

Engenharia de Telecomunicações e Informática

Redes Óticas

**Estudo sobre Aspetos do Planeamento de uma Rede
Ótica**

João Rabuge | 98509

Bernardo Assunção | 98616

Docente:

Luís Gonçalo Lecoq Vences e Costa Cancela

Ano curricular: 4º

Semestre: 1º

2023/2024

Índice

1. Introdução	1
2. Topologia e Matriz de Tráfego da Rede Ótica	2
3. Parte I	3
3.1. Tarefa A (Encaminhamento).....	3
3.1.1. Encaminhamento caminho mais curto	3
3.1.2. Shortest Path First.....	4
3.1.3. Most Used e Técnica de Coloração de Grafos	6
3.1.3.1. Most Used.....	6
3.1.3.2. Técnica de Coloração de Grafos	7
3.2. Tarefa B (Arquitetura).....	9
3.2.1. Número de Transponders.....	9
3.2.2. Arquitetura do ROADM do nó 4	10
3.3. Tarefa C (Proteção)	10
3.3.1. First-Fit	11
3.3.2. Disponibilidade.....	12
4. Parte II.....	14
4.1.1. First Fit com proteção (1+1)	14
4.1.2. Algoritmo First-Fit através do RWA4	15
4.1.3. Apresentação de resultados	16
5. Conclusão.....	19
6. Bibliografia.....	20
7. Anexos.....	20

Índice Tabelas, Figuras e Equações

Tabela 1 - Matriz de Tráfego OTU-4.....	2
Tabela 2 - Caminho mais curto por nós.	3
Tabela 3 - Caminho mais curto pela distância.	4
Tabela 4 - Ordenação através de Shortest Path First.	4
Tabela 5 - Unidades de Tráfego por ligação através do Shortest Path First.	6
Tabela 6 - Atribuição comprimentos de onda através do algoritmo Most Used.....	7
Tabela 7 - Número de Transponders por nó.....	9
Tabela 8 - Distância por caminho para proteção.	11
Tabela 9 - Proteção dedicada de canal e atribuição de comprimento de onda através de algoritmo First-Fit.....	12
Tabela 10 - Valores usados.	13
Tabela 11 - Indisponibilidade por tamanho de fibra.	14
Tabela 12 - Valores de disponibilidade para C10 e C11 de proteção (2 caminhos mais longos).	14
Figura 1 - Topologia Física da Rede de Transporte.	2
Figura 2 - Topologia física através de Shortest Path First.	5
Figura 3 - Técnica de Coloração de Grafos	8
Figura 4 - Rede NSFNET.	16
Figura 5 - Caminho de serviço, de proteção e unidades de tráfego na consola.	17
Figura 6 - Caminho de serviço, de proteção na topologia da rede NSFNET.....	19
Figura 7 - Script Matlab.....	21
Equação 1 - Indisponibilidade OADMs	13
Equação 2 - MTBF de uma fibra.	13
Equação 3 - Indisponibilidade de uma fibra.	13
Equação 4 - Disponibilidade do caminho.	13

Siglas e Acrónimos

ROADM – Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer

OTN – Optical Transport Network

OTU-4 – Optical Transport Unit 4

GbE – Gigabit Ethernet

A/D CD – Chromatic Dispersion Compensation

DWDM – Dense Wavelength Division Multiplexing

IP/MPLS – Internet Protocol/Multiprotocol Label
Switching

OADMs – Optical Add-Drop Multiplexers

MTBF – Mean Time Between Failures

MTTR – Mean Time To Repair

CC – Cable Cut

RWA - Routing and Wavelength Assignment

λ - Comprimento de onda

Km – Quilómetro

1. Introdução

Este projeto, realizado, tem como principal objetivo o **estudo e planeamento** de uma **rede de transporte ótica** transparente, conforme descrita pela topologia física na *Figura 1*. Assume-se que os nós da rede são **ROADMs** e que a conexão entre eles é realizada por um par de fibras óticas, com cada fibra suportando um sinal **DWDM** (grelha fixa de 50 GHz). A rede cliente é uma rede **IP/MPLS**, com os routers IP/MPLS conectando-se à rede de transporte através de ligações Ethernet.

Admitindo que a rede ótica usa a tecnologia **OTN**, cada **comprimento de onda** transporta um canal ótico com capacidade igual a **OTU-4**. A **matriz de tráfego**, indicada na *Tabela 1*, tem como unidade 100 GbE, e supõe-se que o alcance máximo dos transponders existentes em cada ROADM é de **2000 km**.

Na **primeira parte** do trabalho, o objetivo é definir os **melhores caminhos óticos** e os **comprimentos de onda** associados, usando para tal o algoritmo de encaminhamento baseado no caminho mais curto e a estratégia de ordenação de caminhos *Shortest Path First* seguido do *Most Used* e **técnica de coloração de grafos**. De seguida, será necessário determinar o **número de transponders** que deve existir em cada nó da rede (ROADM). Na sequência, será apresentada uma estrutura possível para a **arquitetura do ROADM do nó 4**, em particular, assumindo que se usa uma arquitetura *Broadcast & Select* com uma estrutura de **A/D CD**. Por fim, aplicar-se-á **proteção dedicada de canal (1+1)**, serão definidos os comprimentos de onda respetivos e calculada a **disponibilidade** de caminhos mais longos.

Relativamente à segunda parte do projeto, será implementado um **algoritmo de encaminhamento e atribuição de comprimentos de onda**, recorrendo ao Matlab. Este algoritmo, que será o *First Fit com Proteção (1+1)*, deve ser desenhado de forma a funcionar com qualquer topologia física e matriz de tráfego.

Este projeto irá permitir aprofundar o **conhecimento e planeamento** de uma rede ótica, bem como desenvolver competências práticas na **implementação de algoritmos de encaminhamento e atribuição de comprimentos de onda**, recorrendo ao Matlab.

2. Topologia e Matriz de Tráfego da Rede Ótica

Nesta secção é possível verificar a **topologia física** da rede na **Figura 1.** e a respetiva **matriz de tráfego** na **Tabela 1.**

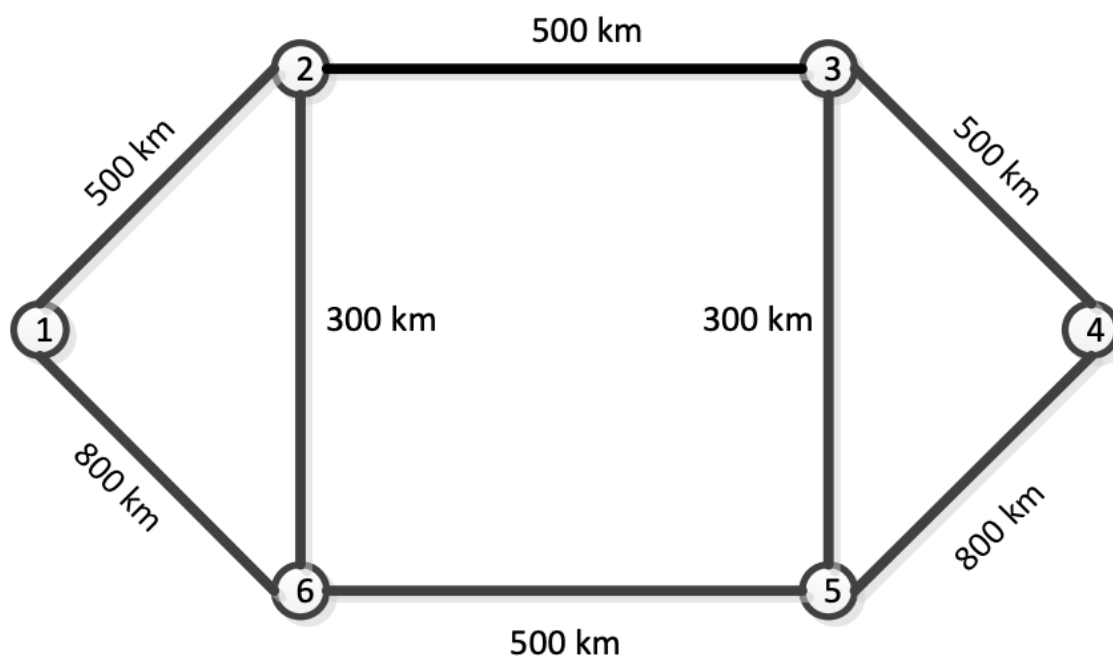


Figura 1 - Topologia Física da Rede de Transporte.

Tabela 1 - Matriz de Tráfego OTU-4.

Nó destino (d) / Nó origem (s)	1	2	3	4	5	6
1	0	2	1	1	2	1
2	2	0	2	1	2	1
3	1	2	0	2	1	0
4	1	1	2	0	1	2
5	2	2	1	1	0	2
6	1	1	0	2	2	0

3. Parte I

Nesta secção iremos realizar as 3 tarefas da parte 1 do projeto, onde iremos determinar os **caminhos óticos** e os respetivos **comprimentos de onda** na **Tarefa A**.

Seguidamente na **Tarefa B** irá ser apresentada uma **estrutura possível do ROADM**, tendo em conta que se uma arquitetura *Broadcast & Select* com estrutura A/D CD.

E por último na **Tarefa C** iremos calcular a **disponibilidade dos caminhos mais longos**, tendo em conta a proteção dedicada do anel.

3.1. Tarefa A (Encaminhamento)

Agora iremos realizar as **3 fases da Tarefa A**, de modo a conseguirmos determinar qual o caminho mais curto.

3.1.1. Encaminhamento caminho mais curto

Nesta primeira fase iremos realizar os caminhos com **encaminhamento mais curto**. Foram realizadas por isto a **Tabela 2**, onde são apresentados os caminhos mais curtos com base no número de saltos entre nós e a **Tabela 3**, com base na distância entre nós.

Tabela 2 - Caminho mais curto por nós.

	1	2	3	4	5	6
1		1-2	1-2-3	1-2-3-4	1-2-3-5 1-2-6-5 1-6-5	1-6 1-2-6
2	2-1		2-3	2-3-4	2-3-5 2-6-5	2-6
3	3-2-1	3-2		3-4	3-5	
4	4-3-2-1	4-3-2	4-3		4-5 4-3-5	4-3-2-6 4-3-5-6 4-5-6
5	5-3-2-1 5-6-2-1 5-6-1	5-3-2 5-6-2	5-3	5-3-4		5-6
6	6-2-1	6-2		6-2-3-4 6-5-3-4 6-5-4	6-5	

Tabela 3 - Caminho mais curto pela distância.

	1	2	3	4	5	6
1		500	1000	1500	1300	800
2	500		500	1000	800	300
3	1000	500		500	300	
4	1500	1000	500		800	1300
5	1300	800	300	800		500
6	800	300		1300	500	

É possível verificar através destas tabelas que existe alguns nós, onde há **2 caminhos possíveis** com o mesmo **número de saltos** e a **mesma distância** entre nós de origem e destino, numa fase mais adiantada do projeto será escolhido que caminho irá ser utilizado.

3.1.2. Shortest Path First

Agora através do algoritmo *Shortest Path First*, iremos ordenar as ligações com **menor custo**. No entanto há situações onde havia **2/3 caminhos possíveis**. Todas as decisões foram feitas tendo em conta o facto de as ligações estarem **menos sobrecarregadas**. Tendo em conta isso, foi possível definir as **ligações mais eficientes** para esta topologia de rede. Abaixo na *Tabela 4*, é possível verificar a **estratégia de ordenação** com base no algoritmo *Shortest Path First*.

Tabela 4 - Ordenação através de Shortest Path First.

Caminhos	Nós	Distância [km]	Custo [OTU-4]
C1	2-6	300	1
C2	3-5	300	1
C3	1-2	500	2
C4	2-3	500	2
C5	3-4	500	2

C6	5-6	500	2
C7	1-6	800	1
C8	2-3-5	800	2
C9	4-5	800	1
C10	1-2-3	1000	1
C11	2-3-4	1000	1
C12	1-6-5	1300	2
C13	4-5-6	1300	2
C14	1-2-3-4	1500	1

Após a realização da tabela acima, foi possível então realizar a **topologia da rede** com as ligações **mais eficientes** demonstradas abaixo na **Figura 2**.

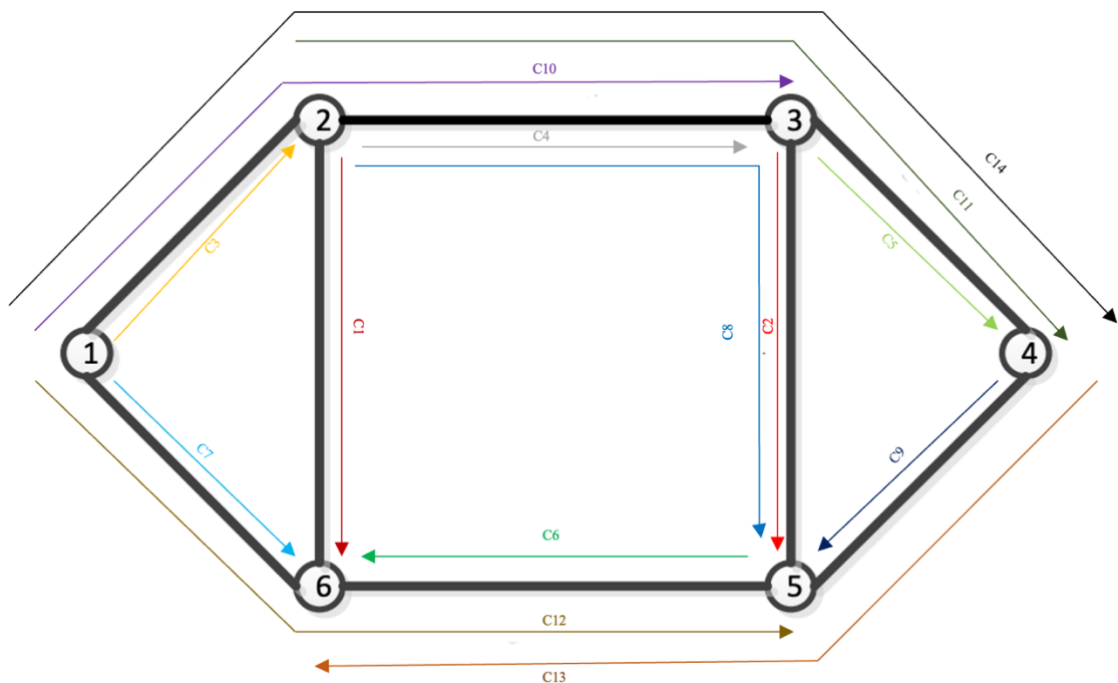


Figura 2 - Topologia física através de Shortest Path First.

Assim, foi possível calcular o tráfego em cada ligação usando o algoritmo **Shortest Path First**. Ao observar a **Tabela 5**, é bem visível que todas as ligações estão bem equilibradas em termos de **unidades de tráfego**, não havendo nenhuma muito **sobrecarregada** ou muito abaixo um dos outros, sendo por isso a **melhor opção**.

Tabela 5 - Unidades de Tráfego por ligação através do Shortest Path First.

Ligações Simples	Caminhos	Unidades de Tráfego
1-2	C3+C10+C14	4
2-3	C4+C8+C10+C11+C14	7
2-6	C1	1
3-4	C5+C11+C14	4
3-5	C2+C8	3
4-5	C9+C13	3
5-6	C6+C12+C13	6
6-1	C7+C12	3

3.1.3. Most Used e Técnica de Coloração de Grafos

Nesta secção foi realizado primeiramente a **atribuição de comprimentos de onda** através do algoritmo *Most Used* e posteriormente foi realizado um grafo através da técnica de coloração de grafos.

3.1.3.1. Most Used

O algoritmo *Most Used* é uma estratégia de atribuição de recursos que favorece a utilização dos recursos **mais utilizados primeiro**. No contexto da atribuição de comprimentos de onda em redes óticas, o algoritmo *Most Used* **priorizaria** a atribuição dos comprimentos de onda que são usados **mais frequentemente**.

Neste caso específico, o algoritmo é usado juntamente com a **estratégia de reutilização de comprimentos de onda**. Ao atribuir comprimentos de onda às ligações na rede, o algoritmo tenta **reutilizar os comprimentos de onda mais usados** que **não causem interferência**, ou seja, aqueles que não se **sobrepõem com as ligações já existentes no mesmo nó**.

Esta abordagem pode ajudar a **maximizar** a utilização da rede e a **minimizar** a quantidade total de comprimentos de onda necessários, permitindo uma operação mais eficiente da rede. Ao aplicar este raciocínio, obteve-se **7 comprimentos de onda** ($\lambda_1 - \lambda_7$), como é possível verificar na *Tabela 6*.

Tabela 6 - Atribuição comprimentos de onda através do algoritmo Most Used.

Caminhos	Ligações	Custo [OTU-4]	Grau	Comprimento Onda
C1	2-6	1	0	$\lambda 1$
C2	3-5	1	1	$\lambda 1$
C3	1-2	2	2	$\lambda 1, \lambda 2$
C4	2-3	2	4	$\lambda 1, \lambda 2$
C5	3-4	2	2	$\lambda 1, \lambda 2$
C6	5-6	2	2	$\lambda 1, \lambda 2$
C7	1-6	1	1	$\lambda 1$
C8	2-3-5	2	5	$\lambda 3, \lambda 4$
C9	4-5	1	1	$\lambda 1$
C10	1-2-3	1	5	$\lambda 5$
C11	2-3-4	1	5	$\lambda 6$
C12	1-6-5	2	3	$\lambda 3, \lambda 4$
C13	4-5-6	2	3	$\lambda 5, \lambda 6$
C14	1-2-3-4	1	6	$\lambda 7$

3.1.3.2. Técnica de Coloração de Grafos

A *Técnica de Coloração de Grafos* é uma técnica usada para representar **visualmente informações** num **grafo**. No contexto das redes óticas, esta técnica é frequentemente usada para representar a **atribuição de comprimentos de onda** a diferentes ligações na rede.

A ideia básica é a seguinte: cada **comprimento de onda** é representado por uma **cor única**. Portanto, se duas ligações compartilham um nó e usam o mesmo comprimento de onda, elas devem ter a mesma cor. Se as ligações **não partilham nós**, é possível reutilizar cores (ou seja, comprimentos de onda), o que é uma maneira eficiente de utilizar recursos limitados.

Neste caso específico, utilizamos esta técnica para **visualizar a atribuição de comprimentos de onda** numa rede ótica. Cada **cor representa um comprimento de onda** único, e os comprimentos de onda são reutilizados sempre que possível para **maximizar a eficiência**.

A coloração de grafos ajuda a visualizar a atribuição de comprimentos de onda, tornando mais fácil identificar onde os comprimentos de onda estão sendo usados de forma eficiente e onde há **potencial para melhorias**. Além disso, também pode ajudar a identificar conflitos, onde dois canais que partilham um nó estão a tentar usar o mesmo **comprimento de onda**. Isto é possível ser observado na **Figura 3**.

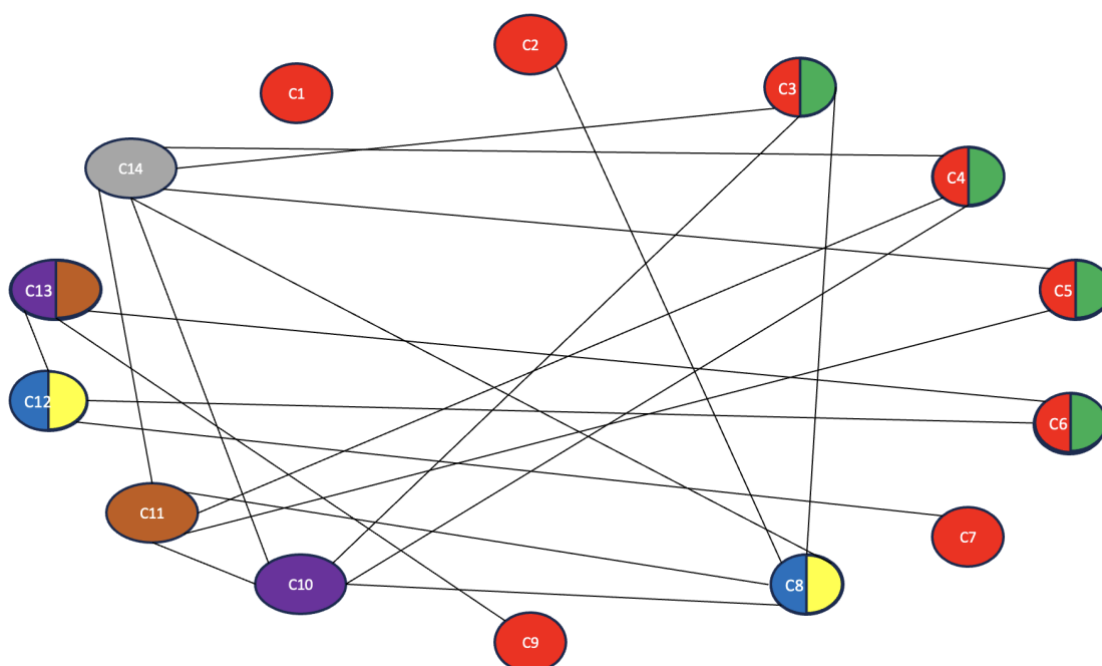


Figura 3 - Técnica de Coloração de Grafos

É possível também observar na **Figura 3**, que alguns foi definido. Isto deve-se ao uso da tecnologia **OTN/DWDM**, onde cada comprimento de onda carrega um canal ótico de capacidade **OTU-4**. Considerando que a unidade da matriz de tráfego é de 100GbE (OTU-4), é fácil perceber que para transportar **uma unidade de tráfego**, precisamos apenas de **um comprimento de onda**, enquanto para **duas unidades**, utilizamos efetivamente os **dois comprimentos de onda** reservados.

3.2. Tarefa B (Arquitetura)

Agora na **Tarefa B** iremos realizar o cálculo do **número de transponders** para esta rede ótica e posteriormente iremos apresentar uma estrutura possível para a **arquitetura do ROADM do nó 4** admitindo que se usa uma arquitetura **Broadcast & Select** com uma estrutura de A/D CD.

3.2.1. Número de Transponders

Agora seguindo para o cálculo do número de transponders, o objetivo foi determinar a **quantidade de transponders** requerida **por nó**. Para realizar essa tarefa, tivemos de contabilizar o **tráfego que é extraído em cada nó**. Consequentemente, o tráfego que deveria ser considerado é aquele que é extraído, enquanto o tráfego que passa por um único nó sem alterar a carga de tráfego pode ser desconsiderado.

Seguindo esse raciocínio, torna-se mais fácil entender a quantidade de transponders necessários para cada nó, pois esse número é **diretamente proporcional à quantidade de tráfego**, assim observando a **Tabela 1**, foi possível chegar ao número de transponder necessários. Consequentemente, foi possível realizar a **Tabela 7**, onde é possível saber o **número de transponders** necessários para esta rede ótica.

Tabela 7 - Número de Transponders por nó.

Nó	OTU-4 [Tráfego]	Transponders
1	7	7
2	8	8
3	6	6
4	7	7
5	8	8
6	6	6

3.2.2. Arquitetura do ROADM do nó 4

A maior distância a ser percorrida nesta rede ótica é de **1500 km**, e que os transponders podem cobrir até **2000 km**, a regeneração do sinal na rede não é necessária. Isto simplifica a composição do ROADM em cada nó, incluindo o **Nó 4**.

Para o Nó 4, vamos assumir uma arquitetura **Broadcast & Select** com uma configuração de **A/D CD**, que inclui **7 transponders**.

- **Transponders (7 Unidades):** Estes são responsáveis pela conversão de sinais **elétricos** em sinais **óticos** e vice-versa, e são essenciais para suportar o tráfego que começa ou termina no Nó 4. Cada transponder pode suportar uma ligação OTU-4, que equivale a uma taxa de dados de 100 Gbps.
- **Broadcast & Select:** Esta arquitetura permite que todos os comprimentos de onda sejam transmitidos para **todos os portos de saída**. Filtros óticos são utilizados para selecionar comprimentos de onda específicos para **encaminhamento** ou **extração no nó**.
- **Amplificadores Óticos (A):** Amplificam o sinal ótico para manter a força do sinal, permitindo uma transmissão eficiente até **1500 km**. São cruciais para garantir a qualidade do sinal dentro do alcance operacional dos transponders.
- **Compensadores de Dispersão (CD):** Estes dispositivos corrigem a **dispersão do sinal ótico**, um fator crucial a considerar em transmissões de longa distância. Eles garantem que os sinais não se distorçam ou enfraqueçam durante a transmissão.

3.3. Tarefa C (Proteção)

Nesta *Tarefa C* iremos proceder à identificação de **caminhos de proteção** e os respetivos **comprimentos de onda** utilizando o algoritmo *First-fit*. Estes processos foram realizados com base na estratégia de **proteção de canal dedicada (1+1)** e ordenação *shortest path first* e posteriormente proceder ao cálculo da **disponibilidade** dos 2 caminhos **mais longos**.

3.3.1. First-Fit

Para determinar o **caminho de proteção** para cada um dos caminhos mais curtos previamente estabelecidos, assumiu-se que todas as partes desse caminho estavam **indisponíveis**. Deste modo, selecionou-se a **segunda melhor opção**, isto é, o caminho com a **menor distância possível** e o **menor número de nós atravessados**. Na **Tabela 8**, encontram -se os **caminhos originais** e os **caminhos de proteção** selecionados, juntamente com as suas respectivas distâncias.

Tabela 8 - Distância por caminho para proteção.

Caminhos	Ligações Original	Distância [km]	Ligações Proteção	Distância [km]
C1	2-6	300	2-1-6	1300
C2	3-5	300	3-4-5	1300
C3	1-2	500	1-6-2	1100
C4	2-3	500	2-6-5-3	1100
C5	3-4	500	3-5-4	1100
C6	5-6	500	5-3-2-6	1100
C7	1-6	800	1-2-6	800
C8	2-3-5	800	2-6-5	800
C9	4-5	800	4-3-5	800
C10	1-2-3	1000	1-6-5-3	1600
C11	2-3-4	1000	2-6-5-4	1600
C12	1-6-5	1300	1-2-3-5	1300
C13	4-5-6	1300	4-3-2-6	1300
C14	1-2-3-4	1500	1-6-5-4	2100

Assim, após a análise da **Tabela 8**, acima concluímos que existem **5 caminhos**, onde o **caminho de proteção** tem a **mesma distância** que o **caminho original**, embora passe por **mais nós** e/ou **sobrecarregue mais a rede** (por isso se procedeu à escolha dos outros caminhos como originais). Além disso, notamos que para o **caminho 14(C14)**, **não há**

um **caminho de proteção** viável, já que a distância total excede o **alcance máximo** de **2000 km** dos transponders.

Depois de definir os caminhos de proteção, foi necessário atribuir **comprimentos de onda**. Esses resultados são visíveis na **Tabela 9**. abaixo.

Tabela 9 - Proteção dedicada de canal e atribuição de comprimento de onda através de algoritmo First-Fit.

Caminhos	Ligações Original	Ligações Proteção	Custo [OTU-4]	Comprimento Onda
C1	2-6	2-1-6	1	λ_1
C2	3-5	3-4-5	1	λ_2
C3	1-2	1-6-2	2	λ_3, λ_4
C4	2-3	2-6-5-3	2	λ_5, λ_6
C5	3-4	3-5-4	2	λ_7, λ_8
C6	5-6	5-3-2-6	2	λ_9, λ_{10}
C7	1-6	1-2-6	1	λ_2
C8	2-3-5	2-6-5	2	λ_1, λ_2
C9	4-5	4-3-5	1	λ_3
C10	1-2-3	1-6-5-3	1	λ_{11}
C11	2-3-4	2-6-5-4	1	λ_1
C12	1-6-5	1-2-3-5	2	λ_4, λ_7
C13	4-5-6	4-3-2-6	2	λ_1, λ_2
C14	1-2-3-4	1-6-5-4	-	Não tem

3.3.2. Disponibilidade

Após a atribuição dos comprimentos de onda para a proteção dedicada do canal **através do algoritmo First-Fit**, foi necessário calcular a **disponibilidade dos 2 caminhos mais longos** (entre os de serviço e de proteção). Para isso recorreu-se à **Equação 1**. para cálculo da **Indisponibilidade OADMs**, a **Equação 2**. para o cálculo do **MTBF da fibra**, a

Equação 3. para o cálculo da **indisponibilidade da fibra** e por fim a *Equação 4.* por fim, calcular a **disponibilidade do caminho**.

Equação 1 - Indisponibilidade OADMs

$$U_{OADM} = \frac{MTTR_{OADM}}{MTBF}$$

Equação 2 - MTBF de uma fibra.

$$MTBF_{Fibra} = \frac{CC \times 365 \times MTTR_{Fibra}}{L_{Fibra}}$$

Equação 3 - Indisponibilidade de uma fibra.

$$U_{Fibra} = \frac{MTTR_{Fibra}}{MTBF_{Fibra}}$$

Equação 4 - Disponibilidade do caminho.

$$A = (1 - U_{OADM})^{\#Nós} \times (1 - U_{Fibra})$$

Na *Equação 4.* multiplica-se pelo **fator (1-U_{Fibra})** o número de vezes igual ao **número de fibras** que existam no **caminho**.

Para o cálculo da disponibilidade foi também necessário considerar-se os valores predefinidos na *Tabela 10.*

Tabela 10 - Valores usados.

MTTR _{OADM} s	6
MTBF	100000
CC	500
MTTR _{Fibra}	24

Os **2 caminhos mais longos** são os caminhos **10** e **11** de proteção (**C10** e **C11** de proteção). Visto que estes caminhos utilizam os **3 tipos de fibras diferentes** que existem

(300, 500 e 800 km), foi necessário calcular a **indisponibilidade para cada fibra** de diferente tamanho como é demonstrado na Tabela 11 abaixo.

Tabela 11 - Indisponibilidade por tamanho de fibra.

L_{Fibra} [km]	$MTBF_{Fibra}$	U_{Fibra}
300	1460	0.001643836
500	8760	0.002739726
800	5475	0.004383562

Assim, após se obter todos estes valores, é possível através da **Equação 4** proceder ao cálculo da **disponibilidade para os 2 caminhos mais longos**. Esses resultados de disponibilidade estão demonstrados na **Tabela 12**. abaixo.

Tabela 12 - Valores de disponibilidade para C10 e C11 de proteção (2 caminhos mais longos).

Caminho	Ligações Proteção	L_{Fibra} [km]	#Nós	#Fibras	Disponibilidade [%]
C10	1-6-5-3	1600	4	3	99.1018696
C11	2-6-5-4	1600	4	3	99.1018696

4. Parte II

Nesta segunda parte do projeto foi implementado em MATLAB a opção **RWA4**:

Algoritmo *First-Fit*, em que para encaminhamento usa o algoritmo **RWA 4: Algoritmo First Fit com protecção (1+1)**, em que para o encaminhamento usa a função do Matlab *shortestpath(G,s,t,'Method',algorithm)*.

4.1.1. First Fit com proteção (1+1)

Este algoritmo é utilizado de modo que se consiga escolher um **caminho de serviço** e um **caminho de proteção** para a rede NSFNET que irá ser abaixo apresentada. Assim, será

escolhido dois e na rede conseguirá dizer-se qual o **caminho de serviço** e o de **proteção** e os respetivos **comprimentos de onda** para cada um desses caminhos.

4.1.2. Algoritmo First-Fit através do RWA4

A presente análise incide sobre a implementação da função *protecao_first_fit()*, que explora o algoritmo *First Fit* no contexto da rede NSFNET.

Inicialmente, foi definida a estrutura da **rede NSFNET**, constituída por **14 nós e as suas respetivas arestas**. Cada aresta é caracterizada por um par de nós e a **respetiva distância** entre eles. Posteriormente, recorrendo à função *graph()* do MATLAB, é construído um gráfico direcionado, onde os **nós** são representados pelas **arestas** definidas e os respetivos **pesos das arestas** correspondem às **distâncias entre os nós**.

Subsequentemente, é definida a **origem** e o **destino** do **encaminhamento**, sendo determinado o **caminho de serviço** entre ambos através da função *shortestpath()*. Esta função permite encontrar o **caminho mais curto** entre a **origem** e o **destino**, no contexto do gráfico direcionado previamente criado.

Após a determinação do **caminho de serviço**, procede-se à procura do **caminho de proteção**. Para cada nó no **caminho de serviço**, remove-se temporariamente a aresta que liga esse nó ao nó subsequente no caminho primário. Após a remoção temporária desta aresta, é feita uma nova busca do caminho mais curto entre a origem e o destino na rede temporária resultante. Caso seja encontrado um **caminho mais curto**, este é então definido como o novo **caminho de proteção**.

Foi assumida a existência de **1 unidade de tráfego para todos os caminhos**, exibindo em seguida o **caminho de serviço** e o **caminho de proteção**.

Conclui-se com a apresentação de um **gráfico da rede**, onde os **caminhos de serviço** e de **proteção** são devidamente destacados. O **caminho de proteção** é identificado em **verde**, ao passo que o **caminho de serviço** é apresentado em **azul**. Quando ambos os

caminhos partilham a mesma aresta, apenas uma linha é visível, podendo se confirmar os caminhos pelo resultado apresentado na consola.

Assim, a função *protecao_first_fit()* proporciona uma metodologia robusta e eficaz para a gestão e **encaminhamento de dados numa rede**, aplicando o algoritmo **First Fit** e garantindo a existência de um **caminho de proteção** para cada **caminho de serviço**.

4.1.3. Apresentação de resultados

Nesta **Figura 4** é possível observar a **rede NSFNET** após a sua criação com as devidas distâncias no MATLAB.

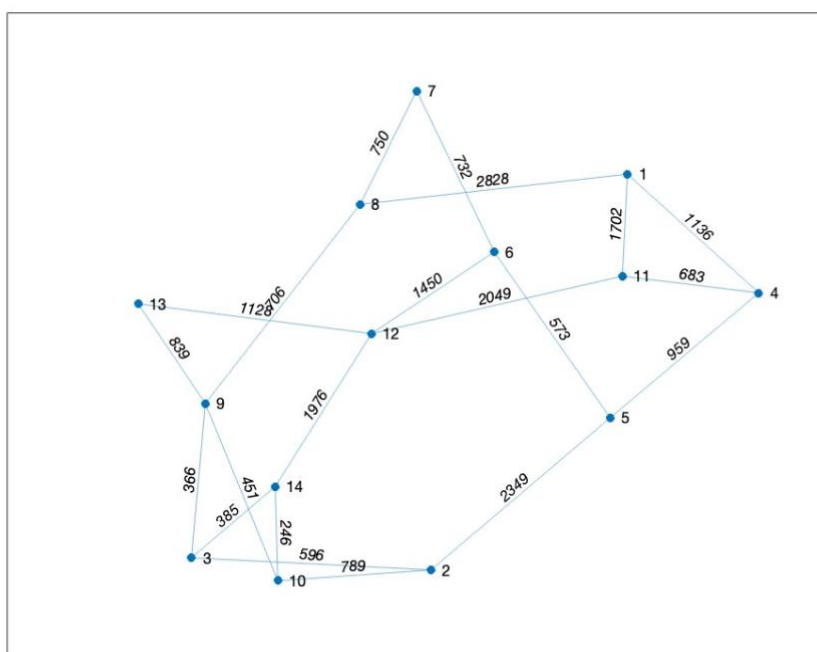


Figura 4 - Rede NSFNET.

Após se ter definido a criação da rede NSFNET, foi necessário a atribuição dos **caminhos de serviço** e de **proteção**. Neste caso, escolheu-se o **nó 1(Seattle, Washington)** como **nó de origem** e o **nó 9 (Ithaca, Nova Iorque)** como **nó de destino**. É possível verificar na

Figura 5 abaixo o caminho de serviço e de proteção na **consola** e os **respetivos comprimentos de onda atribuídos**, e na *Figura 6* os mesmos, mas aplicados na topologia da rede NSFNET.

```
>> first_fit_protection
Comprimento de onda para caminho de serviço:
    1

    1

    1

Comprimento de onda para caminho de proteção:
    2

    2

    1

    1

    1

Caminho de Serviço:
    1      8      9      3

Caminho de Proteção:
    1      8      9     10     14     3

Unidades de Tráfego
    1      1      1
```

Figura 5 - Caminho de serviço, de proteção e unidades de tráfego e comprimentos onda na consola.

É possível através da Figura perceber que o **caminho de serviço** entre **Seattle** e **Ithaca** será:

- **Seattle ⇒ Champaign ⇒ Pittsburgh ⇒ Ithaca**

Já para o **caminho de proteção** será:

- **Seattle ⇒ Champaign ⇒ Princeton ⇒ College Park ⇒ Ithaca**

Para mais fácil compreensão para mais fácil compreensão estas são as **idades** equivalentes aos **nós**:

- **1 – Seattle**
- **2 – Ann Arbor**
- **3 – Ithaca**
- **4 – Palo Alto**
- **5 – Salt Lake City**
- **6 – Boulder**
- **7 – Lincoln**
- **8 – Champaign**
- **9 – Pittsburgh**
- **10 – Princeton**
- **11 – San Diego**
- **12 – Houston**
- **13 – Atlanta**
- **14 – College Park**

Topologia da Rede com Caminhos de Serviço e de Proteção

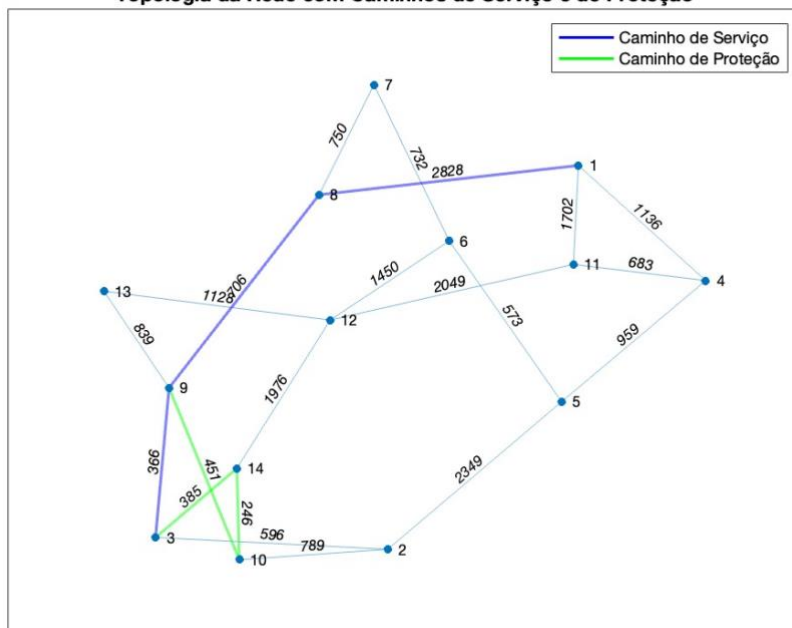


Figura 6 - Caminho de serviço, de proteção na topologia da rede NSFNET.

5. Conclusão

Este projeto sobre o *Estudo sobre Aspetos do Planeamento de uma Rede Ótica* investigou detalhadamente a **estrutura, planeamento e implementação de redes óticas**. Foi realizado um estudo exaustivo da topologia e **matriz de tráfego** de uma rede ótica, seguido pela implementação de várias tarefas que incluíam o **encaminhamento de caminhos mais curtos**, a aplicação do algoritmo **Shortest Path First**, a utilização da técnica **Most Used** e a **Coloração de Grafos**, a determinação do **número de transponders** necessários, a apresentação de uma **estrutura possível para a arquitetura do ROADM do nó 4**, e a aplicação de **proteção dedicada de canal (1+1)**, entre outras tarefas.

O estudo permitiu aprofundar o conhecimento sobre o **planejamento de uma rede ótica**, bem como desenvolver **competências práticas** na implementação de algoritmos de **encaminhamento** e **atribuição de comprimentos** de onda usando o Matlab.

Os resultados obtidos foram **consistentes** e proporcionaram uma **compreensão aprofundada** dos processos envolvidos. Demonstrou-se que a **atribuição eficiente de comprimentos de onda** e a escolha apropriada de **caminhos óticos** podem **maximizar a utilização da rede** e **minimizar a quantidade total de comprimentos de onda** necessários, permitindo uma operação mais eficiente da rede. Além disso, a implementação de **proteção dedicada de canal (1+1)** assegurou a **disponibilidade e confiabilidade da rede**.

Em conclusão, o projeto foi um **sucesso** na exploração do **planeamento e implementação** de uma rede ótica. As técnicas e estratégias aplicadas no projeto forneceram insights valiosos sobre as **melhores práticas** na engenharia de telecomunicações e informática, especificamente no contexto de redes óticas. Estas descobertas podem ser úteis para **futuros trabalhos** e pesquisas na área de **redes óticas** e **engenharia de telecomunicações**. No entanto, é importante ressaltar que cada rede ótica é única e requer um planeamento e implementação específicos para atender às suas necessidades e requerimentos particulares.

6. Bibliografia

1. Ramaswami, R., & Sivarajan, K. N. (2002). Optical Networks: A Practical Perspective (2nd ed.). Morgan Kaufmann.
2. Sivalingam, K. M., & Subramaniam, S. (2010). Optical WDM Networks: Principles and Practice. Springer.
3. NFSNET. https://en.wikipedia.org/wiki/National_Science_Foundation_Network
4. Slides das aulas

7. Anexos

Aqui será possível observar o **script Matlab** utilizado para a **Parte II do projeto**.


```

1 function protecao_first_fit()
2 % Elaboração da rede NSFNET
3 arestas = [
4 1 8 2828; 1 4 1136; 1 11 1702; 4 5 959; 4 11 683; 5 2 2349; 5 6 573; ...
5 11 12 2049; 6 7 732; 6 12 1450; 7 8 750; 12 13 1128; 12 14 1976; ...
6 8 9 706; 9 3 366; 9 10 451; 9 13 839; 2 3 596; 2 10 789; 3 14 385; ...
7 14 10 246
8 ];
9
10 % Criação de um vetor de comprimentos de onda disponíveis para cada aresta
11 comp_onda = ones(size(arestas, 1), 10);
12
13 % Construção do gráfico direcionado com pesos nas arestas (distâncias)
14 Rede = graph(arestas(:, 1), arestas(:, 2), arestas(:, 3));
15 % Criação de uma tabela para armazenar a capacidade dos comprimentos de onda de cada aresta
16 Rede.Edges.Wavelengths = comp_onda;
17
18 % Exemplificação de um encaminhamento por toda a rede
19 origem = 1;
20 destino = 3;
21
22 % Definição do caminho de serviço
23 caminho_servico = shortestpath(Rede, origem, destino);
24 disp('Comprimento de onda para caminho de serviço:');
25 for i = 1:numel(caminho_servico) - 1
26     edgeIndex = findedge(Rede, caminho_servico(i), caminho_servico(i + 1));
27     wavelengthIndex = find(Rede.Edges.Wavelengths(edgeIndex, :), 1);
28     if ~isempty(wavelengthIndex)
29         disp(wavelengthIndex);
30         Rede.Edges.Wavelengths(edgeIndex, wavelengthIndex) = 0;
31     else
32         disp('Não há mais comprimentos de onda disponíveis para esta aresta.');
```

Figura 7 - Script Matlab.