

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

AQUILES MACEDO DIAS

PROJETO DE DIPLOMAÇÃO

**ANÁLISE DE PROJETOS DE REDES METROPOLITANAS
WDM**

Porto Alegre

2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**ANÁLISE DE PROJETOS DE REDES METROPOLITANAS
WDM**

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Álvaro Augusto de Almeida Salles

Porto Alegre

2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

AQUILES MACEDO DIAS

ANÁLISE DE PROJETOS DE REDES METROPOLITANAS WDM

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Álvaro Augusto de Almeida Salles, UFRGS

Formação (Instituição onde obteve o título – Cidade, País)

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Álvaro Augusto de Almeida Salles, UFRGS
Doutor pela University of London – Londres, Inglaterra)

Prof Dr. Tristão Garcia, UFRGS
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Eng. Bernardo Schaeffer, Digital S.A.
Engenheiro pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre,

Brasil

Porto Alegre, agosto de 2009.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, em especial pela dedicação e apoio em todos os momentos difíceis, aos meus amigos, meus familiares e todos aqueles que estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Aos pais agradeço pela paciência e dedicação ao longo de todos esses anos.

À minha namorada Luciana Breier pela ajuda em todas as tarefas nas quais precisei auxílio.

Ao Bernardo Schaeffer pelo seu auxílio nas tarefas desenvolvidas durante o curso e apoio na revisão deste trabalho.

À empresa Digital por me ceder toda infra-estrutura e conhecimento necessário durante minha formação.

A meu orientador que aceitou fazer parte de mais um desafio na minha vida.

À Universidade, professores, funcionários,

RESUMO

Este Projeto de Diplomação tem o objetivo de analisar projetos de redes ópticas, em especial as que utilizam a tecnologia de multiplexação por comprimento de onda, WDM, e a importância dessas no mercado nos dias de hoje. Além disso, será feito um estudo das variáveis que devem ser consideradas nesse tipo de enlace óptico, bem como suas implicações na rede. Alguns projetos de redes WDM para grandes centros da empresa de telecomunicações OI serão implementados.

Palavras-chaves: Engenharia Elétrica. Comunicações Ópticas. Fibra Óptica. WDM. Redes Ópticas.

ABSTRACT

This document aims to analyze projects of optical networks, in special that ones which use the wavelength division multiplexing technology, WDM, and its market importance nowadays. Besides, it will be made a study of some variable that affect the projects of a WDM network structures. Some WDM projects for big centers of OI telecommunication company and Costatel Telecom are going to be implemented.

Keywords: Electrical Engineering. Optical Communication. Optical Fiber. WDM. Optical Networks.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. TECNOLOGIA WDM NAS TELECOMUNICAÇÕES	15
3. ANÁLISE DA TECNOLOGIA WDM	17
3.1. COMUNICAÇÃO ÓPTICA	17
3.2. FIBRA ÓPTICA.....	18
3.2.1. EFEITOS NA FIBRA ÓPTICA.....	20
3.2.1.1. ABSORÇÃO DO MATERIAL	20
3.2.2.2. ESPALHAMENTO DE RAYLEIGH.....	21
3.2.2.3. PERDAS POR CURVATURAS	22
3.3. FREQUÊNCIAS UTILIZADAS EM COMUNICAÇÕES ÓPTICAS.....	24
3.4. TECNOLOGIA WDM.....	25
3.5. MÓDULOS UTILIZADOS NA TECNOLOGIA WDM	30
3.5.1. MULTIPLEXADOR E DEMULTIPLEXADOR ÓPTICO	30
3.5.2. OSC (Optical service channel)	32
3.5.3. OADM (OPTICAL ADD AND DROP MULTIPLEXER)	34
3.5.4. TRANSCEIVERS ÓPTICOS	35
3.5.5. TRANSPONDER	38
3.5.6 AMPLIFICADORES	39
3.5.7. MÓDULO DE GERÊNCIA	43
3.6 PERDAS EM REDES WDM.....	45
3.6.1 ATENUAÇÃO.....	45
3.6.2. DISPERSÃO CROMÁTICA	46
3.6.3 PMD.....	49
3.7 ANÁLISE DE ERROS.....	52
3.8 TIPOS DE REDES WDM.....	54
3.8.1 REDES DE LONGA DISTÂNCIA.....	54
3.8.2 REDES METROPOLITANAS.....	55
3.8.2.1 SISTEMAS METROPOLITANOS DE GRANDE PORTE.....	57
3.8.2.2. SISTEMAS METROPOLITANOS DE MÉDIO E PEQUENO PORTE.....	58
3.8.3 REDES DE ACESSO	59
4. PROJETO DE UM SISTEMA WDM	60
4.1. PROJETO DE REDE CWDM	61
4.1.1. TIPO DE TECNOLOGIA	62
4.1.2. EFEITOS NA FIBRA.....	63
4.1.2.1. CÁLCULO DE ATENUAÇÃO NA FIBRA	63
4.1.2.2. CÁLCULO DA DISPERSÃO CROMÁTICA	63
4.1.3. ANÁLISE DE POTÊNCIAS NO ENLACE	64
4.1.4 SIMULANDO O ENLACE.....	65
4.1.4.A. ENSAIO PARA 12 km DE FIBRA	67
4.1.4.B. ENSAIO PARA 40 km DE FIBRA	68
4.1.4.C. ENSAIO PARA 60 km DE FIBRA	69
4.1.4.D. ENSAIO PARA 80 km DE FIBRA	70
4.2. SIMULAÇÃO DE REDE DWDM.....	71
4.2.1. TIPO DE TECNOLOGIA	72
4.2.2 EFEITOS NA FIBRA	72
4.2.2.2. CÁLCULO DA DISPERSÃO CROMÁTICA	73
4.2.3. ANÁLISE DE POTÊNCIAS NO ENLACE	73
4.2.4. ESCOLHA DO AMPLIFICADOR	75

4.2.5. SIMULANDO O ENLACE.....	76
4.2.5.A Ensaio para 100 km de fibra:	79
5. RESULTADOS ALCANÇADOS	80
6. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES	81
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	82
8. ANEXOS	82

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1 – Estrutura da Fibra Óptica.....	18
Figura 3.2 – Propagação do Sinal nas Fibras	19
Figura 3.3 – Atenuação devido ao Espalhamento de Rayleigh.....	22
Figura 3.4 – Perda por curvatura	22
Figura 3.5 – Perda por Microcurvaturas	23
Figura 3.6 – Perda por Pressão.....	24
Figura 3.7 – Faixa de Frequências em Comunicações Ópticas.....	25
Figura 3.8 – Princípio de Multiplexação WDM.....	26
Figura 3.9 – Princípio de um Sistema WDM.....	26
Figura 3.10 – Canalização CWDM e DWDM.....	27
Figura 3.11 – Tipos de Fibras e Janelas de Comunicação WDM.....	29
Figura 3.12 – Saída de um Multiplexador Óptico	31
Figura 3.13 – Multiplexador Óptico DWDM de 8 Canais.....	32
Figura 3.14 – OSC (Optical Service Channel).....	33
Figura 3.15 – OADM (Optical Add and Drop Multiplexer).....	34
Figura 3.16 – <i>Transceiver</i> SFP “Sem Cor”	35
Figura 3.17 – <i>Transceivers</i> SFP Coloridos	36
Figura 3.18 – <i>Transceiver</i> XFP	37
Figura 3.19 – Transponder CWDM.....	38
Figura 3.20 – Característica Potência de Saída x Ganho EDFA	41
Figura 3.21 – Posição de Amplificador <i>Booster</i> no Sistema.....	41
Figura 3.22 – Posição da Fibra Dopada no Amplificador <i>Booster</i>	42
Figura 3.23 - Posição de Amplificador de Linha no Sistema.....	42
Figura 3.24 – Posição da Fibra Dopada no Amplificador de Linha	42
Figura 3.25 - Posição do Pré-Amplificador no Sistema	43
Figura 3.26 – Posição da Fibra Dopada no Pré-Amplificador	43
Figura 3.27 – Módulo de Gerência WDM	44
Figura 3.28 – Perdas na Fibra Óptica.....	46
Figura 3.29 – Dispersão Cromática para Diferentes Tipos de Fibra	48
Figura 3.30 – Sinal sem Dispersão na Fibra Óptica	49
Figura 3.31 – Sinal Após Efeito de Dispersão Cromática	49
Figura 3.32 – Influência do PMD no Sinal Óptico.....	50
Figura 3.33 – Efeito do PMD no Sinal Óptico	51
Figura 3.34 – Diagrama de Análise de Olho.....	53
Figura 3.35 – Rede de Longa Distância WDM	54
Figura 3.36 – Rede Metropolitana WDM	55
Figura 3.37 – Rede de Acesso WDM	59
Figura 4.1 – Enlace Solicitado pela Empresa OI.....	61
Figura 4.2 – Sistema CWDM Simulado	65
Figura 4.3 – Espectro de Frequência na Saída do Multiplexador.....	66
Figura 4.4 – Resultado da Simulação para 12 km	67
Figura 4.5 – Resultado da Simulação para 40 km	68
Figura 4.6 – Resultado da Simulação para 60 km	69
Figura 4.7 – Resultado da Simulação para 80 km	70
Figura 4.8 – Enlace Solicitado pela Empresa Costatel	71
Figura 4.9 – Simulação para 100 km	77
Figura 4.10 – Espectro de Frequência na Saída do Multiplexador.....	78
Figura 4.11 – Resultado da Simulação para 100 km	79

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - ESTRUTURA DE TÓPICOS.....	14
TABELA 2 - CARACTERÍSTICAS FORNECIDAS PELA EMPRESA OI	63
TABELA 3 - POTÊNCIA NO SISTEMA ÓPTICO SIMULADO.....	65
TABELA 4 - CARACTERÍSTICAS FORNECIDAS PELA EMPRESA COSTATEL..	72
TABELA 5 - POTÊNCIA NO SISTEMA ÓPTICO SIMULADO.....	75

LISTA DE ABREVIATURAS

WDM: Wavelength Division Multiplexing

CWDM: Course Wavelength Division Multiplexing

DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing

PMD: Polarization Mode Dispersion

TDM: Time Division Multiplexing

OC: Optical Carrier

ATM: Asynchronous Transfer Mode

IP: Internet Protocol

SDH: Synchronous Digital Hierarchy

OTDR: Optical Time-Domain *Reflectometer*

OSA: Optical Spectrum Analyzer

GVD: Group Velocity Dispersion

EDFA: Erbium Doped Fiber Amplifier

SFP: Small Form-factor Pluggable Transceiver

NRZ: Non-Return to Zero

RZ: Return to Zero

OADM: Optical Add and Drop Multiplexing

OFA: Optical Fiber Amplifier

FWM: Four Wave Mixing

LAN: Local Area Network

GEth: Gigabit Ethernet

OSC: Optical Service Channel

1. INTRODUÇÃO

O avanço na tecnologia e serviços de comunicações criou uma crescente necessidade de aumento da banda. Há alguns anos, fazer o download de uma imagem através da internet, mesmo que levasse alguns minutos, era empolgante; hoje, dois ou três segundos se tornam um incômodo. Isso acaba por alimentar o aumento dos sistemas de telecomunicações, gerando um avanço cada vez maior da tecnologia, por meio de estudos e pesquisas.

Este projeto de diplomação tem por objetivo analisar uma tecnologia de comunicação óptica que vem sendo implantada muito recentemente, em comparação a outras tecnologias, conhecida como WDM (Wavelength Division Multiplexing), bem como estudar métodos de desenvolvimento de estruturas de redes em regiões metropolitanas que se utilizam dessa nova tecnologia. Serão estudados os módulos que compõem os equipamentos dessa tecnologia, suas estruturas de uma forma geral e seu funcionamento em termos de engenharia elétrica.

Trata-se de um documento que almeja apresentar os fundamentos da tecnologia das comunicações ópticas enfatizando WDM. Será demonstrada a importância cada vez maior desse tipo de comunicação na sociedade moderna e, conseqüentemente, no aprendizado por profissionais do ramo da Engenharia Elétrica que pretendem seguir futuramente no seguimento de telecomunicação.

Logo, este documento apresentará estruturas de redes WDM, embasadas nas utilizadas no Brasil pela empresa OI, e na Colômbia pela empresa Costatel, seus projetos e sua importância econômica para tais empresas. A Tabela 1 apresenta os capítulos que devem compor o documento final, entregue à banca de avaliação do projeto de diplomação.

Capítulo	Conteúdo
1.INTRODUÇÃO	Objetivos do documento, apresentação de assuntos relativos à tecnologia WDM, projetos desse tipo rede, importância do estudo e equipamentos utilizados.
2. TECNOLOGIA WDM NAS TELECOMUNICAÇÕES	Apresentação de uma tecnologia relativamente nova dentro da telecomunicação chamada WDM. São mostrados suas principais características e impulsionadores.
3. ANÁLISE DA TECNOLOGIA WDM	Análise teórica dos principais fenômenos em WDM, os quais auxiliam as previsões de desempenho e projeto dos módulos usados nesse.
4. PROJETO DE UM SISTEMA WDM	Apresentação de um sistema WDM usado em uma rede metropolitana. Projeto e simulações.
5. RESULTADOS ALCANÇADOS	Descrição dos testes e resultados alcançados.
6. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES	Alguns comentários e conclusões pertinentes aos resultados alcançados no projeto realizado.
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	Referência à bibliografia usada nesse Projeto de Diplomação.
8. ANEXOS	Documentos anexos.

Tabela 1 Estrutura de tópicos

2. TECNOLOGIA WDM NAS TELECOMUNICAÇÕES

O crescente aumento na taxa de transmissão de dados nos sistemas de telecomunicações fez surgir muitas tecnologias, as quais utilizam diferentes protocolos, meios físicos e estruturas de redes, entre outras características. No ano de 1970, foram publicados os primeiros estudos da tecnologia WDM, nos quais, com os equipamentos utilizados, foi possível o transporte de dois comprimentos de onda, um deles utilizando a segunda janela de propagação de comprimento de onda igual a 1310nm e a terceira janela de 1550nm, em uma mesma fibra óptica. Esses primeiros equipamentos funcionavam como misturador de dois sinais a serem transmitidos por um sistema ou divisor de dois sinais recebidos. Assim, surgiu princípio de WDM: transporte de mais de um comprimento de onda, em uma única fibra.

WDM foi vista desde o início como um importante avanço nas telecomunicações, pois ao invés da instalação de novas fibras para transportar os dados de novos equipamentos, o que gerava um gasto muito elevado, utilizava-se uma fibra já instalada para transporte de mais de um λ . Com o avanço da tecnologia das comunicações ópticas e a constante pesquisa sobre tais assuntos, o número de sinais ópticos possíveis de serem “misturados” ou “divididos”, ou seja, multiplexados em uma única fibra óptica em redes WDM, cresceu consideravelmente para até 160 λ (comprimentos de onda). Com esse crescimento no número de canais ópticos, a complexidade do projeto dessas redes ópticas aumentou. Assim, a importância dos efeitos causados por esse aumento, os quais serão estudados posteriormente, ganhou um papel importante para o projetista.

Logo, à medida que a necessidade por maior banda para comunicação aumenta novos equipamentos surgem no mercado, e novas possibilidades de estruturas são criadas, permitindo o transporte de muitos canais com taxas cada vez maiores, no mesmo par de fibras.

Uma infra-estrutura WDM é projetada para prover uma evolução de rede significativa para provedores de serviços que buscam atender as demandas de capacidade sempre crescentes de seus clientes. O potencial de fornecer capacidade aparentemente ilimitada de transmissão é obviamente uma das maiores vantagens dessa tecnologia. O WDM traz vantagens tanto no aspecto técnico quanto no aspecto econômico. É possível se fazer uma comparação na utilização da fibra feita pelos sistemas usuais de comunicações ópticas, que vão até 10 Gbps, como o STM-64, e a multiplexação por comprimento de onda. Enquanto no primeiro caso temos apenas um canal transportando 10 Gbps, no segundo temos N canais transportando até 40 Gbps, como nos equipamentos mais sofisticados da tecnologia. Ou seja, a banda usada é de $N \times 40$ Gbps. Para efeitos práticos, pode-se pensar em um sistema de 40 canais que utilize 40 Gbps para cada canal, assim teremos 40×40 Gbps, que resulta em 1.6 Tbps, mais de 100 vezes o que uma tecnologia TDM (Time Division Multiplexing) consegue alcançar.

Alguns analistas da indústria vêem o WDM como um ajuste perfeito para redes que satisfazem demandas para mais largura de banda. Redes baseadas em WDM são altamente flexíveis e modulares. Apesar do fato que um sistema que conecta com 8 ou 16 canais por fibra poder parecer suficiente agora, a flexibilidade desse equipamento será necessária para o sistema ser eficiente desse momento até daqui a dois anos.

A camada óptica provê os únicos meios para portadores integrarem as diversas tecnologias de suas redes existentes em uma infra-estrutura física. Sistemas WDM têm taxa-bit e formatos independentes, e podem aceitar qualquer combinação de taxas de interface (por exemplo, síncrono, assíncrono, OC-3, OC-12, OC-48, ou OC-192) na mesma fibra ao mesmo tempo. Se um portador opera ATM e redes SONET, o sinal do ATM não tem que ser multiplexado até a taxa SONET para ser levado na rede WDM. Como a camada óptica leva

sinais sem qualquer multiplexação adicional, os portadores podem introduzir ATM ou IP rapidamente sem acréscimos na rede. Um benefício importante de networking óptico.

O estudo de estruturas de redes WDM tem como premissa a apresentação de uma nova tecnologia, que vem sendo implantada em diversas redes metropolitanas espalhadas pelo Brasil e pelo mundo.

3. ANÁLISE DA TECNOLOGIA WDM

Antes de se analisar a tecnologia WDM, será feita uma breve explanação sobre a tecnologia de comunicação óptica, a fim de auxiliar no embasamento dos projetos que serão feitos ao final deste documento.

3.1. COMUNICAÇÃO ÓPTICA

O estudo de componentes ópticos exige o conhecimento duas disciplinas de física da luz e a física da matéria. Isso ajuda no entendimento de como funcionam os componentes ópticos e como é possível uma construção de sistemas e redes de comunicação ópticas mais eficientes e com menor custo.

O estudo da luz não é novo. Na antiguidade, a luz já intrigava muitas culturas e religiões, e pelo menos uma dessas cultuava a luz. Entretanto, alguns cientistas antigos se deram conta de que apesar da luz ter muitas particularidades inexplicáveis, como passar por cristais, isso não era obra divina.

Atualmente, muitos materiais foram desenvolvidos para fazer a comunicação óptica, porém a fibra de vidro foi escolhida para comunicações de alta velocidade, alta confiabilidade, longas distâncias terrestres e marítimas, devido às suas características.

Comumente, altas taxas, como por exemplo, 40 Gbps, podem ser transmitidas em uma única fibra de vidro [1].

3.2. FIBRA ÓPTICA

O estudo da fibra óptica é muito importante para o entendimento de como o sinal se propaga ao longo do enlace, e quais os efeitos que esse sofre durante seu percurso.

As fibras ópticas são fios muito longos e finos de vidro muito duro, com diâmetro aproximado de um fio de cabelo humano. Essas são dispostas em feixes chamados cabos ópticos e usadas para transmitir sinais de luz ao longo de grandes distâncias.

Essas fibras são protegidas pela cobertura externa do cabo.

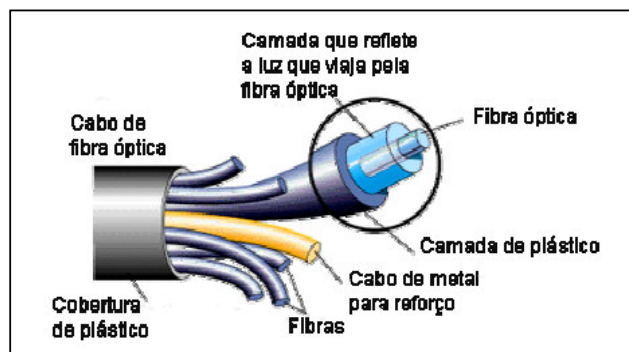


Figura 3.1 – Estrutura da Fibra Óptica

As fibras podem ser multimodo ou monomodo.

A fibra multimodo, como o próprio nome já diz, possui vários modos de propagação e de acordo com o perfil da variação de índices de refração da casca com relação ao núcleo, classificam-se em: **índice degrau** e **índice gradual**. O seu diâmetro é bastante elevado, entre 50 e 80 microns, fazendo com que o feixe luminoso sofra reflexões, limitando o alcance do

sinal a cerca de 2 km. Devido a isso as fibras ópticas multimodo são utilizadas em redes locais ou de campus. [8]

Já a fibra monomodo, que é de interesse para esse trabalho, possui dimensões muito pequenas, e uma capacidade de transmissão superior às fibras multimodo, o seu diâmetro de 10 microns, permite uma propagação da onda com menos reflexão. A distância é claramente mais elevada e a largura de banda disponibilizada limitada pelos equipamentos que compõe o sistema. As fibras monomodo são utilizadas, sobretudo nas redes de longa distância, isto é, nas redes metropolitanas do tipo GÉth, ou em redes principais (backbone) de tipo SDH ou WDM. [8]

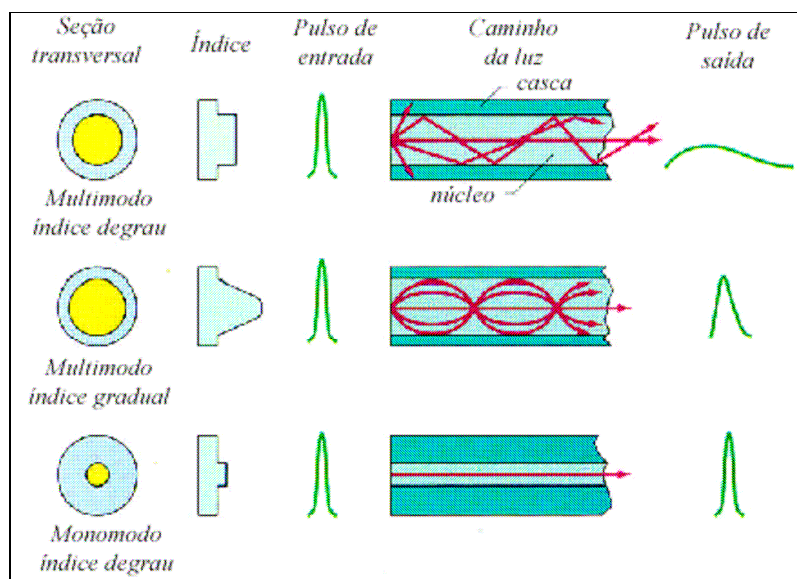


Figura 3.2 – Propagação do Sinal nas Fibras

A fibra óptica monomodo mais utilizada nas aplicações em geral é a Standard. Essa possui algumas características que são de fundamental importância para o projetista de uma rede WDM. As características principais das fibras ópticas podem ser vistas em anexo.

3.2.1. EFEITOS NA FIBRA ÓPTICA

Quando um sinal é propagado na fibra, esse sofre alguns efeitos, os quais fazem o sinal perder sua forma inicial ao longo do enlace. Esses efeitos serão descritos a seguir.

3.2.1.1. ABSORÇÃO DO MATERIAL

A absorção do material da fibra de sílica é o mecanismo de atenuação que exprime a dissipação de parte da energia do sinal em forma de calor. Esse efeito pode ser considerado devido a fatores **intrínsecos e extrínsecos** [5].

A absorção devido a **fatores intrínsecos** pode ser dividida em:

Absorção do ultravioleta: Resulta da interação do campo eletromagnético do sinal com a estrutura eletrônica da fibra; isso ocorre quando um fóton interage com um elétron na banda de valência, excitando-o para um nível de energia superior. Os íons de oxigênio são responsáveis por esta absorção, a qual cresce exponencialmente na direção do ultravioleta [5].

Absorção do infravermelho: Resulta da interação do campo com a estrutura atômica da fibra, transferindo energia do campo para as ligações químicas da estrutura. A vibração e rotação dos átomos do vidro em torno de sua posição de equilíbrio são responsáveis por essa absorção, a qual cresce exponencialmente em direção do infravermelho [5].

Este tipo de absorção é menos significativo do que a extrínseca. Para uma fibra de sílica pura (sem impurezas), existe uma janela de baixa atenuação entre 800 nm e 1600 nm. Por essa razão, as fibras são fabricadas de sílica pura e nessa janela.

Absorção devido a **fatores extrínsecos** [5]:

A absorção extrínseca é causada pela contaminação do material da fibra por impurezas no momento da fabricação. Essas impurezas são essencialmente metais de transição (ferro,

cromo, cobalto, níquel, etc), variando sua concentração de 1 a 10 partes por 10^9 átomos, provocando perdas entre 1 e 10 dB/km. Melhores técnicas fabris conduziram a níveis de concentração aceitáveis [5].

Uma segunda causa de absorção extrínseca é a presença do íon OH^- (oxidrila dissolvida no vidro), cuja vibração fundamental na sílica ocorre em 2730nm, com harmônicos em 950nm, 1240nm e 1380nm. As janelas de baixa atenuação ocorrem em 800nm, 1300nm e 1550nm. Concentrações de poucas partes por 10^9 são suficientes para se obter valores de atenuação de aproximadamente 20dB/km [5].

3.2.2.2. ESPALHAMENTO DE RAYLEIGH

Espalhamento é um processo pelo qual toda ou parte da potência óptica num modo é transferida para outro modo. Provoca, freqüentemente, atenuação, porque a transferência é muitas vezes para um modo cuja propagação no núcleo é deficiente – os designados modos radioativos (ou “*leak modes*”). O Espalhamento Rayleigh, é fortemente dependente do comprimento de onda do sinal propagante e ocorre devido à variação na densidade do material (ou do índice de refração) que compõe a fibra. Portanto, as imperfeições na fabricação da fibra, como por exemplo, pequenas variações do raio do núcleo ao longo de grandes extensões de fibra são fontes de atenuação do sinal.

A atenuação que esse espalhamento propicia é proporcional a $1/(\lambda^4)$ e o gráfico abaixo mostra seu comportamento em relação ao comprimento de onda. A equação para essa perda é [2]:

$$\alpha_R = C / \lambda^4 \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Onde C está entre 0,7-0,9 (dB/km)- μm^4 , dependendo dos constituintes da fibra.

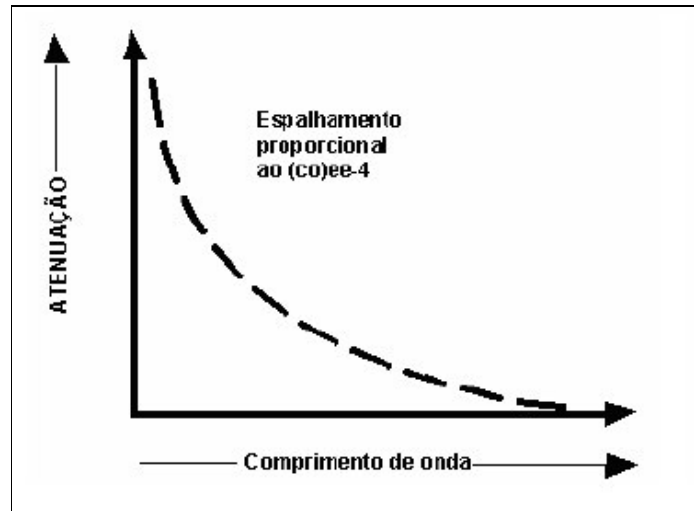


Figura 3.3 – Atenuação devido ao Espalhamento de Rayleigh

3.2.2.3. PERDAS POR CURVATURAS

Sempre que ocorre uma curvatura na fibra, temos uma atenuação do sinal devido a perdas radiativas que isso acarreta. As fibras estão sujeitas a dois tipos de curvatura:

Curvaturas macroscópicas: onde raio de curvatura é grande comparado ao diâmetro da fibra. Um exemplo seria quando uma fibra instalada tem de passar por uma esquina.

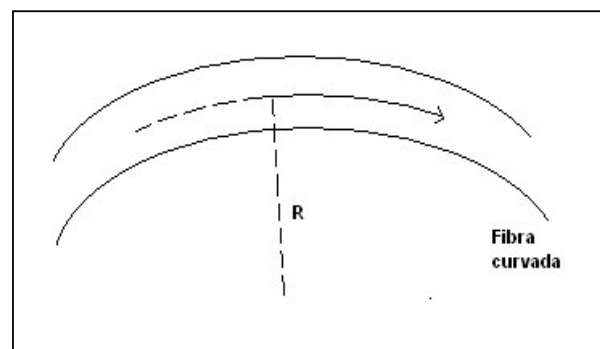


Figura 3.4 – Perda por curvatura

À medida que o raio de curvatura R decresce, as perdas aumentam exponencialmente até que um ponto, denominado de raio de curvatura crítico R_c , é atingido. Se esse limiar é ultrapassado, as perdas tornam-se muito grandes.

Matematicamente, esta perda pode ser expressa por [5]:

$$\alpha = c1 \exp(-c2R) \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Para uma fibra monomodo, o raio de curvatura crítico pode ser calculado com [5]:

$$R_c \cong \frac{20\lambda}{\sqrt{n_1 - n_2}} \left(2,748 - 0,996 \frac{\lambda}{\lambda_c} \right) \quad (\text{Eq. 3.3})$$

onde λ_c é o comprimento de onda de corte da fibra monomodo.

Uma maneira de evitar essa atenuação é não curvar a fibra até o seu R_c . Assim, deve-se tomar um cuidado especial no momento da instalação. Para isso, profissionais especializados devem ser utilizados na mão-de-obra.

Curvaturas microscópicas: ocorre quando a fibra é submetida a pressões transversais, de maneira a comprimi-la contra uma superfície rugosa. Essas microcurvaturas removem energia luminosa do núcleo, devido aos modos de elevada ordem tornarem-se não guiados [5].

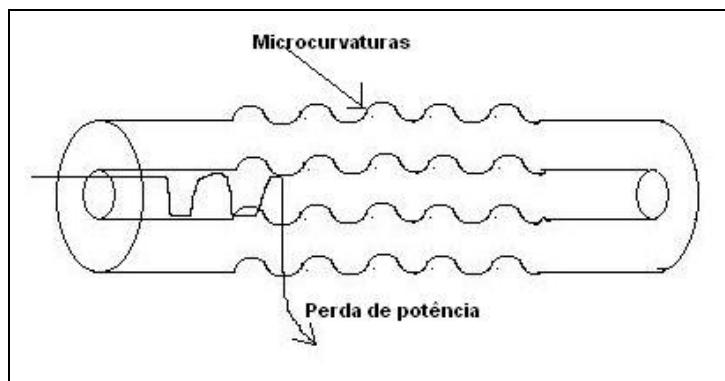


Figura 3.5 – Perda por Microcurvaturas

Esse tipo de curvatura pode ocorrer devido a não uniformidade no momento da fabricação, ou até por pressões laterais não uniformes durante a fabricação.

Uma maneira de minimizar esse efeito é usar uma camada protetora ao redor da fibra. Assim, quando uma força agir sobre a fibra, essa será atenuada por essa camada de proteção.

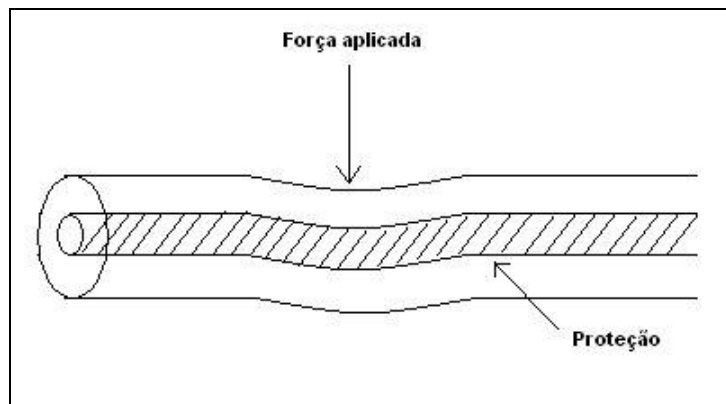


Figura 3.6 – Perda por Pressão

3.3. FREQUÊNCIAS UTILIZADAS EM COMUNICAÇÕES ÓPTICAS

O espectro óptico inclui frequências entre 3×10^{11} Hz e 3×10^{16} Hz, correspondendo ao extremo inferior da faixa infravermelho e o limite superior da faixa ultravioleta. As frequências que interessam para comunicações ópticas estão na faixa do infravermelho, entre $1,5 \times 10^{14}$ Hz, e 4×10^{14} Hz, aproximadamente [5].

Usualmente, para comunicações ópticas, em lugar das frequências ópticas expressam-se os correspondentes comprimentos de onda, o valor calculado de comprimento de onda está entre $0,8 \mu\text{m}$ e $1,6 \mu\text{m}$, aproximadamente no meio da faixa conhecida como infravermelho próximo. Ou melhor, 850 nm até 1611 nm , como usado na prática.

Os comprimentos de onda usados para comunicações ópticas podem ser vistos na figura 3.7.

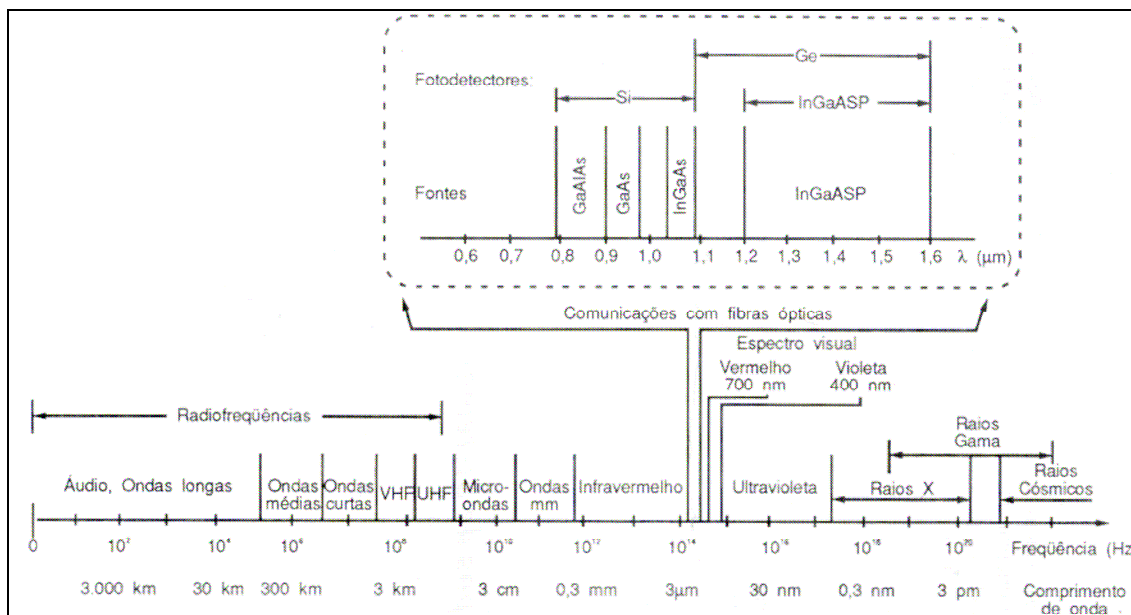


Figura 3.7 – Faixa de Frequências em Comunicações Ópticas

3.4. TECNOLOGIA WDM

No objetivo de explicar as principais propriedades da luz, os cientistas descobriram que a luz visível e invisível era composta por diferentes componentes, e vários deles tentaram decompô-la. Claro, mais tarde a própria natureza se encarregou dessa tarefa quando a luz passou por um cristal de prisma. Dos esforços desses pesquisadores, foi descoberto que mesmo a luz amarela poderia ser dividida em duas cores quando submetida a um forte campo magnético. Breve, foi provado que a luz era formada por energia eletromagnética, mas também foi descoberto que a luz era formada por partículas quantizadas chamadas fótons. Assim, com o passar dos anos mais e mais descobertas foram feitas até chegarmos ao que temos hoje em questão de tecnologia de comunicações ópticas [1].

O princípio utilizado para concentrar vários canais ópticos em uma única fibra é o WDM (Wavelength Division Multiplexing), onde através de um multiplexador óptico, são inseridos na fibra sinais de canais ópticos com comprimentos de onda diferentes, que não

interferem entre si. Na outra extremidade da fibra é utilizado um demultiplexador óptico para separar estes diferentes comprimentos de onda em canais independentes novamente.

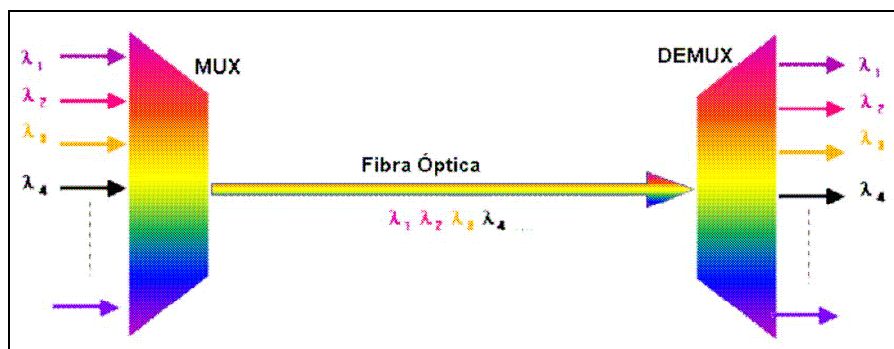


Figura 3.8 – Princípio de Multiplexação WDM

Este processo é transparente à taxa de bits e ao tipo de modulação do sinal óptico, podendo conviver na mesma fibra, sinais com protocolos diferentes em cada canal.

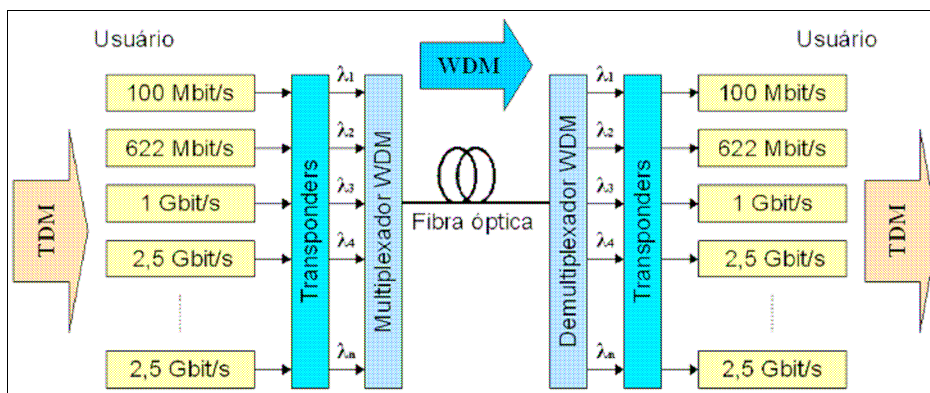


Figura 3.9 – Princípio de um Sistema WDM

Para tornar o desempenho do sistema independente dos equipamentos a ele conectados, utilizam-se transponders WDM, os quais serão explicados no decorrer desse trabalho, entre o usuário e o multiplexador/demultiplexador óptico.

Existem dois sistemas de WDM normatizados pelo ITU-T, o CWDM e o DWDM.

O sistema CWDM é definido pela norma ITU-T 694.2 e prevê espaçamento de 20 nm entre os canais desde 1271 nm até 1611 nm num total de 18 possíveis canais.

O sistema DWDM é definido pela norma ITU-T 694.1 e prevê espaçamento muito menor entre canais, permitindo uma quantidade de canais bem maior, contidos na banda entre 1530 nm e 1625 nm. Nesta faixa de frequência são definidas grades de espaçamento entre canais de 200 GHz, 100 GHz, 50 GHz, 25 GHz e 12,5 GHz conforme a densidade de canais desejada, possibilitando a operação de 50, 100, 200, 400 ou 800 canais respectivamente. Dependendo do espaçamento da grade utilizada é possível operar com bandas de até 10 Gbit/s. DWDM é amplamente usado em enlaces de longo alcance, pois a janela utilizada possibilita o uso de amplificadores ópticos.

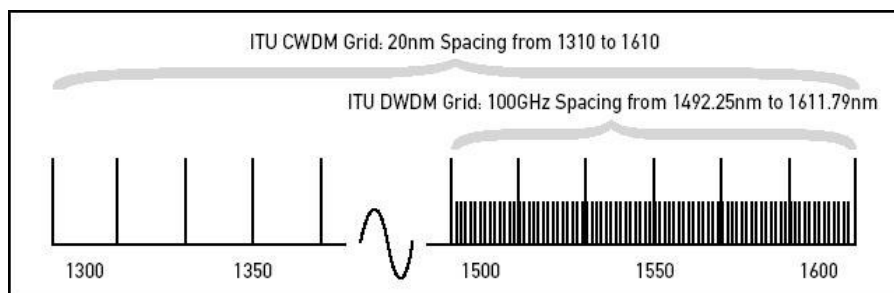


Figura 3.10 – Canalização CWDM e DWDM

Como se pode perceber na figura 3.10, os canais que são utilizados na tecnologia DWDM, estão na mesma faixa de frequência dos utilizados em CWDM. Isso acontece, devido ao espaçamento entre os canais de um e de outro sistema. Conseqüentemente, sistemas que utilizam CWDM, podem ser expandidos com canais DWDM, utilizando-se o espaçamento do canal CWDM, para a inserção de canais DWDM.

O espaçamento em frequência entre os canais é extremamente dependente do número de canais que a tecnologia usará. Isso é um tanto intuitivo, pois a janela que é usada na

comunicação óptica é fixa, e já foi mencionada anteriormente. Portanto, se temos uma banda fixa, se tivermos menor espaçamento poderemos ter um maior número de canais.

Esse espaçamento em comprimento de onda ou em frequência pode ser calculado facilmente, trabalhando com uma equação básica da física:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (\text{Eq. 3.4})$$

Fazendo-se a diferença entre os comprimentos de onda inicial e final:

$$\Delta\lambda = \frac{c}{f_2} - \frac{c}{f_1}$$

$$\Delta\lambda = \frac{c(f_1 - f_2)}{f_2 \cdot f_1}$$

$$\Delta\lambda = \frac{c(f_1 - f_2)}{\frac{c^2}{\lambda_2 \cdot \lambda_1}}$$

Como o sinal não importa nesse caso, pois estamos tratando de um espaço, podemos dizer que temos a diferença entre as frequências. Ainda, se levarmos em conta que os comprimentos de onda são na ordem de nanômetros, não há uma diferença significativa no resultado, se considerarmos os valores iniciais e finais iguais. Portanto, temos que [2]:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2 \cdot \Delta f}{c} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

Essa é a equação usada na definição dos espaçamentos de canais estipulados pela ITU-T, em anexo.

A tecnologia WDM utiliza a fibra monomodo, por ser aplicada em projetos de longas distâncias, maior do que 80 km. Isso já poderia ser intuído sabendo-se a diferença entre as fibras, citada anteriormente no capítulo 3.2.

As fibras padrão ITU-T 652 convencionais possuem uma atenuação significativa de entre 1351 nm e 1451 nm devido ao pico de absorção de hidroxila. Essa atenuação inviabiliza o uso de 6 canais em aplicações de longa distância, permitindo a operação apenas em curtas distâncias. Para distâncias médias e longas é possível utilizar 8 canais entre 1471 nm até 1611 nm, e mais 4 canais entre 1271 nm e 1331 nm. As novas fibras padrão ITU-T 652C eliminam este pico de atenuação permitindo o uso de todos os canais da mesma forma.

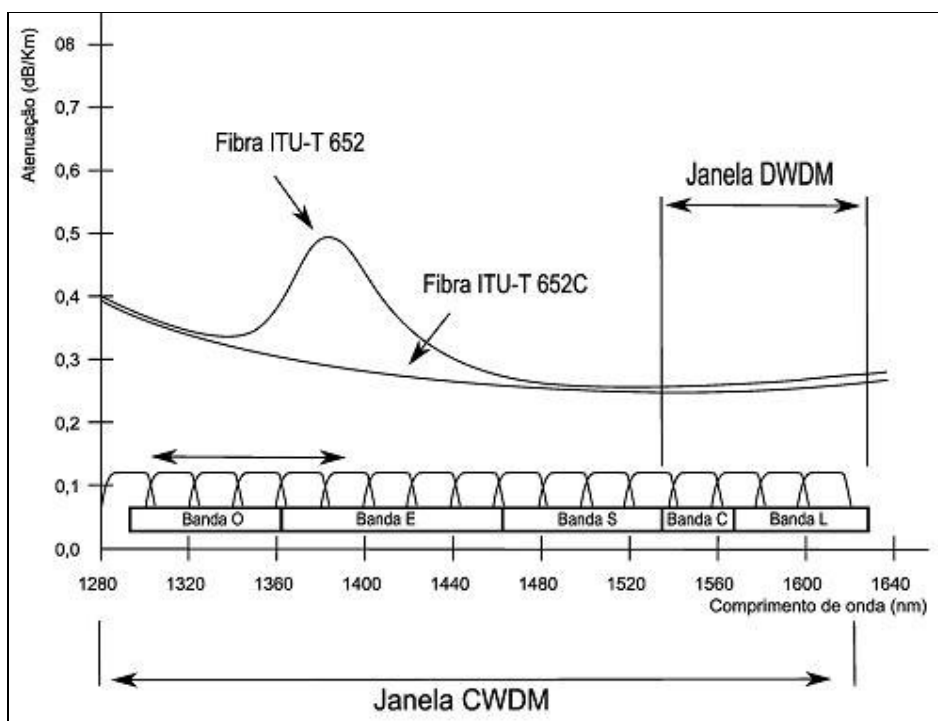


Figura 3.11 – Tipos de Fibras e Janelas de Comunicação WDM

O ideal é que haja a escolha do tipo de fibra óptica, para operação em sistemas WDM, pois devem ser analisados fatores como: atenuação, dispersão e efeitos lineares e não lineares. Esses são efeitos fundamentais que devem ser observados, para um bom desempenho do

sistema. Cada tipo de fibra apresenta algum comportamento para operação em WDM que irá resultar em restrições para este tipo de operação. Estas restrições têm um impacto direto no desempenho do sistema, limitando sua capacidade de transmissão ou diminuindo o alcance dos enlaces.

Porém, na maioria das vezes, os sistemas WDM se utilizam de fibras já instaladas. Assim, devem ser feitos ensaios para qualificar essa fibra em questão de atenuação e capacidade de transmissão. Para isso, um equipamento conhecido por OTDR (*Optical Time-Domain Reflectometer*) é utilizado. Um exemplo desse tipo de equipamento pode ser encontrado em anexo.

O sistema CWDM prevê a transmissão de até 2,5 Gbit/s em cada comprimento de onda, o que possibilita a operação de até 45 Gbit/s em um único enlace. CWDM é um padrão utilizado em redes metropolitanas ou menores. Já um sistema DWDM utiliza usualmente uma taxa de 2,5 Gbit/s a 40 Gbit/s. Alguns fabricantes já conseguiram implantar um enlace com até 100 Gbit/s, porém essa taxa ainda não é tão comum.

3.5. MÓDULOS UTILIZADOS NA TECNOLOGIA WDM

3.5.1. MULTIPLEXADOR E DEMULTIPLEXADOR ÓPTICO

Os principais componentes que formam um sistema de transmissão e recepção de sinais ópticos através da tecnologia WDM são o Multiplexador e o Demultiplexador óptico. Esses módulos têm a função de “juntar” e “separar” todos os sinais, com comprimentos de onda diferentes, de um nó. O multiplexador que utiliza a multiplexação pelo tempo, TDM, já é bem conhecido na área de telecomunicações, pois é um dos elementos mais usados nas redes em geral. A diferença entre o multiplexador TDM (Time Division Multiplexing) para o

óptico, é que ao contrário do primeiro, o segundo utiliza multiplexação no domínio da frequência. Quando trabalhamos com diferentes comprimentos de onda, temos uma distribuição desses sinais ao longo do espectro óptico. Cada sinal está centrado na sua frequência, que é conhecida como frequência central. O sinal adjacente possui um espaçamento de frequência que varia de acordo com a tecnologia usada (colocar referência à explicação acima). Portanto, pode-se perceber que a distribuição dos sinais no espectro da frequência ficará como na figura 3.12, abaixo:

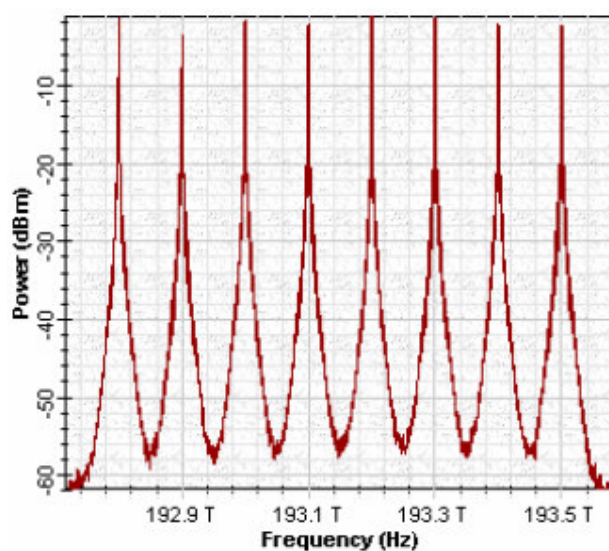


Figura 3.12 – Saída de um Multiplexador Óptico

A figura 3.12 foi retirada de um analisador de espectro óptico, conhecido como OSA (*Optical Spectrum Analyzer*). O OSA é muito utilizado em redes ópticas para se medir a qualidade do sinal em um determinado ponto da rede. O manual de um exemplo desse tipo de equipamento está incluído em anexo.

Os multiplexadores, bem como os demultiplexadores, podem ser divididos basicamente em duas categorias: os multiplexadores baseados em dispersão, os quais utilizam um elemento que dispersa a luz incidente em vários comprimentos de onda com ângulos diferentes, e os multiplexadores baseados em interferência, que utilizam componentes como

filtros ópticos e acopladores direcionais para demultiplexar o sinal incidente. Importante observar que o mesmo dispositivo pode ser usado para ambos os multiplexadores e demultiplexadores, dependendo somente do sentido da luz incidente.

Um multiplexador óptico WDM exemplificada na figura 3.13:



Figura 3.13 – Multiplexador Óptico DWDM de 8 Canais

O MUX/DEMUX da figura 3.13, possui 8 canais ópticos, com comprimentos de onda espaçados de 100 GHz, ou seja, tecnologia DWDM. Porém, esse tipo de multiplexador não possui uma entrada para o comprimento de onda que é usado para a gerência dos equipamentos. Quando isso acontece, outro módulo precisa ser utilizado para se inserir o lambda da gerência no espectro, é a OSC (*Optical Service Channel*), que será abordada a seguir.

Para o projeto de uma rede WDM, algumas características devem ser conhecidas, como atenuação, ondulação da banda passante, etc. Na prática, o valor típico de atenuação que um multiplexador possui é de 4 dB [9]. Assim, no momento dos cálculos de atenuação é importante que esse valor seja considerado.

3.5.2. OSC (OPTICAL SERVICE CHANNEL)

A gerência normalmente é transmitida em um comprimento de onda mais espaçado dos utilizados para transporte do sinal de dados. Isso acontece, porque não é necessário se utilizar uma taxa de transmissão muito elevada para se transmitir os dados utilizados pelo

sistema de gerência, deixando mais um canal para dados em uma melhor banda.

Normalmente, a taxa de comunicação da gerência é 155 Mbps, e o sinal pode ser enviado utilizando os comprimentos de onda de 1310 nm ou 1510 nm, os quais como já mencionado, estão fora do range utilizado pelos canais de dados do usuário.

Portanto, a placa OSC é a responsável por inserir o comprimento de onda do sistema de gerência no espectro que será transmitido ao longo da fibra até outro nó da rede. A figura 3.14 mostra um exemplo de OSC. Além de possuir entrada e saída do canal da gerência, ainda possui:

- Entrada e saída de dados vindos da rede. Essas servem para separar e juntar o sinal do gerente, dos sinais de dados do cliente.

- Uma entrada e saída para o MUX/DEMUX. Pois os canais do cliente devem ser inseridos na OSC e juntados/separados do sinal da gerência.

- Uma entrada e saída para monitor óptico. Nesse caso, o analisador de espectro, OSA, é conectado através dessas portas. Elas possuem todo o espectro, inclusive com o canal de gerência, atenuado em alguns dB para não saturar o receptor do OSA.



Figura 3.14 – OSC (Optical Service Channel)

Assim como no multiplexador, é necessário o conhecimento da atenuação produzida pela OSC no sistema WDM. O valor típico de atenuação é 1 dB, o qual pode ser encontrado no anexo.

3.5.3. OADM (OPTICAL ADD AND DROP MULTIPLEXER)

Quando temos uma rede óptica na topologia de anel, precisamos adicionar canais em algum ponto da rede e retirá-lo em outro. Não é necessário que todos os sinais sejam retirados em todos os nós da rede e depois adicionados. Isso faria com que a eficiência da rede diminuísse, além de aumentar o custo. Por esse motivo, se viú necessária a utilização de um módulo que inserisse e retirasse somente os canais de interesse. Esse módulo é o OADM (*Optical Add and Drop Multiplexer*). O OADM é basicamente uma junção de MUX e DEMUX, como pode ser visto abaixo:



Figura 3.15 – OADM (Optical Add and Drop Multiplexer)

Portanto, se torna evidente que esse é um filtro, o qual deixa passar a banda que lhe é designada e atenua o restante. Essa atenuação nos demais canais que não serão retirados do nó torna a atenuação total do sinal quando se opta por um OADM maior do se utilizasse um par MUX/DEMUX. Isso porque, se isso for feito, todos os canais são retirados do nó e inseridos, passando pela transponder e, portanto regenerando todos os comprimentos de onda. Já no caso de um OADM, somente os canais que serão retirados, serão regenerados.

Para os valores de atenuação de um OADM, é preciso distinguir entre os canais que irão passar através do equipamento, ou seja, que não serão “retirados” no nó, e os canais que serão. O valor típico da atenuação em um canal retirado é de 3 dB. Para inseri-lo novamente no OADM, mais 3 dB são perdidos. Para os canais que passam diretamente por esse equipamento a perda é de 5 dB. Esses valores podem ser encontrados no anexo.

3.5.4. TRANSCEIVERS ÓPTICOS

Transceivers ópticos são componentes responsáveis pela transmissão e recepção do sinal óptico e possuem uma ampla variedade de tipos, que variam de acordo com a aplicação. A taxa de transmissão, por exemplo, pode variar de poucos Mbps até 40 Gbps, a modulação do sinal pode ser NRZ (nonreturn to zero) ou RZ (return to zero), a distância pode ser de poucos metros ou quilômetros, etc. Portanto, os transceivers são definidos de acordo com o escopo do projeto em questão.

Em um sistema WDM, além da taxa de transmissão, os transceivers ainda podem ser caracterizados de acordo com os comprimentos de onda utilizados na banda de transmissão. Por exemplo, transceivers CWDM podem utilizar de 1471nm até 1611nm para transmissão. Por outro lado, os DWDM utilizam os comprimentos de onda disponíveis na banda C ou na banda L. Ainda, os sistemas ópticos podem ser divididos em: sem cor, os quais utilizam os comprimentos de onda já citados anteriormente (850 nm, 1310 nm e 1510 nm), e os coloridos, que por sua vez utilizam outros comprimentos de onda além desses.

Há um tipo de *transceiver* largamente utilizado nos sistemas ópticos, o SFP (*small form-factor pluggable transceiver*). Esse pode transmitir a uma taxa de até 4,5 Gbps, e é usado tanto em sistemas sem cor, quanto em sistemas coloridos CWDM e DWDM.

A figura 3.16, abaixo, mostra um *transceiver* SFP sem cor.



Figura 3.16 – Transceiver SFP “Sem Cor”

Os *transceivers* como os da figura 3.16, são utilizados no lado do usuário, ou seja, o usuário conecta o equipamento que será transmitido no espectro WDM. A potência de transmissão desse tipo é 0 dBm, e de recepção é -28 dBm. Porém, esse dado não é muito preocupante no projeto, devido ao fato do equipamento a ser conectado a esse *transceiver* estar localizado no mesmo site dos equipamentos WDM. Assim, a maior preocupação acaba sendo atenuar o sinal que esse está transmitindo ou recebendo, para não saturar as entradas dos equipamentos do sistema, devido a curta distância entre esses. Mais informações sobre os *transceivers* podem ser encontradas em anexo.

Além desse *transceivers* sem cor, é necessário o uso de outros “coloridos”. A cor, a qual depende do comprimento de onda usado, é escolhida de acordo com o projetista do sistema. Diversas cores são disponíveis, dependendo da tecnologia, CWDM ou DWDM. O custo desse tipo de *transceiver* é mais elevado do que os comuns, devido à complexidade desses. Alguns exemplos desses SFP coloridos estão na figura 3.17.



Figura 3.17 – Transceivers SFP Coloridos

As informações desses *transceivers* são decisivas para o projeto, pois são eles os responsáveis por transmitir e receber os sinais que trafegam no link WDM. Assim, a partir do conhecimento das características desses, o projetista desenvolve o sistema de comunicação, considerando as atenuações, dispersões, etc, para que o receptor consiga distinguir o sinal

vindo da rede. A potência típica do transmissor é de 0 dBm, e a sensibilidade do receptor é de aproximadamente -24dBm.

Porém, quando a taxa de transmissão do canal é alta, acima de 4,5 Gbps, é necessário o uso de outro dispositivo chamado XFP (10 Gigabit Small Form Factor Pluggable). Esse é utilizado em comunicações onde a taxa por canal é maior do que a suportada pelo SFP. Os XFP possuem uma arquitetura ainda mais complexa do que a do SFP, e podem atingir taxas de 40 Gbps ou mais, utilizadas em comunicações DWDM de grande capacidade.

Um exemplo de XFP está na figura 3.18, abaixo:



Figura 3.18 – Transceiver XFP

Os dados desses XFP são fortemente vinculados aos efeitos de dispersão na fibra. Valores de potência de transmissão estão entre 0 dB e 5dBm, e sensibilidade entre -5dBm e -28dBm. Mais detalhes no anexo.

A potência que chega ao receptor de um *transceiver* é dada conforme a equação 3.6.

$$\text{Potência no receptor} = \text{Potência no transmissor} - \text{Atenuações} \quad (\text{Eq. 3.6})$$

3.5.5. TRANSPONDER

Para que seja possível a multiplexação no domínio da frequência, todos os sinais que serão multiplexados devem possuir uma frequência diferente, como vimos anteriormente na figura 3.12. Porém, os equipamentos ópticos atuais, normalmente trabalham com os comprimentos de onda de 1550 nm e 1310 nm, em sua maioria, e são conhecidos como equipamentos sem cor. Portanto, é necessária que seja feita a conversão do comprimento de onda desses sinais, para outros que estejam na banda C, ou L, utilizada pela tecnologia WDM, os coloridos.

O transponder é o módulo utilizado nos equipamentos WDM que é encarregado por fazer a conversão do comprimento de onda do usuário, sem cor, para o comprimento de onda do link, colorido. Esse é composto basicamente por transceivers de usuário, que recebem o sinal vindo do cliente, e os transceivers do link WDM, que transmitem o sinal do usuário em um comprimento de onda diferente.

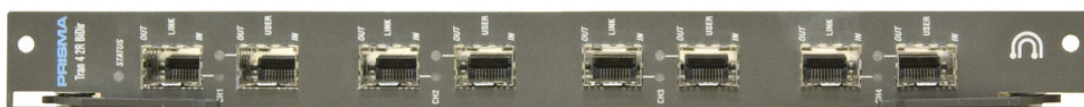


Figura 3.19 – Transponder CWDM

O transponder acima possui as entradas para os transceivers de usuário e de link. Assim, esse módulo apenas faz a conversão dos comprimentos de onda vindos dos equipamentos dos usuários para os de link. Portanto, as características desse módulo dependem somente dos SFPs ou XFPs conforme a taxa de comunicação.

3.5.6 AMPLIFICADORES

Os amplificadores ópticos são fundamentais no momento de um projeto de redes WDM, pois eles permitem um maior alcance do sinal, o que é muito necessário quando se fala em redes de alta capacidade. Os dois amplificadores mais utilizados nas comunicações ópticas são o Raman e o EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifiers*), que será tratado abaixo [3].

A amplificação proporcionada pelos EDFAs opera em uma faixa de comprimento de onda em torno de 1550 nm, que coincide com a janela de comunicação onde a fibra apresenta as menores perdas. Além disso, a amplificação é feita de forma transparente à taxa de transmissão e ao formato de modulação, característica que possibilitou a transmissão simultânea de diversos serviços na rede óptica, além do fato de possibilitar atualizações no sistema óptico sem necessidade da troca do equipamento repetidor [3].

Porém, os amplificadores usados para redes WDM, trabalham na zona C ou na L. Portanto, esses servem somente para amplificar enlaces DWDM, pois a faixa de frequência de CWDM foge do range que os amplificadores suportam. Assim, um motivo pelo qual enlaces CWDM são utilizados para pequenas distâncias, pela carência de equipamentos de amplificação.

O ganho, a figura de ruído e a potência de saída são os três parâmetros básicos de importância fundamental na caracterização dos EDFAs. A localização dos EDFAs ao longo dos enlaces de comunicação ópticas é determinada através dos valores destes parâmetros.

O ganho é um parâmetro do EDFA que depende de uma série de características de operação do amplificador, tais como, concentração do dopante (Érbio) na fibra, comprimento da fibra dopada, potência de entrada do sinal, potência de bombeio injetada, topologia, entre outras. O cálculo do ganho de um amplificador óptico (em decibel, dB) é dado por [3]:

$$G = 10 * \text{Log}\left(\frac{P_s}{P_e}\right) \quad (\text{Eq. 3.7})$$

Onde P_e é o sinal de entrada e P_s é o sinal de saída.

A figura de ruído (NF- Noise Figure) indica, numericamente, a quantidade de ruído adicionada ao sinal pelo amplificador. No caso do EDFA, a figura de ruído leva em consideração a principal fonte de ruído introduzida pelo amplificador, que é a ASE (*Amplified Spontaneous Emission*). A figura de ruído é dada pela equação 3.8, onde SNR_e é a relação sinal ruído na entrada e SNR_s é a relação sinal ruído na saída do amplificador [3].

$$NF = 10 * \text{Log} \left(\frac{SNR_e}{SNR_s} \right) \quad (\text{Eq. 3.8})$$

Muitas vezes o ASE pode ser um fator limitante para o desempenho de um enlace de comunicações ópticas. Dependendo do sistema, o próprio ruído ASE pode saturar o amplificador, a ponto de degradar a relação sinal ruído na saída do amplificador.

A potência do amplificador é outro fator determinante no momento do projeto. A potência de saída saturada é uma definição importante, que corresponde à potência medida na saída do amplificador após uma queda de 3 dB (compressão de ganho) em relação ao ganho de pequeno sinal do amplificador.

Observando-se a potência de saída para a qual o ganho cai 3 dB, podemos obter a potência de saída saturada de um EDFA a partir da curva de ganho em função da potência de saída.

Na Figura 3.20, temos um exemplo de curva de ganho em função da potência de saída, onde a potência de saída saturada é 12 dBm, enquanto que a potência de saída máxima é de 15 dBm [3].

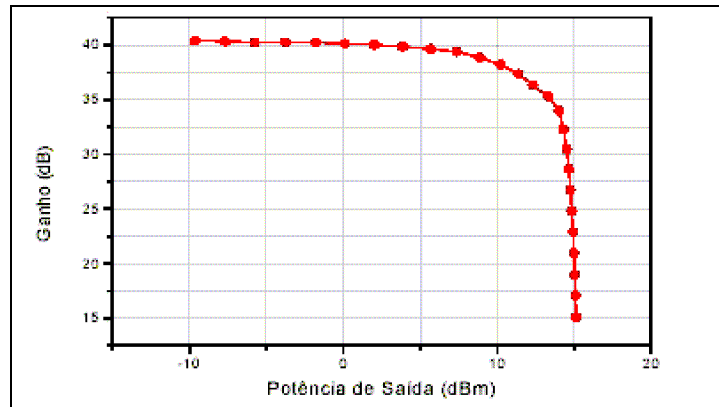


Figura 3.20 – Característica Potência de Saída x Ganho EDFA

O ganho plano, ou seja, o ganho igual para todos os canais possui essa característica, pois esse tipo de amplificador trabalha na zona saturada [3].

Os amplificadores EDFAs usados nos projetos de enlaces podem ser colocados em diferentes pontos do sistema, cada um com um propósito diferente.

O amplificador de potência, ou *booster*, é colocado na saída dos transmissores, como na figura a seguir.

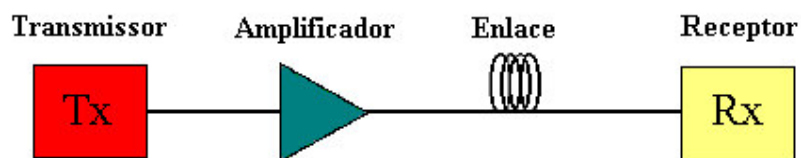


Figura 3.21 – Posição de Amplificador *Booster* no Sistema

Quando se é utilizada essa configuração, o EDFA possui laser de bombeio após a fibra dopada, como na figura 3.22 [3]:

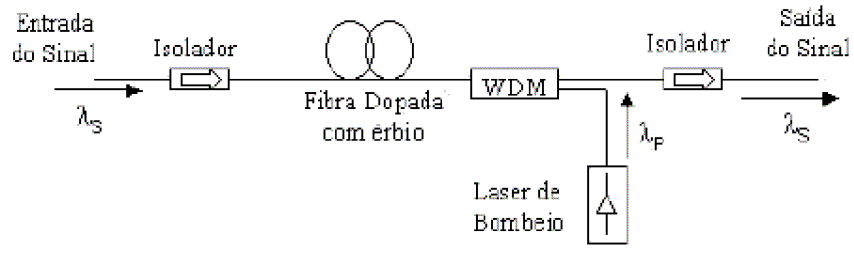


Figura 3.22 – Posição da Fibra Dopada no Amplificador *Booster*

Outra posição na qual o EDFA pode ser utilizado é no meio do enlace, funcionando como um amplificador de linha:



Figura 3.23 - Posição de Amplificador de Linha no Sistema

Nessa configuração, o laser de bombeio é colocado nas duas posições, antes e depois da fibra dopada, porém nos amplificadores de linha é possível a utilização de outras posições do laser de bombeio, como a anterior ou posterior à fibra dopada [3].

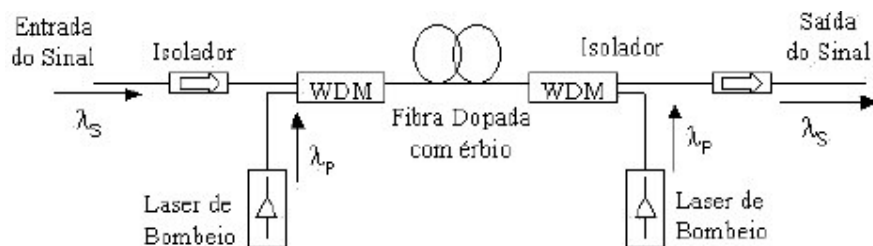


Figura 3.24 – Posição da Fibra Dopada no Amplificador de Linha

Por fim, o EDFA pode ser utilizado como um pré-amplificador, o que é muito utilizado quando o número de canais é elevado, pois a potência da linha já seria suficiente para atingir a outra ponta do enlace, não fazendo sentido o uso de um *booster*.

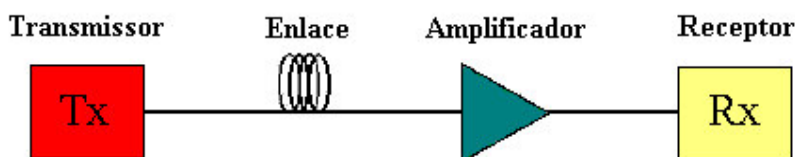


Figura 3.25 - Posição do Pré-Amplificador no Sistema

Nesse caso, o laser de bombeio seria colocado antes da fibra dopada, a seguir [3]:

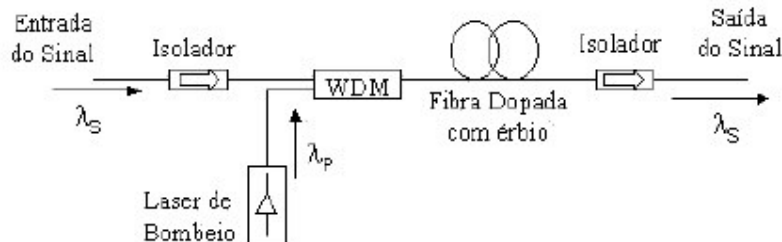


Figura 3.26 – Posição da Fibra Dopada no Pré-Amplificador

Para se determinar qual a posição correta que o amplificador deve ser colocado, é preciso se analisar todas as potências do nó, do qual será transmitido o sinal, e também a distância que esse sinal terá que chegar. Toda essa análise será feita no capítulo de projeto.

3.5.7. MÓDULO DE GERÊNCIA

Para todo o sistema óptico de grande capacidade exige-se uma confiabilidade proporcional. Um enlace que utiliza WDM a taxas altíssimas, como na maioria dos casos, é responsável pelas comunicações de empresas, bancos, servidores de internet... Esse tipo de

comunicação não pode falhar. Uma única falha em um equipamento que dure algumas horas pode custar milhões para uma empresa.

Para se ter essa confiabilidade, é necessária uma rede gerenciada, ou seja, que todos os equipamentos que fazem parte dela sejam “enxergados” por um sistema de gerência. Esse sistema, monitora 24 horas, todos os enlaces, lasers, amplificadores, multiplexadores, enfim, todas as partes do sistema.

Alguns dos eventos mais comuns que precisam ser monitorados por esse sistema são: fibra desconectada ou rompida, transceivers funcionando corretamente, alimentação, ventilação, módulos funcionando corretamente, etc. Através da gerência também é possível que se configure os módulos do sistema.

Existem muitos protocolos utilizados para se gerenciar uma rede, seja essa óptica ou elétrica. Esses protocolos devem estar de acordo com os equipamentos, ou seja, equipamentos com diferentes protocolos de gerenciamento não podem estar na mesma rede física, caso contrário nem todos serão gerenciados.

Um exemplo de módulos de gerência está abaixo:

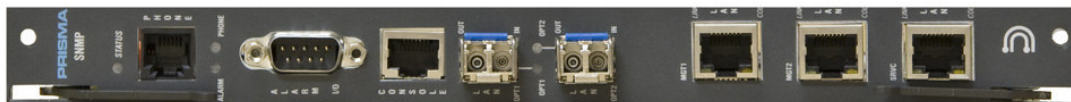


Figura 3.27 – Módulo de Gerência WDM

Para mais detalhes sobre o módulo de gerência WDM, ver anexo.

3.6. PERDAS EM REDES WDM

3.6.1. ATENUAÇÃO

Quando um sinal se propaga em uma fibra óptica, ele está sujeito a sofrer atenuação ao longo da fibra. O sinal entra na fibra com determinada potência, e à medida que percorre o enlace, sua potência vai diminuindo, resultando em um sinal de saída de menor amplitude devido a atenuação sofrida.

Assim, a atenuação do sinal que ocorre na fibra limita o comprimento máximo do enlace óptico de longa distância.

Portanto, a partir do que já foi citado neste trabalho, podemos ver que existem muitos fatores que podem afetar a atenuação que a fibra impõe sobre o sinal. Podemos resumir essa atenuação em três fatores principais citados anteriormente: absorção do material, imperfeições na fibra e espalhamento de Rayleigh.

É possível se referir matematicamente a todos esses efeitos, segundo a equação abaixo [1]:

$$\alpha(\lambda) = \frac{C1}{\lambda^4} + C2 + A(\lambda) \quad (\text{Eq. 3.9})$$

Onde C1 é uma constante, devido ao espalhamento de Rayleigh, C2 é uma constante devido às imperfeições na fibra e A(λ) é uma equação que descreve a absorção na fibra em função do comprimento de onda.

A potência no receptor pode ser calculada por [1]:

$$P_r = P_t \cdot 10^{\frac{-\alpha(\lambda)L}{10}} \quad (\text{Eq. 3.10})$$

Onde Pr é a potência que chega ao receptor, Pt é a potência transmitida, alfa é a atenuação em determinado comprimento de onda e L é o comprimento do enlace.

Assim, incluindo todas as atenuações principais, obtemos um gráfico como o da figura 3.28.

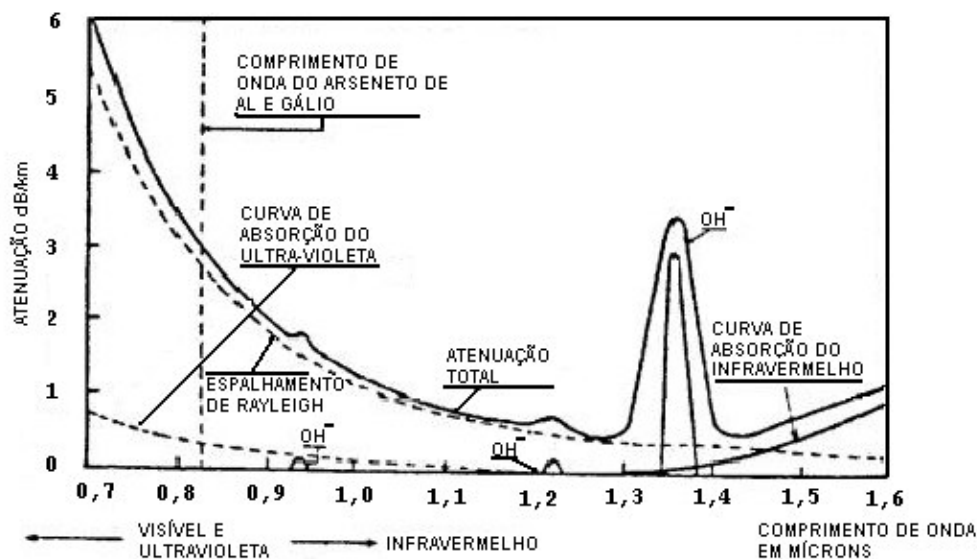


Figura 3.28 – Perdas na Fibra Óptica

3.6.2. DISPERSÃO CROMÁTICA

O desenvolvimento de amplificadores ópticos do tipo EDFA possibilitou a criação de enlaces ópticos de longas distâncias com menor custo e maior eficiência. O posicionamento correto dos amplificadores ópticos ao longo do enlace permite superar o limite de atenuação do enlace óptico [7].

Uma vez contornado o problema da atenuação e na ausência de efeitos não-lineares, o enlace óptico amplificado, operando em altas taxas e longas distâncias, é limitado pelo efeito da dispersão de velocidade de grupo ou dispersão cromática.

A GVD é causada pela diferença na velocidade de propagação das componentes espectrais do pulso óptico que apresenta largura espectral finita, i.e. Não é idealmente

monocromático. Como um pulso modulado é composto por um espectro de frequências, devido à dependência em frequência da velocidade de grupo na fibra, cada parcela do sinal transmitido se propaga na fibra com uma velocidade de grupo específica.

As componentes espectrais que foram transmitidas simultaneamente sofrem atrasos e incidem no receptor em tempos distintos. Por isso, o fotodetector é iluminado por um tempo maior do que a duração do pulso. A conversão do sinal óptico em um pulso elétrico no fotodetector resulta em um pulso recebido com a largura maior do que o pulso que foi transmitido.

O coeficiente de dispersão D de uma fibra óptica é, por definição, o alargamento dado em unidades de [ps] de um pulso óptico, com uma largura de banda igual a 1 nm e propagando-se em um enlace de 1km de distância. O valor típico de D pode ser definido por [7]:

$$D = -\left(\frac{2\pi c}{\lambda^2}\right)\beta'' \quad (\text{Eq. 3.11})$$

Onde:

D – Coeficiente de Dispersão Cromática

λ – Comprimento de onda do sinal transmitido

β – Constante de Propagação

c - Velocidade da luz no vácuo

β'' – Derivada segunda da constante de propagação em relação a frequência w .

Utilizando-se a fibra padrão ITU-T (G.652 – em anexo), no comprimento de onda 1550 nm, o coeficiente de dispersão igual a 17 ps/nm.km. Esse coeficiente varia de acordo com o comprimento de onda utilizado na transmissão. Assim, outro fator torna-se importante: a derivada da dispersão cromática em função do comprimento de onda [7].

Essa derivada, também conhecida como Dispersion Slope – S, pode ser definida por [7]:

$$\frac{dD}{d\lambda} = \left(\frac{2\pi c}{\lambda^3} \right) \left(2\beta'' - \frac{2\pi c}{\lambda} \beta''' \right) \quad (\text{Eq. 3.12})$$

Onde β''' é a derivada terceira da constante de propagação em relação à frequência ω .

O limite imposto pela dispersão cromática é obtido partindo de que essa não ultrapasse o período de bit na taxa de transmissão usada para comunicação. Esse limite imposto pode ser calculado da seguinte forma [2]:

$$L_D = \frac{1}{B \cdot D \cdot \Delta\lambda} \quad (\text{Eq. 3.13})$$

Onde B é a taxa de transmissão de bits.

Assim, fica clara a dependência que existe entre o comprimento de onda usado com o alcance que o enlace poderá alcançar.

Portanto, se for usada uma taxa de transmissão de 10 Gbps, cujo transmissor é composto por um laser de largura de espectral de 0,1 nm, com um índice de dispersão D igual a 17 ps.nm/km, a distância máxima que esse enlace irá alcançar será de 60 km devido ao efeito de dispersão.

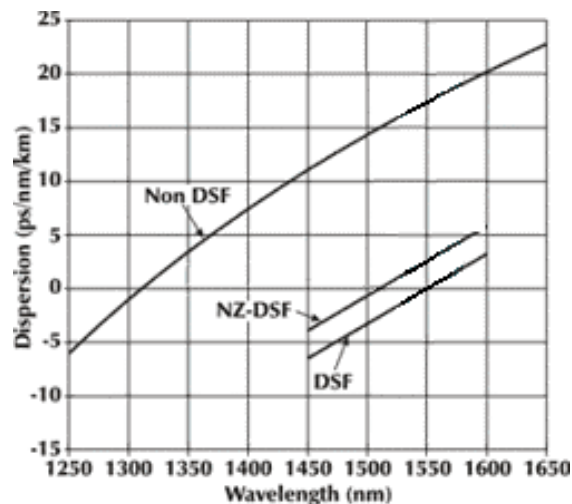


Figura 3.29 – Dispersão Cromática para Diferentes Tipos de Fibra

Podem-se ver acima os tipos de curvas mais comuns em enlaces ópticos. Cada um deles foi projetado para se obter zero dispersão em um determinado comprimento de onda. Assim, percebe-se porque ocorrem atrasos das componentes dos sinais para cada comprimento de onda.

Abaixo, temos o sinal antes e depois de sofrer o efeito de dispersão cromática. É notável o aumento da interferência de um pulso sobre o outro, após o sinal passar pelo link de fibra óptica. Assim, a distinção entre os diferentes pulsos se torna muito difícil, aumentando o índice de erros de comunicação entre os equipamentos.

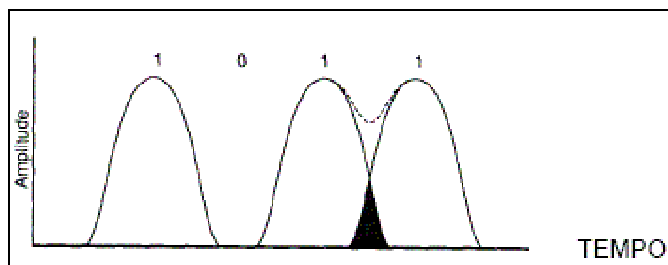


Figura 3.30 – Sinal sem Dispersão na Fibra Óptica

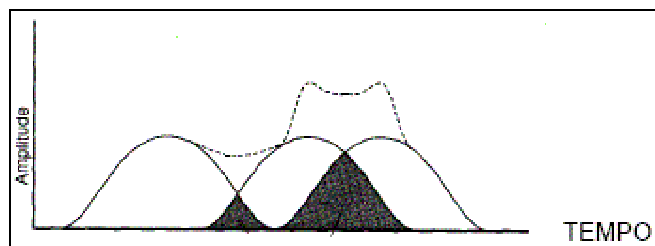


Figura 3.31 – Sinal Após Efeito de Dispersão Cromática

3.6.3 PMD

Todas as fibras têm algum grau de birrefringência (separam um feixe de luz monocromático em dois), ou seja, diferença entre índices de refração, e um núcleo que não é

perfeitamente circular em toda sua extensão. Esses dois fatores causam um efeito na fibra, chamado de *Polarization Mode Dispersion* (PMD), o qual separa um sinal em duas componentes ortogonalmente polarizadas, ambas com diferentes velocidades e fases [1].

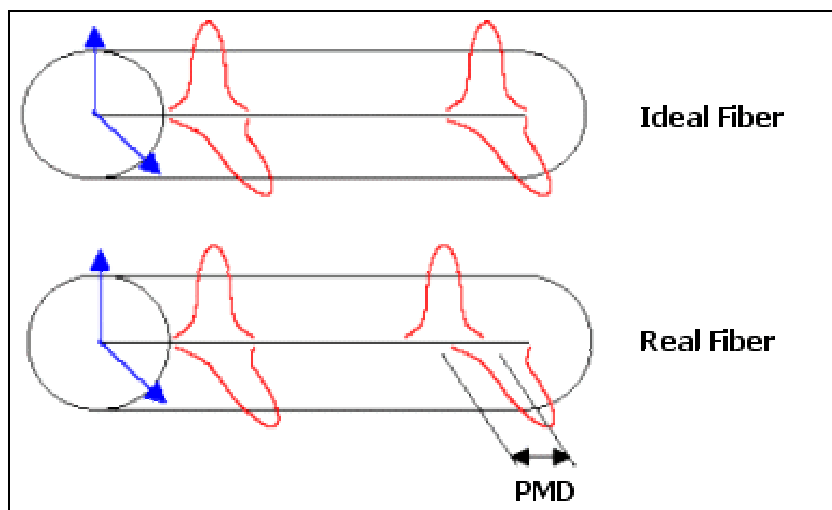


Figura 3.32 – Influência do PMD no Sinal Óptico

Assim, quando esses dois sinais se recombinaem, ocorre um espalhamento do sinal original na frequência, ou seja, um alargamento do pulso original.

Esse fenômeno começa a ser problemático quando estamos falando em um sistema com taxa de transmissão igual ou maior que 10 Gbps, pois o alargamento de dois canais adjacentes pode prejudicar a integridade do dado. Isso decorre do fato que um pulso acaba por misturar com outro, como na figura 3.33 [1]:

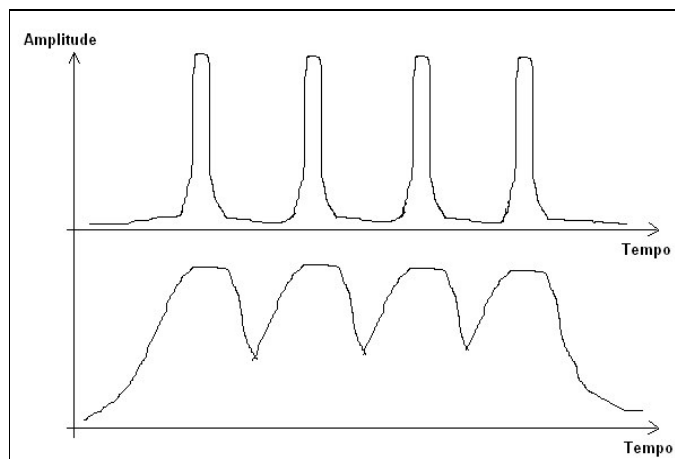


Figura 3.33 – Efeito do PMD no Sinal Óptico

O PMD é um fator limitante no comprimento do enlace de redes WDM, pois o efeito resultante desse fenômeno pode prejudicar muito o funcionamento do sistema.

O coeficiente de PMD é dado por [2]:

$$D_{pmd} = \frac{\Delta T}{Lt} = \frac{1}{v_{gx}} - \frac{1}{v_{gy}} \quad (\text{Eq. 3.14})$$

Onde T , é o atraso sofrido após a propagação de uma distância Lt , por um impulso que se propaga no eixo lento relativamente a um impulso que se propaga no eixo rápido. E v_{gx} e v_{gy} são as velocidades de grupo dos dois modos de polarização ortogonal.

Outra maneira utilizada para se caracterizar o PMD, é fazendo a média do DGD (*Differential Group Delay*, ou atraso diferencial de grupo). Ou seja, o DGD é o atraso entre dois modos de polarização em um dado instante, e o PMD é a média desses atrasos. PMD é uma das principais fontes de penalidade em sistemas DWDM, e ao contrário da dispersão cromática, não é compensado facilmente. Portanto, o cálculo do PMD pode ser como segue [1]:

$$\Delta T \approx D_{pmd} * \sqrt{L} \quad (\text{Eq. 3.15})$$

Onde D_{pmd} é o parâmetro PMD médio.

O coeficiente de PMD máximo, segundo a ITU-T G.652, é 0,5 ps/sqrt(km). Na prática, um índice baixo de PMD é menor que 0,1 ps/sqrt(km), um índice alto é maior que 0,3 ps/sqrt(km) e um inaceitável é maior do que 1,0 ps/sqrt(km) [1].

Para obtermos o PMD, precisamos saber o DGD da fibra e então calcular seu valor RMS. É usada uma simplificação para o cálculo, onde é determinado que $PMD=DGD/3$.

3.7 ANÁLISE DE ERROS

No diagrama do olho pode-se analisar uma seqüência de bits de uma vez. A construção mais simples do diagrama consiste na divisão de um trem de pulso em várias partes de 3 bits de comprimento, por exemplo. Cada uma das partes é representada de forma sobreposta e simultânea. Dessa forma pode-se visualizar a forma de onda de todos os bits de uma seqüência em um único diagrama. Todas as combinações possíveis de transição de estágio lógico dos bits estão representadas no diagrama de olho [6].

Através da medição do diagrama de olho, observam-se os valores médios e a oscilação de sinal nos níveis lógicos “0” e “1”. Uma grande oscilação de potência em torno do valor médio dos níveis lógicos pode causar uma detecção errada de bits, elevando a BER [6].

Outro fator importante é identificar o ponto de cruzamento (ou intersecção) do olho, que é composto pelo ponto referente ao tempo que ocorre a intersecção das curvas da transição positiva (do bit “0” para o bit “1”) e negativa (do bit “1” para o bit “0”), e pelo valor da amplitude onde ocorre o cruzamento (intersecção) da curva. Através da medição da distância entre 02 tempos de cruzamento, tem-se a largura do bit, parâmetro este que permite analisar o alargamento dos bits. A figura 3.34 ilustra um diagrama de olho simplificado [6].

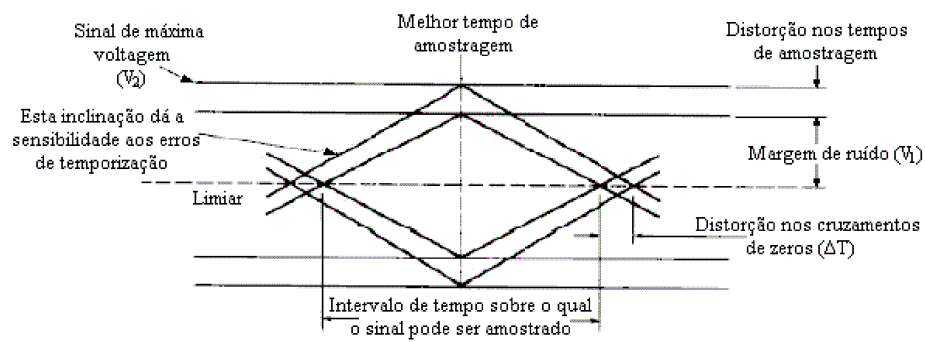


Figura 3.34 – Diagrama de Análise de Olho

3.8 TIPOS DE REDES WDM

As redes WDM são classificadas em diferentes tipos, dependendo da distância dos enlaces, topologias e taxas de transmissão dos sistemas. Para cada um desses sistemas, é necessário um estudo diferenciado para o desenvolvimento do projeto da rede.

Os principais sistemas WDM são:

3.8.1 REDES DE LONGA DISTÂNCIA

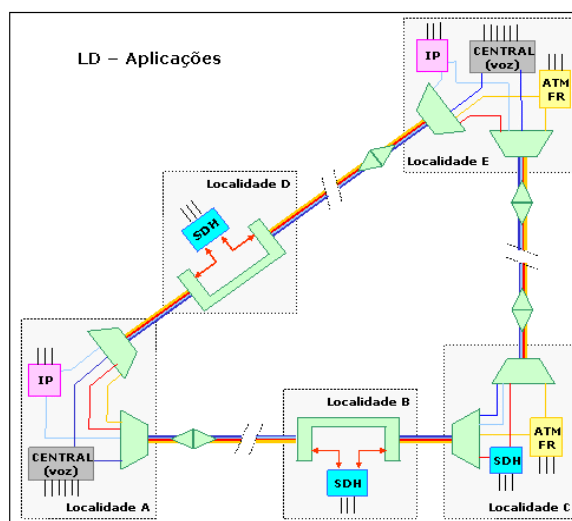


Figura 3.35 – Rede de Longa Distância WDM

Esse tipo de rede é utilizado para interligar cidades, regiões, estados, ou até mesmo países, por terra ou mar. Portanto, a distância física entre os equipamentos desse tipo de rede é muito grande, até 4000 km, o que demanda uma grande potência desses equipamentos, além de amplificadores ópticos ao longo da linha, bem como regeneradores de sinal.

Além disso, o número de comprimentos de onda que trafegam nesse tipo de sistema é muito alto (80, ou 160, projetados para 1000). Por isso, são muito utilizados equipamentos

para realizar inserções e extrações de sinais (OADM) ao longo da linha, em alguma cidade, região, etc.

A taxa de transporte por canal desse tipo de sistema vai de 10 Gbps, até 160 Gbps, e suportam transparência de protocolo, ou seja, o tipo de protocolo que passa pela fibra é indiferente.

Sistemas de proteção são indispensáveis para esse tipo de rede, pois normalmente essas trafegam uma enorme quantidade de dados, e precisam estar protegidas contra falhas. Para isso, é comum o uso do sistema de proteção 1+1, onde um enlace é usado para serviço e o outro somente para garantir a integridade do sistema.

3.8.2 REDES METROPOLITANAS

As redes DWDM Metro são utilizadas para conectar concentradores de operadoras de serviços de telecomunicações em uma determinada região metropolitana. Ela é formada por nós de uma determinada topologia em anel interligada por fibra óptica.

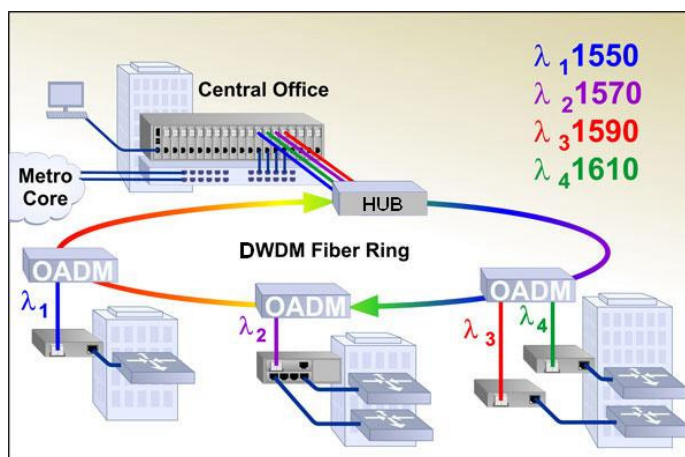


Figura 3.36 – Rede Metropolitana WDM

O anel pode ser com uma, duas ou até quatro fibras, dependendo da estratégia de proteção usada. Usualmente, redes metropolitanas de pequeno porte utilizam apenas uma fibra óptica em sua topologia e redes de médio porte utilizam duas fibras, uma para transporte do serviço e outra para proteção. As redes de grande porte utilizam até quatro fibras, onde duas são usadas para serviço e duas para proteção.

Pelo menos um dos nós do anel é designado como hub. Esse hub conecta a rede em questão com outra de topologia igual ou diferente. Em geral, hubs aceitam vários tipos de *payload* (TCP/IP, ATM, STM, LAN, etc) destinados a um ou mais nós do anel. Cada tipo de carga de dados (canal) é convertido em outro formato ou enviado para seu nó de destino da mesma forma como chegou à rede. Então, ele é transportado em um determinado comprimento de onda e multiplexado ao longo do anel. A complexidade e confiabilidade do hub são proporcionais as da rede.

Diferentes redes Metro cobrem diferentes áreas. Elas têm larguras de bandas, performances, serviços oferecidos, complexidade e custos muito variados, isto é, redes Metro são muito versáteis. Elas oferecem serviço de gerência dos comprimentos de onda e conseguem suprir uma grande gama de aplicações, o que a faz crescer a uma taxa quase exponencial a cada ano.

Um nó DWDM deve ser entendido como formado por duas partes: um multiplexador *add-drop* (OADM) e um sistema ligado a ele. Esse sistema gerencia toda a banda e termina ou realimenta o canal de supervisão.

O fundamento do OADM já foi explicado anteriormente. Em resumo, sua função é extrair e inserir canais de um nó pertencente a rede óptica em questão, como mostrado nas figuras acima.

Além do OADM, devem ser usados transceivers, conforme o número de canais de dados e gerência. Eles são dispositivos que contém um laser interno, o qual é responsável por

transmitir os dados através da fibra óptica, e determinam o alcance da transmissão do sinal. Além disso, convertem os comprimentos de onda do usuário nos comprimentos de onda usados no enlace. Um maior detalhamento sobre os tipos de transceivers pode ser encontrado anteriormente neste documento.

Os demais equipamentos e dispositivos usados nesse tipo de rede irão depender da aplicação em questão, ou seja, a necessidade, bem como a rede do cliente, deve ser estudada.

Em geral, dividimos as redes WDM metropolitanas em dois grupos: Sistemas Metropolitanos de Grande Porte e Sistemas Metropolitanos de Médio e Pequeno Porte. Esses dois grupos serão abordados a seguir.

3.8.2.1 SISTEMAS METROPOLITANOS DE GRANDE PORTE

Sistemas Metropolitanos de Grande Porte são topologias que utilizam quatro fibras na em seus enlaces. Eles suportam 80 ou mais comprimentos de onda por fibra a uma taxa de 10 Gbps ou 40 Gbps. Tais sistemas cobrem uma grande área geográfica, maior do que 1000 km em circunferência, e interconectam grandes cidades.

A amplificação óptica usada nesse tipo de rede é tão complexa quanto a usada em sistemas de grandes distâncias, baseados em amplificadores de Raman, OFA, juntamente com compensadores de dispersão e equalizadores ópticos. Esses amplificadores são usados para enlaces com mais de 80 km.

Esses sistemas são capazes de inserir e extrair um número muito grande de canais, além de fazer um novo roteamento quando uma falha na rede é detectada. Assim, toda a rede deve ser supervisionada via gerência, o que aumenta consideravelmente o nível da tecnologia. O nível de confiabilidade dessa rede depende muito da gerência de erros, o que impacta no momento do projeto da rede em relação à conexão cruzada óptica.

3.8.2.2. SISTEMAS METROPOLITANOS DE MÉDIO E PEQUENO PORTE

Sistemas metropolitanos de médio porte têm 40 comprimentos de onda a uma taxa de 2.5 Gbps até 10 Gbps, com uma separação entre os canais de 100 GHz. As redes DWDM de médio porte são responsáveis por cobrir áreas de até 500 km em circunferência, ou uma região com muitos prédios em grandes cidades. Além de uma topologia em anel, esse tipo de sistema pode ser usado para ligações ponto-a-ponto. A amplificação óptica nesse caso, já não é tão complexa. Compensadores de dispersão podem até não ser utilizados, mas uma equalização dos canais pode ser requerida. Esses sistemas são muito usados para redes com poucos nós, onde é necessário o transporte de uma diversidade de protocolos de serviço, como (TDM, SONET/SDH, ATM, IP, etc). Em muitos aspectos, sistemas de médio porte são sistemas de grande porte com sua capacidade reduzida. Muitas vezes, os sistemas vendidos aos clientes podem ser usados para grande porte ou médio porte dependendo da configuração.

Sistemas metropolitanos de pequeno porte têm menos do que 40 comprimentos de onda, com uma taxa de menos que 2.5 Gbps, com uma separação de 200 GHz. Por esse fato, esses sistemas são conhecidos por sistemas metropolitanos CWDM. Em Pequenas áreas com até 100 km em circunferência, redes ponto-a-ponto, grandes prédios, ou bairros residenciais, são usados sistemas CWDM. A amplificação para eles é simples e compacta baseada em OFA, pode até não ser necessária, devido à baixa distância. Decorrente dos poucos canais, 8 a 32, eles podem ser fixos e com poucos nós.

Em geral, os equipamentos usados para essa topologia são mais simples, e, portanto são mais baratos no mercado. São compactos, de fácil manutenção e exigem poucos componentes, sem amplificadores elaborados, *cross-connects*, e transceivers de menor preço e qualidade que os usados para redes DWDM.

Dados sobre transceivers CWDM e DWDM para esse tipo de rede podem ser encontrados nas folhas de dados em anexo.

3.8.3 REDES DE ACESSO

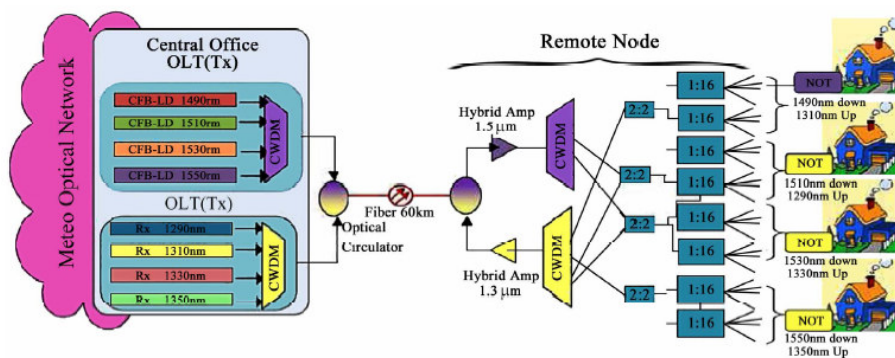


Figura 3.37 – Rede de Acesso WDM

Sistemas WDM podem ser usados também para redes de acesso. Nesse caso, pode ser usada uma rede CWDM, a qual é conectada a um OADM de outra rede maior, como uma rede metropolitana. Ela recebe o sinal retirado e o demultiplexa para taxas menores, as quais podem inseridas em fibras multimodo. Esse tipo de fibra é preferido, por dois motivos: custo e pelo fato de os links serem curtos. Os transceivers usados são simples, e os amplificadores e compensadores de dispersão não são necessários. Se for necessária amplificação, isso poderá ser feito com um amplificador de baixo custo. Componentes feitos com materiais mais baratos também fazem o custo baixar.

Apenas um link de 2.5 Gbps pode suprir a necessidade de banda de 8600 casas com 288 Kbps. Se pensarmos que em cada uma dessas casas temos 3 pessoas, estaremos suprindo uma comunidade de 25000 indivíduos. É sabido que nem todas as casas necessitam uma rede de 288 Kbps, porém esse exemplo mostra como um link de 2.5 Gbps pode suprir a necessidade de hoje e do futuro, em questão de banda.

4. PROJETO DE UM SISTEMA WDM

A alternativa de se usar redes metropolitanas ao invés de redes *long haul* (longas distâncias), foi feita para pela altíssima complexidade que a segunda apresenta em termos de perdas e efeitos indesejáveis.

Foram analisados projetos de redes metropolitanas de empresas brasileiras de telecomunicações e de energia.

A opção de apresentar um projeto de uma empresa de telecomunicações para o embasamento do trabalho foi escolhida devido à possibilidade de utilização desse trabalho para implantações futuras, até mesmo como documento de consulta por parte de engenheiros da área interessados nessa nova tecnologia.

É possível, a partir do conhecimento dos assuntos propostos durante este documento, que outras topologias sejam projetadas.

Como citado acima, há diversos tipos de efeitos que ocorrem na fibra no momento da propagação do laser. É necessário que se tenha em mente que tipos de redes serão projetadas, a partir do conhecimento das distâncias, caminhos a se percorrer, tipos de dados a se transmitir, distância entre os pontos de regeneração do sinal... Entre outras características que devem ser apresentadas pelo cliente. São diversas variáveis que são imprescindíveis para a realização do projeto da rede óptica.

Neste trabalho, foi feita uma abordagem sobre redes WDM metropolitanas de médio e pequeno porte. Essas redes possuem características específicas, como já foi visto nesse trabalho, no capítulo 3. Em resumo, as principais características dessas redes são:

- Topologia física em anel ou ponto-a-ponto.
- Podem conter uma, duas ou quatro fibras; Dependendo da necessidade de proteção.
- Transparente ao serviço.
- Taxas de 2.5 Gbps até 40 Gbps.

Portanto, para o desenvolvimento desse projeto, é preciso que se tenha em mente os possíveis fenômenos que podem ser desprezados, para determinado tipo de rede. Isso ocorre, porque a maioria deles é originada a partir de características próprias da fibra, e são relacionadas com a distância que essa percorre ao longo do enlace, como no caso de redes CWDM.

Para maior clareza, alguns enlaces ópticos licitados pela empresa de telecomunicações OI serão usados. A partir de uma análise das necessidades de distância e banda, se podem extrair os dados relevantes para o projeto.

Os enlaces estão divididos em estados e estão presentes em dez cidades metropolitanas do Brasil, como São Paulo e Rio de Janeiro. Porém, esses comunicam sites próximos, de no máximo vinte quilômetros. Assim, já se pode prever que a distância que a fibra percorrerá nesses enlaces será relevante para os enlaces que não possuem amplificação óptica, como no caso de CWDM, diferentemente de redes com maiores distâncias, nas quais se torna obrigatório o uso de amplificadores ópticos para viabilidade do enlace.

4.1. PROJETO DE REDE CWDM

Na região metropolitana do Rio de Janeiro, um enlace com as seguintes características foi solicitado:

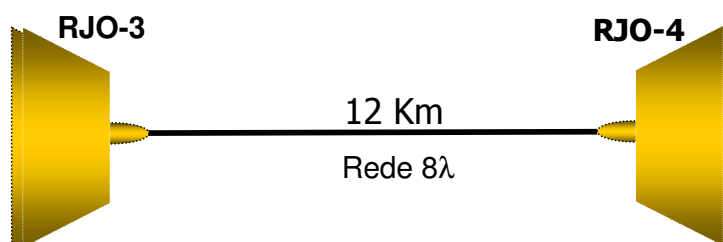


Figura 4.1 – Enlace Solicitado pela Empresa OI

Dados fornecidos do Enlace:

Distância: 12 km

Número de Canais: 8 canais

Taxa de transmissão dos canais: 1Gbps

Proteção: Não necessária

Tipo de fibra: Standard G.652

ROTA	TIPO DE SERVIÇO/CANAL	QTE
RJO-3 / RJO-4	GEth	8

Tabela 2 – Características Fornecidas pela Empresa OI

Assim, a partir desses dados, pode-se saber qual tecnologia deve ser usado, o efeito a se considerar no enlace, e assim, a viabilidade desse sistema.

Cada um desses dados será analisado abaixo:

4.1.1. TIPO DE TECNOLOGIA

Sabendo-se que o número de canais é baixo, será utilizada a tecnologia de multiplexação óptica CWDM. Isso, devido ao menor custo dos equipamentos e pela distância do enlace.

4.1.2. EFEITOS NA FIBRA

Os efeitos na fibra a se considerar são a atenuação e a dispersão cromática. O porquê dessa abordagem pode ser vista no capítulo 3. Os cálculos desses efeitos seguem abaixo:

4.1.2.1. CÁLCULO DE ATENUAÇÃO NA FIBRA

A fibra utilizada no enlace é do tipo G.652. Assim, a partir dos dados do anexo, pode-se considerar a atenuação por quilômetro igual a 0.23 dB/km. Assim, o cálculo é como segue:

Atenuação na fibra = Distância * Atenuação/km

Atenuação na fibra = 12 km * 0.23 dB/ km = 2.76 dB

4.1.2.2. CÁLCULO DA DISPERSÃO CROMÁTICA

Limite de Distância devido à dispersão cromática, utilizando-se a equação 3.13:

$$L_D = \frac{1}{B.D.\Delta\lambda}$$

Sendo, B = 1 Gbps, D = 17 ps/nm.km e $\Delta\lambda = 0.3\text{nm}$. Temos:

Ld = 196,07 km

Conclui-se que a dispersão cromática atuará nesse sistema somente a partir de 196,07 km. Portanto, para o enlace proposto, de poucos quilômetros, esse efeito não será significativo.

4.1.3. ANÁLISE DE POTÊNCIAS NO ENLACE

Não é muito usual em enlaces de fibra óptica, se trabalhar com potência em watts. Por esse motivo, todos os cálculos a seguir serão dados em dB. Para sabermos a potência que chegará no receptor do outro lado do enlace, temos que fazer o cálculo de todas as atenuações sofridas durante o percurso do sinal. Uma maneira simples de isso ser feito pode ser vista a seguir:

Equipamento	
<i>Transceiver</i> : Potência de Saída	0 dBm
Conectores Multiplexador	-0,25 dB
Multiplexador (Perda por inserção)	-4 dB
Conectores fibra	-0,25 dB
Fibra	-2,76 dB
Demultiplexador (Perda por inserção)	4 dB
Conectores Demultiplexador	0,25 dB
<i>Transceiver</i> : Sensibilidade da Entrada	-27 dBm

Tabela 3 – Potências no Sistema Óptico Simulado

Pode-se calcular a potência óptica que estará chegando no receptor, a partir do conhecimento da potência de transmissão e atenuação total, que podem ser vistas acima. Sendo a sensibilidade do receptor igual a -27 dBm, deve-se garantir que não estará chegando menos do que essa potência na entrada do *transceiver*.

$$\text{Potência no receptor} = \text{Potência no transmissor} - \text{Atenuações}$$

Potência no receptor = 0dBm – 11,51dB

Potência no receptor = -11,51dBm

Assim, podemos afirmar que a potência óptica no receptor não será um limitador desse enlace.

4.1.4 SIMULANDO O ENLACE

Acima, a partir do cálculo dos efeitos na fibra e potências do sistema, se concluiu que o enlace é viável. Porém, devemos ter um cuidado maior no momento da implementação desse sistema.

Devido ao alto custo desse tipo de rede, é conveniente que sejam feitas simulação via software, para uma análise mais completa. Nesse trabalho, como já foi mencionado, foi utilizado o software *Optisystem* 8, o qual possui características que ajudam muito no momento do projeto. A análise do olho, bem como ruídos e BER, podem ser verificadas facilmente a partir dessa simulação.

Abaixo, temos o layout sistema solicitado pela Oi, no ambiente do *Optisystem* 8:

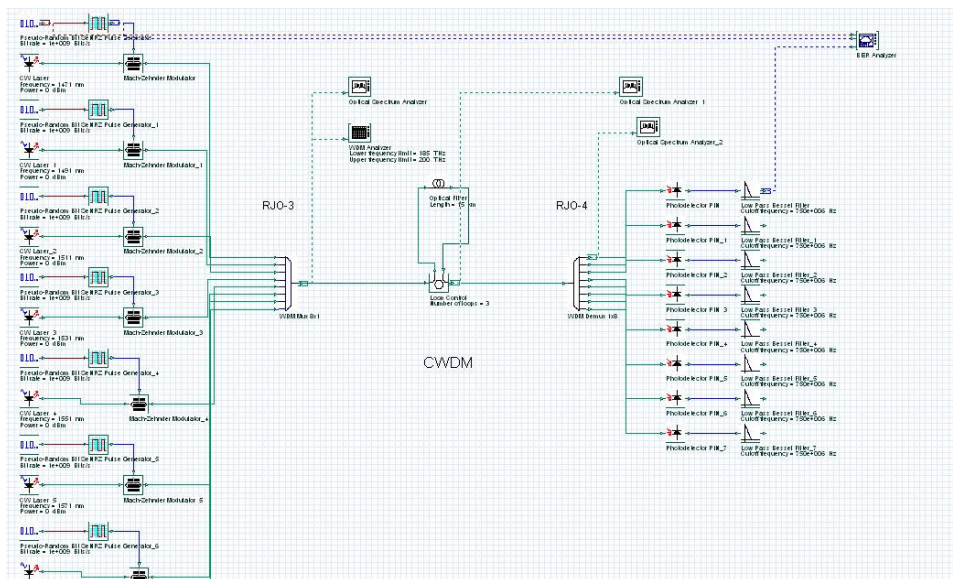


Figura 4.2 – Sistema CWDM Simulado

Nessa simulação foram utilizados transmissores ópticos, multiplexador e demultiplexador, receptores, analisadores de espectro, analisador de BER, analisador WDM, simulador de fibra, etc. O layout desses componentes pode ser visto na documentação do *Optisystem 8* em anexo.

Abaixo, temos o espectro óptico que está na saída do multiplexador:

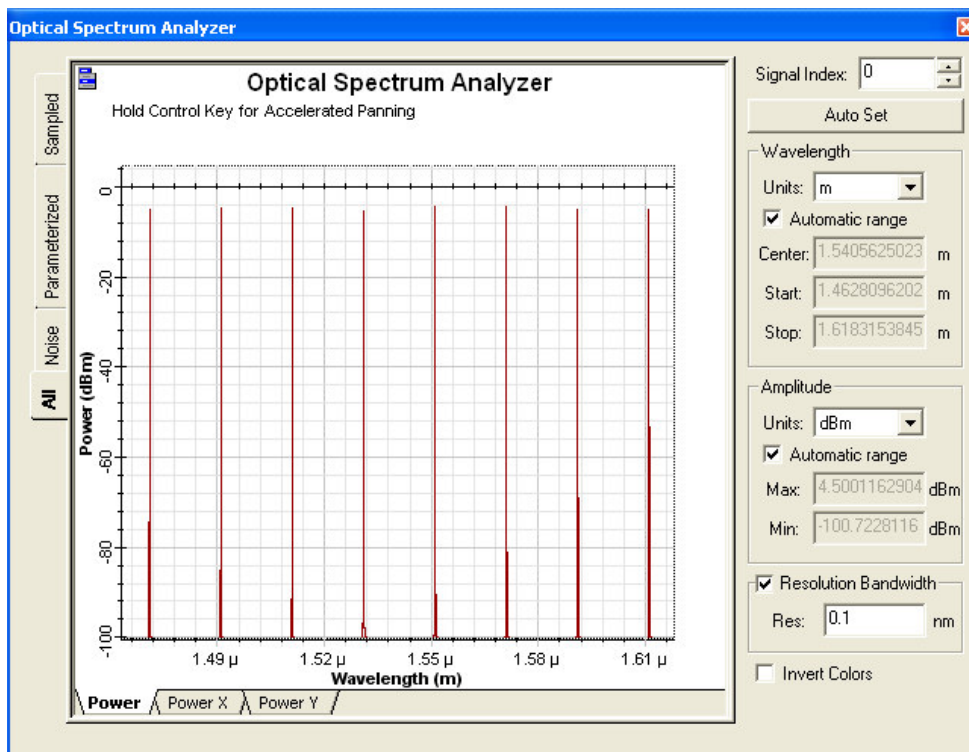


Figura 4.3 – Espectro de Frequência na Saída do Multiplexador

Na figura 4.3 é possível observar os pulsos centrados nas frequências da portadora, as quais são determinadas pela escolha dos transceivers do projeto. Como no caso acima, foi escolhida a tecnologia CWDM, é notável um espaçamento considerável entre os pulsos, o que diminui a possibilidade de *cross-talk* entre esses.

A principal intenção dessa simulação foi fazer a análise de BER e análise do olho, as quais estão explicadas no capítulo 3. Essas análises serão vistas a seguir.

4.1.4.A. ENSAIO PARA 12 KM DE FIBRA

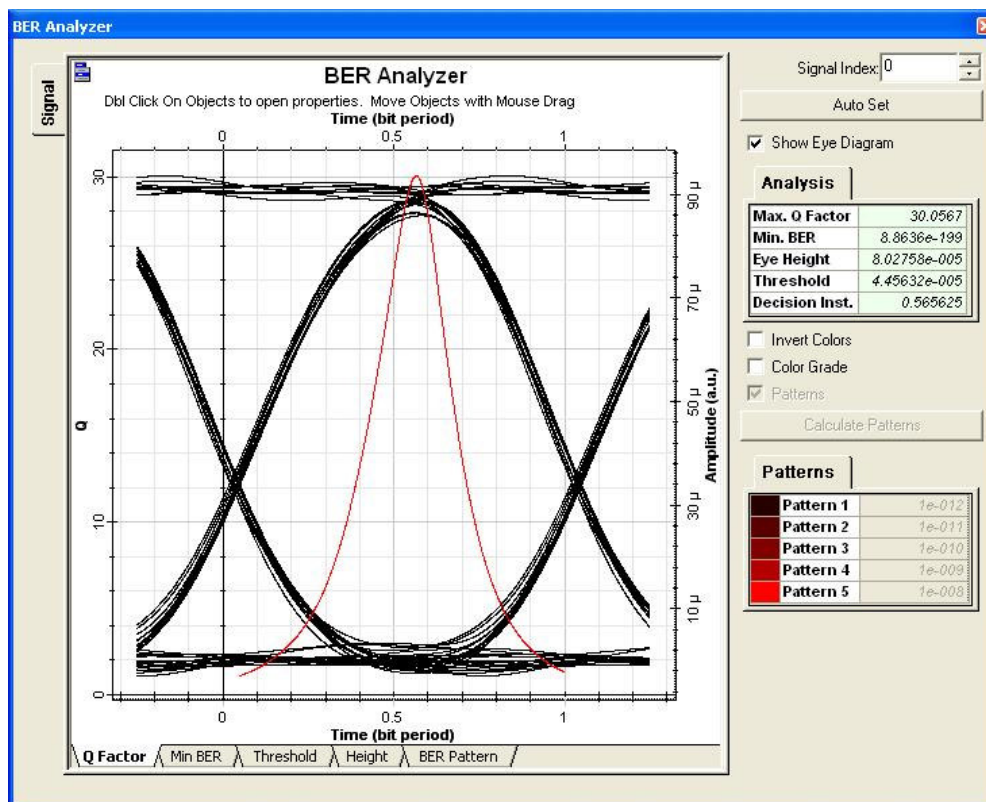


Figura 4.4 – Resultado da Simulação para 12 km

Como já era esperado, tendo-se calculado os principais efeitos do sistema teoricamente para 12 km de fibra, o enlace é viável. Pois, a taxa de BER é quase ideal, como pode ser visto na figura acima.

Para efeitos de conhecimento, foram feitas outras simulações, nas quais a distância do enlace foi aumentada gradualmente.

Para se saber a máxima distância do enlace, deve-se calcular quantos quilômetros de atenuação a potência do sistema suporta. Já é sabido, que a soma das atenuações do mux, demux e conectores, é igual a 8,75 dB. Assim:

Potência do transmissor = 0 dBm

Sensibilidade do Receptor = -27 dBm

Atenuação dos equipamentos e conectores = -8,75dB

Distância = Faixa dinâmica - Atenuação dos equipamentos e conectores / Atenuação da fibra

Distância = 27 dBm - 8,75 dBm / 0,23 dB/km = 79,34 km

4.1.4.B. ENSAIO PARA 40 KM DE FIBRA

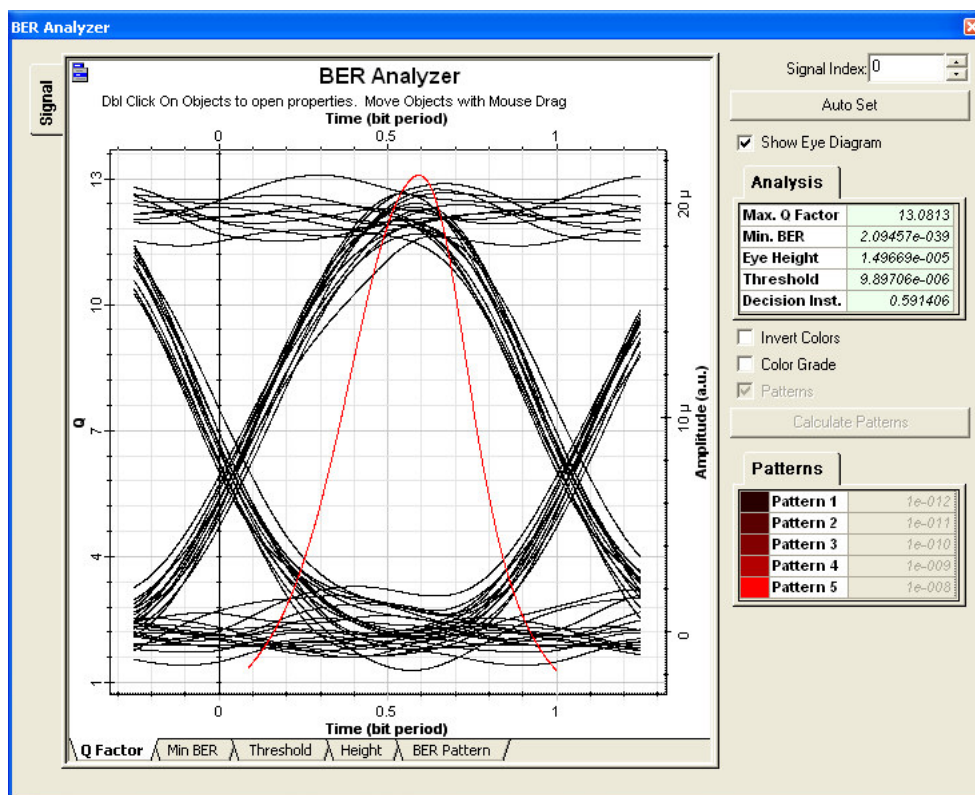


Figura 4.5 – Resultado da Simulação para 40 km

Pode-se perceber, através de análises visuais, que o “olho” diminuiu, e junto com esse efeito, a taxa de BER aumentou. Porém, essas mudanças em relação ao ensaio anterior, não são tão significativas, pois a taxa de BER ainda está ótima.

4.1.4.C. ENSAIO PARA 60 KM DE FIBRA

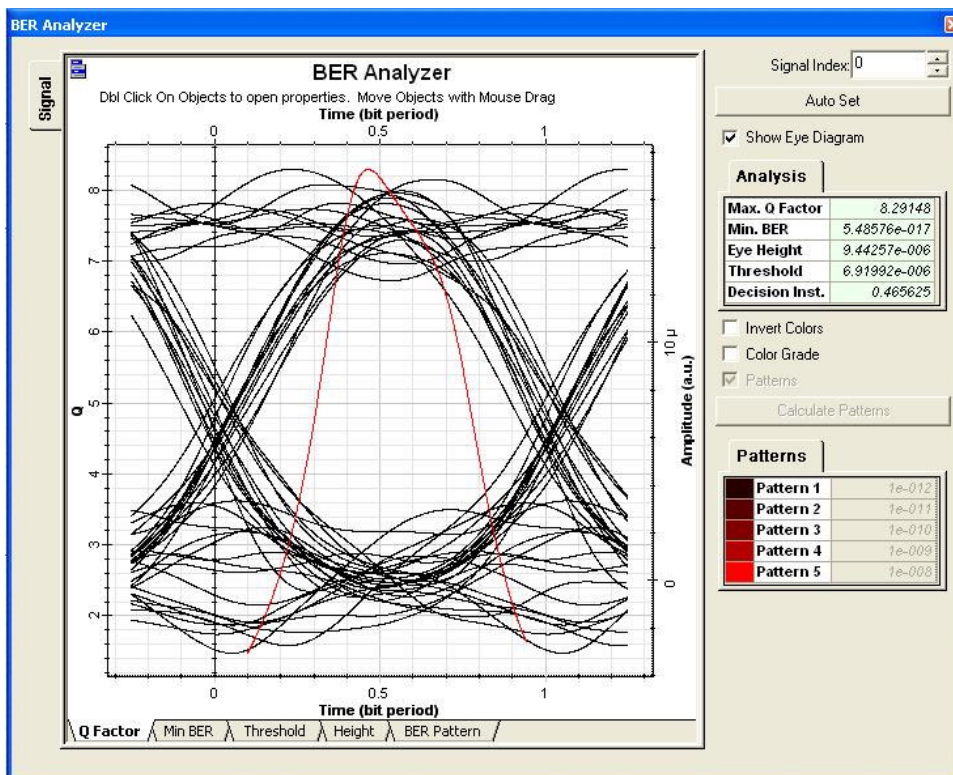


Figura 4.6 – Resultado da Simulação para 60 km

Assim como no ensaio para um enlace de 40 km, nesse ensaio para 60 km de fibra, não temos um resultado ruim. A taxa de BER está acima dos 10^{-9} , ou seja, acima da necessária para uma boa confiabilidade de um sistema CWDM. Isso porque a atenuação total na fibra é 12 dB, o que aumenta a atenuação total do sistema para 19,75 dB, sobrando ainda aproximadamente 8 dB de margem de segurança.

4.1.4.D. ENSAIO PARA 80 KM DE FIBRA

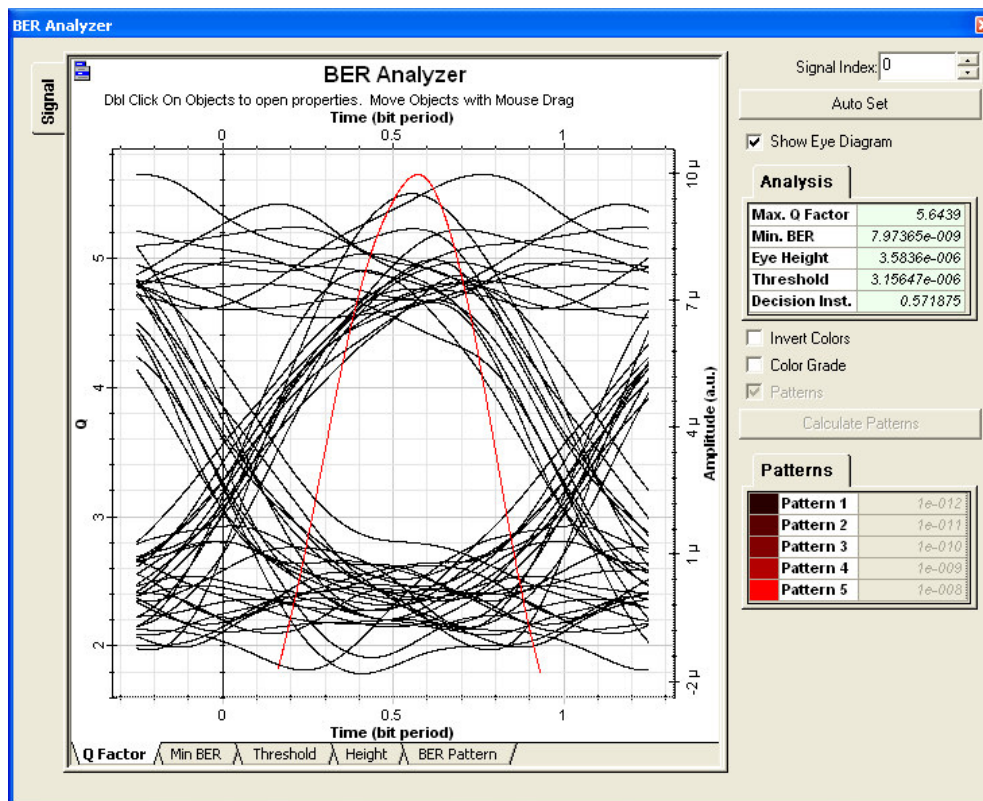


Figura 4.7 – Resultado da Simulação para 80 km

Por fim, o ensaio acima mostra, de acordo com os cálculos teóricos, que a limitação desse enlace se dá pela atenuação na fibra a uma distância menor 80 km. Analisando a figura 4.7, podemos ver que o olho diminuiu consideravelmente, de acordo com o esperado, pois a taxa de BER está em 10^{-9} , abaixo do limite do permitido para uma boa confiabilidade do enlace.

Portanto, se confirmam os resultados teóricos com respeito a dispersão cromática e atenuação, o que limitou o enlace em 80 km foi realmente a potência do sistema, e conseqüentemente a atenuação na fibra.

4.2. SIMULAÇÃO DE REDE DWDM

Utilizando-se como modelo um enlace que foi solicitado pela empresa Colombiana Costatel:

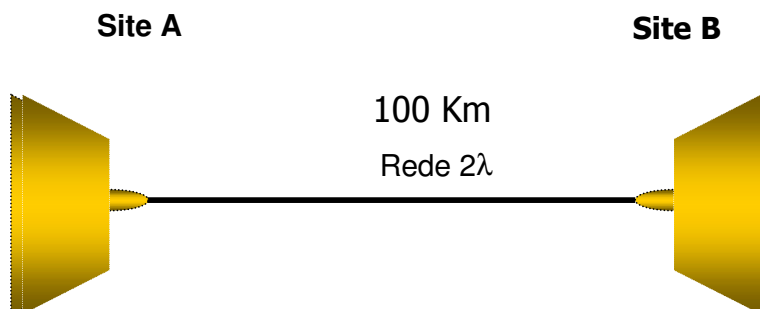


Figura 4.8 – Enlace Solicitado pela Empresa Costatel

Dados fornecidos do Enlace:

Distância: 100 km

Número de Canais: 2 canais

Taxa de transmissão dos canais: 2.5Gbps

Proteção: Não necessária

Tipo de fibra: Standard G.652

ROTA	TIPO DE SERVIÇO/CANAL	QTE
Site-A / Site-B	2.5 Gbps	2

Tabela 4 – Características Fornecidas pela Empresa Costatel

É possível que a partir dos dados acima, se projete um enlace WDM, o que será feito a seguir. Porém, ao invés de apenas dois canais como o solicitado, será levado em conta oito canais para que alguns efeitos sejam ilustrados.

4.2.1. TIPO DE TECNOLOGIA

Devido a distância entre os dois enlaces, já é possível saber que será necessário a utilização da tecnologia DWDM e não CWDM. Isso porque a necessidade de amplificação elimina a possibilidade de um enlace CWDM, como já citado anteriormente no capítulo 3. O objetivo de este projeto a seguir é apresentar um enlace usando a tecnologia de comunicação óptica DWDM abordada anteriormente.

4.2.2 EFEITOS NA FIBRA

Devido a mudança de tecnologia e a amplificação do sistema, outros efeitos devem ser considerados, além dos citados no projeto CWDM anterior. Agora, além de analisar as perdas na fibra, perdas no sistema e dispersão cromática, ainda é preciso que seja levado em conta o OSNR e o FWM (Efeito de Quatro Ondas). A abordagem desses assuntos foi feita ao longo do capítulo 3 desse documento. Assim, abaixo serão mostrados os cálculos necessários para o projeto, bem como a simulação do enlace.

4.2.2.1. CÁLCULO DA ATENUAÇÃO NA FIBRA

A atenuação na fibra é a mesma do projeto anterior, pois serão utilizadas a mesma fibra Standard G.652 e a mesma distância. Assim, a partir dos dados do anexo, pode-se considerar a atenuação por quilômetro igual a 0.23 dB/km. Assim, o cálculo é como segue:

$$\text{Atenuação na fibra} = \text{Distância} * \text{Atenuação/km}$$

$$\text{Atenuação na fibra} = 100 \text{ km} * 0.23 \text{ dB/ km} = 23 \text{ dB}$$

4.2.2.2. CÁLCULO DA DISPERSÃO CROMÁTICA

Limite de Distância devido à dispersão cromática, utilizando-se a equação 3.13:

$$L_D = \frac{1}{B.D.\Delta\lambda}$$

Sendo, $B = 2.5$ Gbps, $D = 17$ ps/nm.km e $\Delta\lambda = 0.3$ nm. Temos:

$$L_D = 78.43 \text{ km}$$

É importante notar a diferença entre a distância permitida com a tecnologia CWDM, e a com DWDM. Isso se deve ao aumento da taxa de transmissão B . Portanto, será necessária a compensação da dispersão cromática para que haja viabilidade desse enlace.

4.2.3. ANÁLISE DE POTÊNCIAS NO ENLACE

Assim como no projeto anterior, o cálculo da atenuação total será feita a partir do conhecimento de todas as atenuações do sistema, vistas na tabela 5.

Equipamento	
<i>Transceiver</i> : Potência de Saída	0 dBm
Conectores Multiplexador	-0,25 dB
Multiplexador (Perda por inserção)	-4 dB
Conectores fibra	-0,25 dB
Fibra	-23 dB
Demultiplexador (Perda por inserção)	-4 Db
Conectores Demultiplexador	-0,25 dB
<i>Transceiver</i> : Sensibilidade de Entrada	-21 dBm

Tabela 5 – Potências no Sistema Óptico Simulado

Pode-se calcular a potência óptica que estará chegando no receptor, a partir do conhecimento da potência de transmissão e atenuação total, que podem ser vistas acima. Sendo a sensibilidade do receptor igual a -21 dBm, deve-se garantir que estará chegando no mínimo esse valor para que a taxa de BER não ultrapasse o especificado para o enlace.

$$\text{Potência no receptor} = \text{Potência no transmissor} - \text{Atenuações}$$

$$\text{Potência no receptor} = 0 \text{ dBm} - 31,75 \text{ dB}$$

$$\text{Potência no receptor} = -31,75 \text{ dBm}$$

Assim, fica claro que não há a possibilidade de implantação desse sistema sem o uso de amplificadores ópticos.

O dimensionamento do amplificador é uma das mais importantes no momento do projeto. É preciso algumas variáveis sejam levadas em conta, para que o amplificador correto seja usado.

O amplificador, ou os amplificadores, devem ser escolhidos entre os três tipos já citados no capítulo 3: *booster*, pré-amplificador e amplificador de linha. Para o primeiro deles, é conveniente que se pense na potência total que irá passar pelo enlace. Assim esse tipo é mais adequado para poucos canais, pois esses não teriam potência suficiente para chegar até o outro lado do enlace, e assim não alcançariam um possível pré-amplificador. Para o pré-amplificador é importante que se considere a potência que está chegando nele, pois sua potência de entrada é muito baixa, podendo saturá-lo. Por último, o amplificador de linha é muito funcional, porém é preciso que haja um site para instalação desse equipamento, o que muitas vezes não é possível.

Essas são somente algumas situações que devem ser levadas em conta no momento do projeto.

4.2.4. ESCOLHA DO AMPLIFICADOR

Na saída do multiplexador, temos uma potência de:

Potência na Saída do Mux = Potência Total – Mux Atenuações

Potência na Saída do Mux = 9 dBm – 4.25 dB

Potência na Saída do Mux = 4.75 dBm

Sendo a entrada do amplificador com um limite de até -8 dBm, a primeira vista parece razoável que não se use um *booster*, e sim um pré-amplificador. Caso isso seja feito, será obtido na entrada do pré-amplificador:

Potência na Entrada do Pré-Amplificador = Potência na Saída do Mux – Atenuação na fibra

Potência na Entrada do Pré-Amplificador = 4.75 dBm – 23 dB

Potência na Entrada do Pré-Amplificador = -18.25 dBm

Assim, para esse projeto é vantajoso que seja usado um pré-amplificador ao invés de um amplificador de potência. Isso porque seria necessário o uso de um atenuador óptico, o que tornaria a solução mais cara e potência do sistema não seria bem aproveitada.

Portanto, já sido feita a escolha do amplificador, é necessário que seja especificado o ganho desse para que seja alcançada a potência de sensibilidade do receptor, ou seja, -21 dBm.

Após o sinal passar pelo pré-amplificador, ele sofrerá a atenuação do demultiplexador, bem como a dos conectores ópticos que estarão na saída desse. Portanto, para que a potência que estará chegando ao receptor de um dos canais seja de -21 dBm, precisamos dividir a potência total entre todos esses e calcular a atenuação que esses sofrerão. Porém, antes de calcular a potência que estará chegando em cada canal, o sinal deve ser amplificado pelo ganho do pré. Um ganho de 21 dB.

Assim,

Potência na Entrada do Demux = Potência na Entrada do Pré-Amplificador + Ganho

Potência na Entrada do Demux = -18,25 dBm +21 dB

Potência na Entrada do Demux = 2,75 dBm

Nessa etapa, ao passar pelo multiplexador, esse sofre uma atenuação:

Potência na Saída do Demux = 2.75 dBm – 4 dB

Potência na Saída do Demux = -1.25 dBm

Potência por Canal (W) = Potência total (W)/ N° de Canais

Potência por Canal (W) = 0,75 / 8

Potência por Canal (W) = 9,37E-2

Passando para dBm, obtemos:

Potência por Canal = -10,28 dBm

Portanto, um amplificador de ganho 21 dB é suficiente para que o sistema funcione corretamente. Além disso, é preciso que se tome cuidado com a potência de recepção máxima que o *transceiver* suporta, -6 dB (ver *datasheet*), caso contrário esse satura sua entrada.

4.2.5. SIMULANDO O ENLACE

Acima, a partir do cálculo dos efeitos na fibra e potências do sistema, se concluiu que o enlace é viável. Porém, devemos ter um cuidado maior no momento da implementação desse sistema.

Devido ao alto custo desse tipo de rede, é conveniente que sejam feitas simulação via software, para uma análise mais completa. Nesse trabalho, como já foi mencionado, foi utilizado o software *Optisystem 8*, o qual possui características que ajudam muito no

momento do projeto. A análise do olho, bem como ruídos e BER, podem ser verificadas facilmente a partir dessa simulação.

Abaixo, temos o layout sistema solicitado pela Costatel, no ambiente do *Optisystem 8*:

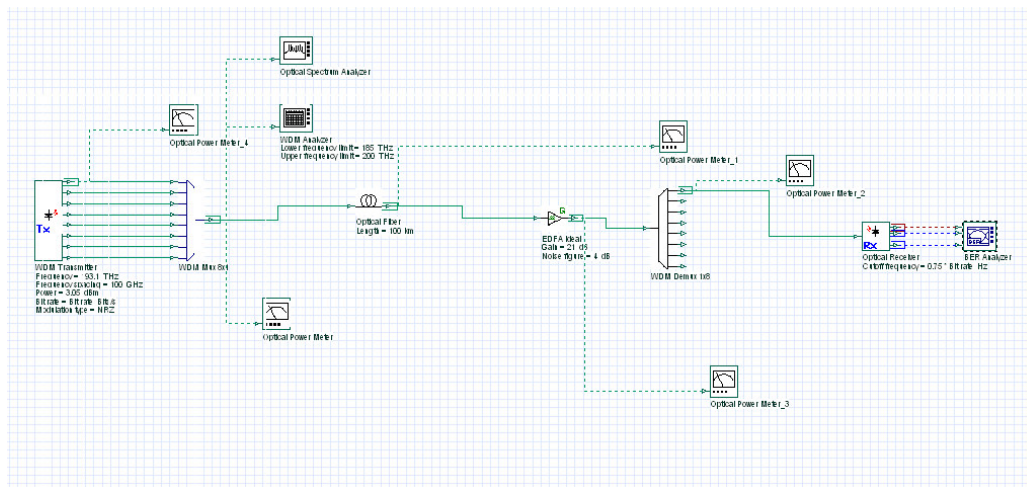


Figura 4.9 – Simulação para 100 km

Nessa simulação foram utilizados transmissores ópticos, multiplexador e demultiplexador, receptores, analisadores de espectro, analisador de BER, analisador WDM, simulador de fibra, etc. O layout desses componentes pode ser visto na documentação do Optisystem 8 em anexo.

Na figura 4.10, temos o espectro óptico que está na saída do multiplexador:

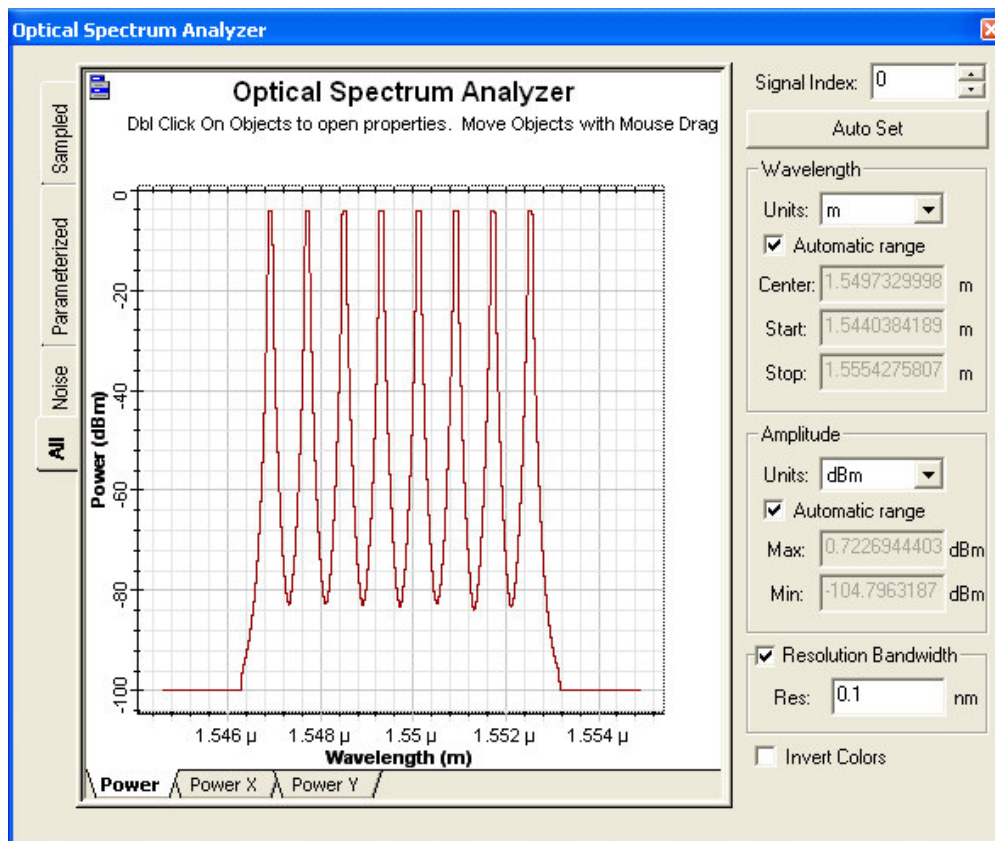


Figura 4.10 – Espectro de Frequência na Saída do Multiplexador

Na figura acima, novamente é possível observar os pulsos centrados nas frequências da portadora, as quais são determinadas pela escolha dos transceivers DWDM do projeto. Como no caso acima, foi escolhida a tecnologia DWDM, é notável um espaçamento pequeno entre os pulsos, o que aumenta o *cross-talk* entre esses.

As análises de BER e olho serão vistas a seguir.

4.2.5.A ENSAIO PARA 100 KM DE FIBRA:

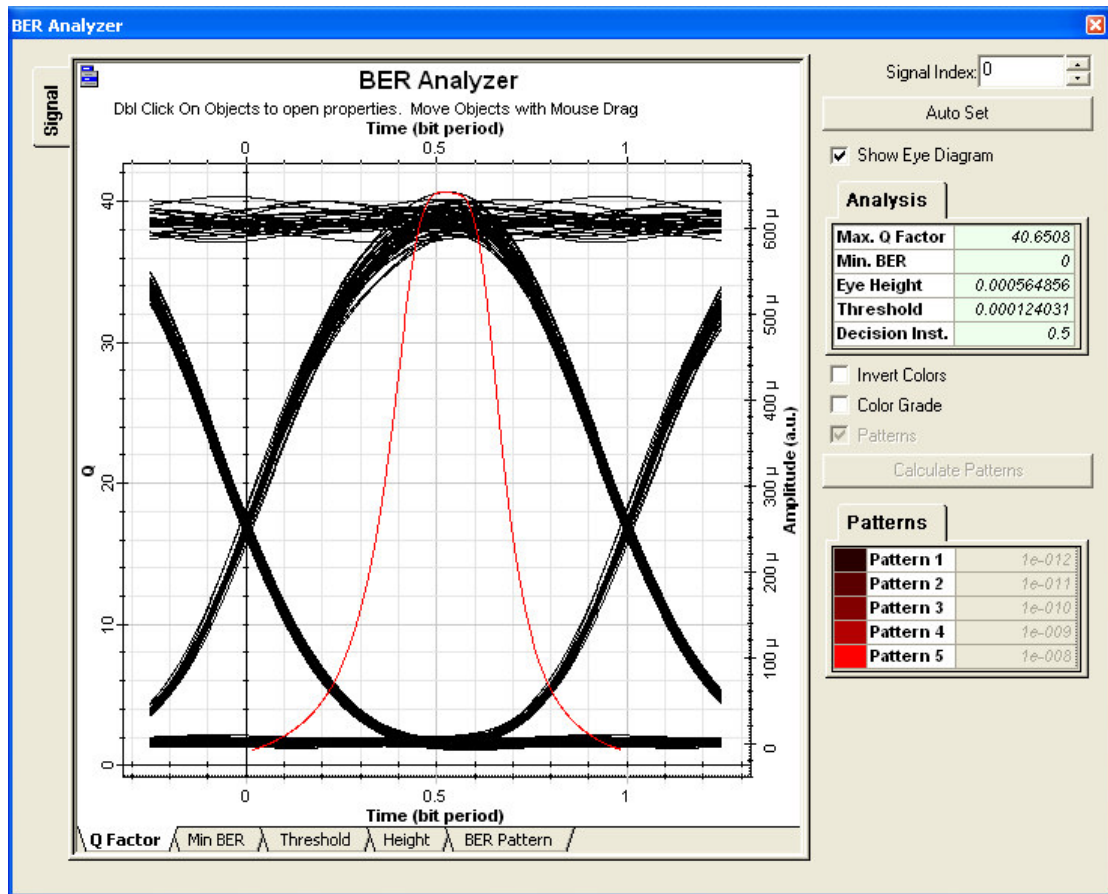


Figura 4.11 – Resultado da Simulação para 100 km

Pela análise teórica, já se esperava que o resultado fosse ótimo, pois a essa distância de enlace, somente a atenuação iria influenciar. Como foi usada amplificação do sinal, esse chegou integro ao outro nó.

5. RESULTADOS ALCANÇADOS

A partir da análise teórica do enlace solicitado pela empresa OI de telecomunicações, bem como a simulação dos mesmos, mostrou viável um enlace CWDM com uma taxa de 1 Gbps, a uma distância de até aproximadamente 80 km, suficiente para comunicação entre os 12 km solicitados. O fator limitante para esse enlace foi a atenuação da fibra. Isso foi concluído teoricamente pela equação de limite de distância e pelos ensaios realizados com o software *Optisystem*. A atenuação fez com que a taxa de BER aumentasse com distância entre os nós do enlace, o que já era esperado.

A análise do olho concorda com o que foi calculado, ou seja, o olho diminuiu com aumento da dispersão cromática.

O mesmo foi concluído com a análise da rede DWDM. A análise teórica do enlace solicitado pela empresa Costatel, bem como a simulação dos mesmos, mostrou viável um enlace DWDM com uma taxa de 2.5 Gbps, a uma distância de 100 km, suficiente para comunicação entre os pontos solicitados. Para esse enlace, o qual dispõe de amplificação óptica, a atenuação na fibra não seria um problema. Porém, para grandes distâncias a dispersão cromática começaria a interferir. Isso foi concluído teoricamente pela equação de limite de distância e pelos ensaios realizados com o software *Optisystem*.

A análise do olho concorda com o que foi calculado, ou seja, para uma distância de 100 km, o sistema funcionaria sem nenhum problema.

6. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

A partir desse trabalho de diplomação, foi concluída a importância que as redes de telecomunicações que utilizam WDM estão ganhando uma maior importância no cenário mundial, devido a sua flexibilidade e alta capacidade.

Porém, devido aos efeitos provenientes da fibra óptica, esse tipo de tecnologia se torna complexa e deve ser estudada a fundo para que uma rede complexa seja projetada. Além disso, a utilização de um software de análise óptica se torna indispensável, pois mesmo com a possibilidade de se calcular todo o efeito que podem prejudicar o sinal se tornaria inviável o cálculo para redes muito complexas, com muitos nós e alta taxa de transmissão.

Ao longo do capítulo 3, foram estudados os elementos que compõe um sistema óptico, bem como foram apresentados alguns módulos básicos para a utilização de uma rede óptica. Além disso, nesse capítulo foram mostrados os principais efeitos que atuam nesse tipo de sistema e suas conseqüências no que diz respeito a comunicação. Por fim, foi feita uma análise dos fundamentos da tecnologia WDM, e como ela é estruturada dentro das normas provenientes da ITU-T.

No capítulo 4, foram utilizados dois enlaces para a aplicação dos conhecimentos estudados. Nesse, foram feitas diversas simulações utilizando-se o software Optisystem 8.

O projeto CWDM feito à empresa OI pode satisfazer as necessidades por ela solicitada. Porém, é importante que se analise a possibilidade de expansão da rede, flexibilidade dos equipamentos escolhidos e a necessidade ou não de amplificação caso o número de canais aumente, já que o sistema CWDM é feito para pequenas redes.

O projeto DWDM feito à empresa Costatel pode satisfazer as necessidades por ela solicitadas. Além disso, caso necessite de ampliação, o sistema é flexível o suficiente para suprir diversas outras necessidades impostas pelo aumento de banda. Por exemplo,

multiplexador e demultiplexador não precisam ser modificados para se aumentar a 10 Gbps o enlace.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

[1] DWDM Networks, Devices and Technology, autor Stamatios V. Kartalopoulos, editora Wiley Inter-Science.

[2] Fiber-Optic Communication Systems, autor Govind P. Agrawal, editora editora Wiley Inter-Science.

[3] Amplificadores de Fibra Óptica para as Bandas C+L, autores António L. J. Teixeira, Mário J. N. Lima, Paulo S. B. André e J. Ferreira da Rocha, Dep. Eletrônica e Telecomunicações, Instituto de Telecomunicações - Pólo Av., Dep. Física. Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.

[4] Análise de Redes Ópticas WDM com Amplificadores EDFA e Raman Utilizando o Software Optisystem, autora Cleide Nielle Souza Neves, Universidade Federal do Pará.

[5] Características de Transmissão: Atenuação e Dispersão, autor Abel Costa, FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

[6] Anatomy of an Eye Diagram - a Primer, autor Guy Foster, Synthesys Research Inc

[7] Estudo de Sistemas WDM Incluindo Compensação de Dispersão, autor Daniel Naves de Luces Fortes, Tese de Mestrado no Instituto Militar de Engenharia

[8] DWDM em Redes Metropolitanas, autores Julliana de Oliveira Pinto, Cristiano Pinheiro Machado, Marcelo Portes de Albuquerque, Márcio Portes de Albuquerque, Nilton Alves Júnior, CAT Informática

[9] WDM Communication Systems, Optisystem Documents, autor Optiwave System Inc

8. ANEXOS

Em CD.