

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

BRUNO CANAL

SISTEMA PARA CÁLCULO DE ENLACES ÓPTICOS DWDM

Porto Alegre

2013

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

BRUNO CANAL

SISTEMA PARA CÁLCULO DE ENLACES ÓPTICOS DWDM

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: Prof. Dr. Álvaro Augusto Almeida de Salles

Porto Alegre

2013

BRUNO CANAL

SISTEMA PARA CÁLCULO DE ENLACES ÓPTICOS DWDM

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

Aprovado em: ____/____/____

Banca Examinadora:

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

Engenheiro Bernardo Schaeffer, Digitel S.A
Engenheiro pela UFRGS – Porto Alegre, Brasil.

Dr. Ivan Müller, UFRGS.
Doutor pela UFRGS – Porto Alegre, Brasil.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família por sempre apoiarem minhas escolhas e incentivarem a conquistar meus objetivos, especialmente no que se trata ao meu curso de graduação em Engenharia Elétrica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Álvaro Augusto Almeida de Salles, orientador deste projeto, pela vontade e empenho em me orientar durante este período.

Agradeço a todos os demais professores da UFRGS, em especial aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica, pelos ensinamentos a mim transmitidos.

Agradeço a UFRGS de um modo geral pelas oportunidades oferecidas durante o curso de graduação.

Agradeço a universidade Politecnico di Torino pela experiência proporcionada no intercâmbio por mim realizado.

Agradeço a Digitel S.A. por ter me acolhido durante o período de estágio e pela oportunidade de desenvolver este projeto. Em especial agradeço aos colegas de trabalho pelos momentos de discussão sobre diversos assuntos abordados neste projeto.

Agradeço aos membros da banca avaliadora por aceitarem o convite.

RESUMO

A crescente demanda por capacidade de transmissão de dados por fibra óptica é atendida pela implantação de sistemas *Dense Wavelength Division Multiplexing* (DWDM). Estes sistemas por sua vez devem se adaptar as especificações impostas pelo enlace a ser atendido, assim torna-se necessário o conhecimento das características de um sistema DWDM para a posterior simulação do mesmo, a fim de estimar as degradações sofridas pelo sinal transmitido. Com este objetivo, após o estudo do sistema e identificação de parâmetros que caracterizam a qualidade do sinal transmitido, desenvolveu-se um simulador de enlaces ópticos DWDM, que é baseado no software Simulink. Sendo composto de uma biblioteca que modela os diversos componentes do sistema, o simulador calcula os parâmetros de potência óptica, relação sinal ruído óptico (OSNR) e dispersão cromática do sinal transmitido. Além do cálculo de parâmetros, o simulador identifica as especificações dos componentes utilizados e gera alarme no caso do não atendimento das mesmas. A validação do simulador se deu através da comparação entre dados simulados e medidas feitas a partir de ensaios utilizando componentes da plataforma Prisma da empresa Digitel S.A. Analisando os dados obtidos na validação concluiu-se que o simulador apresentou resultados satisfatórios e pode ser utilizados no projeto de enlaces ópticos DWDM, visto que os resultados das simulações, por utilizarem as especificações de pior caso dos componentes, apresentaram valores piores do que os testes, mas dentro de uma faixa esperada.

Palavras chave: Transmissão óptica. DWDM. Potência óptica. OSNR. Dispersão cromática.

ABSTRACT

The growing demand for optical fiber transmission data capacity is satisfied by the employment of Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) systems. These systems must fit the specifications imposed by the link that should be build. With this goal it's important know the characteristics of DWDM system for simulation and estimation of signal's parameters degradation on the link. So after studying the system and identify the quality parameters of transmitted signal a Simulink software based was developed through modeling the systems components. This simulator calculate the optical power, optical signal-noise ratio, chromatic dispersion of signals and more the simulator gets component's specifications and generates alarms if any parameter is incorrect. The validation was made comparing data from simulator with measurements of tests using products of Digital S.A. The simulator proved to be able on DWDM network design since the parameters results were worst if compared with the tests measurements as expected because of the parameter's worst case of simulator.

Keywords: Optical Transmission. DWDM. Optical power. OSNR. Chromatic Dispersion.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	FIBRA ÓPTICA	15
2.1	ATENUAÇÃO	16
2.2	DISPERSÃO CROMÁTICA	18
2.3	DISPERSÃO POR MODO DE POLARIZAÇÃO (PMD)	21
2.4	NÃO-LINEARIDADES	22
2.4.1	<i>Espalhamento Raman Estimulado (SRS)</i>	22
2.4.2	<i>Espalhamento de Brillouin</i>	23
2.4.3	<i>Mistura de Quatro Ondas</i>	24
2.5	TIPOS DE FIBRAS ÓPTICAS MONOMODO.....	25
2.5.1	<i>Nondispersion-Shifted Fiber</i>	25
2.5.2	<i>Dispersion-Shifted Fiber (DSF)</i>	26
2.5.3	<i>Nonzero Dispersion-Shifted Fiber (NZDSF)</i>	27
3	TRANSCEIVERS	30
3.1	EMISSORES DE LUZ.....	30
3.2	FOTODETECTOR	32
3.2.1	<i>Fotodetectores PIN</i>	32
3.2.2	<i>Fotodetectores APD</i>	33
4	AMPLIFICADORES ÓPTICOS.....	35
4.1	AMPLIFICADOR EDFA.....	35
4.2	AMPLIFICADOR ÓPTICO RAMAN.....	38
5	COMPONENTES PASSIVOS DO SISTEMA DWDM	40
5.1	MUX E DEMUX	40
5.1.1	<i>TFF</i>	40
5.1.2	<i>AWG</i>	42
5.2	DCM	43
6	CÁLCULO DE ENLACES	45
6.1	DISPERSÃO CROMÁTICA	45
6.2	<i>POWER BUDGET</i>	46
6.3	OSNR	48

6.3.1	<i>Medição</i>	49
6.3.2	<i>Cálculo</i>	53
7	SIMULADOR DE ENLACE ÓPTICO	55
7.1	MODELAGEM DOS DISPOSITIVOS ÓPTICOS	55
7.1.1	<i>Transmissor</i>	56
7.1.2	<i>Multiplexadores</i>	57
7.1.3	<i>Atenuadores</i>	60
7.1.4	<i>Amplificador</i>	61
7.1.5	<i>Fibra</i>	62
7.1.6	<i>DCM</i>	63
7.1.7	<i>OADM</i>	64
7.1.8	<i>APS</i>	67
7.1.9	<i>Receptor</i>	67
7.1.10	<i>Analizador</i>	68
7.2	VALIDAÇÃO DO SOFTWARE	69
7.2.1	<i>Ensaio 1</i>	70
7.2.2	<i>Ensaio 2</i>	76
8	CONCLUSÕES	79
	REFERÊNCIAS	81
	APÊNDICE A	83
	APÊNDICE B	92
	ANEXO 1	100

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. SECÇÃO TRANSVERSAL DA FIBRA ÓPTICA	15
FIGURA 2. SECÇÃO TRANSVERSAL DA FIBRA MULTIMODO (À ESQUERDA) E MONOMODO (À DIREITA).	16
FIGURA 3. ATENUAÇÃO DA FIBRA ÓPTICA EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA	17
FIGURA 4. DIVISÕES DAS JANELAS E BANDAS DE UTILIZAÇÃO DA FIBRA ÓPTICA PARA TELECOMUNICAÇÃO	18
FIGURA 5. EFEITO DA DISPERSÃO CROMÁTICA EM UM PULSO ÓPTICO.	19
FIGURA 6. INTERFERÊNCIA INTERSIMBÓLICA CAUSADA PELA DISPERSÃO CROMÁTICA.	20
FIGURA 7. DISPERSÃO POR MODO DE POLARIZAÇÃO.	22
FIGURA 8. INTERAÇÃO FÓTON-FÔNON DO EFEITO SRS	23
FIGURA 9. EFEITO SBS	24
FIGURA 10. EFEITO DO FWM NO DOMÍNIO TEMPO E FREQUÊNCIA.....	25
FIGURA 11. LIMITES DO COEFICIENTE DE DISPERSÃO CROMÁTICA DA FIBRA CARACTERIZADA NA TABELA 3.	29
FIGURA 12. DISPERSÃO CROMÁTICA DAS PRINCIPAIS FIBRAS UTILIZADAS EM SISTEMAS DWDM.....	29
FIGURA 13. ESTRUTURA DOS LASERS DFB E DBR.	31
FIGURA 14. ESTRUTURA DE UM FOTODETECTOR PIN.....	33
FIGURA 15. ESTRUTURA DE UM FOTODETECTOR APD.....	33
FIGURA 16. ESTRUTURA DE UM AMPLIFICADOR ÓPTICO EDFA.....	36
FIGURA 17. EFEITO DE AMPLIFICAÇÃO EM EDFAS	37
FIGURA 18. EFEITO SRS UTILIZADO EM AMPLIFICADORES RAMAN	38
FIGURA 19. ESTRUTURA DE UM FILTRO FILME FINO (TFF).....	41
FIGURA 20. REPRESENTAÇÃO DE MUX E DEMUX.....	42
FIGURA 21. ESTRUTURA DE UM DEMULTIPLEXADOR ÓPTICO AWG.....	43
FIGURA 22. COMPENSADOR DE DISPERSÃO CROMÁTICA BASEADO EM REDES DE DIFRAÇÃO DE BRAGG	44
FIGURA 23. DIAGRAMA DO ORÇAMENTO DE ENERGIA DE UM ENLACE ÓPTICO.....	48
FIGURA 24. MEDIDA DA OSNR BASEADA NA INTERPOLAÇÃO LINEAR DO RUÍDO.	49
FIGURA 25. ATENUAÇÃO DO RUÍDO INTERCANAL POR DISPOSITIVOS DWDM	50
FIGURA 26. MEDIDA DA OSNR PELO MÉTODO DO OMBRO	51
FIGURA 27. MÉTODO DA DETECÇÃO DA POLARIZAÇÃO DIVERSA.....	51
FIGURA 28. DIAGRAMA DO MÉTODO DA SEPARAÇÃO DA POLARIZAÇÃO ÓPTICA	52
FIGURA 29. BIBLIOTECA CRIADA PARA O SIMULADOR DE ENLACES ÓPTICOS	56
FIGURA 30. INTERFACE GRÁFICA PARA ESPECIFICAR MODELO E CANAL UTILIZADO NO <i>TRANSCEIVER</i>	57
FIGURA 31. INTERFACE GRÁFICA DO MULTIPLEXADOR PARA A ESCOLHA DOS CANAIS A SEREM UTILIZADOS	59
FIGURA 32. ALARME DE CONEXÃO ERRÔNEA NO MULTIPLEXADOR.	60
FIGURA 33. INTERFACE GRÁFICA PARA ESPECIFICAR A ATENUAÇÃO DO BLOCO ATENUADOR.....	60

FIGURA 34. INTERFACE PARA A ESCOLHA DO MODELO DO AMPLIFICADOR ÓPTICO.....	61
FIGURA 35. JANELAS DE ALARME GERADAS PELO AMPLIFICADOR, À DIREITA BAIXA POTÊNCIA E À ESQUERDA ALTA POTÊNCIA.....	62
FIGURA 36. INTERFACE PARA DETERMINAR O TIPO, COMPRIMENTO E ATENUAÇÃO DA FIBRA.....	63
FIGURA 37. INTERFACE PARA A SELEÇÃO DO DCM UTILIZADO NA SIMULAÇÃO.	64
FIGURA 38. INTERFACE PARA SELEÇÃO DE CANAIS ADICIONADOS, RETIRADOS E OS QUE SERÃO FEITO JUMPERS. ..	66
FIGURA 39. MENSAGEM DE ERRO NA INSERÇÃO DE CANAIS NO OADM.....	66
FIGURA 40. TABELA COM VALORES DOS PARÂMETROS DOS CANAIS RETIRADOS PELO OADM.....	66
FIGURA 41. INTERFACE DE CONFIGURAÇÃO DO APS.	67
FIGURA 42. MENSAGENS DE ERRO EXIBIDAS NO RECEPTOR.	68
FIGURA 43. TABELA DE PARÂMETROS GERADA PELO <i>WDM ANALYZER</i>	68
FIGURA 44. ANÁLISE DO ESPECTRO DO SINAL NO ENSAIO 1 APÓS O DCM DE 80 KM.....	69
FIGURA 45. REPRESENTAÇÃO DO ENLACE DO ENSAIO 1.....	70
FIGURA 46. FOTO DO <i>SETUP</i> MONTADO PARA O ENSAIO 1.....	71
FIGURA 47. IMAGEM DO DIAGRAMA CRIADO NO SIMULADOR.....	72
FIGURA 48. DIAGRAMA DO SIMULADOR PARA O ENSAIO 2.	78

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. VALORES TÍPICOS ENCONTRADOS EM UM <i>LINK</i> DE FIBRA PADRÃO.	26
TABELA 2. VALORES TÍPICOS ENCONTRADOS EM UM <i>LINK</i> DE FIBRA G.653	27
TABELA 3. EXEMPLOS DE ATRIBUTOS DA FIBRA G.655	28
TABELA 4. EQUAÇÕES PARA O CÁLCULO DA DISPERSÃO CROMÁTICA EM UMA FIBRA ÓPTICA.....	45
TABELA 5. ATENUAÇÃO MÍNIMA ENCONTRADA NO ENSAIO DE MUX E DEMUX.	58
TABELA 6. RESULTADOS OBTIDOS DA TABELA 5.	58
TABELA 7. VALORES DAS ATENUAÇÕES POR CANAL DO MULTIPLEXADOR.	59
TABELA 8. VALORES DE ATENUAÇÕES MÍNIMAS MEDIDAS NOS OADMS.	65
TABELA 9. RESULTADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA TABELA 8.....	65
TABELA 10. VALORES DE ATENUAÇÃO POR CANAL UTILIZADOS NO OADM.	65
TABELA 11. MÉDIA DO ERRO DOS CANAIS, PARA OS VALORES DOS PARÂMETROS DE CADA COMPONENTE.	74
TABELA 12. PARÂMETROS DO SINAL, MEDIDOS E CALCULADOS, AO FIM DO ENLACE DO ENSAIO 1.....	75
TABELA 13. PARÂMETROS DO SINAL, MEDIDOS E CALCULADOS, AO FIM DO ENLACE DO ENSAIO 2.....	76
TABELA 14. MÉDIA DO ERRO DOS CANAIS PARA OS VALORES DOS PARÂMETROS DO ENSAIO 2.	77

LISTA DE ABREVIATURAS

APC	<i>Angle Polish Connector</i>
APD	<i>Avalanche Photodiode</i>
APS	<i>Automatic Protection Switch</i>
ASE	<i>Amplified Spontaneous Emission</i>
AWG	<i>Array Waveguide Gratings</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>
CWDM	<i>Coarse Wavelength Division Multiplexing</i>
DBR	<i>Distributed Bragg Reflector</i>
DCM	<i>Dispersion Compensation Module</i>
DEMUX	Demultiplexador
DFB	<i>Distributed Feedback</i>
DGD	<i>Differential Group Delay</i>
DRS	<i>Double Rayleigh Scattering</i>
DSF	<i>Dispersion-Shifted Fiber</i>
EDFA	<i>Erbium-doped Fiber Amplifier</i>
FBG	<i>Fiber Bragg Gratings</i>
FWM	<i>Four Wave Mixing</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
ISI	Interferência Intersimbólica
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
LED	<i>Light-emitting Diodes</i>
MUX	Multiplexador
NZDSF	<i>Nonzero Dispersion-Shifted Fiber</i>
OADM	<i>Optical Add Drop Multiplexers</i>
OSA	<i>Optical Spectrum Analyzer</i>
OSNR	<i>Optical Signal to Noise Ratio</i>
PMD	Dispersão por Modo de Polarização
RMS	<i>Root Mean Square</i>

SBS	<i>Stimulated Brillouin Scattering</i>
SRS	<i>Stimulated Raman Scattering</i>
TFF	<i>Thin Film Filter</i>
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>

1 Introdução

A ascensão do uso da internet, e outros meios de comunicação, tornou fundamental o aumento da capacidade das redes de transmissão de dados. A fibra óptica tem se mostrado uma grande aliada nesta missão com o desenvolvimento de redes DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing), estes sistemas são capazes de criar redes muito densas, pois multiplexam diversos canais em uma única fibra óptica.

Na atualidade, já existem estudos para a implantação de 160 canais em uma única fibra, isto se torna possível através da modulação dos sinais em comprimentos de onda específicos. Esta característica faz com que o sistema DWDM seja um grande aliado à expansão da capacidade das fibras, pois a qualquer momento novos canais podem ser adicionados à rede, sem interferir nos canais já existentes, além do mais, o sistema DWDM é transparente a protocolos e a taxa de transferência por se tratar de um sistema a nível físico.

Contudo, a maior densidade de dados e as longas distâncias atendidas pelas redes de transmissão, aumentam a sensibilidade do sistema à degradação do sinal. Sendo a fibra um meio não ideal, o sinal sofre atenuação e distorções lineares e não lineares. A atenuação do sinal pode ser compensada através de amplificadores ópticos, já as distorções dependem de suas naturezas, sendo algumas facilmente compensadas e outras pouco conhecidas. Nota-se assim a necessidade de métodos de cálculos da degradação e qualidade do sinal transmitido, para que seja possível conhecer a viabilidade técnica e econômica do desenvolvimento de uma rede de transmissão óptica.

Este trabalho é composto de oito partes sendo a primeira dedicada à introdução do que foi abordado no projeto. No capítulo seguinte é apresentada a fibra, meio por onde são transportados os dados, apontando efeitos que causam a degradação do sinal na mesma. Os capítulos três e quatro detalham os componentes ativos utilizados em sistemas DWDM, *transceivers* e amplificadores respectivamente. Na quinta etapa são apresentados os componentes passivos, os quais lidam com sinais ópticos inserindo atenuações na potência dos mesmos. No capítulo seis é estudada a forma de cálculo dos parâmetros a serem determinados pelo simulador, que é apresentado no capítulo sete com os testes para a sua validação. Por fim, as conclusões e trabalhos futuros estão apresentados no capítulo oito.

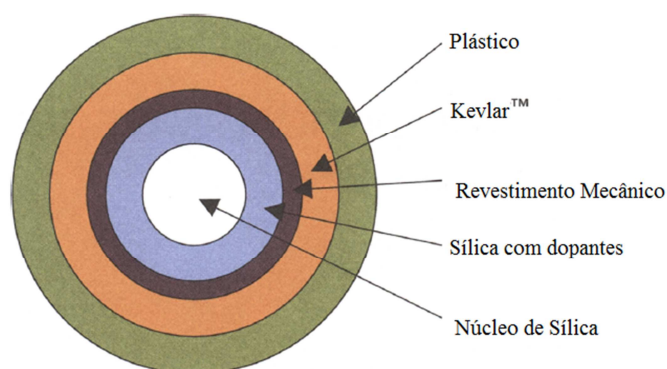
2 Fibra Óptica

A fibra revolucionou a comunicação óptica através dos avanços tecnológicos implementados na sua fabricação. Isto ocorreu entre as décadas de 70 e 80 com o controle do material dopante da fibra e o estudo do comportamento de comprimentos de onda específicos propagados neste guia.

Além da baixa atenuação do sinal, entorno de 0,2dB/km, a fibra óptica apresenta propriedades que não são encontradas em cabos de cobre. Por exemplo, a fibra é imune a interferências eletromagnéticas o que proporciona transmissões de dados bastante densas e a longas distancias.

A fibra é constituída basicamente por cinco camadas; a parte central é composta por um núcleo de sílica envolta por outra camada de sílica com diferente concentração de dopantes. Estas duas camadas são responsáveis pelas características de propagação da luz. Mais externamente aparecem as camadas estruturais; primeiramente uma camada para absorver estresses mecânicos devido à manipulação da fibra seguida por uma camada compostas por Kevlar™, material muito resistente a trações e ao calor. Tudo isso é então envolto por uma camada plástica como pode ser visto na Figura 1 (KARTALOPOULOS, 2000).

Figura 1. Secção transversal da fibra óptica

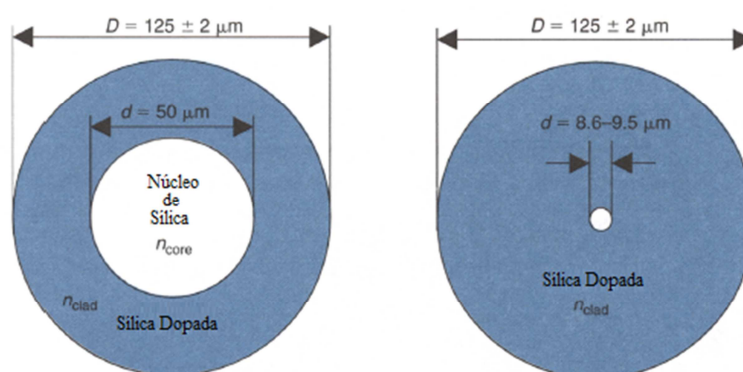


FONTE: (KARTALOPOULOS, 2000)

Além da concentração de dopantes existe outro fator que altera as características da propagação da luz na fibra: o diâmetro do núcleo e da sílica que o envolve. Tipicamente o diâmetro total de sílica de uma fibra tem a dimensão de 125µm, mas o núcleo pode variar seu diâmetro,

sendo este de $50\mu\text{m}$ para fibras multimodo e $9\mu\text{m}$ para fibras monomodo (ITU-T G.652) como observa-se na Figura 2.

Figura 2. Secção transversal da fibra multimodo (à esquerda) e monomodo (à direita).



FONTE: (KARTALOPOULOS, 2000)

Conforme o sinal se propaga na fibra ele sofre degradações, as quais limitam o alcance de um enlace óptico. Para atender distâncias superiores, o sinal deve ser amplificado e algumas vezes até regenerado. Obviamente isto é indesejado, pois aumenta muito o custo do *link* de dados.

A degradação do sinal pode ser dividida em dois principais gêneros; degradações lineares e não lineares. Degradações lineares são as que se acumulam conforme a propagação do sinal ao longo da fibra, como a atenuação e a dispersão cromática. Já as não lineares são devidas aos altos níveis de potência injetados na fibra e até mesmo por falhas estruturais da mesma.

Neste trabalho foram estudados somente efeitos na fibra monomodo, a qual é utilizada em sistemas DWDM, pois apresenta menor atenuação e maior largura de banda tornando possíveis *links* de longas distâncias e mais densos.

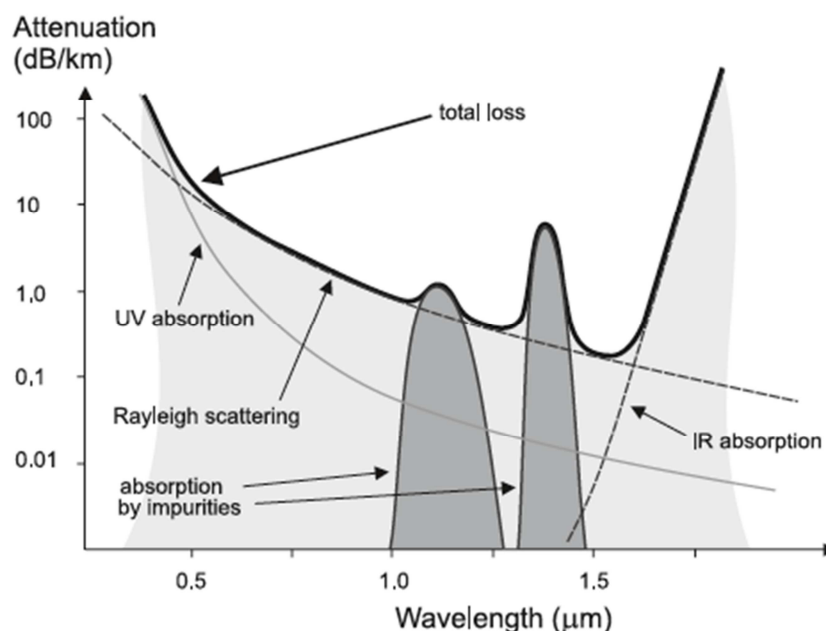
2.1 Atenuação

A atenuação na fibra é dada em dB/km e é tipicamente apresentada em função do comprimento de onda utilizado para a transmissão do sinal como observa-se na Figura 3.

Existem dois processos que determinam as perdas na fibra, a absorção e o espalhamento de Rayleigh, sendo que a absorção está subdividida em absorção extrínseca e intrínseca.

A absorção extrínseca está ligada à composição da fibra. Devido ao método de fabricação, aparecem impurezas na fibra como metais (cobre e ferro) e água, sendo a última mais perceptível. A presença de vapor d'água, no momento da fabricação da fibra, faz com que íons de hidroxila (OH^-) se dissolvam no vidro, apesar do processo fundamental de absorção ocorrer em 2700nm, aparecem harmônicos absorção em 1400, 950 e 750nm. Atualmente, podem-se encontrar fibras comerciais em que o pico de hidroxila é bem reduzido, é o caso da fibra AllWave™ da Lucent Technologies, que com sua tecnologia de fabricação é capaz de trabalhar com uma janela que vai de 1335nm a 1625nm, o que corresponde a 500 canais distanciados 100 GHz entre si.

Figura 3. Atenuação da fibra óptica em função do comprimento de onda



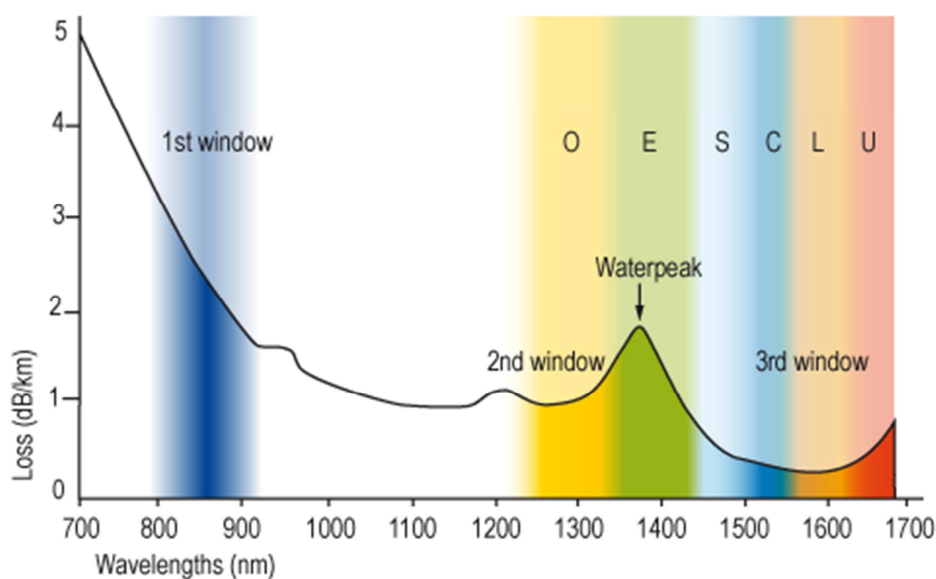
FONTE: (EMCORE Corporation, 2013)

A absorção intrínseca está ligada a interação da luz com a fibra. Na região ultravioleta ocorre a absorção UV, que consiste na interação entre o campo eletromagnético e a estrutura eletrônica da fibra. A absorção ocorre quando um fóton interage com um elétron na banda de valência, excitando-o para um nível de energia superior. A absorção IR, região infravermelha, é devido à interação do campo com a estrutura atômica da fibra, ou seja, transferências de energia do campo para as ligações químicas da estrutura.

O espalhamento de Rayleigh (Rayleigh Scattering) é o processo que define a cor azulada do céu. Conforme a luz se propaga encontra variações dos índices de refração, resultantes de imperfeições na fibra e flutuações na sua composição, com isso a luz se espalha fazendo com que parte de sua potência seja lançada para fora da fibra ou até mesmo retorne por ela. Este efeito apresenta uma dependência de quarta ordem com o comprimento da onda (λ^{-4}), o que pode ser notado na Figura 3.

Devido aos efeitos citados acima a utilização da fibra está dividida em três janelas de utilização. A primeira está localizada entre os comprimentos de onda de 800 a 900nm e é utilizada em fibras multimodo, a segunda está entre os picos de hidroxila, utilizada na tecnologia CWDM, a qual ocupa também a terceira janela. O sistema DWDM, discutido neste trabalho, ocupa a terceira janela, mais precisamente a banda C (1520 a 1560nm). Entretanto no Japão utiliza-se também a banda L (1560 a 1620nm) para esta tecnologia aumentando assim a capacidade da fibra. Esta divisão pode ser observada na Figura 4.

Figura 4. Divisões das janelas e bandas de utilização da fibra óptica para telecomunicação



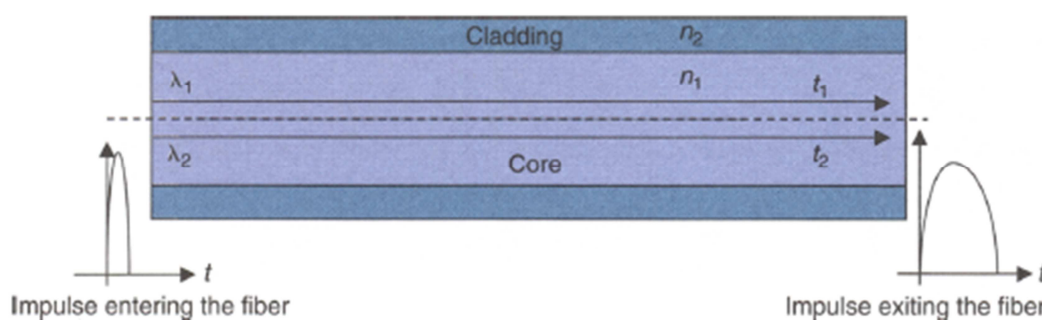
FONTE: (PANDA CAM DIREKT, 2013)

2.2 Dispersão Cromática

Para percorrer uma determinada distância L de uma fibra, uma componente de frequência específica ω toma o tempo de $T = L/V_g$, na qual V_g é a velocidade de grupo da onda em questão (AGRAWAL, 2002).

No entanto, como a luz não apresenta um espectro de frequência infinitamente estreito, o sinal é composto por diferentes frequências ópticas. Como o índice de refração depende do comprimento de onda em questão, as componentes do sinal viajam a velocidades diferentes. Assim inicialmente o pulso de luz apresentará uma duração bem definida, sua energia estará concentrada em um curto espaço de tempo. Ao decorrer da propagação esta energia ocupará um maior espaço de tempo, efeito este conhecido como dispersão cromática, que pode ser observada na Figura 5.

Figura 5. Efeito da dispersão cromática em um pulso óptico.



FONTE: (KARTALOPOULOS, 2000)

Substituindo a frequência ω pelo comprimento da onda λ , comumente utilizado em transmissões ópticas, pode-se representar a diferença no tempo de transmissão das componentes de determinado sinal através da equação (1) (AGRAWAL, 2002):

$$\Delta T = DL\Delta\lambda \quad (1)$$

Na qual:

D = parâmetro de dispersão, $\frac{ps}{nm \cdot km}$;

L = comprimento da fibra, km;

$\Delta\lambda$ = largura de banda do canal, nm.

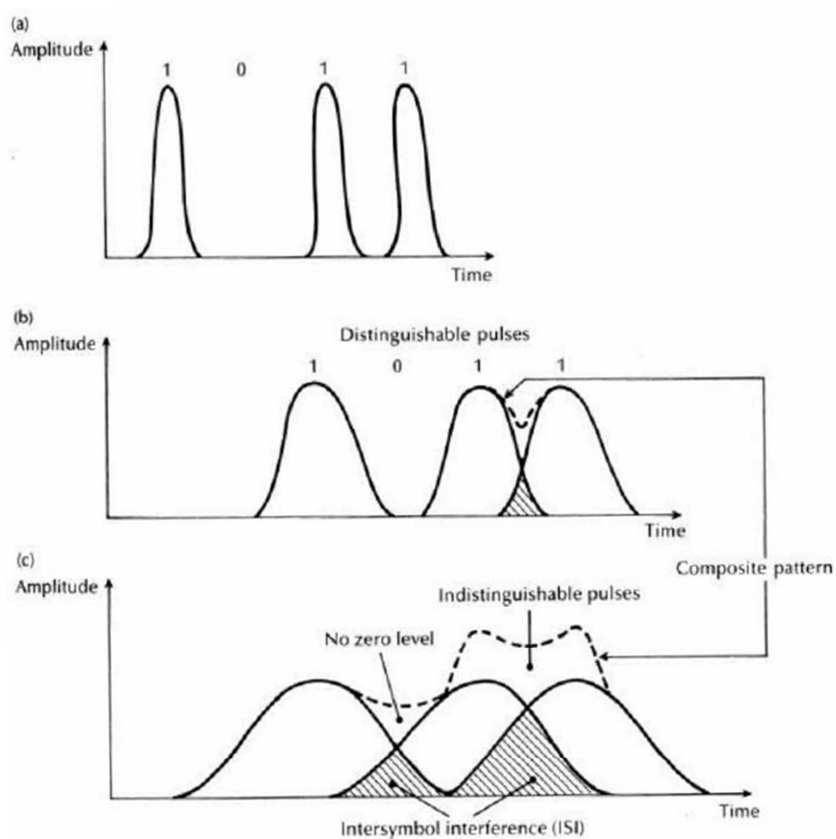
Além da variação do índice de refração devido à frequência da luz, também há o efeito da diferença da refração da camada de sílica dopada. A alteração desta propriedade física da fibra no processo de fabricação permite a criação de fibras com diferentes características de dispersão como as fibras de dispersão deslocada (CHOMYCZ, 2009).

Conforme aumenta a taxa de transmissão, a dispersão cromática se torna mais crítica, podendo seu limite ser estimado pelo critério $B\Delta T < 1$, sendo B o bit rate do sistema. Utilizando a Equação (1) tem-se (AGRAWAL, 2002):

$$B|D|L\Delta\lambda < 1 \quad (2)$$

Não sendo respeitado este critério pode surgir o efeito ISI, interferência intersimbólica, observada na Figura 6, assim o receptor não conseguirá identificar bits adjacentes.

Figura 6. Interferência intersimbólica causada pela dispersão cromática.



FONTE: (PRA, 2012)

Observando a Equação (2), nota-se que para atingir maiores distâncias de transmissão, sem afetar a qualidade do sinal, com *bit rates* cada vez maiores, busca-se a redução da largura de banda do transmissor (menor $\Delta\lambda$) ou a redução do parâmetro de dispersão da fibra (D).

2.3 Dispersão por Modo de Polarização (PMD)

A PMD, Figura 7, é uma propriedade da fibra monomodo ou de componentes ópticos na qual a dispersão do pulso é causada por uma diferença na velocidade de propagação das polarizações ortogonais do sinal. A diferença dos índices de refração para cada modo de polarização é causado pela birrefringência da fibra. Assim como no caso da dispersão cromática, a PMD também se trata de uma diferencial de atraso de grupo, DGD (do inglês, *Differential Group Delay*), e é medida em picosegundos. A PMD é definida como a média linear de vários valores de DGD instantâneos do caminho da onda, ou como o valor RMS destes diferenciais (CHOMYCZ, 2009).

A PMD pode ser expressa como a raiz quadrada do comprimento da fibra, multiplicada pelo coeficiente de modo de polarização, conforme a equação (3). Tipicamente este coeficiente é especificado pelos fabricantes de fibras ópticas para um determinado comprimento de fibra.

$$PMD = PMD_c \times \sqrt{L} \quad (3)$$

Onde:

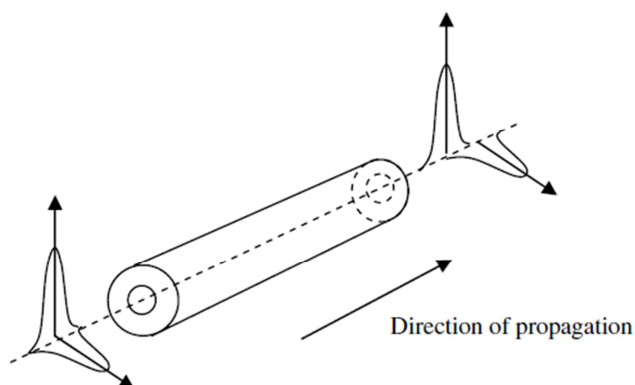
PMD = dispersão por modo de polarização, ps;

PMD_c = coeficiente de PMD, $\frac{ps}{\sqrt{km}}$;

L = comprimento da fibra, km.

A PMD pode causar interferência intersimbólica nas transmissões de altas taxas de bit, normalmente acima de 10Gbps. Em fibras antigas há uma maior ocorrência de PMD, possivelmente ocasionada pelas baixas tolerâncias na fabricação da mesma (CHOMYCZ, 2009).

Figura 7. Dispersão por modo de polarização.



FONTE: (AZADEH, 2009)

2.4 Não-Linearidades

Quando a luz se propaga na fibra, fótons e átomos interagem e em certas circunstâncias fótons podem ser absorvidos por átomos elevando-os a altos níveis de energia. Novos fótons podem provocar a queda dos átomos a seu estado de equilíbrio liberando energia. Esta interação fóton-átomo faz com que os fótons se propaguem através da fibra com velocidade dependente de sua energia, $E = h\nu$ (KARTALOPOULOS, 2000).

Além das interações fóton-átomo, podem ocorrer também interações fóton-fóton, fóton-átomo-fóton, tendo como resultados fenômenos complexos, muitos deles ainda não bem entendidos. Estas interações são conhecidas como fenômenos não lineares, sendo os principais deles o Espalhamento Raman, Espalhamento de Brillouin e a Mistura de Quatro Ondas (KARTALOPOULOS, 2000).

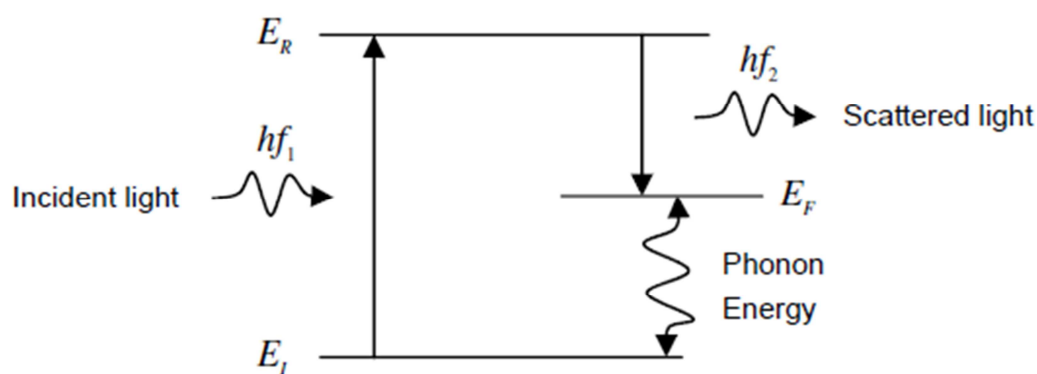
2.4.1 Espalhamento Raman Estimulado (SRS)

O Espalhamento Raman Estimulado, SRS (do inglês, *Stimulated Raman Scattering*) é proveniente da interação fóton-fônon, como pode ser observado na Figura 8. Um fóton com energia hf_1 é absorvido pela estrutura molecular da sílica elevando-a ao nível de energia E_R , após, a molécula decai para o nível E_F , emitindo um fóton de com energia hf_2 . Este fóton, que possui frequência diferente do incidente, é chamado de Fóton de Stokes. A diferença entre a

energia do fóton absorvido e a do emitido, corresponde à energia do fônon produzido (AZADEH, 2009).

Por causa da geração do fônon, o fóton emitido possui uma energia menor, ou seja, ele sofre um deslocamento de frequência, logo também de comprimento de onda de aproximadamente +125nm. Isto pode ser prejudicial em um sistema WDM no caso de inicialmente tratar-se de um fóton com baixo comprimento de onda, o fóton emitido pode interferir nos canais com comprimento de onda maiores. Este efeito é utilizado em amplificadores Raman que é discutido no capítulo 4.2 (AZADEH, 2009).

Figura 8. Interação fóton-fônon do efeito SRS

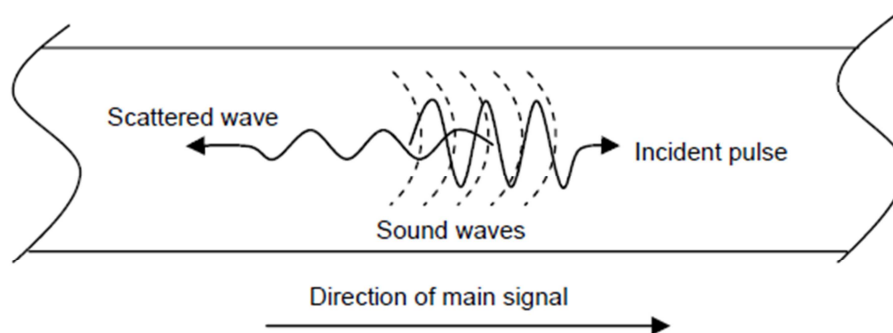


FONTE: (AZADEH, 2009)

2.4.2 Espalhamento de Brillouin

O Espalhamento de Brillouin Estimulado (SBS do inglês *Stimulated Brillouin Scattering*), visualizado na Figura 9, ocorre quando a energia da luz que percorre a fibra, atinge um determinado valor (para fibra monomodo em torno de 10mW), ocasionando o surgimento de fônons de baixa frequência (ondas sonoras). A interação da luz com as ondas sonoras faz com que a luz sofra um deslocamento de aproximadamente 11GHz. Deslocamento este, considerado pequeno para as frequências ópticas (AZADEH, 2009).

Figura 9. Efeito SBS



FONTE: (AZADEH, 2009)

Sendo assim, as ondas criadas não causarão interferência nos canais vizinhos, mas como estas ondas propagam-se na direção oposta do sinal, causam uma atenuação no canal que as originou. Esta atenuação aumenta conforme maior a potência do sinal incidente, resultando em um efeito similar ao de saturação.

2.4.3 Mistura de Quatro Ondas

A mistura de quatro ondas, FWM (do inglês, Four Wave Mixing), aparece quando três sinais com diferentes frequências viajam lado a lado por uma longa distância na fibra (AZADEH, 2009). Sendo as frequências dos sinais iguais à f_1 , f_2 e f_3 , uma terceira onda surgirá, com frequência f_{FWM} , conforme a Equação (4). Logo se percebe que o caso crítico ocorre quando o pulso de frequência f_2 está centralizado entre f_1 e f_3 , pois a nova onda terá a frequência $f_{FWM} = f_2$, causando interferência no sinal.

$$f_{FWM} = f_1 + f_2 - f_3 \quad (4)$$

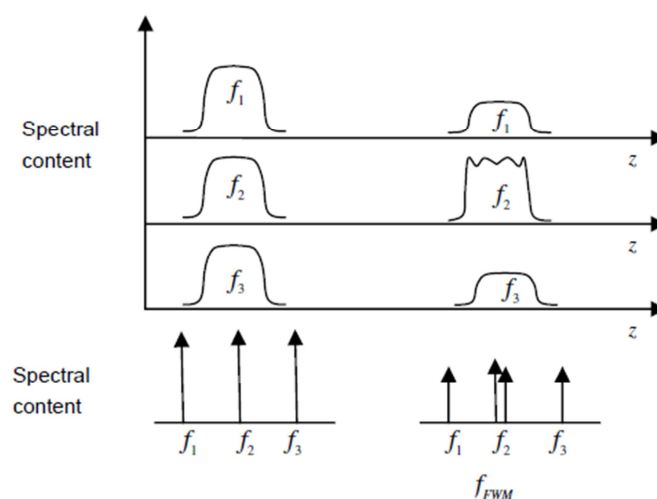
Quanto mais tempo os pulsos propagarem juntos, mais intenso será o efeito FWM, assim, para evita-lo, busca-se trabalhar com transmissões nas quais a dispersão cromática não seja nula. Com isso, diferentes frequências não viajarão lado a lado por longas distâncias (AZADEH, 2009).

O efeito do FWM pode ser observado na Figura 10 na qual nota-se a transferência de potência dos pulsos de frequência f_1 e f_3 ao novo pulso que causa distorção no sinal f_2 .

2.5 Tipos de Fibras Ópticas Monomodo

Devido às distorções sofridas pelo sinal durante sua propagação, diferentes tipos de fibras foram desenvolvidas. Atualmente existem três principais tipos normalizados pela International Telecommunication Union (ITU), que é o organismo de normatização global para fornecedores de sistemas de telecomunicações.

Figura 10. Efeito do FWM no domínio tempo e frequência.



FONTE: (AZADEH, 2009)

2.5.1 Nondispersion-Shifted Fiber

Também conhecida como fibra monomodo padrão, esta fibra segue as normas da recomendação ITU-T G.652 (INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 2009), e possui dispersão zero para comprimentos de onda próximos a 1310nm. Embora otimizada para a utilização nesta região de comprimentos de onda, também é utilizada para a região de 1550nm.

Os valores típicos de atenuação e dispersão cromática deste tipo de fibra podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1. Valores típicos encontrados em um *link* de fibra padrão.

	Comprimento de Onda	Valores típicos da rede
Perda por atenuação	1260nm – 1360nm	0,5 dB/km
	1530nm – 1565nm	0,275 dB/km
	1565nm – 1625nm	0,35 dB/km
Dispersão cromática	D_{1550}	17 ps/nm km
	S_{1550}	0,056 ps/nm ² km

FONTE: (INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 2009)

Logo, nota-se que para um sistema DWDM que utiliza a região de 1530 a 1565nm, a fibra apresenta um coeficiente de dispersão típico de $D = 17 \frac{ps}{nm km}$ para o comprimento de onda de 1550nm, e uma variação do coeficiente de dispersão, $S = 0,056 \frac{ps}{nm^2 km}$, que representa a variação do coeficiente para cada canal adjacente. Portanto, de acordo com a recomendação ITU-T G.652 (INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 2009), a dispersão cromática em um enlace óptico feito com a fibra padrão pode ser calculado conforme a equação (5).

$$D_{Link}(\lambda) = L_{Link}[17 + 0.056(\lambda - 1550)] \quad (5)$$

Sendo:

$D_{Link}(\lambda)$ = dispersão total do enlace em função do canal utilizado, ps/nm;

L_{Link} = comprimento de enlace, km;

λ = comprimento de onda do canal utilizado, nm.

2.5.2 Dispersion-Shifted Fiber (DSF)

Este tipo de fibra segue as recomendações da normatização ITU-T G.653 (INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 2010), a qual cita como característica

diferencial desta fibra, a região de dispersão cromática nula, que neste caso é próximo aos comprimentos de onda de 1550nm. Esta fibra foi desenvolvida para ser utilizada em sistemas DWDM amplificados.

Na Tabela 2 encontram-se valores típicos de atenuação e dispersão cromática da fibra G.653.

Tabela 2. Valores típicos encontrados em um *link* de fibra G.653

	Comprimento de Onda	Valores típicos da rede
Perda por atenuação	1550nm	0,275 dB/km
Dispersão cromática	λ_{0typ}	1550nm
	S_{0typ}	0,07 ps/nm ² km

FONTE: (INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 2010).

A mesma aproximação linear utilizada para a fibra G.652 pode ser utilizada para calcular a distorção cromática de um enlace com esta fibra, desde que sejam alterados o coeficiente de dispersão, que neste caso será nulo, e a variação do mesmo, sendo esta igual a 0,07 ps/nm² km, obtendo assim a equação (6).

$$D_{Link}(\lambda) = L_{Link}[0.07(\lambda - 1550)] \quad (6)$$

2.5.3 *Nonzero Dispersion-Shifted Fiber (NZDSF)*

Esta fibra segue as recomendações da ITU-T G.655 (INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 2009), e possui características parecidas com a fibra padrão, diferenciando na questão da dispersão cromática. Como a operação com dispersão cromática nula induz efeitos de não linearidades, esta fibra apresenta dispersão reduzida, mas não zero para a região de operação de sistemas DWDM.

Há dois tipos de fibra NZDSF (do inglês, *Nonzero Dispersion-Shifted Fiber*). Se o coeficiente de dispersão aumenta com o acréscimo no comprimento da onda, ela é dita positiva (+NZDSF); caso diminua conforme o comprimento de onda aumente, é chamada de negativa (-

NZDSF). O intuito de ter dois perfis de dispersão é que, cascadeando um tipo após o outro, pode-se corrigir a dispersão sem a utilização de módulos compensadores, método este, utilizado em transmissões submarinas.

As recomendações da ITU para este tipo de fibra são mais flexíveis do que para as fibras comentadas anteriormente. Neste documento, a ITU, não determina a especificação de apenas um canal típico para a definição do coeficiente de dispersão cromática, não é citada também uma variação deste coeficiente, apenas é recomendada a apresentação de uma faixa de canais, para os quais, o coeficiente de dispersão cromática esteja entre um intervalo especificado.

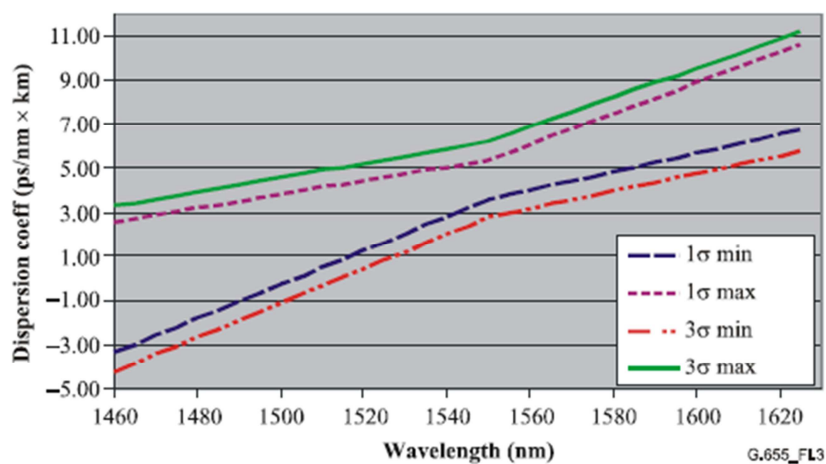
Para se adequar a estas recomendações os fabricantes de fibra adotaram a política de apresentar equações do cálculo do coeficiente de dispersão cromática para determinadas faixas de canais. Estas equações representam duas curvas que limitam os valores máximos e mínimos possíveis do coeficiente. Na Tabela 3 encontra-se um exemplo de especificação dos dados de atenuação e coeficiente de dispersão cromática de uma fibra G.655. Na Figura 11 é apresentado o gráfico dos limites do coeficiente de dispersão cromática desta fibra considerando uma abrangência de 1σ e 3σ .

Tabela 3. Exemplos de atributos da fibra G.655

Atributo	Detalhe	Valor
Coeficiente de Atenuação	Máximo em 1550nm	0,35 dB/km
	Máximo em 1625nm	0,4 dB/km
Coeficiente de dispersão cromática (ps/nm.km)	$D_{min}(\lambda): 1460 - 1550 \text{ nm}$	$\frac{7,0}{90}(\lambda - 1460) - 4,2$
	$D_{min}(\lambda): 1550 - 1625 \text{ nm}$	$\frac{2,97}{75}(\lambda - 1550) + 2,8$
	$D_{máx}(\lambda): 1460 - 1550 \text{ nm}$	$\frac{2,91}{90}(\lambda - 1460) - 3,29$
	$D_{máx}(\lambda): 1550 - 1625 \text{ nm}$	$\frac{5,06}{75}(\lambda - 1550) + 6,2$

FONTE: (INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 2009)

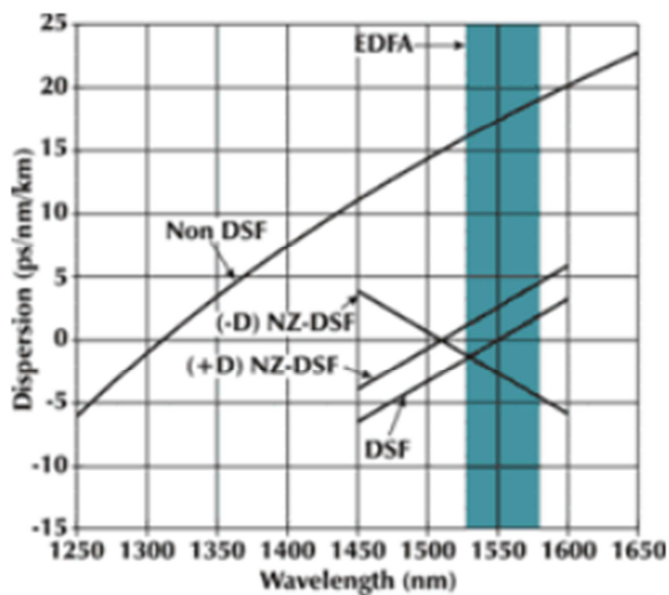
Figura 11. Limites do coeficiente de dispersão cromática da fibra caracterizada na Tabela 3.



FONTE: (INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 2009)

Na Figura 12, apresenta-se um gráfico com a dispersão cromática das fibras comentas anteriormente em função do comprimento de onda utilizado para a transmissão de dados. A região destacada representa os canais utilizados em sistemas DWDM.

Figura 12. Dispersão cromática das principais fibras utilizadas em sistemas DWDM



FONTE: (EMCORE Corporation, 2013).

3 *Transceivers*

O *Transceiver* é o componente óptico que contém a fonte de luz que transmite o dado e o fotodetector que captura o sinal recebido.

Em um sistema DWDM o emissor de luz deve ser compacto, monocromático, estável e duradouro. Na prática não é possível construir um emissor monocromático, mas como será apresentado neste capítulo, é possível fazer com que sua largura espectral seja muito estreita. A estabilidade do emissor implica que o mesmo não altere a potência do sinal enviado, bem como sua frequência, em virtude de variações na temperatura e envelhecimento dos componentes (KARTALOPOULOS, 2000).

Analisando as características do receptor, assim como o emissor este deve possuir um rápido tempo de resposta. Isto determina a taxa de transmissão em que se pode operar, além disso, o fator mais importante a ser observado é a sua sensibilidade, ou seja, quanta potência de óptica deve ser injetada no receptor para criar uma corrente elétrica capaz de gerar um sinal que possa ser detectado pelo sistema. Para atingir este parâmetro buscam-se receptores com alto ganho de corrente e baixo ruído. No decorrer deste capítulo serão apresentados os tipos de receptores e suas características.

3.1 **Emissores de Luz**

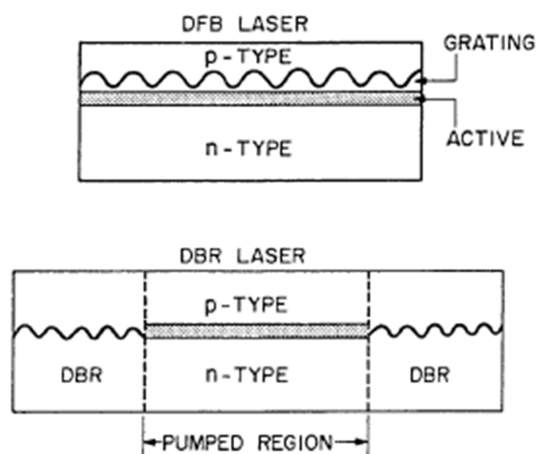
Existem duas principais fontes de luz utilizadas em comunicações ópticas: os LEDs (do inglês, *Light-emitting diodes*) e os Lasers (*Light Amplification through Stimulated Emission of Radiation*). Estes dois dispositivos se diferenciam pelo método de geração da luz; o LED funciona pelo princípio de emissão espontânea, já o laser, utiliza a emissão estimulada. Sistemas de comunicação que utilizam fibras monomodo, o qual é o caso estudado, por necessitarem de uma emissão coerente de luz, utilizam lasers como dispositivos geradores do sinal.

Para gerar uma luz coerente os lasers possuem um sistema que cria uma ressonância dos fótons com o comprimento de onda desejado. O laser pode ser baseado em uma cavidade de Fabry-Perot a qual consiste em uma cavidade que possui suas extremidades planas e paralelas entre si formando uma superfície semi reflexiva na interface com o ar (CHOMYCZ, 2009).

À medida que a corrente passa pelo material semicondutor, elétrons são excitados para a banda de condução. Depois de um período a energia destes elétrons decai liberando fóton em qualquer direção. Este processo é conhecido como emissão espontânea. Ao se propagarem, estes fótons encontram a extremidade da cavidade e são refletidos. Os fótons refletidos interagem com outros elétrons que estão na banda de alta energia, fazendo com que os mesmos decaiam para seu nível de energia estável e assim liberem fótons com a mesma característica que o seu estimulador, este processo é conhecido como emissão estimulada. A potência óptica gerada é concentrada nas frequências ressonantes, que ocorrem somente para comprimentos de ondas múltiplos inteiros de duas vezes o comprimento da cavidade (CHOMYCZ, 2009).

Para atingir um espectro de luz ainda mais estreito utiliza-se lasers DFB (do inglês, *Distributed Feedback*) ou DBR (do inglês, *Distributed Bragg Reflector*) os quais apresentam uma reflexão distribuída, ou seja, a reflexão se dá não apenas nas duas faces como nos lasers com a cavidade de Fabry-Perot, mas há uma grade de reflexão que no caso dos lasers DFB é localizada na região de ativação e para lasers DBR nas suas extremidades, como observa-se na Figura 13.

Figura 13. Estrutura dos lasers DFB e DBR.



FONTE: (AGRAWAL, 2002)

Com a reflexão distribuída, pequenas quantidades de luz são refletidas ao longo das grades de reflexão, de forma que o comprimento de onda desejado some-se construtivamente, e os demais estarão fora de fase ocasionando uma soma destrutiva (AZADEH, 2009). Assim somente

um espectro estreito de frequência é estimulado, e não múltiplas frequências, como no caso da cavidade de Fabry-Perot.

Além da rede de difração e das camadas constituintes do diodo emissor, os lasers necessitam de outros componentes para tornar sua em uma frequência estável e sua amplitude constante. O controle de potência depende de um fotodetector na saída do laser que aponte o nível de potência do mesmo para que o sistema de controle possa atuar. Outro ponto crítico é a estabilização da temperatura; sabe-se que os materiais sofrem dilatação com a variação da temperatura, a dilatação de um laser altera o tamanho de sua câmara de ativação e as propriedades da grade de reflexão, assim um sensor térmico torna-se necessário para fazer a realimentação do controlador de temperatura que deve deixar o laser a uma temperatura constante de 25°C enquanto seu encapsulamento possa variar de -20°C a 65°C (KARTALOPOULOS, 2000).

3.2 Fotodetector

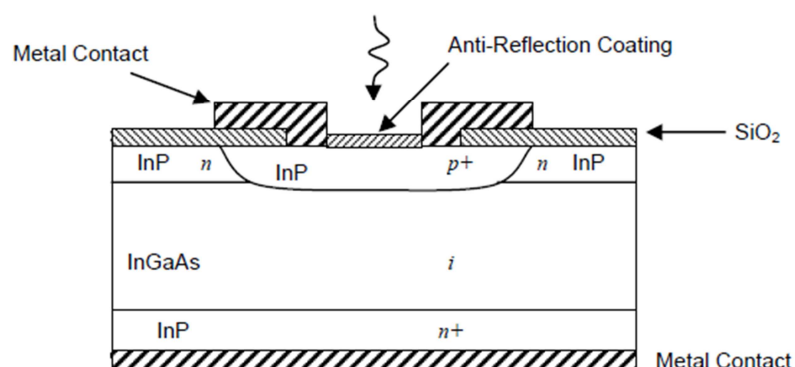
Os *transceivers* de sistemas DWDM podem utilizar dois tipos de fotodetectores, PIN ou APD (do inglês, *Avalanche Photodiode*). O primeiro recebe esta nomenclatura devido a sua estrutura que consiste de uma camada de material intrínseco (levemente dopado) entre as camadas com dopantes P e N, o segundo tipo recebe este nome em virtude do efeito avalanche ocorrido em sua região de ativação, o qual será explicado a seguir.

3.2.1 Fotodetectores PIN

Na Figura 14 pode-se observar a estrutura do diodo PIN o qual possui uma camada com dopantes P e outra com dopantes N separadas por um material intrínseco, no caso InGaAs.

Em um fotodetector PIN a conversão de luz em sinal elétrico ocorre quando um fóton atinge o receptor e se choca com a região de material intrínseco, Isto faz com que os elétrons desta camada saltem para a banda de condução causando a ocorrência de lacunas positivas. Como a junção do diodo formado pelo fotodetector é inversamente polarizada o campo presente na camada intrínseca faz com que os elétrons migrem para a região N+ e as lacunas para a região P+ causando assim o fluxo de corrente elétrica no fotodetector.

Figura 14. Estrutura de um fotodetector PIN



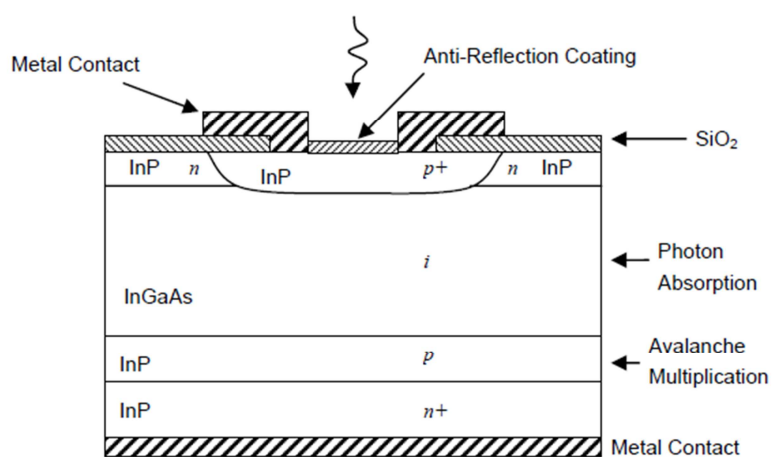
FONTE: (AZADEH, 2009)

Os *transceivers* que utilizam esta tecnologia são usados para a transmissão de menores distâncias por apresentarem baixa sensibilidade em relação aos *transceivers* com tecnologia APD.

3.2.2 Fotodetectores APD

Como se observa na Figura 15, o fotodetector APD é muito similar ao PIN. A alteração se dá na camada com dopantes P, localizada entre a camada N+ e o material intrínseco. Sendo esta nova camada a responsável pelo efeito avalanche.

Figura 15. Estrutura de um fotodetector APD.



FONTE: (AZADEH, 2009)

Ao ser inversamente polarizado, o fotodetector gera um campo elétrico que tem seu ápice na junção N+P, região do efeito avalanche. Como no fotodetector PIN, no momento em que a luz se choca com o material intrínseco, elétrons são levados à banda de condução e migram para a região N+. Em virtude do alto campo elétrico presente neste fotodetector, os elétrons atingem altos níveis de energia e ao se chocarem com átomos fazem com que estes sejam ionizados, liberando novos pares elétrons lacunas. Assim forma-se o efeito avalanche no qual um par elétron-lacuna gera vários outros pares resultando em um alto ganho de corrente.

4 Amplificadores Ópticos

Quando o *link* óptico de transmissão de dados atinge distâncias próximas a 80 km, em geral, é necessário amplificar o sinal em virtude das perdas na fibra óptica. Antes da concepção de amplificadores ópticos isto era feito por regeneradores eletrônicos. Os dados eram demultiplexados, no caso de um *link* multicanal, convertidos para sinal elétrico e depois novamente para sinal óptico.

A grande vantagem de se utilizar amplificadores ópticos é que os mesmos podem amplificar diretamente o sinal óptico, sendo transparentes às taxas de transmissão, tipos de modulação e ainda são capazes de amplificar uma larga faixa espectral, ou seja, em um sistema DWDM são capazes de amplificar todos os canais simultaneamente. Estas características tornam o sistema expansível, pois após ter um *link* de transmissão amplificado, podem-se adicionar canais de diferentes taxas, modulações, sem a necessidade de alterar as características do amplificador, salvo por questões de saturação de potência do mesmo. Mas isto deve ser previsto no momento do projeto do *link*.

Existem atualmente dois principais tipos de amplificadores ópticos utilizados em sistemas DWDM: EDFA (do inglês, *Erbium-doped Fiber Amplifier*) e os Amplificadores Ópticos Raman.

4.1 Amplificador EDFA

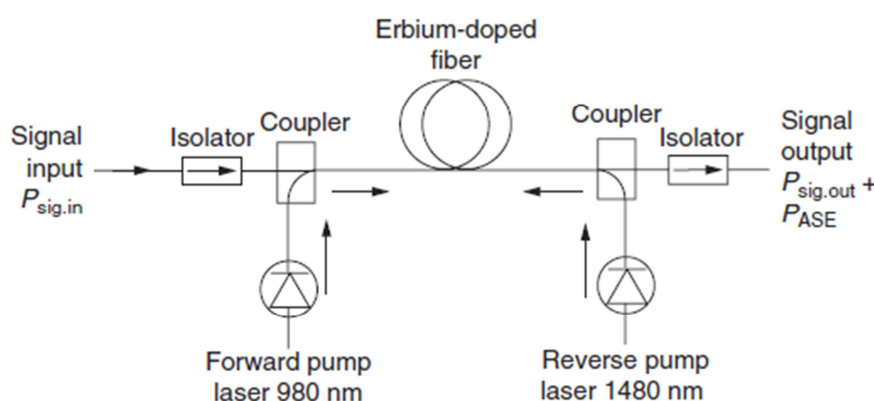
Os amplificadores EDFAs possuem o princípio de funcionamento baseado na emissão estimulada, mesmo princípio de funcionamento que os lasers, mas no caso dos amplificadores a energia estimuladora provém de fontes ópticas e não elétricas como nos lasers.

Estes amplificadores, como pode ser visto na Figura 16, são compostos por uma ou duas fontes de luz que são inseridas na fibra dopada através de acopladores e ainda possuem isoladores na entrada e saída do sinal a fim de prevenir que reflexões da fibra dopada se espalhem na fibra de transmissão causando ruído no sistema.

Os lasers em co-propagação, 980nm, e em contra-propagação, 1480nm, são responsáveis por gerar fótons que irão colidir com elétrons da fibra dopada fazendo com que estes sejam levados à banda de alta energia e ao encontrarem um fóton proveniente da transmissão óptica, irão decair para seu nível de potência inicial liberando um fóton idêntico ao da transmissão. No caso

em que os elétrons excitados não encontrem um fóton que cause a emissão estimulada, após certo tempo decaem ao seu nível de energia inicial liberando um fóton com características não definidas, estes fótons são responsáveis pela geração do ruído ASE (do inglês, *Amplified Spontaneous Emission*). Estes efeitos estão ilustrados na Figura 17.

Figura 16. Estrutura de um amplificador óptico EDFA



FONTE: (CHOMYCZ, 2009)

O ruído ASE é a grande desvantagem da utilização de amplificadores EDFA e pode ser calculado de acordo com a equação (7)

$$P_{ASE} = 2n_{sp}hfB_0(g - 1) \quad (7)$$

Na qual:

P_{ASE} = potência média do ruído ASE, Watts;

n_{sp} = fator de emissão espontânea;

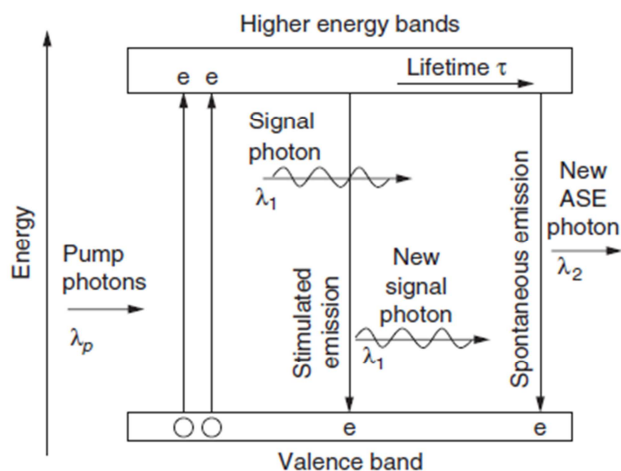
h = constante de Planck ($6,626069 \times 10^{-34}$), Js;

f = frequência central do sinal óptico, Hz;

B_0 = largura de banda do canal óptico, Hz;

g = ganho do amplificador, dB.

Figura 17. Efeito de amplificação em EDFAs



FONTE: (CHOMYCZ, 2009)

Levando-se em conta a figura de ruído, que consiste na perda da razão de sinal ruído sofrida pelo sinal ao passar pelo amplificador, dada pela equação (8) pode-se reescrever a equação (7) tendo como resultado a equação (9).

$$NF = \frac{2n_{sp}(g - 1)}{g} \quad (8)$$

$$P_{ASE} = NFhfB_0g \quad (9)$$

Onde:

NF = figura de ruído do amplificador, dB;

n_{sp} = fator de emissão espontânea;

g = ganho do amplificador, dB;

P_{ASE} = potência média do ruído ASE, Watts;

h = constante de Planck ($6,626069 \times 10^{-34}$), Js;

f = frequência central do sinal óptico, Hz;

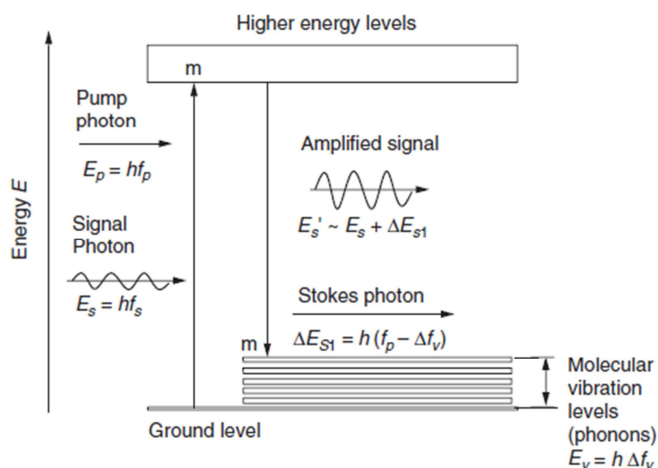
B_0 = largura de banda do canal óptico, Hz.

4.2 Amplificador Óptico Raman

O amplificador Raman utiliza o efeito SRS (do inglês, *Stimulated Raman Scattering*). Como explicado no capítulo 2.4.1 o espalhamento Raman trata-se de uma interação fóton-fônon, na qual a colisão de um fóton com uma molécula da estrutura da fibra faz com que esta eleve seu nível de energia. Este nível de energia não é um estado instável da molécula assim a mesma decai para um nível intermediário liberando um fóton com frequência diferente à do fóton inicialmente colidido.

Sabendo que esta diferença de frequência causa um deslocamento de em torno de 100nm no comprimento de onda do fóton, amplificadores Raman utilizam frequências específicas em seus lasers estimuladores. Como no caso de um amplificador para a banda C, na qual a fonte de luz está localizada em torno dos 1452nm. Com esta configuração o átomo que se encontra em um nível de energia alto (instável) interage com o sinal transmitido gerando um fóton idêntico ao do sinal, consequentemente amplificando o mesmo (Figura 18).

Figura 18. Efeito SRS utilizado em amplificadores Raman



FONTE: (CHOMYCZ, 2009)

O ganho do amplificador Raman é função das características da fibra e do laser como pode ser observado na equação (10).

$$G_R = 10 \log \left[\exp \left(\frac{g_R P_{po} L_{eff}}{A_{eff}} \right) \right] \quad (10)$$

Na qual:

G_R = Ganho do amplificador, dB;

g_R = coeficiente de ganho Raman da fibra, m/W;

P_{po} = potência do laser do amplificador, W;

L_{eff} = comprimento efetivo da fibra, m;

A_{eff} = área efetiva da fibra, m^2 .

Os ruídos inseridos por um amplificador Raman ao sistema consistem do ruído ASE, Espalhamento de Rayleigh Duplo, DRS (do inglês, *Double Rayleigh Scattering*). O efeito DRS ocorre devido às reflexões na fibra, é tipicamente menor que o ruído ASE e pode ser bastante reduzido utilizando conectores APC (do inglês, *Angle Polish Connector*), o qual como o nome diz possui a terminação em ângulo, portanto a reflexão não retorna diretamente à fibra. A emissão espontânea por efeito Raman é menor comparada ao mesmo efeito em um amplificador EDFA. Com isso tipicamente o amplificador Raman apresenta uma figura de ruído 6dB melhor que um EDFA.

5 Componentes passivos do sistema DWDM

Além da fibra óptica, o sistema DWDM possui outros componentes passivos, ou seja, componentes que não inserem potência ao sinal transmitido. Estes dispositivos são compostos por filtros e circuladores ópticos.

Os componentes passivos presentes em um sistema DWDM são os multiplexadores, demultiplexadores ópticos, que como o nome já diz, são responsáveis pela multiplexação e demultiplexação dos vários canais de um sistema DWDM. Ainda têm-se os compensadores de dispersão cromática e por fim em sistemas mais complexos pode ocorrer a utilização de OADMs (do inglês, *Optical Add Drop Multiplexers*), responsáveis pela inserção ou derivação de comprimentos de onda de um sinal WDM transportado em uma fibra.

5.1 MUX e DEMUX

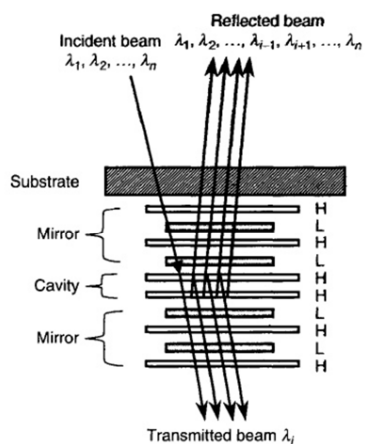
Os multiplexadores e demultiplexadores são componentes indispensáveis em um sistema WDM. Eles são os responsáveis por agregar os diversos canais do sistema em uma única fibra e ao fim da mesma separá-los.

Duas principais tecnologias são utilizadas para este fim: TFF (do inglês, *Thin Film Filter*) e AWG (do inglês, *Array Waveguide Gratings*) sendo a primeira utilizada para sistemas de poucos canais (até 16 canais) e o segundo para sistema de 40 canais ópticos.

5.1.1 TFF

A tecnologia filme fino é composta por filtros seletivos, onde um canal é transmitido e os demais são refletidos. Estes filtros funcionam como cavidades *Fabry-Perot* com varias camadas de espelhos. Como mostra a Figura 19, um filtro filme fino é constituído de uma cavidade central embutida em meio a espelhos de um quarto de onda, que se alternam entre índices de refração altos e baixos. O espaçamento da cavidade central determina o canal passante enquanto o numero de camadas de um quarto de onda determinam a refletividade do filtro (DUTTA, et al., 2003).

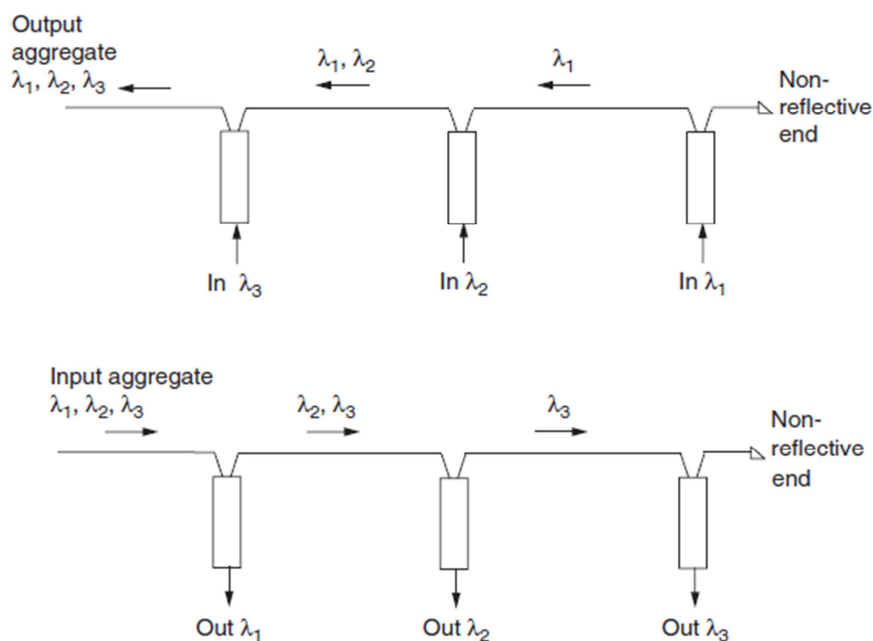
Figura 19. Estrutura de um filtro filme fino (TFF).



FONTE: (DUTTA, et al., 2003).

Para obter multiplexadores e demultiplexadores, devem-se cascatear diversos filtros (Figura 20). Assim cada filtro deixará passar o canal para o qual foi desenvolvido. Os demais canais serão refletidos e direcionados ao próximo filtro. O problema desta técnica de cascateamento é que em cada estágio de reflexão a luz sofre uma atenuação, e com isso, o canal que passa por mais filtros sofre maior perda. Para solucionar este efeito, ao desenvolver um par Mux/Demux deve-se fazer a compensação dos filtros, ou seja, o primeiro canal do multiplexador será o último do demultiplexador.

Figura 20. Representação de Mux e Demux.



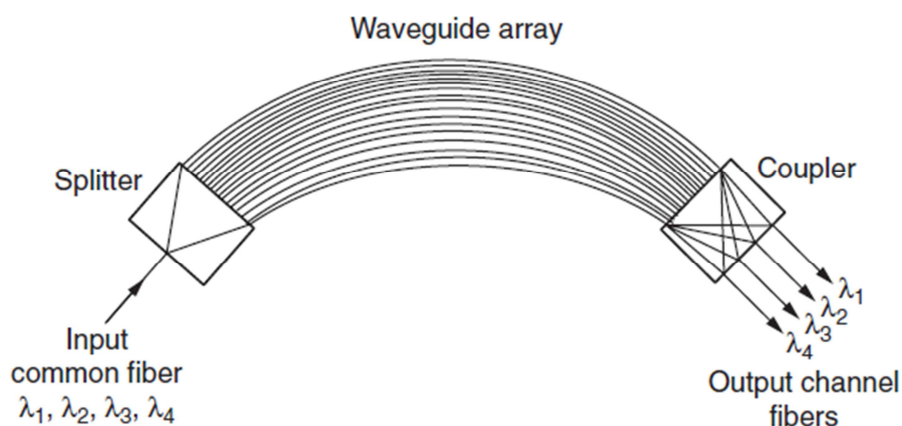
FONTE: (DUTTA, et al., 2003)

5.1.2 AWG (*Array Waveguide Gratings*)

Um Mux/Demux AWG é baseado no princípio da interferência entre ondas. Tipicamente estes dispositivos consistem de acopladores de entradas e saídas e vários guias de ondas, com diferenças constantes de comprimento ΔL entre guias adjacentes (DUTTA, et al., 2003). A Figura 21 apresenta a estrutura de um demultiplexador AWG de cinco canais.

A luz que entra no dispositivo é espalhada no primeiro acoplador, fazendo com que a mesma se direcione a todos os guias de ondas. Uma vez que os guias possuem comprimentos diferentes, cada sinal do guia de onda terá um desvio de fase diferente. Isto causa um padrão de interferência com pontos de máxima intensidade. A direção destes máximos depende do comprimento de onda em questão, permitindo assim que cada lambda seja direcionado para um canal diferente de fibra. A grande vantagem da utilização da tecnologia AWG, é que a mesma pode ser fabricada sobre um único substrato, tornando-a uma escolha economicamente vantajosa para confecção de Mux/Demux com grande número de canais (CHOMYCZ, 2009).

Figura 21. Estrutura de um demultiplexador óptico AWG.



FONTE: (CHOMYCZ, 2009)

5.2 DCM (*Dispersion Compensation Module*)

Módulos compensadores de dispersão DCM (*Dispersion Compensation Module*) são responsáveis por fazer a correção da dispersão cromática causada pela propagação da luz na fibra. Estes módulos são compostos pela combinação de dois elementos ópticos passivos: os circuladores e as redes de difração FBG (do inglês, *Fiber Bragg Grating*).

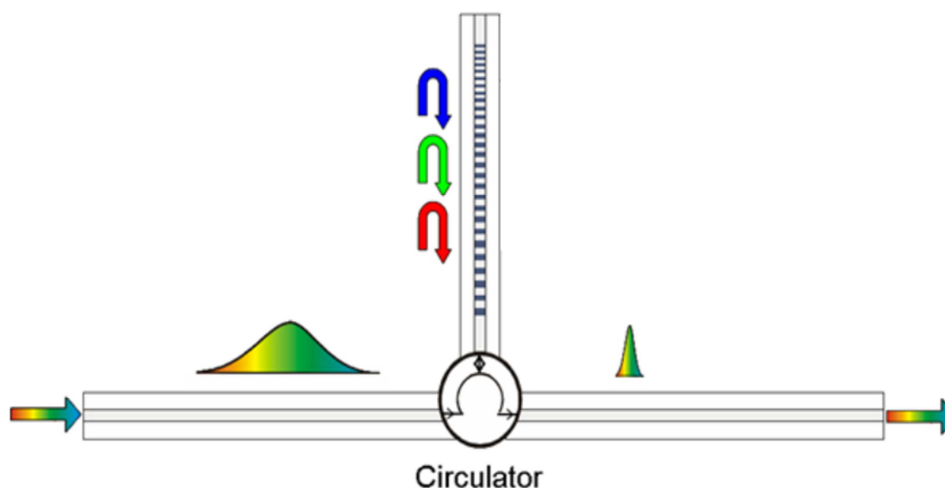
Circuladores são dispositivos com três portas que permitem a propagação do sinal somente em determinadas direções dependendo de qual porta o sinal é proveniente. Seu funcionamento é baseado em isoladores que permitem uma propagação unidirecional. Para isso utiliza o princípio da polarização, onde ao entrar no dispositivo a luz é polarizada, e logo após rotacionada de 90 graus através de um rotador de Faraday. Se esta luz é refletida, ao retornar para a entrada do dispositivo será bloqueada pelo polarizador, devida a sua polarização estar rotacionada de 90 graus (GUMASTE, et al., 2002).

A rede de difração FBG consiste numa variação no índice de refração periódico no núcleo de uma fibra óptica. Quando uma luz incide sobre uma fibra com rede de Bragg o comprimento de onda correspondente ao comprimento de onda de Bragg será refletido retornando para a extremidade de entrada e os demais comprimentos não sofrerão esta reflexão (DUTTA, et al., 2003).

Combinando o circulador e a rede de difração FBG, conforme a Figura 22, consegue-se fazer uma compensação à dispersão cromática. O princípio básico é deixar os comprimentos de onda ‘rápidos’ do pulso se propagarem mais na rede de difração, enquanto os ‘lentos’ são refletidos próximos ao circulador (PROXIMION AB, 2013). Alterando os tempos de reflexão ajusta-se a o valor da compensação e a variação da mesma para cada canal DWDM, de acordo com os valores necessários para o *link* em questão.

Os valores de compensação de dispersão são dados em picosegundos. Dependendo do fabricante este valor pode também ser apresentado em quilômetros, juntamente com especificação do tipo de fibra para o qual o DCM é utilizado.

Figura 22. Compensador de dispersão cromática baseado em redes de difração de Bragg



FONTE: (PROXIMION AB, 2013)

6 Cálculo de enlaces

O desenvolvimento de enlaces ópticos se dá satisfazendo inicialmente a compensação da dispersão cromática, seguida do cálculo de *power budget* (em tradução literal, orçamento de potência), a qual implica na inserção ou não de amplificadores ópticos. Estes, porém inserem ruído ASE ao sistema. Torna-se necessário portanto conhecer também a relação de sinal ruído óptico, OSNR (do inglês, *Optical Signal Noise Ratio*), para posterior análise dos requerimentos do fotodetector. Este capítulo, tem o objetivo de apresentar os cálculos a serem feitos, para determinar as características acima citadas do sinal óptico.

6.1 Dispersão Cromática

Como comentado no capítulo 2.2 a dispersão cromática é um efeito linear ocorrido na fibra, o qual causa a dispersão do sinal óptico no tempo. Esta dispersão é dependente das características da composição da fibra, seu comprimento e o canal óptico utilizado.

De acordo com as recomendações ITU-T G.652, ITU-T G.653 e ITU-T G.655, a dispersão cromática de um enlace óptico pode ser calculada a partir dos coeficientes de dispersão cromática, assumindo uma dependência linear com o comprimento da fibra utilizada e levando em conta o sinal dos coeficientes.

Tabela 4. Equações para o cálculo da dispersão cromática em uma fibra óptica.

Tipo de Fibra		Equação
G.652		$D_{Link}(\lambda) = L_{Link}[17 + 0.056(\lambda - 1550)]$
G.653		$D_{Link}(\lambda) = L_{Link}[0.07(\lambda - 1550)]$
G.655	$\lambda = 1460 - 1550 \text{ nm}$	$D_{Link}(\lambda) = L_{Link} \left[\frac{2,91}{90}(\lambda - 1460) - 3,29 \right]$
	$\lambda = 1550 - 1625 \text{ nm}$	$D_{Link}(\lambda) = L_{Link} \left[\frac{5,06}{75}(\lambda - 1550) + 6,2 \right]$

Portanto para o cálculo da dispersão cromática de um dado enlace, é utilizada a aproximação linear acima citada. No caso de fibras G.652 e G.653, pode-se encontrar os valores típicos de coeficiente de dispersão e sua variação para canais adjacentes na Tabela 1 e Tabela 2 respec-

tivamente. Já para a fibra tipo G.655 utiliza-se as equações de máximo coeficiente de dispersão cromática presentes na Tabela 3. Um resumo das equações utilizadas é apresentado na Tabela 4.

6.2 Power Budget

O *power budget*, trata da diferença entre a potência inserida no sistema, proveniente do emissor do *transceivers*, e a sensibilidade do receptor do mesmo.

A potência em um sistema de transmissão óptico é representada na escala logarítmica de decibel. Essa medida é referenciada a potência de 1mW, conforme a equação (11), e é definida com a unidade de dBm. Portanto um nível de potência óptica de 1mW equivale a 0dBm.

$$P_{dBm} = 10 \log \left(\frac{P_{mW}}{1_{mW}} \right) \quad (11)$$

Na qual:

P_{dBm} = potência óptica referenciada a 1mW, dBm;

P_{mW} = potência óptica, mW.

A atenuação da potência óptica causada por dispositivos do sistema é dada pela razão da potência de saída pela da entrada segundo a equação

$$\Gamma = -10 \log \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \quad (12)$$

Onde:

Γ = perda de potência óptica, dB;

P_{out} = potência óptica de saída, mW;

P_{in} = potência óptica de entrada, mW.

Para obter um orçamento de energia completo deve-se considerar a perda inserida por todos os componentes, equação (13), desde a perda causada pela fibra, perdas dos diversos dispositi-

tivos do sistema óptico, até perdas de conexões. Tipicamente a perda da fibra é obtida por medições, isto é feito em virtude da fibra apresentar variação na sua atenuação devido a agentes externos como tensões, envelhecimento, emendas, entre outros. Para os demais componentes, é utilizado o pior caso de atenuação apresentado nas especificações dos mesmos.

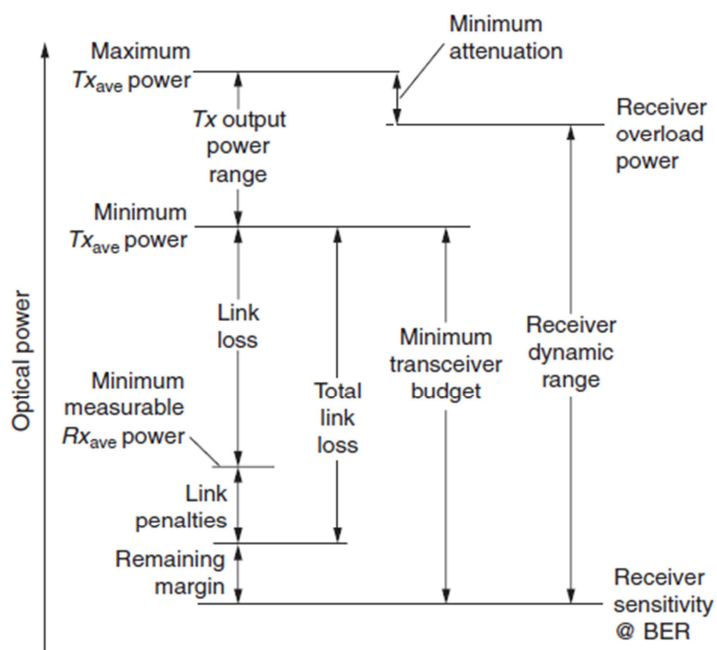
$$\Gamma_{Total} = \Gamma_{Fibra} + \sum \Gamma_{Componentes} \quad (13)$$

O planejamento de um enlace óptico requer um orçamento de energia detalhado para ser completo. O objetivo deste cálculo é assegurar que as perdas totais do sistema não excedam os limites de operação do *transceiver*. Trata-se de uma simples soma das perdas presentes em cada componente do enlace. Se esta soma é maior que o orçamento especificado pelo *transceivers* o enlace pode não funcionar corretamente e apresentar uma alta taxa de erro. A Figura 23 ilustra o diagrama de orçamento de potência de um enlace óptico (CHOMYCZ, 2009).

No caso em que a potência resultante ao fim do enlace óptico não satisfaça as especificações da sensibilidade do *transceiver*, amplificadores ópticos devem ser adicionados ao sistema. A inserção destes, porém, causa a degradação da OSNR. Este caso é abordado no capítulo seguinte.

Para o sistema DWDM é importante ressaltar que a atenuação é dependente do canal utilizado. Um exemplo são os multiplexadores e demultiplexadores que utilizam tecnologia de filme fino (capítulo 5.1.1) pois possuem um cascadeamento de filtros sendo que cada etapa insere uma atenuação. Portanto o último canal a ser multi/demultiplexado sofrerá maior atenuação. Muitas vezes esta variação de atenuação devido ao canal utilizado não é fornecida pelos fabricantes de módulos ópticos e seu ensaio torna-se necessário para uma melhor aproximação da realidade.

Figura 23. Diagrama do orçamento de energia de um enlace óptico



FONTE: (CHOMYCZ, 2009)

6.3 OSNR

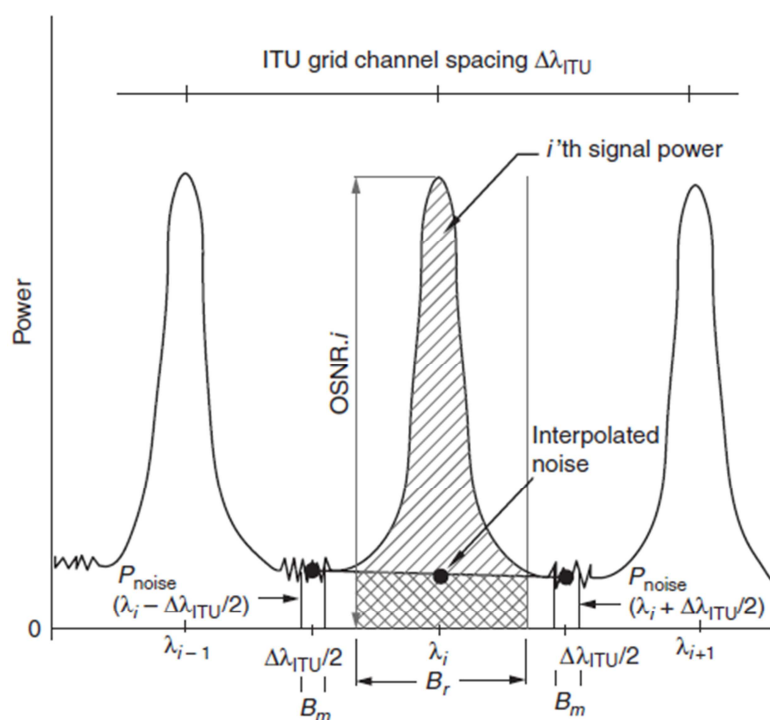
A razão entre as potências do sinal transmitido e do ruído presente no mesmo são quantificados pela OSNR (do inglês, *Optical Signal-to-Noise Ratio*), este é um dos parâmetros mais importantes a serem determinados em sistemas de comunicação.

Quando amplificadores ópticos são adicionados em um enlace óptico, uma pequena parcela de ruído ASE é adicionada ao sinal transmitido. Embora a inserção de ruído provocada por um único amplificador seja pequena e não cause consequências graves à OSNR, amplificadores adicionais a este não irão adicionar somente o seu próprio ruído ASE, mas irão amplificar o ruído inserido pelos amplificadores anteriores presentes no enlace. O limite é atingido quando a adição de um novo amplificador resulta na degradação da OSNR fazendo com que o sinal não atenda mais as especificações do receptor. Isto implicará em uma BER abaixo da desejada (CHOMYCZ, 2009).

6.3.1 Medição

O método mais apropriado para medir esta relação de potências, seria analisar a potência do sinal e do ruído no comprimento de onda central do canal, ou seja, analisar ambas as potências na mesma frequência. No entanto a OSNR é medida através do analisador de espectro óptico, OSA (do inglês, *Optical Spectrum Analyzer*), e grande parte destes analisadores determina a potência óptica do comprimento de onda sem distinguir se esta se trata de ruído ou dado trafegado, tornando assim inviável este método. De acordo com a IEC 61280-2-9 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2009), a medida da potência de ruído pode ser feita através da interpolação linear entre canais. Para isso devem-se analisar as potências fora da banda do canal, à esquerda e à direita, fazendo uma média entre elas, ver Figura 24.

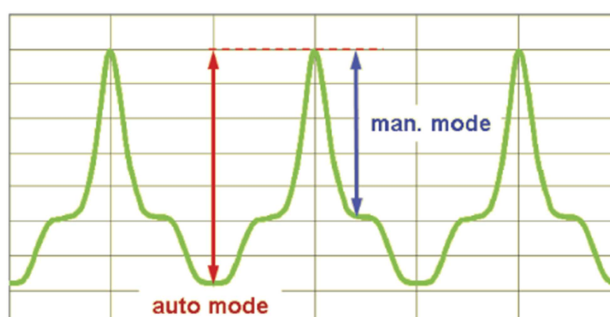
Figura 24. Medida da OSNR baseada na interpolação linear do ruído.



FONTE: (CHOMYCZ, 2009)

Um cuidado especial deve ser tomado para medidas de OSNR em sistemas DWDM. Os filtros presentes em demultiplexadores, OADMs e DCMs podem mascarar a potência do ruído,

Figura 26. Medida da OSNR pelo Método do Ombro

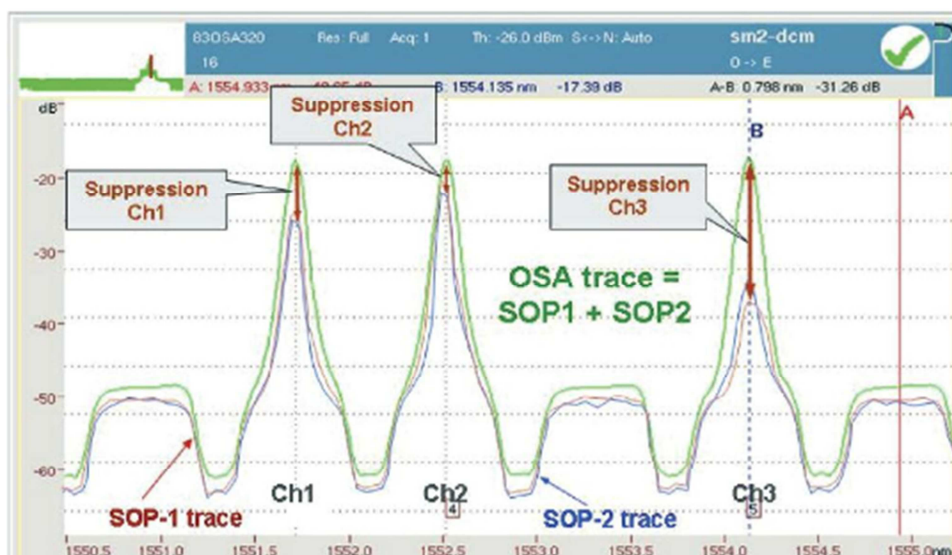


FONTE: (MOENCH, 2007)

6.3.1.2 Detecção da Polarização Diversa

A detecção da Polarização Diversa é baseada no princípio de polarização nula suportando o fato de que o sinal óptico transmitido consiste de uma luz arbitrariamente polarizada, enquanto que o ruído ASE consiste somente de luz não polarizada. Instalando um polarizador óptico no caminho da luz, este irá bloquear ou passar o sinal óptico dependendo do estado de polarização do mesmo (MOENCH, 2007).

Figura 27. Método da Detecção da Polarização Diversa



FONTE: (MOENCH, 2007)

Um separador de polarização separa o sinal de entrada em dois estados de polarizações ortogonais, suprimindo o sinal polarizado transmitido e deixando passar o ruído não polarizado.

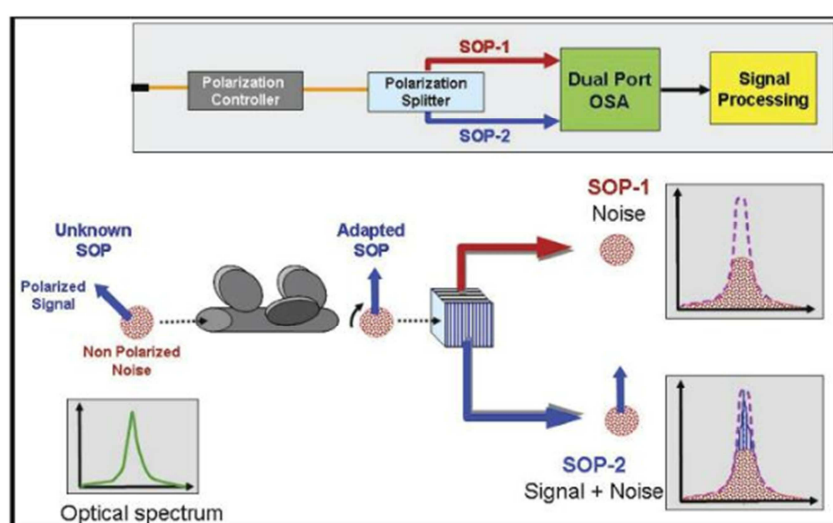
Este método não é tão eficiente, pois a atenuação do sinal depende do casamento entre o polarizador e o sinal transmitido. Alguns fabricantes utilizam este método, pois dizem que separando o sinal em estados de polarização ortogonais sempre haverá condição para detectar a ondulação no pico do sinal. Posteriormente utiliza-se o Método do Ombro para finalizar a medida da OSNR.

Nota-se na Figura 27, que para cada canal a atenuação do sinal é diferente, isto depende do estado de polarização do mesmo. No caso apresentado os canais um e dois apresentaram baixa atenuação tornando difícil a detecção da ondulação no pico do sinal. Já no canal três este se tornou mais perceptível, passando a ser viável o uso do Método do Ombro.

6.3.1.3 Método da Separação da Polarização Óptica

Como a desvantagem do método da Detecção da Polarização Diversa é que a supressão do sinal transmitido depende da combinação entre o seu estado de polarização e a do separador de polarização, alguns fornecedores desenvolveram um controlador para um polarizador ajustável, que polariza o sinal transmitido de forma a casá-lo com o separador de polarização. O controlador busca o ponto de máxima atenuação do sinal transmitido e após encontrar o ponto ótimo, o sinal é separado em duas polarizações ortogonais e então, analisando os dois resultados, pode-se encontrar a OSNR do sinal transmitido (MOENCH, 2007).

Figura 28. Diagrama do Método da Separação da Polarização Óptica



FONTE: (MOENCH, 2007)

6.3.2 Cálculo

Para um enlace óptico com amplificadores, a fonte dominante de ruído é a ASE. Se amplificadores Raman de alto ganho são utilizados, o duplo espalhamento de Rayleigh (DRS) também pode ser uma fonte significativa de ruído. As equações a seguir irão considerar apenas a OSNR em razão da ocorrência de ruído ASE (CHOMYCZ, 2009).

Como comentado anteriormente a OSNR é a razão da potencia do sinal e a potência de ruído:

$$OSNR = \frac{P_{out}}{P_{ASE}} \quad (14)$$

Sendo:

P_{out} = potência de saída do amplificador, W;

P_{ASE} = potência de ruído ASE inserida pelo amplificador, W.

Sabendo que a potência de saída é a potência de entrada vezes o ganho do amplificador, e a potência ASE inserida por EDFA obedece a equação (9), pode-se reescrever a equação (14) como:

$$OSNR = \frac{P_{in}}{NFhfB_0} \quad (15)$$

Na qual:

P_{in} = potência de entrada no amplificador, W;

NF = figura de ruído do amplificador, dB;

h = constante de Plank, $6,626069 \times 10^{-34}$ Js;

f = frequência óptica do sinal analisado, Hz;

B_0 = banda do canal óptico, Hz.

Convertendo a equação (15) para dB, tem-se como resultado a equação (16):

$$OSNR_{dB} = P_{in_{dB}} - NF - 10 \log hf - 10 \log B_0 \quad (16)$$

Sendo:

$OSNR_{dB}$ = relação sinal ruído, dB;

$P_{in_{dB}}$ = potência de entrada no EDFA, dB.

Analisando a equação (16), percebe-se que o ganho do EDFA não é considerado. Isto ocorre devido à OSNR ser uma razão entre a potência do sinal e a do ruído e o ganho do EDFA atuar igualmente nas duas potências. Portanto os parâmetros do ganho no numerador e denominador da equação são cancelados. Em outras palavras, embora os EDFAs compensem a atenuação do enlace óptico, cascadeando EDFAs, a OSNR será degradada a cada amplificação. Esta degradação pode ser diminuída com a utilização de amplificadores Raman (GUMASTE, et al., 2002).

Amplificadores Raman apresentam uma figura de ruído baixa, tipicamente -2 à 0dB, e tem um bom ganho no sinal, 5 à 20dB, mas são significativamente mais caros em relação aos EDFAs. Seu uso é limitado à expansão de longas linhas ópticas onde a OSNR atingiu seu limite. Embora este também adicione ruído ASE ao sistema, a figura de ruído equivalente ao final do enlace pode ser zero ou até negativa (CHOMYCZ, 2009).

O cálculo da OSNR resultante de um enlace óptico com diversas fontes de ruído, no caso amplificações, pode ser calculado sabendo a OSNR de cada estágio de amplificação de acordo com a equação (17) (CHOMYCZ, 2009).

$$\frac{1}{OSNR_F} = \frac{1}{OSNR_{Fonte}} + \frac{1}{OSNR_1} + \frac{1}{OSNR_2} + \dots + \frac{1}{OSNR_n} \quad (17)$$

7 Simulador de Enlace Óptico

Como visto nos capítulos anteriores, sistemas DWDM possuem diversos componentes para adequar o enlace de transmissão às características desejadas. Entretanto além de auxiliar no desenvolvimento do *link* óptico, estes dispositivos inserem atenuações, ruídos e distorções ao sistema. Todos estes parâmetros devem ser equilibrados para se desenvolver uma rede DWDM técnica e economicamente viável.

Devido à complexibilidade de adequar todos os parâmetros às especificações dos dispositivos, um simulador de enlaces ópticos torna-se uma ferramenta de grande ajuda, pois o mesmo consegue calcular os diversos parâmetros simultaneamente e compará-los as especificações dos componentes. Com este objetivo foi criada uma biblioteca para o software Simulink, que embora seja um software para simulação de sistemas dinâmicos, pareceu bastante atrativo para o desenvolvimento do sistema requerido, devido a sua interface gráfica onde blocos são adicionados e conectados entre si, representando o fluxo do sinal no sistema. Além disso, estes blocos podem ser customizados, tornando possível a modelagem dos diversos dispositivos ópticos.

Buscou-se desenvolver um método simples, no qual bastasse escolher os modelos, adicionar os blocos dos dispositivos modelados e conectá-los para que o software pudesse fazer o cálculo da qualidade do sinal propagado. Os parâmetros calculados para determinar esta qualidade foram a dispersão cromática, potência óptica e a relação sinal ruído óptico (OSNR). Esta escolha foi feita em virtude das especificações dos *transceivers* apresentarem estes parâmetros para determinar a sua sensibilidade.

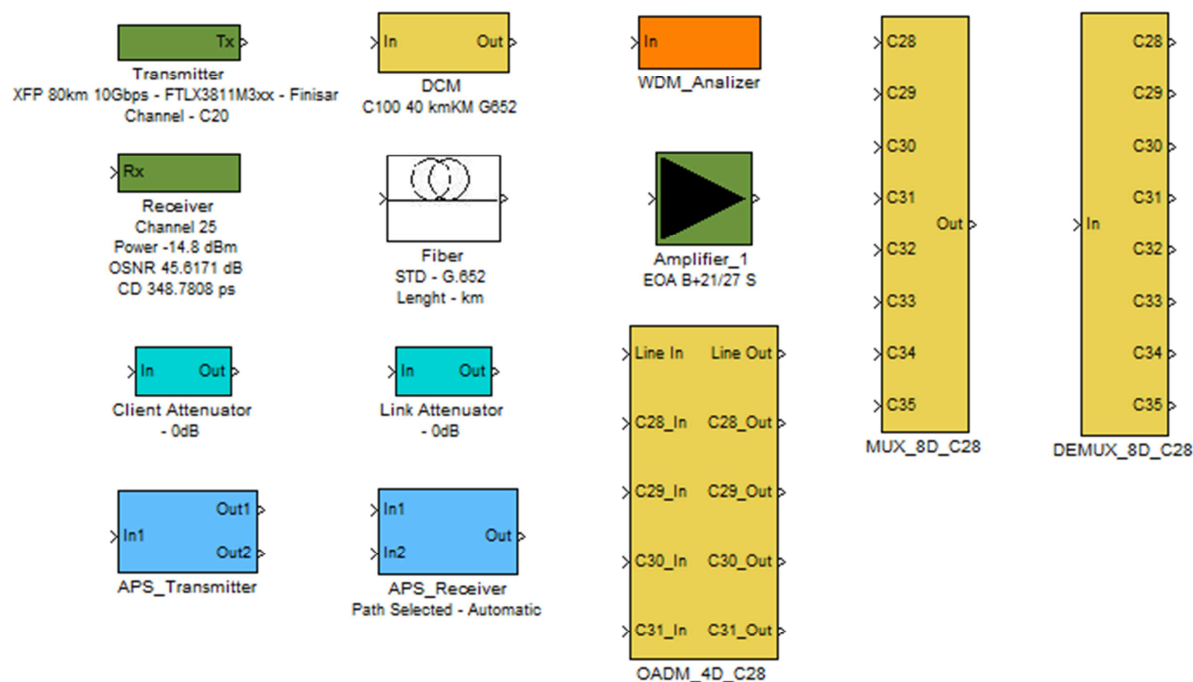
Primeiramente neste capítulo são apresentados os diversos blocos dos dispositivos ópticos modelados, os parâmetros neles inseridos, suas configurações e alarmes. Após a apresentação dos blocos criados são apresentados dois ensaios com equipamentos reais e a comparação das medidas obtidas com os valores calculados pelo simulador.

7.1 Modelagem dos dispositivos ópticos

Para a modelagem dos dispositivos foram criados subsistemas com blocos *Embedded MATLAB Function*, pois estes permitem inserir rotinas de linguagem de programação Matlab. Os subsistemas se mostraram úteis para criar uma interface gráfica de fácil compreensão e manu-

seio. Na Figura 29 pode-se observar os blocos desenvolvidos para a modelagem dos componentes do sistema DWDM.

Figura 29. Biblioteca criada para o simulador de enlaces ópticos



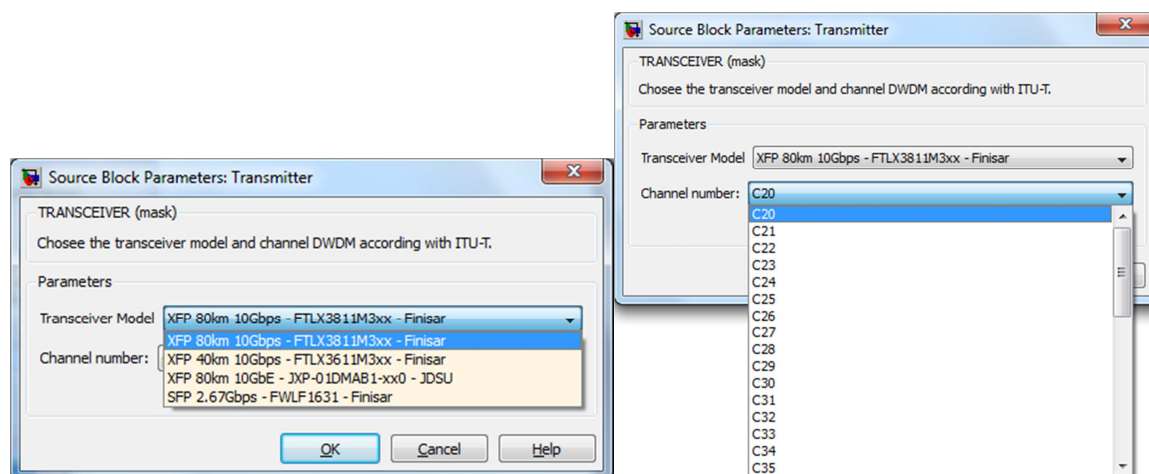
7.1.1 Transmissor

Para obter uma interface gráfica mais intuitiva decidiu-se separar o *transceiver* em duas partes: transmissor e receptor. Portanto neste capítulo são abordados os assuntos referentes ao transmissor.

Como existem diversos fabricantes e modelos de *transceivers*, criou-se um método e seleção do *transceiver* a ser utilizado (Figura 30). Esta escolha faz com que o mesmo carregue as especificações de potência e OSNR do sinal emitido, além disso, esta seleção já determina as características do receptor ao final do enlace. Na mesma janela de seleção também deve-se escolher o canal a ser utilizado para a transmissão. Este parâmetro determinará o comprimento de onda utilizado conforme a normativa ITU-T G.694.1, pois vários parâmetros calculados no decorrer do

software dependem deste valor. Os canais disponíveis para a escolha cobrem a faixa do canal C20 ao C59.

Figura 30. Interface gráfica para especificar modelo e canal utilizado no *transceiver*.



7.1.2 Multiplexadores

O multiplexador óptico, como comentado anteriormente, agrupa diversos canais em uma única fibra. Como este dispositivo funciona através de um cascadeamento de filtros ópticos, diferentes atenuações são inseridas para cada canal. Ao consultar o manual de especificações destes componentes, somente o pior caso de atenuação é informado. Visto que muitas vezes os enlaces ópticos podem trabalhar muito próximo do limite da sensibilidade do receptor, decidiu-se ensaiar alguns multiplexadores para determinar a perda de potência em cada canal.

Pela análise do capítulo 5.1.1, que aborda multiplexadores e demultiplexadores de tecnologia filme fino, geralmente utilizada para dispositivos com até 16 canais, observa-se que a variação da atenuação dos canais pode ser linearizada, pois a cada novo canal multiplexado um filtro é adicionado ao caminho óptico do sinal. Portanto a modelagem das perdas dos canais consistiu em determinar o valor da atenuação do canal com a menor perda por inserção do multiplexador e foi feita uma linearização com a máxima atenuação, que é fornecida no manual de especificações do componente.

Para o ensaio dos multiplexadores e demultiplexadores ópticos, foi injetada uma potência óptica com o *transceiver* correspondente a cada canal. Com o analisador de espectro OSA, me-

diu-se a potência de entrada e saída do dispositivo e calculou-se a atenuação de cada canal. Na Tabela 5 estão amostrados os valores de atenuação mínimos encontrados em cada dispositivo, assumindo que este valor segue uma distribuição normal, adquire-se sua média, μ , e desvio padrão, σ , e então adota-se o valor mínimo de atenuação sendo a média destas medidas mais três sigmas ($\mu + 3\sigma$), o que estatisticamente corresponde a um valor superior à cerca de 99,7% das atenuações mínimas dos multiplexadores, Tabela 6. Este valor também foi utilizado para a atenuação do demultiplexador, pois este possui o mesmo padrão de construção.

Tabela 5. Atenuação mínima encontrada no ensaio de mux e demux.

Mux/Demux	Atenuação* (dB)	Mux/Demux	Atenuação* (dB)
1	0,84	7	0,92
2	0,67	8	1,22
3	0,86	9	1,03
4	0,86	10	1,06
5	0,76	11	0,96
6	0,45	12	0,71

* Atenuação do canal com menor perda por inserção.

Tabela 6. Resultados obtidos da Tabela 5.

Média	0,86 dBm
Desvio Padrão	0,2 dBm
Valor adotado	1,5 dB

Portanto, a atenuação de cada canal do multiplexador do simulador obedece aos valores amostrados na Tabela 7.

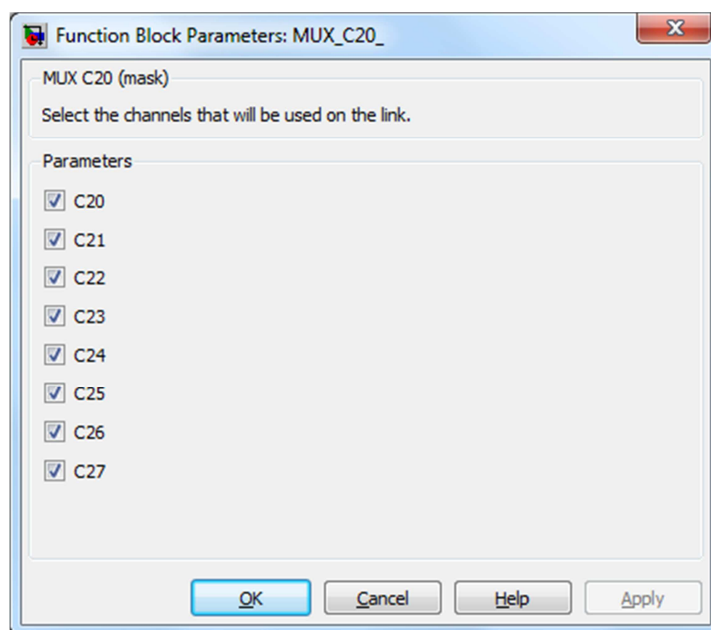
Uma das grandes vantagens de sistemas DWDM é a capacidade de expansão do mesmo. Um enlace óptico pode começar com um único canal, todavia utilizando um sistema multiplexado, para futuramente adicionar novos canais sem interromper o tráfego de dados. Com este objetivo tornou-se necessário desenvolver um método em que apenas alguns canais do multiplexador sejam utilizados para a simulação. A solução foi criar uma interface gráfica onde o usuário escolhe os canais a serem utilizados (Figura 31). Ao escolher os canais, as demais entradas do multi-

plexador são ocultadas. Isto foi necessário pois o software Simulink não permite deixar portas de entrada sem conexão.

Tabela 7. Valores das atenuações por canal do multiplexador.

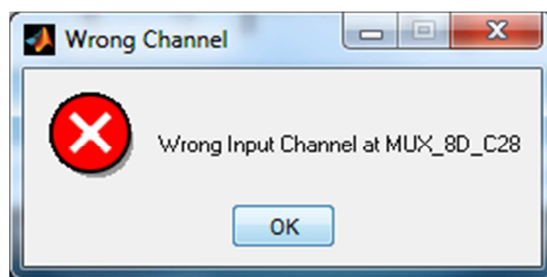
Canal	Atenuação (dB)
C28	1,5
C29	1,7
C30	1,9
C31	2,1
C32	2,3
C33	2,5
C34	2,7
C35	2,9

Figura 31. Interface gráfica do multiplexador para a escolha dos canais a serem utilizados



No caso de algum transmissor ser conectado a porta errada do multiplexador uma mensagem de erro surge para o usuário, indicando em qual componente está a inconsistência, ver Figura 32.

Figura 32. Alarme de conexão errônea no multiplexador.

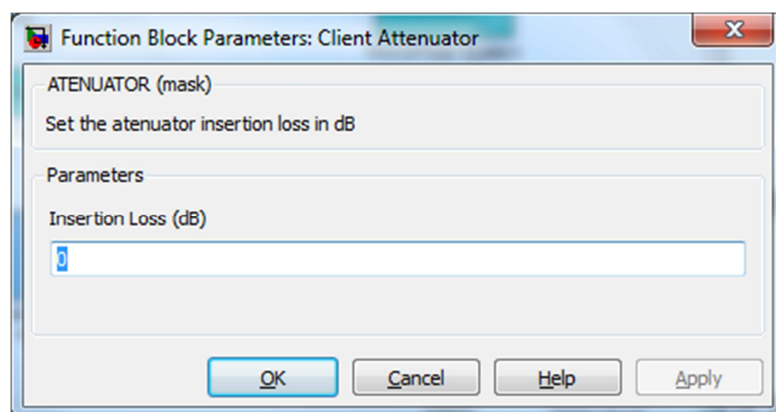


7.1.3 Atenuadores

Para o ajuste de potência óptica no sistema, diversas vezes torna-se necessária a inserção de atenuadores no caminho óptico. Em virtude do método de compilação do Simulink foi necessária a criação de dois tipos de atenuadores, *Client Attenuator* e *Link Attenuator*. O funcionamento de ambos é o mesmo, mas cada um deve ser utilizado em seu devido lugar, ou seja, *Client Attenuator* é utilizado para equilibrar a potência entre canais, na entrada de multiplexadores e receptores. A utilização do *Link Attenuator* se dá no *link* de transmissão, nos pontos em que há vários canais multiplexados, geralmente na entrada ou saída de amplificadores.

O único parâmetro a ser determinado para o atenuador é o valor de sua atenuação. A interface criada para este fim está apresentada na Figura 33.

Figura 33. Interface gráfica para especificar a atenuação do bloco atenuador.

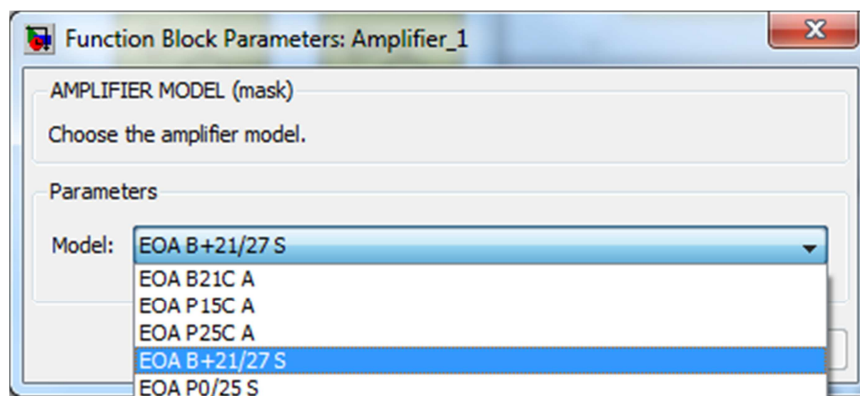


7.1.4 Amplificador

O bloco amplificador é um dos mais complexos do simulador. São os amplificadores que injetam ruído ao sistema, portanto neste bloco é feito o cálculo da degradação da OSNR, além da inserção de potência ao sinal.

A complexibilidade deste bloco se limita aos cálculos por ele determinado, pois para o usuário do simulador basta escolher o modelo do amplificador a ser utilizado. Quando determinado o modelo, o simulador carrega automaticamente os parâmetros especificados pelo fabricante. No caso foram configuradas cinco opções de amplificadores, todos eles comercializados pela empresa Digitel S.A. Dentre estes cinco modelos existem um amplificador *booster* monocanal, EOA B+21/27 S; um pré-amplificador monocanal, EOA P0/25 S; um amplificador *booster* multicanal EOA B21C A; dois pré-amplificadores multicanais, EOA P15C A e EOA P25C A. A interface para a escolha do modelo é apresentada na Figura 34, esta possui a lista dos amplificadores, bastando clicar sobre o desejado para realizar a escolha.

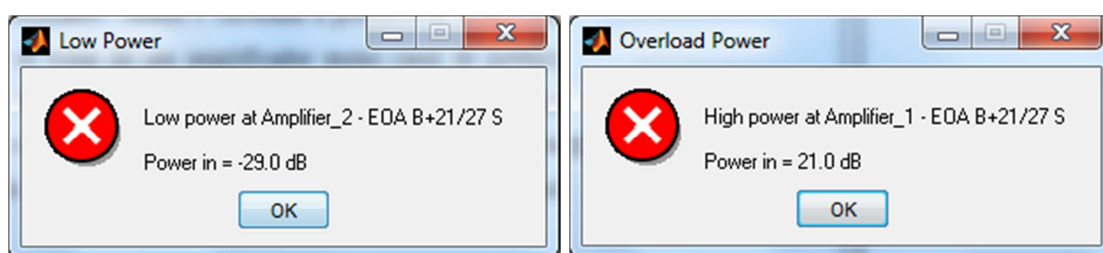
Figura 34. Interface para a escolha do modelo do amplificador óptico.



Determinado o modelo do amplificador este bloco carrega os parâmetros correspondentes, faz a aquisição dos dados de potência e OSNR de entrada e então através das equações (16) e (17) calcula a OSNR resultante. Ainda é calculada a potência de saída, que para o amplificador EOA B+21/27 S, por se tratar de um amplificador monocanal de potência controlada tem sua saída fixa em 21dBm. Os demais EDFAs possuem um controle de ganho, portanto, a potência de saída é obtida somando o ganho correspondente à potência de entrada de cada canal.

Como amplificadores possuem potências máximas e mínimas de entrada, alarmes foram criados para chamar a atenção do projetista do enlace óptico. No caso desta ocorrência, janelas com mensagens de erro são mostradas informando a potência de entrada, se a mesma é alta ou baixa, o amplificador no qual a inconsistência foi detectada, e ainda, no diagrama do enlace, o contorno do amplificador é realçado na cor vermelha. As possíveis janelas de erro do amplificador podem ser visualizadas na Figura 35.

Figura 35. Janelas de alarme geradas pelo amplificador, à direita baixa potência e à esquerda alta potência.

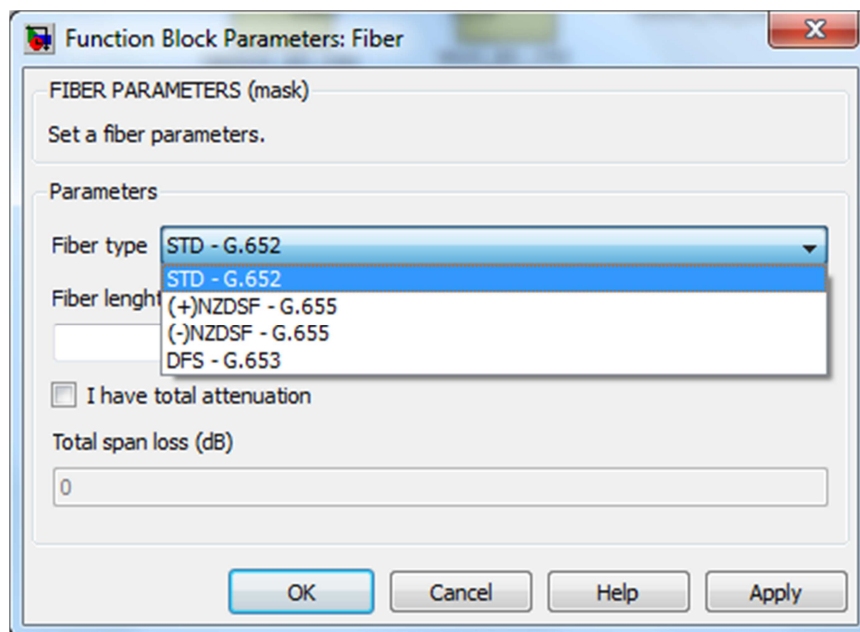


7.1.5 Fibra

A fibra é o componente caracterizador do enlace, ou seja, todo o sistema é desenvolvido em torno da fibra. Normalmente o usuário do simulador terá as características da fibra determinadas pelo solicitador do enlace, e então através dos demais parâmetros do sistema, como número de canais, taxa de transferência, possibilidade de expansão, entre outros, ele terá que adaptar os demais componentes a fim de atender a todos os requisitos.

Para caracterização da fibra três parâmetros devem ser determinados: tipo de fibra, comprimento e atenuação total. Foram modelados quatro tipos de fibra de acordo com as recomendações da ITU, sendo elas a fibra padrão (STD – G.652), *Nonzero Dispersion-Shifted* positiva (+NZDSF – G.655) e negativa (-NZDSF – G.655) e ainda por fim a fibra *Dispersion-Shifted* (DSF – G.653). Para determinar o tipo a ser utilizado, na interface mostrada na Figura 36, basta selecionar o modelo desejado. Na mesma figura ainda pode-se visualizar uma caixa de texto para determinar o comprimento total da fibra e ainda uma *checkbox* que permite ativar ou não a utilização de um valor pré-determinado de atenuação total da fibra. No caso desta caixa não ser marcada a atenuação total será calculada em função da atenuação por quilômetro conforme as recomendações da ITU para cada tipo de fibra.

Figura 36. Interface para determinar o tipo, comprimento e atenuação da fibra.



7.1.6 DCM

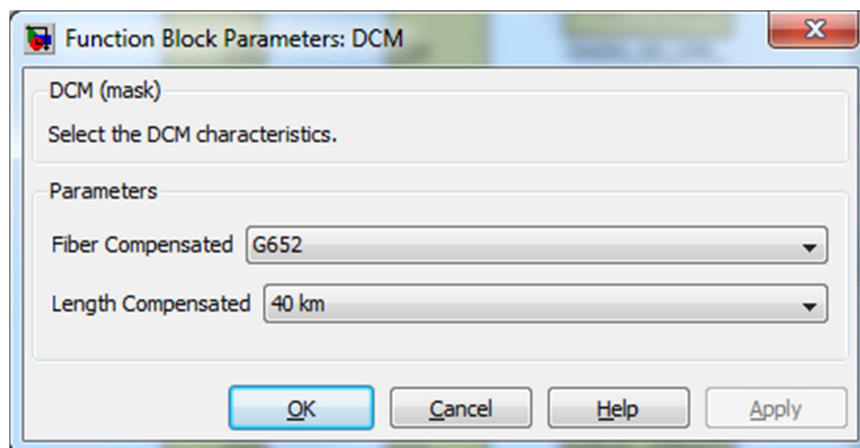
Os módulos compensadores de dispersão cromática, DCMs, normalmente são utilizados em sistemas ópticos após a fibra. Estes dispositivos variam de acordo com o tipo e comprimento da fibra utilizada. Para a seleção do componente a ser utilizado foi criada a interface presente na Figura 37. Dois campos de seleção devem ser especificados; o primeiro indica o tipo de fibra utilizado, sendo possíveis três escolhas: G.652, G.653 e G.655; o segundo campo determina a distância equivalente à dispersão compensada. Neste caso valores de 40 a 200 km foram especificados.

Chama-se a atenção para a fibra G.655 modelada no simulador. Esta fibra corresponde à NZDSF positiva, pois a utilização da NZDSF negativa se dá somente em enlaces com alternância na utilização de fibras positivas e negativas, resultando na compensação de dispersão ao longo do enlace, portanto não é necessária a utilização de DCMs para estes tipos de enlaces.

Com a seleção do modelo de DCM, o simulador carrega as especificações do canal de referência da dispersão, a variação da compensação entre canais e a perda por inserção correspondente. De acordo com as equações apresentadas na Tabela 4 é calculada então a compensação da

dispersão proporcionada pelo DCM e a perda por inserção é descontada da potência dos canais que passam pelo componente.

Figura 37. Interface para a seleção do DCM utilizado na simulação.



7.1.7 OADM

No caso de um enlace ter uma ramificação, podem ser utilizados OADMs que se responsabilizam por retirar ou adicionar canais específicos do *link* óptico. No simulador foi criado um OADM de quatro canais, sendo eles os canais 28, 29, 30, 31.

Como o método de construção de OADMs é igual ao de multiplexadores de filme fino, nos manuais de especificação destes componentes também só é encontrada a atenuação máxima. Por se tratar de cascadeamento de filtros, para aproximar o simulador da realidade foi necessário o ensaio destes dispositivos e assim, foram adquiridos os valores presentes na Tabela 8. Adotando o mesmo critério utilizado para calcular a atenuação máxima do canal com menor atenuação dos multiplexadores, calcularam-se os valores da Tabela 9. Assim determinaram-se as atenuações por canal apresentadas na Tabela 10. Lembrando que o método de construção dos filtros para adicionar e retirar canais é o mesmo. Portanto os valores para o cálculo da atenuação dos canais adicionados e retirados foram os mesmos. Foi definida também a atenuação dos canais do enlace que passam pelo módulo, mas não sofrem manobras, através de especificações do fabricante.

Tabela 8. Valores de atenuações mínimas medidas nos OADMs.

Add	Atenuação* (dB)	Drop	Atenuação* (dB)
1	0,63	7	0,93
2	0,62	8	0,58
3	0,85	9	0,95
4	0,97	10	1,02
5	0,54	11	0,69
6	0,54	12	0,64
7	0,91	13	0,78
8	0,52	14	1,13

* Atenuação do canal com menor perda por inserção.

Tabela 9. Resultados obtidos através da Tabela 8

Média	0,77 dBm
Desvio Padrão	0,2 dBm
Valor adotado	1,38 dB

Tabela 10. Valores de atenuação por canal utilizados no OADM.

Canal	Atenuação (dB)
C28	1,38
C29	1,52
C30	1,66
C31	1,8

Assim como nos multiplexadores, uma interface para a seleção dos canais a serem utilizados no componente foi criada (Figura 38). Nesta interface três abas são encontradas: *ADD*, para a seleção dos canais a serem adicionados no enlace; *Drop* para os canais a serem retirados; *Bridge* para canais que estão sendo transmitidos no *link* em questão, fazem parte da faixa de operação do OADM, mas não serão retirados, portanto simulando uma ponte do conector de saída para a entrada do canal em questão.

No caso de uma conexão na qual o canal inserido não é correspondente à porta conectada, uma mensagem de erro como a visualizada na Figura 39 é exibida. Após fazer a simulação pode-se então visualizar os parâmetros dos canais retirados e, com um duplo clique sobre o ícone do OADM, uma janela como a presente na Figura 40 é amostrada.

Figura 38. Interface para seleção de canais adicionados, retirados e os que serão feito jumpers.

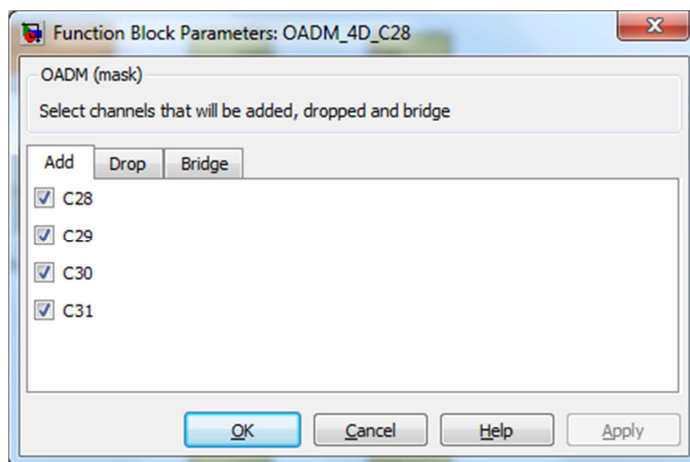


Figura 39. Mensagem de erro na inserção de canais no OADM.



Figura 40. Tabela com valores dos parâmetros dos canais retirados pelo OADM.

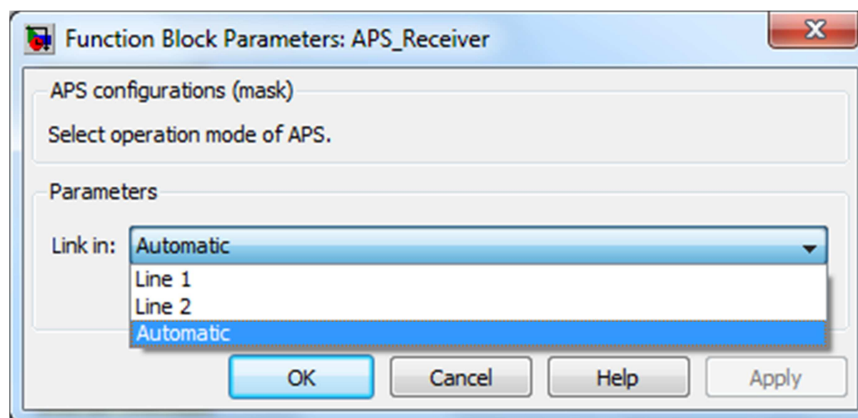
	Drop Channel	Lambda	Power	OSNR	Chromatic Dispersion
1	28	1.5549e+03	-10.7000	37.3958	259.1496
2	29	1.5541e+03	-10.8000	37.3693	258.4692
3	30	1.5533e+03	-10.9000	37.3417	257.7972
4	31	1.5525e+03	-11	37.3130	257.1168

7.1.8 APS

Os APS são utilizados para criar a redundância de enlaces de transmissão. No caso de possuir dois caminhos de transmissão, o APS detecta se ocorre a queda do *link* em um dos caminhos e chaveia a transmissão para o caminho em funcionamento. Este componente é composto de dois módulos, emissor e receptor. O emissor consiste em um módulo passivo responsável por prover duas saídas de sinal idênticas provenientes do sinal de entrada, portanto insere uma penalidade de potência ao sistema. O emissor possui a detecção do *link* a ser utilizado para a transmissão, e também insere uma perda por inserção ao sistema.

Um duplo clique sobre o ícone do receptor abre a janela para a seleção da linha a ser utilizada para o cálculo dos parâmetros do sinal (Figura 41). Três opções são disponíveis: *Line 1*, adquire o sinal da entrada 1 do APS receptor; *Line 2*, adquire o sinal da linha 2; *Automatic*, seleciona automaticamente o *link* a ser utilizado tendo como parâmetro de escolha a linha que apresenta maior atenuação. Abaixo do ícone é apresentada a opção escolhida, no caso da escolha pelo método automático, após a simulação este campo apresentará a linha utilizada para a simulação.

Figura 41. Interface de configuração do APS.



7.1.9 Receptor

O receptor identifica o modelo de *transceiver* selecionado no momento da configuração do transmissor e carrega as especificações do fabricante. Se algum parâmetro estiver fora de especificação, janelas com mensagens de erro irão aparecer, identificando o receptor da ocorrência e a inconsistência detectada. Estas mensagens podem ser visualizadas na Figura 42.

Figura 42. Mensagens de erro exibidas no receptor.



7.1.10 Analisador

Para analisar os parâmetros dos sinais em qualquer ponto do enlace foi criado o *WDM Analyzer*. Seu funcionamento se dá conectando-o ao ponto de interesse do enlace. Após fazer a simulação, um duplo clique sobre o seu ícone irá fazer com que seja mostrada uma tabela contendo todos os canais presentes naquele ponto do sistema, bem como os valores de potência, OSNR e dispersão cromática dos mesmos. Na parte inferior da janela ainda é apresentada uma tabela com os valores críticos, ou seja, potência total, menor OSNR e maior dispersão cromática. Um exemplo da tabela amostrada pode ser visualizado na Figura 43.

Figura 43. Tabela de parâmetros gerada pelo *WDM Analyzer*.

	Channel	Lambda	Power	OSNR	Chromatic Dispersion
1	28	1.5549e+03	-20.7000	37.5134	1.7277e+03
2	29	1.5541e+03	-20.9000	37.4917	1.7231e+03
3	30	1.5533e+03	-21.1000	37.4692	1.7186e+03
4	31	1.5525e+03	-21.3000	37.4457	1.7141e+03
5	32	1.5517e+03	-21.5000	37.4212	1.7096e+03
6	33	1.5509e+03	-21.7000	37.3958	1.7052e+03
7	34	1.5501e+03	-21.9000	37.3693	1.7007e+03
8	35	1.5493e+03	-22.1000	37.3417	1.6962e+03

	Total Power	Worst OSNR	Max. CD
1	-12.3450	37.3417	1.7277e+03

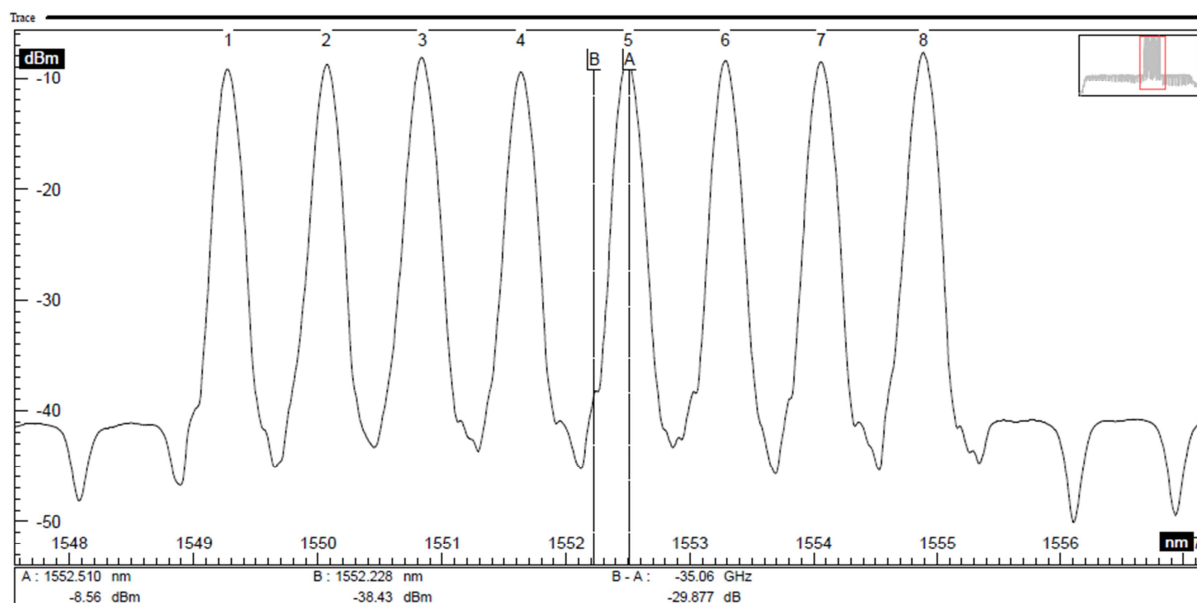
7.2 Validação do software

Para a validação do software foram utilizados equipamentos da linha PRISMA da empresa Digitel S.A, que consiste em uma solução WDM com capacidade de transportar até 40 canais DWDM a uma taxa de 10Gbps. A aquisição das medidas foi feita através do equipamento MTS-6000 da marca JDSU, equipado com um módulo analisador de espectro óptico OSA-110M que é capaz de fazer a leitura de -60 à +15dBm com uma precisão absoluta de $\pm 0,6$ dB. A inserção de dados se deu através do TestSet MTS-6000A também da JDSU.

Dois ensaios foram feitos para a avaliação do simulador criado. No primeiro buscou-se a representação de um enlace com ramificações para avaliar principalmente a perda de potência no enlace já no segundo teste o objetivo foi representar um longo enlace com diversas ampliações em cascata, fazendo com que haja uma grande degradação na OSNR.

Observa-se que para a aquisição das medidas de OSNR foi utilizado o método do ombro explicado na seção 6.3.1.1. Para a transmissão a 2,5Gbps o espectro gerado pelo OSA, Figura 44, apresentou a ocorrência do ombro a uma distância de 35GHz do centro dos canais.

Figura 44. Análise do espectro do sinal no ensaio 1.



7.2.1 Ensaio 1

O ensaio 1 representou uma configuração simulando uma rede com três sites de utilização dos dados transmitidos, (Figura 45) na qual o site A envia sinais para os sites B e C, no ponto B alguns canais são retirados e inseridos ao sistema para a comunicação entre B e C.

Com este objetivo o enlace consistia de dois *transponders* do modelo TRAN 4 2R BI-DIR, equipados com 4 *transceivers* Finisar modelo SFP FWLF1631XX cada um. Os dados emitidos pelos *transponders* foram multiplexados através do MUX 8D C28, após o sinal foi amplificado pelo amplificador EOA B21C A e injetado na fibra. Esta por sua vez trata-se de uma fibra tipo STD G.652 com 90 km de comprimento e atenuação de 20,2dB. Após passar por um atenuador de 5dB o sinal foi amplificado pelo EOA P15C A, a compensação da dispersão cromática foi feita através do DCM C100 080. Para a retirada e inserção dos novos canais foi utilizado o OADM 4D C28, que recebe e entrega os sinais a um *transponder* de mesmo modelo que o anterior. No segundo *link*, B para C, foi feita uma amplificação através de outro EOA B21C A, que insere o sinal em mais 50km de fibra tipo STD G.652, a qual possui uma atenuação de 12dB. Neste caso a dispersão foi compensada por um DCM C100 040 e então através do DEMUX 8D C28 o sinal foi demultiplexado. A Figura 46, apresenta uma foto do *setup* montado para o ensaio e a Figura 47 o diagrama do simulador.

Figura 45. Representação do enlace do ensaio 1.

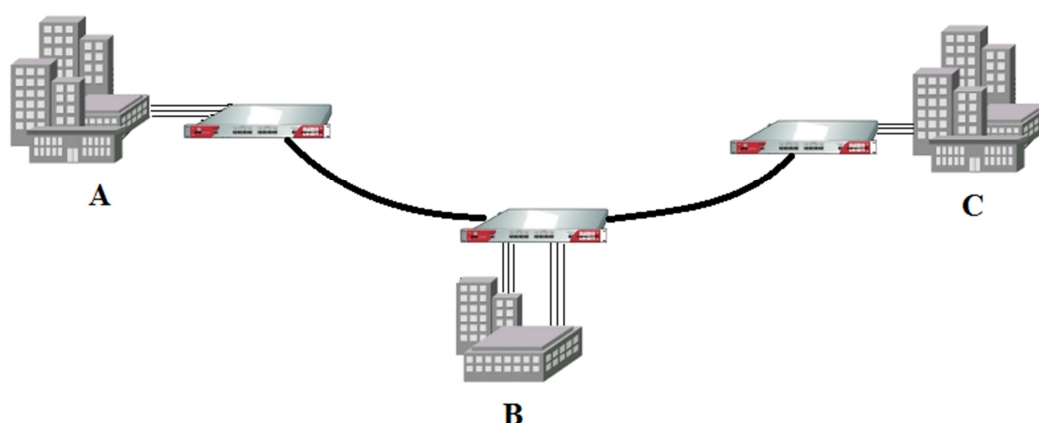


Figura 46. Foto do *setup* montado para o ensaio 1.

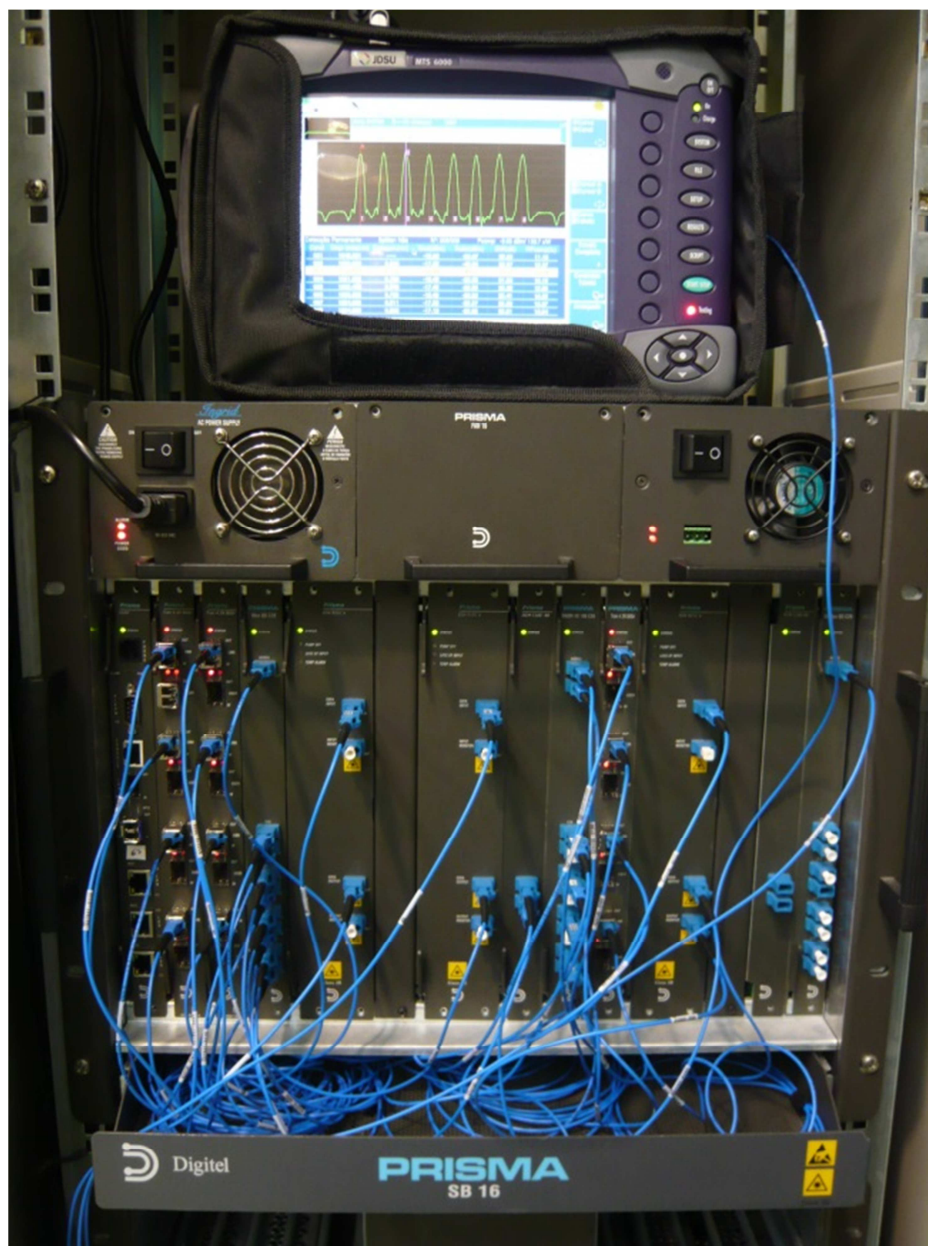
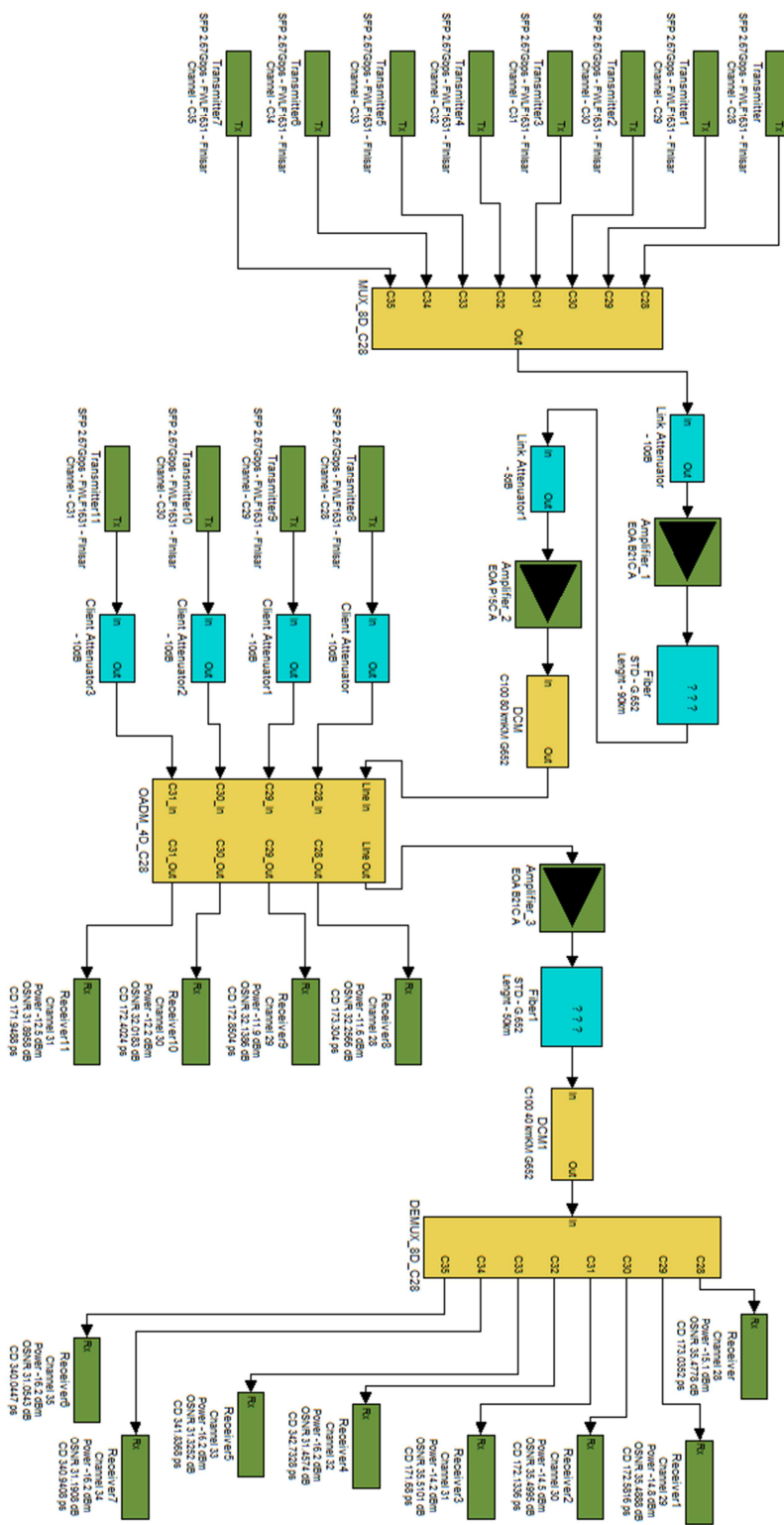


Figura 47. Imagem do diagrama criado no simulador.



Para validar o desempenho do simulador, foram analisados os dados de entrada no sistema e seu comportamento antes e depois de cada componente, exceto dos atenuadores. Na Tabela 11 estão apresentadas as médias dos erros dos canais, para os parâmetros de potência e OSNR de cada componente. Estes resultados foram retirados da análise feita nos dados presentes no APÊNDICE A.

Os valores de erro médio presentes na Tabela 11, correspondem à diferença entre os dados simulados e testados de acordo com a equação (18).

$$\bar{\epsilon} = \overline{Valor_{Sim}} - \overline{Valor_{Test}} \quad (18)$$

Sendo:

$\bar{\epsilon}$ = erro médio do parâmetro em questão, dB;

$\overline{Valor_{Sim}}$ = média dos valores dos canais do dispositivo em questão, calculados pelo simulador, dB;

$\overline{Valor_{Test}}$ = média dos valores dos canais do dispositivo em questão, medidas no ensaio, dB;

A perda por inserção corresponde à atenuação causada no sinal devido a sua transmissão por determinado dispositivo, logo, um erro médio com sinal positivo significa que o simulador atenuou mais o sinal do que o teste realizado. O ganho de um amplificador é a diferença entre a potência de saída a de entrada, portanto um erro médio positivo no ganho indica que a potência de saída do simulador será maior do que a o teste. A degradação da OSNR indica quantos dB foram perdidos na relação sinal-ruído do sinal quando este passou por determinado componente, assim um erro positivo neste parâmetro indica que o simulador aplica uma perda maior na OSNR.

A potência inserida pelo emissor ao sistema foi determinada adotando o pior caso apontado pelas especificações do fabricante, logo é de fundamental importância que este valor seja inferior ao medido nos testes, já para o valor da OSNR foi feita uma aquisição de dados e estatisticamente se determinou um valor que seja cerca de 95% das vezes inferior ao valor real do emissor.

Tabela 11. Média do erro dos canais, para os valores dos parâmetros de cada componente.

Erro Médio	
Emissor - SFP 2.67Gbps - FWLF1631 - Finisar	
Potência	-2,01 dBm
OSNR	-2,14 dB
Multiplexador – MUX_8D_C28	
Perda por Inserção	0,62 dB
Degradação da OSNR	-1,12 dB
Amplificador 1 – EOA B21C A	
Ganho	-0,28 dB
Degradação da OSNR	0,18 dB
Amplificador 2 – EOA P15C A	
Ganho	0,81 dB
Degradação da OSNR	0,04 dB
DCM 1 – C100 80km G.652	
Perda por Inserção	0,58 dB
Degradação da OSNR	0,54 dB
OADM - OADM_4D_C28	
Perda dos canais retirados	1,13 dB
Degradação da OSNR dos canais retirados	1,22 dB
Perda dos canais adicionados	0,46 dB
Degradação da OSNR dos canais adicionados	-1,62 dB
Perda dos canais passantes	1,13 dB
Degradação da OSNR dos canais passantes	-0,24 dB
Amplificador 3 – EOA B21C A	
Ganho	0,50 dB
Degradação da OSNR	-0,14 dB
DCM 2 – C100 40km G.652	
Perda por Inserção	1,35 dB
Degradação da OSNR	0,92 dB
Demultiplexador - DEMUX_8D_C28	
Perda por Inserção	0,75 dB
Degradação da OSNR	0,95 dB

A perda por inserção de todos os dispositivos passivos, presentes no enlace, foram maiores do que as medidas adquiridas no ensaio. Estes valores eram esperados, pois para os equipamentos utilizou-se o pior caso de atenuação constante nas especificações. No simulador, o ganho dos amplificadores é correspondente ao valor nominal cedido pelo fabricante, notou-se que no

ensaio houve uma pequena variação neste valor. O caso mais crítico ocorreu no amplificador 2, com 0,81dB a mais de média de ganho.

Nos valores da degradação média da OSNR, percebe-se que, o amplificador 3, os canais adicionados e passantes do OADM e o multiplexador apresentaram um valor inferior ao obtido nos testes. Para o simulador, por se tratarem de dispositivos passivos, o multiplexador e o OADM não degradam o valor da OSNR. No entanto, os valores do ensaio se alteraram, provocando um erro médio de, -1,12dB para o multiplexador e -1,62dB para os canais adicionados pelo OADM. Se for analisado o método de medida, os dados de entrada foram adquiridos individualmente para cada canal, e na saída do dispositivo o OSA analisa todos os canais simultaneamente. Como o ruído para o cálculo da OSNR é adquirido numa faixa lateral ao canal, a análise simultânea dos diversos canais pode causar a interferência desta aquisição devido à potência injetada pelo canal adjacente ao analisado. O caso oposto ocorre na medida dos canais retirados no OADM.

Nos DCMs e demultiplexador, que também são componentes passivos, houve uma variação positiva na OSNR. Neste caso por estes dispositivos possuírem filtros ópticos, a banda lateral dos canais é atenuada causando um aumento na medida da OSNR. Para os amplificadores a variação da degradação da OSNR foi pequena, ficando dentro da faixa de incerteza do equipamento.

Tabela 12. Parâmetros do sinal, medidos e calculados, ao fim do enlace do ensaio 1.

Canal	Lambda	Potência (dBm)			OSNR (dB)			Dispersão Cromática (ps)
		Simulador	Ensaio	Erro	Simulador	Ensaio	Erro	
28,00	1554,90	-15,10	-8,55	-6,55	33,92	37,54	-3,62	173,03
29,00	1554,10	-14,80	-9,50	-5,30	33,93	37,59	-3,66	172,58
30,00	1553,30	-14,50	-11,06	-3,44	33,94	35,18	-1,24	172,13
31,00	1552,50	-14,20	-10,60	-3,60	33,94	36,06	-2,12	171,68
32,00	1551,70	-16,20	-11,60	-4,60	30,34	33,60	-3,26	342,73
33,00	1550,90	-16,20	-10,33	-5,87	30,22	33,43	-3,21	341,83
34,00	1550,10	-16,20	-10,40	-5,80	30,10	33,11	-3,01	340,94
35,00	1549,30	-16,20	-10,62	-5,58	29,97	34,60	-4,63	340,04
Erro Médio				-5,09				-3,09

Ao final do enlace nota-se que o simulador inseriu mais atenuação e degradação da OSNR do que o sistema real. Analisando os dados iniciais, o simulador apresentava a potência inserida pelo emissor em média 2,01dBm menor do que a real e a OSNR 2,14dB menor. Ao final

do enlace, como observado na Tabela 12, estes valores são respectivamente 5.09dBm e 3.09dB menores, fato explicado em razão de o simulador considerar os valores de atenuação dos componentes e figura de ruído dos amplificadores como o pior caso possível.

Os valores da dispersão cromática não puderam ser validados em função da indisponibilidade de um equipamento que faça esta medida, mas os cálculos foram feitos de acordo com as recomendações da ITU.

7.2.2 Ensaio 2

O ensaio 2 foi realizado para analisar o comportamento do simulador no caso de um enlace com diversas ampliações. Para isso, baseado na mesma plataforma que o ensaio anterior foram inseridos 8 canais de 2,5Gbps, em um sistema composto de um multiplexador MUX 8D C28, que agrega os sinais em uma única fibra. Após a multiplexação o sinal passa pelos amplificadores EOA B21C A, EOA P15C A, EOA B21C A, EOA P25C A, EOA P25C A, respectivamente, e então é demultiplexado pelo DEMUX 8D C28. Entre os amplificadores foram adicionados atenuadores para simular a perda inserida pela fibra em um enlace real. Na Figura 48 é apresentado o diagrama do ensaio, gerado pelo simulador. Os dados adquiridos no ensaio estão presentes no APÊNDICE B.

Tabela 13. Parâmetros do sinal, medidos e calculados, ao fim do enlace do ensaio 2.

Canal	Lambda	Potência			OSNR		
		Simulador	Ensaio	Erro	Simulador	Ensaio	Erro
28,00	1554,90	-19,80	-14,70	-5,10	23,31	25,50	-2,19
29,00	1554,10	-19,80	-16,60	-3,20	23,12	23,90	-0,78
30,00	1553,30	-19,80	-16,70	-3,10	22,93	24,50	-1,57
31,00	1552,50	-19,80	-17,05	-2,75	22,75	24,10	-1,35
32,00	1551,70	-19,80	-18,00	-1,80	22,56	23,50	-0,94
33,00	1550,90	-19,80	-17,00	-2,80	22,37	25,26	-2,89
34,00	1550,10	-19,80	-17,20	-2,60	22,18	24,54	-2,36
35,00	1549,30	-19,80	-17,40	-2,40	21,99	23,94	-1,95
			Média	-2,97		Média	-1,75

No início do enlace o simulador apresentou uma potência, em média, 1,98dBm menor que o teste, e uma OSNR média 2,43dB menor. Se forem analisados estes valores ao fim do en-

lace observa-se que a potência no simulador foi em média 2,97dBm menor e que a OSNR média apresentou um valor 1,75dB menor, ver Tabela 13.

A potência, como comentado anteriormente, por levar em conta o pior caso dos componentes sofrerá uma redução no seu valor. Pode ser observado na Tabela 14 que apenas o terceiro amplificador apresentou ganho médio maior do que o esperado, 0,09dB, valor inferior à precisão do equipamento utilizado.

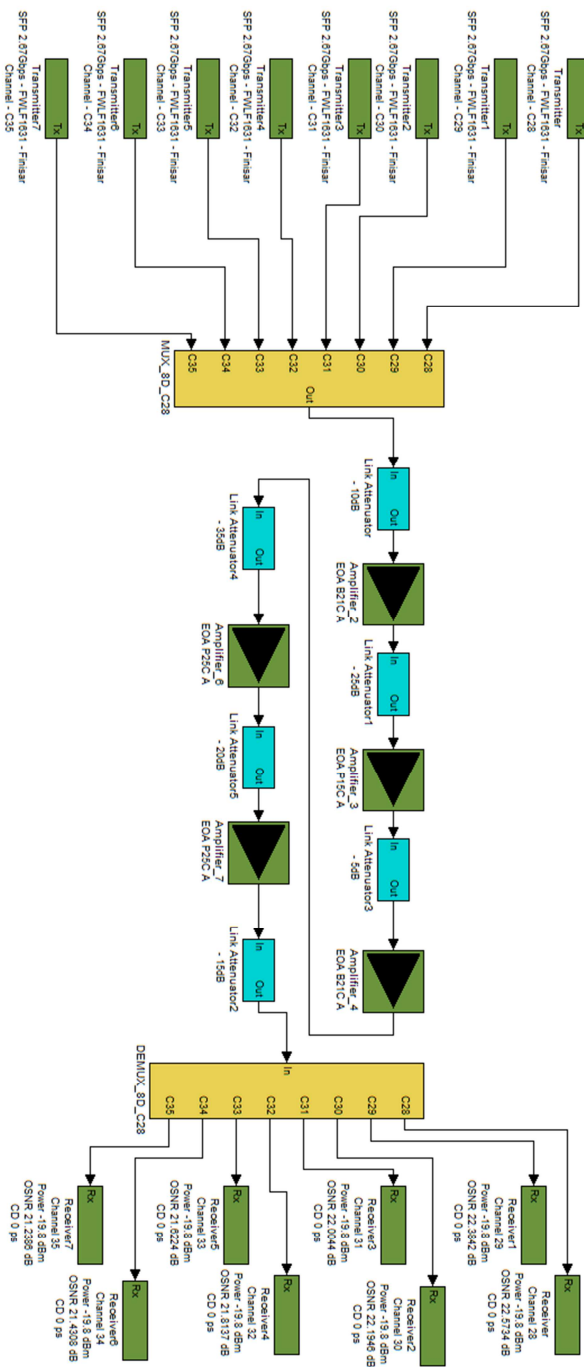
Tabela 14. Média do erro dos canais para os valores dos parâmetros do ensaio 2.

Erro Médio	
Emissor	
Potência	-1,98 dBm
OSNR	-2,43 dB
Amplificador 1 – EOA B21C A	
Ganho	-0,43 dB
Degradação da OSNR	-0,16 dB
Amplificador 2 – EOA P15C A	
Ganho	-0,13 dB
Degradação da OSNR	-0,62 dB
Amplificador 3 – EOA B21C A	
Ganho	0,09 dB
Degradação da OSNR	-0,10 dB
Amplificador 4 – EOA P25C A	
Ganho	-0,17 dB
Degradação da OSNR	-1,04 dB
Amplificador 5 – EOA P25C A	
Ganho	-0,85 dB
Degradação da OSNR	-0,17 dB
DEMUX 8D C28	
Perda por Inserção	0,81 dB
Degradação da OSNR	2,26 dB

Ao se tratar da degradação da OSNR gerada pelos amplificadores, nota-se que todos apresentaram um valor inferior ao esperado pelo simulador. O pior caso ocorreu no quarto amplificador. Este apresentou uma degradação média da OSNR 1,04dB menor que o ensaio, mas analisando a potência de entrada deste dispositivo, encontra-se um valor inferior a -30dBm, que é o limite de potência para qual é garantida a precisão de 0,6dB no cálculo da OSNR pelo OSA utilizado. Nota-se ainda que, a imprecisão na determinação da potência pelo simulador reflete no

cálculo da OSNR, pois é um dado de entrada deste cálculo. Para o demultiplexador a diferença no valor da OSNR deve-se a filtragem do canal óptico, que faz com que a borda do sinal, ponto em que é adquirido o valor do ruído para o cálculo da OSNR, seja atenuado mascarando o ruído.

Figura 48. Diagrama do simulador para o ensaio 2.



8 Conclusões

O projeto de diplomação desenvolvido auxiliou no aprofundamento do conhecimento de uma área bastante específica e pouco abordada durante o curso de Engenharia Elétrica. No entanto notou-se que a base do conhecimento para o fácil entendimento de novas tecnologias é de extrema importância e muito bem aplicada ao curso.

Em um período de aproximadamente três meses de dedicação quase que exclusiva no desenvolvimento deste projeto, vários níveis do conhecimento foram exigidos, pois o trabalho começou desde a pesquisa do funcionamento de sistema DWDM, identificando sua utilização, passando ao nível da funcionalidade de cada componente e chegando ao conhecimento da tecnologia utilizada no desenvolvimento destes dispositivos. Neste ponto passou a ser importante a determinação do efeito de cada dispositivo na transmissão do sinal, quais efeitos são relevantes na determinação da qualidade do sinal e como calculá-los.

A complexibilidade da determinação dos parâmetros devido às suas dependências e a flexibilidade da expansão dos enlaces ópticos, apontou a grande utilidade de um simulador de enlaces ópticos e junto com este surgiu a ideia da implementação de alarmes que auxiliassem na identificação de inconformidades na operação dos dispositivos.

A escolha da implementação do simulador por meio da criação de uma biblioteca para Simulink tornou o sistema muito intuitivo. Os diagramas gerados são de fácil entendimento apresentando diversas informações úteis, como modelo dos dispositivos utilizados, algumas características dos mesmos e parâmetros dos sinais recebidos ao final do enlace. A fácil configuração dos dispositivos se dá por meio de interfaces bastante simples, que são acessadas por meio de um duplo clique sobre os componentes. Ainda após a rodar a simulação, pode-se acessar os parâmetros do sinal em diversos pontos do enlace por meio da utilização de blocos de análise, os quais foram criados exclusivamente para facilitar o desenvolvimento do enlace. Os parâmetros dos sinais transmitidos podem ser acessados também com um duplo clique sobre o demultiplexador e OADM quando utilizados.

A comparação dos valores obtidos por meio do simulador e dos testes realizados com a plataforma PRISMA Digitel, demonstrou uma boa fidelidade do simulador. Os valores de degradação da potência e OSNR gerados pelos diversos blocos simuladores, normalmente corresponderam às medidas, ficando em sua maioria dentro da faixa de precisão do equipamento utilizado.

Portanto o simulador mostrou-se uma ferramenta apta ao auxílio no desenvolvimento de enlaces ópticos DWDM, visto que seus cálculos apresentaram valores abaixo dos parâmetros medidos, em virtude da utilização do pior caso constante nas especificações dos componentes.

Embora não foi possível fazer a aferição do cálculo da dispersão cromática do sinal, os cálculos utilizados seguiram as recomendações da ITU, e os coeficientes necessários para este cálculo são facilmente encontrados nas especificações das fibras ópticas, o que garante a confiabilidade dos cálculos.

Como trabalhos futuros, ficam o estudo mais detalhado de amplificadores Raman para a sua modelagem, a aferição dos cálculos da dispersão cromática e o levantamento da curva característica dos receptores, pois nas especificações dos *transceivers*, normalmente um dos parâmetros calculados no simulador é fixado, e dois ou três pontos variando os demais parâmetros são fornecidos como limitantes da sensibilidade do receptor. Isto acaba gerando uma grande lacuna na determinação da funcionalidade ou não dos enlaces simulados.

REFERÊNCIAS

AGRAWAL GOVING P. Fiber-Optic Communications Systems - Third Edition [Book]. - New York : John Wiley & Sons, 2002.

AZADEH MOHAMMAD Fiber Optics Engineering [Book]. - Boston : Springer-Verlag US, 2009.

CHOMYCZ BOB Planning Fiber Optics Networks [Book]. - New York : McGraw-Hill Professional, 2009.

DUTTA ACHYUT K., DUTTA NILOY K. and FUJIWARA MASAHIKO WDM Technologies: Passive Optical Components [Book]. - Sandiego : Academic Press, 2003. - Vol. II.

EMCORE Corporation Fiber-Optics.Info [Online] // Fiber-Optics.Info. - EMCORE Corporation, 2013. - Maio 03, 2013. - http://www.fiber-optics.info/articles/fiber_dispersion.

GUMASTE ASHWIN e TONY ANTONY DWDM Network Design and Engineering Solutions [Livro]. - Indianapolis, EUA : Cisco Press, 2002.

INTERNATIONAL ELETROTECHNICAL COMMISSION Part 2-9: Digital systems – Optical signal-to-noise ratio measurement for dense wavelength-division multiplexed systems // IEC 61280 - Fibre optic communication subsystem test procedure. - 2009.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION ITU-T G.652 // Characteristics of a single-mode optical fibre and cable. - Genebra : ITU, 11 2009.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION ITU-T G.653 // Characteristics of a dispersion-shifted, single-mode optical fibre and cable. - Genebra : ITU, 2010.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION ITU-T G.655 // Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable. - Genebra : ITU, 11 2009.

KARTALOPOULOS STAMATIOS V. Introduction on DWDM Technology [Livro]. - Bellingham : SPIE Optical Engineering Press, 2000.

MOENCH WOLFGANG and LARIKOVA JULIA Measuring the Optical Signal-to-Noise Ratio in Agile Optical Networks [Conference] // Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference. - Anaheim, EUA : OFC/NFOEC , 2007.

MOENCH WOLFGANG How to Measure the True OSNR in ROADM-Based Networks // JDSU - White Paper. - 2007.

PANDA CAM DIREKT Panda Cam Direkt [Online] // Panda Cam Direkt. - 2013. - Abril 15, 2013. - <http://www.pandacomdirekt.com/en/technologies/wdm/what-is-wdm.html>.

PRA THIAGO DAI Medidor de taxa de erro para fibra óptica [Report]. - Porto Alegre : [s.n.], 2012.

PROXIMION AB Dispersion Management [White Paper] // Fiber Bragg Grating based DCM. - Kista : [s.n.], 2013.

APÊNDICE A

Tabelas com valores de potência óptica, relação sinal ruído óptico e dispersão cromática, calculados pelo simulador e medidos no ensaio 1.

Tabela 1. Valores dos parâmetros no transmissor

Canal	Lambda (nm)	Potência (dBm)			OSNR (dB)			Dispersão Cromática (ps)
		Simulador	Ensaio	Erro	Simulador	Ensaio	Erro	
28	1554,90	0,00	2,25	-2,25	34,35	37,23	-2,88	0
29	1554,10	0,00	1,60	-1,60	34,35	37,60	-3,25	0
30	1553,30	0,00	2,20	-2,20	34,35	36,75	-2,40	0
31	1552,50	0,00	1,95	-1,95	34,35	36,86	-2,51	0
32	1551,70	0,00	1,90	-1,90	34,35	36,50	-2,15	0
33	1550,90	0,00	2,40	-2,40	34,35	34,50	-0,15	0
34	1550,10	0,00	1,80	-1,80	34,35	35,00	-0,65	0
35	1549,30	0,00	1,95	-1,95	34,35	37,50	-3,15	0
			Média	-2,01		Média	-2,14	

Tabela 2. Valores dos parâmetros na entrada do amplificador 1, EOA B21C A

Canal	Lambda (nm)	Potência (dBm)			OSNR (dB)			Dispersão Cromática (ps)
		Simulador	Ensaio	Erro	Simulador	Ensaio	Erro	
28	1554,90	-11,70	-8,85	-2,85	34,35	36,15	-1,80	0
29	1554,10	-11,90	-10,02	-1,88	34,35	36,20	-1,85	0
30	1553,30	-12,10	-9,47	-2,63	34,35	36,08	-1,73	0
31	1552,50	-12,30	-9,58	-2,72	34,35	35,39	-1,04	0
32	1551,70	-12,50	-10,77	-1,73	34,35	35,25	-0,90	0
33	1550,90	-12,70	-9,28	-3,42	34,35	34,19	0,16	0
34	1550,10	-12,90	-9,99	-2,91	34,35	33,75	0,60	0
35	1549,30	-13,10	-10,26	-2,84	34,35	35,97	-1,62	0
			Média	-2,62		Média	-1,02	

Tabela 3. Valores dos parâmetros na saída do amplificador 1, EOA B21C A

Canal	Lambda (nm)	Potência (dBm)			OSNR (dB)			Dispersão Cromática (ps)	
		Simulador	Ensaio	Erro	Simulador	Ensaio	Erro		
28	1554,90	3,30	6,78	-3,48	33,94	36,30	-2,36	0	
29	1554,10	3,10	5,04	-1,94	33,93	35,63	-1,70	0	
30	1553,30	2,90	5,79	-2,89	33,91	35,42	-1,51	0	
31	1552,50	2,70	5,95	-3,25	33,89	35,53	-1,64	0	
32	1551,70	2,50	4,74	-2,24	33,87	34,66	-0,79	0	
33	1550,90	2,30	5,86	-3,56	33,84	34,12	-0,28	0	
34	1550,10	2,10	5,28	-3,18	33,82	33,63	0,19	0	
35	1549,30	1,90	4,60	-2,70	33,80	35,35	-1,55	0	
				Média	-2,91			Média	-1,21

Tabela 4. Valores dos parâmetros na entrada do amplificador 2, EOA P15C A

Canal	Lambda	Potência (dBm)			OSNR (dB)			Dispersão Cromática (ps)	
		Simulador	Ensaio	Erro	Simulador	Ensaio	Erro		
28	1554,90	-21,90	-18,04	-3,86	33,94	35,71	-1,77	1554,90	
29	1554,10	-22,10	-19,16	-2,94	33,93	35,97	-2,04	1550,80	
30	1553,30	-22,30	-18,88	-3,42	33,91	35,76	-1,85	1546,80	
31	1552,50	-22,50	-18,95	-3,55	33,89	35,00	-1,11	1542,70	
32	1551,70	-22,70	-20,03	-2,67	33,87	34,54	-0,67	1538,70	
33	1550,90	-22,90	-18,67	-4,23	33,84	33,81	0,03	1534,60	
34	1550,10	-23,10	-19,45	-3,65	33,82	33,25	0,57	1530,60	
35	1549,30	-23,30	-19,77	-3,53	33,80	35,45	-1,65	1526,60	
				Média	-3,48			Média	-1,06

Tabela 5. Valores dos parâmetros na saída do amplificador 2, EOA P15C A

Canal	Lambda	Potência (dBm)			OSNR (dB)			Dispersão Cromática (ps)	
		Simulador	Ensaio	Erro	Simulador	Ensaio	Erro		
28	1554,90	-6,90	-3,69	-3,21	31,08	32,80	-1,72	1554,90	
29	1554,10	-7,10	-5,05	-2,05	30,97	32,30	-1,33	1550,80	
30	1553,30	-7,30	-4,88	-2,42	30,86	31,90	-1,04	1546,80	
31	1552,50	-7,50	-4,51	-2,99	30,75	32,31	-0,62	1542,70	
32	1551,70	-7,70	-5,60	-2,10	30,63	31,37	-0,61	1538,70	
33	1550,90	-7,90	-4,58	-3,32	30,52	31,24	-0,72	1534,60	
34	1550,10	-8,10	-5,19	-2,91	30,40	30,81	-0,41	1530,60	
35	1549,30	-8,30	-5,90	-2,40	30,28	31,6	-0,53	1526,60	
				Média	-2,68			Média	-0,87

Tabela 6. Valores dos parâmetros na entrada do OADM 4D C28

Canal	Lambda	Potência (dBm)			OSNR (dB)			Dispersão Cromática (ps)
		Simulador	Ensaio	Erro	Simulador	Ensaio	Erro	
28	1554,90	-9,90	-6,40	-3,50	31,08	33,00	-1,92	173,30
29	1554,10	-10,10	-7,25	-2,85	30,97	33,05	-2,08	172,85
30	1553,30	-10,30	-7,27	-3,03	30,86	32,34	-1,48	172,40
31	1552,50	-10,50	-7,07	-3,43	30,75	32,67	-0,98	171,95
32	1551,70	-10,70	-8,24	-2,46	30,63	31,73	-1,22	171,50
33	1550,90	-10,90	-6,83	-4,07	30,52	31,85	-1,33	171,05
34	1550,10	-11,10	-7,64	-3,46	30,40	31,54	-1,14	170,60
35	1549,30	-11,30	-8,06	-3,24	30,28	32,5	-1,26	170,16
			Média	-3,26		Média	-1,43	

Tabela 7. Valores dos parâmetros dos canais retirados no OADM 4D C28

Canal	Lambda	Potência (dBm)			OSNR (dB)			Dispersão Cromática (ps)
		Simulador	Ensaio	Erro	Simulador	Ensaio	Erro	
28	1554,90	-11,60	-6,97	-4,63	31,08	34,60	-3,52	173,30
29	1554,10	-11,90	-8,60	-3,30	30,97	33,40	-2,43	172,85
30	1553,30	-12,20	-7,56	-4,64	30,86	34,25	-3,39	172,40
31	1552,50	-12,50	-7,75	-4,75	30,75	33,7	-2,95	171,95
			Média	-4,33		Média	-3,07	

Tabela 8. Valores dos parâmetros dos canais adicionados no OADM 4D C28

Canal	Lambda	Potência (dBm)			OSNR (dB)			Dispersão Cromática (ps)
		Simulador	Ensaio	Erro	Simulador	Ensaio	Erro	
28	1554,90	-10,00	-7,83	-2,17	34,35	37,52	-3,17	0,00
29	1554,10	-10,00	-7,95	-2,05	34,35	38,02	-3,67	0,00
30	1553,30	-10,00	-7,88	-2,12	34,35	35,55	-1,20	0,00
31	1552,50	-10,00	-8,02	-1,98	34,35	38,83	-4,48	0,00
	Média	-10,00	-7,92	-2,08		Média	-3,13	

Tabela 9. Valores dos parâmetros na entrada do amplificador 3, EOA B21C A

Canal	Lambda	Potência (dBm)			OSNR (dB)			Dispersão Cromática (ps)
		Simulador	Ensaio	Erro	Simulador	Ensaio	Erro	
28	1554,90	-12,00	-8,74	-3,26	34,35	36,66	-2,31	0,00
29	1554,10	-11,90	-9,08	-2,82	34,35	36,57	-2,22	0,00
30	1553,30	-11,80	-10,33	-1,47	34,35	34,81	-0,46	0,00
31	1552,50	-11,70	-9,11	-2,59	34,35	35,41	-1,06	0,00
32	1551,70	-13,90	-10,09	-3,81	30,63	31,79	-1,16	171,50
33	1550,90	-14,10	-9,09	-5,01	30,52	31,70	-1,18	171,05
34	1550,10	-14,30	-9,65	-4,65	30,40	31,13	-0,73	170,60
35	1549,30	-14,50	-10,21	-4,29	30,28	32,04	-1,76	170,16
				Média	-3,49	Média		-1,36

Tabela 10. Valores dos parâmetros na saída do amplificador 3, EOA B21C A

Canal	Lambda	Potência (dBm)			OSNR (dB)			Dispersão Cromática (ps)
		Simulador	Ensaio	Erro	Simulador	Ensaio	Erro	
28	1554,90	3,00	5,95	-2,95	33,92	36,05	-2,13	0,00
29	1554,10	3,10	5,61	-2,51	33,93	35,90	-1,97	0,00
30	1553,30	3,20	4,06	-0,86	33,94	33,98	-0,04	0,00
31	1552,50	3,30	5,19	-1,89	33,94	34,50	-0,56	0,00
32	1551,70	1,10	4,57	-3,47	30,34	31,67	-1,33	171,50
33	1550,90	0,90	5,39	-4,49	30,22	31,45	-1,23	171,05
34	1550,10	0,70	4,84	-4,14	30,10	31,00	-0,90	170,60
35	1549,30	0,50	4,09	-3,59	29,97	31,60	-1,63	170,16
				Média	-2,99	Média		-1,22

Tabela 11. Valores dos parâmetros na entrada do DEMUX 8D C28

Canal	Lambda	Potência (dBm)			OSNR (dB)			Dispersão Cromática (ps)
		Simulador	Ensaio	Erro	Simulador	Ensaio	Erro	
28	1554,90	-12,00	-7,83	-4,17	33,92	36,19	-2,27	173,03
29	1554,10	-11,90	-8,04	-3,86	33,93	36,37	-2,44	172,58
30	1553,30	-11,80	-9,49	-2,31	33,94	34,63	-0,69	172,13
31	1552,50	-11,70	-8,45	-3,25	33,94	35,24	-1,30	171,68
32	1551,70	-13,90	-9,67	-4,23	30,34	32,60	-2,26	342,73
33	1550,90	-14,10	-8,12	-5,98	30,22	32,67	-2,45	341,83
34	1550,10	-14,30	-8,82	-5,48	30,10	32,21	-2,11	340,94
35	1549,30	-14,50	-9,05	-5,45	29,97	33,63	-3,66	340,04
				Média	-4,34	Média		-2,15

Tabela 12. Valores dos parâmetros na saída do DEMUX 8D C28

Canal	Lambda	Potência (dBm)			OSNR (dB)			Dispersão Cromática (ps)
		Simulador	Ensaio	Erro	Simulador	Ensaio	Erro	
28	1554,90	-15,10	-8,55	-6,55	33,92	37,54	-3,62	173,03
29	1554,10	-14,80	-9,50	-5,30	33,93	37,59	-3,66	172,58
30	1553,30	-14,50	-11,06	-3,44	33,94	35,18	-1,24	172,13
31	1552,50	-14,20	-10,60	-3,60	33,94	36,06	-2,12	171,68
32	1551,70	-16,20	-11,60	-4,60	30,34	33,60	-3,26	342,73
33	1550,90	-16,20	-10,33	-5,87	30,22	33,43	-3,21	341,83
34	1550,10	-16,20	-10,40	-5,80	30,10	33,11	-3,01	340,94
35	1549,30	-16,20	-10,62	-5,58	29,97	34,60	-4,63	340,04
				Média	-5,09	Média		-3,09

Tabelas com os resultados médios das atenuações, ganho dos amplificadores e degradação da OSNR dos canais de cada componente segundo as equações (1),(2) e (3) respectivamente

$$IL = Pwr_{IN\ dBm} - Pwr_{OUT\ dBm} \quad (1)$$

$$Ganho = Pwr_{OUT\ dBm} - Pwr_{IN\ dBm} \quad (2)$$

$$OSNR_{deg} = OSNR_{IN\ dB} - OSNR_{OUT\ dB} \quad (3)$$

Tabela 13. Valores das degradações proporcionadas pelo MUX 8D C28

Canal	Lambda	Perda por inserção (dB)		Degradação da OSNR (dB)	
		Simulador	Ensaio	Simulador	Ensaio
28	1554,90	1,70	1,10	0,00	1,08
29	1554,10	1,90	1,62	0,00	1,40
30	1553,30	2,10	1,67	0,00	0,67
31	1552,50	2,30	1,53	0,00	1,47
32	1551,70	2,50	2,67	0,00	1,25
33	1550,90	2,70	1,68	0,00	0,31
34	1550,10	2,90	1,79	0,00	1,25
35	1549,30	3,10	2,21	0,00	1,53
Média		2,40	1,78	0,00	1,12
Erro Médio		0,62		-1,12	

Tabela 14. Valores das degradações e ganhos proporcionados pelo amplificador 1, EOA B21C A

Canal	Lambda	Ganho (dB)		Degradação da OSNR (dB)	
		Simulador	Ensaio	Simulador	Ensaio
28	1554,90	15,00	15,63	0,41	-0,15
29	1554,10	15,00	15,06	0,42	0,57
30	1553,30	15,00	15,26	0,44	0,66
31	1552,50	15,00	15,53	0,46	-0,14
32	1551,70	15,00	15,51	0,48	0,59
33	1550,90	15,00	15,14	0,51	0,07
34	1550,10	15,00	15,27	0,53	0,12
35	1549,30	15,00	14,86	0,55	0,62
	Média	15,00	15,28	0,48	0,29
	Erro Médio	-0,28		0,18	

Tabela 15. Valores das degradações e ganhos proporcionados pelo amplificador 2, EOA P15C A

Canal	Lambda	Ganho (dB)		Degradação OSNR (dB)	
		Simulador	Ensaio	Simulador	Ensaio
28	1554,90	15,00	14,35	2,86	2,91
29	1554,10	15,00	14,11	2,95	3,67
30	1553,30	15,00	14,00	3,04	3,86
31	1552,50	15,00	14,44	3,14	2,69
32	1551,70	15,00	14,43	3,23	3,17
33	1550,90	15,00	14,09	3,33	2,57
34	1550,10	15,00	14,26	3,42	2,44
35	1549,30	15,00	13,87	3,52	3,85
	Média	15,00	14,19	3,19	3,15
	Erro Médio	0,81		0,04	

Tabela 16. Valores das degradações proporcionadas pelo DCM C100 080KM G652

Canal	Lambda	Perda por inserção (dB)		Degradação da OSNR (dB)	
		Simulador	Ensaio	Simulador	Ensaio
28	1554,90	3,00	2,71	0,00	-0,20
29	1554,10	3,00	2,20	0,00	-0,75
30	1553,30	3,00	2,39	0,00	-0,44
31	1552,50	3,00	2,56	0,00	-0,36
32	1551,70	3,00	2,64	0,00	-0,36
33	1550,90	3,00	2,25	0,00	-0,61
34	1550,10	3,00	2,45	0,00	-0,73
35	1549,30	3,00	2,16	0,00	-0,90
	Média	3,00	2,42	0,00	-0,54
	Erro Médio	0,58		0,54	

Tabela 17. Valores das degradações proporcionadas pelo OADM 4D C28 aos canais passantes.

Canal	Lambda	Perda por inserção (dB)		Degradação da OSNR (dB)	
		Simulador	Ensaio	Simulador	Ensaio
32	1551,70	3,20	1,85	0,00	-0,06
33	1550,90	3,20	2,26	0,00	0,15
34	1550,10	3,20	2,01	0,00	0,41
35	1549,30	3,20	2,15	0,00	0,46
	Média	3,20	2,07	0,00	0,24
	Erro Médio	1,13		-0,24	

Tabela 18. Valores das degradações proporcionadas pelo OADM 4D C28 aos canais retirados.

Canal	Lambda	Perda por inserção (dB)		Degradação da OSNR (dB)	
		Simulador	Ensaio	Simulador	Ensaio
28	1554,90	1,70	0,57	0,00	-1,60
29	1554,10	1,80	1,35	0,00	-0,35
30	1553,30	1,90	0,29	0,00	-1,91
31	1552,50	2,00	0,68	0,00	-1,03
	Média	1,85	0,72	0,00	-1,22
	Erro Médio	1,13		1,22	

Tabela 19. Valores das degradações proporcionadas pelo OADM 4D C28 aos canais inseridos.

Canal	Lambda	Perda por inserção (dB)		Degradação da OSNR (dB)	
		Simulador	Ensaio	Simulador	Ensaio
28	1554,90	2,00	0,91	0,00	0,86
29	1554,10	1,90	1,13	0,00	1,45
30	1553,30	1,80	2,45	0,00	0,74
31	1552,50	1,70	1,09	0,00	3,42
	Média	1,85	1,40	0,00	1,62
	Erro Médio	0,46		-1,62	

Tabela 20. Valores das degradações e ganhos proporcionados pelo amplificador 3, EOA B21C A

Canal	Lambda	Ganho (dB)		Degradação da OSNR (dB)	
		Simulador	Ensaio	Simulador	Ensaio
28	1554,90	15,00	14,69	0,43	0,61
29	1554,10	15,00	14,69	0,42	0,67
30	1553,30	15,00	14,39	0,41	0,83
31	1552,50	15,00	14,30	0,41	0,91
32	1551,70	15,00	14,66	0,29	0,12
33	1550,90	15,00	14,48	0,30	0,25
34	1550,10	15,00	14,49	0,30	0,13
35	1549,30	15,00	14,30	0,31	0,44
	Média	15,00	14,50	0,36	0,50
	Erro Médio	0,50		-0,14	

Tabela 21. Valores das degradações proporcionadas pelo DCM C100 040KM G652

Canal	Lambda	Perda (dB)		Degradação da OSNR (dB)	
		Simulador	Ensaio	Simulador	Ensaio
28	1554,90	3,00	1,78	0,00	-0,14
29	1554,10	3,00	1,65	0,00	-0,47
30	1553,30	3,00	1,55	0,00	-0,65
31	1552,50	3,00	1,64	0,00	-0,74
32	1551,70	3,00	2,24	0,00	-0,93
33	1550,90	3,00	1,51	0,00	-1,22
34	1550,10	3,00	1,66	0,00	-1,21
35	1549,30	3,00	1,14	0,00	-2,03
	Média	3,00	1,65	0,00	-0,92
	Erro Médio	1,35		0,92	

Tabela 22. Valores das degradações proporcionadas pelo DEMUX 8D C28

Canal	Lambda	Perda (dB)		Degradação da OSNR (dB)	
		Simulador	Ensaio	Simulador	Ensaio
28	1554,90	3,10	0,72	0,00	-1,35
29	1554,10	2,90	1,46	0,00	-1,22
30	1553,30	2,70	1,57	0,00	-0,55
31	1552,50	2,50	2,15	0,00	-0,82
32	1551,70	2,30	1,93	0,00	-1,00
33	1550,90	2,10	2,21	0,00	-0,76
34	1550,10	1,90	1,58	0,00	-0,90
35	1549,30	1,70	1,57	0,00	-0,97
	Média	2,40	1,65	0,00	-0,95
	Erro Médio	0,75		0,95	

APÊNDICE B

Tabelas com valores de potência óptica, relação sinal ruído óptico e dispersão cromática, calculados pelo simulador e medidos no ensaio 2

Tabela 1. Valores dos parâmetros no transmissor

Canal	Lambda	Potência (dBm)			OSNR (dB)		
		Simulador	Ensaio	Erro	Simulador	Ensaio	Erro
28	1554,90	0,00	2,20	-2,20	34,35	37,50	-3,15
29	1554,10	0,00	1,50	-1,50	34,35	38,00	-3,65
30	1553,30	0,00	2,10	-2,10	34,35	37,35	-3,00
31	1552,50	0,00	2,14	-2,14	34,35	37,05	-2,70
32	1551,70	0,00	2,04	-2,04	34,35	36,60	-2,25
33	1550,90	0,00	2,35	-2,35	34,35	35,11	-0,76
34	1550,10	0,00	1,57	-1,57	34,35	35,08	-0,73
35	1549,30	0,00	1,91	-1,91	34,35	37,54	-3,19
			Média	-1,98		Média	-2,43

Tabela 2. Valores dos parâmetros na entrada do amplificador 1, EOA B21C A.

Canal	Lambda	Potência (dBm)			OSNR (dB)		
		Simulador	Ensaio	Erro	Simulador	Ensaio	Erro
28	1554,90	-11,70	-9,07	-2,63	34,35	36,46	-2,11
29	1554,10	-11,90	-10,19	-1,71	34,35	36,61	-2,26
30	1553,30	-12,10	-10,00	-2,10	34,35	35,57	-1,22
31	1552,50	-12,30	-9,81	-2,49	34,35	35,70	-1,35
32	1551,70	-12,50	-10,78	-1,72	34,35	35,14	-0,79
33	1550,90	-12,70	-9,24	-3,46	34,35	34,38	-0,03
34	1550,10	-12,90	-10,07	-2,83	34,35	33,84	0,51
35	1549,30	-13,10	-10,70	-2,40	34,35	36,65	-2,30
			Média	-2,42		Média	-1,19

Tabela 3. Valores dos parâmetros na saída do amplificador 1, EOA B21C A.

Canal	Lambda	Potência (dBm)			OSNR (dB)		
		Simulador	Ensaio	Erro	Simulador	Ensaio	Erro
28	1554,90	3,30	6,65	-3,35	34,01	35,96	-1,95
29	1554,10	3,10	4,99	-1,89	33,99	35,39	-1,40
30	1553,30	2,90	5,67	-2,77	33,98	35,28	-1,30
31	1552,50	2,70	5,63	-2,93	33,96	34,73	-0,77
32	1551,70	2,50	4,38	-1,88	33,94	34,55	-0,61
33	1550,90	2,30	6,16	-3,86	33,92	34,32	-0,40
34	1550,10	2,10	5,23	-3,13	33,91	33,93	-0,02
35	1549,30	1,90	4,90	-3,00	33,89	35,74	-1,85
			Média	-2,85		Média	-1,04

Tabela 4. Valores dos parâmetros na entrada do amplificador 2, EOA P15C A.

Canal	Lambda	Potência (dBm)			OSNR (dB)		
		Simulador	Ensaio	Erro	Simulador	Ensaio	Erro
28	1554,90	-21,70	-18,15	-3,55	34,01	35,78	-1,77
29	1554,10	-21,90	-19,36	-2,54	33,99	35,99	-2,00
30	1553,30	-22,10	-19,34	-2,76	33,98	34,94	-0,96
31	1552,50	-22,30	-18,92	-3,38	33,96	34,98	-1,02
32	1551,70	-22,50	-19,97	-2,53	33,94	34,84	-0,90
33	1550,90	-22,70	-18,64	-4,06	33,92	34,06	-0,14
34	1550,10	-22,90	-19,32	-3,58	33,91	34,04	-0,13
35	1549,30	-23,10	-20,27	-2,83	33,89	35,81	-1,92
			Média	-3,15		Média	-1,11

Tabela 5. Valores dos parâmetros na saída do amplificador 2, EOA P15C A.

Canal	Lambda	Potência (dBm)			OSNR (dB)		
		Simulador	Ensaio	Erro	Simulador	Ensaio	Erro
28	1554,90	-6,70	-3,07	-3,63	31,57	32,34	-0,77
29	1554,10	-6,90	-4,24	-2,66	31,47	32,07	-0,60
30	1553,30	-7,10	-4,39	-2,71	31,37	31,85	-0,48
31	1552,50	-7,30	-4,04	-3,26	31,27	31,82	-0,55
32	1551,70	-7,50	-4,85	-2,65	31,17	31,22	-0,05
33	1550,90	-7,70	-3,25	-4,45	31,06	31,74	-0,68
34	1550,10	-7,90	-4,12	-3,78	30,95	30,89	0,06
35	1549,30	-8,10	-4,95	-3,15	30,84	31,66	-0,82
			Média	-3,29		Média	-0,48

Tabela 6. Valores dos parâmetros na entrada do amplificador 3, EOA B21C A.

Canal	Lambda	Potência (dBm)			OSNR (dB)		
		Simulador	Ensaio	Erro	Simulador	Ensaio	Erro
28	1554,90	-11,70	-8,15	-3,55	31,57	32,30	-0,73
29	1554,10	-11,90	-9,31	-2,59	31,47	32,14	-0,67
30	1553,30	-12,10	-9,28	-2,82	31,37	32,06	-0,69
31	1552,50	-12,30	-9,05	-3,25	31,27	32,05	-0,78
32	1551,70	-12,50	-10,01	-2,49	31,17	31,20	-0,03
33	1550,90	-12,70	-8,61	-4,09	31,06	31,40	-0,34
34	1550,10	-12,90	-9,42	-3,48	30,95	30,76	0,19
35	1549,30	-13,10	-10,20	-2,90	30,84	31,60	-0,76
			Média	-3,15		Média	-0,47

Tabela 7. Valores dos parâmetros na saída do amplificador 3, EOA B21C A.

Canal	Lambda	Potência (dBm)			OSNR (dB)		
		Simulador	Ensaio	Erro	Simulador	Ensaio	Erro
28	1554,90	3,30	6,88	-3,58	31,39	32,16	-0,77
29	1554,10	3,10	5,52	-2,42	31,29	31,71	-0,42
30	1553,30	2,90	5,85	-2,95	31,18	31,71	-0,53
31	1552,50	2,70	5,73	-3,03	31,08	31,62	-0,54
32	1551,70	2,50	4,67	-2,17	30,97	30,66	0,31
33	1550,90	2,30	6,37	-4,07	30,86	31,31	-0,45
34	1550,10	2,10	5,29	-3,19	30,74	30,35	0,39
35	1549,30	1,90	4,95	-3,05	30,63	31,63	-1,00
			Média	-3,06		Média	-0,38

Tabela 8. Valores dos parâmetros na entrada do amplificador 4, EOA P25C A.

Canal	Lambda	Potência (dBm)			OSNR (dB)		
		Simulador	Ensaio	Erro	Simulador	Ensaio	Erro
28	1554,90	-31,70	-29,16	-2,54	31,39	32,12	-0,73
29	1554,10	-31,90	-30,29	-1,61	31,29	31,94	-0,65
30	1553,30	-32,10	-30,46	-1,64	31,18	31,96	-0,78
31	1552,50	-32,30	-30,14	-2,16	31,08	31,79	-0,71
32	1551,70	-32,50	-30,97	-1,53	30,97	30,93	0,04
33	1550,90	-32,70	-29,41	-3,29	30,86	31,61	-0,75
34	1550,10	-32,90	-30,24	-2,66	30,74	31,14	-0,40
35	1549,30	-33,10	-31,06	-2,04	30,63	31,40	-0,77
		Média	-32,40	-30,22	-2,18	Média	-0,60

Tabela 9. Valores dos parâmetros na saída do amplificador 4, EOA P25C A.

Canal	Lambda	Potência (dBm)			OSNR (dB)		
		Simulador	Ensaio	Erro	Simulador	Ensaio	Erro
28	1554,90	-6,70	-3,79	-2,91	24,29	24,27	0,02
29	1554,10	-6,90	-5,15	-1,75	24,11	23,10	1,01
30	1553,30	-7,10	-5,11	-1,99	23,93	23,17	0,76
31	1552,50	-7,30	-4,84	-2,46	23,74	23,47	0,27
32	1551,70	-7,50	-5,83	-1,67	23,56	22,52	1,04
33	1550,90	-7,70	-4,47	-3,23	23,37	23,75	-0,38
34	1550,10	-7,90	-5,19	-2,71	23,18	22,97	0,21
35	1549,30	-8,10	-6,02	-2,08	23,00	22,35	0,65
			Média	-2,35		Média	0,45

Tabela 10. Valores dos parâmetros na entrada do amplificador 5, EOA P25C A.

Canal	Lambda	Potência (dBm)			OSNR (dB)		
		Simulador	Ensaio	Erro	Simulador	Ensaio	Erro
28	1554,90	-26,70	-24,47	-2,23	24,29	24,44	-0,15
29	1554,10	-26,90	-25,96	-0,94	24,11	23,17	0,94
30	1553,30	-27,10	-25,88	-1,22	23,93	23,32	0,61
31	1552,50	-27,30	-25,69	-1,61	23,74	23,60	0,14
32	1551,70	-27,50	-26,73	-0,77	23,56	22,59	0,97
33	1550,90	-27,70	-25,25	-2,45	23,37	23,88	-0,51
34	1550,10	-27,90	-26,01	-1,89	23,18	23,06	0,12
35	1549,30	-28,10	-26,67	-1,43	23,00	22,64	0,36
			Média	-1,57		Média	0,31

Tabela 11. Valores dos parâmetros na saída do amplificador 5, EOA P25C A.

Canal	Lambda	Potência (dBm)			OSNR (dB)		
		Simulador	Ensaio	Erro	Simulador	Ensaio	Erro
28	1554,90	-1,70	1,22	-2,92	23,31	23,13	0,18
29	1554,10	-1,90	0,11	-2,01	23,12	22,26	0,86
30	1553,30	-2,10	-0,15	-1,95	22,93	22,02	0,91
31	1552,50	-2,30	0,08	-2,38	22,75	22,29	0,46
32	1551,70	-2,50	-0,77	-1,73	22,56	21,48	1,08
33	1550,90	-2,70	0,73	-3,43	22,37	22,85	-0,48
34	1550,10	-2,90	-0,17	-2,73	22,18	21,98	0,20
35	1549,30	-3,10	-0,94	-2,16	21,99	21,34	0,65
			Média	-2,41		Média	0,48

Tabela 12. Valores dos parâmetros na entrada do DEMUX 8D C28.

Canal	Lambda	Potência (dBm)			OSNR (dB)		
		Simulador	Ensaio	Erro	Simulador	Ensaio	Erro
28	1554,90	-16,70	-13,91	-2,79	23,31	23,21	0,10
29	1554,10	-16,90	-15,12	-1,78	23,12	22,23	0,89
30	1553,30	-17,10	-15,18	-1,92	22,93	22,17	0,76
31	1552,50	-17,30	-15,07	-2,23	22,75	22,34	0,41
32	1551,70	-17,50	-16,07	-1,43	22,56	21,43	1,13
33	1550,90	-17,70	-14,74	-2,96	22,37	22,66	-0,29
34	1550,10	-17,90	-15,57	-2,33	22,18	21,83	0,35
35	1549,30	-18,10	-16,26	-1,84	21,99	21,28	0,71
			Média	-2,16		Média	0,51

Tabela 13. Valores dos parâmetros na saída do DEMUX 8D C28.

Canal	Lambda	Potência (dBm)			OSNR (dB)		
		Simulador	Ensaio	Erro	Simulador	Ensaio	Erro
28	1554,90	-19,80	-14,70	-5,10	23,31	25,50	-2,19
29	1554,10	-19,80	-16,60	-3,20	23,12	23,90	-0,78
30	1553,30	-19,80	-16,70	-3,10	22,93	24,50	-1,57
31	1552,50	-19,80	-17,05	-2,75	22,75	24,10	-1,35
32	1551,70	-19,80	-18,00	-1,80	22,56	23,50	-0,94
33	1550,90	-19,80	-17,00	-2,80	22,37	25,26	-2,89
34	1550,10	-19,80	-17,20	-2,60	22,18	24,54	-2,36
35	1549,30	-19,80	-17,40	-2,40	21,99	23,94	-1,95
			Média	-2,97		Média	-1,75

Tabelas com os resultados médios das atenuações, ganho dos amplificadores e degradação da OSNR dos canais de cada componente segundo as equações (1),(2) e (3) respectivamente

$$IL = Pwr_{IN \text{ dBm}} - Pwr_{OUT \text{ dBm}} \quad (4)$$

$$Ganho = Pwr_{OUT \text{ dBm}} - Pwr_{IN \text{ dBm}} \quad (5)$$

$$OSNR_{deg} = OSNR_{IN \text{ dB}} - OSNR_{OUT \text{ dB}} \quad (6)$$

Tabela 14. Valores das degradações e ganhos proporcionados pelo amplificador 1, EOA B21C A

Canal	Lambda	Ganho (dB)		Degradação da OSNR (dB)	
		Simulador	Ensaio	Simulador	Ensaio
28	1554,90	15,00	15,72	0,34	0,50
29	1554,10	15,00	15,18	0,36	1,22
30	1553,30	15,00	15,67	0,37	0,29
31	1552,50	15,00	15,44	0,39	0,97
32	1551,70	15,00	15,16	0,41	0,59
33	1550,90	15,00	15,40	0,43	0,06
34	1550,10	15,00	15,30	0,44	-0,09
35	1549,30	15,00	15,60	0,46	0,91
	Média	15,00	15,43	0,40	0,56
	Erro Médio	-0,43		-0,16	

Tabela 15. Valores das degradações e ganhos proporcionados pelo amplificador 2, EOA P15C A

Canal	Lambda	Ganho (dB)		Degradação da OSNR (dB)	
		Simulador	Ensaio	Simulador	Ensaio
28	1554,90	15,00	15,08	2,44	3,44
29	1554,10	15,00	15,12	2,52	3,92
30	1553,30	15,00	14,95	2,60	3,09
31	1552,50	15,00	14,88	2,69	3,16
32	1551,70	15,00	15,12	2,78	3,62
33	1550,90	15,00	15,39	2,86	2,32
34	1550,10	15,00	15,20	2,95	3,15
35	1549,30	15,00	15,32	3,04	4,15
	Média	15,00	15,13	2,74	3,36
	Erro Médio	-0,13		-0,62	

Tabela 16. Valores das degradações e ganhos proporcionados pelo amplificador 3, EOA B21C A

Canal	Lambda	Ganho (dB)		Degradação da OSNR (dB)	
		Simulador	Ensaio	Simulador	Ensaio
28	1554,90	15,00	15,03	0,18	0,14
29	1554,10	15,00	14,83	0,19	0,43
30	1553,30	15,00	15,13	0,19	0,35
31	1552,50	15,00	14,78	0,20	0,43
32	1551,70	15,00	14,68	0,20	0,54
33	1550,90	15,00	14,98	0,20	0,09
34	1550,10	15,00	14,71	0,21	0,41
35	1549,30	15,00	15,15	0,21	-0,03
	Média	15,00	14,91	0,20	0,30
	Erro Médio	0,09		-0,10	

Tabela 17. Valores das degradações e ganhos proporcionados pelo amplificador 4, EOA P25C A

Canal	Lambda	Ganho (dB)		Degradação da OSNR (dB)	
		Simulador	Ensaio	Simulador	Ensaio
28	1554,90	25,00	25,37	7,09	7,85
29	1554,10	25,00	25,14	7,18	8,84
30	1553,30	25,00	25,35	7,26	8,79
31	1552,50	25,00	25,30	7,33	8,32
32	1551,70	25,00	25,14	7,41	8,41
33	1550,90	25,00	24,94	7,49	7,86
34	1550,10	25,00	25,05	7,56	8,17
35	1549,30	25,00	25,04	7,63	9,05
	Média	25,00	25,17	7,37	8,41
	Erro Médio	-0,17		-1,04	

Tabela 18. Valores das degradações e ganhos proporcionados pelo amplificador 5, EOA P25C A

Amp5		Ganho (dB)		Degradação da OSNR (dB)	
Canal	Lambda	Simulador	Ensaio	Simulador	Ensaio
28	1554,90	25,00	25,69	0,98	1,31
29	1554,10	25,00	26,07	0,99	0,91
30	1553,30	25,00	25,73	0,99	1,30
31	1552,50	25,00	25,77	1,00	1,31
32	1551,70	25,00	25,96	1,00	1,11
33	1550,90	25,00	25,98	1,00	1,03
34	1550,10	25,00	25,84	1,01	1,08
35	1549,30	25,00	25,73	1,01	1,30
	Média	25,00	25,85	1,00	1,17
	Erro Médio	-0,85		-0,17	

Tabela 19. Valores das degradações e ganhos proporcionados pelo DEMUX 8D C28

Amp5		Perda (dB)		Degradação da OSNR (dB)	
Canal	Lambda	Simulador	Ensaio	Simulador	Ensaio
28	1554,90	3,10	0,79	0,00	-2,29
29	1554,10	2,90	1,48	0,00	-1,67
30	1553,30	2,70	1,52	0,00	-2,33
31	1552,50	2,50	1,98	0,00	-1,76
32	1551,70	2,30	1,93	0,00	-2,07
33	1550,90	2,10	2,26	0,00	-2,60
34	1550,10	1,90	1,63	0,00	-2,71
35	1549,30	1,70	1,14	0,00	-2,66
	Média	2,40	1,59	0,00	-2,26
	Erro Médio	0,81		2,26	

ANEXO 1

Product Specification

DWDM SFP Transceiver

FWLF-1631-xx

PRODUCT FEATURES

- Up to 2.7 Gb/s bi-directional data links
- Hot-pluggable SFP footprint
- Temperature-stabilized DWDM-rated DFB laser transmitter
- 100GHz ITU Grid, C-Band
- Low dispersion DFB laser with 120km reach performance
- Extended operating range: -5°C to 70°C case temperature
- Wavelength controlled within ± 0.1 nm over life and temperature
- Extended link budget with APD receiver technology
- SONET OC-48 LR-2 compliant
- Gigabit Ethernet compatible



APPLICATIONS

- Amplified DWDM & SONET networks
- Bandwidth aggregation
- Ring topologies with fixed and reconfigurable OADMs

Finisar's Dense Wavelength-Division Multiplexing (DWDM) Small Form Factor Pluggable (SFP) transceivers¹ address communication network optics requirements that necessitate lower power and cost parameters. The FWLF-1631-xx is designed expressly for service providers deploying SONET and DWDM² networking equipment in metropolitan access and core networks; and is RoHS 5-of-6 compliant per Directive 2002/95/EC³ and Finisar Application Note AN-2038⁴. It is also compatible to Gigabit Ethernet data rate.

Basic digital diagnostic features for the FWLF-1631-xx are implemented as described in Finisar Application Note AN-2030, "Digital Diagnostic Monitoring Interface for Optical Transceivers"⁵. Enhanced diagnostic features are available as described in the DWDM SFP MSA⁶.

PRODUCT SELECTION

Product Code	Frequency (THz)	Center Wavelength (nm)
FWLF-1631-17	191.7	1563.86
FWLF-1631-18	191.8	1563.05
FWLF-1631-19	191.9	1562.23
FWLF-1631-20	192.0	1561.42
FWLF-1631-21	192.1	1560.61
FWLF-1631-22	192.2	1559.79
FWLF-1631-23	192.3	1558.98
FWLF-1631-24	192.4	1558.17
FWLF-1631-25	192.5	1557.36
FWLF-1631-26	192.6	1556.55
FWLF-1631-27	192.7	1555.75
FWLF-1631-28	192.8	1554.94
FWLF-1631-29	192.9	1554.13
FWLF-1631-30	193.0	1553.33
FWLF-1631-31	193.1	1552.52
FWLF-1631-32	193.2	1551.72
FWLF-1631-33	193.3	1550.92
FWLF-1631-34	193.4	1550.12
FWLF-1631-35	193.5	1549.32
FWLF-1631-36	193.6	1548.51
FWLF-1631-37	193.7	1547.72
FWLF-1631-38	193.8	1546.92
FWLF-1631-39	193.9	1546.12
FWLF-1631-40	194.0	1545.32
FWLF-1631-41	194.1	1544.53
FWLF-1631-42	194.2	1543.73
FWLF-1631-43	194.3	1542.94
FWLF-1631-44	194.4	1542.14
FWLF-1631-45	194.5	1541.35
FWLF-1631-46	194.6	1540.56
FWLF-1631-47	194.7	1539.77
FWLF-1631-48	194.8	1538.98
FWLF-1631-49	194.9	1538.19
FWLF-1631-50	195.0	1537.40
FWLF-1631-51	195.1	1536.61
FWLF-1631-52	195.2	1535.82
FWLF-1631-53	195.3	1535.04
FWLF-1631-54	195.4	1534.25
FWLF-1631-55	195.5	1533.47
FWLF-1631-56	195.6	1532.68
FWLF-1631-57	195.7	1531.90
FWLF-1631-58	195.8	1531.12
FWLF-1631-59	195.9	1530.33
FWLF-1631-60	196.0	1529.55
FWLF-1631-61	196.1	1528.77

I. Pin Descriptions

Pin	Symbol	Name/Description	Ref.
1	V _{EET}	Transmitter Ground (Common with Receiver Ground)	1
2	T _{FAULT}	Transmitter Fault	
3	T _{DIS}	Transmitter Disable. Laser output disabled on high or open	2
4	MOD_DEF(2)	Module Definition 2. Data line for Serial ID	3
5	MOD_DEF(1)	Module Definition 1. Clock line for Serial ID	3
6	MOD_DEF(0)	Module Definition 0. Grounded within the module	3
7	Rate Select	No connection required	4
8	LOS	Loss of Signal indication. Logic 0 indicates normal operation	5
9	V _{EER}	Receiver Ground (Common with Transmitter Ground)	1
10	V _{EER}	Receiver Ground (Common with Transmitter Ground)	1
11	V _{EER}	Receiver Ground (Common with Transmitter Ground)	1
12	RD-	Receiver Inverted DATA out. AC Coupled	
13	RD+	Receiver Non-inverted DATA out. AC Coupled	
14	V _{EER}	Receiver Ground (Common with Transmitter Ground)	1
15	V _{CCR}	Receiver Power Supply	
16	V _{CCT}	Transmitter Power Supply	
17	V _{EET}	Transmitter Ground (Common with Receiver Ground)	1
18	TD+	Transmitter Non-Inverted DATA in. 100 ohm termination between TD+ and TD-, AC Coupled thereafter	
19	TD-	Transmitter Inverted DATA in. See TD+	
20	V _{EET}	Transmitter Ground (Common with Receiver Ground)	1

Notes:

1. **Circuit ground is internally isolated from chassis ground.**
2. Laser output disabled on T_{DIS} >2.0V or open, enabled on T_{DIS} <0.8V.
3. Should be pulled up with 4.7k – 10kohms on host board to a voltage between 2.0V and 5.5V. MOD_DEF(0) pulls line low to indicate module is plugged in.
4. Receiver achieves multi-rate operation without active control.
5. LOS is open collector output. Should be pulled up with 4.7k – 10kohms on host board to a voltage between 2.0V and 5.5V. Logic 0 indicates normal operation; logic 1 indicates loss of signal.

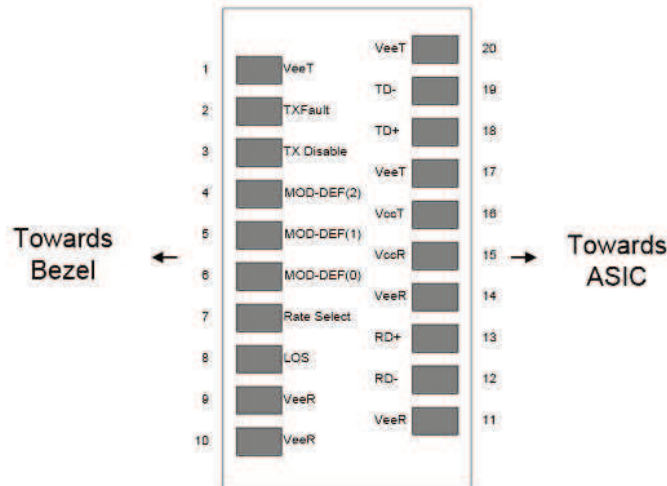


Diagram of Host Board Connector Block Pin Numbers and Names

II. Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Maximum Supply Voltage	V _{cc}	-0.5		4.7	V
Storage Temperature	T _s	-10		85	°C
Case Operating Temperature	T _{OP}	-5		70	°C

III. Electrical Characteristics (T_{OP} = -5 to 70 °C, V_{CC} = 3.13 to 3.50 Volts)

Parameter	Symbol	Min	Typ	Max	Unit	Ref.
Supply Voltage	V _{cc}	3.13	3.30	3.50	V	
Supply Current	I _{cc}			380	mA	
Inrush Current	I _{surge}			I _{cc} +30	mA	
Maximum Power	P _{max}			1	W	
TRANSMITTER						
Input differential impedance	R _{in}		100		Ω	1
Single ended data input swing	V _{in,pp}	250		1200	mV	
Transmit Disable Voltage	V _D	V _{cc} – 1.3		V _{cc}	V	
Transmit Enable Voltage	V _{EN}	V _{ee}		V _{ee} + 0.8	V	2
RECEIVER						
Single ended data output swing	V _{out,pp}	175		1000	mV	3
Data output rise time	t _r			150	ps	4
Data output fall time	t _f			150	ps	4
LOS Fault	V _{LOS fault}	V _{cc} – 0.5		V _{ccHOST}	V	5
LOS Normal	V _{LOS norm}	V _{ee}		V _{ee} +0.5	V	5
Power Supply Rejection	PSR	100			mVpp	6

Notes:

1. Connected directly to TX data input pins. AC coupled thereafter.
2. Or open circuit.
3. Into 100 ohms differential termination.
4. 20 – 80 %
5. Loss of signal (LOS) is LVTTL. Logic 0 indicates normal operation; logic 1 indicates no signal detected.
6. Receiver sensitivity is compliant with power supply sinusoidal modulation of 20 Hz to 1.5 MHz up to specified value applied through the recommended power supply filtering network.

IV. Low Speed Signals

Parameter	Symbol	Min	Typ	Max	Units	Notes/Conditions
RX_LOS Assert Level		-42	-36		dBm	
RX_LOS Deassert Level			-34	-32	dBm	
RX_LOS Hysteresis		0.5	2		dB	
RX_LOS Assert Delay	t_loss_on			100	μsec	From detection of loss of signal to assertion of RX_LOS
RX_LOS Negate Delay	t_loss_off			100	μsec	From detection of presence of signal to negation of RX_LOS
TX_DISABLE Assert Time	t_off			10	μsec	Rising edge of TX_DISABLE to fall of output signal below 10% of nominal
TX_DISABLE Negate Time	t_on			1000	μsec	Falling edge of TX_DISABLE to rise of output signal above 90% of nominal. Time indicated is under steady-state temperature conditions.
TX_DISABLE Reset Time	t_reset	10			μsec	TX_DISABLE HIGH before TX_DISABLE set LOW
TX_FAULT Assert		-0.2		+0.2	nm	TX_Fault will assert before the device is outside of specified wavelength range

V. Optical Parameters

Parameter	Symbol	Min	Typ	Max	Units	Notes/Conditions
TRANSMITTER CHARACTERISTICS						
Center Wavelength Spacing			100		GHz	Corresponds to approximately 0.8 nm
Modulated Spectral Width	$\Delta\lambda_{20}$		0.2	0.3	nm	Full width, -20dB from max. See note 3
Transmitter Center Wavelength – End of Life	λ_c	X - 100	X	X + 100	pm	X = specified ITU center wavelength
Transmitter Center Wavelength – Start of Life	λ_c	Y - 25	Y	Y + 25	pm	Y = specified BOL center wavelength
Side Mode Suppression Ratio (SMSR)	SMSR	30			dB	Modulated
Optical Rise/Fall Time	t_r / t_f			160	ps	Unfiltered, 80% -20%
Transmitter Optical Output Power	P_{out}	0		+4	dBm	Average power coupled into single mode fiber
Transmitter Extinction Ratio	OMI	8.2			dB	
Transmitter Eye Opening		10			%	OC-48 eye mask margin
Transmitter Jitter (peak to peak)				75	mUI	Parameter per GR-253 ² section 5.6 for OC-48 B
Tolerable Back Reflection	BR			-14	dB	See note 4
Relative Intensity Noise	RIN			-120	dB/Hz	
Dispersion Power Penalty at 2400ps/nm	DPP			3.0	dB	See Note 5
RECEIVER CHARACTERISTICS						
Optical Input Wavelength	P_{in}	1520		1570	nm	
Receiver Jitter Generation				75	mUI	Parameters per GR-253 ² section 5.6 for OC-48 B
Optical Input Power (BER < 10 ⁻¹²)	P_{in}	-28		-9	dBm	2.5 Gb/s w/ PRBS 2 ²³ -1
Optical Input Power – Receiver Damage Threshold				+6	dBm	
Receiver Reflectance	R_{RX}			-27	dB	
Dispersion Noise Penalty at 2400ps/nm	DNP			3.0	dB	See Note 6

Notes:

- Parameters are specified over temperature and voltage, at end of life unless otherwise noted.
- All parameters are measured on a Finisar SFP Evaluation Card unless otherwise noted.
- For accurate $\Delta\lambda_{20}$ measurements, an OSA with a resolution band width of ≤ 20 pm is recommended.
- Tolerable back reflection is the max back reflection level at which the power penalty will be <1dB.
- Dispersion power penalty is measured in loop back with OSNR set to 28 dB. Data rate and pattern used same as specified for Optical Input Power. Dispersion power penalty is the difference in Rx power at a BER of 10⁻¹² for 0ps/nm and 2400ps/nm.
- Dispersion noise penalty is measured in loop back with Rx power set between -9dBm and -22dBm. Data rate and pattern used same as specified for Optical Input Power. Dispersion noise penalty is the difference in OSNR at a BER of 10⁻¹² for 0ps/nm and 2400ps/nm.

VI. Wavelength Stabilization

The laser transmitter will not be turned on until its temperature is adjusted to ensure operation within the specified channel ($X \pm 300\text{pm}$). This temperature stabilization time is dependent on the ambient temperature conditions, but will typically occur within 5 seconds of powering the device. The module will transmit within the specified wavelength tolerance ($X \pm 100\text{pm}$) within 10 ms of transmitter operation.

VII. General Specifications

Parameter	Symbol	Min	Typ	Max	Units	Notes/Conditions
Data Rate	BR	0.155		2.7	Gb/sec	SONET OC-3/12/48 compatible
Total Link Budget		28	30		dB	@ 2.5 Gb/s, BER $<10^{-12}$ w/ PRBS $2^{23}-1$. See Note 1

Note 1: Total link budget is defined as $P_{\text{out}} - P_{\text{in}}$ – typical connector losses.

VIII. Environmental Specifications

Parameter	Symbol	Min	Typ	Max	Units	Notes/Conditions
Operating Temp	T_{op}	-5		70	°C	Case temperature measured on top-side of device
Storage Temp	T_{sto}	-40		85	°C	Ambient temperature
Eye Safety						CDRH and IEC-825 Class 1 Laser Product. See Note 1

Note 1: Complies with FDA performance standards for laser products except for deviations pursuant to Laser Notice No. 50, dated July 26, 2001.

IX. Serial Communication Protocol

All Finisar SFPs support the 2-wire serial communication protocol to provide module ID information as outlined in the SFP MSA¹. These SFPs use an Atmel AT24C01A 128 byte E²PROM with an address of A0h. For details on interfacing with the E²PROM, see the Atmel data sheet titled “AT24C01A/02/04/08/16 2-Wire Serial CMOS E²PROM.”⁷

Finisar SFPs also support diagnostic features as described in Finisar Applications Note AN-2030⁴ and SFF-8472⁸, “Digital Diagnostic Monitoring Interface for Optical Transceivers”. A controller IC that monitors system parameters such as laser current, module temperature, transmitter power, and received power is accessible at address A2H. In addition, Finisar’s DWDM SFPs provide extended set of ID information and diagnostic features as described in the DWDM SFP MSA⁶.

I2C clock speed, digital diagnostic accuracy and digital diagnostic range can be found in the table below. Values in the table represent the worst-case values over temperature, voltage, and life.

Parameter	Symbol	Min	Typ	Max	Units	Notes/Conditions
I ² C Clock Speed		0		100,000	Hz	Bus can be driven blind
Accuracy						
Transceiver Case Temperature	DD _{Temperature}	-10		+10	°C	Measured on the top-side of the module case
Transceiver Supply Voltage	DD _{Voltage}	-3		+3	%	
Tx Bias Current	DD _{Bias}	-10		+10	%	
Tx Output Power	DD _{TxPower}	-2		+2	dB	
Received Average Power	DD _{RxPower}	-2		+2	dB	
Range						
Transceiver Case Temperature	DD _{Temperature}	-40		85	°C	
Transceiver Supply Voltage	DD _{Voltage}	3.0		4.0	V	
Tx Bias Current	DD _{Bias}	0		90	mA	
Tx Output Power	DD _{TxPower}	-5		+10	dBm	
Received Average Power	DD _{RxPower}	-30		-7	dBm	

X. Mechanical Specifications

Finisar's Multi-rate DWDM Small Form Factor Pluggable (SFP) transceivers are compatible with the dimensions defined by the DWDM SFP Multi-Sourcing Agreement (MSA)⁶.

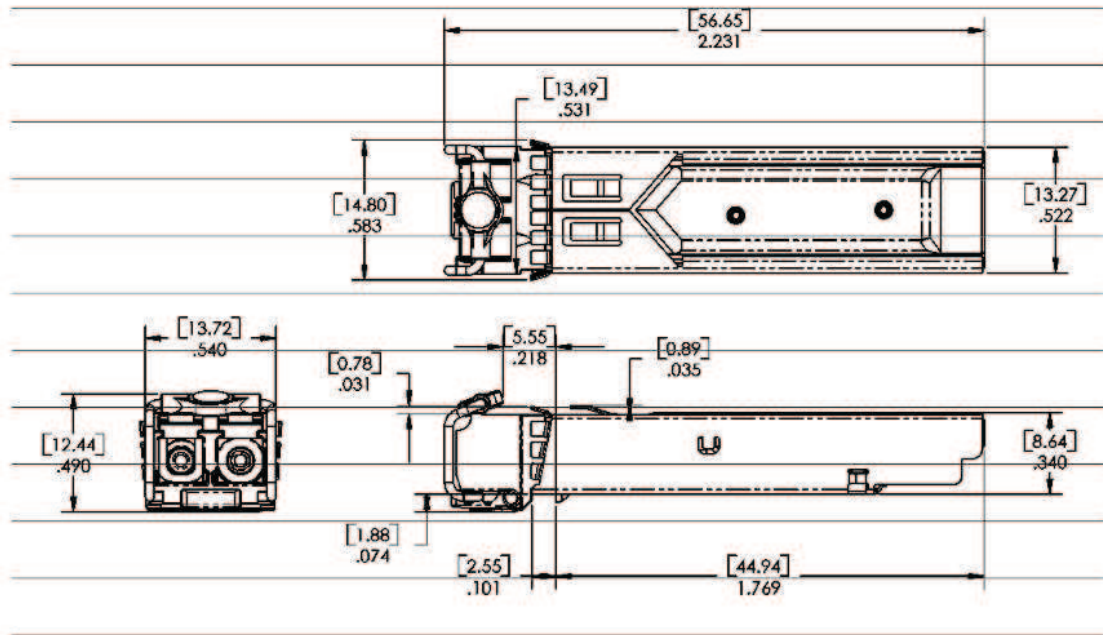


Figure 1. DWDM SFP Outline Drawing (units in inches [mm])

XI. Ordering Information

Part Number	Description
FWLF-1631-xx	DWDM SFP with APD Receiver xx = channel number (see product selection on page 2)

XII. References

1. Small Form Factor Pluggable (SFP) Transceiver Multi-Source Agreement (MSA), September 2000. Documentation is currently available from Finisar upon request.
2. “SONET Transport Systems: Common Generic Criteria”, Telcordia Technologies, GR-253-CORE, Issue 3, September 2000.
3. Directive 2002/95/EC of the European Council Parliament and of the Council, “on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment.” January 27, 2003.
4. “Application Note AN-2038: Finisar Implementation Of RoHS Compliant Transceivers”, Finisar Corporation, January 21, 2005.
5. “Application Note AN-2030: Digital Diagnostic Monitoring Interface for Optical Transceivers”, Finisar Corporation, April 2002.
6. Specifications for DWDM SFP Transceiver Draft 1.0. October 21 2005. Documentation is available from Finisar upon request.
7. “AT24C01A/02/04/08/16 2-Wire Serial CMOS E²PROM”, Atmel Corporation. www.Atmel.com.
8. “Digital Diagnostic Monitoring Interface For Optical Transceivers Rev 9.3”. SFF Document No. SFF-8472.

For More Information:

Finisar Corporation
1308 Moffett Park Drive
Sunnyvale, CA 94089-1133
Tel. (408) 548-1000
Fax (408) 5416138
sales@finisar.com
www.finisar.com