



INSTITUTO  
UNIVERSITÁRIO  
DE LISBOA

Engenharia de Telecomunicações e Informática

**Sistemas de Comunicação Ótica**

**Projeto de um anel com gestão de dispersão e  
encaminhamento de comprimentos de onda**

João Rabuge | 98509

Tiago Felício | 99213

Grupo 17

Docentes:

Prof. Adolfo da Visitação Tregeira Cartaxo

Prof. João Lopes Rebola

Ano curricular: 3º ano

Semestre: 2º

2022/23

## Índice

<b>Acrónimos e Siglas utilizados .....</b>	<b>3</b>
<b>Variáveis e Constantes utilizadas .....</b>	<b>3</b>
<b>1 Introdução .....</b>	<b>4</b>
<b>2 Análise e Resultados .....</b>	<b>5</b>
2.1 Seleção das ligações óticas no anel A17 .....	5
2.2 Eliminação de emissores e recetores que não apresentem a largura de banda necessária para a capacidade pretendida .....	6
2.3 Avaliação da necessidade de compensação de dispersão e escolha dos DCM's7	
2.3.1 Frequências e comprimentos de onda centrais dos 22 canais .....	8
2.3.2 Análise de Necessidade de Compensação .....	9
2.4 Avaliação de Exequibilidade da Ligação .....	12
2.4.1 Ligação Sem Amplificação ótica .....	12
2.4.2 Pré-Amplificação Ótica .....	14
2.4.3 Pré e Pós Amplificação Ótica .....	15
2.4.4 Pré e Pós Amplificação Ótica em todos os ROADMS e Amplificação de Linha Unicamente nas Secções de Multiplexagem onde seja Necessário .....	16
2.5 Verificações Finais .....	20
<b>3 Conclusão .....</b>	<b>21</b>
<b>4 Anexos .....</b>	<b>23</b>
4.1 Anexo A – Número de Canais e Cálculo da Largura de Banda a -3 dB .....	23
4.2 Anexo B – Largura de Banda Necessária .....	24
4.3 Anexo C – Cálculos Frequências e Comprimentos de Onda.....	24
4.4 Anexo D – Análise de Dispersão.....	25
4.5 Anexo E – Perdas no Anel (Sem Amplificação) .....	26
4.6 Anexo F – Cálculo da Margem dos pares $T_x-R_x$ (Sem Amplificação).....	26
4.7 Anexo G – Perdas Anel (Pré-Amplificação) .....	29
4.8 Anexo H – Cálculos de Amplificação de Linha .....	29
4.9 Anexo I – Cálculo de Penalidade .....	31

## Acrónimos e Siglas utilizados

**DCM** - Dispersion Compensation Module

**SSMF** - Standard Single-Mode Fiber

**UPSR** - Unidirectional Path Switched Ring

**ROADM** - Reconfigurable optical Add-drop Multiplexer

**ITU-T** – International Telecommunication Union

**AWG** – Arrayed Waveguided Granting

**OSNR** – Optical Signal to Noise Ratio

**EDFA** – Erbium Doped Fiber Amplifier

**ASE** – Amplified Spontaneous Emission

**VOA** – Variable Optical Attenuator

## Variáveis e Constantes utilizadas

$X$  - Capacidade por canal ótico

$Y$  - Capacidade total

$\lambda$  - Comprimento de onda do canal

$D_{sec}$  - Dispersão da fibra em cada secção

$D_\lambda$  - Dispersão para a frequência ótica do canal

$D_{res}$  - Dispersão residual

$D_{res,máx}$  - Dispersão residual máxima

$\Delta\nu_M$  - Largura de banda associada à modulação

$\Delta\nu_L$  - Largura de linha a meia potência

$\Delta P\Gamma(D\lambda L)|_{dB,máx}$  - Penalidade máxima aceitável devida à dispersão

$R_{b,ch}$  - Ritmo binário do canal

$B_{-3dB}$  – Largura de Banda a -3 dB

$T_x$  - Emissor

$R_x$  - Recetor

## 1 Introdução

Neste projeto de um anel com gestão de dispersão e encaminhamento de comprimentos de onda, o objetivo é generalizar-se a análise realizada na 1ª parte do projeto. Essa generalização será feita para os emissores, recetores e comprimentos de onda associados às frequências pretendidas. Verificar a necessidade de compensar a dispersão, quando o anel está a ser operado num **multicanal** e a utilizar a **fibra ótica Corning SMF-28e+**. Se for necessária essa compensação, serão especificados quais os dispositivos de compensação de dispersão (**DCM's**) escolhidos em cada secção do anel. É de notar que este anel é unidirecional e que há características específicas a cada grupo (**Grupo 17**), descritas na **Tabela 1**.

Dados	Valor
Comprimento de onda do canal ( $\lambda$ )	1554.13 nm
Anel do Grupo	A17
Capacidade por Canal ótico (X)	10 Gbit/s
Capacidade Total (Y)	220 Gbit/s
Fase Não Linear Aceitável	$\pi/2$
Pior caso de probabilidade de erro de bit requerida	$10^{-10}$
Margem de Sobrecarga Requerida	2 dB
Margem de Sistema Requerida	2.5 dB
Número de Canais	22
Penalidade Máxima Aceitável devido a efeitos Não Lineares da Fibra	1 dB
Penalidade Máxima Aceitável devido à Dispersão	1 dB
Segmento de Fibra de Transmissão	2 Km

*Tabela 1 – Características e valores do projeto, para o grupo 17.*

São tidos em conta os **emissores** e **recetores** definidos no **enunciado do projeto**, para a realização de uma análise sobre quais destes devem ser utilizados para o **melhor desempenho do anel A17**, realizando-se assim a escolha dos **equipamentos necessários** para o projeto.

O anel atribuído ao nosso grupo foi o **A17**, cujas ligações e respetivas características estão enunciadas na **Tabela 2**. De modo a sabermos o número de segmentos de fibra ótica para cada ligação, fizemos a divisão do comprimento dessa ligação pelo comprimento de cada **segmento de fibra ótica (2 km)**.

Ligação	Nós de entrada e saída	Comprimento da ligação	Número segmentos
A	Viseu – Peso da Régua	71 Km	35.5 $\approx$ 36
B	Peso da Régua - Chaves	92 Km	46
C	Chaves – Braga	121 Km	60.5 $\approx$ 61
D	Braga - Porto	56 Km	28
E	Porto - Aveiro	76 Km	38
F	Aveiro - Viseu	87 Km	43.5 $\approx$ 44

Tabela 1 – Ligações mais longas, para o grupo 17.

Para fazer o estudo deste anel de forma correta, estipulámos serem necessárias **5 fases** de análise distintas:

- **identificar as conexões mais longas** no anel A17,
- **eliminar emissores e recetores** que **não** possuam **largura de banda** necessária para a capacidade pretendida,
- avaliação da necessidade de **compensação de dispersão** e escolha dos **DCM's**,
- avaliação da **exequibilidade da ligação**,
- **verificações finais**.

## 2 Análise e Resultados

### 2.1 Seleção das ligações óticas no anel A17

As ligações óticas no anel A17 que se pretendem estudar são as mais longas, asseguradas por este, de forma a assegurar todas as margens e penalidades. Sabendo que o anel em estudo é composto por seis secções, induz-se que as ligações mais longas atravessam cinco secções. Como forma de apoio à análise destas ligações, realizámos a **Tabela 3** onde é possível observar que **a ligação mais longa é a ligação E5** (Porto - Aveiro), com um comprimento de ligação equivalente a **447 Km**. Esta ligação é a escolhida, devido ao facto de ser a **mais limitativa**, uma vez que é esta que apresentará mais **perdas devido aos materiais** (fibras, juntas e conectores).

Ligação (mais longa)	Nós de entrada e saída	Secções atravessadas	Comprimento da ligação
<b>A1</b>	Viseu – Peso da Régua	A + B + C + D + E	416 Km
<b>B2</b>	Peso da Régua - Chaves	B + C + D + E + F	432 Km
<b>C3</b>	Chaves – Braga	C + D + E + F + A	411 Km
<b>D4</b>	Braga - Porto	D + E + F + A + B	382 Km
<b>E5</b>	Porto - Aveiro	E + F + A + B + C	447 Km
<b>F6</b>	Aveiro - Viseu	F + A + B + C + D	427 Km

Tabela 3 - Ligações mais longas do anel A17 e respetivos comprimentos.

## 2.2 Eliminação de emissores e recetores que não apresentem a largura de banda necessária para a capacidade pretendida

Primeiramente, foi necessário calcular a **largura de banda** necessária para cada um dos **22 canais** existentes, chegando-se à conclusão que **B<sub>-3 dB</sub> = 6 GHz**. Assim, após comparação com a tabela dos emissores do enunciado do projeto verifica-se, que emissores e recetores têm o **B<sub>-3 dB</sub> > 6 GHz**. Assim, nas análises daqui em diante, serão apenas considerados os **emissores A, B, C e D** e os **recetores A, B, C, D e H** como demonstrado na **Tabela 4**. É possível observar as fórmulas para o cálculo da largura de banda a -3 dB no Anexo A – Número de Canais e Cálculo Largura de Banda a -3 dB.

ID do Emissor	Largura de Banda a -3 dB [GHz]	Largura de Linha a Meia Potência [MHz]
<b>A</b>	13	10
<b>B</b>	11	6
<b>C</b>	9	2
<b>D</b>	6.5	8
ID do Recetor	Largura de Banda a -3 dB [GHz]	
<b>A</b>	10	
<b>B</b>	12	
<b>C</b>	8	
<b>D</b>	9	
<b>H</b>	6.5	

Tabela 4 – Emissores e Recetores que cumprem cláusula de largura de banda para o anel A17.

### 2.3 Avaliação da necessidade de compensação de dispersão e escolha dos DCM's

Quando se pretende fazer uma avaliação da necessidade de compensação de dispersão, tem que se primeiramente identificar as **frequências óticas (comprimentos de onda)** dos **22** canais. Assume-se também que os canais podem estar em **qualquer parte da banda ótica disponível**. Para isto, é necessário identificar essa banda ótica e que **equipamentos a limitam**. Apenas os **amplificadores óticos e multiplexadores/demultiplexadores WDM**, usados nos **ROADM's** mostram **limitação de banda**. De entre os 2 multiplexadores/demultiplexadores disponíveis, apenas o **AWG100W** é **viável**. Isto deve-se ao facto, de apenas este **garantir a abrangência de todos os canais do anel A17** (22 canais), tendo este **40** disponíveis, ao contrário do **AWG50** (8 canais). Na **Tabela 5**, é possível observar algumas características do **AWG100** e dos **EDFA oa3500** e **oa4500** na **Tabela 6**.

Características	Valores
Tipo	AWG
Número Canais	40
Espaçamento entre canais [GHz]	100
Banda de passagem de referência [GHz]	$\pm 12.5$
Gama de comprimentos de onda de funcionamento [nm]	Banda C (1530-1565) ou L (1565-1625)
Perdas de inserção [dB]	5.0 (máximo)
Variação pico a pico das perdas entre canais [dB]	0.5 (máximo)
Largura de banda a -3 dB [GHz]	75

Tabela 5 – Características do AWG 100.

EDFA	$\lambda_{\min}$ [nm]	$\lambda_{\max}$ [nm]
Oa3500	1430	1563
Oa4500	1530	1564

Tabela 6 – Características dos EDFA.

Após a observação da tabela acima, é possível garantir que a **banda disponível está entre 1530–1564 [nm]**. Agora, é preciso averiguar se o **AWG 100 pode ser utilizado**, tendo em conta se a sua **largura de banda** (75 GHz) é suficiente para receber a capacidade que se pretende transmitir em cada canal e, também se tem que examinar a deriva de sinal causada pelo emissor. Para os emissores A, B, C, e D, tendo em conta a **deriva máxima de frequência** de cada um deles, foi possível calcular a **largura de banda necessária** e verificar se esse valor será **inferior ao do AWG100** e assim, possível de ser **acomodado por este**.

Na **Tabela 7**, é possível verificar esses valores. Os cálculos são possíveis de observar no Anexo B – Largura de Banda Necessária AWG

ID do Emissor	Largura de Banda Necessária (AWG) [GHz]	Deriva Máxima de Frequência [GHz]
A	29	$\pm 4.5$
B	27	$\pm 3.5$
C	25	$\pm 2.5$
D	26	$\pm 3$

Tabela 7 – Largura de Banda Necessária (AWG) e Deriva Máxima para cada Emissor.

### 2.3.1 Frequências e comprimentos de onda centrais dos 22 canais

A imposição do **espaçamento de 100GHz**. Com **22 canais de banda disponível**, torna assim possível identificar 3 alternativas para delinear um plano de **comprimentos de onda**, de acordo com as limitações que os canais sofrem pelo ITU-T, como é demonstrado na **Tabela 8**, os cálculos realizados encontram-se em Anexo C – Cálculos Frequências e Comprimentos de Onda:

- 22 canais encostados ao extremo inferior da banda disponível,
- 22 canais centrados aproximadamente ao meio da banda disponível,
- 22 canais encostados ao extremo superior da banda disponível

ID do Canal	Extremo Inferior da Banda Disponível		Centro da Banda Disponível		Extremo Superior da Banda Disponível	
	[THz]	[nm]	[THz]	[nm]	[THz]	[nm]
1	193.7	1547.72	192.9	1554.13	191.9	1562.23
2	193.8	1546.92	193	1553.33	192.0	1561.42
3	193.9	1546.12	193.1	1552.52	192.1	1560.61
4	194.00	1545.32	193.2	1551.72	192.2	1559.79
5	194.1	1544.53	193.3	1550.92	192.3	1558.98
6	194.2	1543.73	193.4	1550.12	192.4	1558.17
7	194.3	1542.94	193.5	1549.32	192.5	1557.36
8	194.4	1542.14	193.6	1548.51	192.6	1556.55
9	194.5	1541.35	193.7	1547.72	192.7	1555.75
10	194.6	1540.56	193.8	1546.92	192.8	1554.94
11	194.7	1539.77	193.9	1546.12	192.9	1554.13
12	194.8	1538.98	194.0	1545.32	193.0	1553.33
13	194.9	1538.19	194.1	1544.53	193.1	1552.52
14	195.0	1537.40	194.2	1543.73	193.2	1551.72
15	195.1	1536.61	194.3	1542.94	193.3	1550.92
16	195.2	1535.82	194.4	1542.14	193.4	1550.12
17	195.3	1535.04	194.5	1541.35	193.5	1549.32
18	195.4	1534.25	194.6	1540.56	193.6	1548.51

Tabela 8 – Frequências e comprimentos de onda dos 22 canais: extremo inferior e superior e central de banda disponível..



### 2.3.2 Análise de Necessidade de Compensação

Tendo em conta os **22 canais de 10 Gbit/s**, o valor máximo da dispersão residual para uma **penalidade devido à dispersão associada à modulação de 1 dB** irá depender exclusivamente da **localização em que os canais se encontram**. Assim, iremos escolher o canal com o valor de **dispersão mais elevado**, de modo a que os outros **21 canais não estejam tão sub-compensados**. O canal escolhido é o **canal 1**, pois este apresenta o **maior comprimento de onda** para cada plano de frequências, estes valores são possíveis observar na **Tabela 9**.

	Extremo Inferior da Banda Disponível	Centro da Banda Disponível	Extremo Superior da Banda Disponível
Comprimento de onda [nm]	1547.72	1554.13	1562.23
Dispersão para a frequência ótica do canal [ps/(nm*Km)]	17.33	17.70	18.17
Dispersão Residual Máxima por Ligação [ps/nm]	751.74	745.54	737.83

*Tabela 9 – Valores de dispersão para a frequência do canal 1 e dispersão residual máxima do canal 1.*

Através destes valores, é possível concluir que é possível utilizar um valor **menor de dispersão residual**, com a condição de que seja utilizado o **extremo superior da banda disponível**, algo que exige **mais dispersão**, portanto **maior comprimento de DCF** e por consequência também **maiores perdas**. Também é introduzida **dispersão na banda pela SSMF**, tornando assim **impossível** concluir de **antemão** que banda é a melhor.

Assim, ir-se-á considerar o DCM que apresenta o valor de **dispersão mais baixo (em módulo devido à modulação externa)** para cada comprimento das secções, algo que é o pior caso do **ponto de vista das perdas**.

A banda que irá ser escolhida, será aquela que tenha o **total de perdas mais baixo**, nos DCM, na ligação mais longa. Isto pois as perdas nos outros componentes não dependem da banda utilizada.

Na **Tabela 10**, é possível observar os dados **DCM tabelados e para os comprimentos de onda de cada plano**.

	Comprimento Onda [nm]	Comprimento Onda [nm]	Comprimento Onda [nm]			m	perdas [dB]
	1550	1569	1554.13	1547.72	1562.23	-	-
DCM-20	-327	-348	331.56	324.48	340.52	1105263158	3.4
DCM-30	-490	-523	497.17	486.04	511.24	1736842105	4.1
DCM-40	-653	-697	662.56	647.72	681.32	2315789474	4.8
DCM-60	-980	-1045	994.13	-972.2	1021.84	3421052632	6.1
DCM-80	-1307	-1394	1325.91	1296.56	1363.00	4578947368	7.5
DCM-100	-1633	-1742	1656.69	1619.92	1703.16	5736842105	8.9
DCM-120	-	-	1987.48	1943.28	2043.32	-	10.3
DCM-140	-	-	2318.26	2266.64	2383.48	-	11.7

Tabela 10 – DCM tabelados e para comprimentos de onda de cada plano.

Agora nas **Tabelas 11, 12 e 13** vai ser possível observar o processo de **seleção dos DCM's** para as localizações **superiores, centrais e inferiores da banda**. Uma vez que o **extremo inferior** da banda apresenta **menor valor de dispersão residual**, será este o considerado doravante como demonstrado nas tabelas a seguir.

	Secção A	Secção B	Secção C	Secção D	Secção E	Secção F
Comprimento da secção [Km]	71	92	121	56	76	87
Dispersão na SSMF [ps/nm]	1230.264863	1594.146019	2096.648569	970.3497508	1316.903233	1507.507649
D residual por secção [ps/nm]	150.3467602	150.3467602	150.3467602	150.3467602	150.3467602	150.3467602
D acc DCM ideal [ps/nm]	1079.918102	1443.799259	1946.301808	820.0029906	1166.556473	1357.160888

Fase 1						
Dis. DCM	-972.2	-1296.56	-1943.28	-972.2	-1296.56	-1296.56
Dres,sec [ps/nm]	258.0648626	297.5860191	153.3685686	1.850249233	20.34323318	210.9476485
Subestimação disp. [ps/nm]	107.7181024	147.2392589	3.021808445	152.1970094	130.003527	60.60088834
Dres total [ps/nm]	727.5124343	680.3952202	640.8740637	785.0915142	940.310332	918.1168496

Fase 2						
Dis. DCM	-972.2	-1619.92	-1943.28	-972.2	-1296.56	-1296.56
Dres,sec [ps/nm]	258.0648626	25.77398088	153.3685686	1.850249233	20.34323318	210.9476485
Subestimação disp. [ps/nm]	107.7181024	176.1207411	3.021808445	152.1970094	130.003527	60.60088834
Dres total [ps/nm]	404.1524343	357.0352202	640.8740637	461.7315142	616.950332	594.7568496

Perdas DCM secção [dB]	6.1	8.9	10.3	6.1	7.5	7.5
Perdas DCM's ligação começa na ligação K [dB]	38.9	40.3	37.5	36.1	40.3	38.9

Tabela 11 – Processo seleção DCM's do extremo inferior da banda.

	Secção A	Secção B	Secção C	Secção D	Secção E	Secção F
Comprimento da secção [Km]	71	92	121	56	76	87
Dispersão na SSMF [ps/nm]	1256.716 694	1628.421 631	2141.728 45	991.2131 667	1345.217 869	1539.920 455
D residual por secção [ps/nm]	149.1091 091	149.1091 091	149.1091 091	149.1091 091	149.1091 091	149.1091 091
D acc DCM ideal [ps/nm]	- 1107.607 584	- 1479.312 522	- 1992.619 34	- 842.1040 576	- 1196.108 76	- 1390.811 346
Fase 1	-	-	-	-	-	-
Dis. DCM	994.1289 474	1325.911 053	1987.475 263	994.1289 474	1325.911 053	1325.911 053
Dres.sec [ps/nm]	262.5877 461	302.5105 784	154.2531 863	2.915780 655	19.30681 648	214.0094 028
Subestimação disp. [ps/nm]	113.4786 37	153.4014 693	5.144077 203	152.0248 898	129.8022 927	64.90029 365
Dres total [ps/nm]	735.7425 467	687.1642 034	647.2413 711	795.4987 632	952.6677 302	930.4451 33
Fase 2	-	-	-	-	-	-
Dis. DCM	994.1289 474	1656.693 158	1987.475 263	994.1289 474	1325.911 053	1325.911 053
Dres.sec [ps/nm]	262.5877 461	28.27152 687	154.2531 863	2.915780 655	19.30681 648	214.0094 028
Subestimação disp. [ps/nm]	113.4786 37	177.3806 36	5.144077 203	152.0248 898	129.8022 927	64.90029 365
Dres total [ps/nm]	404.9604 415	356.3820 981	647.2413 711	464.7166 579	621.8856 249	599.6630 278
Perdas DCM secção [dB]	6.1	8.9	10.3	6.1	7.5	7.5
Perdas DCM's ligação começa na ligação K [dB]	38.9	40.3	37.5	36.1	40.3	38.9

Tabela 12 – Processo seleção DCM's do centro da banda.

	Secção A	Secção B	Secção C	Secção D	Secção E	Secção F
Comprimento da secção [Km]	71	92	121	56	76	87
Dispersão na SSMF [ps/nm]	1289.769 163	1671.250 184	2198.057 307	1017.282 72	1380.597 978	1580.421 369
D residual por secção [ps/nm]	147.5668 872	147.5668 872	147.5668 872	147.5668 872	147.5668 872	147.5668 872
D acc DCM ideal [ps/nm]	- 1142.202 276	- 1523.683 296	- 2050.490 419	- 869.7158 332	- 1233.031 091	- 1432.854 482
Fase 1	-	-	-	-	-	-
Dis. DCM	1021.839 474	1363.000 526	2043.322 632	1021.839 474	1363.000 526	1363.000 526
Dres.sec [ps/nm]	267.9296 897	308.2496 573	154.7346 751	4.556753 232	17.59745 144	217.4208 43
Subestimação disp. [ps/nm]	120.3628 025	160.6827 7	7.167787 878	152.1236 405	129.9694 358	69.85395 572
Dres total [ps/nm]	743.9547 204	693.4458 736	653.1259 06	806.6408 882	965.9323 165	943.7781 119
Fase 2	-	-	-	-	-	-
Dis. DCM	1021.839 474	-1703.16	2043.322 632	1021.839 474	1363.000 526	1363.000 526
Dres.sec [ps/nm]	267.9296 897	31.91139 535	154.7346 751	4.556753 232	17.59745 144	217.4208 43
Subestimação disp. [ps/nm]	120.3628 025	179.4782 826	7.167787 878	152.1236 405	129.9694 358	69.85395 572
Dres total [ps/nm]	403.7936 677	353.2848 209	653.1259 06	466.4798 356	625.7712 639	603.6170 592
Perdas DCM secção [dB]	6.1	8.9	10.3	6.1	7.5	7.5
Perdas DCM's ligação começa na ligação K [dB]	38.9	40.3	37.5	36.1	40.3	38.9

Tabela 13 – Processo seleção DCM's do extremo superior da banda.

Após observação das tabelas acima, é possível concluir que todas as **ligações do anel A17** têm **dispersão residual sempre inferior à dispersão residual máxima**.

Todos estes cálculos vão ser possíveis observar no *Anexo D – Análise de Dispersão*.

## 2.4 Avaliação de Exequibilidade da Ligação

### 2.4.1 Ligação Sem Amplificação ótica

Agora, iremos avaliar a necessidade de implementar **amplificação ótica**. Para ser **exequível sem amplificação ótica**, é necessário que se consiga obter a **margem de sistema requerida de 2.5 dB sem esta**. Mais uma vez, devem ser considerados os **piores casos** possíveis de **perdas** nos componentes. Deve-se ainda considerar que as atenuações dos **VOA's** estão em **0 dB**, visto que corresponde à **melhor situação** relativa à **potência de entrada no emissor**. Na ligação mais longa **E5 (Porto – Aveiro)**, onde atravessa as secções **E+F+ A+ B +C**, o sinal irá percorrer **1 ROADM** em modo de **extração**, **4** em modo de **passagem** e **1** em modo de **inserção**. Na *Tabelas 14* é possível observar a **ligação E5** e os respetivos **modos de ROADM** em cada nó.

Ligação E5	Comprimento Secção [Km]	Início Secção	ROADM's
<b>E</b>	76	Porto	Inserção - Tx
<b>F</b>	87	Aveiro	Passagem
<b>A</b>	71	Viseu	Passagem
<b>B</b>	92	Peso da Régua	Passagem
<b>C</b>	121	Chaves	Passagem
<b>Total</b>	447	Braga	Extração - Rx

*Tabela 14 – Ligação E5 e respetivos ROADM's.*

Agora, é necessário apresentar os **valores das perdas** para cada um dos **elementos**, tanto **ROADM's** nos seus **modos** específicos e de outros **componentes nos nós**. Esses valores estão apresentados abaixo nas *Tabelas 15 e 16*.

Modo Funcionamento	Perdas demux [dB]	Perdas comutador [dB]	Perdas mux [dB]	Perdas conetores emissor e recetor	Total [dB]
Passagem	5	1.5	5	0	11.5
Extração	5	1.5	0	0.4	6.9
Inserção	0	1.5	5	0.4	6.9

Tabela 15 – Perdas nos ROADMs do anel.

Secção	Comprimento da fibra	Número conector es	Número de juntas	Perdas fibra [dB]	Perdas conectores [dB]	Perdas juntas [dB]	Perdas DCM [dB]	Total [dB]
E	76	2	75	16.72	0.8	5.25	7.5	30.27
F	87	2	86	19.14	0.8	6.02	7.50	33.46
A	71	2	70	15.62	0.8	4.9	6.1	27.42
B	92	2	91	20.24	0.8	6.37	8.90	36.31
C	121	2	120	26.62	0.8	8.4	10.3	46.12

Tabela 16 – Perdas nos equipamentos em cada secção da ligação E5.

Após a análise dos dados, consegue-se concluir que existe um **total de perdas de 233.38 dB**. Tais cálculos para as perdas, são possíveis observar no Anexo E – Perdas no Anel (Sem Amplificação).

Para a verificação da **exequibilidade da ligação E5 sem amplificação ótica**, foi necessário o cálculo das **margens de sistema de cada par emissor-recetor** ( $T_x - R_x$ ). Para isso, foi calculado no Anexo F – Cálculo da Margem dos pares Tx-Rx (Sem Amplificação), os valores de  **$r_{ext}$**  e **potência média** para o emissor e o **parâmetro Q**, **efeito filtro** e  **$B_{e,n}$**  para o recetor para a obtenção da **sensibilidade**. Considerou-se também o valor máximo de penalidade a soma entre o valor de **penalidade máxima aceitável de vido à dispersão (1 dB)** e a **penalidade máxima aceitável devido a efeitos não lineares da fibra (1 dB)**. Após esses cálculos, foi possível a obtenção da **Tabela 17** com as **margens** para cada um dos **22 pares emissor-recetor**.

Par Tx-Rx	Potência média acoplada à fibra [dBm]	Perdas no caminho [dB]	Sensibilidade [mW]	Sensibilidade [dBm]	Valor máximo de penalidade [dB]	Margem [dB]
A-A	8.063522236	233.38	4.30465E-06	-23.66061966	2	-203.6558581
A-B	8.063522236	233.38	9.38712E-06	-20.27467706	2	-207.0418007
A-C	8.063522236	233.38	1.14968E-05	-19.39422076	2	-207.922257
A-D	8.063522236	233.38	1.69946E-05	-17.69688393	2	-209.6195938
A-H	8.063522236	233.38	7.63515E-06	-21.17182607	2	-206.1446517
B-A	8.451536157	233.38	4.05779E-06	-23.91709961	2	-203.0113642
B-B	8.451536157	233.38	8.8488E-06	-20.531157	2	-206.3973068
B-C	8.451536157	233.38	1.08375E-05	-19.65070071	2	-207.2777631
B-D	8.451536157	233.38	1.602E-05	-17.95336388	2	-208.9751
B-H	8.451536157	233.38	7.1973E-06	-21.42830602	2	-205.5001578
C-A	8.860477688	233.38	3.87293E-06	-24.11960308	2	-202.3999192
C-B	8.860477688	233.38	8.44567E-06	-20.73366047	2	-205.7858618
C-C	8.860477688	233.38	1.03438E-05	-19.85320418	2	-206.6663181
C-D	8.860477688	233.38	1.52902E-05	-18.15586735	2	-208.363655
C-H	8.860477688	233.38	6.8694E-06	-21.63080948	2	-204.8887128
D-A	6.727302021	233.38	3.62507E-06	-24.40683403	2	-204.2458639
D-B	6.727302021	233.38	7.90516E-06	-21.02089143	2	-207.6318066
D-C	6.727302021	233.38	9.68181E-06	-20.14043513	2	-208.5122628
D-D	6.727302021	233.38	1.43117E-05	-18.4430983	2	-210.2095997
D-H	6.727302021	233.38	6.42978E-06	-21.91804044	2	-206.7346575

Tabela 17 – Margens sem amplificação ótica para os 22 pares emissor-recetor.

Após a observação da tabela, concluímos que todas as **margens de cada par emissor-recetor são inferiores à margem de sistema de 2.5 dB**. Conclui-se assim, que a **ligação não é exequível sem amplificação ótica**.

## 2.4.2 Pré-Amplificação Ótica

Nesta fase, foi utilizado um **amplificador por secção, colocado antes de cada ROADM**, de modo a que estes **compensem as perdas da secção em que se encontram** e também do **ROADM antecedente**. Para isto, foi necessário o cálculo do **ganho do amplificador**, que irá efetuar a **compensação**. Para isso, ele tem em consideração as **perdas totais**. Perdas totais essas, que os seus cálculos estão efetuados no Anexo G – Perdas e Ganhos no Anel (Pré-Amplificação).

Na **Tabela 18**, é possível observar o **ganho requerido ao pré-amplificador ótico** e as **perdas totais por secção**.

Secção	Total perdas fibra, conectores e juntas [dB]	Perdas do ROADM em modo de passagem [dB]	Total de perdas na secção [dB]	Ganho requerido ao pré-amplificador [dB]
E	30.27	11.9	42.17	42.17
F	33.46	11.9	45.36	45.36
A	27.42	11.9	39.32	39.32
B	36.31	11.9	48.21	48.21
C	46.12	11.9	58.02	58.02

Tabela 18 – Total de perdas por secção e ganho requerido ao pré-amplificador ótico.

Observando a **Tabela 18**, e os **ganhos requeridos ao pré-amplificador** e observando os amplificador **disponibilizados neste projeto**, conclui-se que nenhum deles (**OA3500 e**

OA4500), conseguem abrigar o **ganho necessário**. Isto pois, o **ganho máximo do amplificador OA3500** é de **23 dB** e o do **amplificador OA4500** é de **32 dB**. Assim, consegue concluir-se que a ligação **E5** não é exequível recorrendo a **pré-amplificação ótica**.

### 2.4.3 Pré e Pós Amplificação Ótica

Após se concluir que a **ligação E5** não é exequível utilizando apenas **pré-amplificação**, recorre-se agora **pré e pós amplificação ótica**. Ao invés do utilizado anteriormente, cada **secção possuirá 2 amplificadores**. 1 deles será colocado **antes do ROADM (pré-amplificador)**, e o outro será colocado **depois do ROADM (pós-amplificador)**. O **pré-amplificador** irá **compensar as perdas da secção** (fibras, conectores, juntas), já o **pós-amplificador** irá compensar as perdas do ROADM seguinte.

Para isto, foi necessário o cálculo do **ganho do pré-amplificador e pós-amplificador**, que irá efetuar a **compensação**. Para isso, ele tem em consideração as **perdas totais**.

Na **Tabela 19**, é possível observar o **ganho requerido ao pré-amplificador ótico**, **ganho requerido ao pós-amplificador ótico** e as **perdas totais por secção**.

Secção	Total perdas fibra, conectores e juntas [dB]	Perdas do ROADM em modo de passagem [dB]	Total de perdas na secção [dB]	Ganho requerido ao pré-amplificador [dB]	Ganho requerido ao pós-amplificador [dB]
E	30.27	11.9	42.17	30.27	11.9
F	33.46	11.9	45.36	33.46	11.9
A	27.42	11.9	39.32	27.42	11.9
B	36.31	11.9	48.21	36.31	11.9
C	46.12	11.9	58.02	46.12	11.9

*Tabela 19 – Total de perdas por secção e ganho requerido ao pré e pós-amplificador ótico.*

Observando a **Tabela 19**, e os **ganhos requeridos ao pré-amplificador**, verificamos que estes são mais **baixos que anteriormente**, no entanto, apenas passaria a ser **exequível** nas **secções E e A** (não sendo por isso mandatário amplificação de linha), utilizando o **amplificador OA4500**. Seria por isso necessário **amplificação de linha nas secções C, E e F**. Já observando os **ganhos requeridos ao pós-amplificador**, a ligação seria **exequível em todas as secções com o amplificador OA3500**.

#### 2.4.4 Pré e Pós Amplificação Ótica em todos os ROADMS e Amplificação de Linha Unicamente nas Secções de Multiplexagem onde seja Necessário

Após verificação do realizado anteriormente, concluiu-se que a **ligação E5, não cumpre a margem de sistema requerida de 2.5 dB** nem quando é usado um **pré amplificador**, nem quando este é **complementado** com um **pós-amplificador**. Note-se que foram necessários a utilização de **6 amplificadores de linha** para se chegar a ter pelo menos um **par emissor-recetor** com as **margens pretendidas**. A ordem de **adição dos amplificadores de linha** foi:

- 1º - Secção C,
- 2º - Secção B,
- 3º - Secção F,
- 4º - Secção E,
- 5º - Secção A,
- 6º - 2ª vez na Secção C<sub>1</sub>

Esta ordem de adição de amplificadores de linha, era escolhida tendo em conta a necessidade de se **aumentar a margem**. Para isso, era necessário o **aumento do OSNR**, que era possível, através da **redução do ruído ASE**. A redução do desse ruído poderia ser realizada com a **adição de um amplificador de linha**. Por isso, até haver um par emissor-recetor que **cumprisse a margem**, era adicionado um amplificador de linha na **secção com o maior valor de ruído ASE**. A adição do amplificador de linha, **introduz 2 conectores** para ligar o **amplificador de linha à fibra**. Na **Tabela 20**, é apresentado os **valores de margem** de modo a **cumprir a margem de sistema de 2.5 dB**.

Amplificador	Ganho [dB]	Ganho [linear]	$S_{ASE}$ [W/Hz]	Potência total de ruído ASE [W]	Potência total de ruído ASE p/Sec [W]
<b>Linha, E</b>	15.535	35.76844006	1.10465E-17	1.65697E-06	3.31394E-06
<b>Pré -, E</b>	15.535	35.76844006	1.10465E-17	1.65697E-06	3.31394E-06
<b>Linha, F</b>	17.13	51.64163693	1.60896E-17	2.41345E-06	4.82689E-06



<b>Pré -, F</b>	17.13	51.64163693	1.60896E-17	2.41345E-06	4.82689E-06
<b>Linha, A</b>	14.11	25.76321157	7.86766E-18	1.18015E-06	2.3603E-06
<b>Pré -, A</b>	14.11	25.76321157	7.86766E-18	1.18015E-06	2.3603E-06
<b>Linha, B</b>	18.555	71.69683756	2.24615E-17	3.36922E-06	6.73845E-06
<b>Pré -, B</b>	18.555	71.69683756	2.24615E-17	3.36922E-06	6.73845E-06
<b>Linha, C</b>	15.90666667	38.964281	1.20618E-17	1.80928E-06	3.61855E-06
<b>Linha, C</b>	15.90666667	38.964281	1.20618E-17	1.80928E-06	3.61855E-06
<b>Pré -, C</b>	15.90666667	38.964281	1.20618E-17	1.80928E-06	5.42783E-06
<b>Pós</b>	11.9	15.48816619	4.60312E-18	6.90468E-07	6.90468E-07

<b>Potência do ruído total [dBm]</b>	- 16.31566555
<b>OSNR [dB]</b>	14.32427263

<b>Par Tx-Rx</b>	<b>r</b>	<b>Q<sup>2</sup></b>	<b>B<sub>e,n</sub></b>	<b>B<sub>0</sub> [Hz]</b>	<b>OSNR requerida [dB]</b>
<b>A-A</b>	0.141253754	40.896025	10261721530	7500000000	12.33280293
<b>A-B</b>	0.141253754	40.896025	12199688862	7500000000	13.0562277
<b>A-C</b>	0.141253754	40.896025	8133125908	7500000000	11.36780543
<b>A-D</b>	0.141253754	40.896025	9996486611	7500000000	12.22366982
<b>A-H</b>	0.141253754	40.896025	6670118994	7500000000	10.55215144
<b>B-A</b>	0.112201845	40.896025	10261721530	7500000000	11.71576151
<b>B-B</b>	0.112201845	40.896025	12199688862	7500000000	12.43293219
<b>B-C</b>	0.112201845	40.896025	8133125908	7500000000	10.76040216
<b>B-D</b>	0.112201845	40.896025	9996486611	7500000000	11.607642
<b>B-H</b>	0.112201845	40.896025	6670118994	7500000000	9.954140362
<b>C-A</b>	0.089125094	40.896025	10261721530	7500000000	11.21177016

<b>C-B</b>	0.08912 5094	40.896025	12199688862	7500000 0000	11.92238381
<b>C-C</b>	0.08912 5094	40.896025	8133125908	7500000 0000	10.26635387
<b>C-D</b>	0.08912 5094	40.896025	9996486611	7500000 0000	11.10470542
<b>C-H</b>	0.08912 5094	40.896025	6670118994	7500000 0000	9.469601953
<b>D-A</b>	0.05623 4133	40.896025	10261721530	7500000 0000	10.46147158
<b>D-B</b>	0.05623 4133	40.896025	12199688862	7500000 0000	11.15866075
<b>D-C</b>	0.05623 4133	40.896025	8133125908	7500000 0000	9.535875282
<b>D-D</b>	0.05623 4133	40.896025	9996486611	7500000 0000	10.35653932
<b>D-H</b>	0.05623 4133	40.896025	6670118994	7500000 0000	8.757521333

Par Tx-Rx	OSNR [dB]	OSNR requerida [dB]	Valor máx penalidade [dB]	Margem [dB]
<b>A-A</b>	14.3242 7263	12.33280293	2	- 0.00853 03
<b>A-B</b>	14.3242 7263	13.0562277	2	- 0.73195 5064
<b>A-C</b>	14.3242 7263	11.36780543	2	0.95646 7208
<b>A-D</b>	14.3242 7263	12.22366982	2	0.10060 281
<b>A-H</b>	14.3242 7263	10.55215144	2	1.77212 1191
<b>B-A</b>	14.3242 7263	11.71576151	2	0.60851 1127
<b>B-B</b>	14.3242 7263	12.43293219	2	- 0.10865 956
<b>B-C</b>	14.3242 7263	10.76040216	2	1.56387 0471
<b>B-D</b>	14.3242 7263	11.607642	2	0.71663 0633
<b>B-H</b>	14.3242 7263	9.954140362	2	2.37013 2272
<b>C-A</b>	14.3242 7263	11.21177016	2	1.11250 2479
<b>C-B</b>	14.3242 7263	11.92238381	2	0.40188 8825

<b>C-C</b>	14.3242 7263	10.26635387	2	2.05791 8765
<b>C-D</b>	14.3242 7263	11.10470542	2	1.21956 7213
<b>C-H</b>	14.3242 7263	9.469601953	2	2.85467 0681
<b>D-A</b>	14.3242 7263	10.46147158	2	1.86280 1056
<b>D-B</b>	14.3242 7263	11.15866075	2	1.16561 1883
<b>D-C</b>	14.3242 7263	9.535875282	2	2.78839 7352
<b>D-D</b>	14.3242 7263	10.35653932	2	1.96773 3316
<b>D-H</b>	14.3242 7263	8.757521333	2	3.56675 1301

Secções	Comprimento (km)	Comprimento Efetivo (km)
<b>E1</b>	55.51875	18.5550284
<b>E2</b>	20.48125	12.74587713
<b>F1</b>	61.5	18.8649456
<b>F2</b>	25.5	14.31613432
<b>A1</b>	50.175	18.18644136
<b>A2</b>	20.825	12.86662499
<b>B1</b>	66.84375	19.0726234
<b>B2</b>	25.15625	14.22084825
<b>C1</b>	53.9125	18.45452305
<b>C2</b>	53.9125	18.45452305
<b>C3</b>	13.175	9.612939562

*Tabela 20 – Contribuições da potência ruído ASE e margens para pares emissores-recetores em cada amplificador e localização dos amplificadores com 6 amplificadores de linha nas secções acima referidas .*

É possível perceber pela observação da tabela acima que os **pares emissor recetor-recetor C-H, D-C e D-H cumprem a margem de sistema de 2.5 dB**. O emissor C, para além de garantir uma **boa margem**, é também aquele que tem **menor largura de banda** (sendo por isso o **mais barato**). Em suma, conclui-se que o **C é o emissor escolhido**.

Em termos de margem de sobrecarga, tendo em consideração a **potência ótica média por canal** ser de **-1.99 dBm** e os valores mais baixos das **perdas do ROADM e dos dois conectores** são de  $5+0.7+2*0.3 = 6.3 \text{ dB}$ . Assim, o pior caso possível (com emissor C, que é apenas o recetor H) em termos de sobrecarga de sistema é de  $-3-(-1.99-6.3) = 5.29 \text{ dB} > 2 \text{ dB}$ , logo **cumpra a margem de sobrecarga do sistema**.

## 2.5 Verificações Finais

Primeiramente, foi verificado o nível de **potência ótica** que chegava ao recetor (no pior caso) se era superior que a sensibilidade do **recetor C**. No pior caso possível, a potência ótica média à entrada do recetor é de  $-1.99-(5+1.5+2*0.4) = -9.29 \text{ dBm}$ . Sendo a sensibilidade do par emissor recetor **C-H** de **-21.63 dBm**, concluindo assim que o é **desprezável o ruído do recetor** no desempenho da margem.

Em segundo lugar, verificamos que a dispersão residual para o plano inferior da banda é de **640.87 ps/nm**. Com um **ritmo binário de 10 Gbit/s** para o **emissor C**, com uma **largura de linha de 2 MHz**, esta dispersão residual leva a uma **penalidade de  $6.57*10^{-8} \text{ dB}$** , sendo por isso **desprezável**. (cálculos possíveis de observar no *Anexo I – Cálculo de Penalidade*).

Em terceiro lugar, foi necessário a validação se o nível de **potência à entrada dos EDFA's** se encontram dentro dos limites de funcionamento. Calculou-se por isso a **potência à entrada** do EDFA para a secção de amplificação que apresentava mais perdas, sendo essa a **secção B** com **18.555 dB**. Assim, a **potência ótica média por canal** à entrada dos amplificadores é de **-1.99 dBm – 18.555 dB = -20.545 dBm**. Assim, o valor encontra-se no intervalo de **-30 a 0 dBm** em que o amplificador funciona corretamente.

Em quarto lugar, as **perdas dos VOA's serão tais para que os canais em modo de passagem** a atenuação à entrada e também à saída do ROADM será de **11.9 dB**. Se o canal estiver a ser inserido o VOA já irá **produzir uma atenuação que faz com que a potência à saída do pós-amplificador será igual à potência dos canais em modo de passagem**. Sendo essa potência de **-1.99 dBm**. As perdas mínimas do VOA num canal que esteja inserido, ter-se-á um valor de  **$8.86-0.4-1.5-(-1.99-11.9+0.4+5) = 15.45 \text{ dB}$** .

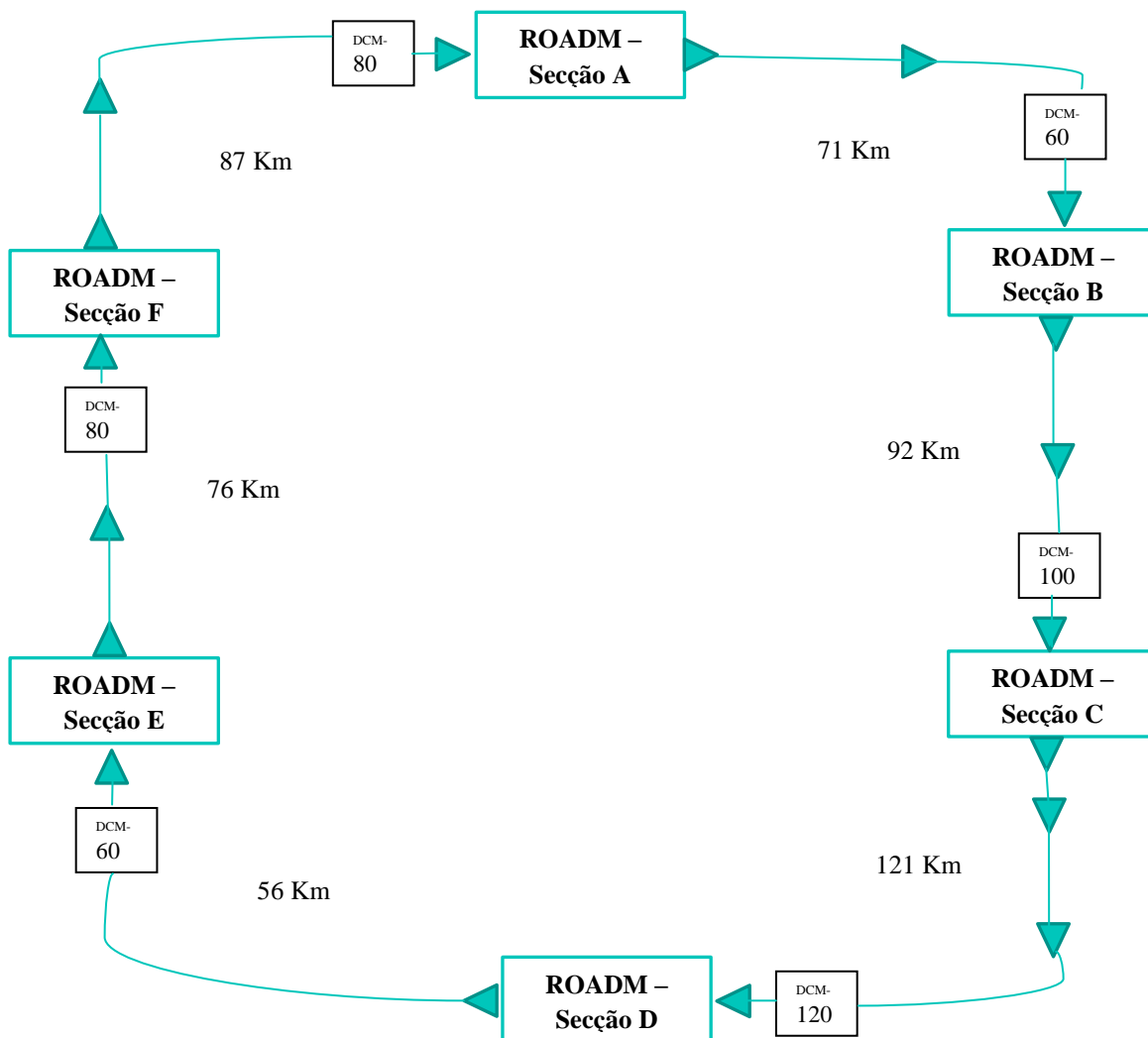
Para concluir, verifica-se que a margem para a ligação mais longa que incluía a **secção D** para assim se poder concluir se esta necessita de amplificação de linha. Essa ligação é a **B2** que irá atravessar as **secções B+C+D+E+F**. As perdas nessa secção são de **23.07 dB**. Como o ganho requerido ao pré-amplificador da secção D é de **11.9 dB**, a **potência total que existe na entrada do recetor** é de **-16.27 dBm**. A **OSNR** que se obtém à entrada do recetor é de **14.27 dB**, tendo sido também considerado o valor de **-1.99 dBm** para a **potência ótica do canal à saída do último EDFA**, por ser a mais limitativa para a secção mais longa que inclui a **secção D**. Assumindo tudo isto, obteve-se para o **par emissor-recetor C-H** a **margem de 2.8 dB > 2.5**

cumprindo assim a margem. Assim sendo, não é necessário amplificação de linha para a secção D.

Todos os cálculos para a realização da tabela acima e as tabelas anteriores até se ter chegado ao valor que cumprisse a margem de sistema, estão apresentados no *Anexo H – Cálculos para Amplificação de Linha*.

### 3 Conclusão

É possível observar na *Figura 1*, o **esquema do anel** com a **localização dos equipamentos** principais para **um sentido da comunicação**, sabendo que para o outro sentido será **igual**.



*Figura 1 – Esquema do anel para o sentido horário da comunicação .*

Para conclusão do projeto, foi criada a **Tabela 21**, onde estão colocados todos os **equipamentos necessários** para a criação deste projeto.

Equipamento	Anel de Serviço	Anel de Proteção
<b>Fibra Ótica SMF-28</b>	253 unidades (2 Km cada unidade)	253 unidades (2 Km cada unidade)
<b>DCM-60</b>	2 unidades	2 unidades
<b>DCM-80</b>	2 unidades	2 unidades
<b>DCM-100</b>	1 unidade	1 unidade
<b>DCM-120</b>	1 unidade	1 unidade
<b>AWG-100GHz</b>	12 unidades	12 unidades
<b>Optical Switch</b>	22*6 = 132 unidades	22*6 = 132 unidades
<b>VOA</b>	22*6 = 132 unidades	22*6 = 132 unidades
<b>Emissor C</b>	22*6 = 132 unidades	22*6 = 132 unidades
<b>Recetor H</b>	22*6 = 132 unidades	22*6 = 132 unidades
<b>Juntas</b>	247 unidades	247 unidades
<b>Conectores</b>	24 unidades	24 unidades
<b>Amp. OAC-17F4500Cx</b>	24 unidades	24 unidades

*Tabela 21 – Equipamentos a adquirir.*

## 4 Anexos

Para a realização do projeto, foi necessário proceder a **diversos cálculos**, ao longo do projeto era indicado onde estariam esses **cálculos nos anexos agora descritos**.

### 4.1 Anexo A – Número de Canais e Cálculo da Largura de Banda a -3 dB

Primeiramente foi necessário calcular o **número de canais no sistema**. Para isto, era necessário dividir o **ritmo binário do sistema WDM** pelo **ritmo binário por canal**, como demonstrado na *Fórmula 1*.

$$N_{Ch} = \frac{R_{b,WDM}}{R_{b,Ch}} = \frac{220}{10} = 22$$

*Fórmula 1 – Cálculo canais no sistema.*

Após o cálculo do número de canais no sistema, foi necessário calcular a **largura de banda a -3 dB nos emissores e recetores**, tendo em conta o **fator roll-off,  $\alpha$** , do filtro que é cerca de **20%**. Essa largura de banda é calculada com a **divisão do ritmo binário do canal por 2**, a multiplicar por **1.2 (1+ 0.2 de roll-off)**, como é demonstrado na *Fórmula 2*.

$$B_{-3\text{ dB}} = \frac{R_{b,Ch}}{2} * (1 + \alpha) = \frac{10}{2} * (1 + 0.2) = 6 \text{ [GHz]}$$

*Fórmula 2 – Cálculo largura de banda a -3 dB.*

## 4.2 Anexo B – Largura de Banda Necessária

Para verificar se a **largura de banda AWG necessária** para cada emissor possível estava de acordo com a largura de banda que o **equipamento AWG-100GHz conseguia acomodar**, teve que se calcular. A **largura de banda AWG (75 GHz)**, tem que ser **superior ou igual** à soma de **2 vezes o ritmo binário por canal** com **2 vezes a deriva máxima da frequência**, como é possível observar na **Fórmula 3**.

$$B_{AWG} \geq 2 * R_{b,ch} + 2 * \Delta v_{d,max}$$

*Fórmula 3 – Cálculo para a largura de banda necessária (AWG).*

## 4.3 Anexo C – Cálculos Frequências e Comprimentos de Onda

Devido ao facto de o **multiplexador** escolhido ter **100 GHz de espaçamento entre canais** e **40 canais disponíveis**, existem **3 planos** onde delinear os **comprimentos de onda** de acordo com a **grelha ITU-T**, são estes os **planos extremo inferior e superior, e central da banda disponível**. Existem portanto **22 canais em cada plano**, sendo por isso necessário primeiramente calcular as **frequências** de cada um dos **canais**. As frequências são calculadas através da **Fórmula 4**.

$$v_n = v_{anc} \pm \Delta v_{ch}, \text{ sendo } v_{anc} = 193.1 [THz]$$

*Fórmula 4 – Determinação frequência para os canais nos planos de acordo com a grelha ITU-T.*

Após o cálculo das **frequências de cada canal** em cada plano, é possível calcular o **comprimento de onda de cada canal dependendo do plano** onde se encontram. Os **comprimentos de onda**, são calculados através da **Fórmula 5**.

$$\lambda_n = \frac{c}{v_n * 10^{-12}}, \text{ sendo } c \text{ (velocidade da luz)} = 3 * 10^8$$

*Fórmula 5 – Determinação dos comprimentos de onda para os canais nos planos.*



#### 4.4 Anexo D – Análise de Dispersão

Para realizar **necessidade de compensação**, necessitamos de realizar alguns cálculos.

Primeiramente, sabendo que o  $R_{b,ch} = 10 \text{ Gbit/s}$ , e a **penalidade máxima aceitável devido à dispersão é de 1 dB**. Utiliza-se o comprimento de onda do **canal 1 para um dos 3 planos**.

Primeiramente teve que se calcular a dispersão para a **frequência ótica do canal,  $D_\lambda$** , através da **Fórmula 6**.

$$D_\lambda = \Sigma \frac{s_0}{4 * \left( \frac{\lambda_n - \lambda_0^4}{\lambda_n^3} \right)}, \text{ sendo } s_0 = 0.092 \text{ e } \lambda_0 = 1310 \text{ [nm]}$$

*Fórmula 6 – Determinação da frequência ótica do canal para os canais nos planos.*

Depois, observa-se que a **largura de banda da modulação é maior que o ritmo binário do canal**, sendo assim  $\Delta v_M \gg \Delta v_L$ , o que implica que  $\Delta P_I(D_\lambda L)|_{dB} \approx \Delta P_I(D_\lambda L)|_{dB}^M$

Assim, necessita-se de calcular a **figura de mérito máxima e a dispersão residual máxima**, como demonstrado na **Fórmula 7**.

$$\begin{aligned} D_{res} &= D_\lambda L \\ |f_m^M| &= \left| \frac{R_b^2 \cdot D_{res} \cdot \lambda^2}{2\pi c} \right| \Rightarrow \left| \frac{R_b^2 \cdot D_{res} \cdot \lambda^2}{2\pi c} \right| \leq \frac{\sqrt{10 \frac{\Delta P_I(D_\lambda L)|_{dB, max}}{5}} - 1}{8} \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow |D_{res}| \leq \frac{\sqrt{10 \frac{\Delta P_I(D_\lambda L)|_{dB, max}}{5}} - 1}{8} \times 2\pi c \\ &\quad R_b^2 \cdot \lambda^2 \end{aligned}$$

*Fórmula 7 – Determinação da figura de mérito máxima e da dispersão residual máxima para que não seja necessário compensação para os canais nos planos.*

#### 4.5 Anexo E – Perdas no Anel (Sem Amplificação)

Para a avaliação da **exequibilidade da ligação** mais longa **sem amplificação ótica**, é necessário o cálculo das **perdas totais no anel A17** tendo em conta os valores das **Tabelas 15 e 16**. As perdas totais são calculadas através da **Fórmula 8**.

$$\begin{aligned} \text{Perdas Totais} = & 4 \times \text{Total}_{\text{passagem}} + \text{Total}_{\text{extração}} + \text{Total}_{\text{inserção}} + \text{Total}_B + \text{Total}_C \\ & + \text{Total}_D + \text{Total}_E + \text{Total}_F \text{ [dB]} \end{aligned}$$

*Fórmula 7 – Determinação das perdas totais entre o emissor e recetor na ligação mais longa.*

#### 4.6 Anexo F – Cálculo da Margem dos pares T<sub>x</sub>-R<sub>x</sub> (Sem Amplificação)

Para os cálculos das **margens para os pares emissor-recetor**, foi necessário primeiramente calcular qual o **valor máximo da penalidade**, sendo a **penalidade máxima aceitável devido à dispersão 1 dB** e a **penalidade máxima aceitável devido aos efeitos não lineares da fibra 1 dB**, conclui-se que o **valor máximo da penalidade 2[1+1] [dB]**.

Depois, foi necessário o cálculo da **potência média acoplada á fibra**. Sabendo os valores da **potência à saída – nível lógico “0” (dado no enunciado)** em **dBm**, teríamos primeiramente que converter de **dBm** em **mW** através da **Fórmula 8**.

$$P_0 \text{ [mW]} = 10^{\frac{P \text{ [dBm]}}{10}}$$

*Fórmula 7 – Conversão potência à saída de nível lógico “0” de dBm para mW.*

Após a conversão para **mW**, foi necessário o cálculo do **r<sub>ext</sub>**, sabendo o **R<sub>ext</sub> [dB] (dado no enunciado)**, através da **Fórmula 8**.

$$r_{\text{ext}} = 10^{\frac{R_{\text{ext}} \text{ [dB]}}{10}}$$

*Fórmula 8 – Cálculo do r<sub>ext</sub>, sabendo o R<sub>ext</sub> [dB].*

Após o cálculo do  $r_{ext}$ , foi necessário calcular a **potência à saída – nível lógico “1”**, através da **Fórmula 9**.

$$P_1[mW] = r_{ext} * P_0 [mW]$$

*Fórmula 9 – Cálculo potência à saída de nível lógico “1” em mW .*

Agora, é possível o cálculo da **potência média [mW]**, através da **Fórmula 10**.

$$P_{media}[mW] = \frac{P_0 + P_1}{2}$$

*Fórmula 10 – Cálculo da potência média em mW .*

Foi necessário depois a **conversão para dBm da potência média**. Como é demonstrado pela **Fórmula 11**.

$$P_{media}[dBm] = 10Log(P_{media}[mW])$$

*Fórmula 11 – Cálculo da potência média em dBm .*

Foi necessário agora, o cálculo do **parâmetro Q**, sabendo que a  $P_e=10^{-10}$ . Através da **Fórmula 12**.

$$P_e = \frac{1}{2} erfc\left[\frac{Q}{\sqrt{2}}\right]$$

*Fórmula 12 – Cálculo do parâmetro Q .*

Depois foi necessário o cálculo do **efeito filtro (Ef)**, sabendo a **ordem do filtro (Of)** dada no enunciado através da **Fórmula 13**.

$$E_f = \frac{\frac{\pi}{2 * O_f}}{\sin\left(\frac{\pi}{2 * O_f}\right)}$$

*Fórmula 13 – Cálculo do efeito filtro .*

Agora foi necessário o cálculo do **fator  $B_{e,n}$** , sabendo a **Largura de Banda (LB)** dada no enunciado, através da **Fórmula 14**.

$$B_{e,n} = E_f * LB$$

*Fórmula 14 – Cálculo do fator  $B_{e,n}$ .*

O último parâmetro a ser calculado antes da margem, é a **sensibilidade**, para isto calculou-se a **sensibilidade [mW]** (será depois convertida para dBm), já era dado no enunciado os valores de **NEP**, através da **Fórmula 15**.

$$p_i[mW] = \frac{1 + r_{ext}}{1 - r_{ext}} * Q * NEP * 10^{-12} * \sqrt{B_{e,n} * 10^9}$$

*Fórmula 15 – Cálculo da sensibilidade [mW].*

Foi depois necessário **converter a sensibilidade em dBm**, como demonstrado na **Fórmula 16**.

$$p_i[dBm] = 10 \log(p_i[mW]) + 30$$

*Fórmula 15 – Cálculo da sensibilidade [dBm].*

Assim, é finalmente possível o cálculo da **margem**, sabendo já a **potência média acoplada à fibra**, as **perdas no caminho** também já demonstradas como calcular, a **sensibilidade [dBm]** e o **valor máximo da penalidade ( $V_m$ )**. É assim possível calcular a **margem [dB]**, como demonstrado na **Fórmula 16**.

$$Margem [dB] = P_{media}[dBm] - Perdas [dB] - p_i[dBm] - V_m [dB]$$

*Fórmula 16 – Cálculo da margem [dB].*

#### 4.7 Anexo G – Perdas Anel (Pré-Amplificação)

P a avaliação da **exequibilidade da ligação** mais longa **com pré-amplificação ótica**, é necessário o cálculo das **perdas totais no anel A17** tendo em conta os valores das **Tabelas 16 e 18**. As perdas totais são calculadas através da **Fórmula 17**, com base também na **Fórmula 7**.

$$Total\ Perdas\ Pre - Amp. = Perdas\ Totais + Perdas\ ROADM + 0.4$$

*Fórmula 17 – Cálculo das perdas pré-amplificação .*

Sabe-se também que as **Perdas ROADM**, equivalem às perdas em **modo passagem** **11.5[5+1.5+5+0]**.

#### 4.8 Anexo H – Cálculos de Amplificação de Linha

Os cálculos para a amplificação de linha, possui vários passos. Primeiramente começa com o **comprimento efetivo da secção**. Como demonstrado na **Fórmula 18**.

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha_{[Np/m]} \cdot L_{sec}}}{\alpha_{[Np/m]}}$$

*Fórmula 18 – Cálculo do comprimento efetivo de secção .*

Depois, é necessário o cálculo da **potência máxima do amplificador por canal**, como demonstrado na **Fórmula 19**.

$$P_{ch} = \frac{P_{m\acute{a}x}}{N_{ch}}$$

*Fórmula 19 – Cálculo da potência máxima do amplificador por canal .*

Depois foi necessário o **cálculo do OSNR** requerida à **entrada do fotodetetor**. Tal é demonstrado na **Fórmula 20**.

$$osnr_{R,i} = \frac{Q^2 \cdot B_{e,n}}{B_0} \cdot \left( \frac{r_{ext} + 1}{r_{ext} - 1} \right) \left[ 1 + \sqrt{\frac{4 \cdot r_{ext}}{(1 + r_{ext})^2} + \left( \frac{r_{ext} - 1}{r_{ext} + 1} \right)^2 \cdot \frac{B_0}{Q^2 \cdot B_{e,n}}} \right]$$

$$\Rightarrow OSNR_{R,i} = 10 \log_{10}(osnr_{R,i}) \text{ [dB]}$$

*Fórmula 20 – Cálculo da potência requerida à entrada do fotodetetor.*

Depois foi necessário o cálculo da **potência do ruído ASE** em cada amplificador, como demonstrado na **Fórmula 21**.

$$P_{ASE} = \frac{f_n}{2} (g - 1) \cdot h \cdot \nu \cdot B_0$$

Com:  $f_n$  sendo o pior valor de frequência;  $g$  a depender da pré e pós-amplificação e da amplificação de linha;  $\nu$  sendo a frequência ótica do pior canal; e  $B_0 = B_{-3\text{dB},AWG}$ .

*Fórmula 21 – Cálculo da potência do ruído ASE em cada amplificador.*

É agora necessário, o cálculo da **potência do ruído ASE** no **pior caminho** do anel A17, tal como demonstrado na **Fórmula 22**.

$$P_{n,ASE} = 2 \cdot \sum_{i=1^{\text{ª}} \text{ sec da lig}}^{\text{Última sec da lig}} (P_{ASE,pós-amp,i} + P_{ASE,amp \text{ de linha},i} + P_{ASE,pré-amp,i})$$

*Fórmula 22 – Cálculo da potência do ruído ASE no pior caminho.*

Agora, calcula-se a **OSNR à saída do último amplificador**, como demonstrado na **Fórmula 23**.

$$osnr_R = \frac{P_R}{P_{n,ASE}} \Rightarrow OSNR_R = 10 \log_{10}(osnr_R) \text{ [dB]}$$

*Fórmula 23 – Cálculo da OSNR à saída do último amplificador.*

Por fim, consegue-se assim calcular a **margem do sistema** com **pré e pós-amplificação ótica** e com **amplificação de linha** (onde necessário), como demonstrado na **Fórmula 24**.

$$M_s \geq M_{s,req} \Leftrightarrow OSNR_R - OSNR_{R,i} - (\Delta\bar{P}_i(D_\lambda L)|_{m\acute{a}x} + \Delta\bar{P}_i|_{trans,m\acute{a}x}) \geq M_{s,req}$$

*Fórmula 24 – Cálculo da margem de sistema com pré e pós-amplificação de linha.*

#### 4.9 Anexo I – Cálculo de Penalidade

Foi necessário também o cálculo da **penalidade de dispersão no extremo inferior da banda**. Como demonstrado na **Fórmula 25**.

Para isto, foram necessários os dados: **D<sub>Res</sub>=640.87 ps/nm**; **Δv<sub>L</sub> = 2MHz**; **λ=1447.72 nm** e **R<sub>b,Ch</sub>=10 Gbit/s**.

$$\Delta\lambda_L = \frac{\lambda^2}{c} * \Delta v_L = 1.597 * 10^{-14}$$

$$f_m^L = R_{b,ch} * D_{res} * \frac{\Delta\lambda_L}{2.35} = 4.35 * 10^{-4}$$

$$\Delta P_i|_{\Delta v_L} = -5\text{Log}[1 - (4f_m^L)^2] = 6.57 * 10^{-8} \text{ dB}$$

*Fórmula 25 – Cálculo da penalidade de dispersão no extremo inferior da banda.*