



Plataforma de projeto de ligações óticas ponto a ponto

João Carlos Leal Martins

Trabalho Final de Mestrado para a obtenção do Grau de Mestre

Engenharia de Eletrónica e Telecomunicações

Orientador: Prof. Pedro Renato Tavares Pinho

Júri:

Presidente:

Prof. Nuno Cota

Vogais:

Prof. Paula Louro

Prof. Pedro Pinho

Abril de 2021

Agradecimentos

Este trabalho foi possível graças à colaboração e contributo de várias pessoas, às quais gostaria de exprimir os meus mais sinceros agradecimentos:

- Aos meus familiares e às pessoas mais próximas que me apoiaram e ajudaram no meu percurso escolar;
- A todos os meus colegas que me acompanharam ao longo do meu percurso escolar.
- Ao Instituto de Telecomunicações, pelos meios disponibilizados para a realização desta dissertação;
- Ao Instituto Superior de Engenharia onde tenho o orgulho de ter estudado.

Muito especialmente, desejo agradecer ao meu orientador Professor Pedro Renato Tavares Pinho, pela sua orientação, disponibilidade e atenção dispensada.

Resumo

O interesse pelas redes óticas tem crescido à medida que aumentam as necessidades dos consumidores disporem de uma crescente largura de banda, em virtude dos serviços serem tecnologicamente mais avançados. A exigência de cada vez maiores larguras de banda tem captado o interesse pelo desenvolvimento das redes óticas. O sucesso das redes óticas é visível por parte dos operadores de telecomunicações, pela oferta de diversas soluções desde o cliente residencial ao empresarial. Além disso, as empresas associadas à indústria de telecomunicações apercebem-se do enorme potencial de construir redes óticas que permitem distribuir os dados mais longe e mais rápido do que alguma vez antes.

Atendendo ao crescente interesse das redes óticas, é importante o dimensionamento destas. Por isso são necessárias ferramentas de simulação para identificar atempadamente o comportamento da ligação ótica antes da sua implementação.

Nesta dissertação foi desenvolvida uma ferramenta de simulação, simples e robusta para estudo de ligações óticas ponto a ponto numa rede de telecomunicações. É formada por diversos blocos, como por exemplo, o emissor, o recetor, o amplificador e a fibra. O utilizador deve seleccionar um desses blocos e posteriormente interligá-los de forma a estabelecer a ligação ótica pretendida. Depois de desenhar a ligação ótica é possível adicionar novos equipamentos ou eventualmente eliminá-los em caso de necessidade. Por último, o utilizador inicializa a simulação ao clicar no botão e no fim são produzidos os resultados através de ficheiros localizados na pasta "Value". Os resultados produzidos permitem analisar as limitações da ligação ótica.

De acordo com os *inputs* introduzidos pelo utilizador são produzidos pela ferramenta os resultados da atenuação, dispersão e das penalidades de potência ao longo da ligação ótica, sendo comparado esses resultados com os conceitos teóricos. Assim, esta ferramenta é simples, robusta e apresenta ao utilizador os principais parâmetros que permitem avaliar o desempenho da rede.

Para o desenvolvimento da ferramenta foi utilizada o programa *Matlab*, pois trata-se de um *software* interativo de alta performance vocacionado para o cálculo numérico.

Palavras chave: *Simulink*, fibra ótica, redes óticas, ligações óticas.

Abstract

The interest in optical networks has grown as consumers need an increasing bandwidth, since the services are technologically more advanced.

The demand for increasing bandwidth has captured the interest in the development of optical networks which success is visible by telecommunications operators, by offering different solutions from the residential customer to the business customer. In addition, companies associated with the telecommunications industry are realizing the enormous potential of building optical networks that allow them to distribute data further and faster than ever before.

Considering the growing interest of optical networks, their dimensioning is important. Therefore, simulation tools are needed to identify the behaviour of the optical connection before its implementation.

In this dissertation, a simple and robust simulation tool was developed to study point-to-point optical connections in a telecommunications network.

It consists of several blocks, for example, the emitter, the receiver, the amplifier and the fiber. The user must select one of these blocks and then interconnect them in order to establish the desired optical connection. After designing the optical connection, it is possible to add new equipment or eventually eliminate it if necessary. Finally, the user starts the simulation by pushing on the button and in the end the results are produced through files located in the "Value" folder. The results produced allow to analyse the limitations of the optical connection.

According to the inputs, the results produced are returned by the tool, which are compared with the theoretical concepts. This tool is simple, efficient and presents the user with the main parameters of an optical network.

For the development of the tool, it was used the Matlab software, because it is a high performance interactive software dedicated to numerical calculation.

Keywords: Simulink, optical fiber, optical networks, optical connections

Índice

Capítulo 1	1
1.1 Introdução	1
1.2 Motivação	2
1.3 Objetivos	3
1.4 Descrição das ferramentas/software existentes	3
1.5 Estrutura da dissertação	4
2. Capítulo 2	5
2.1 Dispositivos óticos de um sistema de telecomunicações	5
2.2 Fibra ótica	7
2.3 Fenómenos que ocorrem na fibra ótica	11
2.3.1 Atenuação	11
2.3.2 Dispersão	12
2.3.3 Efeitos não lineares	18
2.4 Fibra ótica monomodo padrão (SMF)	22
2.5 Fibra ótica NZDSF	23
2.6 Emissor Ótico	24
2.6.1 Frequência de <i>Chirpping</i>	25
2.7 Recetor ótico	26
2.7.1 Tipos de fotodetector	26
2.7.2 Parâmetros no recetor	27
2.7.3 Degradação da Sensibilidade no recetor	31
2.8 Amplificador Ótico	32
2.9 Filtro Ótico	34
2.10 Splitter	34
3. Capítulo 3	37
3.1 Evolução das tecnologias	37
3.2 Redes SDH	38
3.3 Redes WDM	39
3.4 OSNR	40

3.4.1	OSNR do transmissor.....	41
3.4.2	OSNR do amplificador ótico	41
3.4.3	OSNR do recetor ótico	42
3.5	Metodologias de projeto numa rede ponto a ponto.....	43
4.	Capítulo 4	45
4.1	Simulação e projeto de uma ligação por fibra ótica	45
4.2	Utilização do simulador	46
4.3	Utilização dos blocos no Simulador FOTS.....	47
4.3.1	Emissor ótico	47
4.3.2	Fibra ótica.....	49
4.3.3	Amplificador ótico	50
4.3.4	Filtro ótico	51
4.3.5	Recetor ótico.....	51
4.4	Resultados do Simulador Fots	52
4.5	Conclusão.....	63
5.	Capítulo 5	65
5.1	Principais conclusões	65
5.2	Trabalhos futuros.....	66
6.	Referências	67

Lista das Figuras

<i>Figura 2.1- Elementos Sistema Comunicação por Fibra [4].</i>	6
<i>Figura 2.2 - Estrutura física da fibra [5].</i>	7
<i>Figura 2.3 - Reflexão interna total no interior do núcleo n_1. [6].</i>	8
<i>Figura 2.4 – Reflexão interna total. [7]</i>	8
<i>Figura 2.5 - Esquema de propagação de uma Fibra [7].</i>	9
<i>Figure 2.6 - Alargamento dos impulsos numa fibra [10].</i>	13
<i>Figura 2.7 – Dispersão da Fibra para os diferentes modos de propagação [11].</i>	13
<i>Figura 2.8 – Evolução do parâmetro de dispersão em função do comprimento de onda [13].</i>	15
<i>Figura 3.1 - Distribuição dos canais nas redes WDM [11].</i>	39
<i>Figura 3.2 - Sistema DWDM utilizado na rede ótica de transporte [21].</i>	40
<i>Figura 4.1 – Blocos associados ao simulador FOTS.</i>	46
<i>Figura 4.2 – Parâmetros que podem ser editados no bloco emissor</i>	48
<i>Figura 4.3 - Parâmetros que podem ser editados no bloco da fibra ótica</i>	49
<i>Figura 4.4 – Parametrização da atenuação na fibra ótica para diferentes intervalos de comprimentos de onda</i>	50
<i>Figura 4.5 - Parâmetros que podem ser editados no bloco do amplificador.</i>	50
<i>Figura 4.6 - Parâmetros que podem ser editados no bloco do filtro ótico.</i>	51
<i>Figura 4.7 - Parâmetros que podem ser editados no bloco do recetor ótico.</i>	52
<i>Figura 4.8 – Esquema da simulação do sistema de telecomunicações implementado.</i>	55
<i>Figura 4.9 – Configuração do emissor ótico.</i>	55
<i>Figura 4.10 - Configuração dos parâmetros da fibra ótica.</i>	56
<i>Figura 4.11 - Configuração da atenuação da fibra ótica.</i>	56
<i>Figura 4.12 - Configuração do amplificador ótico.</i>	57
<i>Figura 4.13 - Valores de parametrização do recetor ótico.</i>	57
<i>Figura 4.14 – Potência antes da amplificação no 1.º troço.</i>	58
<i>Figura 4.15 – Potência da fibra antes da amplificação no 7º troço.</i>	59
<i>Figura 4.16 – Potência antes da amplificação do 1º troço ao 7º troço.</i>	59
<i>Figura 4.17 – Potência da fibra depois da amplificação do 1º troço ao 7º troço</i>	60
<i>Figura 4.18 – Resultados das penalidades apresentadas pelo simulador nos dois últimos troços da ligação ótica</i>	61
<i>Figura 4.19 – Variação da probabilidade de erro com o fator Q</i>	62

Lista de Tabelas

<i>Tabela 2.1 - Valores típicos de atenuação e dispersão de uma fibra SMF [9].</i>	23
<i>Tabela 2.2 - Valores típicos de atenuação e dispersão de uma fibra NZDSF [18].</i>	23
<i>Tabela 3.1 - Tramas e débitos na rede SDH [15].</i>	38
<i>Tabela 4.1 - Valores tipicamente usados num sistema de telecomunicações a inserir no simulador.</i>	53
<i>Tabela 4.2 - Parâmetros do emissor Valores tipicamente usados num sistema de telecomunicações a inserir no simulador.</i>	53
<i>Tabela 4.3 – Resumo dos valores inseridos e obtidos pelo simulador para o cálculo do OSNR</i>	63

Lista de Acrónimos

AN	Abertura numérica
APD	Avalanche Photodiode
ASE	Amplified Spontaneous Emission
BER	Bit Error Rate
DFB	Distributed Feedback Laser
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
EDFA	Erbium-Doped Fibre Amplifier
FDM	Frequency Division Multiplexing
FWM	Four-Wave Mixing
ID	Índice Degrau
IG	Índice Gradual
ISI	Intersymblic interference
ITU-T	International Telecommunications Union Telecommunication Standardization Sector
IP	Internet Protocol
LED	Light Emitting Diode
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
MPLS	Multi-Protocol Label Switching
NDSF	Nondispersion-shifted Fibre
NZDSF	Non-zero Dispersion-shifted Fibre
OA	Optical Amplifier
OADM	Optical Add-Drop Multiplexer
OSNR	Optical Signal to Noise Ratio
OTM	Optical Terminal Multiplexer
OTN	Optical Transport Network
OXC	Optical cross-connect
PIN	p-i-n Photodiode
PMD	Polarization Mode Dispersion
PPP	Point to Point Protocol
SBS	Stimulated Brillouin Scattering
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SMF	Single-Mode Optical Fibre
SNR	Signal to Noise Ratio
SPM	Self-Phase Modulation
SRS	Stimulated Raman Scattering
STM	Synchronous Transport Module
TDM	Time-Division Multiplexing

TDT	Televisão Digital Terrestre
UDWDM	Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing
WDM	Wavelength-Division Multiplexing

Capítulo 1

Introdução

1.1 Introdução

Um sistema de telecomunicações é tipicamente formado por um conjunto de equipamentos baseados numa grande diversidade de tecnologias. Existem equipamentos concebidos e instalados em épocas muito diferentes. Por exemplo, na rede telefónica pública há algum tempo atrás ainda era possível encontrar em funcionamento as centrais de comutação digitais em paralelo com centrais de comutação analógicas. Desde o início do século XXI, o sector das telecomunicações em Portugal tem sofrido uma verdadeira revolução e evolução tecnológica. Atualmente num sistema de telecomunicações existem equipamentos de grande complexidade, sendo necessário efetuar a sua gestão e controlo. A gestão de rede é responsável por garantir a fiabilidade (resposta rápida a eventuais falhas) e flexibilidade (configuração rápida dos elementos de rede). O controlo da rede é realizado através da sinalização, sendo responsável pela dinâmica do sistema e pela sua capacidade de resposta aos pedidos dos utilizadores

Tipicamente, num sistema de telecomunicações podem-se identificar dois tipos básicos de equipamentos:

- Elementos de rede;
- Canal de transmissão.

Os elementos de rede ou os nós de uma rede dizem respeito ao equipamento de comutação, ao equipamento terminal, aos servidores e aos sistemas de sinalização e de gestão. O equipamento de comutação inclui por exemplo as centrais de comutação nas redes telefónicas ou os routers nas redes de dados e tem por objetivo assegurar o encaminhamento apropriado da informação.

No canal de transmissão incluem-se, por exemplo, os pares de condutores de cobre, como é o caso da linha telefónica, o cabo coaxial utilizado nas redes de distribuição de televisão, as fibras óticas nos meios de transmissão mais complexos e os canais via rádio usados nas redes móveis ou nas redes de comunicação via satélite.

Nos últimos vinte anos assistimos à vulgarização do uso de telemóveis, à receção e transmissão de dados a velocidades cada vez maiores e às ofertas de novos serviços como o vídeo a pedido e a Televisão Digital Terrestre (TDT). Devido a estas evoluções tecnológicas que assistimos, houve a necessidade de evoluir e revolucionar as infraestruturas de telecomunicações ao nível da rede de transporte e de acesso.

O grande desafio das operadoras consiste em possibilitar uma maior largura de banda, pois como se sabe, anteriormente as redes foram concebidas para dar resposta essencialmente ao tráfego de voz. Atualmente, o tráfego de dados é dominante. Assim, há um maior número de utilizadores com diferentes terminais e com redes distintas, que por sua vez, pretendem aceder a vários serviços simultaneamente. Para fazer frente às dificuldades e incompatibilidades existentes nas redes de comunicação, as infraestruturas físicas de transmissão na maioria das situações estão a ser substituídas por fibra ótica.

Atualmente a fibra ótica tem uma elevada importância na rede de transmissão. Assim, a otimização da rede ótica é um tema crucial para os operadores de telecomunicações. Em Portugal, uma grande percentagem do tráfego das redes de transporte é efetuado utilizando meios óticos. Além disso, a rede ótica tem ganho alguma relevância na rede de acesso. Devido a este interesse por parte dos operadores, muitas empresas de *software* desenvolveram simuladores relacionados com o planeamento de sistemas baseados em fibra ótica. No entanto, as licenças destes programas são caras e pouco intuitivas para o utilizador.

1.2 Motivação

O papel desempenhado pelas tecnologias de informação implica um aumento na procura de novos serviços e aplicações de forma a dar respostas à necessidade de comunicar em tempo real. Com o aumento da necessidade dos consumidores disporem de uma crescente largura de banda, em virtude dos serviços serem tecnologicamente mais avançados, tanto os operadores de telecomunicações como os governos estão a investir em grande escala na implementação de redes de fibra ótica, nomeadamente na rede de acesso.

As redes de fibra ótica conseguem oferecer uma qualidade de serviço superior e uma redução significativa de degradações, como por exemplo a latência ou a taxa de contenção. No entanto, para dimensionar uma rede de fibra ótica é necessário ponderar na sua implementação alguns aspetos práticos:

- Opções arquiteturais;
- Limitações de desempenho de equipamentos (passivos ou ativos) nos diferentes segmentos da rede;
- Planos de instalação;
- Capacidade limitada da rede devido ao comportamento dos mercados.

Assim, é preciso continuar o processo de evolução nas infraestruturas e tecnologias que levem a superar estas limitações.

Nesta dissertação foi implementada uma ferramenta de simulação para auxiliar no planeamento de sistemas de fibra ótica ponto-a-ponto. A escolha vai de encontro à crescente necessidade de encontrar um *software* livre para simular sistemas de fibra ótica. Além disso, pretende-se com este *software* que o utilizador esteja familiarizado com os componentes que são necessários para efetuar uma ligação ótica, como por exemplo os emissores, recetores, mas também outros componentes como os amplificadores, *MUX*, *DEMUX*, divisores óticos, filtros, etc.

Na ferramenta de simulação a desenvolver em Matlab® é possível parametrizar os equipamentos e correr a simulação a fim de obter os respetivos resultados. Pela flexibilização na parametrização dos equipamentos é possível obter desta forma uma otimização da rede de fibra ótica.

1.3 Objetivos

Com a presente dissertação tenciona-se implementar um simulador de Sistemas de Telecomunicações baseado em fibra ótica utilizando a ferramenta MATLAB. Com a implementação do simulador pretende-se:

- Adquirir familiarização com o estado da arte das atuais redes de transporte;
- Compreender as limitações das atuais redes de transporte em fibra ótica;
- Familiarização com os diferentes componentes óticos numa ligação ponto a ponto;
- Compreender os principais fatores que contribuem para a degradação do sinal numa ligação ótica;
- Permitir a interligação dos diferentes componentes óticos na implementação do simulador.

1.4 Descrição das ferramentas/software existentes

Atualmente existem muitas ferramentas de simulação de sistemas de telecomunicações de fibra ótica com custos consideráveis na sua aquisição. Muitas destas ferramentas também são complexas na inserção dos dados. Existem empresas especializadas que fornecem muitas soluções para sistemas óticos, como por exemplo a *OptiSystem* e *Synopsys* [1,2]. A desvantagem é que estes simuladores exigem licenças de utilização e não podem ser modificados pelo utilizador. As principais características destas ferramentas são as seguintes:

- *OptiSystem* - Realiza a simulação do sistema de comunicação ótica. É possível fazer teste e otimização de qualquer tipo de ligação ótico, como por exemplo, desde sistemas de transmissão de vídeo analógicos a fibras intercontinentais. É um simulador com uma extensa

biblioteca, com mais de uma centena de equipamentos ativos e passivos, no domínio elétrico e ótico. Além disso, é possível através de ferramentas de visualização gráfica, como por exemplo, analisadores de espectro, osciloscópios, medidores de potência, analisadores de BER e diagrama de olho analisar o desempenho do sistema. O *OptiSystem* possui uma interface gráfica que permite ao utilizador controlar o ambiente de simulação e o *layout* dos componentes óticos [1];

- *Synopsys* - Possui um simulador que permite projetar e por sua vez simular o sistema de comunicação ótica. A interface gráfica é intuitiva para o utilizador e permite combinar com instrumentos de medição semelhantes a um laboratório. Além disso, possui uma interface MATLAB® para facilitar o desenvolvimento de modelos personalizados por parte do utilizador, por intermédio de um ficheiro “m-file” e utilizando o modelo *Simulink*. Assim, o *software* é capaz de executar os modelos que são adicionados pelo utilizador. Além disso, possui uma ferramenta que simula vários equipamentos no domínio de tempo e da frequência [2].

1.5 Estrutura da dissertação

Esta dissertação é composta por 5 capítulos, estruturados da seguinte forma:

- Capítulo 1 – Introdução: Neste capítulo é apresentado o enquadramento da dissertação e os objetivos a serem atingidos;
- Capítulo 2 – Equipamentos de um sistema ótico: Neste capítulo são apresentados os principais equipamentos que constituem o sistema comunicação ótico. Além disso, são abordados os principais fenómenos que ocorrem no sistema e medidas a serem adotadas aquando da implementação de uma ligação ótica;
- Capítulo 3 – Rede de transporte ótica: Este capítulo apresenta as soluções de rede que utilizam fibra ótica como meio de transmissão;
- Capítulo 4 – Cenários da simulação das redes de transporte em fibra ótica: Nesta secção são apresentadas as principais características do simulador e serão comparados os resultados obtidos pelo simulador com os resultados teóricos de uma ligação ótica tendo em consideração todos os fenómenos que ocorrem na propagação;
- Capítulo 5 – Conclusão e trabalhos futuros. Neste capítulo são apresentadas as conclusões de todo o trabalho efetuado e são apresentadas algumas sugestões de trabalho a realizar no futuro.

Equipamentos de um sistema ótico

2.1 Dispositivos óticos de um sistema de telecomunicações

Os sistemas de comunicação ótica operam na banda do espectro eletromagnético com comprimentos de onda entre os 800 e os 1600 nm. Baseiam-se num conjunto de equipamentos óticos ligados entre si através de fibras óticas. Este sistema de comunicação tem uma enorme importância, pois permite comunicações a longas distâncias. Além disso, permitem a transmissão de elevadas quantidades de informação entre pontos bastantes distantes do planeta em reduzidos intervalos de tempo.

Tipicamente os elementos básicos de um sistema de comunicação por fibra ótica são:

- Emissor ótico:
 - Fonte ótica (LED ou LASER);
 - Circuito de modulação associado.
- Cabo de fibras óticas composto por várias fibras óticas;
- Recetor ótico:
 - Fotodetetor (PIN, APD);
 - Circuito de amplificação;
 - Regeneração do sinal.
- Componentes adicionais
 - Comp. Ativos
 - Amplificadores.
 - Comp. Passivos
 - Filtros;

- Conectores óticos;
- Juntas óticas;
- Acopladores ou divisores óticos;
- Multiplexadores/demultiplexadores óticos;

A Figura 2.1 apresenta os elementos de um sistema de comunicação por fibra ótica. Nas ligações de fibra ótica, cada ligação pode suportar um determinado número de comprimentos de onda. Assim, existem equipamentos que têm a capacidade de agregar vários comprimentos de onda num único sinal, ou a então realizar a operação inversa, desmultiplexar o sinal em vários comprimentos de onda [3].

O cabo de fibras óticas contém diversas fibras óticas, e possui um revestimento para garantir a sua proteção do meio exterior. É um dos elementos mais importantes num circuito ótico. O cabo tem a função de proteger as fibras durante a instalação e ao longo da utilização. Além disso, o cabo contém várias fibras cilíndricas, de espessura muito fina, cada uma sendo um canal de comunicação independente.

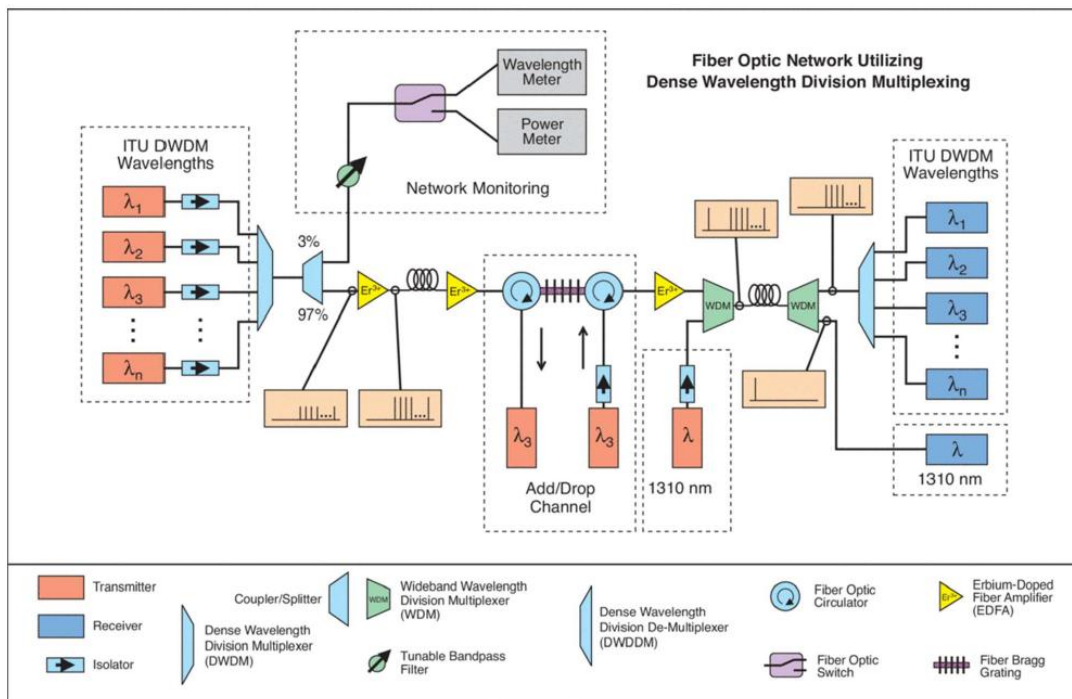


Figura 2.1- Elementos Sistema Comunicação por Fibra [4].

2.2 Fibra ótica

A fibra em comparação com outros meios de transmissão é uma alternativa atraente. É usado para transmitir sinal ótico, transportando informações digitais para sistemas de comunicação a longas distâncias com maior largura de banda.

O interesse pelo desenvolvimento da fibra ótica como um meio de transmissão para grandes distâncias, deve-se à existência de vários benefícios em relação ao cobre:

- A atenuação é menor;
- As taxas de transferência são bem maiores;
- Imunidade à interferência eletromagnética;
- Tamanho e peso reduzidos;
- Custo reduzido;
- Isolamento elétrico intrínseco (vidro e plástico).

As fibras óticas dividem-se em fibras monomodo e fibras multimodo. Os principais fenómenos limitativos são a atenuação, que é responsável por reduzir a amplitude dos impulsos e a dispersão que é responsável pela sua distorção.

A estrutura da fibra ótica é a de um cilindro sólido. É constituída pelo núcleo e pela bainha. A figura 2.2 mostra estrutura física de uma Fibra Ótica.

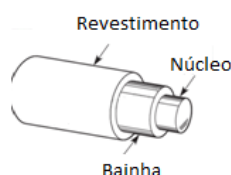


Figura 2.2 - Estrutura física da fibra [5].

Na fibra, o núcleo é construído em vidro, sendo a parte da fibra onde o sinal ótico se propaga. A bainha participa no mecanismo de propagação, sendo que tipicamente a maior parte da potência propaga-se pelo núcleo. Assim, a bainha tem a função de impedir perdas significativas no decorrer do trajeto dos mesmos. Existe ainda uma camada adicional de proteção que encapsula a fibra ótica, sendo em geral de material plástico com alguma elasticidade e resistente à abrasão.

Uma fibra ótica tem um diâmetro muito fino. O núcleo e a bainha têm diferentes índices de refração. Devido a essa característica, o sinal ótico é mantido no núcleo pelo fenómeno da reflexão interna total, que faz com que a fibra atue como um guia de ondas de acordo com a figura 2.3.

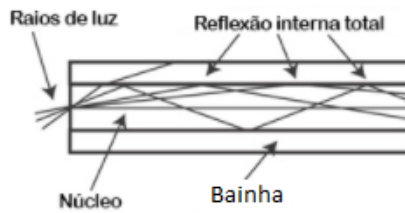


Figura 2.3 - Reflexão interna total no interior do núcleo n_1 . [6]

A utilização da fibra ótica como meio de transmissão é baseada nesta diferença do índice de refração. A transmissão do sinal ótico através da fibra e a sua propagação é devido ao núcleo interno ter um índice de refração n_1 que é superior ao índice de refração da bainha n_2 . Assim, dependendo da diferença entre os índices de refração e do ângulo em que o sinal ótico atinge a interface dos dois meios de transmissão, reflete ou refrata.

A lei de Snell, equação (2.1), é o princípio por detrás da refração interna na Fibra Ótica.

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2) \quad (2.1)$$

Em que:

- n_1, n_2 são o índice de refração do núcleo e bainha respetivamente;
- θ_1, θ_2 são os ângulos de incidência e refração respetivamente.

De acordo com a Figura 2.4 pode se concluir que há reflexão total, desde que $n_1 > n_2$ e desde que o ângulo de incidência seja superior ao ângulo crítico.

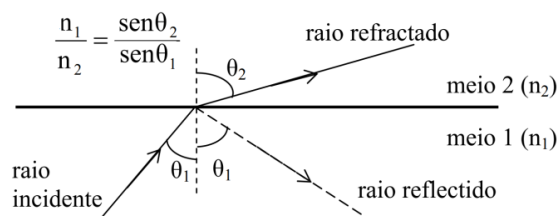


Figura 2.4 – Reflexão interna total. [7]

Um outro parâmetro importante é o ângulo de aceitação θ_a de uma fibra ótica. De acordo com a figura 2.5, este ângulo corresponde ao ângulo de incidência máximo que permite a propagação na fibra se efetue, sem perdas por reflexão múltipla.

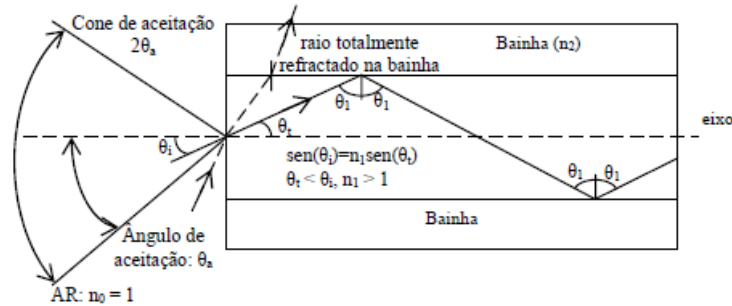


Figura 2.5 - Esquema de propagação de uma Fibra [7].

O valor do ângulo de aceitação, θ_a , é dado pela equação (2. 2).

$$\theta_a = \arcsen \left[\frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_0} \right] = \arcsen \sqrt{n_1^2 - n_2^2}; \text{ (se } n_0 = 1 \text{)} \quad (2.2)$$

Em que:

- n_0 é o índice de refração do meio em que a fibra está inserida (normalmente é o ar);

Ainda há um outro parâmetro importante para quantificar a maior ou menor capacidade que a fibra ótica tem de captar e transmitir o sinal ótico. Este parâmetro denomina-se como Abertura Numérica (AN) sendo definido pela equação (2. 3).

$$AN = n_0 \cdot \sin \theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.3)$$

$$AN \approx n_1 \sqrt{2\Delta} \text{ (se } \Delta \ll 1 \text{)} \quad (2.4)$$

Em que:

- AN é abertura numérica;
- θ_a é o ângulo de aceitação;
- Δ é o contraste.

A abertura numérica é uma grandeza adimensional, com valores típicos entre 0,15 e 0,5.

Pode-se também exprimir contraste ou diferença de índice normalizado pelas expressões (2.5) e (2.6).

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2 n_1^2} \quad (2.5)$$

$$\Delta \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (\text{se } \Delta \ll 1) \quad (2.6)$$

O sinal que se propaga na fibra tem um número finito de caminhos. Esses caminhos são designados de modos. Assim, a fibra ótica pode ser multimodo ou monomodo, consoante o valor da frequência normalizada (V). A Frequência normalizada é dada pela equação (2.7)

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.7)$$

Em que :

- V é a frequência normalizada;
- a é o raio do núcleo da fibra;
- n_1, n_2 são o índice de refração do núcleo e bainha respetivamente;
- λ – Comprimento de onda.

Assim, a fibra do tipo multimodo tem vários caminhos, enquanto fibra monomodo tem apenas um.

A equação (2. 8) é equivalente à equação anterior.

$$V \approx \frac{2\pi a}{\lambda} n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (2.8)$$

Assim, teremos fibras Índice Degrau (ID) monomodo se $V < 2,4048$ e fibras multimodo se $V > 2,4048$.

As fibras óticas do tipo multimodo distinguem-se das fibras monomodo pela menor capacidade de transmissão e pelas suas dimensões maiores. As fibras multimodo têm um núcleo aproximadamente cinco vezes maior que as fibras monomodo. Como o tempo de propagação ao longo de diferentes trajetórias é diferente, as fibras multimodo sofrem de dispersão intermodal, isto é, diferenças nos

tempos de propagação dos sinais que se propagam na fibra. Consequentemente, a dispersão intermodal vai contribuir para reduzir a largura de banda da fibra.

As dimensões reduzidas das fibras monomodo exigem o uso de dispositivos e técnicas de alta precisão para realização de ligações entre segmentos de fibras e o acoplamento da fibra com as fontes e recetores óticos. Em suma, a fibra multimodo é mais simples de produzir, tornando-se mais barata. No entanto, a fibra monomodo tem várias vantagens, como por exemplo a sua aplicação para longas distâncias, devido à sua menor dispersão.

É de referir que nas fibras óticas do tipo monomodo existe a dispersão intramodal. Esta dispersão resulta do facto dos diferentes componentes espectrais do sinal transmitido se propagarem com velocidades diferentes, devido à variação do índice de refração com o comprimento de onda.

2.3 Fenómenos que ocorrem na fibra ótica

A utilização da fibra ótica tem muitas vantagens, no entanto, a fibra também tem algumas características menos favoráveis tais como:

- Atenuação;
- Dispersão;
- Efeitos não lineares.

Um dos problemas da fibra ótica é a atenuação. Esta tende a aumentar os requisitos de energia do emissor, a fim de satisfazer os requisitos de energia do recetor.

Além da atenuação, o uso de fibra ótica introduz dispersão. A dispersão aumenta a largura dos impulsos óticos dentro da fibra. Isto faz com que haja interferência nos impulsos óticos. Os problemas resultantes da dispersão aumentam à medida que o débito binário aumenta, o que torna esse problema significativo.

No que diz respeito aos efeitos não lineares, em geral causam alargamento do impulso e/ou geram frequências indesejadas no sinal a propagar.

2.3.1 Atenuação

A atenuação de ligação é um dos parâmetros mais importantes da fibra, pois pode determinar a distância máxima entre o emissor e o recetor, se a ligação for limitada por atenuação. Dado que os

repetidores (e mesmo os amplificadores óticos) tem custos elevados no fabrico, assim como instalar e manter, o grau de atenuação da fibra tem uma grande influência no custo do sistema.

A atenuação depende do tipo de fibra e do comprimento de onda. Os principais comprimentos de onda do sistema de telecomunicações correspondem aos valores onde a atenuação está no mínimo. Estes comprimentos de onda são conhecidos como janelas. A norma do ITU-T G.692 [8] definiu três janelas:

- 820 - 880 nm (1ª janela)
- 1260 - 1360 nm (2ª janela)
- 1530 - 1565 nm (3ª janela)

Existe atenuação quando a fonte ótica envia um sinal e este ao atravessar a fibra diminui o nível de potência. A diminuição do nível de potência é expressa em decibéis (dB) ou como uma taxa de perda por unidade de distância (dB / km). Os três principais mecanismos de atenuação do sinal em fibra ótica são:

- Absorção;
- Espalhamento;
- Perdas por curvaturas: macro e micro

Estes fatores são influenciados pela composição da própria fibra ótica, a técnica do seu fabrico e a sua estrutura de guia de onda, pelo que podem ser melhorados. Atualmente os valores típicos de coeficiente de atenuação é de 0,2-0,3 dB/km [9].

2.3.2 Dispersão

A dispersão é outro fator que afeta a propagação do sinal durante a transmissão. Quando há dispersão a largura de banda efetiva disponível para a transmissão é reduzida devido ao alargamento dos impulsos sendo o resultado devido à velocidade de grupo ser função do comprimento de onda. De acordo com a figura 2.6, os impulsos vão alargando, até que há uma sobreposição com os impulsos vizinhos, tornando-se por vezes indistinguíveis na receção. A sobreposição de impulsos é denominada como interferência inter-simbólica (ISI).

Assim, na figura 2.6 em (a) temos os impulsos na entrada da fibra e em (b) a saída da mesma com a interferência inter-simbólica.

O alargamento dos impulsos depende da distância percorrida no interior da fibra. A dispersão na fibra corresponde ao alargamento temporal do impulso por unidade de comprimento. As unidades de medida podem ser ns/km ou ps/km.

Os efeitos de dispersão são diferentes para cada um dos três tipos de fibra;

- multimodo índice degrau (ID);
- multimodo índice gradual (IG);
- monomodo.

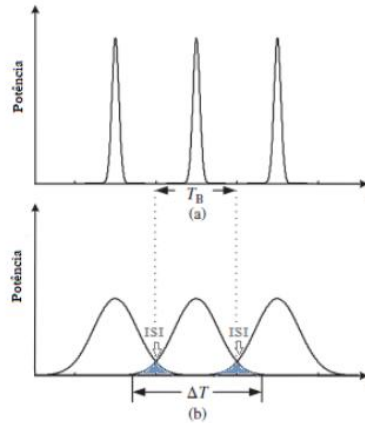


Figure 2.6 - Alargamento dos impulsos numa fibra [10].

De acordo com a Figura 2.7, a fibra monomodo apresenta a menor dispersão, sendo, por isso, a que tem maior largura de banda. A fibra multimodo ID é a que apresenta a maior dispersão, pois há um maior alargamento do impulso transmitido em comparação com a fibra monomodo e com a fibra de IG.

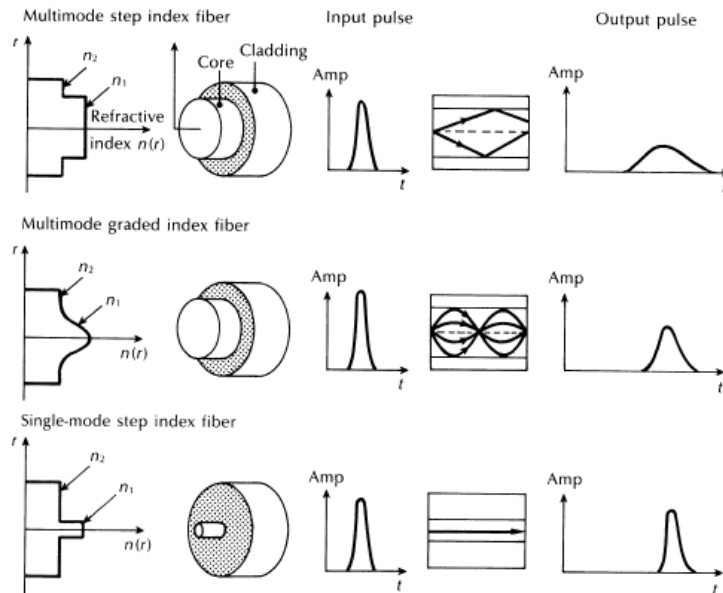


Figura 2.7 – Dispersão da Fibra para os diferentes modos de propagação [11].

Existem vários tipos de dispersão numa fibra:

- Intramodal ou Cromática;
 - Dispersão material (D_m);
 - Dispersão guia de onda (D_w);
- Intermodal;
- Modo de polarização (PMD);

Dispersão Intramodal

Na dispersão Intramodal ou cromática existe um alargamento do impulso, ocorrendo num único modo. Isto acontece devido à velocidade com que a energia de um dado modo propaga na fibra ser função do comprimento de onda. O efeito da dispersão é tanto mais pronunciado quanto maior a largura espectral da fonte ótica. De acordo com o ponto 2.2, as fontes óticas podem ser de LED ou LASER. A largura espectral de uma fonte ótica é o conjunto de comprimentos de onda em que a fonte emite. Para fontes LED é aproximadamente 5% do comprimento de onda central. Por exemplo, para um LED com pico de emissão a 850 nm, a sua largura espectral típica é da ordem dos 40 nm. No caso de díodos laser, os valores típicos são de 0,01 nm ou menores [12].

A dispersão material resulta da variação do índice de refração do núcleo em função do comprimento de onda, o que provoca a dependência da velocidade de grupo, ou seja, a velocidade com que a energia de um dado modo se propaga na fibra ser função do comprimento de onda. Assim, o alargamento do impulso ocorre mesmo quando comprimentos de onda diferentes seguem o mesmo percurso.

A dispersão é diretamente proporcional à distância da ligação. A dispersão total numa ligação de fibra ótica é dada pela equação (2.9)

$$\Delta t = L D \sigma_\lambda \quad (2.9)$$

Em que:

- Δt – Dispersão total numa ligação [ps];
- D – Parâmetro da dispersão cromática [ps / (nm.km)];
- L – Comprimento da ligação [km];
- σ_λ – Largura espectral da fonte ótica [nm].

Habitualmente o parâmetro de dispersão cromática é definido através dos parâmetros de fibra ótica do fabricante. Por exemplo, para uma fibra padrão usada nos sistemas de comunicação por fibra ótica, o parâmetro de dispersão cromática é de aproximadamente 17 [ps / (nm.km)], para um comprimento de onda de 1550 [nm]. Este parâmetro depende do comprimento de onda de acordo com a equação (2.10). A figura 2.8 apresenta os diferentes valores do parâmetro de dispersão para diferentes comprimentos de onda.

$$D(\lambda) = D_\lambda + S(\lambda - \lambda_0) \quad (2.10)$$

Em que:

- S – Declive da curva de dispersão;
- D_λ – Parâmetro de dispersão cromática num comprimento de onda λ ;
- λ – Comprimento de onda ;
- λ_0 – Comprimento de onda de referência.

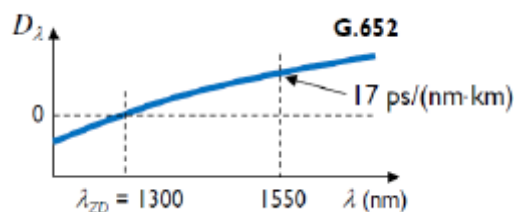


Figura 2.8 – Evolução do parâmetro de dispersão em função do comprimento de onda [13].

Dispersão Intermodal

A dispersão intermodal ocorre em regime multimodo. É devido a cada modo de propagação ter um valor diferente da velocidade de com que a energia viaja na fibra para a mesmo comprimento de onda [12].

Assim, como os diferentes modos, que constituem um impulso, viajam ao longo da fibra a diferentes velocidades, a largura do impulso depende dos tempos de transmissão do modo mais rápido e do modo mais lento. Este efeito pode ser muito severo se os lasers funcionarem num comprimento de onda que não é fixo, mas sim numa gama de comprimentos de onda, quando há vários modos em diferentes comprimentos de onda. [12].

O valor da dispersão Intermodal em fibra multimodo ID é aproximado pela equação (2.11)

$$\Delta T_{mod} = T_{max} - T_{min} = \frac{Ln_1^2}{cn_2} - \frac{Ln_1}{c} \approx \frac{Ln_1\Delta}{c} \quad (2.11)$$

Em que:

- ΔT_{mod} – Alargamento temporal do impulso;
- T_{max} – Alargamento temporal máximo;
- T_{min} - Alargamento temporal mínimo;
- c – Velocidade da luz.

Em fibras ID, o alargamento rms devido à dispersão intermodal é dado pela equação (2.12)

$$\sigma_{mod} \approx \frac{L\Delta n_1}{2\sqrt{3}c} \quad (2.12)$$

No caso de fibras IG, com perfil otimizado ($\alpha \approx 2$), o alargamento é dado pela equação (2.13)

$$\sigma_{mod} \approx \frac{L\Delta^2 n_1}{20\sqrt{3}c} \quad (2.13)$$

A dispersão de fibras IG é dada pela equação (2.14)

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{intermodal}^2 + \sigma_{intramodal}^2} \quad (2.14)$$

Em que:

- $\sigma_{intermodal}$ - Largura rms do impulso devido à dispersão intermodal;
- $\sigma_{intramodal}$ - Largura rms resultante do alargamento do impulso em cada modo devido à dispersão material e de guia de onda.

Para o caso de fibras IG a expressão que representa a contribuição da dispersão intermodal é mais complexa.

Normalmente é feita a análise de cada um dos termos da dispersão, considerando o outro nulo, sendo depois adicionados os resultados assim obtidos para se obter a dispersão total do modo. O valor assim obtido representa uma boa estimativa da dispersão intramodal total. Porém, na realidade os dois mecanismos responsáveis pela dispersão intramodal total estão intrinsecamente relacionados. É apenas por simplificação da análise e obtenção das expressões que são considerados em separado.

Dispersão por modo de polarização (PMD)

A dispersão por modos de polarização (PMD) acontece para taxas de transmissão iguais ou superiores a 40 Gb/s.

A PMD está relacionada com as fibras onde a propagação do sinal se faz através de dois modos polarizados ortogonalmente que apresentam velocidades de propagação ligeiramente diferentes. A PMD nas fibras monomodo é devido à assimetria do núcleo. A maioria das vezes essa perda de simetria resulta de uma geometria não circular do núcleo.

Penalidade devido à dispersão cromática

A contribuição da penalidade de transmissão devido à dispersão cromática está associado a:

- Largura espectral da fonte ótica – $\Delta\lambda_L$;
- Largura de banda do sinal modulado – $\Delta\lambda_M$.

A penalidade devido à dispersão cromática associada a largura espectral da fonte ótica é dada pela equação (2.15) [14]

$$\Delta P_i|_{\Delta\lambda_L} = -5 \log[1 - (4R_B D L \sigma_\lambda)^2] \text{ para } |4R_B D L \sigma_\lambda| < 1 \quad (2.15)$$

Em que:

- R_b - Débito binário;
- D - parâmetro de dispersão;
- L - Comprimento da ligação;
- λ_0 - Comprimento de onda;
- σ_λ - Largura espectral da fonte ótica;
- c - Velocidade da luz.

A penalidade devido à dispersão cromática associada a largura da banda do sinal modulado é dada pela equação (2.16) [14].

$$\Delta P_i|_{\Delta\lambda_M} = -5\log[(1 - 8\alpha_c\beta_2LR_B)^2 + (8\beta_2LR_B)^2] \text{ para } |4R_BDL\sigma_\lambda| < 1 \quad (2.16)$$

Em que:

- β_2 – Parâmetro de dispersão da velocidade de grupo;
- α_c – Parâmetro chirp.

A penalidade total devido à dispersão cromática é dada pela equação (2.17) [14].

$$\Delta P_i| = \Delta P_i|_{\Delta\lambda_L} + \Delta P_i|_{\Delta\lambda_M} \quad (2.17)$$

Em que:

- $\Delta P_i|_{\Delta\lambda_L}$ – Penalidade devido à dispersão cromática associado a largura espectral da fonte ótica;
- $\Delta P_i|_{\Delta\lambda_M}$ – Penalidade devido à dispersão cromática associado a largura de banda do sinal modulado.

Numa ligação ótica a penalidade devido à transmissão é configurada para 2 dB. Este valor é o máximo de distorção que a ligação pode tolerar. Qualquer uma das penalidades ($\Delta P_i|_{\Delta\lambda_L}$ ou $\Delta P_i|_{\Delta\lambda_M}$) não podem exceder os 2 dB.

2.3.3 Efeitos não lineares

Os efeitos não lineares numa fibra ótica são divididos em:

- Efeitos originados pela não linearidade do índice de refração;
- Efeitos originados pela difusão estimulada.

Em relação aos efeitos originados pela não linearidade do índice de refração, fazem parte:

- Auto-modulação de fase (*Self-Phase Modulation* - SPM);
- Modulação de fase cruzada (*Cross Phase Modulation* - CPM);
- Mistura de 4 ondas (*Four-Wave Mixing* - FWM).

No que diz respeito aos Efeitos originados pela difusão estimulada, fazem parte:

- Difusão estimulada de *Raman* (*Stimulated Raman Scattering* - SRS);
- Difusão estimulada de *Brillouin* (*Stimulated Brillouin Scattering* - SBS).

Os efeitos não lineares ocorrem quando temos débitos binários elevados e/ou potências elevadas. Os efeitos não lineares deixaram de ser desprezáveis devido ao aumento da distância das ligações.

SPM

A *Self Phase Modulation* (SPM) é uma não linearidade que está relacionada com a dependência existente entre a potência associada a um canal com o índice de refração da fibra ótica. Para caraterizar a SPM utiliza-se o parâmetro não linear da equação (2.18)

$$\gamma = \frac{2\pi n_2^2}{\lambda \cdot A_{eff}} \quad (2.18)$$

Em que:

- n_2 - Valor numérico relacionado com os dopantes dentro do núcleo de fibras de sílica. As unidades de medida são [m^2 / W];
- A_{eff} - Área efetiva da fibra.

De acordo com a equação anterior o parâmetro não linear está relacionado com a área efetiva da fibra. Quanto maior for a área efetiva da fibra menor serão os efeitos não-lineares. Além disso, varia também com o comprimento de onda do sinal.

A variação de fase produzida pelo SPM é dada pela equação (2.19)

$$\phi_{NL} = \gamma \cdot P_{in} \cdot L_{eff} \quad (2.19)$$

Em que:

- L_{eff} - Comprimento efetivo da fibra;
- P_{in} - Potência que pode ser inserida na fibra;
- γ - Parâmetro não linear.

Caso existam múltiplos amplificadores, a variação de fase irá acumular-se sobre esses amplificadores. Então a equação (2.20) é dada por:

$$\phi_{NL} = \gamma \cdot P_{in} \cdot L_{eff} \cdot N_A \quad (2.20)$$

Em que:

- N_A – Número de amplificadores;
- P_{in} - Potência de entrada;
- L_{eff} - Comprimento efetivo da fibra;
- γ - Parâmetro não linear.

As variações de fase originam o *chirping*. O *chirp* vai contribuir para aumentar o alargamento ou a compressão dos impulsos. Para que o SPM tenha pouco impacto, as variações de fase devem ser $\phi_{NL} \ll 1$. [14]. Considerando que o valor máximo para a variação de fase é $\phi_{NL} = 0,1$ a potência máxima resulta da seguinte equação (2.21)

$$P_{in} < \frac{0.1}{\gamma \cdot L_{eff} \cdot N_A} \quad (2.21)$$

O SPM pode ter maior ou menor impacto dependendo da intensidade da dispersão cromática [15].

CPM

A *Cross Phase Modulation* (CPM) está presente em sistemas *Wavelength Division Multiplexing* (WDM), onde é possível ter uma sequência de impulsos a propagarem-se na fibra. A não linearidade CPM é parecida com a SPM, no entanto, o CPM não depende apenas de um canal específico, mas também da potência de outros canais. Assim, variação de fase do impulso é afetada pelos outros impulsos que se propagam na fibra ótica e pode ser determinada pela equação (2.22) para o canal j.

$$\phi_j^{NL} = \gamma \cdot L_{eff} \cdot \left(P_j + 2 \sum_{m \neq j} P_m \right) \quad (2.22)$$

O chirp induzido num canal passa a depender da potência dos outros sinais que estão a ser transmitidos na fibra ótica, ao mesmo tempo. Esta limitação pode ser minimizada aumentando o espaçamento entre os canais que vão ser enviados na fibra [16].

FWM

A *Four Wave Mixing* (FWM) é uma limitação dos sistemas WDM. Este sistema permite que sejam transmitidos vários sinais de comprimentos de onda diferentes, ao mesmo tempo e na mesma fibra, o que podem originar o aparecimento de outros sinais indesejados. Num sistema de telecomunicações de fibra ótica, em que há uma ligação com WDM, canais com diferentes comprimentos de onda podem ser misturados, formando uma nova onda com um comprimento de onda diferente. Este efeito é um dos principais responsáveis pela degradação do WDM e em situações em que o espaçamento entre canais seja pequeno. Para evitar que isto aconteça a potência do sinal deve ser baixa. Ao contrário da SPM e da CPM, a FWM não depende do débito binário [16].

SRS

O *Simulated Raman Scattering* (SRS) pode ser estimulado por outro sinal ótico com maior frequência e energia. Ou seja, quando são injetados na fibra ótica vários sinais com comprimentos de onda diferentes, a potência dos comprimentos de onda mais baixos é transferida para os comprimentos de onda mais altos [15].

O efeito da SRS num sistema de telecomunicações de fibra ótica consiste na redução do limite máximo de potência inserido na fibra. A potência limite máxima limitada pela SRS pode ser determinada com a equação (2.23) [14].

$$P_{th} \approx \frac{16 \cdot A_{eff}}{g_R \cdot L_{eff}} \quad (2.23)$$

Onde:

- g_R – Ganho SRS com o valor aproximado de 6×10^{-13} [m / W] para um comprimento de onda de 1550 [nm].

SBS

Existe o *Stimulated Brillouin Scattering* (SBS) quando da onda transmitida surge uma segunda onda, com energia inferior, que é refletida. A segunda onda denomina-se por onda de *Stokes*. Para contrariar este efeito é necessário colocar isoladores que eliminem a onda de *Stokes* [16].

Este fenómeno acontece quando surgem potências elevadas que interagem com a vibração acústica das moléculas de sílica. A vibração acústica na fibra ótica irá interagir com o sinal, transmitido na fibra, causando um efeito não linear. Assim, irá afetar o limite máximo de potência que pode ser determinado pela equação (2.24) [14].

$$P_{th} \approx \frac{21 \cdot A_{eff}}{g_B \cdot L_{eff}} \quad (2.24)$$

Onde:

- g_B – Ganho SBS com o valor aproximado de $5 \times 10^{-11} [m/W]$;
- A_{eff} – Área efetiva da fibra.
- L_{eff} – Comprimento efetivo da fibra;

O limite máximo de potência será afetado pelas dimensões da fibra e o comprimento efetivo L_{eff} que pode ser calculado com a equação (2.25) [17]

$$L_{eff} = \frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha} \quad (2.25)$$

Onde:

- α – Coeficiente de atenuação.
- L – Comprimento da fibra;

2.4 Fibra ótica monomodo padrão (SMF)

A fibra ótica monomodo (SMF) é a mais utilizada no sistema de telecomunicações. É também conhecida como a fibra ITU-T G.652 [9]. A recomendação ITU-T G.652 descreve os atributos geométricos, mecânicos e de transmissão de um cabo de fibra ótica monomodo que tem comprimento de onda de dispersão zero em torno de 1310 nm. A fibra ITU-T G.652 foi originalmente otimizada para uso na região de comprimento de onda de 1310 nm, mas também pode ser usada na região de 1550 nm onde apresenta uma dispersão elevada com valores típicos do parâmetro de dispersão de 17 ps/(nm.km), para o comprimento de onda de 1550 nm. Como consequência, a utilização desta fibra para comprimento de onda de 1550 nm vai limitar significativamente o comprimento de ligação, particularmente para débitos muito elevados, requerendo normalmente a utilização de técnicas de compensação da dispersão.

A tabela 2.1 apresenta os parâmetros de atenuação e de dispersão cromática para este tipo de fibra. Estes valores foram retirados da norma ITU-T G.652 [9].

Tabela 2.1 - Valores típicos de atenuação e dispersão de uma fibra SMF [9].

Região do comprimento de onda	Valores típicos de ligação
1260nm-1360nm	0,5 dB/km
1530nm-1565nm	0,275 dB/km
1565 nm-1625 nm	0,35 dB/km
D1550	17ps/(nm km)
S1550	0,056 ps/(nm ² km)
Nota: Valores típicos da ligação correspondem ao coeficiente de atenuação da ligação usado em ITU-T-G.957 e b-ITU-T-G.6911	

2.5 Fibra ótica NZDSF

A fibra ótica monomodo (NZDSF) é também conhecida como a fibra ITU-T G.655. Esta fibra resolve o problema da dispersão para comprimento de onda de 1550 nm, sendo apropriada para ser usada com sistemas com WDM devido ao facto de ter um declive pequeno de modo a reduzir a variação da dispersão acumulada entre diferentes comprimentos de onda.

O projeto desta fibra resultou de um compromisso entre dispersão e efeitos não lineares. Por este motivo, foi desenvolvida uma fibra com uma secção eficaz do núcleo maior do que a fibra normal, permitindo minimizar a influência das perturbações não lineares, e manter a dispersão com os valores médios do parâmetro de dispersão de cerca de 4 ps/(nm.km) para 1550 nm.

A tabela 2.2 apresenta os parâmetros das duas principais famílias de implementações de fibra ITU-T G.655 [18] que são suportados por vários fornecedores.

Tabela 2.2 - Valores típicos de atenuação e dispersão de uma fibra NZDSF [18]

Coeficiente de atenuação Região do comprimento de onda	Valores típicos de ligação	
(Note) 1530nm-1565nm	0.275 dB/km	
1565 nm-1625 nm	0.35 dB/km	
Nota: Valores típicos da ligação correspondem ao coeficiente de atenuação da ligação usado em ITU-T-G.957 e b-ITU-T-G.6911		
Coeficiente de dispersão cromática (ps/(nm.km))	$D_{\min}(\lambda):1460-1550$ nm	$\frac{6.94}{90}(\lambda - 1460) - 3.34$
	$D_{\min}(\lambda):1550-1625$ nm	$\frac{3.13}{75}(\lambda - 1550) + 3.60$
	$D_{\min}(\lambda):1460-1550$ nm	$\frac{2.78}{90}(\lambda - 1460) + 2.60$
	$D_{\min}(\lambda):1550-1625$ nm	$\frac{5.28}{75}(\lambda - 1550) + 5.38$

2.6 Emissor Ótico

O emissor ótico é um dispositivo que tem como principal função a conversão do sinal do domínio elétrico para o domínio. Existem dois tipos de emissores óticos:

- LED;
- LASER.

Após se introduzir o sinal ótico na fibra, o sinal vai atenuando e distorcendo com o aumento da distância devidos aos efeitos de atenuação e dispersão. A escolha do emissor ótico depende da distância da fibra ótica e da sua aplicação.

Os emissores do tipo LED possuem as seguintes características:

- Espectro mais largo do sinal derivado de uma emissão incoerente;
- Limitações na velocidade de modulação.

Os emissores do tipo laser possuem as seguintes características:

- Espectro mais estreito do sinal derivado de uma emissão coerente
- Mais sensíveis a variações de temperatura;
- Feixe mais diretivo com potências maiores;
- Menores limitações na velocidade de modulação.

Para ligações envolvendo distâncias moderadas (algumas centenas de metros, ou até alguns quilómetros) são geralmente implementadas para estes sistemas, os emissores do tipo LED. Para distâncias da ordem de centenas ou milhares de quilómetros, a tecnologia ótica a usar, dependendo das aplicações, pode necessitar de componentes de elevado desempenho tais como os díodos laser DFB.

As altas radiâncias do emissor do tipo LED são necessárias para introduzir níveis de energia ótica suficientemente elevados numa fibra. O tempo de resposta de emissão é o atraso entre a aplicação de um impulso de corrente e a correspondente emissão ótica. Este fator limita a largura de banda com que a fonte pode ser diretamente modulada variando a corrente injetada. A eficiência quântica está relacionada com a fração de pares elétron-lacuna que se recombinam.

No que diz respeito à outra fonte ótica, os LASERs usados são quase sempre semicondutores. A vantagem é que, possuem uma coerência espacial e temporal na radiação emitida. De uma forma resumida, no LASER, a radiação de saída é altamente monocromática e o sinal é bastante direcional.

Comparando os dois tipos de fontes óticas, as vantagens do LASER em relação ao LED são:

- Um tempo de resposta mais curto. Assim, são possíveis maiores taxas de informação;
- Uma largura espectral mais estreita. Assim, há uma menor distorção do sinal por dispersão;
- Um nível de potência ótica muito superior. Assim, permite comunicações a maiores distâncias.

Como desvantagens, tem-se:

- A sua construção é mais complicada, atendendo que há a necessidade de restringir a sua corrente numa cavidade muito pequena;
- O nível de potência da saída ótica depende bastante da temperatura, o que aumenta a complexidade do circuito de transmissão.

2.6.1 Frequência de *Chirpping*

O *Chirping* no emissor, como por exemplo num laser, resulta das mudanças da corrente de injeção, durante a subida ou descida dos impulsos elétricos, que produzem ressonâncias e também alterações na densidade de portadores no interior do laser. Consequentemente, nos lasers verifica-se alterações no índice de refração da cavidade. Estas alterações provocam alterações na sequência de emissão. O pior cenário para a penalidade de potência introduzida pelo chirping de frequência pode ser determinado com a equação (2.26) [17].

$$\delta_c = 5 \cdot \log \left[\left(1 + 8 \cdot C \cdot B^2 \cdot L_{Total} \frac{D \cdot \lambda_0^2}{2\pi \cdot c} \right)^2 + \left(8 \cdot B^2 \cdot L_{Total} \frac{D \cdot \lambda_0^2}{2\pi \cdot c} \right)^2 \right] \quad (2.26)$$

Em que:

- C - Parâmetro *chirp*.
- c – velocidade da luz no vácuo;
- D - Dispersão na fibra;
- λ_0 – Comprimento de onda;
- B – Débito Binário;
- L_{Total} - Comprimento total da fibra.

2.7 Recetor ótico

Um recetor ótico tem como função converter o sinal ótico para o domínio elétrico e recuperar os dados originalmente transmitidos pelo emissor. Os seus componentes são:

- Fotodetetor;
- Pré-amplificador (pode existir ou não);
- Outros elementos essenciais para o processamento do sinal, como por exemplo filtros.

Os parâmetros a ter em conta num fotodetetor são a sensibilidade e o ruído gerado no processo de deteção.

2.7.1 Tipos de fotodetetor

A deteção do sinal ótico é possível devido a um fotodetetor inserido no recetor ótico. O fotodetetor converte o sinal ótico num sinal elétrico.

Os semicondutores PIN e os fotodíodos de avalanche (APD) são os principais dispositivos para detetar os fótons nos circuitos de fibra ótica devido a:

- Compatibilidade de tamanho com as fibras;
- Altas sensibilidades nos comprimentos de onda pretendidos;
- Tempos de resposta curtos.

Quando a energia de fótons é maior ou igual à energia da banda de passagem do material semiconductor que incide num fotodetetor, os fótons podem “desistir” da sua energia e excitar os eletrões da banda de valência para a banda de condução. Este processo gera pares eletrão-lacuna que são conhecidos como foto-portadores. Quando se aplica uma tensão inversa no fotodetetor, o campo elétrico resultante faz com os portadores se separem, o que dá origem a um fluxo de corrente num circuito externo, denominada de foto-corrente.

A diferença entre os recetores óticos é que no APD há a existência de um ganho elevado na conversão óptico-eléctrica. Porém, é mais caro devido à sua estrutura complexa e existe limitação do desempenho devido ao ruído quântico. No recetor PIN, este ruído é desprezável sendo a limitação geralmente imposta pelo ruído de circuito.

A sensibilidade de um fotodetetor, e o recetor que lhe está associado, é determinada através:

- Ruídos do fotodetetor resultantes da natureza estatística do processo de conversão fóton-eletrão;

- Ruídos térmicos no circuito de amplificação.

As principais correntes de ruído de um fotodetector são:

- Corrente de ruído quântico que surge da natureza estatística da produção e coleção de foto-elétrões;
- Corrente escura que surge dos elétrões e/ou lacunas que são gerados termicamente na junção PN do fotodíodo;
- Corrente negra de superfície (ou corrente de fuga) que depende dos defeitos da superfície, da limpeza, da tensão inversa e da área de superfície.

De forma a reproduzir fielmente o sinal de entrada, o fotodíodo deve ser capaz de seguir de uma forma precisa as variações do seu sinal, o que depende:

- Coeficiente de absorção no comprimento de onda pretendido,
- Largura da camada de depleção do fotodíodo
- Várias capacitâncias e resistências do fotodíodo e do restante circuito de receção.

2.7.2 Parâmetros no recetor

A função de um recetor ótico é detetar o sinal ótico e convertê-lo num sinal elétrico, interpretando a informação recebida do sinal ótico. A capacidade de detetar o sinal ótico recebido pode ser medida. Este parâmetro é denominado como sensibilidade do recetor.

A sensibilidade de um recetor determina a potência mínima necessária para funcionar adequadamente com uma determinada taxa de erros BER ("Bit Error Rate") abaixo de um valor especificado.

Este valor especificado é definido como a probabilidade de *bits* errados por unidade de tempo. Em sistemas de telecomunicações por fibra ótica, as taxas típicas de erro variam entre 10^{-9} a 10^{-12} . O número de *bits* errados é o número de bits recebidos que foram alterados devido à distorção, à interferência e ao ruído. A sensibilidade do recetor para operar numa probabilidade especificada de BER requer uma potência média recebida mínima. Assim, pode-se definir a probabilidade de erro de acordo com a equação (2.27) [14].

$$BER = p(1)P(0/1) + p(0)P(1/0) \quad (2.27)$$

Os bits com o nível lógico “1” e “0” têm a mesma probabilidade de ocorrer. Assim, a probabilidade de $p(1) = p(0) = 0,5$ ou seja há 50% de ocorrência para $p(1)$ e 50% de ocorrência para $p(0)$. A probabilidade do BER pode ser determinada com a equação (2.28) [14].

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \quad (2.28)$$

Em que:

- Q - Fator Q;
- erfc - Função de erro complementar

De acordo com a equação (2.29) erfc representa a função de erro complementar.

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-y^2} dy \quad (2.29)$$

Sabendo de antemão o valor do BER, o fator Q pode ser obtido a partir do gráfico da variação da probabilidade de erro com o fator Q ou através da equação (2.30) [14].

$$Q = \frac{2 \cdot M \cdot R \cdot \bar{p}_i}{\sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_T^2 + \sigma_r}} \quad (2.30)$$

Em que:

- σ_S - Ruído de *shot*;
- σ_T - Ruído térmico;
- M – Ganho do recetor, com valor unitário para recetores PIN;
- R - Responsividade do recetor.

A responsividade do recetor é a razão entre a corrente de saída do fotodetetor e a potência ótica recebida. Este parâmetro caracteriza o desempenho do recetor. Este parâmetro pode ser determinado pela equação (2.31) [14].

$$R = \frac{q \cdot \eta}{h \cdot f} \quad (2.31)$$

Em que:

- η - Eficiência quântica do recetor que compreende valores entre 0 e 1;
- $q[C]$ – Carga do eletrão;
- $h[J \cdot s]$ - Constante de *Planck*;
- $f [Hz]$ - Frequência do sinal.

O ruído de *shot* é determinado pela equação (2.32)

$$\sigma_s = \sqrt{(2 \cdot \bar{p}_i) \cdot 2 \cdot R \cdot q \cdot F_A \cdot Q \cdot \Delta f \cdot M^2} \quad (2.32)$$

Em que:

- F_A – Excesso de fator de ruído;
- Δf – Largura de banda de ruído efetiva do recetor;
- \bar{p}_i – Potência mínima recebida;

Por sua vez, o excesso de fator de ruído é dado por:

$$F_A = k_A \cdot M + (1 - k_A) \cdot \left(2 - \frac{1}{M}\right) \quad (2.33)$$

Em que:

- k_A – Taxa de coeficiente ionizante, com valor nulo para o recetor PIN e com $0 < k_A < 1$ para recetores APD;

A potência mínima recebida \bar{p}_i pode ser obtida pela equação (2.34) [14].

$$\bar{p}_i = \frac{Q}{R} \left(q \cdot F_A \cdot Q \cdot \Delta f + \frac{\sigma_T}{M} \right) \quad (2.34)$$

É de referir que o ganho do recetor tem um valor unitário para recetores PIN. O ganho do recetor do tipo APD é dado pela equação (2.35)

$$M_{APD} = \frac{1}{\sqrt{k_A}} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_T}{Q \cdot q \cdot \Delta f} + k_A - 1} \quad (2.35)$$

- M_{APD} – Ganho de multiplicidade no caso de um APD;
- σ_T , - Ruído térmico;
- Δf – Largura de banda de ruído efetiva do recetor;

Para saber qual dos recetores (PIN ou APD) é melhor para a comunicação ótica em estudo, o simulador irá avaliar qual é recetor que tem a maior sensibilidade \bar{P}_i . Assim, o melhor recetor será aquele que tiver o menor \bar{P}_i porque a energia recebida média mínima para o valor especificado exigirá menos valor para o mesmo desempenho. Além disso, um menor \bar{P}_i fornecerá uma relação sinal / ruído ótica mais baixa.

O ruído térmico é dado pela equação (2.36) [14].

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{4k_B T}{R_L} f_n \Delta f} \quad (2.36)$$

Em que:

- T- Temperatura ambiente, considerando o valor de T = 290 K;
- k_B - Constante de Boltzmann [J / K];
- R_L – Resistência elétrica, considerando o valor de 1kΩ;
- f_n - Figura de ruído do amplificador em unidades lineares.

O valor de Δf é um valor compreendido pela expressão (2.37) [14].

$$0,5B \leq \Delta f \leq B \quad (2.37)$$

A figura de ruído, no caso de existir vários amplificadores pode ser determinada pela equação (2.38)

$$f_n = f_{n_1} + \frac{f_{n_2} - 1}{g_1} + \frac{f_{n_3} - 1}{g_1 \cdot g_2} + \frac{f_{n_4} - 1}{g_1 \cdot g_2 \cdot g_3} + \dots + \frac{f_{n_i} - 1}{g_1 \cdot g_2 \cdot g_3 \cdot \dots \cdot g_{i-1}} \quad (2.38)$$

Em que:

- f_{n_i} - Figura de ruído linear do amplificador i ;
- g_{i-1} – Ganho linear do amplificador $i - 1$.

Outro parâmetro do recetor a ter em consideração num sistema de telecomunicação de fibra ótica é a sobrecarga do recetor. Este parâmetro difere de recetor para recetor sendo normalmente apresentado na ficha técnica dos recetores. Caso a potência recebida ultrapassar este parâmetro, o recetor pode deixar de funcionar.

2.7.3 Degradação da Sensibilidade no recetor

Num sinal ótico, o ruído adicionado nos amplificadores óticos e a degradação através das ligações aos vários componentes do sistema de comunicação ótico resultam no aumento da potência ótica média mínima \bar{p}_i .

Na maioria dos transmissores, ainda emitem alguma energia quando o seu estado transita do estado ligado para desligado. No caso dos LASERs, a relação entre a potência $p(0)$ e $p(1)$ é chamada a razão de extinção R_{ext} sendo dado pela equação (2.39).

$$r_{ext} = \frac{p_1}{p_0} \quad (2.39)$$

Analisando a norma ITU-T Rec. G.957 [19] é possível determinar que a razão de extinção ótima é $r_{ext} = \infty$. Esta relação de extinção ótima irá produzir uma menor degradação de sensibilidade. Isto também é possível de ser verificado combinando a definição da sensibilidade média do recetor, dada pela equação (2.40) [14].

$$\bar{p}_i = \frac{(p_0 + p_1)}{2} \quad (2.40)$$

Combinando as equações (2.30), (2.34), (2.40), então temos a equação (2.41)

$$Q_{ex} = \frac{(1 - r)}{(1 + r)} \frac{2 \cdot M \cdot R \cdot \bar{p}_i}{\sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_T^2} + \sigma_T} \quad (2.41)$$

Em que:

- r – Razão de extinção que pode ser dado por $r = \frac{1}{r_{ext}}$;
- M – Ganho do recetor, com valor unitário para recetores PIN;
- σ_S - Ruído de *shot*;
- σ_T , - Ruído térmico;
- M – Ganho do recetor, com valor unitário para recetores PIN;
- R - Responsividade do recetor;
- \bar{p}_i – Potência mínima recebida.

A sensibilidade apresentada na equação (2.31) será diferente se $r > 0$. Assim, obtém-se a equação (2.42) que contabiliza a razão de extinção.

$$\bar{p}_{i_{ex}} = \frac{(1+r)}{(1-r)} \left(q \cdot F_A \cdot Q \cdot \Delta f + \frac{\sigma_T}{M} \right) \quad (2.42)$$

Analisando a equação é possível confirmar que a razão de extinção ótima é $r_{ext} = \infty$ ou $r=0$, resultando em $\delta_{ex} = 0[dB]$ sem degradação da sensibilidade.

$$\delta_{ex} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1+r}{1-r} \right) \quad (2.43)$$

2.8 Amplificador Ótico

O amplificador ótico é um dispositivo usado em comunicações de fibra ótica para amplificar o sinal ótico sem convertê-lo em sinal elétrico. O amplificador ótico é usado devido às perdas na fibra. Esta atenuação do sinal resulta na impossibilidade da potência de sinal ser detetada pelo recetor sem haver alguma amplificação do sinal.

Num sistema de telecomunicação de fibra ótica, o amplificador pode ser inserido em qualquer lugar entre o transmissor ótico e o recetor ótico. Uma das técnicas é fazer a pré-amplificação, ou seja, colocar o amplificador ótico antes do recetor ótico. A pré-amplificação produz melhorias significativas no sistema, melhorando a relação sinal-ruído. Além disso, o uso de pré-amplificação melhora a sensibilidade do recetor ótico. No entanto, na utilização desta técnica pode ser aplicado um filtro ótico. O filtro ótico pode ser utilizado entre o amplificador e o recetor para minimizar o ruído induzido pelo amplificador ótico.

Caso o recetor possuir uma pré-amplificação, como o fator de ruído predominante com pré-amplificação deixa de ser o ruído térmico e passa a ser o ruído induzido pelo pré-amplificador, então a sensibilidade do recetor é dada pela equação (2.44) [14].

$$\bar{p}_i = h \cdot v \cdot F_n \cdot \Delta f \cdot Q \left(F_A \cdot Q \cdot + \sqrt{\frac{\Delta v_{opt}}{\Delta f}} \right) \quad (2.44)$$

Em que:

- $\Delta\nu_{opt}$ - Largura de banda do filtro ótico;
- h - constante *Plancks* $6,63 \times 10^{-34}$ J.s. ;
- Δf – Largura de banda de ruído efetiva do recetor;
- F_A – Excesso de fator de ruído;
- M – Ganho do recetor, com valor unitário para recetores PIN;
- f_n - Figura de ruído do amplificador em unidades lineares;
- Q - Parâmetro qualidade ruído;
- c – Velocidade da luz no vácuo.

No caso de o amplificador ser inserido em qualquer lugar entre o emissor ótico e o recetor ótico, apesar do amplificador trazer benefícios no sistema de comunicações óticas, o uso do amplificador ótico tem a desvantagem de introduzir ruído para o sistema. A maior parte desse ruído vem do ASE. Este fenómeno degrada o OSNR induzindo flutuações na amplitude do sinal. O ruído do amplificador gerado pelo ASE é determinado com a equação (2.45):

$$p_{noise} = f_n \cdot (g - 1) \cdot h \cdot f_0 \cdot B_0 \quad (2.45)$$

Em que:

- f_n – Figura de ruído do amplificador;
- g – Ganho do amplificador;
- h - constante Planck $6,63 \times 10^{-34}$ J.s. ;
- f_0 – Frequência central;
- B_0 – Largura de banda do amplificador/filtro.

Cada amplificador é caracterizado pelo seu ganho, o qual relaciona a potência do sinal na saída P_0 , com a potência do sinal na entrada P_i .

$$g = \frac{P_0}{P_i} \quad (2.46)$$

Atendendo que o ganho dos amplificadores usados nos sistemas de telecomunicações é muito elevado, exprime-se o ganho de potência em decibel (dB).

$$G = 10 \log_{10} g \quad (2.47)$$

Assim, a equação (2.46) em unidades logarítmicas reescreve-se da seguinte maneira:

$$P_{out\,amplifier} = P_{in\,amplifier} + G \quad (2.48)$$

Em que:

- $p_{in\,amplifier}$ - potência recebida pelo amplificador;
- G - Ganho do amplificador.

2.9 Filtro Ótico

Uma das aplicações do filtro ótico é a seguir a um processo de amplificação. O filtro ótico filtra parte do ruído se a largura de banda do filtro ótico for menor que a largura de banda do recetor. O objetivo principal do uso de um filtro ótico nesta situação é fornecer menos ruído, atingindo uma melhor medida da relação de potência do sinal para potência de ruído num canal ótico (ONSR) na entrada do recetor ótico.

Outras das aplicações do filtro ótico é no sistema WDM. O uso de muitos canais é possível com o WDM e com um transmissor ótico com capacidade de emitir mais de um canal. O filtro ótico é usado para separar e analisar cada canal no comprimento de onda especificado, já que cada canal tem um comprimento de onda diferente, rejeitando outras frequências.

2.10 Splitter

Os *splitters* são equipamentos passivos que, geralmente, têm uma entrada e n saídas. Estes equipamentos geralmente usados na Rede de Acesso têm o objetivo de “repartir” o sinal de uma fibra

em várias saídas (ao custo de uma atenuação), transformando-se assim numa rede ponto multiponto.

Os *splitters* usados dividem uniformemente o sinal ótico. No entanto, existem também *splitters* que dividem o sinal de forma não uniforme. Os *splitters* dividem o sinal em gamas que podem chegar até 64 vezes, apesar da norma prever a utilização de até 1:128. Na prática, não é muito utilizado os *splitters* 1:128 devido à taxa de contenção, que é um parâmetro que mede a qualidade de serviço na rede.

Capítulo 3

Rede de transporte ótica

3.1 Evolução das tecnologias

A Rede de transporte ótico, também denominada como rede *core*, é responsável pelo transporte de grande fluxo de tráfego agregado a grandes distâncias, permitindo suportar diferentes serviços. A rede de transporte garante diferentes funcionalidades, como por exemplo:

- Transmissão;
- Multiplexagem;
- Encaminhamento;
- Proteção, supervisão e aprovisionamento de capacidade.

Na rede core tem existido uma grande evolução no que diz respeito às tecnologias usadas. Durante a década de 80, a tecnologia que prevaleceu foi o PDH (*Plesiochronous Digital Hierarchy*). Esta tecnologia era utilizada para transportar grandes quantidades de dados agregados em sistemas de cabo coaxial, em sistemas de fibra ótica ou sistemas de rádio. Uma das limitações desta tecnologia está relacionada com a capacidade limitada para suportar mecanismos de gestão e uma flexibilidade reduzida para a partilha da largura de banda para serviços com débitos distintos. Assim, surgiu a tecnologia SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) próximo da década de 90.

Enquanto as tecnologias de transporte mencionadas anteriormente foram desenvolvidas para canais de comunicação onde ocorre multiplexação sucessiva por divisão no tempo (TDM), existem outras tecnologias de transporte desenvolvidas para canais de comunicação onde ocorre multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM), caso da DWDM (Dense WDM) ou da UDWDM (Ultra Dense WDM).

A DWDM é uma tecnologia de alta capacidade de transmissão por canal, com aplicações preferenciais em redes de longa distância. A desvantagem é que a implementação desta tecnologia de transporte implica custos ainda muito elevados devido à complexidade dos seus equipamentos.

3.2 Redes SDH

A rede SDH foi desenvolvida para substituir o sistema PDH no transporte de grandes quantidades de chamadas telefônicas e tráfego de dados sobre a fibra ótica sem problemas de sincronização. Além disso, foram as primeiras gerações da rede ótica a serem implementadas nas redes de transporte, que são capazes de suportar transmissões de taxas de bits constante com utilização de multiplexagem por divisão no tempo [20].

A multiplexagem refere-se à operação pela qual vários sinais analógicos ou digitais são combinados num único sinal tendo como objetivo a sua transmissão sobre um único canal.

É de referir que a multiplexagem pode ser feita no domínio do tempo, no domínio da frequência (FDM, Frequency Division Multiplexing) ou no domínio do comprimento de onda.

As tramas de SDH têm dimensões variadas que permitem uma estrutura multi-granular que pode transportar também os diferentes tipos de sinais PDH. A sua estrutura é composta por um cabeçalho entrelaçado entre os dados de uma forma complexa. Assim, os dados encapsulados têm a sua própria taxa de transição. De acordo com a tabela 3.1, o padrão SDH utiliza tramas STM-N (*Synchronous Transport Module*) com as seguintes taxas de bits.

Tabela 3.1 - Tramas e débitos na rede SDH [15].

Sinal SDH	Débito [Mbps]
-	51,84
STM-1	155,52
STM-4	622,08
-	1244,16
STM-16	2488,32
STM-64	9953,28
STM-256	39814,32

A principal vantagem é que transporta sinalização e informações de gestão de cabeçalho. Muitas dessas informações podem ser minimizadas se tais funções forem incorporadas pelos dispositivos *Internet Protocol* (IP).

O SDH pode multiplexar *frames* baseadas em transmissão de pacotes, como *Ethernet* e *Point to Point Protocol* (PPP). No entanto, para a implementação do mecanismo de gestão da rede, o SDH necessita de um protocolo que implemente mecanismos de priorização de tráfego da rede core, como por exemplo o MPLS (*Multi-Protocol Label Switching*).

3.3 Redes WDM

As tecnologias de transporte mencionadas anteriormente foram desenvolvidas para canais de comunicação onde ocorre multiplexação sucessiva por divisão no tempo. Existem outras tecnologias de transporte desenvolvidas para canais de comunicação onde ocorre multiplexação por divisão de comprimento de onda, caso da DWDM.

A normalização dos comprimentos de onda a usar nas redes WDM é feita pela norma G.692 do ITU-T e usa um espaçamento idêntico na frequência para essa normalização. De acordo com a figura 3.1, os canais são colocados numa grelha de 50 GHz (≈ 0.4 nm), com a frequência central nominal de 193.1 THz (1552.52 nm)

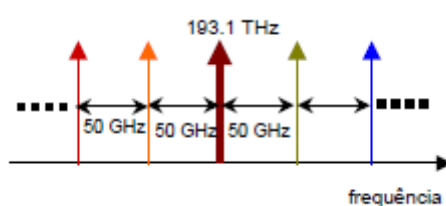


Figura 3.1 - Distribuição dos canais nas redes WDM [11].

O desvio máximo da frequência nominal de canal não deve ser muito elevado, caso contrário contribui para aumentar o *crosstalk* e as perdas. Para $\Delta f \geq 200$ GHz o ITU-T especificou um desvio máximo de $\pm \Delta f / 5$. A normalização dos comprimentos de onda em WDM é importante para garantir a interligação de equipamentos de diferentes fabricantes e permitir aos fabricantes a redução dos custos de fabrico.

No sistema de multiplexagem DWDM são agregados vários canais óticos e cada um opera no seu comprimento de onda distinto.

A DWDM é uma tecnologia de alta capacidade de transmissão por canal, com aplicações preferenciais em redes de longa distância como a rede de transporte. A implementação desta tecnologia de transporte implica custos ainda muito elevados devido à complexidade dos seus equipamentos, embora atualmente tenham vindo a descer.

De acordo com a figura 3.2, os elementos de uma rede ótica incluem os seguintes equipamentos:

- OTM (*Optical Terminal Multiplexer*):
 - Aceita a entrada de vários comprimentos de onda;
 - Não lhe interessa a informação transportada no sinal;
 - O objetivo é transportá-la até ao destino [21].

- OA (*Optical Amplifier*):
 - São também designados por EDFA (*Erbium-Doped Fiber Amplifier*);
 - São inseridos nas ligações óticas, com espaçamento entre os 80 a 120 km;
 - Estão sempre acompanhados dos DCU (*Dispersion Compensation Unit*) para compensar a dispersão na fibra [21].
- OADM (*Optical Add-Drop Multiplexer*):
 - Permite a derivação e adição de um determinado número de canais óticos sem qualquer processamento;
 - Utilizado para adicionar e remover canais de supervisão de uma rede DWDM;
 - São *multiplexers* de inserção/extração de comprimentos de onda;
 - Não existe o processamento da trama [21].
- OXC (*Optical cross-connect*):
 - Elemento de rede que permite controlar redes mais complexas;
 - O encaminhamento da informação é feito consoante ela chega a um determinado nó, ou seja, consegue ver se a informação é para aquele nó, ou se aquele é apenas um nó de passagem [21];
 - É similar ao OADM, no entanto, tem maior capacidade de processamento;
 - O encaminhamento funciona com caminhos de luz.

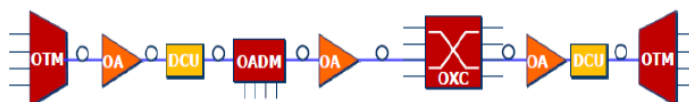


Figura 3.2 - Sistema DWDM utilizado na rede ótica de transporte [21].

A rede Optical Transport Network (OTN) trata-se de uma evolução da rede SONET/SDH e foi projetada para transportar todos os tipos de tráfego de dados na rede de transporte de longa distância, incluído o tráfego SONET/SDH.

A grande desvantagem é que a rede OTN necessita de novo *hardware* e mecanismos de gestão e controlo em relação à rede SONET/SDH [22].

3.4 OSNR

A relação sinal ruído ótico (OSNR) serve para avaliar a qualidade do sinal recebido ótico. Este parâmetro mede a relação entre o sinal recebido e o seu ruído. Assim, esta é a melhor maneira de analisar o desempenho do sistema de telecomunicação de fibra ótica. O OSNR pode ser determinado em cada ponto de ligação avaliando assim o seu desempenho sendo dado pela equação (3.1) [23].

$$osnr = \frac{p_{out}}{p_n} \quad (3.1)$$

Em que:

- p_{out} – Potência ótica num determinado ponto;
- p_n - Potência do ruído no mesmo ponto.

A unidade típica de OSNR é em decibéis (dB). Para que o sistema de comunicação ótico tenha um bom funcionamento, o valor de OSNR deve ser maior do que o valor necessário para o sistema funcionar, atendendo que pode haver degradação do sinal nos vários dispositivos do sistema, o que causará novas penalidades de potência que o sistema não considerou.

3.4.1 OSNR do transmissor

O ruído do transmissor pode ser determinado de acordo com a equação (3.2).

$$P_{ntransmitter} = P_{outtransmitted} - OSNR_{transmitter} \quad (3.2)$$

3.4.2 OSNR do amplificador ótico

Embora tenha sido mencionado no ponto 2.6, é de referir que o amplificador ótico introduz ruído na ligação. A potência de ruído p_n na saída de um amplificador pode ser determinada usando a equação (3. 3) [23].

$$p_n = p_{ASE} + p_{n_s} \quad (3.3)$$

Em que:

- p_{n_s} - Ruído que é propagado no sistema até esse ponto, incluindo todo o ruído introduzido pelos amplificadores anteriores e pelo transmissor ótico.

Por outro lado, como a potência do sinal está a ser amplificada, o ruído que já está no sistema também será amplificado. Assim, o ruído mencionado na equação (3.3) é determinado pela equação (3.4).

$$P_{n_s} = P_{n_{received}} + G \quad (3.4)$$

Além disso, como foi mencionado na Seção 2.6, o sinal ótico após o amplificador pode ser representado pela equação (3.5) [23].

$$p_{out} = G + p_{in_{amplifier}} (dB) \quad (3.5)$$

Através da combinação das equações (3.3), (3.4) e (3.5), a OSNR no final do amplificador ótico pode ser determinada pela equação (3.6):

$$osnr_a = \frac{G + p_{in_{amplifier}}}{p_{ASE} + p_{n_s}} \quad (3.6)$$

3.4.3 OSNR do recetor ótico

O OSNR é calculado na entrada do recetor ótico, antes de ser convertido em um sinal elétrico. A potência de ruído que chega ao recetor ótico é a soma de todo o ruído do sistema. Este parâmetro não difere entre recetores APD ou PIN, pois o ganho e a inserção de ruído destes recetores afetam apenas o sinal elétrico. Assim, a potência de ruído p_n na entrada do receptor óptico pode ser determinada pela equação (3.7) [23].

$$p_n = p_{n_s} \quad (3.7)$$

Em que:

- p_{n_s} - Soma de todo o ruído do sistema até que o sinal chegue ao recetor.

Combinando a equação (3.3) com a equação (3.7) o OSNR no final do amplificador ótico é dado pela equação (3.8)

$$osnr_r = \frac{p_{in_{receiver}}}{p_{n_s}} \quad (3.8)$$

3.5 Metodologias de projeto numa rede ponto a ponto

O projeto de uma ligação ponto a ponto envolve muitas variáveis, relacionando as características de operação da fibra ótica, do emissor, do fotodetetor e dos componentes passivos. Para assegurar o desempenho pretendido num sistema de comunicação ótico é necessário ter em conta:

- Balanço de potência ótico;
- Balanço da dispersão.

A obtenção de um balanço de potência ótico não é a condição suficiente para garantir o funcionamento correto do sistema de comunicação ótico. Além disso, é necessário uma análise da dispersão para verificar se o débito pretendido é suportado pelos componentes que fazem parte do sistema. Por exemplo, a dispersão é em função do comprimento de onda e do tipo de fibra.

Como foi referido anteriormente, num sistema de comunicação ótico há muitas variáveis inter-relacionadas. Esta interdependência tem como resultado que o projeto e análise da ligação sejam feitos iterativamente até que os requisitos do sistema sejam cumpridos.

O balanço de potência ótico é calculado pela equação (3.9)

$$BP(ou GS) = P_i - P_0 = \sum Perdas + MS + PenalidadesS \quad (3.9)$$

Em que:

- P_i - Potência ótica média acoplada à fibra pelo emissor, expressa geralmente em dBm;
- P_0 – Potência ótica mínima requerida no fotodetetor, expressa em dBm;
- $\sum Perdas$ – Somatório de perdas em que inclui perdas por atenuação, uniões e acoplamento ao longo da ligação em dB;
- $PenalidadesS$ – Penalidades de potência;
- MS – Margem de segurança em dB.

A determinação da potência ótica média é dada pela equação (3.10)

$$P_i = \frac{P_1 + P_0}{2} \quad (3.10)$$

A determinação de P_i está relacionada com o tipo de codificação em banda base. Assim, para um sinal do tipo ON-OFF, em que há iguais probabilidades de 1s e 0s a sua probabilidade é de 50%. A potência ótica mínima requerida no fotodetector, ou a sensibilidade nominal do recetor, para assegurar uma determinada taxa de erros foi abordada no ponto 2.5. Porém, existem fatores, tais como o limiar da razão de extinção do laser ou o tipo de impulso que introduzem penalidades adicionais na sensibilidade do recetor. Estas penalidades degradam o sinal e costuma ser englobado no termo de potência mínima requerida pelo fotodetector.

No balanço de potência ótica é considerado a margem de segurança. A margem de 3 a 6 dB é considerada adequada sendo o valor necessário para acomodar as variações de temperatura e de envelhecimento dos componentes. No entanto, em certos casos, prevê-se uma margem de reserva adicional entre 2 a 3 dB.

No sistema de comunicação ótica se considerarmos uma margem de segurança de 6 dB, então poderemos ter em conta:

- Variações das condições ambientais nos equipamentos;
- Envelhecimentos dos componentes
- Alterações futuras;

No cálculo do balanço da potência ótica e no cálculo da dispersão assume-se sempre o pior caso. Isto é, apenas são considerados para o projeto os piores valores para os diversos parâmetros dos componentes envolvidos numa ligação ótica. Apesar desta consideração penalizar a distância de transmissão do sistema, por outro lado, garante que os valores de atenuação e da dispersão são inferiores aos valores calculados para a ligação e que constituem a especificação do sistema.

É de referir que na análise do balanço de potência ótica, assumiu-se que a dispersão do sistema era desprezável, isto é, assumiu-se que a largura de banda do sistema era suficiente para garantir o débito de transmissão requerido. Para assegurar o correto funcionamento do sistema é necessário uma análise da dispersão total do sistema.

No Sistema de Comunicação Ótica é importante o formato do sinal ótico transmitido. Uma boa decisão sobre o sinal ótico a ser transmitido, implica que o recetor seja capaz de extrair corretamente a informação de sincronismo do sinal ótico. A capacidade de obtenção de sincronismo num sinal é importante para:

- Permitir que o sinal seja amostrado em instantes de tempo em que a razão sinal ruído seja máxima;
- Garantir espaçamento entre impulsos, para evitar a sua interferência;
- Indicar corretamente o início e fim das tramas;

Cenários da simulação das redes de transporte de fibra ótica

4.1 Simulação e projeto de uma ligação por fibra ótica

O projeto de uma ligação ótica possui diversos componentes para que a ligação seja adequada às características desejadas. Estes componentes introduzem atenuações, ruídos e distorções no sinal. Por este motivo, deve-se parametrizar os componentes de uma forma correta para que a ligação seja viável tecnicamente e economicamente.

O objetivo desta dissertação consistiu no desenvolvimento de um simulador que permita caracterizar o *link budget* de uma ligação ótica. O programa foi desenvolvido tendo em consideração os padrões e recomendações ITU-T.

A simulação da ligação de fibra ótica é feita através do MATLAB® / *Simulink*. O projeto foi desenvolvido com o auxílio de uma biblioteca para o *Simulink*. O utilizador pode desenvolver um sistema de telecomunicações por fibra ótica, arrastando os componentes tais como emissor, fibra, recetor e amplificador, através de um ambiente gráfico.

No planeamento de uma ligação de fibra ótica é definido o emissor ótico e o recetor ótico. Entre estes dois equipamentos, por exemplo, existem amplificadores, o cabo de fibra ótica e outros componentes. Devido à complexidade de adequar todos os parâmetros às especificações dos equipamentos, o simulador consegue calcular a dispersão, potência ótica no recetor e a relação sinal ruído. Como as restrições de desempenho e custo são fatores muito importantes nas ligações de fibra ótica, o utilizador deste simulador deve escolher cuidadosamente os equipamentos para garantir que o nível de desempenho desejado possa ser mantido.

Em suma, neste capítulo são verificados através de gráficos os resultados expectáveis tendo em consideração todos os fenómenos que ocorrem na propagação de um sinal ótico.

4.2 Utilização do simulador

A utilização deste simulador, não requer nenhuma instalação. Este simulador trabalha diretamente no MATLAB® com o auxílio da ferramenta *Simulink*. Assim, será apenas necessário abrir o MATLAB® na pasta onde o simulador foi colocado. Ao abrir um novo projeto através do *Simulink*, o utilizador necessita de recorrer aos blocos dos componentes do sistema ótico para começar a construir a rede. O *Simulink* inclui uma biblioteca de blocos pré-definidos, mas neste simulador foram desenvolvidos os próprios blocos. Desta forma, será necessário recorrer à biblioteca do MATLAB® / *Simulink* e inserir os blocos que foram desenvolvidos. Através do ficheiro “sblocks.m” que existe no simulador, será adicionado à biblioteca do MATLAB® / *Simulink* os blocos do emissor, do recetor, do amplificador e da fibra ótica para que o utilizador possa projetar a rede ótica pretendida.

A biblioteca é ativada através do botão *Simulink Library Browser*. Na biblioteca deve aparecer o nome "*FOTS Simulator*", como mostra a figura 4.1. Porém, existem procedimentos a terem em conta para inserir o "*FOTS Simulator*" na biblioteca:

- Seguir os procedimentos na ajuda *online* do Matlab, pesquisando como adicionar blocos à biblioteca do *Simulink*;
- Abrir um novo ficheiro da biblioteca do *Simulink* e de seguida deve-se copiar para este ficheiro todos os blocos que existem no ficheiro template "*FOTS 2020*". Após estas tarefas deve-se executar o comando de Matlab "set_param(gcs,'EnableLBRepository','on');". Posteriormente deve-se guardar o ficheiro. Este procedimento vai mudar uma propriedade deste ficheiro para que o "*Fots Simulator*" seja adicionado à biblioteca.

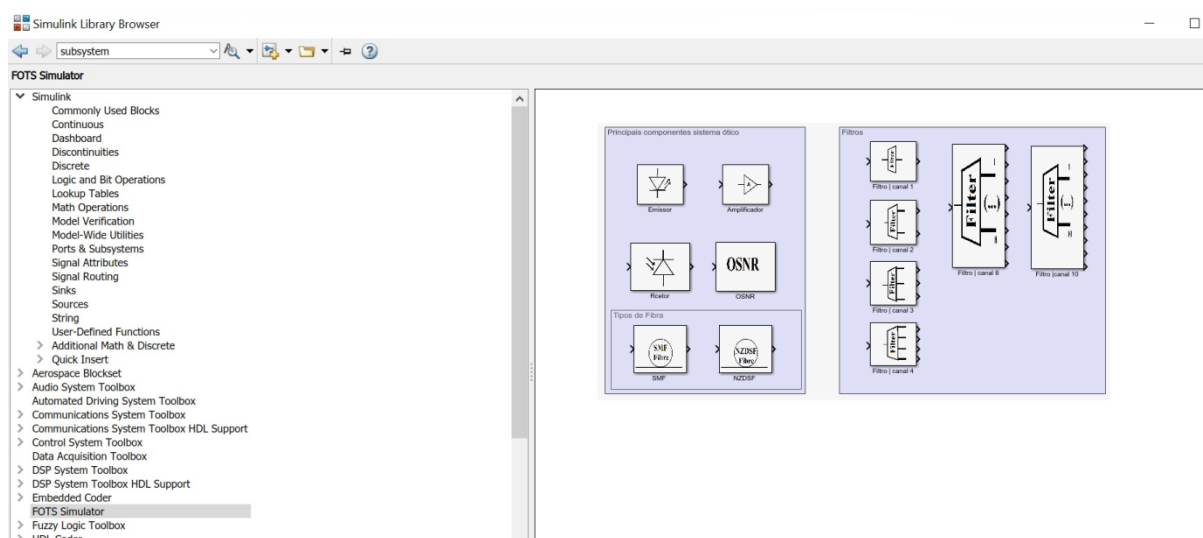


Figura 4.1 – Blocos associados ao simulador FOTS

Os blocos desenvolvidos podem também ser abertos diretamente através do ficheiro FOTS.slx. Depois de abrir o ficheiro, irá surgir uma nova janela com os vários blocos que constituem o sistema ótico de telecomunicações. Ao abrir a janela do bloco do componente, as opções de parametrização para cada componente e as respetivas explicações podem ser observadas nas figuras 4.2 a 4.5. As informações a seguir são uma descrição de como usar cada componente.

Os blocos desenvolvidos podem também ser abertos diretamente através do ficheiro FOTS.slx. Depois de abrir o ficheiro, irá surgir uma nova janela com os vários blocos que constituem o sistema ótico de telecomunicações. Ao abrir a janela do bloco do componente, as opções de parametrização para cada componente e as respetivas explicações podem ser observadas nas figuras 4.2 a 4.5. As informações a seguir são uma descrição de como usar cada componente.

4.3 Utilização dos blocos no Simulador FOTS

Os blocos que fazem parte deste simulador são os seguintes:

- Emissor ótico;
- Fibra ótica;
- Amplificador ótico;
- Filtro;
- Recetor ótico.

Nos pontos seguintes são descritos as suas características e os seus principais parâmetros.

4.3.1 Emissor ótico

O emissor ótico é o bloco de partida da simulação do sistema de telecomunicações por fibra ótica. Este bloco é o único que pode ser ligado diretamente a qualquer bloco da biblioteca. Ao pressionar o bloco do emissor ótico a partir do “Fots Simulator” que está inserido no *Simulink Library Browser* irá aparecer uma janela, de acordo com a figura 4.2. A partir da caixa de diálogo é possível editar vários parâmetros, que caracterizam o emissor ótico.

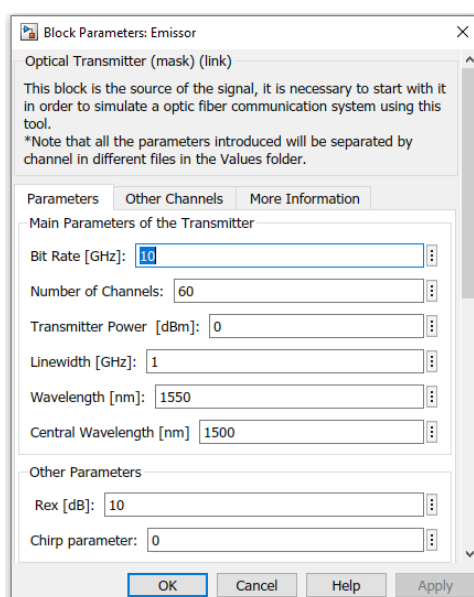


Figura 4.2 – Parâmetros que podem ser editados no bloco emissor

Os principais parâmetros do emissor são:

- Potência do sinal;
- Débito binário;
- Largura da linha;
- Comprimento de onda.

A potência do sinal é um dos parâmetros mais importantes. Por um lado, quanto maior é a potência, mais elevados são custos de aquisição de equipamento e de manutenção. Se o valor da sua potência é baixo, então pode ser insuficiente para compensar todas as atenuações do sistema, e desta forma, o recetor pode não receber um sinal detetável. Consegue-se saber se o sinal no recetor é detetável através da medição da sensibilidade do recetor, cujo assunto será discutida mais adiante na Seção 4.3.5.

O emissor ótico permite adicionar mais que um canal. No entanto, se o número de canais ultrapassar 10 canais, devido a limitação do simulador, todos os canais terão a mesma largura de linha e a mesma potência de sinal inicial. Caso o número de canais esteja compreendido no intervalo [1, 10], então os valores para cada potência de sinal, assim como a largura de linha podem ser inseridos no separador "Other channels" do bloco do emissor ótico. Além disso, o valor do espaçamento do canal pode ser alterado neste bloco. Por último, o separador "More informations" do bloco do emissor ótico fornece informações sobre cada parâmetro. A figura 4.2 mostra os parâmetros padrão do bloco emissor.

O sinal do emissor ótico pode ser transmitido através de modulação direta ou modulação externa. Na modulação externa, o parâmetro chirp (C) tem o valor de zero e tem penalidades de potência menores.

4.3.2 Fibra ótica

O bloco de fibra ótica é inserido entre o emissor ótico e o recetor ótico. Existem dois tipos de fibras construídas nesta biblioteca:

- SMF;
- NZDSF.

Os principais parâmetros da fibra podem ser editados na caixa diálogo ao pressionar o bloco, tal como se pode ver no exemplo da figura 4.3.

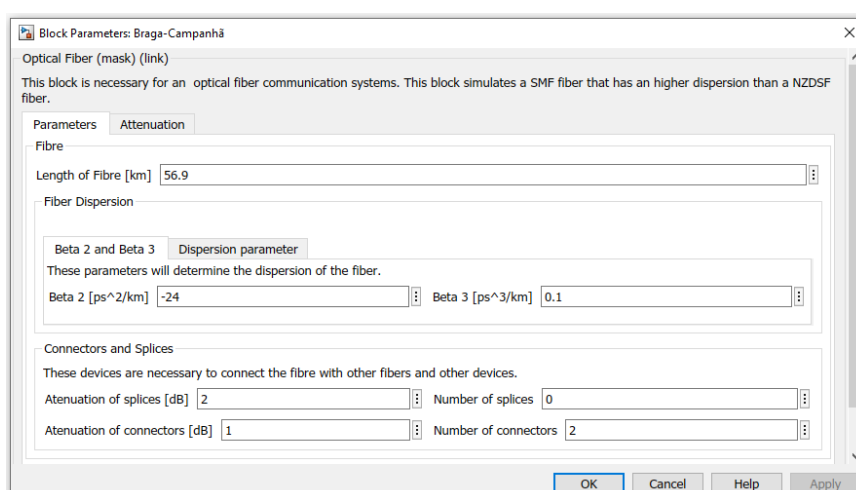


Figura 4.3 - Parâmetros que podem ser editados no bloco da fibra ótica

No bloco da fibra ótica é possível também parametrizar os valores de atenuação de emendas e conectores solicitados neste bloco para que o processo fique mais simplificado.

A atenuação da fibra pode ser inserida de três formas diferentes:

- Não é adicionado nenhuma informação sobre a atenuação da fibra. O simulador assume os valores típicos mencionados nas tabelas 2.1 e 2.2 referentes ao exemplo da fibra do tipo G.655 ou tipo G.652;
- Assumir que a atenuação da fibra não muda com o comprimento de onda e esta assume um valor constante;
- Fornecer valores específicos para intervalos específicos definidos pelo utilizador, como pode ser observado na figura 4.4.

O utilizador pode parametrizar cada bloco da fibra ótica. Os efeitos não lineares na fibra são editados neste bloco. Estes efeitos têm em consideração a soma da potência de cada canal transmitido na fibra. As limitações dos efeitos não lineares limitarão apenas a potência limite ou a potência incidente na fibra.

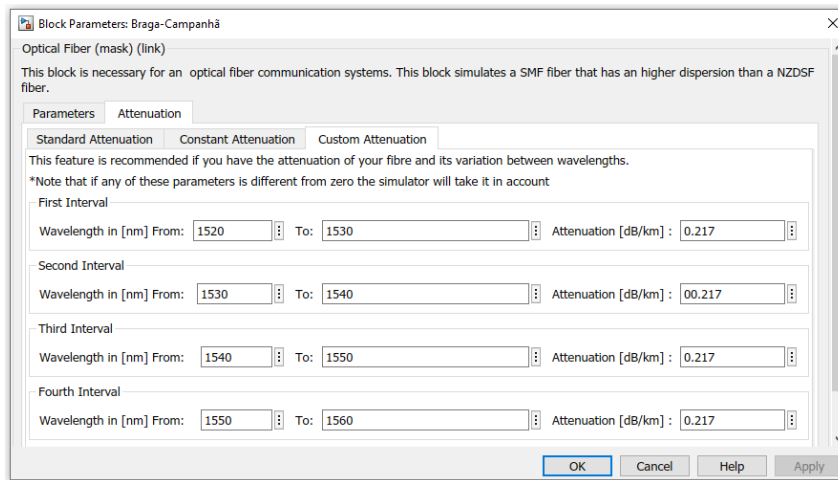


Figura 4.4 – Parametrização da atenuação na fibra ótica para diferentes intervalos de comprimentos de onda

4.3.3 Amplificador ótico

O bloco do amplificador é inserido em qualquer posição entre o emissor e o recetor ótico. Tal como foi referido na secção 2.6, o amplificador é usado para amplificar a potência do sinal, no entanto vai introduzir ruído.

Os principais parâmetros do amplificador podem ser editados na caixa diálogo ao pressionar o bloco, surgindo uma janela como a do exemplo da Figura 4.5.

A utilização da técnica de pré-amplificação antes da receção ótica é possível através da escolha de opção “1” no último parâmetro na janela. Caso seja escolhido o valor “0”, então o simulador assumirá que não há pré-amplificação no sistema. A pré-amplificação serve para aumentar a sensibilidade do recetor ótico.

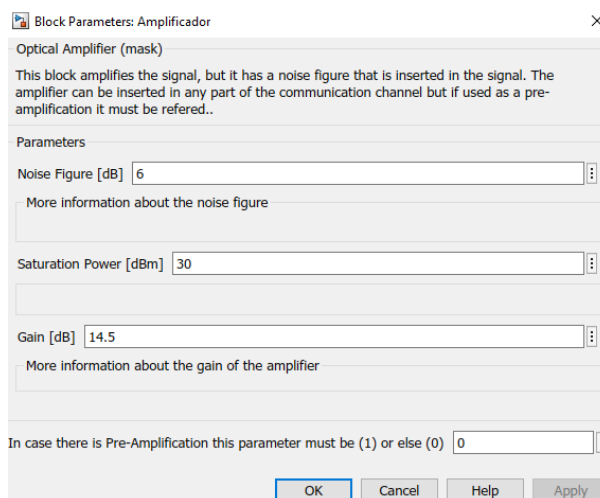


Figura 4.5 - Parâmetros que podem ser editados no bloco do amplificador.

4.3.4 Filtro ótico

O filtro ótico funciona apenas com sistemas WDM. Neste simulador existem muitos tipos de blocos com filtros óticos, permitindo filtrar canais específicos que o utilizador deseja analisar mais detalhadamente.

O número de canais é limitado, atendendo que no Simulink não é possível criar uma matriz $[N, N]$ sem fornecer um valor máximo para N . Para além da quantificação dos canais que o utilizador deseja filtrar, pode também definir a largura de banda do filtro. As funcionalidades do filtro ótico foram referidas na secção 2.9. Os principais parâmetros do filtro são apresentados no exemplo da Figura 4.6.

É de referir que nas situações em que utilizamos mais do que um canal, ao separar os canais, caso o espaçamento dos canais não seja muito grande, o filtro ótico pode detetar parte da energia emitida pelos canais adjacentes, contribuindo desta forma para um aumento do ruído do sinal conhecido como diafonia fora da banda.

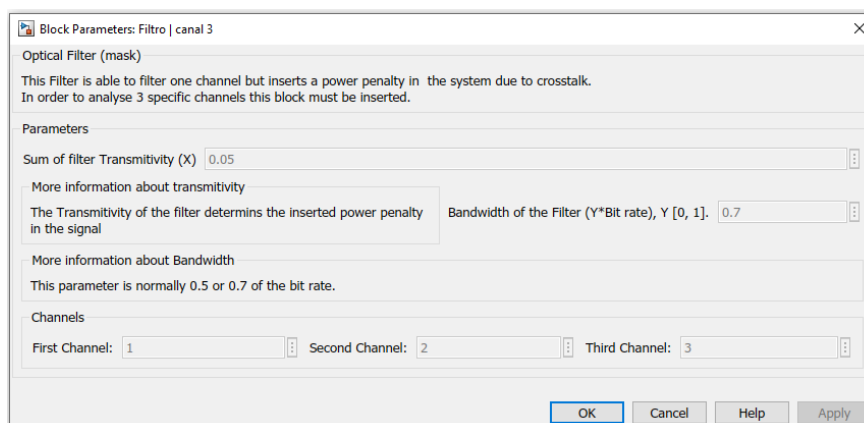


Figura 4.6 - Parâmetros que podem ser editados no bloco do filtro ótico.

4.3.5 Recetor ótico

O recetor ótico é o último bloco do sistema. Na janela do simulador é possível alterar os parâmetros para que seja um recetor do tipo PIN ou do tipo APD. Como o recetor do tipo APD possui um ganho elevado na conversão ótica-elétrica em relação ao recetor do tipo PIN, no simulador, o utilizador escolhe um recetor do tipo APD quando o ganho do recetor é por exemplo 2, como mostra a figura 4.7.

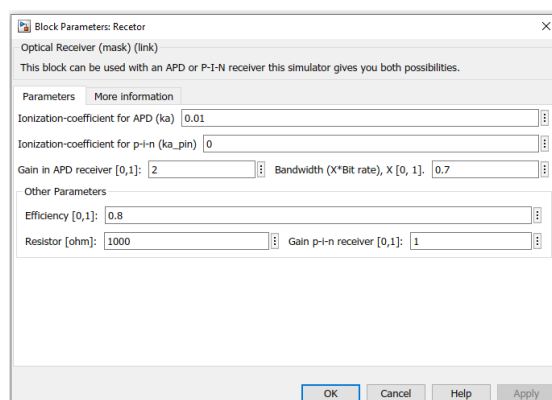


Figura 4.7 - Parâmetros que podem ser editados no bloco do recetor ótico.

4.4 Resultados do Simulador Fots

As informações fornecidas pelo simulador são obtidas através do ficheiro “ChannelX.txt” que corresponde ao X^o canal. Este ficheiro está na pasta “Value” e existe um ficheiro para cada canal. O objetivo é analisar um canal independentemente de outros canais. Os dados mais importantes no sistema são:

- OSNR;
- Dispersão;
- Atenuação da fibra.

Além disso, durante a propagação do sinal desde o emissor ao recetor podem existir comportamentos não lineares de alguns dos componentes ou situações inesperadas na resposta em frequência do meio de transmissão. Estes acontecimentos provocam uma dispersão do sinal, ou seja, uma alteração da forma do sinal durante a sua propagação desde o emissor até ao recetor. Por outro lado, a atenuação consiste numa redução da potência do sinal ao longo do meio de transmissão. Assim, a potência do sinal recebido no recetor deve ser suficiente para ser detetado (sensibilidade do recetor).

Os resultados deste simulador foram verificados através de gráficos com os resultados expectáveis tendo em consideração todos os fenómenos que ocorrem na propagação. Os dados inseridos foram baseados numa ligação realista entre Braga e a estação do Oriente em Lisboa, baseado na rede de fibra ótica dos Caminhos de Ferro de Portugal.

Os parâmetros a terem em conta nesta simulação foram os seguintes:

- Comprimento da fibra;
- Atenuação por quilómetro;
- Dispersão da fibra;
- Perdas de inserção da fibra.

Consideram-se que os valores apresentados na tabela 4.1 são os tipicamente usados num sistema de telecomunicações.

Tabela 4.1 - Valores tipicamente usados num sistema de telecomunicações a inserir no simulador.

N.º troço da Fibra Origem-Destino	Distância [km]	Parâmetros de Dispersão ps/(km/nm)	Coefficiente de Atenuação [dB/km]
1 Braga - Campanhã	56,9	15,33	0,217
2 Campanhã - Aveiro	67,3	16,34	0,221
3 Aveiro - Coimbra	58,1	16,55	0,245
4 Coimbra - Vermoil	58,5	16,75	0,265
5 Vermoil - Entroncamento	57,7	16,23	0,265
6 Entroncamento - Setil	53,3	16,23	0,258
7 Setil - Oriente	52,4	16,38	0,203

É de referir que foram ainda feitas as seguintes considerações:

- O ganho do amplificador é igual à atenuação da fibra;
- Há uma pré-amplificação no último amplificador antes do recetor;
- Os parâmetros do emissor estão de acordo com os valores apresentados na Tabela 4.2;
- Número de canais igual a 20;
- O comprimento de onda para o primeiro canal é de 1550 [nm] e no último canal é de 1531 [nm];

Tabela 4.2 - Parâmetros do emissor Valores tipicamente usados num sistema de telecomunicações a inserir no simulador.

B [Gbps]	Pe [dBm]	λ [nm]	$\Delta\lambda_L$ [Ghz]
10	0	[1531,1550]	0.0125

Apesar da complexidade de adequar todos os parâmetros às especificações dos equipamentos, este simulador é bastante prático devido à sua interface gráfica, em que os blocos são adicionados e ligados entre si, para que o simulador realize o dimensionamento. A análise do desempenho da ligação ótica faz-se em duas etapas:

- Penalidade de potência devido à dispersão;
- Perdas de potência.

A penalidade de potência devido à dispersão permite verificar se a ligação está limitada por dispersão, enquanto as perdas de potência permite verificar se o sistema está limitado pela atenuação.

Na primeira etapa, para garantir que o sinal chega ao recetor em condições de ser recuperado, deverá ser garantido que no máximo a penalidade de potência é menor ou igual a 2dB. Esta condição permite saber se a ligação está limitada por dispersão. O simulador apresenta o resultado das penalidades através das fórmulas que foram apresentadas nos capítulos anteriores.

Depois de garantir os limites da penalidade de potência devido à dispersão será necessário verificar se a margem de segurança é tipicamente superior a 6 dB, pela diferença entre o $OSNR_{Real}$ e $OSNR_{Ideal}$ de acordo com a equação (4.1)

$$M = OSNR_{Real} - OSNR_{Ideal} - PenalidadesS \quad (4.1)$$

Em que:

- $OSNR_{Real}$ – Relação sinal ruído real é dada pela expressão $P_{Sinal} - P_{Ruído}$;
- $OSNR_{Ideal}$ – Relação sinal ruído ideal;
- $PenalidadesS$ – Penalidades de potência admitida na ligação.

O $OSNR_{Ideal}$ é dado pela seguinte expressão [10] :

$$OSNR_{Ideal} = \frac{Q^2 \times Be}{B0} \times \left(\frac{1+r}{1-r}\right)^2 \left[1 + \sqrt{\frac{4r}{(1+r)^2} \times \left(\frac{1-r}{1+r}\right)^2 \frac{B0}{Q^2 - Be}} \right] \quad (4.2)$$

Em que:

- Q – Parâmetro definido para contabilizar a probabilidade de erro do sistema ou BER;
- r – Razão de extinção
- $B0$ – Largura de Banda ótica;
- Be – Largura de Banda equivalente de ruído elétrico.

Por questões de fiabilidade de uma ligação ótica é necessário garantir esta margem de segurança porque podem acontecer perdas inesperadas.

Atendendo a estes pressupostos, foi desenhado no simulador o sistema de telecomunicações por fibra ótica que liga Braga a Lisboa de acordo com a figura 4.8.

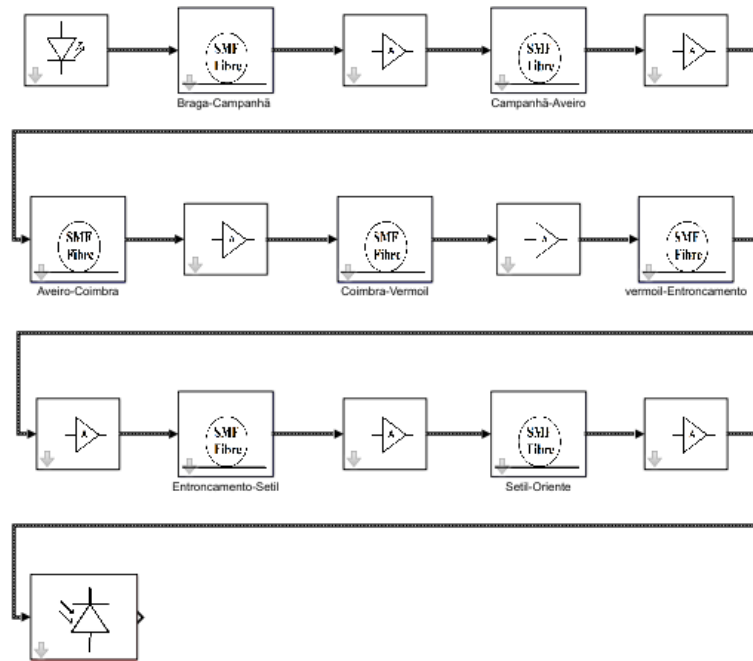


Figura 4.8 – Esquema da simulação do sistema de telecomunicações implementado.

Neste estudo admite-se que a penalidade na transmissão é só devido à dispersão e considera-se o valor máximo de 2dB para esta penalidade. Não se entra em consideração com efeitos não-lineares na fibra ótica.

No simulador foi introduzido o bloco do emissor e editados os respetivos parâmetros. Os valores utilizados estão representados na figura 4.9.

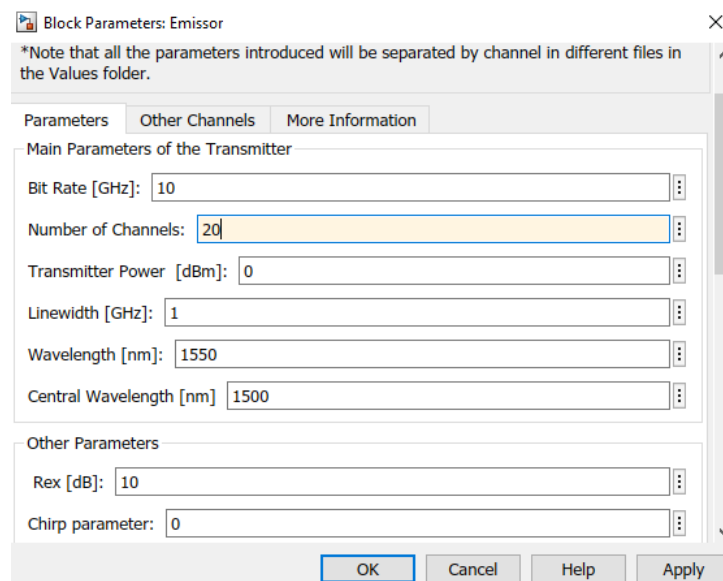


Figura 4.9 – Configuração do emissor ótico.

Os valores utilizados na parametrização dos blocos de fibra, dos amplificadores e do recetor estão representados nas figuras 4.10, 4.11 e 4.12. É de referir que na parametrização dos blocos da fibra foram considerados os comprimentos das fibras que constam na tabela 4.1.

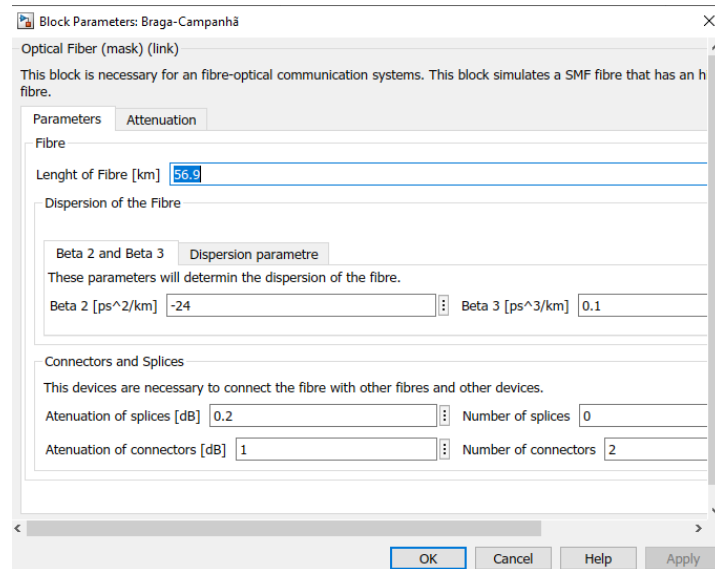


Figura 4.10 - Configuração dos parâmetros da fibra ótica.

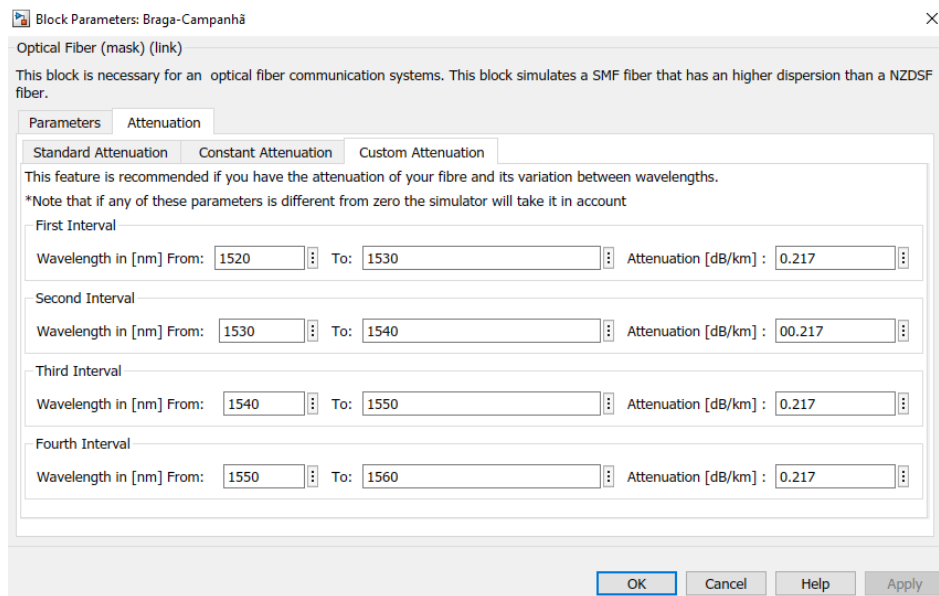


Figura 4.11 - Configuração da atenuação da fibra ótica.

No que diz respeito ao amplificador, o valor escolhido para a figura de ruído dos amplificadores foi de 6 dB. Os parâmetros inseridos no bloco amplificador 1 são apresentados na figura 4.12.

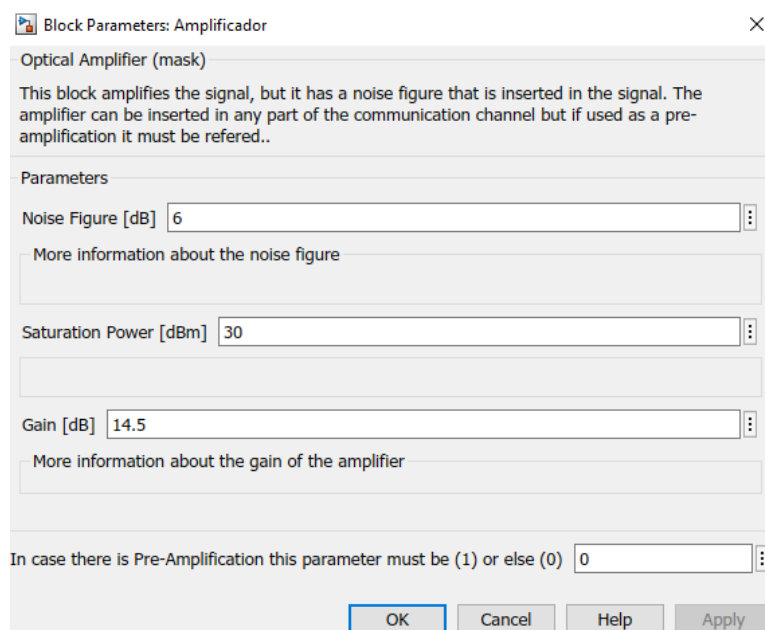


Figura 4.12 - Configuração do amplificador ótico.

Por último, o recetor ótico. Os parâmetros inseridos no bloco do recetor são os apresentados na figura 4.13.

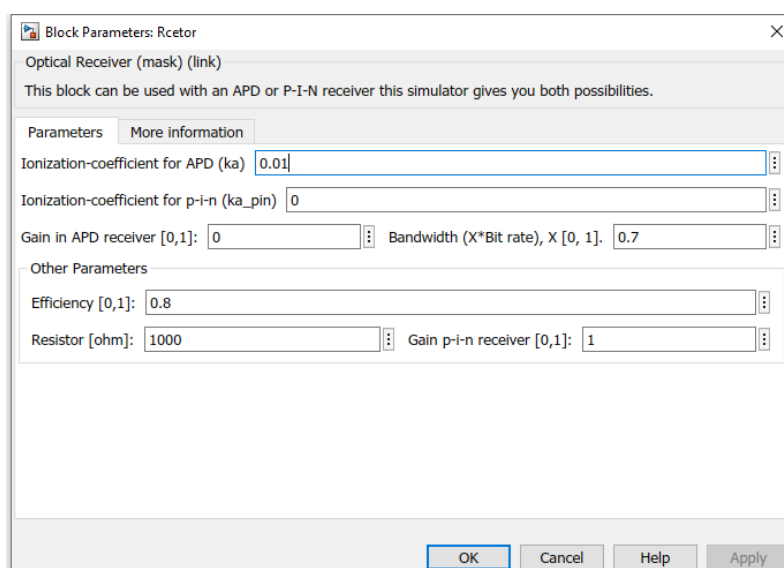


Figura 4.13 - Valores de parametrização do recetor ótico.

Nesta dissertação foi feita uma análise ao comportamento da ligação ótica, através da variação do parâmetro Chirp consoante o tipo de modulação utilizado, direta ou externa. Foram efetuadas duas simulações, sendo que na primeira usou-se uma modulação direta, ou seja, assumiu-se o valor padrão do parâmetro *chirp* como 6 ($\alpha_c=6$). Na segunda simulação usou-se uma modulação externa, ou seja, o parâmetro chirp foi definido como 0 ($\alpha_c=0$).

As próximas figuras representam a potência antes da amplificação e a potência depois da amplificação no primeiro troço e no último troço. Na primeira simulação, simularam-se 20 canais com comprimentos de onda entre os intervalos [1531; 1550] [nm]. Os resultados são apresentados nas figuras 4.14 a 4.17. De acordo com as figuras anteriores conclui-se que:

- O sinal ótico originado no emissor com 0 dBm propaga-se pelo primeiro troço de fibra sofrendo perda de potência, devido à atenuação que depende do comprimento da fibra. A figura 4.13 mostra o valor dessa potência;
- O ganho do amplificador é aproximadamente igual à atenuação da fibra, tornando o sinal ótico depois de amplificado próximo de 0 dBm. Porém, quando se inicia o segundo troço de fibra, o sinal ótico sofre nova perda de potência, devido à atenuação que depende do comprimento da fibra. Esta sequência de ligações acontece até ao sétimo troço. A figura 4.14 mostra o valor da potência no sétimo troço;
- Os valores das potências antes da amplificação nos vários troços da ligação são semelhantes porque quando sofrem perda de potência, devido à atenuação que depende do comprimento da fibra, o amplificador consegue compensar essa perda com ganho aproximadamente igual à atenuação da fibra e não entra na zona de saturação.

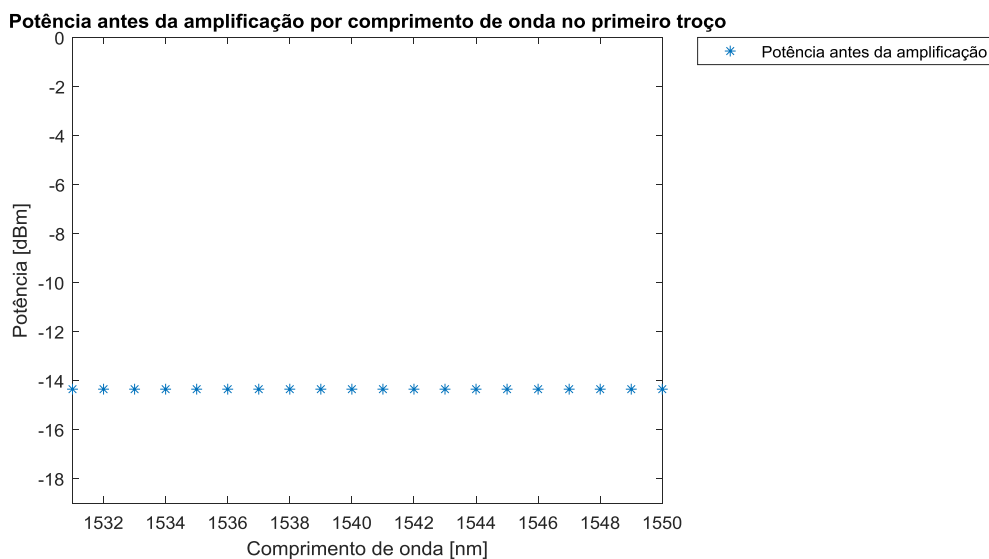


Figura 4.14 – Potência antes da amplificação no 1.º troço.

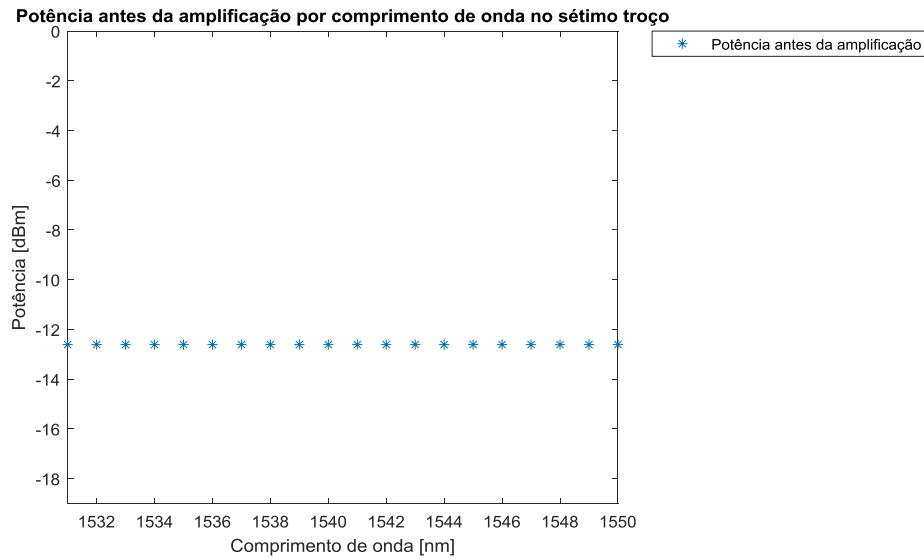


Figura 4.15 – Potência da fibra antes da amplificação no 7º troço.

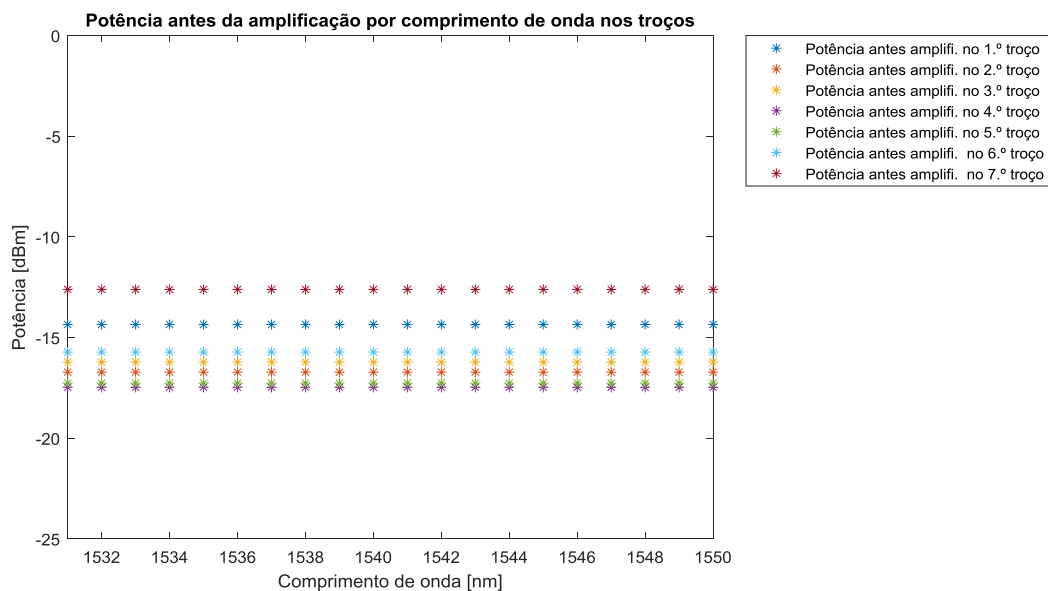


Figura 4.16 – Potência antes da amplificação do 1º troço ao 7º troço.

Em relação à potência depois da amplificação, de acordo com a figura 4.17 conclui-se o seguinte:

- Os valores das potências depois da amplificação em cada troço são semelhantes e aproximadamente iguais ao valor do sinal ótico originado no emissor (0 dBm);
- O valor da potência depois da amplificação em cada troço é resultante da aplicação do ganho do amplificador para compensar a perda de potência, devido à atenuação que depende do comprimento da fibra. Como o amplificador nunca entra na zona de saturação, então os valores são semelhantes em cada troço;

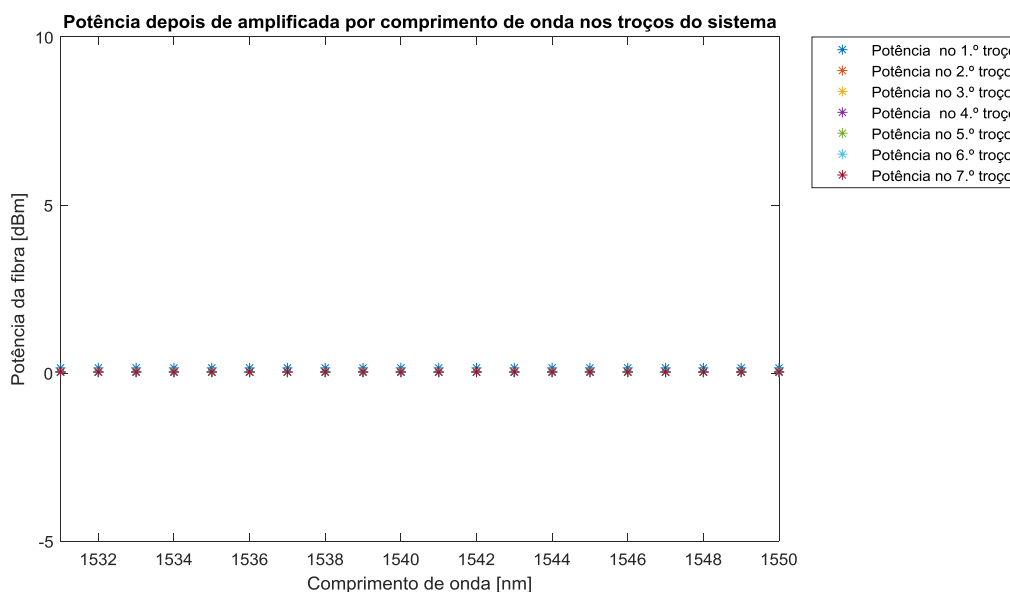


Figura 4.17 – Potência da fibra depois da amplificação do 1º troço ao 7º troço

Depois de serem apresentados os gráficos da potência antes da amplificação e da potência depois da amplificação, a seguir serão feitas análises e observações sobre os resultados obtidos pelo simulador. De acordo com os resultados do simulador apresentados na figura 4.18 constata-se que a penalidade de potência associada à dispersão é maior que 2dB. Assim, a ligação fica limitada por dispersão e conseqüentemente a ligação não é viável.

A penalidade de potência associada à dispersão pode existir devido a:

- Largura espectral da fonte ótica – $\Delta\lambda_L$;
- Largura de banda do sinal modulado – $\Delta\lambda_M$.

A ligação por intermédio da modulação direta está limitada por dispersão, atendendo que os valores da penalidade são superiores a 2dB de acordo com a figura 4.18. Atendendo que a largura espectral da fonte ótica é de 0,0125 GHz e a largura espectral do sinal modulado é de 10 GHz, a distância máxima que limita a dispersão para o caso do parâmetro de dispersão positiva e $\alpha_c=6$ é dada pela seguinte inequação [6]:

$$\frac{Rb^2 DL\lambda_0^2}{2\pi c} \leq 0.0121 \quad (4.3)$$

Em que:

- Rb - Débito binário;
- D – parâmetro de dispersão;
- L – Comprimento da ligação;
- λ_0 – Comprimento de onda;
- c – Velocidade da luz.

Substituindo os valores para determinar a distância máxima, então teremos o seguinte:

$$L < \frac{0.0121 \times 2\pi c}{Rb^2 D \lambda_0^2}$$

$$L < \frac{0.0121 \times 2\pi \times 3 \times 10^8}{(10 \times 10^9)^2 \times 15.33 \times 10^{-6} \times (1550 \times 10^{-9})^2}$$

$$L < 61.92 \text{ km}$$

Como a distância não deve ser superior a 61.92 km, então comprova-se o resultado dado pelo simulador que está na figura 4.18. A penalidade de potência associada à dispersão é superior a 2 dB. Assim, para os comprimentos apresentados nesta ligação haverá perda de sinal.

Transmitter:		
Channel 1:		
Transmitted power:0.000 [dBm]	Bit rate:10.000 [Gbit/s]	Wavelength:1550 [nm]
Extinction Ratio: 10 [dB]	Linewidth:1.0 [GHz]	Chirp Parameter:6.00
Q Parameter:7.03 , from BER: 1.00*(10^-12)		

SMF Fibre:	Lenght:56.900 [km]	
	Attenuation of Connectors:1.000 [dB]	Attenuation of Splices:2.000 [dB]
	Number of Connectors:2.000 [dB]	Number of Splices:0.000 [dB]
Channel 1:		
	Attenuation per km:0.217 [dB/km]	Dispersion:15.330*10^-6 [ps km nm]
	Penaltie due to Pulse Broadening:0.03 [dB]	Penaltie due to Mode-Partition Noise:0.00 [dB]
	Penaltie due to Frequency Chirping:4.27 [dB]	Power at the end of the Fibre:-14.35 [dBm]

Amplifier:	Gain 14.50 [dB]	Noise Figure: 6.00
Channel 1:	Power after Amplification:0.153 [dBm]	

Figura 4.18 – Resultados das penalidades apresentadas pelo simulador nos dois últimos troços da ligação ótica

Na segunda simulação usou-se uma modulação externa, ou seja, o parâmetro chirp foi definido como 0 ($\alpha_c=0$). No que diz respeito à potência, conclui-se que as potências são iguais em relação à modulação direta.

Na modulação externa, de acordo com os resultados do simulador, a penalidade de potência devido à dispersão é menor do que a modulação direta e inferior a 2 dB. Assim, a alteração do parâmetro *chirp* influencia a potência associada à transmissão devido à dispersão, melhorando o desempenho da ligação. A seguir, pretende-se provar que efetivamente a distância da ligação de Braga a Lisboa é

inferior à distância máxima que limita a dispersão para o caso da dispersão positiva e $\alpha_c=0$. A distância máxima é dada pela seguinte inequação [6]:

$$\frac{Rb^2DL\lambda_0^2}{2\pi c} \leq 0.154 \quad (4.4)$$

Substituindo os valores para determinar a distância máxima, então teremos o seguinte:

$$L < \frac{0.154 \times 2\pi c}{Rb^2D \lambda_0^2}$$

$$L < \frac{0.154 \times 2\pi \times 3 \times 10^8}{(10 \times 10^9)^2 \times 15.33 \times 10^{-6} \times (1550 \times 10^{-9})^2}$$

$$L < 788.17 \text{ km}$$

Comprova-se que o resultado dado pelo simulador está coerente. A distância de Braga a Lisboa é inferior à distância máxima que limita a dispersão.

Depois de ser verificado e garantido os limites da penalidade de potência e comprovado as distâncias associadas, na etapa a seguir, terá de ser confirmado as perdas de potência por atenuação.

Sabendo de antemão o valor do BER, o fator Q que é um parâmetro definido para contabilizar a probabilidade de erro do sistema à entrada do recetor ótico é obtido a partir da análise à figura 4.19

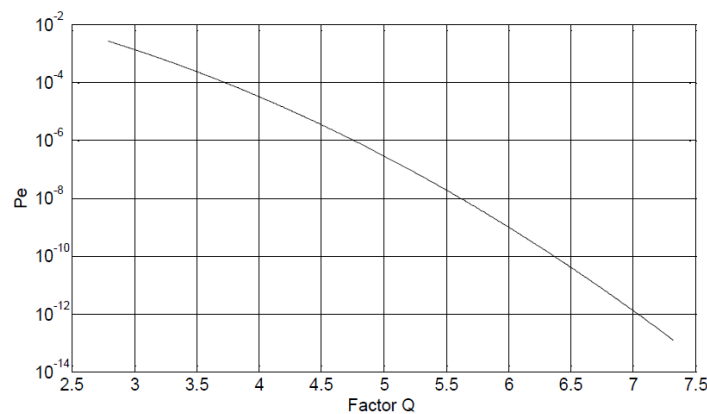


Figura 4.19 – Variação da probabilidade de erro com o fator Q

Assim, ao assumir-se que a probabilidade de erro é de 10^{-12} , então de acordo com a figura 4.18 o fator Q é de 7,03.

Para o cálculo do $OSNR_{Real}$ considerou-se a potência emitida de 0 dBm e os valores apresentados na tabela 4.3, ou seja, os ganhos dos amplificadores, a potência antes da amplificação e a potência depois da amplificação em cada troço.

Tabela 4.3 – Resumo dos valores inseridos e obtidos pelo simulador para o cálculo do OSNR

Troço	G [dB]	FN [dB]	Pot. antes ampli. [dBm]	Pot. depois ampli. [dBm]	P noise [dBm]
Braga-Campanhã	14,5	6	-14,35	0,153	-33,4976
Campanhã-Aveiro	16,75	6	-16,72	0,029	-29,2556
Aveiro -Coimbra	16,25	6	-16,22	0,033	-27,3391
Coimbra-Vermoil	17,50	6	-17,47	0,030	-25,6414
Vermoil-Entronc.	17,29	6	-17,26	0,030	-24,4752
Entronc. Setil	15,75	6	-15,72	0,030	-23,8163
Setil-Oriente	12,64	6	-12,64	0,030	-23,5353

A partir da equação (4.1) e dos valores apresentados na tabela 4.3 é possível calcular o $OSNR_{Real}$. O resultado do $OSNR_{Real}$ é de 45,03 dB.

O valor do parâmetro $OSNR_{Ideal}$ é obtido a partir da equação (4.2) substituindo pelos valores da tabela 4.3

O resultado da equação (4.4) dá 4.95 dB. Tal como foi referido anteriormente, por se tratar de uma cadeia de amplificadores, é possível calcular a margem de segurança da ligação após o conhecimento dos valores do $OSNR_{Real}$, do $OSNR_{Ideal}$ e assumindo que as penalidades são no máximo 2 dB. Desta forma, a partir da expressão de (4.1) e efetuar a substituição de valores conclui-se que a margem de ligação é superior a 6 dB. Assim, a ligação ótica Braga-Lisboa utilizando modulação externa não é limitada pela atenuação nem pela dispersão.

4.5 Conclusão

Neste capítulo, foi demonstrado o potencial do simulador desenvolvido para o planeamento de projetos de uma ligação por fibra ótica. A maioria dos dados inseridos foram adaptados para a ligação por fibra ótica que atualmente está implementada entre Braga e Lisboa, ou seja, foram considerados valores que são usados tipicamente no sistema de telecomunicações de forma a cumprir os requisitos ITU-T. Conforme demonstrado neste capítulo, a ferramenta desenvolvida fornece ao utilizador os dados suficientes para planear um projeto de uma ligação por fibra ótica.

Em suma, foi simulado uma ligação por fibra ótica usando a modulação direta e modulação externa de acordo com a figura 4.8. Pelos resultados obtidos na simulação constata-se que existem diferenças e estão coerentes com os resultados teóricos. Na modulação externa conclui-se que:

- Penalidade de potência será menor do que com a modulação direta;
- Permite alcançar maiores distâncias até que a ligação esteja limitada por dispersão ou atenuação.

No que diz respeito às potências da fibra antes e depois de amplificação, como era expectável, os valores mantêm-se inalteráveis tanto para a modulação direta e para a modulação externa.

Através dos cálculos teóricos, confirmou-se o resultado dado pelo simulador para a modulação direta e para a modulação externa.

Na modulação direta, nos cálculos teóricos realizados, confirma-se que a ligação está limitada por dispersão a partir dos 91 km. Como a distância da ligação Braga – Lisboa é superior a 91 km, então as penalidades da ligação dadas pelo simulador foram superiores a 2 dB.

Na modulação externa, nos cálculos teóricos realizados constata-se que a ligação está limitada por dispersão a partir dos 788 km. Como a distância da ligação Braga – Lisboa é inferior a esse valor, então a penalidade de potência dada pelo simulador foi inferior a 2 dB.

Conclusão e trabalhos futuros

5.1 Principais conclusões

O trabalho desenvolvido e apresentado nesta dissertação permitiu cumprir o objetivo principal inicialmente proposto, que era o desenvolvimento de um simulador capaz de realizar o projeto de ligações óticas ponto a ponto. Além disso, atinge um outro objetivo que era fornecer uma ferramenta de desenvolvimento gratuita através do *Simulink* do MATLAB.

O simulador desenvolvido possui uma interface muito simples, podendo o utilizador construir um projeto de ligação ótico com os blocos que foram implementados através da biblioteca do *Simulink* do MATLAB. Por meio de um duplo clique sobre os blocos, consegue-se configurar os equipamentos de uma forma bastante simples. Após correr a simulação, pode-se aceder novamente aos parâmetros dos equipamentos e alterar em caso de uma necessidade de ajuste.

O simulador foi testado tendo em conta os conceitos teóricos. Nos resultados obtidos neste simulador, através da análise de gráficos, constatou-se que a potência após amplificação é semelhante à potência transmitida emissor, 0 [dBm]. Este resultado deve-se ao ajuste do ganho dos amplificadores.

Nesta dissertação foi simulado uma ligação por fibra ótica através da modulação direta e modulação externa. Nos resultados obtidos, o simulador forneceu uma explicação clara na comparação entre modulação direta e externa. Na modulação externa a penalidade de potência é menor do que com a modulação direta. Consequentemente faz com que a ligação se mantenha com a qualidade pretendida mesmo quando existem flutuações indesejáveis com o tempo.

Em suma, o simulador fornece a capacidade de desenvolver projetos uma ligação por fibra ótica. O uso do *Simulink* simplifica a sua construção, pois devido à interface gráfica é possível mover cada bloco e adicioná-lo ao sistema. O simulador também oferece a capacidade de entender e comparar seus resultados devido a uma fácil configuração dos equipamentos. Após realizar a simulação, os parâmetros dos sinais podem ser acessados e posteriormente alterados, permitindo verificar qual é o seu comportamento da ligação.

5.2 Trabalhos futuros

Após o desenvolvimento deste *software*, existem sugestões de melhorias interessantes e que devem ser levadas em consideração no futuro. Essas sugestões visam aumentar a robustez deste programa e introduzir novos recursos na ferramenta. As alterações a realizar são as seguintes:

- Desenvolvimento de uma interface que mostre um estudo económico da relação entre custos e lucros;
- Melhoria da interface gráfica;
- Corrigir possíveis erros detetados pelos utilizadores.

É de referir que os efeitos não lineares que podem ocorrer num sistema de fibra ótica não foram implementados no simulador. Existem efeitos não lineares, como por exemplo, o FWM que é excessivamente complexo na sua implementação para uma simulação da comunicação ao nível do sinal. Desta forma, um dos trabalhos futuros a considerar seria a inclusão dos efeitos não lineares.

Referências

- [1] Mathworks.com, "OptiSystem - Optical communication system design software - Third-Party Products & Services," MATLAB & Simulink, 2015. [Online]. Available: http://www.mathworks.com/products/connections/product_detail/product_35663.html. [Acedido em 25 04 2019].
- [2] Synopsys, "Receiver Sensitivity," Synopsys, [Online]. Available: <https://optics.synopsys.com/rsoft/application-gallery/optsim-receiver-sensitivity.html>. [Acedido em 26 04 2019].
- [3] N. R. R. e. K. N. Sivarajan, "A Practical Persperctive," em Second Edition,, 2014.
- [4] U. J. Dreyer, "http://paginapessoal.utfpr.edu.br/uiliandreyer," [Online]. Available: <http://paginapessoal.utfpr.edu.br/uiliandreyer/instalacoes-eletricas-prediais-1/projeto-de-telecomunicacoes/Aula%20-%20Projeto%20Telecomunicacao%20Fibra%20otica.pdf/view>. [Acedido em 04 02 2021].
- [5] "HSTN," [Online]. Available: <https://www.hstn.co.th/en/content/9775/fiber-optic-link-components->. [Acedido em 25 Abril 2019].
- [6] " The Fiber Optic Association, Inc.," The Fiber Optic Association, Inc., [Online]. Available: https://www.thefoa.org/PORT/Chapter%205_PT.html. [Acedido em 8 5 2021].
- [7] F. S. Moreira. [Online]. Available: http://www.ipb.pt/~fmoreira/Ensino/Ondas/Ondas_04_05_cap5.pdf. [Acedido em 24 03 2019].
- [8] I. T. Union, "ITU-T G.692". 23 10 1998.
- [9] I. T. Union, "ITU- T G.652". 11 2016.
- [10] I. A. M. Gil, "Dissertação de Sistema de comunicações óticas baseadas em modulação de intensidade em fibras óticas de plástico," IST, 2018.
- [11] P. Pinho, "Apontamentos de Sistemas Comunicações Ótico, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa," 2016.
- [12] A. Costa, "Comunicações Óticas," FEUP, Porto, 2009.
- [13] J. Rebola, *Acetatos2 SRCO (Transparências teóricas de aulas)*, Lisboa.
- [14] G. P. AGRAWAL, Fiber-Optic Communication Systems, 3rd Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2002.

- [15] R. Ramaswami e K. N. Sivarajan, *Optical Networks*, 3ª Edição, Elsevier, 2010.
- [16] M. F. S. Ferreira, *Nonlinear Effects in Optical Fibers*, John Wiley & Sons, 2011.
- [17] G. Keiser, *Optical Fiber Communications*, 2ª Edição, Lisboa: McGraw-Hill Series in Electrical Engineering, 1991.
- [18] I. T. Union, "ITU- T G.655". 2009.
- [19] I. T. Union, "ITU-T Rec. G.957". 29 03 2006.
- [20] R. S. K. a. S. G. Ramaswami, *Optical Networks: A Practical Perspective*, 3rd Edition., Morgan Kaufmann, 2009.
- [21] N. Cota, *Cap5 – "Transmissão Digital". Apontamentos de Sistemas de Telecomunicações*, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2015/2016.
- [22] T. Walker, "Optical Transport Network (OTN) Tutorial", ITU.
- [23] A. Cartaxo, *Sistemas de Telecomunicações por fibra óptica - Apontamentos*, Lisboa: AEIST, 2005.