice	i
Lista de figuras	v
Lista de tabelas	vii
1 Introdução	1
1.1 Motivação	2
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura da dissertação	2
2 Dimensionamento de Redes Óticas Opacas e Transparentes	3
2.1 Elementos de Rede	3
2.1.1 Arquitetura das Ligações	3
2.1.2 Arquitetura dos Nós	4
2.2 Topologias de Rede	5
2.2.1 Topologia Física	5
2.2.2 Topologia Lógica	5
2.3 Modos de Transporte	5
2.3.1 Modo de Transporte Opaco	5
2.3.2 Modo de Transporte Transparente	5
2.4 Rede Referência	5
2.4.1 Topologia Física	5
2.4.2 Topologia Lógica	6
2.4.3 Matrizes de Tráfego	6
2.5 Rede Real	8
2.5.1 Topologia Física	8
2.5.2 Matrizes de Tráfego	8
3 CAPEX	9
3.1 Modelo Analítico	9

3.1.1	Modo de Transporte Opaco	9
3.1.2	Modo de Transporte Transparente	9
3.2	ILP	9
3.2.1	Modo de Transporte Opaco	9
3.2.2	Modo de Transporte Transparente	9
3.3	Heurísticas	9
3.3.1	Modo de Transporte Opaco	9
3.3.2	Modo de Transporte Transparente	9
4	Implementação NetXPTO	11
4.1	Diagrama do Sistema	12
4.2	Parâmetros de Entrada do Sistema	12
4.2.1	Formato do Ficheiro de Entrada	12
4.3	Estrutura dos Sinais do Sistema	12
4.3.1	Logical Topology	12
4.3.2	Physical Topology	12
4.3.3	Demand Request	12
4.3.4	Path Request	12
4.3.5	Path Request Routed	12
4.3.6	Demand Request Routed	12
4.4	Blocos do Sistema	12
4.4.1	Scheduler	12
4.4.2	LogicalTopologyGenerator	12
4.4.3	PhysicalTopologyGenerator	12
4.4.4	LogicalTopologyManager	12
4.4.5	PhysicalTopologyGenerator	12
4.5	Final Report	12
5	Algoritmos das Heurísticas	13
5.1	Scheduling	13
5.2	Topologia Lógica	13
5.3	Routing	13
5.4	Wavelength Assignment	13
5.5	Grooming	13
6	Resultados	15
6.1	Rede Referência	15
6.1.1	Modelo Analítico	15
6.1.2	ILP	17

6.1.3	Heurísticas	18
6.1.4	Análise Comparativa	18
6.2	Rede Real	19
6.2.1	Modelo Analítico	19
6.2.2	Heurísticas	19
6.2.3	Análise Comparativa	19
7	Conclusões e trabalho futuro	21
7.1	Conclusões	21
7.2	Trabalho futuro	21

Lista de figuras

2.1	Schematic of a node structure containing modules, shelves and a rack. [6515886].	4
2.2	Topologia física da rede referência.	5

Lista de tabelas

2.1	Matriz adjacência da topologia física da rede referência.	5
-----	---	---

Chapter 1

Introdução

1.1 Motivação

1.2 Objetivos

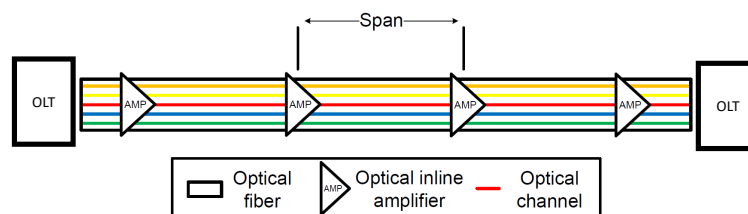
1.3 Estrutura da dissertação

Chapter 2

Dimensionamento de Redes Óticas Opacas e Transparentes

2.1 Elementos de Rede

2.1.1 Arquitetura das Ligações



2.1.2 Arquitetura dos Nós

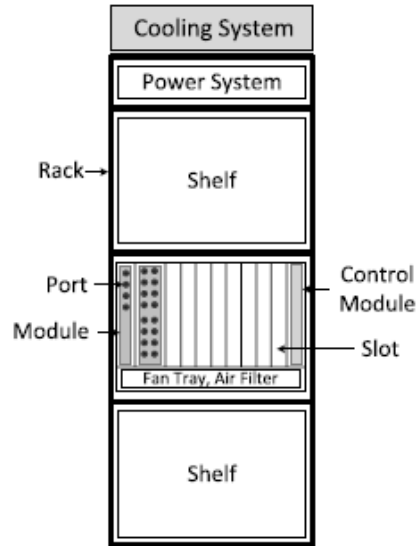


Figure 2.1: Schematic of a node structure containing modules, shelves and a rack. [6515886].

2.2 Topologias de 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

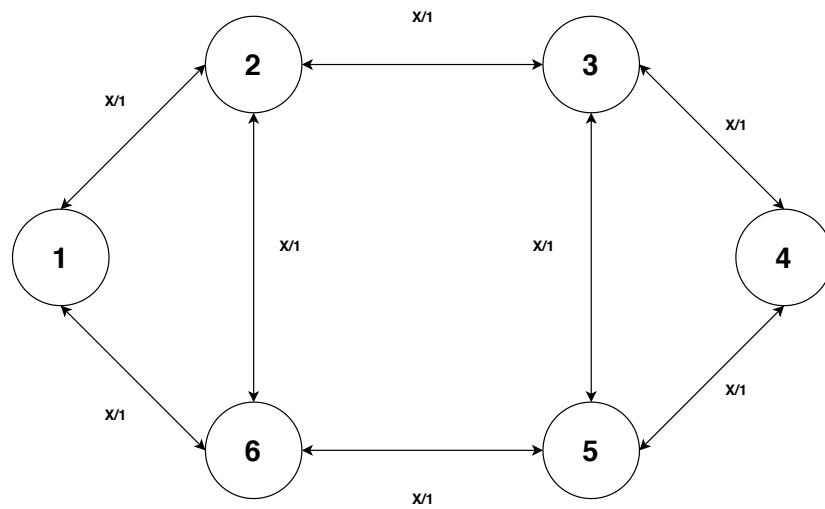


Figure 2.2: Topologia física da rede referência.

Node	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

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

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

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

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

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

2.5 Rede Real

2.5.1 Topologia Física

2.5.2 Matrizes de Tráfego

Chapter 3

CAPEX

3.1 Modelo Analítico

3.1.1 Modo de Transporte Opaco

3.1.2 Modo de Transporte Transparente

3.2 ILP

3.2.1 Modo de Transporte Opaco

3.2.2 Modo de Transporte Transparente

3.3 Heurísticas

3.3.1 Modo de Transporte Opaco

3.3.2 Modo de Transporte Transparente

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 Logical Topology

4.3.2 Physical Topology

4.3.3 Demand Request

4.3.4 Path Request

4.3.5 Path Request Routed

4.3.6 Demand Request Routed

4.4 Blocos do Sistema

4.4.1 Scheduler

4.4.2 LogicalTopologyGenerator

4.4.3 PhysicalTopologyGenerator

4.4.4 LogicalTopologyManager

4.4.5 PhysicalTopologyGenerator

4.5 Final Report

Chapter 5

Algoritmos das Heurísticas

5.1 Scheduling

5.2 Topologia Lógica

5.3 Routing

5.4 Wavelength Assignment

5.5 Grooming

Chapter 6

Resultados

6.1 Rede Referência

6.1.1 Modelo Analítico

Tráfego Baixo

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

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

$$N^R = 16$$

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

$$\langle d \rangle = \frac{20}{6} \quad \langle d \rangle = 3.33$$

$$\langle P_{exc} \rangle = 3.333 \times 1.533] \quad \langle P_{exc} \rangle = 5.1095$$

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

$$C_N = 366\ 570 + 200\ 00 = \mathbf{566\ 570\ €}$$

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

Tráfego Médio

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

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

$$N^R = 16$$

$$C_L = (2 \times 8 \times 15000) + (2 \times 8 \times 5000 \times 9.581) + (2 \times 16 \times 2000) = \mathbf{1\ 070\ 280\ €}$$

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

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

$$C_N = (6 \times (10000 + (100 \times 100 \times 22.5501)) + (100 \times 1.25 \times 120) + (100 \times 2.5 \times 100) + (100 \times 10 \times 32) + (100 \times 40 \times 12) + (100 \times 100 \times 8)))$$

$$C_N = 1\ 359\ 006 + 1\ 000\ 000 = \mathbf{2\ 359\ 006\ €}$$

$$CAPEX = 1\ 070\ 480 + 2\ 359\ 006 \quad CAPEX = \mathbf{3\ 429\ 486\ €}$$

$$< P_{exc} > = 18.75$$

$$< P_{oxc} > = 18.75 \times [1 + (1 + 0) \times 1.533] \quad < P_{oxc} > = 47.4938$$

Tráfego Elevado

6.1.2 ILP

Tráfego Baixo

Network CAPEX						
			Quantity	Unit Price	Cost	Total
Link Cost	OLTs		16	15 000 €	240 000 €	584 000 €
	Optical Channels		56	5000 €	280 000 €	
	Amplifiers		32	2000 €	64 000 €	
Node Cost	Electrical	EXCs	6	10 000 €	60 000 €	1 020 000 €
		ODU0 Ports	120	100 €/Gbit/s	15 000 €	
		ODU1 Ports	100	100 €/Gbit/s	25 000 €	
		ODU2 Ports	32	100 €/Gbit/s	32 000 €	
		ODU3 Ports	12	100 €/Gbit/s	48 000 €	
		ODU4 Ports	8	100 €/Gbit/s	80 000 €	
		LR Transponders	40	100 €/Gbit/s	400 000 €	
	Optical	OXC	6	20 000 €	120 000 €	
		OXC Ports	96	2 500 €	240 000 €	
Total Network Cost						1 604 000 €

Tráfego Médio

Network CAPEX						
			Quantity	Unit Price	Cost	Total
Link Cost	OLTs		16	15 000 €	240 000 €	1 004 000 €
	Optical Channels		140	5000 €	700 000 €	
	Amplifiers		32	2000 €	64 000 €	
Node Cost	Electrical	EXCs	6	10 000 €	60 000 €	2 955 000 €
		ODU0 Ports	600	100 €/Gbit/s	75 000 €	
		ODU1 Ports	500	100 €/Gbit/s	125 000 €	
		ODU2 Ports	160	100 €/Gbit/s	160 000 €	
		ODU3 Ports	60	100 €/Gbit/s	240 000 €	
		ODU4 Ports	40	100 €/Gbit/s	400 000 €	
		LR Transponders	114	100 €/Gbit/s	1 140 000 €	
	Optical	OXC	6	20 000 €	120 000 €	
		OXC Ports	254	2 500 €	635 000 €	
Total Network Cost						3 959 000 €

Tráfego Elevado

Network CAPEX						
			Quantity	Unit Price	Cost	Total
Link Cost	OLTs		16	15 000 €	240 000 €	1 604 000 €
	Optical Channels		260	5000 €	1 300 000 €	
	Amplifiers		32	2000 €	64 000 €	
Node Cost	Electrical	EXCs	6	10 000 €	60 000 €	5 505 000 €
		ODU0 Ports	1200	100 €/Gbit/s	150 000 €	
		ODU1 Ports	1000	100 €/Gbit/s	250 000 €	
		ODU2 Ports	320	100 €/Gbit/s	320 000 €	
		ODU3 Ports	120	100 €/Gbit/s	480 000 €	
		ODU4 Ports	80	100 €/Gbit/s	800 000 €	
		LR Transponders	214	100 €/Gbit/s	2 140 000 €	
	Optical	OXC	6	20 000 €	120 000 €	
		OXC Ports	474	2 500 €	1 185 000 €	
Total Network Cost						7 109 000 €

6.1.3 Heurísticas

Tráfego Baixo

Tráfego Médio

Tráfego Elevado

6.1.4 Análise Comparativa

6.2 Rede Real

6.2.1 Modelo Analítico

6.2.2 Heurísticas

6.2.3 Análise Comparativa

Chapter 7

Conclusões e trabalho futuro

7.1 Conclusões

7.2 Trabalho futuro

