

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DA COMPENSAÇÃO DA
DISPERSÃO EM REDES DE FIBRAS ÓPTICAS

FABRÍCIO PINHO DA LUZ

DM – 45/2019

UFPA/ ITEC/ PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FABRÍCIO PINHO DA LUZ

ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DA COMPENSAÇÃO DA
DISPERSÃO EM REDES DE FIBRAS ÓPTICAS

DM-45/2019

UFPA/ ITEC/ PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FABRÍCIO PINHO DA LUZ

ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DA COMPENSAÇÃO DE
DISPERSÃO EM REDES DE FIBRAS ÓPTICAS

Dissertação de mestrado submetida à
Banca Examinadora do Programa de
Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica da UFPA para a obtenção do
Grau de Mestre em Engenharia
Elétrica na área de Telecomunicações

UFPA/ ITEC/ PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DA COMPENSAÇÃO DE
DISPERSÃO EM REDES DE FIBRAS ÓPTICAS

AUTOR: FABRÍCIO PINHO DA LUZ

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓSGRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, SENDO JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE TELECOMUNICAÇÕES.

APROVADA EM: 13/12/2019

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Marcos Benedito Caldas Costa (Orientador - UFPA)

Prof. Dr. Karlo Queiroz da Costa (Membro Interno)

Prof. Dr. José Renato Ferreira Alves da Cunha (Membro externo)

VISTO:

Prof.^a Dr.^a Maria Emília de Lima Tostes (Coordenadora do PPGEE/ITEC/UFPA)

Este trabalho é dedicado à minha família, a meus pais Vitalino Neves da Luz e Janeth Pinho da Luz, a meus sogros Ciro Coelho Gomes e Maria da Conceição Batista Gomes, aos meus Filhos, Enzo Gomes da Luz e Maitê Gomes da Luz, a minha esposa e companheira Cibele Batista Gomes, que nos momentos de dificuldade, sempre me motivaram, incentivaram e apoiaram, me dando força para eu nunca desistir apesar das dificuldades nessa caminhada, é a eles que devo tudo que sou.

Fabício Pinho da Luz

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

P654a Pinho da Luz, Fabrício
Análise Comparativa do Desempenho da Compensação de
Dispersão em Redes de Fibras Ópticas / Fabrício Pinho da Luz. —
2019.
88 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Marcos Benedito Caldas Costa
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal
do Pará, Belém, 2019.

1. Fibras Ópticas . 2. Dispersão. 3. Compensação de
Dispersão. 4. Análise Comparativa. I. Título.

CDD 621.3

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me dar a sabedoria e força de vontade para a concluir este trabalho, em memória aos meus avós, Arthur Pereira da Luz e Mirasselva Neves da Luz, que não puderam realizar o sonho de viver esse momento, mas que sempre deram o apoio total para minha formação pessoal e acadêmica, também a meus pais Vitalino Neves da Luz e Janeth Pinho da Luz, aos meus irmãos Patrícia Bárbara Pinho da Luz e Alexandre Pinho da Luz, que sempre me incentivaram, à minha esposa Cibele Batista Gomes e aos meus filhos Enzo Gomes da Luz e Maitê Gomes da Luz que sempre foram minha fonte de energia. Agradeço também aos meus amigos do Laboratório de Óptica. Fiterlinge Sousa, Fábio Barros, Elizete Sabino, Professor Everaldo, Marcio Costa e aos outros colegas da UFPA de outros grupos de pesquisa que sempre me ajudaram nas horas que mais precisei.

Agradeço a todos os professores que contribuíram com a nossa formação acadêmica, especialmente ao meu orientador professor Dr. Marcos Benedito Caldas Costa que me guiou com sabedoria no desenvolvimento deste trabalho e aos amigos que ao longo desta jornada colaboraram de forma direta e indireta para a nossa formação pessoal e acadêmica.

Fabício Pinho da Luz

RESUMO

Este trabalho aborda o uso de métodos para tratamento da dispersão em fibras ópticas, mostrando a eficácia da utilização para um melhor resultado do Fator de qualidade (Q. Factor) e da taxa de erro de bit (Min. Ber) na transmissão de dados por redes de fibras ópticas. Desse modo, esta dissertação tem por objetivo fazer uma análise do desempenho de uma das técnicas de Pós-compensação em sistemas Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda Densa, baseado em redes ópticas passivas (DWDM-PON) com 16 canais e 100GHz de espaçamento para uma taxa de transmissão de dados de 10Gbps através do método de Pós-compensação de dispersão; propõe a utilização de técnicas de dispersão, a de Pós-compensação e a de dispersão Cromática na transmissão de dados por fibras ópticas com utilização de fibras compensadoras de dispersão (DCF) e Fibras de Grade de Bragg (FBG) para um melhor resultado do fator de qualidade (Q-Factor) e da taxa de erro de bit (Min Ber). A metodologia aplicada teve base em levantamentos bibliográficos de trabalhos na mesma linha de pesquisa sobre métodos de tratamento dos efeitos não lineares, em especial o de dispersão em fibras ópticas; em seguida foi feita a modelagem da rede óptica no software OptiSytem da Optiwave Corporation para implementação das simulações dos métodos utilizados para tratamento da dispersão em fibras ópticas. Concluiu-se, a partir do estudo de três sistemas de compensação de dispersão, onde uma ligação DCF e uma ligação FBG foram utilizadas para esse fim, que os valores do fator Q e do BER foram comparados e analisados a uma taxa de transmissão de 10 Gb/s; que o fator Q e o OSNR para o sistema de compensação de simétrica (mista) eram os maiores, estas técnicas de compensação de dispersão diminuem a degradação do sinal, melhorando a transmissão dos dados no sistema, com fibra DCF as perdas totais aumentam devido os efeitos não lineares, e seu custo é maior do que a fibra FBG, ou seja, com fibra FBG, o custo do sistema é menor, porém seu alcance é limitado. Portanto as duas técnicas podem ser utilizadas dependendo dos requisitos da rede do projeto de telecomunicações.

Palavras-chaves: Redes de Fibras Ópticas. Dispersão. Fibras Compensadoras de Dispersão (DCF).

ABSTRACT

This paper discusses the use of methods for treatment of fiber optic dispersion, showing the efficiency of use for a better quality factor (Q. Factor) and bit error rate (Min. Ber) result in data transmission by fiber optic networks. Thus, this dissertation aims to perform a performance analysis of one of the techniques of Post-Compensation techniques in Dense Wavelength Division Multiplexing based on 16-channel passive optical networks (DWDM-PON) with 100GHz spacing, a data rate of 10Gbps through the scatter post compensation method; proposes the use of dispersion, post-compensation and chromatic dispersion techniques in optical fiber data transmission using dispersion compensating fibers (DCF) and Bragg Grid Fibers (FBG) for a better factor result. (Q-Factor) and bit error rate (Min Ber). The applied methodology was based on bibliographical surveys of works in the same line of research on methods of treatment of nonlinear effects, especially the dispersion in optical fibers; Optical network modeling was then performed using Optiwave Corporation's OptiSystem software to implement simulations of the methods used to treat fiber dispersion. It was concluded from the study of three dispersion compensation systems, where a DCF bond and an FBG bond were used for this purpose, that the Q factor and BER values were compared and analyzed at a transmission rate of 10 Gb / s; Since Q factor and OSNR for symmetric (mixed) compensation system were the largest, these scatter compensation techniques decrease signal degradation, improving data transmission in the system, with DCF fiber the total losses increase due to nonlinear effects, and its cost is higher than FBG fiber, ie with FBG fiber, the system cost is lower, but its range is limited. Therefore both techniques can be used depending on the requirements of the telecommunication project network.

Key-words: Fiber Optic Networks. Dispersion. Dispersion Compensating Fibers (DCF).

SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT	9
1 INTRODUÇÃO	17
1.1 MOTIVAÇÃO	18
1.2 OBJETIVOS	18
1.2.1 Objetivos Gerais	18
1.2.2 Objetivos Específicos	19
1.3 MÉTODOLOGIA DE PESQUISA	19
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	19
1.5 ESTADO DA ARTE	20
2 SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES POR FIBRAS ÓPTICAS.....	23
2.1 NATUREZA DA LUZ	27
2.2 FIBRAS ÓPTICAS	30
2.2.1 Fibras Monomodo (<i>Single Mode Fiber - SMF</i>).....	34
2.2.2 Fibras Multimodo (<i>MultiMode Fiber – MMF</i>)	35
2.2.3 Fibras de Cristais Fotônicos (PCF)	36
2.2.4 Dispositivos Ópticos	38
3 EFEITOS NÃO LINEARES.....	45
3.1 PROPAGAÇÃO ELETROMAGNÉTICA EM FIBRAS ÓPTICAS.....	45
3.1.1 Equações de Maxwell.....	45
3.1.2 Equação de Schrödinger	46
3.2 MECANISMO DE PERDAS DE SINAL EM FIBRAS ÓPTICAS	49
3.2.1 Atenuação.....	49
3.2.2 Dispersão.....	51
3.3 EFEITOS NÃO LINEARES EM FIBRAS ÓPTICAS	55
3.3.1 Automodulação de Fase (SPM)	56
3.3.2 Modulação Cruzada de Fase (XPM)	57
3.3.3 Mistura de Quatro Ondas (FWM)	58
3.4 MÉTODO DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA	59
3.4.1 <i>Software Optisystem</i>	61
4 ANÁLISE DA DISPERSÃO PELOS MÉTODOS DE COMPENSAÇÃO	64
4.1 PRÉ-COMPENSAÇÃO	65
4.2 PÓS-COMPENSAÇÃO	65

4.3	COMPENSAÇÃO SIMÉTRICA (MISTA)	66
4.4	ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DA COMPENSAÇÃO POR PÓS-DISPERSÃO NO SISTEMA DWDM-PON 66	
4.4.1	Modelo de Simulação.....	67
4.4.2	Método de Pós-compensação.....	68
4.4.3	Resultados e discursões	68
4.5	ANÁLISE DA COMPENSAÇÃO CROMÁTICA DA DISPERSÃO EM SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO ÓPTICA EM FIBRA	72
4.5.1	Modelo de simulação	72
4.5.1.1	Os três métodos de compensação da Dispersão.	72
4.5.2	Resultados e discursões	73
4.6	ANÁLISE COMPARATIVA DE COMPENSAÇÃO DA DISPERSÃO EM SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO ÓPTICA COM FIBRAS COMPENSADORAS DE DISPERSÃO (DCF) E GRADE DE BRAGG EM FIBRA (FBG). 75	
4.6.1	Modelo de simulação	75
4.6.2	Resultados e discursões	77
5	CONCLUSÃO	82
5.1	TRABALHOS FUTUROS	82
5.2	TRABALHOS PUBLICADOS	83
5.2.1	Revistas – Trabalhos aceitos / publicados	83
5.2.2	Congressos – Trabalhos aceitos / publicados.....	83
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1::REFRAÇÃO [13].	30
FIGURA 2.2::REFLEXÃO [13].	31
FIGURA 2.3 PRINCÍPIO BÁSICO DE TRANSMISSÃO EM FIBRA ÓPTICA [13].	31
FIGURA 2.4 COMPONENTES DA FIBRA ÓPTICA [13].	32
FIGURA 2.5: ESTRUTURA DE UMA FIBRA ÓPTICA COM NÚCLEOS: MULTIMODO (MM) E MONOMODO (SM) [ADAPTADO DE 4].	33
FIGURA 2.6: COMPARAÇÃO ENTRE AS FIBRAS ÓPTICAS CONVENCIONAIS MONOMODO E MULTIMODO COM ÍNDICE- DEGRAU E	34
FIGURA 2.7: REPRESENTAÇÃO SIMPLES DE CRISTAIS FOTÔNICOS UNI, BI E TRIDIMENSIONAIS, AS CORES DIFERENTES REPRESENTAM MATERIAIS COM DIFERENTES INDICIES DE REFRAÇÃO. O RECURSO DE DEFINIÇÃO DE UM CRISTAL FOTÔNICO É A PERIODICIDADE DO MATERIAL DIELETRICO AO LONGO DE UM OU MAIS EIXOS [ADAPTADOS DE 9].	36
FIGURA 2.8: MODELO DE AMPLIFICADOR ÓPTICO [14].	38
FIGURA 2.9: CONFIGURAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM SOA [14].	41
FIGURA 2.10: ACOPLADOR DIRECIONAL DUPLO NÃO-LINEAR DE COMPRIMENTO L .	42
FIGURA 2.11: COMPENSAÇÃO DA DISPERSÃO COM FBG, REFLETINDO DIFERENTES COMPRIMENTOS DE ONDA EM DIFERENTES PONTOS AO LONGO DO COMPRIMENTO DA GRADE.	43
FIGURA 2.12: FUNCIONAMENTO DA GRADE DE BRAGG, ONDE DE ACORDO COM A EQUAÇÃO DE BRAGG, PARTE DO SINAL DE ENTRADA É REFLETIDO E A OUTRA PARTE É TRANSMITIDO [16].	44
FIGURA 3.1: A ATENUAÇÃO EM FIBRA ÓPTICA [15].	50
FIGURA 3.2: ATENUAÇÃO EM FIBRAS MONOMODO E MULTIMODO [14].	50
FIGURA 3.3: DISPERSÃO EM FIBRA ÓPTICA [15].	52
FIGURA 3.4: MAPA DE GERENCIAMENTO DE DISPERSÃO.	54
FIGURA 3.5: EFEITO SPM [15].	57
FIGURA 3.6: EFEITO DA MODULAÇÃO CRUZADA DE FASE (XPM).	58
FIGURA 3.7: MISTURA DE QUATRO ONDAS (FWM) EM UM SISTEMA WDM.	59
FIGURA 3.8: INTERFACE DO SOFTWARE OPTISYSTEM.	62
FIGURA 4.1:SISTEMA WDM DE 16 CANAIS UTILIZANDO AS TÉCNICAS DE COMPENSAÇÃO DE DISPERSÃO (PRÉ- COMPENSAÇÃO, PÓS-COMPENSAÇÃO E COMPENSAÇÃO MISTA.	64
FIGURA 4.2: ESQUEMA DO MÉTODO DE PRÉ-COMPENSAÇÃO DA DISPERSÃO.	65
FIGURA 4.3: ESQUEMA DO MÉTODO DE PRÉ-COMPENSAÇÃO DA DISPERSÃO.	65
FIGURA 4.4: ESQUEMA DO MÉTODO DE COMPENSAÇÃO SIMÉTRICA (MISTA) DE DISPERSÃO.	66
FIGURA 4.5: DIAGRAMA DE SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA DWDM-PON COM 16 CANAIS.	67
FIGURA 4.6. MAX. Q. FACTOR COM COMPENSAÇÃO E SEM COMPENSAÇÃO DE DISPERSÃO.	68
FIGURA 4.7. MIN. BER COM COMPENSAÇÃO E SEM COMPENSAÇÃO DE DISPERSÃO.	69

FIGURA 4.8. DIAGRAMAS DE OLHO COM A POTÊNCIA DE ENTRADA DE 0 dBm (A) SEM COMPENSAÇÃO E (B) COM COMPENSAÇÃO DE DISPERSÃO.	69
FIGURA 4.9. DIAGRAMAS DE OLHO COM A POTÊNCIA DE ENTRADA DE 3 dBm (A) SEM COMPENSAÇÃO E (B) COM COMPENSAÇÃO DE DISPERSÃO.	70
FIGURA 4.10. DIAGRAMAS DE OLHO COM A POTÊNCIA DE ENTRADA DE 5 dBm (A) SEM COMPENSAÇÃO E (B) COM COMPENSAÇÃO DE DISPERSÃO.	70
FIGURA 4.11. DIAGRAMAS DE OLHO COM A POTÊNCIA DE ENTRADA DE 7 dBm (A) SEM COMPENSAÇÃO E (B) COM COMPENSAÇÃO DE DISPERSÃO.	71
FIGURA 4.12. DIAGRAMAS DE OLHO COM A POTÊNCIA DE ENTRADA DE 10 dBm (A) SEM COMPENSAÇÃO E (B) COM COMPENSAÇÃO DE DISPERSÃO.	71
FIGURA 4.13. ESQUEMA DE COMPENSAÇÃO PELO MÉTODO DE DISPERSÃO MISTA (SIMÉTRICA).	73
FIGURA 4.14. DESEMPENHO DOS TRÊS SISTEMAS DE COMPENSAÇÃO DE DISPERSÃO PELO FATOR Q.	73
FIGURA 4.15. DESEMPENHO DOS TRÊS SISTEMAS DE COMPENSAÇÃO DE DISPERSÃO PELO FATOR Q.	74
FIGURA 4.16. POTÊNCIA DE ENTRADA VERSUS MAX. FATOR DE QUALIDADE.	74
FIGURA 4.17. ESQUEMA DE COMPENSAÇÃO PELO MÉTODO DE PÓS-COMPENSAÇÃO COM FBG.	76
FIGURA 4.18. ESQUEMA DE COMPENSAÇÃO PELO MÉTODO DE PÓS-COMPENSAÇÃO COM DCF.	76
FIGURA 4.19. MÁXIMO FATOR DE QUALIDADE (Q) COM COMPENSAÇÃO DE DISPERSÃO COM FBG E DCF PARA 100 KM.	77
FIGURA 4.20. TAXA DE ERRO DE BIT (MIN. BER) COM COMPENSAÇÃO DE DISPERSÃO COM FBG E DCF PARA 100 KM.	78
FIGURA 4.21. MÁXIMO FATOR DE QUALIDADE (Q) COM COMPENSAÇÃO DE DISPERSÃO COM (FBG x DCF) PARA 120 KM.	79
FIGURA 4.22. MENOR TAXA DE ERRO DE BIT (MIN. BER) COM COMPENSAÇÃO DE DISPERSÃO COM (FBG x DCF) PARA 120 KM.	79
FIGURA 4.23. MÁXIMO FATOR DE QUALIDADE (Q) COM COMPENSAÇÃO DE DISPERSÃO COM (FBG x DCF) PARA 140 KM.	81
FIGURA 4.24. MENOR TAXA DE ERRO DE BIT (MIN. BER) COM COMPENSAÇÃO DE DISPERSÃO COM (FBG x DCF) PARA 140 KM.	81

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1- RESUMO DE EFEITOS NÃO LINEARES EM FIBRAS ÓPTICAS.	55
TABELA 4.1: DADOS DA SIMULAÇÃO DE DOIS ESQUEMAS WDM-PON.....	68
TABELA 4.2: DADOS DA SIMULAÇÃO DE DOIS ESQUEMAS WDM.....	76
TABELA 4.3: COMPARAÇÃO DOS DADOS DA SIMULAÇÃO DE PÓS-COMPENSAÇÃO COM FBG E DCF A UMA TAXA DE 10 GBPS A 100 KM.....	77
TABELA 4.4: COMPARAÇÃO DOS DADOS DA SIMULAÇÃO DE PÓS-COMPENSAÇÃO COM FBG E DCF A UMA TAXA DE 10 GBPS A 120 KM.....	78
TABELA 4.5: COMPARAÇÃO DOS DADOS DA SIMULAÇÃO DE PÓS-COMPENSAÇÃO COM FBG E DCF A UMA TAXA DE 10 GBPS A 140 KM.....	80

LISTA DE SIGLAS

ASE	<i>Amplified Spontaneous Emission</i>
BER	Taxa de Erro de Bit
CW	<i>Continouws Wave</i>
DCF	<i>Dispersion Compensation Fiber</i>
DSF	Fibra de Dispersão Deslocada
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>
EDFA	<i>Erbium-Doped Fiber Amplifier</i>
FBG	Fibras de Grade de Bragg
FWM	<i>Four Wave Mixing</i>
GVD	Dispersão da Velocidade de Grupo
ITU-T	União Internacional de Telecomunicações
MMF	<i>MultiMode Fiber</i>
NLDC	Acoplador Direcional Não Linear
NRZ	Não Retorno ao Zero
NZDSF	Fibra de Dispersão Deslocada Não Nula
OSNR	<i>Optical Signal to Noise Ratio</i>
PCF	Fibra de Cristal Fotônico
PMD	Dispersão dos Modos de Polarização
Q. Factor	Fator de Qualidade
SMF	<i>Single Mode Fiber</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
SOA	<i>Semiconductor Optical Amplifier</i>

SBS	<i>Stimulated Brillouin Scattering</i>
SPM	<i>Self Phase Modulation</i>
SRS	<i>Stimulated Ramam Scatering</i>
WDM	<i>Wavelength-Division Multiplexing</i>
XGM	<i>Cross-Gain Modulation</i>
XPM	<i>Cross Phase Modulation</i>

1 INTRODUÇÃO

A utilização da luz como forma de transmitir informações não é algo novo. Hoje em dia, a tecnologia está muito mais avançada e a capacidade de transmitir informações através da luz é muito maior. A velocidade da luz no vácuo pode ser considerada como sendo 300.000 km/s, o que permite a construção de redes rápidas e confiáveis, as Redes Ópticas.

Dessa forma, para não se “perder” durante a transmissão, a onda de luz deve ser transmitida por um tipo especial de condutor, a Fibra Óptica, que teve como inventor o físico indiano Narinder Singh Kanpany. Em 1950 as fibras ópticas começaram a interessar os pesquisadores, com muitas aplicações práticas sendo desenvolvidas e que se referiam principalmente à iluminação remota ou à transmissão de imagens através de cabos flexíveis para aplicações médicas. Em 1966, os pesquisadores ingleses K.C. Kao e G. A. Hockham propuseram o uso de fibras de vidro e luz, no lugar de eletricidade e condutores de cobre, na transmissão de mensagens telefônicas. Evolutivamente, as fibras ópticas puderam ser utilizadas como meio de transmissão a partir da invenção e posterior aprimoramento do laser.

Assim, a fibra óptica passou a ter aplicações práticas a partir da década de 1960 com o advento da criação de fontes de luz de estado sólido (raio laser e LED), revolucionando principalmente o setor de comunicações e transmissão de dados graças à descoberta de fibras ópticas extremamente finas, uma tecnologia que permite a trafegabilidade de dados e informações em sistemas de comunicação, com comprovada superioridade e qualidade em relação a outros meios.

Conceitualmente, a fibra óptica é uma tecnologia em que a luz é utilizada para transporte de informação digital através de uma mídia feita de pequenos fios de vidro, onde cada qual determina um caminho para os raios de luz que transportam o sinal. Devido ao fenômeno de reflexão interna total, a luz pode se propagar através da fibra com pequenas perdas. Um sistema de comunicação por fibra óptica é, portanto, um sistema de ondas luminosas que empregam fibras ópticas para a transmissão de dados e informações [1].

Atualmente, a fibra óptica é utilizada na montagem de redes, pois aumenta a largura de banda para transmissões de dados. A transmissão em fibra óptica é realizada pelo envio de um sinal de luz codificado, dentro do domínio de frequência do infravermelho, através de um cabo óptico.

Com os avanços tecnológicos, os sistemas de comunicação necessitam cada vez mais trafegar os dados com maior confiabilidade, segurança e integridade, com isso é necessário garantir a integração entre os múltiplos serviços ofertados por uma rede de telecomunicações, o que exige eficiência energética, que é uma característica fundamental dos sistemas ópticos, observando-se que os meios ópticos substituem os componentes eletrônicos quando estes aquecem demasiadamente, o que ocorre quando operam em grandes faixas de frequência e banda passante, tratando-se de um fenômeno que ocorre em função do processo de modulação e demodulação dos sinais [1].

Em tal cenário é constante a investigação sobre a regeneração totalmente óptica, visando o tratamento dos sinais ópticos degradados para que a transmissão dos sinais por fibra óptica ocorra sem distorções, *crosstalk* e ruídos, bem como que chegue com a qualidade necessária até o receptor.

1.1 MOTIVAÇÃO

Este trabalho aborda o uso de métodos para tratamento da dispersão em fibras ópticas, mostrando a eficácia da utilização para um melhor resultado do Fator de qualidade (Q. Factor) e da taxa de erro de bit (Min. Ber) na transmissão de dados por redes de fibras ópticas.

1.2 OBJETIVOS

Esta dissertação tem por objetivo fazer uma análise do desempenho de uma da técnica de Pós-compensação em sistemas Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda Densa, baseado em redes ópticas passivas (DWDM-PON) com 16 canais e 100GHz de espaçamento para uma taxa de transmissão de dados de 10Gbps através do método de Pós-compensação de dispersão.

1.2.1 Objetivos Gerais

Este trabalho propõe a utilização de técnicas de dispersão, a de Pós-compensação, Pré-Compensação e Compensação Mista (simétrica) para o tratamento da dispersão Cromática na transmissão de dados por fibras ópticas com utilização de fibras compensadoras de dispersão

(DCF) e Grade de Bragg em fibra (FBG), para que com o uso destas técnicas, obtenhamos um melhor resultado do fator de qualidade (Q) e da taxa de erro de bit (Min Ber).

1.2.2 Objetivos Específicos

- Análise da técnica de Pós-compensação em um sistema de DWDM-PON por meio de comparações de simulações no software *OptiSystem*.
- Análise de Compensação de Dispersão Cromática em Sistemas de Comunicação de Fibra Óptica com a utilização de três métodos de dispersão, Pré-Compensação, Pós-Compensação e Compensação Mista (simétrica) no software *OptiSystem*.
- Análise Comparativa de Compensação de Dispersão Cromática em Sistemas de Comunicação de Fibra Óptica com a utilização do método de Pós-Compensação com o uso de fibra compensadora de dispersão (DCF) e Grade de Bragg em fibra (FBG) no software *OptiSystem*.

1.3 MÉTODOLOGIA DE PESQUISA

Primeiramente foram feitos levantamentos bibliográficos de trabalhos na mesma linha de pesquisa sobre métodos de tratamento dos efeitos não lineares, em especial o de dispersão em fibras ópticas.

Em seguida foi feito a modelagem da rede óptica no software *OptiSystem* da *Optiwave Coporation* para implementação das simulações dos métodos utilizados para tratamento da dispersão em fibras ópticas.

E por fim, foi realizado a coleta e análises dos resultados obtidos e escrito a dissertação.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O primeiro capítulo, aborda a necessidade sobre da qualidade do sinal enviado por um sistema de telecomunicações, a motivação, os objetivos gerais e específicos, a metodologia de pesquisa utilizada.

O segundo capítulo, aponta o estado da arte sobre os sistemas de telecomunicações, as redes ópticas, os tipos de fibras ópticas, a propagação da onda em fibra óptica regido pelas Equações de Maxwell, a Equação não linear de Schrödinger, os fatores que degeneram o sinal degradando um sistema de comunicação e os efeitos não lineares.

O terceiro capítulo, aborda sobre as Equações de Maxwell, a Equação não linear de Schrödinger, os fatores que degradam um sistema de comunicação, os efeitos não lineares, os tipos de dispersão, as técnicas de compensação, equações do comprimento de fibra, os conceitos e a relação entre GVD x SPM.

O quarto capítulo, aborda a rede e os componentes e os métodos que foram utilizados nas simulações de análises da Pós-compensação com fibra (DCF) e (FBG) e análise de compensação de dispersão cromática em sistemas de comunicação de fibra óptica pelo software Optisystem, como também, os resultados encontrados que comprovam a eficácia das técnicas utilizadas no tratamento da dispersão em fibras ópticas.

O quinto capítulo, apresenta as considerações finais, as referências bibliográficas utilizadas, os trabalhos publicados pelo nosso grupo de pesquisa e possíveis trabalhos futuros nesta linha de pesquisa.

1.5 ESTADO DA ARTE

Importante para o desenvolvimento do tema sobre a “Análise Comparativa do Desempenho da Compensação da Dispersão em Sistemas com Redes de Fibras Ópticas” é a obra de Govind P. Agrawal, que como texto de referência na área de estudo, por sua atualidade, eis que apresenta os fundamentos básicos sobre sistemas de comunicação e, especificamente, sobre a temática desta pesquisa na medida em que também aborda projetos avançados de sistemas com redes de fibras ópticas, bem como capítulos específicos sobre o gerenciamento de perdas e dispersão em fibras ópticas.

Outro autor não menos importante é Gerg Keiser, que desenvolve estudos que fundamentam os princípios para a compreensão e aplicação da moderna tecnologia de fibras ópticas para as redes de comunicação, pelo que esclarece como as comunicações ópticas se combinam com os sistemas de telecomunicações, bem como as motivações e vantagens de uso das fibras ópticas.

A aplicação dessa referência teórica para esta pesquisa ocorre por também descrever as características de uso e desempenho dos principais elementos das fibras ópticas, avaliando os efeitos dos processos não lineares em fibras ópticas e, fundamentalmente, observando que alguns desses efeitos, tal como a dispersão, degradam o desempenho do sistema, conseqüentemente exigindo controle e reparação.

Também se considerou de alta relevância no estudo da temática a obra de William Giozza por discorrer sobre os sistemas de fibras ópticas refazendo a contextualização histórica da invenção dessa tecnologia e o crescente interesse dos pesquisadores em suas aplicações práticas nos sistemas de comunicação, assim servindo também de base referencial para esta pesquisa por explicar o funcionamento da tecnologia da fibra óptica e seus princípios básicos de transmissão de dados e informações nos modernos sistemas de comunicações e telecomunicações.

Com o estudo realizado por Isaac Dankwa, Ferdinand A. Katsriku, Andy B. Amewuda, Grace G. Yamoah e J-D Abdulai em 2017, no qual, foi feita a comparação de dois esquemas de compensação de dispersão, um com fibra compensadora de dispersão (DCF) e outro com grade de Bragg em fibra (FBG), para três taxas de bits (10, 20 e 40Gbps) três métodos de compensação foram avaliados (Pós-compensação, Pré-compensação e compensação Mista) em um sistema com 200 km de comprimento, foi possível comprovar que a compensação simétrica com fibra DCF teve melhores resultados.

Também outro estudo importante foi o de M.L Meena and Meena em 2018, o qual, faz uma Análise de Desempenho da Rede Óptica DWDM com técnicas de compensação de dispersão para sistema de transmissão 4×8 Gbps, nele foi proposto um sistema DWDM de transmissão óptica de 4 canais com taxa de 08Gbps, também foi utilizado os métodos de compensação de dispersão (Pré-compensação, Pós-compensação e Compensação Simétrica), foram modelados, analisados e comparados para investigar o desempenho do sistema DWDM, usando o formato de modulação Gaussian sem retorno a zero (NRZ), retorno a zero (RZ) e com amplificador de fibra dopada com érbio (EDFA) em um comprimento de 150 km de fibra monomodo (SMF) e 30 km fibra de compensação de dispersão (DCF). O desempenho do modelo projetado é comparado em termos de taxa de erro de bit (BER) e fator Q. Neste estudo foi possível observar que, o esquema de compensação de dispersão simétrica com modulação de gerador de pulso RZ oferece melhor desempenho para o sistema de transmissão de longo curso.

Outro estudo foi o de Ashwani Sharma, Inder Singh, Suman Bhattacharya and Shalini Sharma em 2011, fazendo a Comparação de desempenho do DCF e FBG como compensação de dispersão Técnicas a 100 Gbps Mais de 120 km, o qual com a utilização de técnicas de compensação de dispersão Pré-compensação, Pós-compensação e Compensação Simétrica com fibra DCF e Grade de Bragg em fibra FBG, com os resultados obtidos foi possível observar que, das diferentes configurações comparadas em termos de fator Q, diagrama de Olho e BER respectivamente, o esquema com fibra DCF utilizando o método de compensação de dispersão Pré-compensação possui um fator Q alto, melhor diagrama de olho e menor taxa de erro de bit BER quando comparado com as outras configurações do DCF e FBG.

Acredita-se que a convergência de todos os autores estudados a respeito da temática aqui tratada possibilitou maior clareza sobre o assunto pesquisado e maior eficácia quanto à busca de sua elaboração e também para a efetividade e segurança em relação ao principal objetivo deste estudo, que é a “Análise Comparativa do Desempenho da Compensação da Dispersão em Sistemas com Redes de Fibras Ópticas”.

2 SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES POR FIBRAS ÓPTICAS

Neste capítulo 2 serão apresentados os aspectos teóricos gerais acerca sobre os sistemas de telecomunicações por fibra óptica, os tipos de fibras ópticas em especial as fibras de cristais fotônicos, seus modos de propagação, tipos e aplicações. Abordará também sobre os amplificadores a fibra dopada com érbio (EDFA – *Erbium Doped Fiber Amplifiers*) seus principais parâmetros em especial a relação entre a OSNR, fator Q e a BER.

A Teoria Matemática da Comunicação, também conhecida como Teoria da Informação, foi elaborada por dois engenheiros matemáticos, Shannon e Weaver, em 1949, que é considerada como uma sistematização do processo comunicativo a partir de uma perspectiva puramente técnica, com ênfase nos aspectos quantitativos. A comunicação é apresentada como um sistema no qual uma fonte de informação seleciona uma mensagem desejada a partir de um conjunto de mensagens possíveis e codifica esta mensagem, transformando-a num sinal passível de ser enviada por um canal ao receptor, que fará o trabalho do emissor ao inverso. Ou seja, a comunicação é entendida como um processo de transmissão de uma mensagem por uma fonte de informação, através de um canal, a um destinatário [12].

Observa-se, pois, que qualquer sistema de comunicação como elementos fundamentais o transmissor da mensagem, o meio físico e o receptor; o meio físico é o meio de transmissão da mensagem – o canal, seja o meio verbal, o papel ou os meios de comunicação eletrônica. Desse modo, diante do avanço tecnológico atualmente existente, pode-se destacar o grande crescimento nos seguintes sistemas de comunicação: a *Internet* (rede mundial de computadores) e os sistemas *Wireless* (*rede sem fio*), onde o segundo pode se apresentar através de diferentes e diversificados meios, para comunicação e recebimento de informações, tanto de sistemas similares (rádio, infravermelho, laser), como também de sistemas cabeados, dentre os quais se pode citar os sistemas de fibra óptica.

Esses sistemas, portanto, apresentam a mesma função, qual seja a de transportar sinais de comunicação de um local para outro, em que nos sistemas de fibra óptica a transmissão de mensagens é enviada através do laser, que converte os sinais elétricos em sinais ópticos para, posteriormente, emití-los no meio físico guiado pela onda de luz e na qual as informações são direcionadas ao receptor (a parte final) que, por sua vez, transforma os sinais ópticos em sinais elétricos através de fotodetector.

A transmissão por fibra óptica, quando comparada à transmissão por cabos metálicos, razão pela qual, a seguir, são listadas as principais razões para o uso das fibras ópticas:[13]

- Imunidade a ruídos EMI e RF: a fibra óptica não conduz corrente elétrica e sim luz. Dessa forma, interferências eletromagnéticas e de radiofrequência não a atingem;
- Atenuação baixa: pode-se transmitir os sinais por comprimentos muito mais longos, sem a necessidade de repetidores, do que se consegue com cabos metálicos;
- Grande largura de banda: as taxas de transmissões que as fibras podem alcançar são da ordem de Tbps;
- Longevidade do projeto: o cabo de fibra que se usa em um projeto de redes será o mesmo durante muito mais tempo do que nos sistemas por cabos metálicos;
- Imunidade à condução elétrica: que pode causar problemas de aterramento quando se interligam redes com mais de um ponto de conexão a terra.

As fibras ópticas possuem muitas características que as classificam como um excelente meio físico para redes de alta velocidade: [13]

- Imunidade a interferências (eletromagnéticas – EFI, e rádio-frequência - RFI) e ao ruído;
- Pequeno tamanho e peso;
- Custos potencialmente baixos;
- Alta resistência a agentes químicos e à temperatura;
- Isolamento elétrico;
- Flexibilidade na expansão da capacidade.

As perdas do sinal para um conjunto de um ou mais comprimentos de onda podem ser muito pequenas, sendo assim o número de amplificadores e repetidores necessários é reduzido. Além de sua enorme largura de faixa e de sua baixa atenuação a fibra óptica também proporciona baixas taxas de erro.

A razão para que a fibra seja melhor do que o cobre é inerente às questões físicas subjacentes a esses dois materiais. Quando um sinal se move num par de condutores de cobre, ele afeta outro par de condutores do cabo e, além do mais, são afetados pelos sinais eletromagnéticos existentes fora do cabo. Os sinais de um condutor óptico não afetam outro condutor (por não transportar carga elétrica) e não são afetados por nenhum tipo de sinal existente do lado de fora da fibra.

Do mesmo modo, acentua que as características das fibras ópticas destacam suas vantagens como meio de transmissão:[13]

- Banda passante potencialmente enorme: a transmissão em fibras ópticas é realizada em frequências ópticas portadoras na faixa espectral de 10^{14} a 10^{15} Hz (100 a 1000 THz), o que significa uma capacidade de transmissão potencial, no mínimo, 10.000 vezes superior, por exemplo, à capacidade dos sistemas de microondas que operam com uma banda passante útil de 700 MHz. Além de suportar um aumento significativo de número de canais de voz e /ou de vídeo em um mesmo circuito telefônico, essa enorme banda passante permite novas aplicações.

- Perdas de transmissão muito baixas: as fibras ópticas apresentam atualmente perdas de transmissão extremamente baixas, desde atenuações típicas da ordem de 3 a 5 dB/Km na região em torno de $0,85\mu\text{m}$ até perdas inferiores a 0,2 dB/Km para operação na região de $1,55\mu\text{m}$. Pesquisas com novos materiais, em comprimentos de ondas superiores, prometem fibras ópticas com atenuações ainda menores, da ordem de centésimos e, até mesmo, milésimos de decibéis por quilômetro. Desse modo, com fibras ópticas, é possível implantar sistemas de transmissão de longa distância com um espaçamento muito grande entre repetidores, o que reduz significativamente a complexidade e custos do sistema.

- Imunidade a interferências e ao ruído: as fibras ópticas, por serem compostas de material dielétrico, ao contrário dos suportes de transmissão metálicos, não sofrem interferências eletromagnéticas. Isso permite uma operação satisfatória dos sistemas de transmissão por fibras ópticas mesmo em ambientes eletricamente ruidosos. Interferências causadas por descargas elétricas atmosféricas, pela ignição de motores, pelo chaveamento de relés e por diversas outras fontes de ruído elétrico esbarram na blindagem natural provida pelas fibras ópticas. Por outro lado, existe um excelente confinamento do sinal luminoso propagado pelas fibras ópticas. Desse modo, não irradiando externamente, as fibras ópticas agrupadas em cabos ópticos não interferem opticamente umas nas outras, resultando num nível de ruído de diafonia (*crosstalk*) desprezível. Os cabos de fibras ópticas, por não necessitarem de blindagem metálica, podem ser instalados convenientemente, por exemplo, junto às linhas de transmissão de energia elétrica. A imunidade e pulsos eletromagnéticos (EMP) são outra característica importante das fibras ópticas.

- Isolação elétrica: o material dielétrico (vidro ou plástico) que compõe a fibra óptica oferece uma excelente isolação elétrica entre os transceptores ou estações interligadas. Ao contrário dos suportes metálicos, as fibras ópticas não tem problemas com aterramento e

interfaces dos transeptores. Além disso, quando um cabo de fibra óptica é danificado não existem faíscas de curto-circuito.

- Pequeno tamanho e peso: as fibras ópticas possuem dimensões comparáveis com as de um fio de cabelo humano. Mesmo considerando-se os encapsulamentos de proteção, o diâmetro e o peso dos cabos ópticos são bastante inferiores aos dos equivalentes cabos metálicos. Por exemplo, um cabo óptico de 6,3mm de diâmetro, com uma única fibra de diâmetro 125 μm e encapsulamento plástico, substitui, em termos de capacidade, um cabo de 7,6cm de diâmetro com 900 pares metálicos. Quanto ao peso, um cabo metálico de cobre de 94 quilos pode ser substituído por apenas 3,6 quilos de fibra óptica. A enorme redução dos tamanhos dos cabos providos por fibras ópticas permite aliviar o problema de espaço e de congestionamento de dutos nos subsolos das grandes cidades e em grandes edifícios comerciais. O efeito combinado do tamanho e peso reduzidos faz das fibras ópticas o meio de transmissão ideal nos mais variados ambientes (aviões, navios, satélites etc.).

Além disso, os cabos ópticos oferecem vantagens quanto ao armazenamento, transporte, manuseio e instalação em relação aos cabos metálicos de resistência e durabilidade equivalentes.

- Segurança da informação e do sistema: as fibras ópticas não irradiam significativamente a luz propagada, implicando um alto grau de segurança para a informação transportada. Qualquer tentativa de captação de mensagens ao longo de uma fibra óptica é facilmente detectada, pois exige o desvio de uma porção considerável de potência luminosa transmitida. Esta qualidade das fibras ópticas é importante em sistemas de comunicações exigentes quanto à privacidade, tais como nas aplicações militares, bancárias etc. Uma outra característica especial das fibras ópticas, de particular interesse das aplicações militares, é que, ao contrário dos cabos metálicos, as fibras não são localizáveis através de equipamentos medidores de fluxo eletromagnético ou detectores de metal.

- Custos potencialmente baixos: o vidro com que as fibras ópticas são fabricadas é feito principalmente a partir do quartzo, um material que, ao contrário do cobre, é abundante na crosta terrestre. Embora a obtenção de vidro ultrapuro envolva um processo sofisticado, a produção de fibras ópticas em larga escala gradualmente superou esse inconveniente.

- Alta resistência a agentes químicos e variações de temperatura: as fibras ópticas, por serem compostas basicamente de vidro ou plástico, têm uma boa tolerância a temperaturas, favorecendo sua utilização em diversas aplicações. Além disso, as fibras ópticas são menos

vulneráveis à ação de líquidos e gases corrosivos, contribuindo assim para uma maior confiabilidade e vida útil dos sistemas.

Dessa forma, a transmissão por fibra óptica apresenta melhor desempenho em relação à velocidade, taxa de transmissão e qualidade das informações transmitidas e recebidas, muito em vista da melhor qualidade desse canal de transmissão de informações e dados, que é a fibra óptica, uma tecnologia em que a luz é utilizada para o transporte da informação.

2.1 NATUREZA DA LUZ

A natureza da luz tem intrigado pesquisadores desde os tempos mais remotos, considerando-se que os antigos gregos estudaram a reflexão e a refração – o desvio de luz por um vidro ou pela água, por exemplo. Do mesmo modo, estudiosos árabes na Idade Média, como Al-Hazen (965-1038), conheciam a refração o suficiente para fabricar lentes de óculos.

No entanto, foi apenas no século XVII que houve progresso na compreensão do verdadeiro significado da luz, pois quase simultaneamente, na década de 1670, os dois maiores cientistas da época – Isaac Newton (1642-1727) e Christian Huygens (1629-1695) elaboraram teorias sobre a natureza da luz.

Isaac Newton afirmava que um feixe de luz se constituía de minúsculas partículas, que foram por eles chamadas de “corpúsculos”, que viajavam a uma velocidade enorme. Ou seja, se a luz era feita de corpúsculos isso explicaria sua propagação em linha reta, além da projeção de sombras bem delineadas. Nesse sentido, a refração poderia ser causada por corpúsculos que se propagavam mais depressa no vidro e na água, do que no ar; explicaria também porque a luz poderia brilhar através do vácuo.

Por sua vez, Christian Huygens acreditava que a luz caminhava em ondas, o que demonstrava porque a luz branca se decompõe em um espectro de cores quando passa pela refração de um prisma, tal como Isaac Newton descobrira em 1666. Huygens avaliou que cada cor de luz possuía um comprimento de onda diferente. Assim, se a luz se propaga mais devagar pelo vidro e pela água do que pelo ar, o total da refração, ou seja, o quanto a luz é desviada, depende do comprimento de onda dessa luz. Quanto menor for o comprimento de onda, maior será o desvio. É a teoria ondulatória de Huygens.

Entretanto, histórica e evolutivamente, houve mudanças sobre a natureza da luz, sendo observado que até o início do século XVII as teorias existentes explicavam alguns efeitos

ópticos de grande escala, como reflexão e refração, mas não explicavam fenômenos de escala mais fina como a interferência e difração, esta última com explicação dada, em 1815, por Fresnel, que demonstrou que a luz se move como onda. Posteriormente, Maxwell, em 1864, confirmou que as ondas de luz são transversais e possuem natureza eletromagnética, cuja direção e propagação são indicadas por um raio de luz. Tal conceito é que permite os efeitos ópticos de grande escala, como a reflexão e a refração.

Com base na natureza da luz, de se propagar pelo ar, importantes descobertas foram feitas para seu uso na comunicação e na transmissão de informações, observando-se que o uso da luz para propósitos de comunicação data desde a antiguidade [1]. Evolutivamente, portanto, em 1792, o francês Claude Chappe utilizou a natureza da luz para a transmissão mecânica por longas distâncias (100 km), surgindo o primeiro “telégrafo óptico”, no qual a luz tornava visíveis os sinais codificados, que eram interceptados e recebidos por estações retransmissoras.[1]

Em 1830 ocorre o advento da telegrafia, que substituiu a luz pela eletricidade, dando início à era das comunicações elétricas, além do uso estações retransmissoras intermediárias que permitiam a comunicação por longas distâncias (1.000 km). Outra grande mudança foi a invenção do telefone (1876) a partir do qual houve o desenvolvimento de redes mundiais de telefonia já durante o século XX, período no qual houve também a invenção do laser (1960), que chamou a atenção sobre o uso da luz do laser para as comunicações ópticas.

Em 1966 sugeriu-se que as fibras ópticas eram capazes de guiar a luz de modo similar ao de guiamento de elétrons em fios de cobre, cujo principal problema eram as altas perdas acima de 1.000 dB/km, que foram reduzidas em 1970 para abaixo de 20 dB/km na região de comprimentos de onda próximos de 1 mm[1].

Pesquisas foram desenvolvidas a partir de 1975 para que fibras ópticas de baixas perdas fossem aplicadas nos sistemas de comunicações ópticas, o que na época possibilitou o aumento das distâncias de transmissão (de 10 para 10.000 km). O avanço desses estudos está dividido em gerações de sistemas[1]:

- Primeira geração: na década de 1970 estudos foram realizados para que o aumento do sistema de onda luminosa operasse na região de comprimentos de onda próximos de 1,3 mm, com perdas menores do que 1 dB/km, haja vista que as fibras ópticas apresentam mínima dispersão nessa faixa de comprimentos de onda.

- Segunda geração: início da década de 1980, mas com a taxa de bits limitada abaixo de 100 Mb/s, devido à dispersão em fibras multimodo, limitação que foi superada a partir do uso de fibras *monomodo*.

- Terceira geração: introdução de sistemas de ondas luminosas em 1,55 μm , que apresentavam grande dispersão, problema que poderia ser superado pelo emprego de fibras de dispersão deslocada, deslocadas em combinação com lasers que oscilavam em um único modo longitudinal. Em 1989 houve o advento de amplificadores de fibra óptica.

- Quarta geração: em 1992, a amplificação óptica é utilizada para aumentar o espaçamento entre repetidores e multiplexação por divisão em comprimento de onda (WDM – *Wavelength-Division Multiplexing*), visando aumentar a taxa de bits, tratando-se de uma revolução que possibilitou a duplicação da capacidade de sistemas a cada 6 meses, aproximadamente. Nesse sistema, as perdas de fibras são compensadas periodicamente por amplificadores da fibra dopada com érbio, espaçados a cada 60–80 km.

- Quinta geração: os sistemas de comunicação por fibra óptica, a partir da tecnologia WDM, operam simultaneamente; há o desenvolvimento de um novo tipo de fibra – a fibra seca, que apresenta pequenas perdas e novos esquemas de amplificação que resultam em sistemas de ondas luminosas com milhares de canais WDM. O principal objetivo dos atuais sistemas de quinta geração é o aumento da eficiência espectral dos sistemas WDM, surgindo a tecnologia DWDM.[1]

O DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) – Multiplexação por Divisão de Onda Densa) é o processo de transmissão de diferentes comprimentos de onda sobre uma única fibra, sendo uma evolução da solução WDM. O DWDM oferece o potencial de *terabits* por segundo, podendo ser implementado simultaneamente com uma nova rede ou ser usado para reequipar sistemas sobrecarregados já existentes. Ou seja, a DWDM é uma tecnologia de multiplexação que pode multiplicar a capacidade de cada fibra em dezenas de números, aumentando as capacidades já embutidas.[13]

O DWDM é usado para expandir a capacidade de enlace de telecomunicações, permitindo que um maior número de sinais (transportados por diferentes comprimentos de onda) sejam transmitidos simultaneamente em uma única fibra, multiplicando assim a capacidade das fibras, principalmente em redes de longas distâncias (terrestre e submarina), como também em aplicações em redes metropolitanas (usada em anéis de redes metropolitanas – MAN's - equipadas com cabos de fibras ópticas).

A lógica utilizada por esses multiplexadores reproduz o princípio físico da refração, onde cada feixe de luz, quando jogado contra um prisma, é subdividido em diferentes frequências de cores. Cada uma dessas cores, também chamadas de *lambdas* (λ), consegue carregar a mesma quantidade de informações que, antes dos multiplexadores, era possível transportar no interior de uma única fibra óptica. Todo esse aumento de capacidade acontece sem prejuízo da integridade dos sinais ópticos, pois cada feixe de luz trabalha com frequência.

A tecnologia DWDM pode ser utilizada de maneira híbrida em relação à taxa e ao formato da modulação, isto é, sinais com protocolos ou taxas de transmissão diferentes podem ser multiplexadas em uma mesma fibra. A principal vantagem da DWDM é o aumento proporcionado na utilização da largura de faixa de uma fibra.

2.2 FIBRAS ÓPTICAS

A fibra óptica é uma tecnologia em que a luz é utilizada para transporte de informação digital através de uma mídia feita de pequenos fios de vidro, onde cada qual determina um caminho para os raios de luz que transportam o sinal. Devido ao fenômeno de reflexão interna total, a luz pode se propagar através da fibra com pequenas perdas. A transmissão em fibra óptica é realizada pelo envio de um sinal de luz codificado, dentro do domínio de frequência do infravermelho, através de um cabo óptico.

Para se entender como funciona a fibra óptica, necessária se faz a compreensão dos quesitos de refração e reflexão da luz. A Refração ocorre quando a luz passa do ar, um meio menos refringente, para água, mais refringente. (Figura 2.1) [13].

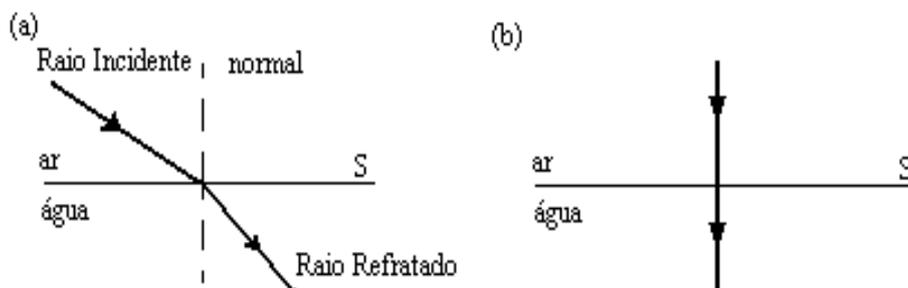


Figura 2.1::Refração [13].

Ou seja, quando a luz se dirige de um meio ambiente onde o índice de refração é menor para outro onde o índice de refração é maior, ocorre assim uma mudança do sentido e velocidade da luz, que consiste na refração.

Com a luz na água, tende a se expandir em direção à parede do recipiente, mas como a luz não passa por essa, deduz-se que o índice de refração do recipiente é menor que o da água, o que resulta no fenômeno de reflexão total (Figura 2.2) [13].

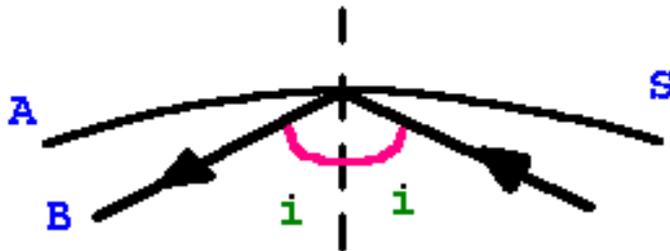


Figura 2.2::Reflexão [13].

Para que ocorra a reflexão é necessário que o sentido da propagação da luz seja do meio mais para o menos refringente e que o ângulo de incidência da luz seja maior que o ângulo limite

A fibra óptica consiste em um núcleo central, cujo índice de refração é maior do que o índice de refração do material que o reveste. Há também uma jaqueta revestindo e protegendo o núcleo e o revestimento contra a abrasão e outros efeitos. Há uma fonte de luz na entrada do núcleo da fibra que emite um cone de luz para dentro dela. A luz é então conduzida então somente se o núcleo satisfaz a condição de *reflexão interna total*. O feixe de luz que entra na fibra começa a percorrer um caminho de ziguezague entre as paredes do núcleo, sendo este o princípio básico de transmissão em fibra óptica (Figura 2.3) [13].

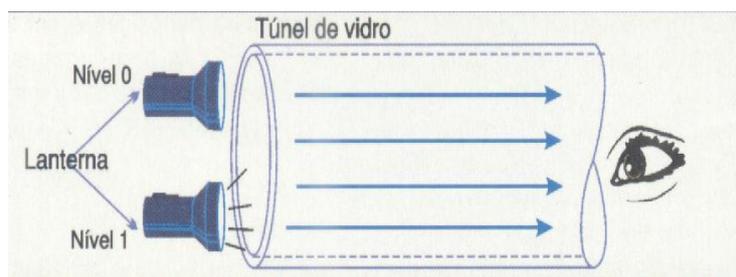


Figura 2.3 Princípio básico de transmissão em fibra óptica [13].

A fibra óptica é um filamento de vidro com diâmetro bastante reduzido, feito de quartzo de alta pureza, com duas partes principais: o núcleo, por onde se propaga a luz, e a casca, que serve para manter a luz confinada no núcleo (Figura 2.4). As duas camadas têm índices de refração diferentes, permitindo que o feixe de luz que entra por uma das extremidades seja confinado no núcleo e conduzido, com baixíssimas perdas, até a extremidade oposta.

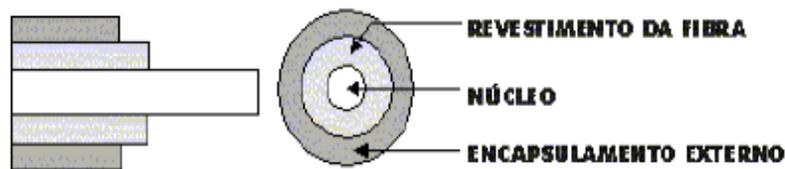


Figura 2.4 Componentes da fibra óptica [13].

O núcleo é mais denso que a casca, ou seja, o índice de refração do núcleo é maior que o da casca. A luz então é transmitida no núcleo de forma que seu ângulo de incidência sobre a casca seja maior que o ângulo limite de refração. Isto fará com que ocorra a reflexão total da luz no interior do núcleo. Dessa forma, irá ziguezagueando no núcleo refletindo na casca até chegar ao destino da transmissão.

A fibra é essencialmente um filamento fino de vidro que atua como um guia de ondas. Um guia de ondas é um meio físico ou um caminho que permite a propagação de ondas eletromagnéticas tais como a luz. Devido ao fenômeno de reflexão interna total, a luz pode se propagar através da fibra com pequenas perdas. Ao envio e a manipulação de dados em forma de luz, dá-se o nome de fotônica.

O confinamento da luz é obtido com uma diferença de índices de refração entre a casca e o núcleo. É composta de material dielétrico, normalmente o vidro, tem a forma de um filamento cilíndrico e diâmetro comparável a um fio de cabelo, porém mais resistente, e é revestida por um material com baixo índice de refração. Este revestimento plástico lhe garante proteção mecânica contra o meio externo.

Uma fibra óptica é, portanto, um guia de ondas dielétrico que opera nas chamadas frequências ópticas. Esse guia de ondas de fibra possui, normalmente, forma cilíndrica. Ela

confina a energia eletromagnética na forma de luz dentro de sua superfície e guia a luz em uma direção paralela ao seu eixo. As propriedades de transmissão de um guia de ondas óptico são ditadas por suas características estruturais, as quais têm um efeito importante na determinação de como um sinal óptico é afetado ao propagar-se ao longo da fibra.

A estrutura basicamente estabelece a capacidade de transportar informação e também influencia a resposta do guia de ondas a perturbações ambientais [2].

A figura 2.5 mostra a estrutura de uma fibra óptica com núcleos de dimensões diferentes.

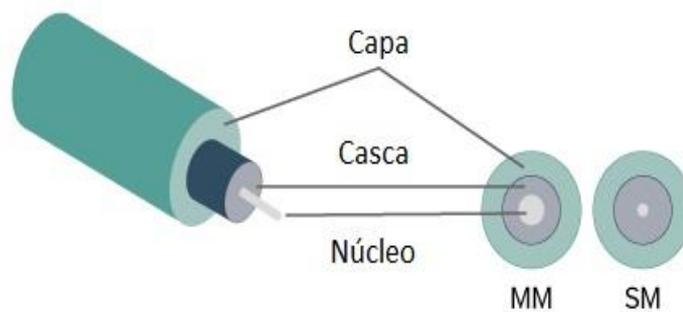


Figura 2.5: Estrutura de uma fibra óptica com núcleos: multimodo (MM) e monomodo (SM) [Adaptado de 4].

A estrutura de uma fibra óptica amplamente aceita considera-o como um único cilindro dielétrico sólido de raio a e índice de refração n_1 (Figura 2.1). Esse cilindro é conhecido como o núcleo da fibra. O núcleo nas fibras ópticas mais comuns é um vidro composto de sílica de alta pureza (SiO_2) é rodeado por um revestimento ou casca dielétrica sólida também composta de (SiO_2), que tem um índice de refração n_2 menor que n_1 .

Embora, em princípio, a casca não seja necessária para que a luz se propague ao longo do núcleo da fibra, ela serve para vários propósitos: reduz a perda por dispersão resultante das discontinuidades da superfície dielétrica do núcleo, acrescenta resistência mecânica à fibra e protege o núcleo da absorção de contaminantes superficiais com os quais ele pode entrar em contato[2].

As variações na composição do material do núcleo dão origem aos dois tipos de fibras mais comuns, a fibra de índice-degrau, que tem como característica, o índice de refração do núcleo varia bruscamente ao atingir a interface da casca [2].

O segundo tipo é a de índice-gradual, que é caracterizada, pela variação do índice de refração do núcleo gradualmente em função da distância radial a partir do centro da fibra. Tanto as fibras de índice-degrau como as de índice-gradual podem ser ainda divididas nas classes

monomodo (ou modo único) com somente um modo de propagação e multimodo, podendo ter centenas de modos de propagação [2].

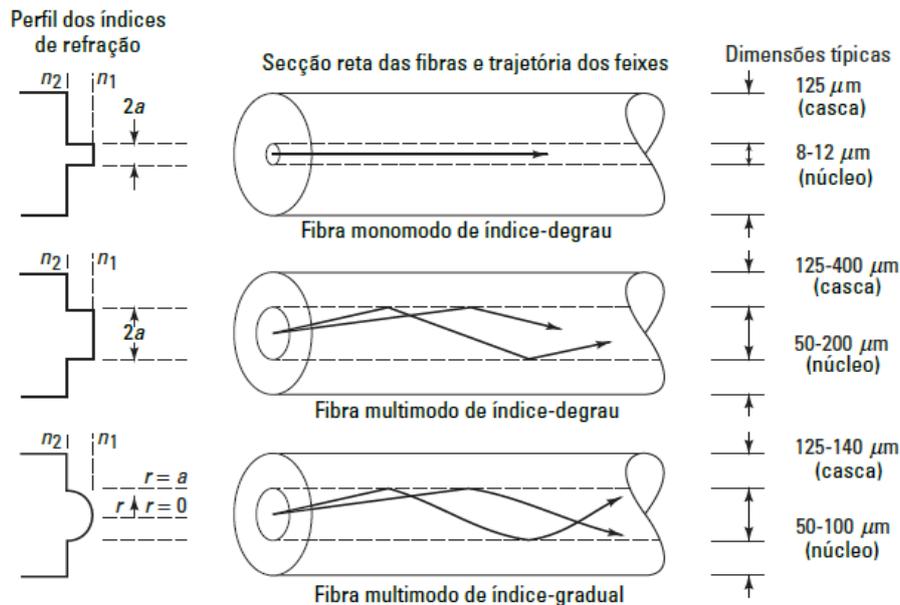


Figura 2.6: Comparação entre as fibras ópticas convencionais monomodo e multimodo com índice-degrau e índice-gradual [2].

2.2.1 Fibras Monomodo (*Single Mode Fiber - SMF*)

Este tipo de fibra é projetada para o feixe de luz se propagar em linha reta, um único modo de propagação em termos de óptica geométrica é construída de tal forma que transmite somente uma fonte de luz sem realizar nenhuma reflexão, evitando assim vários caminhos de propagação da luz dentro do núcleo ao longo da fibra, diminuindo a dispersão do impulso luminoso[5].

Tem um diâmetro muito menor no núcleo, e uma casca mais compacta esse tipo de fibra tem menor perda. Apresentam outras diferenças em diversos aspectos desde o custo de produção até as melhores possibilidades de aplicação [6]. Segundo Filgueiras e Pessoa (2015, *apud* [6]) apresentam menos dispersão por isso tem maiores distância entre os repetidores de até 120 quilômetros.

Os perfis dos índices de refração, a secção reta das fibras e a trajetória dos feixes luminosos, como também as dimensões típicas são descritas na Figura 2.6.

2.2.2 Fibras Multimodo (*MultiMode Fiber* – MMF)

A fibra multimodo propaga a raio luminoso em diversos modos de propagação e pode ter índice em degrau ou gradual. É uma fibra que apresenta grande diâmetro do núcleo em relação a fibra monomodo e que sua análise pode ser feita com base na teoria da óptica geométrica.

Nesta fibra, com o índice de refração degrau, os raios de luz são conduzidos com base na reflexão interna total. Em seu núcleo existe um material homogêneo de índice constante e superior a casca, este tipo de fibra é considerado inferior as demais fibras, pois tem banda passante muito estreita, alta atenuação, por isso o seu uso é recomendado para curtas distâncias.

A fibra óptica multimodo de índice gradual possui núcleo e casca com diâmetros variados respectivamente. O seu núcleo possui índice de refração variável, o que evita o alargamento do pulso, tem maior banda passante, portanto maior capacidade de transmissão em relação a fibra com índice em degrau.

Os perfis dos índices de refração, a secção reta das fibras e a trajetória dos feixes luminosos, como também as dimensões típicas são descritas na figura 2.2.

A ITU-T (União Internacional de Telecomunicações) desenvolve e publica uma ampla gama de recomendações e normas ou padrões internacionalmente reconhecidos, e servem de diretrizes para construção das fibras ópticas multimodo e monomodo utilizadas em telecomunicações, conforme segue abaixo:

- G.652: Essa fibra é constituída por um núcleo de sílica dopada com germânio, que tem um diâmetro entre 5 e 8 μm , e casca de sílica de diâmetro de 125 μm . A atenuação nominal é de 0,4 dB/km em 1.310 nm e 0,35 dB/km em 1.550 nm. A máxima dispersão modal de polarização é de 0,2 ps/;
- G.653: A fibra de dispersão deslocada (DSF) foi desenvolvida para utilização com lasers em 1.550 nm. O ponto de dispersão nula é transferido para 1.550 nm, onde a atenuação da fibra é cerca de metade do que em 1.310 nm. Permite um fluxo de dados de alta velocidade de em um canal de único comprimento de onda em ou próximo de 1.550 nm, ótima para longa distâncias. Apresenta problemas em sistemas (DWDM) no centro da banda C;
- G.654: Essa recomendação aborda a fibra com comprimento de onda de corte deslocado que é projetada para transmissão de sinais de alta potência a longas distâncias. Essa

recomendação descreve as características geométricas, mecânicas e de transmissão de uma fibra óptica monomodo, que tem o comprimento de onda de dispersão nula em torno de 1.300 nm. A fibra tem uma perda muito baixa na faixa de 1.550 nm, graças à utilização de um núcleo de sílica pura. Uma vez que tem um elevado comprimento de onda de corte de 1.500 nm, essa fibra é restrita à operação na região de 1.500 a 1.600 nm e normalmente é usada apenas em aplicações submarinas de longa distância.

- G.655: A fibra de dispersão deslocada não nula (NZDSF) foi introduzida em meados da década de 1990 para aplicações WDM. A sua característica principal é ter um valor não nulo positivo de dispersão ao longo de toda banda C, que é a região espectral de operação para os amplificadores de fibra óptica dopados com érbio.

2.2.3 Fibras de Cristais Fotônicos (PCF)

Cristais fotônicos são nanoestruturas que possibilitam a manipulação da luz visível e das demais formas de radiação eletromagnética, graças à organização de sua estrutura em padrões periódicos e como são criados pelo homem são classificados como metamateriais.[7]

A figura 2.7 mostra a representação dos cristais fotônicos.

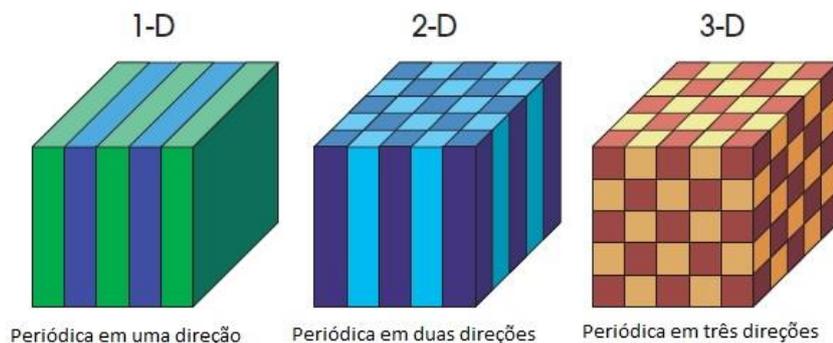


Figura 2.7: Representação simples de cristais fotônicos uni, bi e tridimensionais, as cores diferentes representam materiais com diferentes índices de refração. O recurso de definição de um cristal fotônico é a periodicidade do material dielétrico ao longo de um ou mais eixos [Adaptados de 9].

Muitas pesquisas sobre cristais fotônicos tiveram uma maior atenção da comunidade científica somente com a publicação dos artigos de Yablonovitch [8] e John [10], em 1987.

Estes trabalhos procuravam demonstrar teoricamente que a aplicação das equações de Maxwell a determinadas geometrias cristalinas tridimensionais possibilitava o controle da propagação eletromagnética por meio da existência de bandas fotônicas proibidas.

No início dos anos 1990, pesquisadores conceberam e demonstraram uma nova estrutura de fibra óptica. Inicialmente, isso foi chamado de fibra perfurada (*holeyfiber*) e mais tarde ficou conhecida como fibra de cristal fotônico (PCF) ou fibra microestruturada. A diferença entre essa nova estrutura e a de uma fibra convencional é que a casca e, em alguns casos, as regiões centrais de uma PCF contêm furos de ar, que se estendem ao longo de todo o comprimento da fibra [2].

Considerando que as propriedades do material do núcleo e da casca definem as características de transmissão de luz das fibras convencionais, o arranjo estrutural de uma PCF cria uma microestrutura interna que proporciona dimensões extras para o controle das propriedades ópticas da luz, como os efeitos de dispersão, não linearidade e birrefringência nas fibras ópticas [2].

Os tamanhos dos orifícios e o espaçamento entre os furos (conhecido como “passo” ou *pitch*) na microestrutura e no índice de refração do seu material constituinte determinam as características de guia de ondas nas fibras de cristal fotônico. As duas categorias básicas da PCF são as fibras de índice-guiado (*index-guidingfiber*) e as fibras de *bandgap* fotônico (*photonic band gapfibers*).

O mecanismo de transmissão de luz, em uma fibra de índice-guiado, é semelhante ao de uma fibra convencional, uma vez que tem um núcleo de alto índice rodeado por uma casca de índice mais baixo. No entanto, para uma PCF, o índice de refração eficaz da casca depende do comprimento de onda e do tamanho e do passo dos furos. Em contraste, em uma fibra *bandgap* fotônico, a luz é guiada por meio de um efeito de *bandgap* fotônico, seja no núcleo oco, seja no núcleo microestruturado, que está rodeado por uma casca microestruturada [2].

2.2.4 Dispositivos Ópticos

Existem vários dispositivos ópticos, que possuem diversas aplicações (optoeletrônica, telecomunicações, processamento digital totalmente óptico, portas lógicas totalmente ópticas e chaveamento óptico) e ótimos resultados ópticos, dentre os quais o amplificador óptico semicondutor (SOA – *Semiconductor Optical Amplifier*), formando um SOA-MI; o acoplador direcional não linear (NLDC); as fibras de Grade de Bragg (FBG) lineares; e onda contínua (*Continouws Wave – CW*) do Laser.[14]

Um amplificador óptico semicondutor (SOA) é um dispositivo não linear optoeletrônico, cujo objetivo é a amplificação do sinal de entrada, como solução prática para todas as funções de dispositivos de processamento de sinal totalmente óptico, que facilmente lidam com sinais complexos e processam taxas de dados de até 40 Gb/s com muito menos consumo de energia (1W).

O modelo mostrado na Figura 2.8 é exemplo dos amplificadores ópticos mais utilizados em redes de fibras ópticas, que são: amplificador à fibra dopada de Érbio (EDFA - *Erbium-Doped Fiber Amplifier*); amplificador Ramam; amplificador óptico semicondutor (SOA – *Semiconductor Optical Amplifier*); e amplificador paramétrico.

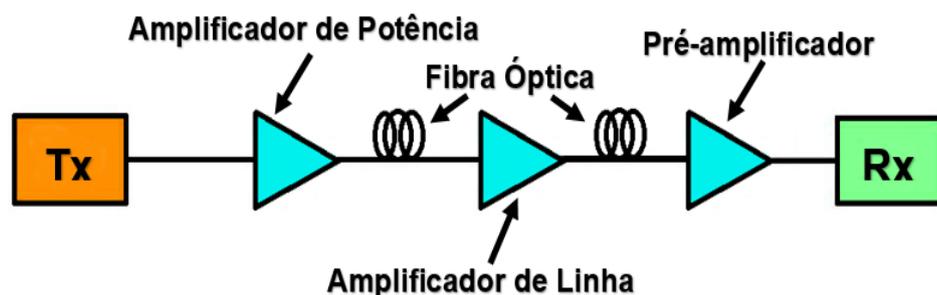


Figura 2.8: Modelo de amplificador óptico [14].

O princípio de funcionamento de um amplificador óptico genérico é determinado pela absorção da potência de uma fonte de bombeio, e o primeiro parâmetro a ser analisado é o seu ganho em dB (decibel):

$$G = 10 \log \left(\frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \right) \quad (2.1)$$

Onde $P_{saída}$ e $P_{entrada}$ são as potências de entrada e saída respectivamente.

Assim como seu funcionamento é determinado pela relação sinal-ruído (SNR – *Signal to Noise Ratio*), que indica seu desempenho. Nesse sentido, do processo de amplificação resultam ruídos indesejáveis que são resultado do limite de saturação e a alta potência de entrada, sendo este um processo que degrada a SNR causada pela emissão espontânea amplificada (ASE – *Amplified Spontaneous Emission*) [14]. O SNR pode ser expresso pela seguinte fórmula:

$$SNR = \frac{P_{sinal}}{P_{ruído}} = \left(\frac{A_{sinal}}{A_{ruído}} \right)^2 \quad (2.2)$$

onde P é a potência e A a amplitude.

A relação sinal-ruído óptico (*Optical Signal to Noise Ratio* – OSNR) representa, portanto, a potência óptica que é gerada quando o sinal óptico é transformado em corrente elétrica, que é a principal fonte do ruído. Assim a OSNR é a razão entre a potência média (P_{Med}) na saída do EDFA e a potência do ruído óptico de ASE (P_{ASE}), que é determinada em uma certa largura de banda de referência e é definida em dB por [2]:

$$OSNR = 10 \log \left(\frac{P_{Med}}{P_{ASE}} \right) \quad (2.3)$$

Dessa forma, a especificação do desempenho de um receptor óptico depende da OSNR, pois na medida em que aumenta a potência do ruído (ASE), o ganho do amplificador diminui e conseqüentemente a OSNR diminui, sendo este um processo que caracteriza a OSNR como um parâmetro de análise do desempenho dos canais ópticos, observando-se que para uma avaliação mais significativa em relação ao desempenho do receptor deve ser aplicada a relação entre o fator Q e a OSNR [14].

O fator Q é uma medida da qualidade do sinal transmitido em relação ao sinal-ruído (SNR). Esta métrica é importante para descrever o desempenho de um amplificador e é definida por [2]:

$$Q = \frac{2\sqrt{2} OSNR}{1 + \sqrt{1 + 4OSNR}} \quad (2.4)$$

A relação entre os níveis de ruído do receptor (OSNR) ideal e o melhor fator Q definida por [2]:

$$OSNR = \frac{1}{2}Q(Q + \sqrt{2}) \quad (2.5)$$

Outro critério também importante para a análise do desempenho do sistema de transmissão com a utilização de amplificadores ópticos é a taxa de erro de bit (BER), que é medida pela relação sinal-ruído (SNR) no circuito de decisão do receptor, definindo a probabilidade de identificação incorreta do bit, sendo definida por [2].

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \quad (2.6)$$

Onde $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-y^2} dy$ é a função de erro [2].

Para os erros dos sistemas de transmissão óptica, a transmissão livre é muitas vezes referida como tendo BER inferior a 10^{-9} , já para o fator Q o resultado aceitável para uma transmissão é $Q \geq 6$ e o $OSNR \geq 13,5 \text{ dB}$ [1].

Por sua vez, o Amplificador Óptico Semicondutor (SOA) é um dispositivo óptico adequado para todos os processamentos de sinal óptico (comutação totalmente óptica, conversão de comprimento de onda e regeneração de sinal), o que se deve à sua integração com semicondutores, lasers, moduladores, etc., além das vantagens apresentadas em relação ao baixo consumo de energia, integração homogênea, funcionamento com alta velocidade e

estabilidade, afora ser um dispositivo óptico compacto, com uma estrutura de ondas simples, semelhante a um laser, mas que opera abaixo do limite do laser.[14]

A Figura 2.9 demonstra a configuração esquemática do dispositivo óptico Amplificador Óptico Semicondutor (SOA).

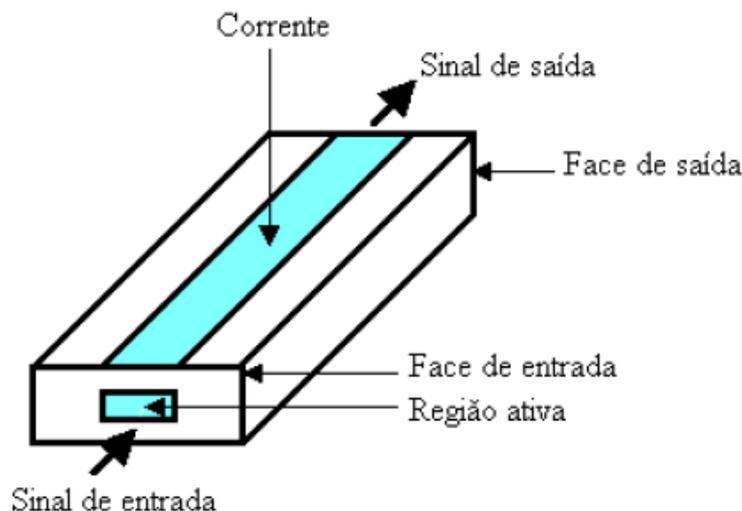


Figura 2.9: Configuração esquemática de um SOA [14].

Outra vantagem atribuída ao SOA refere-se aos efeitos não lineares, que o tornam um dispositivo muito promissor para redes de fibra óptica, observando-se que esses efeitos dependem do design do sistema. Dentre os efeitos não lineares atribuídos ao SOA tem-se o efeito XGM, que é relacionada à variação do ganho em função da potência do sinal de entrada, em que o aumento da potência provoca no amplificador uma perda da densidade de portadora na ordem dos picossegundos (ps), reduzindo o ganho [14].

As não linearidades do SOA surgem principalmente das variações de densidade de portadores no amplificador. Os quatro principais efeitos não lineares são: modulação de fase cruzada (XPM), modulação de ganho cruzado (XGM), modulação de fase própria (SPM) e mistura de quatro ondas (FWM), que possibilitam várias configurações para a projeção de diversos modelos de portas lógicas totalmente ópticas, devido à emissão estimulada em SOA durante o processo de amplificação. Essas portas podem fornecer uma conversão de comprimento de onda com alta eficiência de energia, ampla faixa de conversão e alta relação sinal-ruído (OSNR) para o sinal convertido.

Na avaliação de resposta não linear do SOA são propostas as portas AND, OR e NOR em termos de efeito de modulação de ganho cruzado (XGM) em que o sinal de entrada de dados combinado, junto com o sinal do CW Laser, são introduzidos no SOA, atuando como um elemento não linear ativo, possuindo um filtro óptico na saída do amplificador, cuja largura de banda e comprimento de onda do filtro são ajustados de acordo com a operação de porta desejada.[14]

Já os dispositivos ópticos classificados como acopladores direcionais apresentam estruturas passivas e unidirecionais constituída de duas fibras paralelas, possuindo o acoplador duas entradas e duas saídas, que possuem a função de receber o pulso óptico vindo de uma das entradas e dividi-lo coerentemente para as saídas. Tal processo é demonstrado na Figura 2.10.

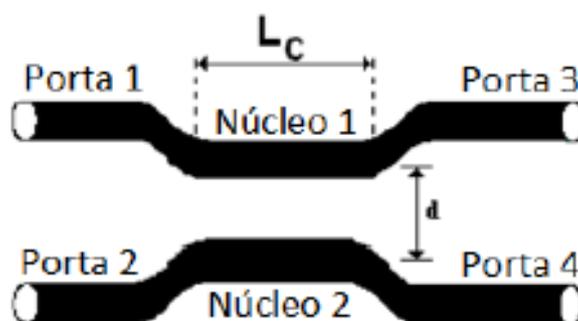


Figura 2.10: Acoplador Direcional Duplo Não-Linear de comprimento L .

No Acoplador Direcional Duplo Não-Linear (Figura 2.10), a porta 1 é a porta de entrada da potência (os pulsos aplicados na porta 1 irá para uma das portas de saída dependendo de suas potências), a porta 4 é conhecida como porta acoplada e a porta 3 é considerada como porta transmitida, servindo como porta de saída. Entretanto, em acopladores assimétricos, a porta 3 funciona como entrada e a porta 2 como porta isolada que recebe uma parte da potência vinda da porta 3.

Dispositivos compostos por guias de ondas diferentes, como acopladores direcionais não lineares assimétricos, possuem importantes aplicações na construção de portas lógicas totalmente ópticas e chaveamento de energia a baixas potências.[14]

Outro dispositivo óptico é a Grade de Bragg em Fibra (FBG – *Fiber Bragg Grating*), conforme a Figura 2.11, que é um dispositivo óptico destinado a compensar as perdas de dispersão na transmissão de dados em redes de comunicação óptica. Consiste na

modulação/variação/perturbação periódica no índice de refração do núcleo da fibra, cujas propriedades do coeficiente de reflexão são capazes de refletir (em período curto) ou transmitir (em período longo) a luz em função do comprimento de onda da grade Bragg (λ_{Bragg}), dependendo do alargamento do pulso e de sua potência.

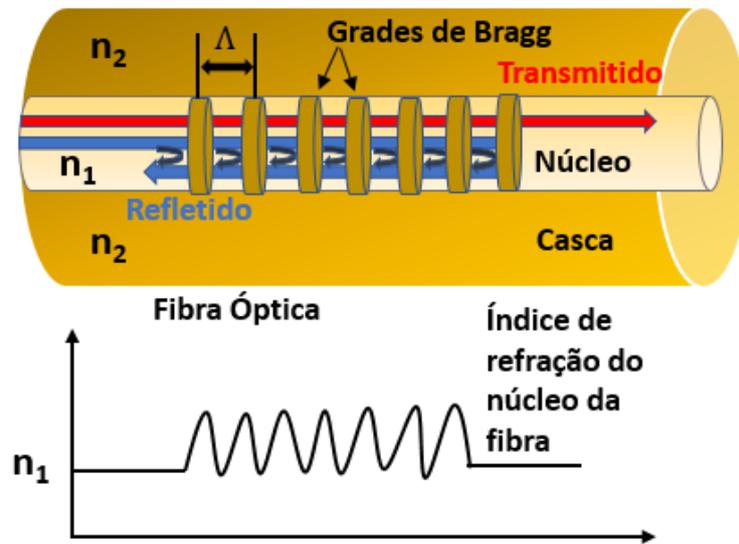


Figura 2.11: Compensação da dispersão com FBG, refletindo diferentes comprimentos de onda em diferentes pontos ao longo do comprimento da grade.

A primeira grade de Bragg foi introduzida por Ken Hill em 1978 [16]. Originalmente, as grades eram construídas usando raio laser visível que se espalhava ao longo do núcleo da fibra óptica. Em 1989, Gerald Meltz e seus amigos apresentaram uma técnica de gravação transversal de grade de Bragg no núcleo da fibra. Esta técnica utiliza o raio laser ultravioleta para criar uma estrutura periódica perpendicular à estrutura da fibra [16].

A estrutura da grade de Bragg permite a variação periódica do índice de refração no núcleo da fibra. O princípio básico de funcionamento da grade de Bragg é baseado na reflexão de Fresnel, onde a luz propagada pode ser refletida e refratada simultaneamente entre camadas com um índice de refração variado [16].

A Grade de Bragg está relacionada com a periodicidade espacial da modulação do índice de refração (Λ) e com o índice de refração efetivo do núcleo (n_{eff}) conforme a equação (3.17).

$$\lambda_{Bragg} = 2n_{eff}\Lambda \quad (2.2)$$

Onde λ_{Bragg} é o comprimento de onda da luz de entrada que será refletida de volta e n_{eff} é o índice de refração efetivo do núcleo da fibra no respectivo comprimento de onda.

A Grade de Bragg funciona como um acoplador de energia de forma contra direcional, e como um tipo de filtro espectral refletor construído no interior de uma fibra óptica capaz de refletir/selecionar uma faixa de comprimentos de onda, conservando-se relativamente transparente para o restante do espectro de acordo com a condição de Bragg [14].

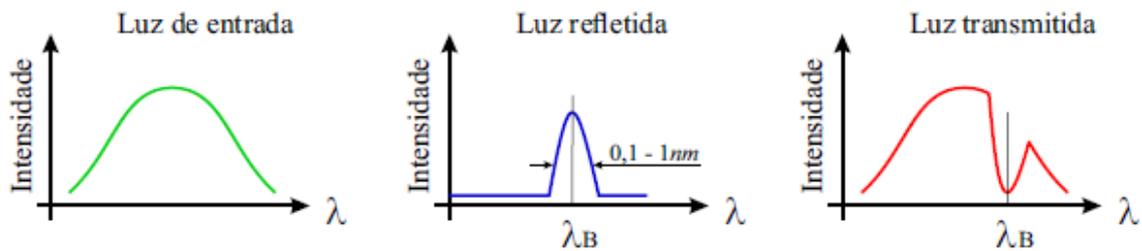


Figura 2.12: Funcionamento da Grade de Bragg, onde de acordo com a equação de Bragg, parte do sinal de entrada é refletido e a outra parte é transmitido [16].

3 EFEITOS NÃO LINEARES

3.1 PROPAGAÇÃO ELETROMAGNÉTICA EM FIBRAS ÓPTICAS

3.1.1 Equações de Maxwell

Para analisarmos o guia de onda óptico, precisamos considerar as equações de Maxwell que dão as relações entre os campos elétricos e magnéticos envolvidos. Assumindo um material dielétrico, linear e isotrópico, que não possui corrente e cargas livres, essas equações tomam as seguintes formas [2].

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (3.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = 0 \quad (3.4)$$

onde \vec{E} é o vetor campo elétrico, \vec{H} o vetor campo magnético, \vec{D} é a densidade de fluxo elétrico e \vec{B} a densidade de fluxo magnética em um meio onde cargas livres e corrente de condução são ausentes, que se relacionam com os vetores de campo por meio de relações construtivas:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}), \quad \vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{M} \quad (3.5)$$

Em que ϵ_0 é a permissividade do vácuo, μ_0 é a permeabilidade do vácuo, P e M são as polarizações elétrica e magnética induzidas, respectivamente. Para fibras ópticas, $M = 0$, devido à natureza não magnética do vidro de sílica [13].

$$\vec{P} = \epsilon_0 X^{(1)} \vec{E} + \vec{P}_{NL} \quad (3.6)$$

Em que $\overrightarrow{P_{NL}}$ e $X^{(1)}$ são respectivamente, a componente não-linear da polarização e o termo linear da susceptibilidade.

Uma relação que define os fenômenos ondulatórios dos campos eletromagnéticos pode ser derivada a partir das equações de Maxwell. Tomando o rotacional da Equação (3.1) e o da Equação (3.2), temos:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{H}) = -\varepsilon\mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (3.7)$$

Utilizando a identidade vetorial:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = \nabla (\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E}$$

e levando em conta a equação. (3.3) (ou seja, $\nabla \cdot \vec{E} = 0$), a equação (3.7) se reduz a

$$\nabla^2 \vec{E} = \varepsilon\mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (3.8)$$

Da mesma forma, tomando o rotacional da Equação (3.2), pode-se mostrar que

$$\nabla^2 \vec{H} = \varepsilon\mu_0 \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (3.9)$$

As Equações (3.8) e (3.9) são as formas padrão das equações de onda.

3.1.2 Equação de Schrödinger

Qualquer dielétrico quando submetido a uma forte potência no seu campo eletromagnético, responde de maneira não linear, portanto as fibras ópticas não são uma exceção. Em uma fibra óptica real muitos efeitos não lineares diferentes começam a aparecer

com o aumento do nível de potência óptica, os quais em algumas situações podem degradar o desempenho do sistema, ou podem servir para aplicações úteis [2].

A propagação do sinal através da fibra óptica pode ser descrita pela Equação Não Linear de Schrödinger (NLSE – *Non-Linear Schrödinger Equation*) simplificada que tem origem das equações de Maxwell [1]:

$$\frac{\partial A}{\partial Z} + \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} + \frac{\alpha A}{2} = i\gamma|A|^2 A \quad (3.10)$$

Onde A é a amplitude complexa do sinal óptico, β_2 e β_3 são os parâmetros de dispersão de segunda e terceira ordem, γ é o coeficiente não-linear, e α é a constante de atenuação da fibra.

O coeficiente de não linearidade da fibra é dado por [1]:

$$\gamma = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{n_2}{A_{ef}} \quad (3.11)$$

Onde λ é o comprimento de onda do pulso, n_2 e A_{ef} são o índice não linear e a área modal efetiva do núcleo da fibra respectivamente. O valor de γ para a sílica varia entre 1 e 5 $\text{W}^{-1}\text{Km}^{-1}$, conforme o tipo de fibra e o comprimento de onda [2].

As não linearidades são classificadas como mostra a tabela 3.1, quanto ao índice e quanto ao espalhamento. Esses efeitos são prejudiciais ao sistema de comunicação por fibra óptica e se não tratados poderão comprometer a eficiência da transmissão dos sinais.

A não linearidade para campos intensos e frequências ópticas afastadas da frequência de ressonância do material, exige que a polarização \vec{P} da luz na fibra óptica que é induzida por dipolos elétricos e dada pela equação (3.6), pode ser representada em série de potências crescentes do campo elétrico \vec{E} como [26, 27]:

$$\vec{P} = \epsilon_0 \sum_n X^{(j)} E^{(j)} \quad (3.12)$$

Sendo ε_0 a permissividade do vácuo e $X^{(j)}$, é a susceptibilidade de ordem j do meio, onde $j = 1, 2, \dots, j$.

A validade da equação (3.18) só é garantida se as respostas lineares e não lineares da fibra sejam locais e que originam uma refração não linear, em que o índice de refração é dependente da intensidade efetiva do pulso de luz I , dada por [2]:

$$I = \frac{P}{A_{ef}} \quad (3.13)$$

A qual é responsável pela maioria dos efeitos não lineares. O índice de refração n que é dado por [2]:

$$n = n_0 + n_2 \frac{P}{A_{ef}} \quad (3.13)$$

Em que n_0 é o índice de refração ordinário do material, e n_2 o índice de refração não linear, e o P é a potência óptica contida no pulso em *Watts* no interior da fibra. Para fibras de sílica o valor numérico do o índice de refração não linear é $n_2 = 2,6 \times 10^{-20} m^2/W$ podendo variar com os dopantes utilizados no núcleo [1]. E A_{ef} é a área efetiva da fibra que é calculada a partir de integrais de sobreposição dos modos, a qual está próxima da área real do núcleo [2], sendo definida por [28]:

$$A_{ef} = \frac{[\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |F(x, y)|^2 dx dy]^2}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |F(x, y)|^4 dx dy} \quad (3.14)$$

Onde $|F(x, y)|$ representa a distribuição transversal do campo elétrico em função x e y .

As não linearidades ópticas incluem: Espalhamento Ramam Estimulado (SRS - *Stimulated Ramam Scatering*), Espalhamento *Brillouin* Estimulado (SBS - *Stimulated Brillouin*

Scattering) e o Efeito *Kerr*. A tabela 3.1 resume esses efeitos e mostra que independem do número de canais WDM.

Diversas pesquisas foram realizadas com o propósito de se conhecer e utilizar os efeitos não lineares, contudo para este trabalho serão apresentados somente os efeitos não lineares quanto ao índice de refração do meio guiado, por isso qualquer menção aos efeitos não lineares daqui em diante será associada aos efeitos *Kerr*: Automodulação de Fase (*Self Phase Modulation - SPM*), Modulação de Fase Cruzada (*Cross Phase Modulation - XPM*) e Mistura de Quatro Ondas (*Four Wave Mixing - FWM*).

Pela equação (3.13) pode-se afirmar que a intensidade do sinal de entrada induz o aumento do índice de refração do material. E que $2n$ é o responsável pela não linearidade Kerr.

3.2 MECANISMO DE PERDAS DE SINAL EM FIBRÁS ÓPTICAS

Os mecanismos de perdas de sinal em fibras ópticas, também denominados como fatores limitantes na propagação do pulso em fibras ópticas são divididos em fenômenos lineares e não lineares. Os fenômenos lineares são a atenuação (que determina o número de repetidores/amplificadores colocados entre o transmissor e o receptor em um link óptico), ou seja, a perda de potência e intensidade do sinal; e a dispersão, que é o alargamento do pulso. Por sua vez, os efeitos não lineares ocorrem principalmente nos sistemas WDM, cujo resultado é a impossibilidade de recuperação da informação no receptor. [15] [16].

3.2.1 Atenuação

A perda de sinal em uma fibra óptica, ou Atenuação, ocorre quando há a diminuição da intensidade de energia de um sinal quando este se propaga através de um meio, isto é, as perdas que ocorrem na transmissão do feixe de luz, variando de acordo com o comprimento de onda luz utilizada e que afeta o alcance máximo da transmissão do sinal luminoso.

Essa atenuação é a soma de várias perdas ligadas ao material que é empregado na fabricação da fibra e à estrutura do guia de onda. A atenuação experimentada pelos sinais

luminosos propagados através de uma fibra óptica é uma característica fundamental para a determinação da distância máxima entre um transmissor e um receptor óptico [13].

Portanto, a atenuação dificulta a detecção do sinal, limitando o comprimento dos enlaces ópticos, e varia com o comprimento de onda da luz propagante (Figura 3.1), com mínimo de perdas em torno de 1550 nm [15].

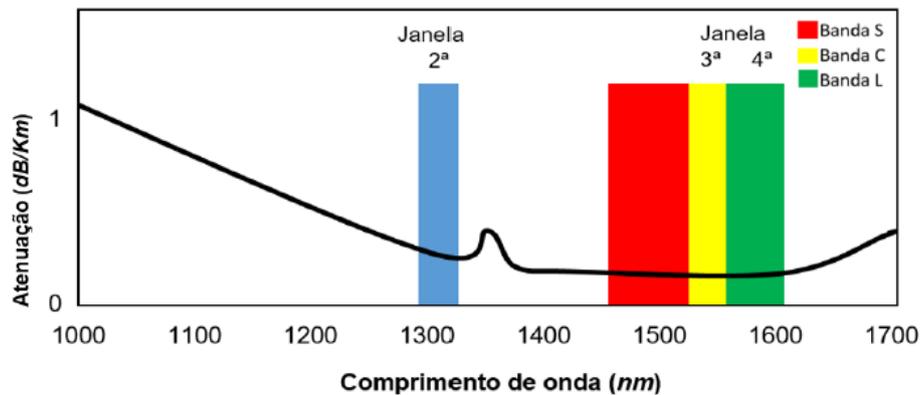


Figura 3.1: A atenuação em fibra óptica [15].

Ao se considerar os comprimentos de onda, a Figura 3.2 mostra a ocorrência da atenuação em fibras monomodo e multimodo.

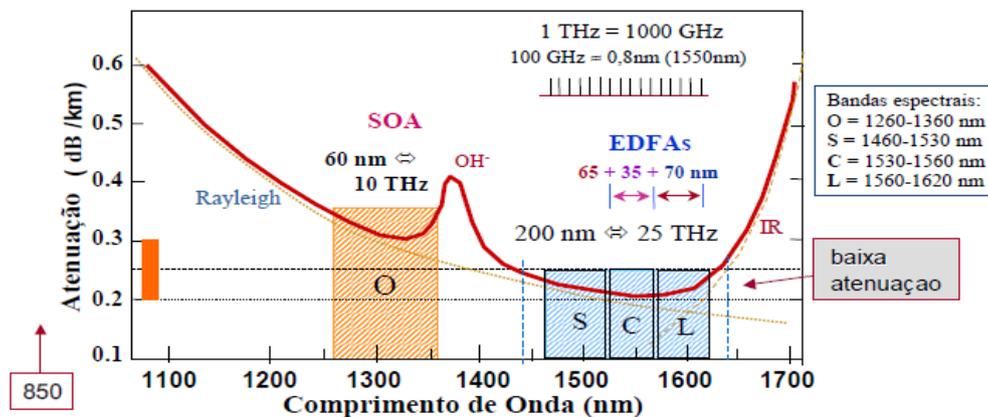


Figura 3.2: Atenuação em Fibras Monomodo e Multimodo [14].

A atenuação é definida como a relação da potência óptica em sua saída em relação à potência de entrada, que aponta a distância máxima requerida para a regeneração e à amplificação do sinal.[16]

A medida total das perdas ocorridas na fibra óptica são medidas em dB/km (decibéis por quilômetro) e é expressa pela seguinte equação:

$$\alpha_{dB} = \frac{-10 \log_{10} \left(\frac{P_t}{P_i} \right)}{L} = 4,343\alpha \quad (3.15)$$

As perdas de transmissão são avaliadas pelo valor da atenuação que o link oferece entre a potência de saída do sinal em relação à potência de entrada. Dessa forma, a atenuação de uma fibra óptica costuma ser definida em termos da relação da potência luminosa na entrada da fibra e da potência luminosa na sua saída [13].

No dimensionamento de um sistema óptico, além das perdas introduzidas pela atenuação da fibra óptica, devem ser consideradas também as perdas causadas nas emendas e conexões entre segmentos de fibras e no acoplamento das fibras com as fontes e detectores luminosos [13].

O coeficiente de atenuação depende do comprimento de onda e de vários fenômenos físicos, os quais determinam a distância máxima, como por exemplo, entre o transmissor, amplificador de linha e receptor.

As causas principais para a ocorrência da atenuação em um sinal óptico são: (1) absorção material, que ocorre em vista de eventuais impurezas contidas nos materiais utilizados; e (2) espalhamento Rayleigh, que ocorre em virtude de movimentos aleatórios das moléculas da sílica fundida e que resultam em flutuações aleatórias do índice de refração da fibra quando da propagação do sinal óptico [15].

3.2.2 Dispersão

A dispersão é o fenômeno de alargamento do pulso que ocorre em virtude da ocorrência de anormalidades na composição do material fibroso, especialmente impurezas, ou ainda em decorrência de eventual heterogeneidade pontual no índice de refração [16].

É uma característica de transmissão que exprime o alargamento dos pulsos transmitidos em uma fibra óptica. A dispersão em uma fibra óptica está associada ao fato de que os modos de propagação são transmitidos através da fibra óptica com velocidades diferentes, resultado dos diferentes atrasos de propagação dos modos que transportam a energia luminosa, tendo por

efeito a distorção dos sinais transmitidos, impondo uma limitação na sua capacidade de transmissão [13].

Esse alargamento dos pulsos determina a largura de banda da fibra óptica e está relacionado à capacidade de transmissão de informação das fibras. A dispersão permite caracterizar a capacidade de transmissão de uma fibra óptica expressa pela taxa de transmissão (em Bps) ou pela banda passante (em Hz) [13].

Portanto, a dispersão pode ser definida como o fenômeno que causa atrasos na propagação de campos eletromagnéticos (EM) e, nesse sentido, a dispersão é um dos fatores limitantes para os sistemas de fibra óptica (Figura 3.3) [15] [17].



Figura 3.3: Dispersão em fibra óptica [15].

1- **Dispersão modal:** é a maior fonte de atraso nas fibras multimodo, ocorrendo quando diferentes modos de propagação apresentam diferentes caminhos óticos e, conseqüentemente, com diferentes atrasos de sinal;

Equação que representa a dispersão modal:

Parâmetro V , frequência normalizada:

$$V = \left[\frac{\pi d}{\lambda} \right] \sqrt{n_{n2} - n_{c2}} \approx \left[\frac{\pi d}{\lambda} \right] n_{c2} \sqrt{2 \Delta} \quad (3.16)$$

onde, d é o diâmetro do núcleo, n_n é índice do núcleo, n_c é índice da casca, aproximação válida pra Δ pequeno; $\Delta \approx 0,01-0,02$. O parâmetro Δ é muito usado pelos fabricantes de fibra para especificar abertura numérica e dispersão modal.

$$AN = n_c \sqrt{2 \Delta} \quad (3.17)$$

Parâmetro b , const. propagação:

$$b = \left(\frac{n_m - n_c}{n_n - n_c} \right) \quad (3.18)$$

onde n_m é o índice modal (índice efetivo percebido pelo modo m). Na fibra de índice degrau $n(r) = n_n = \text{cte.}$; nas fibras de índice gradual, $n(r) = n_n \cdot f(r)$ [quadrática];

2- **Dispersão cromática:** também conhecida como dispersão da velocidade de grupo (GVD), é a maior fonte de atraso nas fibras monomodo, caracterizando-se como a ocorrência de atraso que envolvem as várias componentes espectrais do pulso ou do sinal propagante. A dispersão cromática é representada pela seguinte equação:

$$D = D_m + D_{go} \text{ [ps/nm/km]} \quad (3.19)$$

A dispersão cromática pode ser dividida em:

- a) **Dispersão de guia de onda:** as componentes espectrais sofrem uma pequena variação de propagação, quando no modo fundamental:

$$D_{go} = \left(\frac{-1}{2\pi c} \right) V^2 d^2 \left(\frac{b}{dV^2} \right) \quad (3.20)$$

- b) **Dispersão material:** é a maior fonte de atraso nas fibras monomodo, quando em regime linear:

$$D_{mat} = \left(\frac{1}{C} \right) \left(\frac{dn}{d\lambda} \right) \quad (3.21)$$

3- **Dispersão dos modos de polarização (PMD):** é a variação de velocidade de propagação das componentes ortogonais de polarização (x e y, propagação z). Ocorre em fibras monomodo de altas taxas de transmissão (acima de 2,5 Gb/s) e longas distâncias, especialmente quando se tem enlaces com mecanismos de compensação da dispersão GVD.

A dispersão intermodal não é um problema significativo nos sistemas de fibra monomodo, pois está ausente. Porém, no entanto, o PMD é a principal causa que limita a utilização da largura de banda em uma transmissão por fibra óptica. Essa dispersão é o principal parâmetro que precisa ser compensado pela transmissão efetiva do sinal e a grade de Grade de Bragg (FBG) é uma das soluções para a compensação desta dispersão, mas apenas até um certo nível. A figura 3.4 ilustra a ideia por trás da técnica de compensação de dispersão, onde a fibra SMF é usada seguido pela DCF. O valor do coeficiente de dispersão β_2 é calculado em termos de β_1 (coeficiente de dispersão da SMF) de tal forma que, após uma certa distância, a primeira ordem total ou dispersão cromática deve ser zero.

Esse esquema de gerenciamento pode ser repetido em toda a extensão da distância total de transmissão. Um EDFA pode regenerar um sinal fraco, mas piora a dispersão devido os efeitos não lineares. Como o efeito de dispersão se acumula nos vários estágios do amplificador, mas das tarefas atuais de projeto do sistema de comunicação por fibra óptica é resolver o problema de dispersão de fibras, especialmente devido ao PMD.

Existem muitas técnicas demonstradas para a compensação de PMD no domínio óptico e no domínio elétrico. As estratégias iniciais para reduzir o PMD estavam focadas na redução do PMD intrínseco da fibra, alterando o processo de fabricação.

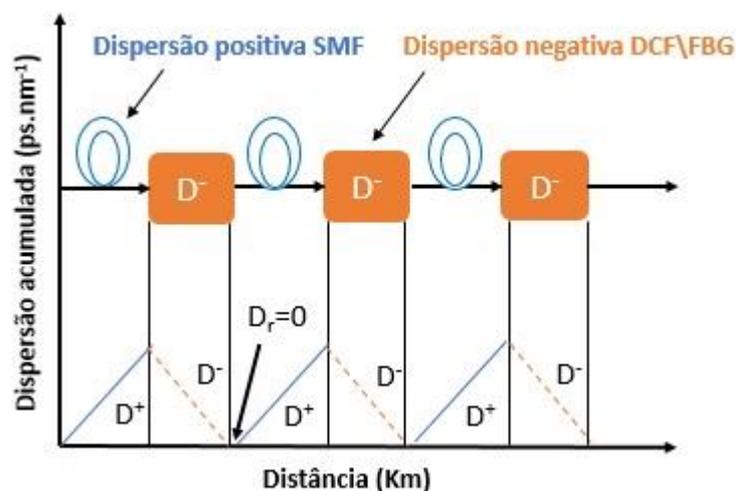


Figura 3.4: Mapa de gerenciamento de dispersão.

Existem dois tipos de dispersão, ou seja, dispersão positiva e dispersão negativa na fibra, e isso pode ser compensado colocando fibras DCF ou FBG com dispersão negativa. A medida que aumenta o tamanho da rede no sistema de transmissão a dispersão PMD fica positiva, com

a técnica de compensação com elementos compensadores de dispersão, como fibras DCF e FBG, é possível mapear e controlar a dispersão, pois no início de um destes elementos dispersivos, começa a ocorrer uma dispersão negativa até a seu término, tendo como resultante uma dispersão igual a zero ($D_r = 0$), logo em seguida o processo se repete de acordo com comprimento da fibra do sistema de telecomunicações.

3.3 EFEITOS NÃO LINEARES EM FIBRAS ÓPTICAS

Os efeitos não lineares referem-se a quando as fibras ópticas são submetidas a uma forte potência no seu campo eletromagnético, cujo resultado é a degradação do desempenho do sistema. Tais efeitos ocorrem principalmente nos sistemas WDM, cujo resultado é a impossibilidade de recuperação da informação no receptor e são classificados quanto ao índice e quanto ao espalhamento, conforme mostra a Tabela 3.1. [14] [15]

Tabela 3.1- Resumo de Efeitos não Lineares em Fibras Ópticas.

Tipo de Não Linearidade	Monocanal	Multicanal
Devido ao índice	SPM	XPM FWM
Devido ao espalhamento	SBS	SRS

Fonte: [14].

Os efeitos não lineares são também classificados em três grandes classes: dispersivos, absorptivos e paramétricos.[14]

1- **Efeitos dispersivos:** ligados ao $X^{(3)}$, com espalhamento não-linear (*non-linear scattering*) do campo elétrico, que é causado pelas vibrações moleculares da sílica da fibra, destacando-se dois efeitos:

- **Espalhamento Ramam Estimulado** (SRS - *Stimulated Ramam Scatering*): ocorre com fibra e amplificador;
- **Espalhamento Brillouin Estimulado** (SBS - *Stimulated Brillouin Scattering*): ocorre com fibra e amplificador.

2- **Efeitos absortivos:** possuem relação com o índice de refração não linear do meio guiado na fibra. Composto por SOA, laser. Os efeitos absortivos são associados aos efeitos *Kerr*:

- **Automodulação de Fase (SPM - Self Phase Modulation):** ocorre com fibra, amplificador e afeta o próprio canal;
- **Modulação de Fase Cruzada (XPM - Cross Phase Modulation):** ocorre com fibra, amplificador e cada canal afeta outros canais.
- **Modulação de Ganho Cruzado (XGM - Cross-Gain Modulation):** formado por laser e SOA, em que a potência de um canal A pode ser usada para modular o ganho em outro canal B; e um sinal de Onda Contínua (CW)-A pode ser modulado por outro sinal B, em outra frequência (λ_A ; λ_B).
- **Transparência Auto Induzida:** conseguindo implementar o Sólitons por meio dos efeitos na fibra e no amplificador.

3- **Efeitos paramétricos:** resultam da ligação com o $X^{(3)}$ e n_2 , espalhamento não linear, ocorrem em tudo; são relacionados aos efeitos *Kerr*:

- **Mistura de Quatro Ondas (FWM - Four Wave Mixing):** ocorre com laser, fibra, amplificador, SOA.

3.3.1 Automodulação de Fase (SPM)

Trata-se de um efeito não linear que ocorre somente na fibra óptica monocanal e que se refere ao deslocamento de fase auto-induzido e no qual diferentes partes do pulso apresentam diferentes mudanças de fase, limitando o desempenho do sistema ao longo do comprimento da fibra óptica [14].

A automodulação de fase (SPM), também denominada de *chirping* (gorjeio), é o alargamento do espectro do pulso no domínio da frequência, mantendo a forma temporal, cuja ocorrência depende da intensidade da potência que incide sobre o índice de refração e do coeficiente de não linearidade da fibra[15].

A automodulação de fase (SPM) é determinada por [15]:

$$\phi_{NL} = 2\pi\lambda n_2 |E|^2 \quad (3.22)$$

onde n é o índice de refração, L é o comprimento da fibra, λ é o comprimento de onda do pulso e $|E|$ o módulo do campo elétrico.

O efeito SPM é demonstrado na Figura 3.4.

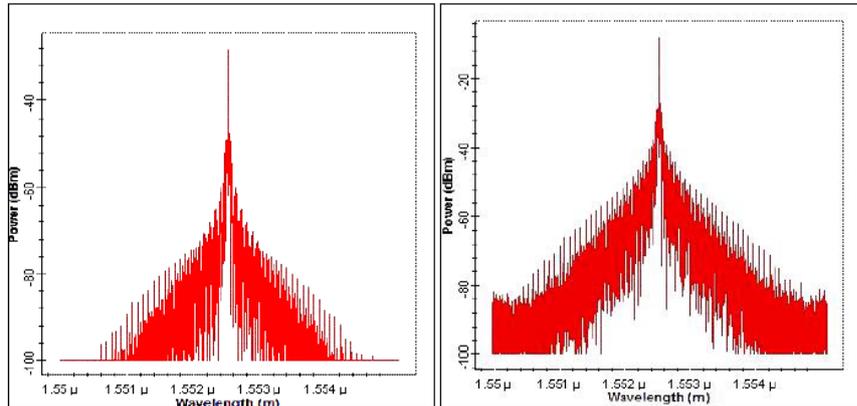


Figura 3.5: Efeito SPM [15].

Comparativamente, a figura acima mostra à esquerda o sinal na saída do receptor e à direita a propagação do pulso em uma SMF de 100 Km a uma potência de entrada de 16 dBm, observando-se a ocorrência de um considerado alargamento suplementar do pulso, o que demonstra a relação entre o efeito de SPM com o aumento da potência de entrada, cujo efeito é o comprometimento do desempenho do sistema [14].

3.3.2 Modulação Cruzada de Fase (XPM)

Na Modulação Cruzada de Fase (XPM) ocorre variação do índice de refração do material semiconductor, que é causada pelo sinal óptico de entrada, cujo resultado é a variação dos portadores do mesmo e que é percebida como uma modulação de fase por um sinal de bombeio CW que é injetado no SOA [14].

O efeito de XPM (Figura 3.5) pode apresentar como resultado sérios problemas nos sistemas de telecomunicações por fibra óptica, principalmente nos WDM ultradensos, com

taxas de bits de 2,5 ou 10 Gb/s e com espaçamento entre canais menor ou igual a 2,5 GHz e também nos sistemas de detecção coerente [18].

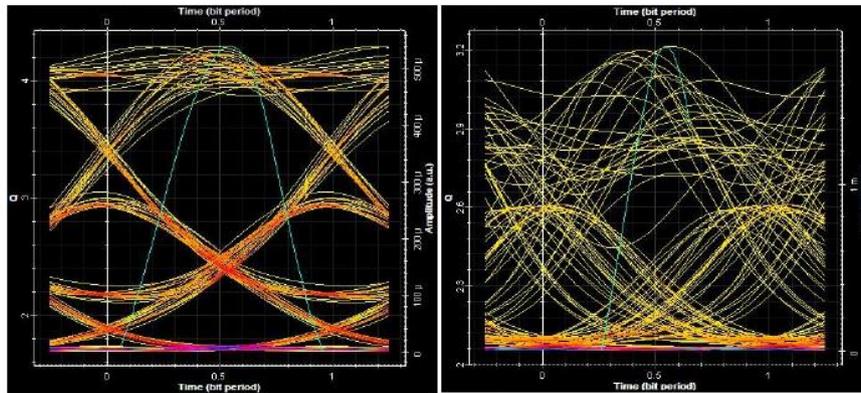


Figura 3.6: Efeito da Modulação Cruzada de Fase (XPM).

No efeito de XPM o desvio de fase depende não apenas da potência do próprio canal, mas também da potência dos outros canais existentes no sistema, ou seja, a XPM vem sempre acompanhada da SPM [2, 11]. Dessa forma, o campo elétrico total de dois campos ópticos com frequências (ω_1) e (ω_2) linearmente polarizado ao longo de x e propagando-se na mesma fibra pode ser expresso por [18]:

$$\phi_{NL} = mk_0L(|E_1|^2 + |E_2|^2) \quad (3.23)$$

O efeito de XPM é semelhante ao de SPM, porém só ocorre quando há dois ou mais sinais ópticos com comprimentos de ondas diferentes se propagando simultaneamente em uma mesma fibra óptica, como em sistemas WDMs [15].

3.3.3 Mistura de Quatro Ondas (FWM)

A Mistura de Quatro Ondas (FWM) é um tipo de efeito não linear que ocorre em fibra multicanal, permitindo que dois, três ou mais sinais sejam transmitidos na mesma direção,

realizando o processo semelhante ao paramétrico, que realiza a interferência de diferentes frequências com as frequências originais (Figura 3.6).

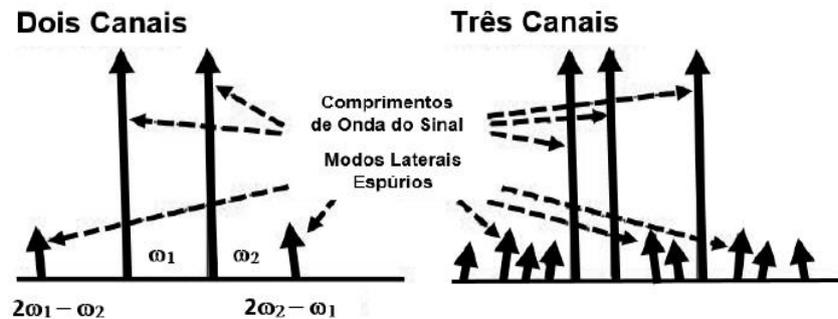


Figura 3.7: Mistura de Quatro Ondas (FWM) em um sistema WDM.

Os resultados do efeito FWM são novos sinais em comprimentos de onda espaçados nos mesmos intervalos, ou seja, novos produtos espectrais, ondas parasitas conhecidas como bandas laterais em $(2\omega_1 - \omega_2)$ e $(2\omega_2 - \omega_1)$, por meio do sinal de mistura, observando-se que tais bandas reduzem a força do sinal quando estes se misturam [14] [15].

Um dos sérios problemas causados pelo efeito da Mistura de Quatro Ondas (FWM) é denominado de crosstalk (diafonia grave), que é classificado em dois tipos: [18]

- **Crosstalk Heteródino:** interferências que ocorrem de forma inter-canal, ou seja, fora da largura de banda do canal, cuja consequência é o aumento da BER e a redução do fator de qualidade;

- **Crosstalk Homódino:** interferências de forma intracanal, ou seja, que ocorrem dentro da largura de banda do canal.

3.4 MÉTODO DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA

O método mais eficiente para a resolução dos problemas de propagação do pulso em meios não lineares e dispersivos é o Método de Passo Alternado de Fourier (*Split-Step Fourier*

Method - SSFM). A equação não linear de Schrödinger, a qual foi apresentada na seção 3.1.2 é a que melhor representa a deformação da sequência de bits ópticos durante a transmissão do sinal em uma fibra óptica e a solução da mesma é feita por meio do método SSF [1] este método foi aplicado para este fim em 1973 [29] e de lá para cá vem sendo utilizado em diversos problemas ópticos, como a propagação de ondas atmosféricas, fibras ópticas, lasers, ressoadores e acopladores.

A partir do SSFM a fibra óptica é dividida em pequenos pedaços δz em que a dispersão e a não linearidade da fibra são considerados estatisticamente independentes uma da outra. Assim a equação (3.10) é escrita de maneira formal [30]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} = (\widehat{D} + \widehat{N})A \quad (3.24)$$

Onde \widehat{D} é um operador diferencial que corresponde a dispersão e a atenuação em um meio não linear e \widehat{N} é um operador não linear descrevendo os fenômenos não lineares na propagação dos pulsos dados pelas relações [29]:

$$\widehat{D} = -\frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\alpha}{2}, \quad (3.25)$$

dependendo das condições de sua dispersão, e

$$\widehat{N} = i\gamma|A|^2, \quad (3.26)$$

Uma solução aproximada é dada por:

$$A(z + h, t) = e^{h\widehat{D}} e^{h\widehat{N}} A(z, t) \quad (3.27)$$

Esta solução está relacionada diretamente a abordagem prática de modernos sistemas de ondas luminosas [1], isto pode ser feito por meio de técnicas de simulações numéricas, as quais podem mostrar que os efeitos não lineares resultam em sérios problemas para os sistemas de telecomunicações reais. Assim todos os sistemas modernos de comunicações ópticas podem ser

projetados por simulações numéricas pelos diversos pacotes de softwares comerciais 55 disponíveis [1]. Projetos assistidos por computador têm sido implementados com sucesso na solução desses problemas, pois permitem otimizar diversos parâmetros, como: área efetiva da fibra, comprimento, coeficientes de atenuação e de dispersão, taxa de bits do sistema, como também a velocidade da sequência de bits entre outros.

3.4.1 Software Optisystem

É um simulador de sistemas de comunicações ópticas desenvolvido pela empresa canadense *Optiwave Corporation*, que possibilita a criação de projetos, testa e otimiza praticamente qualquer tipo de conexão visual de camada física, desde o projeto, teste e otimização até a transmissão de vídeo analógica. Geralmente, é um simulador baseado em modelagem realista de comunicação por fibra óptica. Tem um poderoso ambiente de simulação e uma ampla gama de componentes e sistemas. A interface gráfica é interativa, fácil de usar e manipular o layout visual e a topologia de rede, sistemas, componentes e apresentação gráfica. Conta com uma extensa biblioteca de componentes (elementos ativos e passivos) inclui parâmetros dependentes de comprimento de onda realistas. Esses parâmetros são usados para investigar o efeito de cada dispositivo separadamente no desempenho de todo o sistema [31].

Além disso inclui instrumentos para a visualização dos resultados como analisador do espectro óptico e elétrico, osciloscópio, visualizador da taxa de erro de bit, medidor de potência, visualizador de diagrama de constelação e muito mais, pois a cada nova versão outros recursos são incorporados, com o propósito de acompanhar as tendências atuais, conforme figura 3.8.

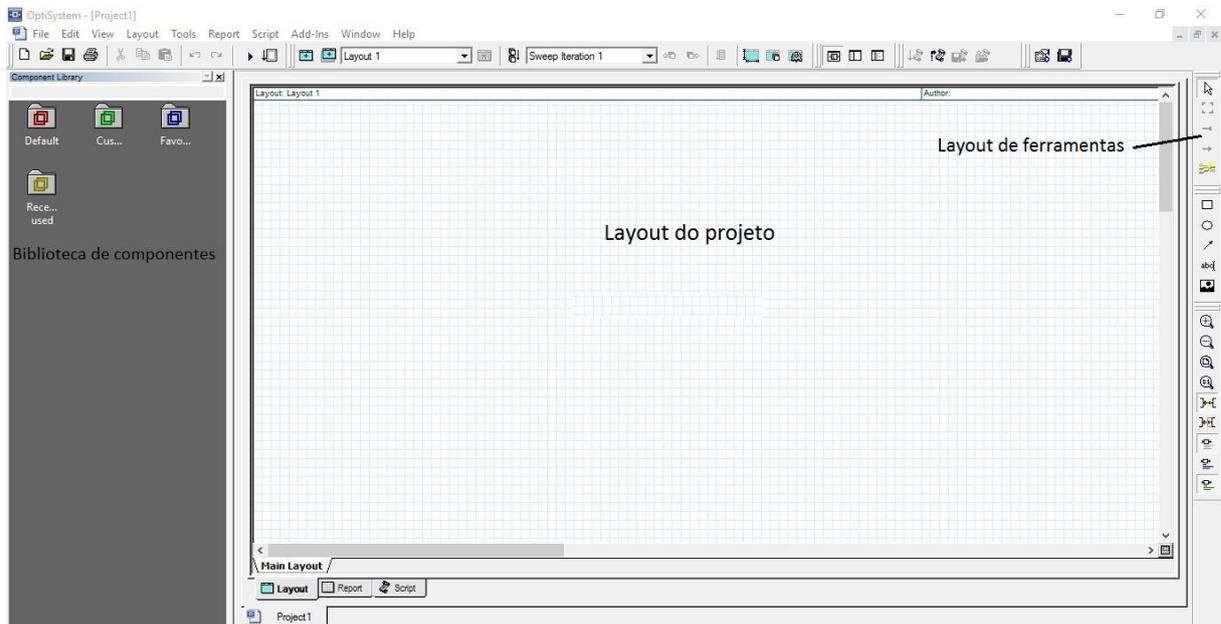


Figura 3.8: Interface do software Optisystem.

O Optisystem possui as principais características:

Biblioteca: para ser totalmente eficaz, as métricas devem ser capazes de reproduzir o comportamento real do dispositivo com precisão e eficiência. A biblioteca inclui centenas de componentes, todos validados para fornecer resultados comparáveis aos aplicativos do mundo real, **Medição de peças de montagem:** o *OptiSystem* permite gerenciar parâmetros que podem ser medidos em dispositivos reais. Também incorpora equipamentos de teste de diferentes fornecedores, **Representação de sinal misto:** ele pode lidar com formatos de sinais mistos, ou seja, sinais elétricos e ópticos juntos. Calcula os sinais usando os algoritmos apropriados associados com a eficácia e precisão da simulação, **Qualidade da funcionalidade do algoritmo:** para prever a operação do sistema, ele calcula parâmetros, como BER e Fator Q, usando análise numérica ou técnicas semi analíticas para sistemas que estão interferindo e produzindo ruído, **Ferramentas para visualização avançada:** essas ferramentas de visualização produzem espectros OSA, diagramas de olho, estados de polarização, diagramas de constelação. Também incluem ferramentas de análise WDM, mostrando potência de sinal, ganho, fator de ruído e sinal óptico em relação com ruído OSNR por canal, Biblioteca de Componentes Layout do Projeto Layout de Ferramentas, **Monitor de dados:** ele pode selecionar pedaços de dados para fazer backup e anexar um monitor após a simulação, isso

permite que os dados sejam processados após a simulação sem precisar recalculá-los. Você também pode conectar um número de monitor arbitrário à mesma porta, **Simulação hierárquica com subsistemas:** Sendo uma ferramenta de modelagem flexível e adaptativa, é necessário fornecer modelos em diferentes níveis de remoção, incluindo níveis de sistema, subsistema e dados. O *OptiSystem* possui uma definição de componente verdadeiramente hierárquica e de última geração, ferramentas de software especificamente usadas para componentes de fibra óptica que permitem que a simulação seja tão detalhada quanto você desejar. **Itens definidos pelo usuário:** Pode adicionar novos elementos e subsistemas baseados em bibliotecas e subsistemas definidos pelo usuário, ou usar co-simulação com outras ferramentas, **Vários arranjos:** pode criar vários designs que usam o mesmo arquivo de projeto e também permite criar e modificar designs de maneira rápida e eficiente. Cada arquivo de projeto pode conter várias versões de rascunho. As versões de design são contadas separadamente, mas o cálculo dos resultados pode ser combinado em diferentes versões, levando em consideração a comparação de diferentes designs, **Referências:** um relatório totalmente personalizado permite ver cada conjunto de parâmetros e resultados. Os relatórios resultantes são organizados em planilhas legíveis, textos, gráficos 2D e 3D. Isso também inclui extrair o modelo HTML, **Parâmetros e otimizações:** as simulações podem ser repetidas com uma variação dos parâmetros. O *OptiSystem* também pode otimizar parâmetros para minimizar ou maximizar qualquer resultado ou procurar resultados objetivos. Isso também nos dá a opção de combinar várias varreduras e otimizações de vários parâmetros e **Catálogos de materiais:** a tabela *OptiSystem* fornece uma análise de custo do sistema que está sendo projetado. Dados de custo podem ser exportados para outros aplicativos ou planilhas.

4 ANÁLISE DA DISPERSÃO PELOS MÉTODOS DE COMPENSAÇÃO

Redes ópticas WDM (multiplexação por divisão de comprimento de onda) revolucionaram a transmissão de dados no sistema de comunicação por causa de baixa perda, alta velocidade, melhor largura de banda e alto ganho [2]. Os amplificadores Ópticos são a muito importantes para rede óptica, pois eles amplificam diretamente o sinal sem passar através de processo eletrônico. Mas também amplifica os sinais que ocorrem devido às perdas de fibra e muitas outras fontes de ruído. Existem vários amplificadores como SOA (amplificador óptico de semicondutores), RAMAN e EDFA (amplificador de fibra dopada com érbio) etc.

O EDFA é o amplificador óptico mais utilizado, devido à sua alta capacidade e seu baixo poder de bombeio. Portanto, o comportamento do EDFA em uma rede WDM precisa ser estudado [22].

A fibra também sofre dispersão devido aos efeitos não lineares dos materiais, e banda cortada fibra e distância que o sinal propaga dentro da fibra. Então, devido a essas questões, a dispersão deve ser minimizada por alguns métodos. Instalação da DCF (*Dispersion Compensation Fiber*) é um dos métodos para compensar a dispersão devido ao SMF (*Fiber Single Mode*).

Para o tratamento da dispersão em fibras ópticas, existem três técnicas para a compensação da dispersão, são eles a Pré-Compensação, Pós-Compensação e a Compensação Mista (Simétrica) conforme figura 4.1

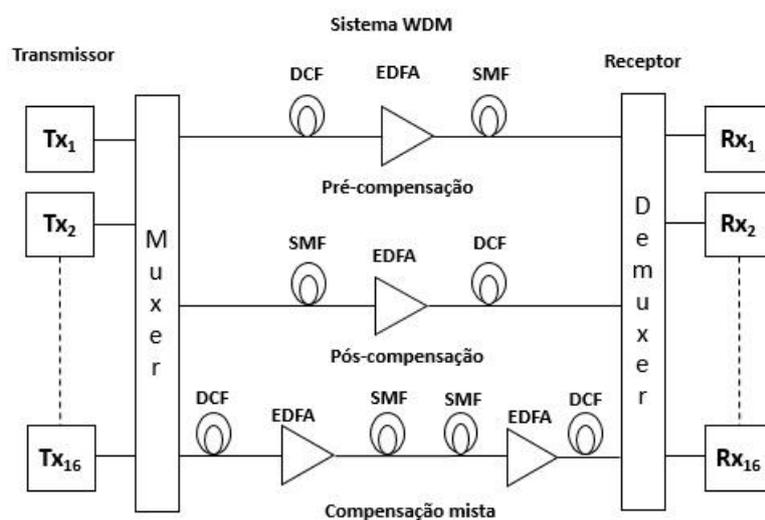


Figura 4.1: Sistema WDM de 16 canais utilizando as técnicas de compensação de dispersão (Pré-compensação, Pós-compensação e Compensação Mista).

4.1 PRÉ-COMPENSAÇÃO

O que difere um método de outro é o arranjo da rede óptica com relação à posição da fibra DCF em relação à fibra SMF e ao EDFA. No método de Pré-compensação, primeiramente a fibra DCF compensada pela dispersão é usada para dispersar o sinal óptico negativamente então este sinal é amplificado usando EDFA e então fibra monomodo (SMF) é usada para compensar a dispersão do sinal óptico.

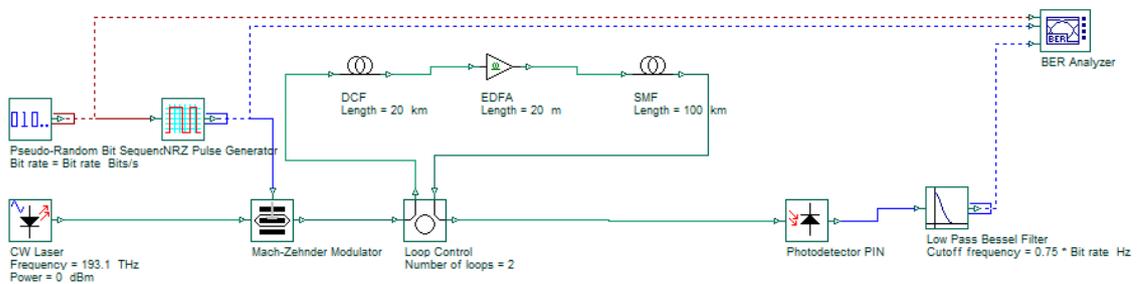


Figura 4.2: Esquema do método de Pré-compensação da dispersão.

4.2 PÓS-COMPENSAÇÃO

No método de Pós-compensação, primeiro a fibra de monomodo (SMF) é usada, o sinal é amplificado usando EDFA e, em seguida, fibra compensadora de dispersão (DCF) é usada para compensar a dispersão do sinal óptico.

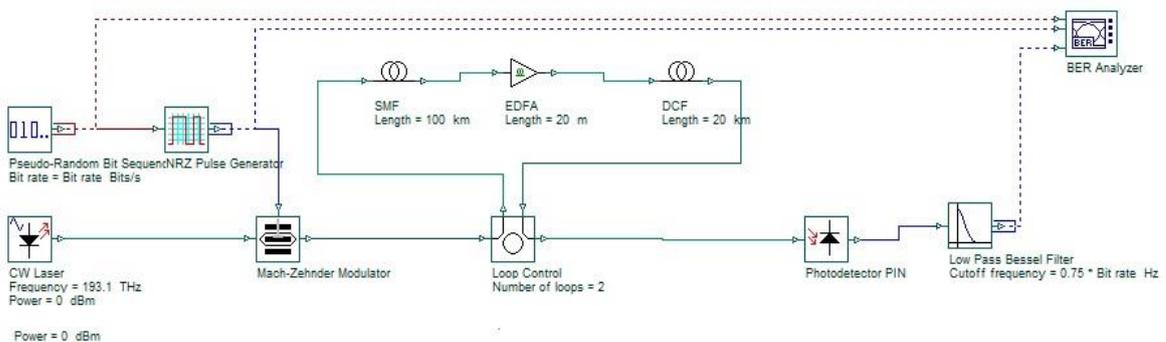


Figura 4.3: Esquema do método de Pós-compensação da dispersão.

4.3 COMPENSAÇÃO SIMÉTRICA (MISTA)

Neste método, basicamente é a combinação de ambos, isto é, Pré-compensação seguida de Pós-compensação é usada. Em primeiro lugar, o sinal é compensado negativamente usando a fibra compensadora de dispersão (DCF), depois passa através do par de fibras monomodo (SMF) e EDFA para amplificar o sinal e, finalmente, ao longo de todo o sinal, é compensada a dispersão usando a DCF.

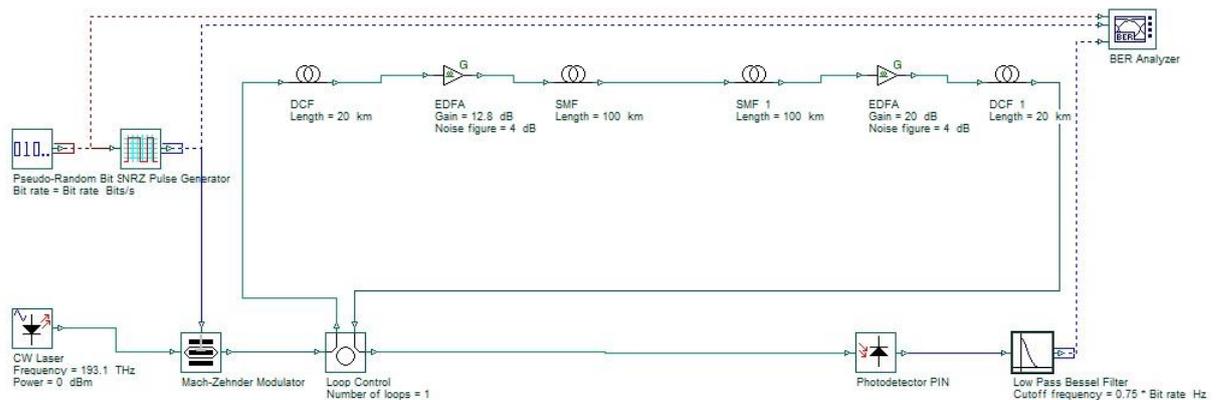


Figura 4.4: Esquema do método de compensação simétrica (mista) de dispersão.

4.4 ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DA COMPENSAÇÃO POR PÓS-DISPERSÃO NO SISTEMA DWDM-PON

Na transmissão de dados existem problemas de natureza física que comprometem o sinal transmitido, dentre eles destacamos dois: a Atenuação, que é a perda de potência do sinal no decorrer do percurso de transmissão e o outro é a Dispersão como já citado acima, que é um atraso na transmissão dos dados devido a um espalhamento que ocorre no pulso que também propaga-se em diferentes velocidades, causando deformações no sinal transmitido.

Aqui foi abordada o método de Pós-compensação, com a utilização da fibra compensadora de dispersão (DCF) que possui um coeficiente de dispersão negativo, na faixa de -70 a -90 ps/nm.km [2]. A DCF foi usada para compensar a dispersão positiva da fibra monomodo (SMF), além de reduzir a não-linearidade de Kerr e a emissão de ruído espontâneo (ASE) resultante da amplificação do sinal realizada pelo amplificador de fibra dopada com érbio (EDFA) [2].

4.4.1 Modelo de Simulação

O sistema WDM com 16 canais foi simulado através do software Optisystem 15.0 da empresa *Optiwave corporation*. Os sinais ópticos com formato de modulação Não Retorno ao Zero (NRZ) e com frequência variando de 193.1THz a 194.6THz, foram multiplexados pelo WDM Mux 16x1 e depois enviados para a SMF, posteriormente os sinais foram amplificados pelo EDFA que também inseriu ruídos indesejáveis de ASE. Antes de ser demultiplexado o sinal passou pela DCF, para a compensação de dispersão acumulada. E finalmente na seção de recepção o desempenho do sistema DWDM-PON foi analisado através do Fator de Qualidade (Q-Factor) e da taxa de erro de bit (BER) em função da variação da potência de entrada do sinal.

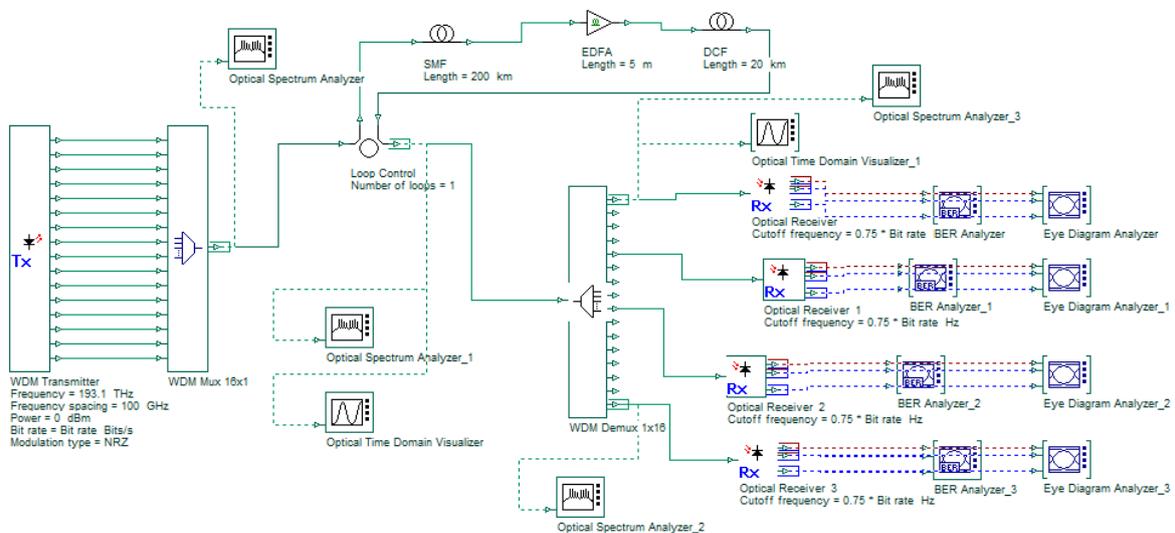


Figura 4.5: Diagrama de simulação de um sistema DWDM-PON com 16 canais.

Para o sinal de entrada foi utilizado uma faixa de potência de 0dBm a 10dBm, o EDFA com 5km de comprimento, o comprimento da fibra SMF foi de 100km, e a fibra DCF é de 20km. O comprimento da DCF foi determinado através da seguinte equação [11]:

$$L_{DCF} = L_{SMF} \left| \frac{D_{SMF}}{D_{DCF}} \right| \quad (4.1)$$

onde L_{DCF} e L_{SMF} são os comprimentos e D_{DCF} e D_{SMF} são os coeficientes de dispersão da DCF e da SMF respectivamente.

4.4.2 Método de Pós-compensação

A tabela abaixo mostra os dados das simulações com variação da potência de entrada com o Max. Q. Factor e o Min. BER com dois esquemas de simulação de Pós compensação de dispersão, um com compensação e outro sem compensação.

Tabela 4.1: Dados da simulação de dois esquemas WDM-PON.

Input Power (dBm)	Sem compensação		Com compensação	
	Max. Q. Factor	Min. BER	Max Q. Factor	Min. BER
0	3,81191	1	6,81516	10^{-8}
3	3,91409	1	10,5291	10^{-21}
5	4,01916	10^{-2}	16,1264	10^{-54}
7	4,18444	1	17,8773	10^{-67}
10	4,65384	10^{-1}	11,0917	10^{-24}

4.4.3 Resultados e discussões

Após as simulações obteve-se os seguintes resultados:

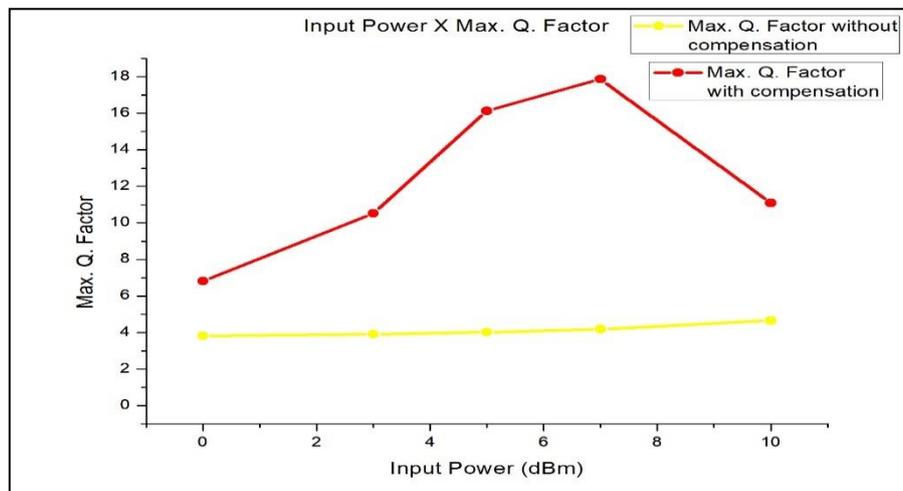


Figura 4.6. Max. Q. Factor com compensação e sem compensação de dispersão.

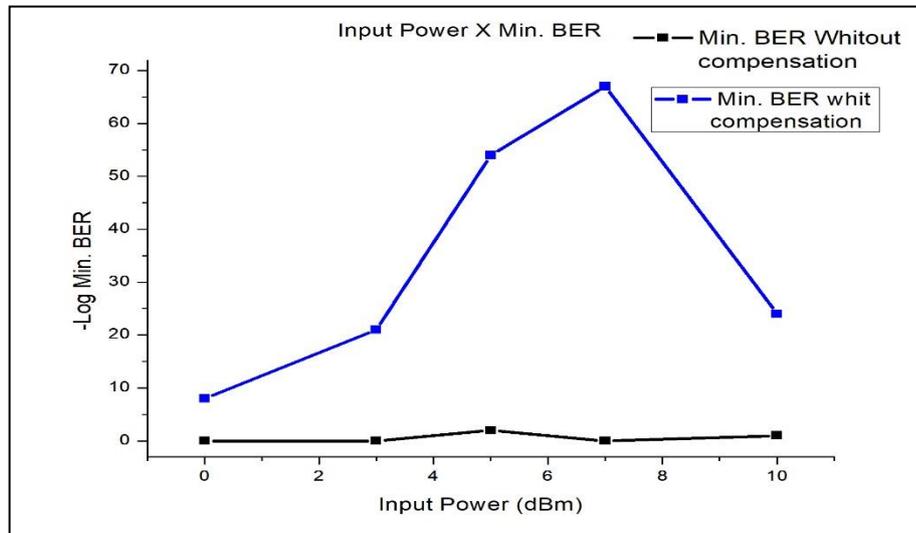
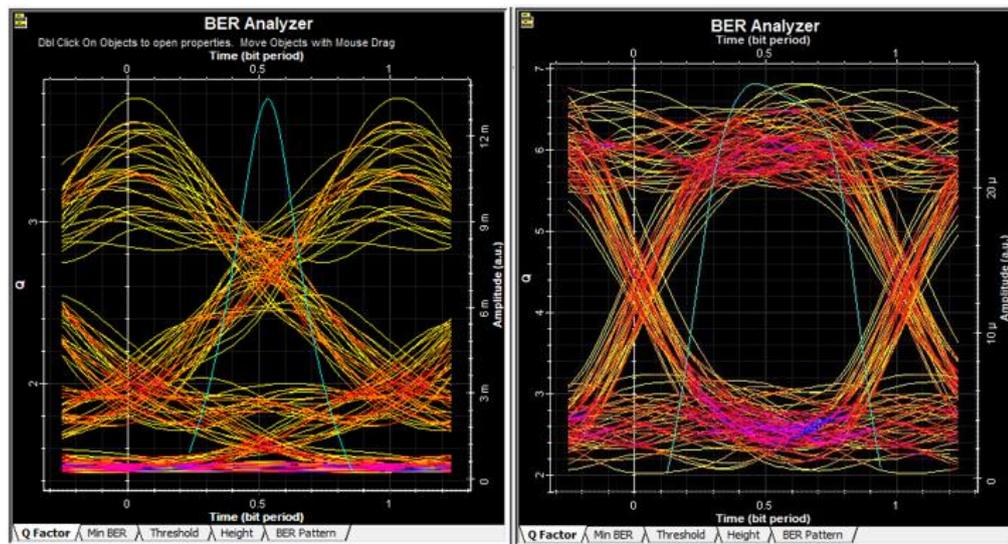


Figura 4.7. Min. Ber com compensação e sem compensação de dispersão.

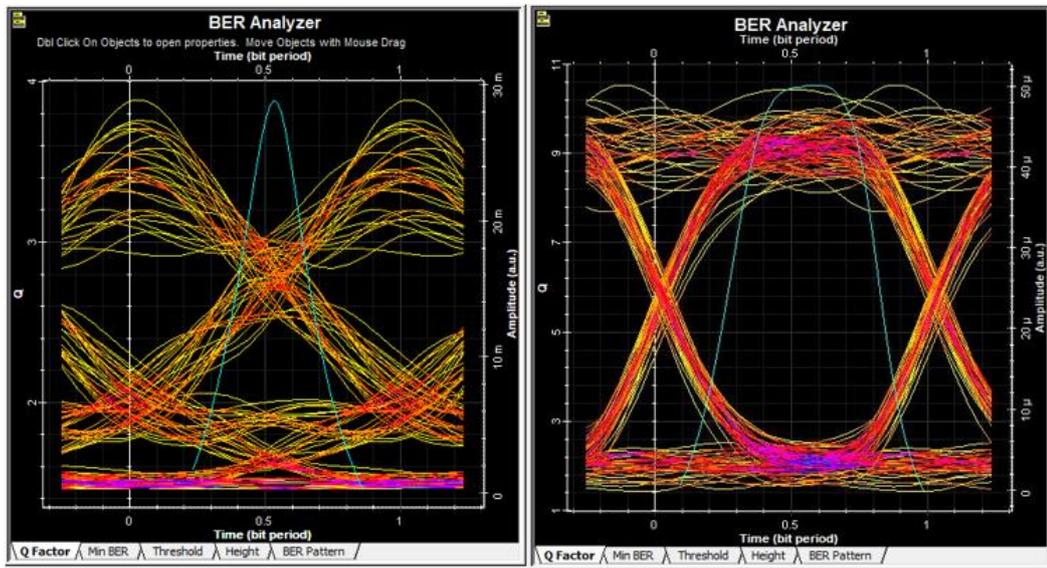
Nos gráficos das figuras 4.6 e 4.7, destacamos que, para o limite de potência de entrada de 7dBm, o sistema DWDM-PON com compensação de dispersão obteve um melhor resultado de desempenho com o Max. Fator Q igual a 17,8773 e mín. BER igual a 10^{-67} quando comparado ao sistema DWDM-PON sem compensação de dispersão com o valor de Max. Fator Q igual a 4,18444 e mín. BER 1, ou seja, ocorreu uma melhoria na qualidade da transmissão.



(a)

(b)

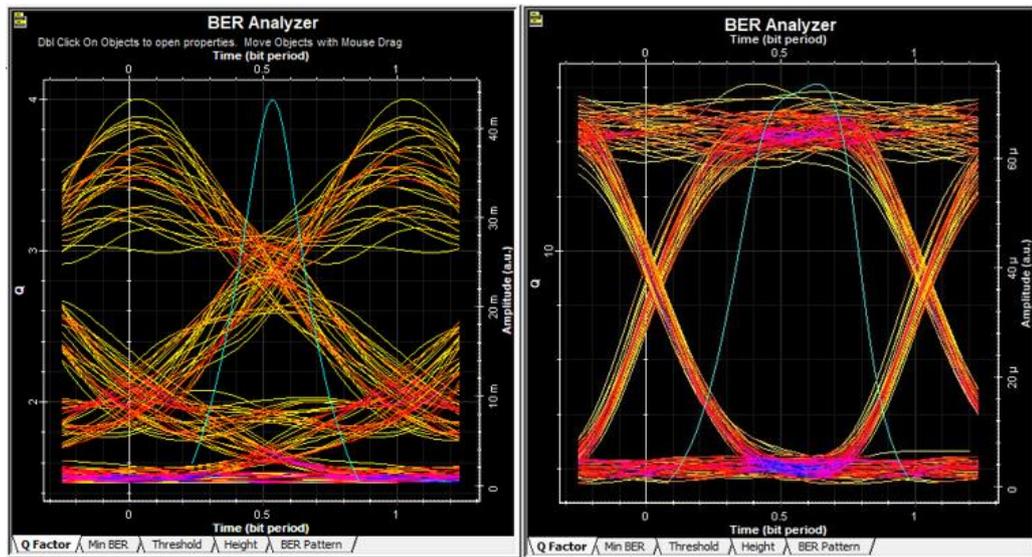
Figura 4.8. Diagramas de olho com a potência de entrada de 0 dBm (a) sem compensação e (b) com compensação de dispersão.



(a)

(b)

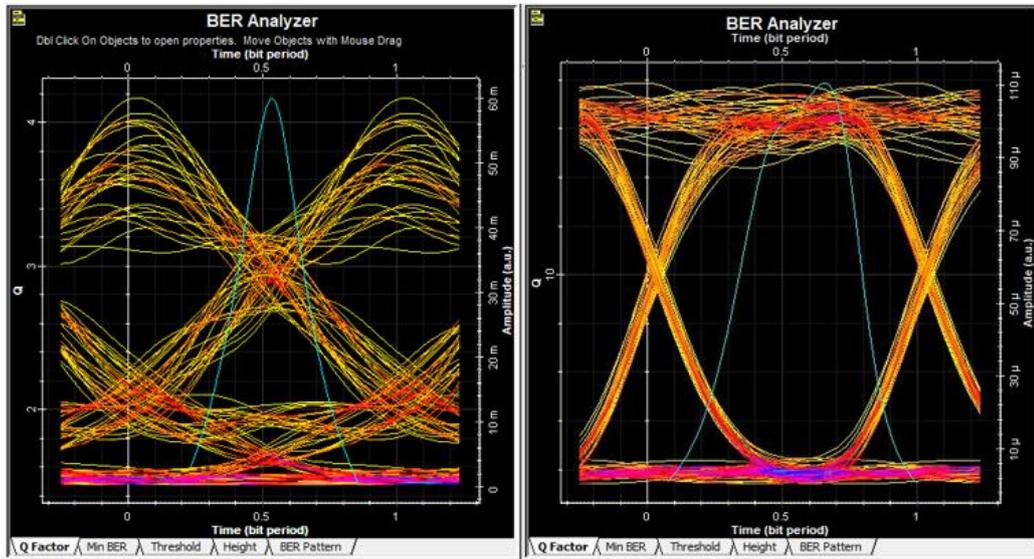
Figura 4.9. Diagramas de olho com a potência de entrada de 3 dBm (a) sem compensação e (b) com compensação de dispersão.



(a)

(b)

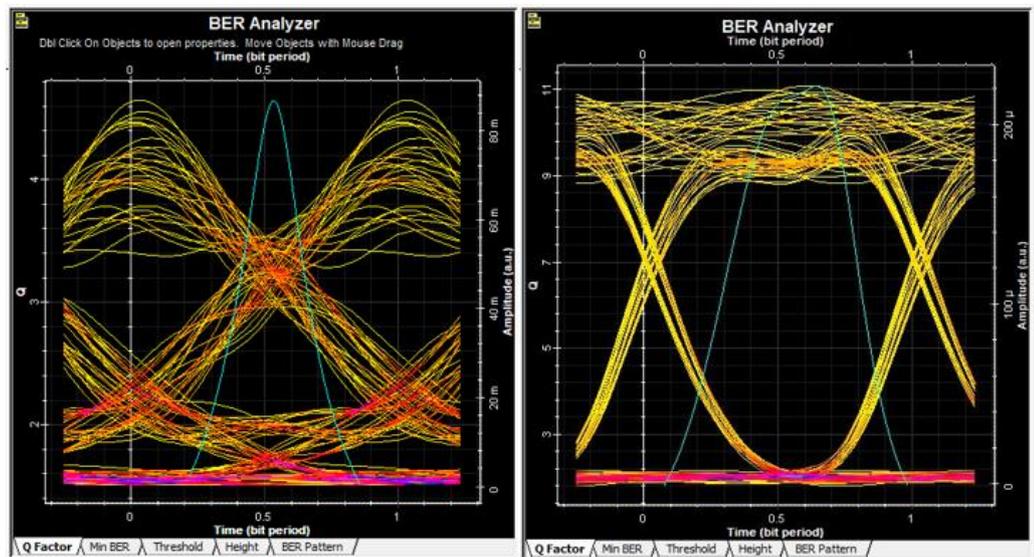
Figura 4.10. Diagramas de olho com a potência de entrada de 5 dBm (a) sem compensação e (b) com compensação de dispersão.



(a)

(b)

Figura 4.11. Diagramas de olho com a potência de entrada de 7 dBm (a) sem compensação e (b) com compensação de dispersão.



(a)

(b)

Figura 4.12 Diagramas de olho com a potência de entrada de 10 dBm (a) sem compensação e (b) com compensação de dispersão.

Isso também pode ser confirmado pelos diagramas de olho das figuras 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12, podemos observar que para o sistema DWDM-PON compensado houve uma melhoria satisfatória na relação sinal-ruído (SNR) e também uma excelente redução de dispersão para todos os valores de potência de entrada utilizados na simulação.

4.5 ANÁLISE DA COMPENSAÇÃO CROMÁTICA DA DISPERSÃO EM SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO ÓPTICA EM FIBRA

Nesta análise, foi realizada a compensação de dispersão através do software OptiSystem 15.0 em três configurações básicas [20]: Pós-compensação, Pré-compensação e compensação de mista (simétrica). As discussões e comparações dos dados foram baseadas em menor taxa de erro de bit (Min BER), fator Q máximo e OSNR em função da potência de entrada. Essas metodologias são discutidas aqui para compará-las e saber qual oferece o melhor desempenho.

4.5.1 Modelo de simulação

O projeto consiste em um sistema monomodo no qual o transmissor é composto por um laser CW operando a λ 1552.5 nm, um modulador Mach-Zehnder, um gerador de pulso RZ e um gerador de sequência de bits Pseudo-Aleatório com uma taxa de bits de 10 Gb/s. Uma SMF como elo principal com D_{SMF} de dispersão cromática igual a 17,8 ps/nm.km, comprimento L_{SMF} igual a 100 km, coeficiente de atenuação α igual a 0.17 dB/km, área efetiva A_{eff} igual a 80 μm^2 e uma dispersão S igual a 0.075 ps/nm²/km e uma DCF com D_{DCF} igual a -80 ps/nm.km, L_{DCF} igual a 22 km, α igual a 0.6 dB/km, A_{eff} igual a 30 μm^2 , S igual a 0.075 ps/nm²/km e PMD igual a 0.5 ps/km^{1/2}. EDFAs com ganhos iguais a 20 dB e 13 dB, ambos com Noise Figure NF iguais a 4 dB. O receptor é composto por um fotodetector PIN, um filtro passa baixo Bessel, responsável por remover o ruído do sinal elétrico e, finalmente, um analisador BER.

4.5.1.1 Os três métodos de compensação da Dispersão.

E, como mostrado na figura 4.13 na compensação mista (simétrica), o sinal é compensado negativamente pelo DCF, depois é amplificado pelo EDFA com ganho de 13 dB, passa por um par de SMF novamente e é amplificado por dois EDFAs, ambos com ganhos de 20 dB e finalmente a dispersão do sinal é compensada por outro DCF. Neste esquema foi usada o método de compensação de dispersão simétrica.

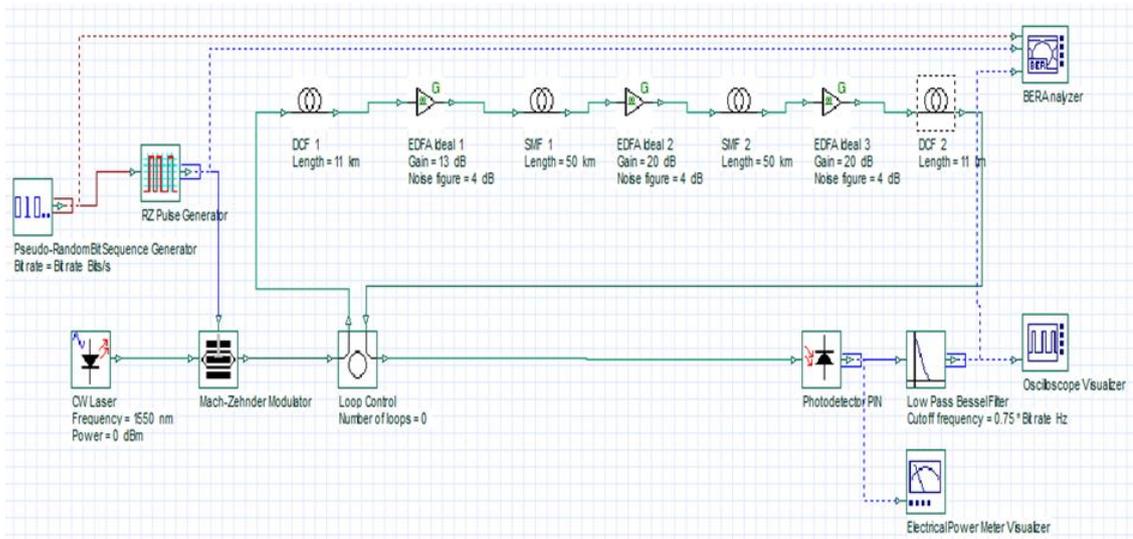


Figura 4.13. Esquema de compensação pelo método de dispersão mista (simétrica).

4.5.2 Resultados e discussões

Para a análise dos resultados, uma variação de potência de 0 a 25 dBm foi feita linearmente em etapas de 0,5 dBm em 50 interações de varredura.

Para a análise do desempenho dos três sistemas de compensação de dispersão, foram utilizados os valores do fator Q e do Min. BER para a potência de entrada de 0 dBm. Para a análise do desempenho dos três sistemas de compensação de dispersão, foram utilizados os valores do fator Q e do MIN BER para a potência de entrada de 0 dBm.

Pode ser visto na figura 4.14 que o valor do fator Q para o sistema de Pré-compensação foi igual a 24,4 e para a pós-compensação foi obtido o valor de 24,5. Enquanto para a compensação de mix foi de 31,8.

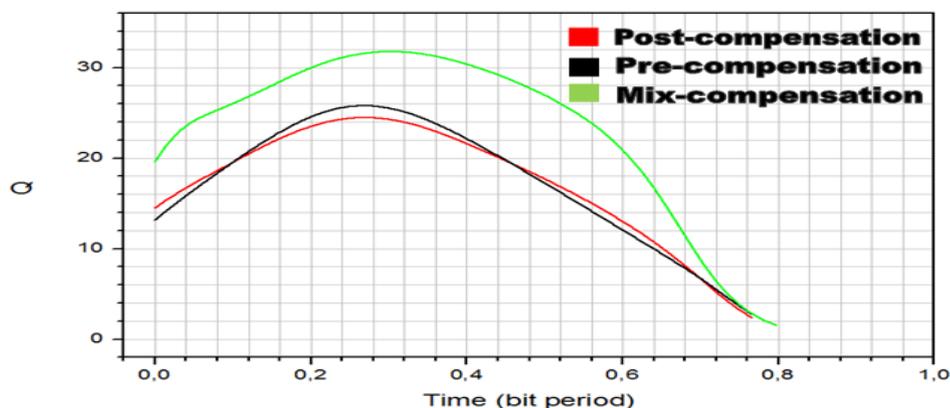


Figura 4.14. Desempenho dos três sistemas de compensação de dispersão pelo fator Q.

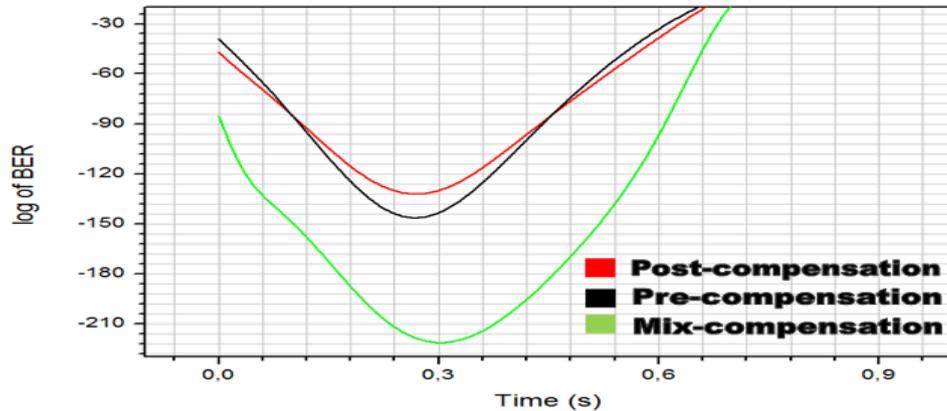


Figura 4.15. Desempenho dos três sistemas de compensação de dispersão pelo fator Q.

Na figura 4.15, os gráficos de registros do Min. BER mostram que, para o sistema de compensação de mista (simétrica), o Min. BER é igual a 4×10^{-222} , que é a menor taxa de erro de bit em comparação com a Pré-compensação com Min. BER igual a 3×10^{-132} e a Pós-compensação com Min. BER igual a 7×10^{-133} . Portanto, o sistema de compensação de simétrico (misto) ofereceu um fator de qualidade mais alto e uma menor taxa de erros de bits, apresentando, portanto, melhor desempenho que os sistemas de Pré e Pós-compensação.

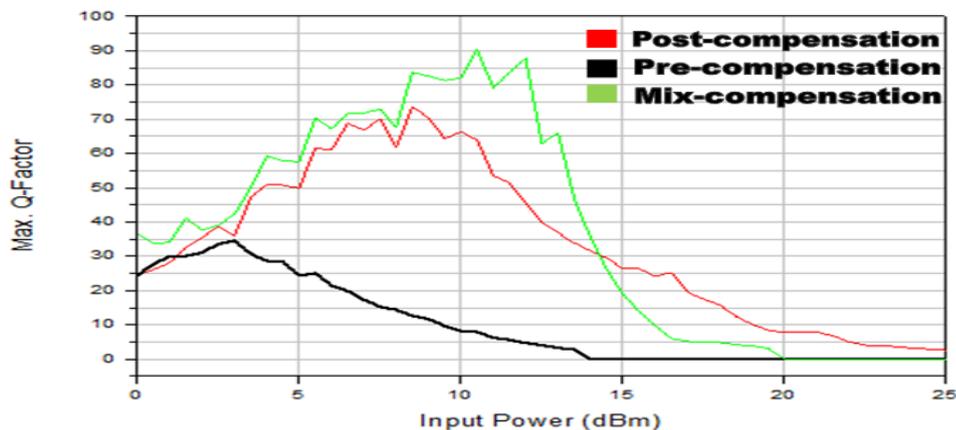


Figura 4.16. Potência de entrada versus Max. Fator de qualidade.

A Figura 4.16 mostra o resultado do fator Q máximo em função da potência de entrada da simulação dos três sistemas de compensação de dispersão. Pode ser visto na Figura 4 que o fator Q máximo igual a 90 e OSNR igual a 36 dB foram alcançados pelo sistema de compensação de mistura a uma potência de entrada de 10,5 dBm. Para o sistema de Pré-

compensação, o fator Q máximo é igual a 34,5 e OSNR igual a 28 dB e para a Pós-compensação o fator Q máximo é igual a 73,5 e OSNR igual a 34 para uma potência de entrada de 8,5 dB.

Os valores do fator Q diminuem para todos os três sistemas de compensação de dispersão logo após atingir o nível máximo atingindo 0 para o sistema de Pré-compensação e compensação de simétrica (mixta) quando a potência tende a 25 dBm. Isso ocorreu porque, à medida que o nível de energia aumentou, o valor OSNR diminuiu. Assim, o sinal foi degradado pelo efeito da modulação da fase, resultando em altas taxas de erros de bits.

4.6 ANÁLISE COMPARATIVA DE COMPENSAÇÃO DA DISPERSÃO EM SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO ÓPTICA COM FIBRAS COMPENSADORAS DE DISPERSÃO (DCF) E GRADE DE BRAGG EM FIBRA (FBG).

Nesta análise, foi implementado o método de compensação de dispersão de Pós-compensação com utilização de fibra DCF e também da Grade de Bragg em fibra (FBG), fazendo um comparativo de qual elemento compensador é melhor para compensação de dispersão.

4.6.1 Modelo de simulação

O sistema WDM com 16 canais foi simulado através do software Optisystem 15.0 da empresa Optiwave corporation. Os sinais ópticos com formato de modulação Não Retorno ao Zero (NRZ) e com frequência de 193.1THz, foram multiplexados pelo WDM Mux 16x1 e depois enviados para a SMF, posteriormente os sinais foram amplificados pelo EDFA que também inseriu ruídos indesejáveis de ASE. Antes de serem demultiplexados, os sinais passaram em uma simulação pela DCF e em outra simulação pela FBG, com taxa de 10 Gbps e variações no comprimento da fibra, 100, 120 e 140 km com a utilização do método de Pós-compensação, para a compensação de dispersão acumulada. E finalmente na seção de recepção o desempenho do sistema WDM foi analisado através do Fator de Qualidade (Q-Factor) e da taxa de erro de bit (BER) em função da variação da potência de entrada do sinal.

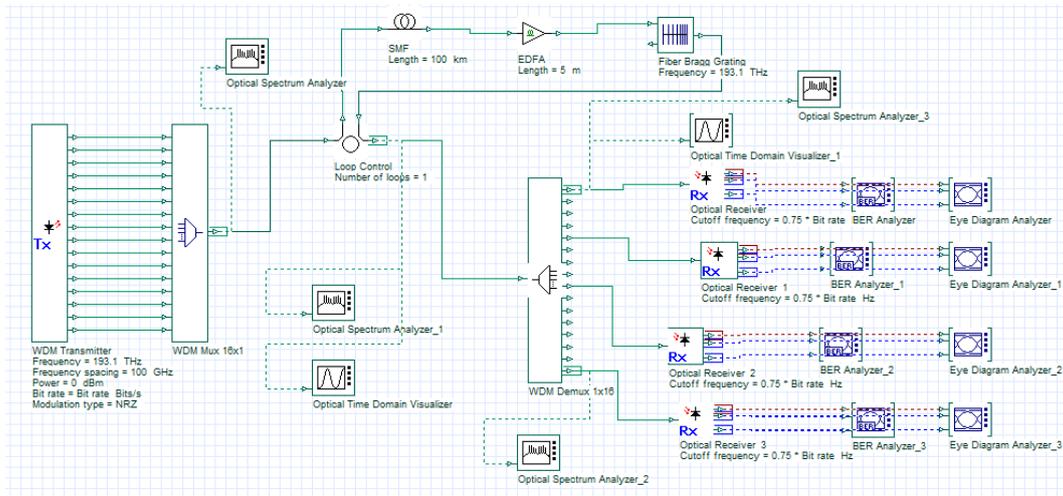


Figura 4.17. Esquema de compensação pelo método de pós-compensação com FBG.

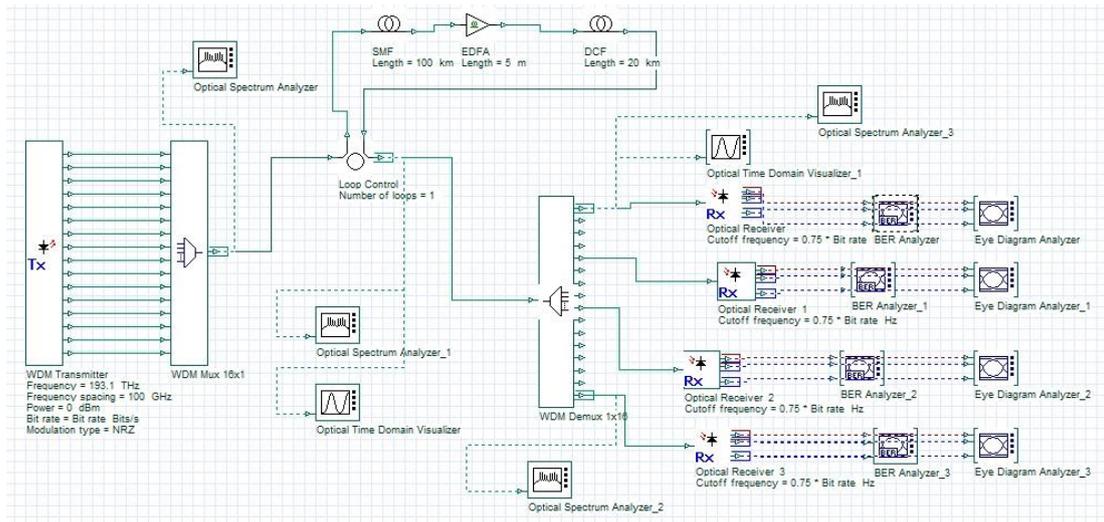


Figura 4.18. Esquema de compensação pelo método de pós-compensação com DCF.

Abaixo a tabela mostra os dados inseridos no sistema para as simulações.

Tabela 4.2: Dados da simulação de dois esquemas WDM.

CW Laser power	0 a 10 dBm
EDFA	5 m
Data rate	10 Gb/s
Fiber length	100, 120 e 140 km
DCF Length	20 km
DCF Dispersion	-80 ps/nm/km
DCF Dispersion Slope	-0.5 ps/nm ² /km
Fiber Bragg Grating frequency	193.1 THz

4.6.2 Resultados e discursões

Para os dois esquemas de compensação de dispersão das figuras 4.13 e 4.14, foram analisados a taxa de erro de bit (Min. BER) e o fator de qualidade (Q) a taxas de transmissão de 10 Gbps para 100, 120 e 140 km, nas tabelas abaixo, pode-se observar os resultados para o fator de qualidade (Q) e para a taxa de erro de bit (Min.Ber).

Tabela 4.3: Comparação dos dados da simulação de pós-compensação com FBG e DCF a uma taxa de 10 Gbps a 100 km.

Input Power (dBm)	Compensação com FBG		Compensação com DCF	
	Max. Factor	Q.	Log Min. BER	Max Q. Factor
0	3,76046	1	10 ⁻⁵	6,27331
3	3,87838	1	1	3,44327
5	3,99064	1	1	2,34887
7	4,1604	1	1	1,62503
10	4,6313	10 ⁻¹	0	1

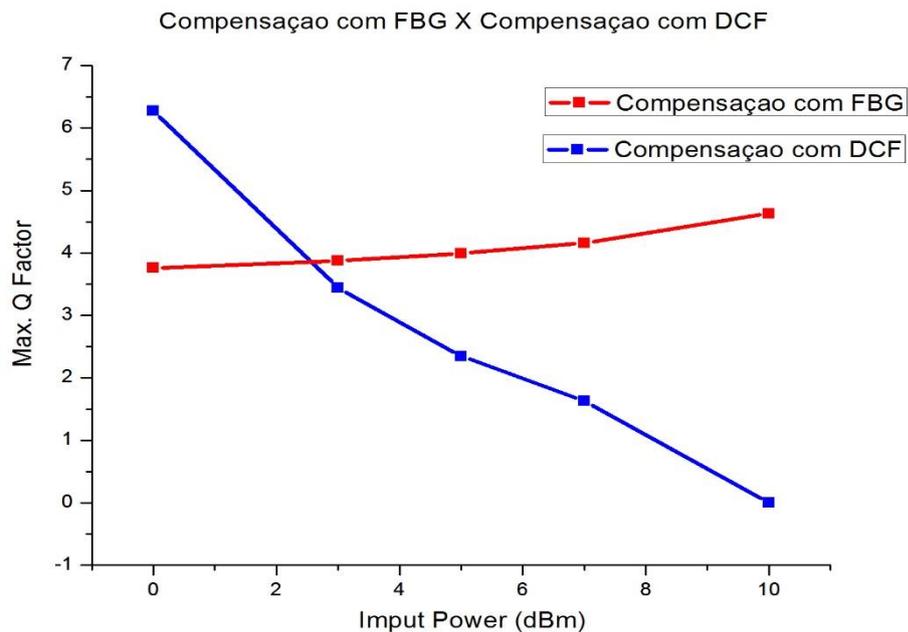


Figura 4.19. Máximo fator de qualidade (Q) com compensação de dispersão com FBG e DCF para 100 km.

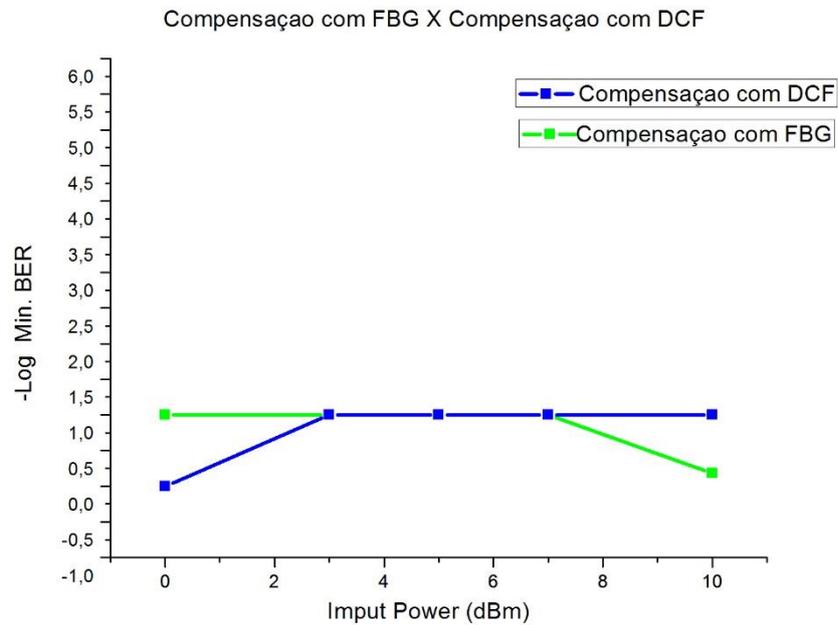


Figura 4.20 Taxa de erro de bit (Min. BER) com compensação de dispersão com FBG e DCF para 100 km.

Para o enlace de 100 km a uma taxa de 10 Gbps, foi possível observar que a compensação de dispersão com fibra DCF obteve melhor resultado em relação a Grade de Bragg em fibra, pois obteve o valor de 6,27331 de Max. Fator de Qualidade (Q) e uma taxa de erro de bit (Min. BER) de 10^{-5} , já os valores para FBG foram respectivamente de 3,76046 para o máximo fator de qualidade e 1 para a taxa de erro de bit.

Tabela 4.4: Comparação dos dados da simulação de pós-compensação com FBG e DCF a uma taxa de 10 Gbps a 120 km.

Input Power (dBm)	Compensação com FBG		Compensação com DCF	
	Max. Factor	Q.	Max Q. Factor	Log Min. BER
0	2,41717	1	12,41540	10^{-31}
3	2,49781	1	10,16470	10^{-19}
5	2,57194	1	7,14954	10^{-08}
7	2,68493	1	4,74279	10^{-02}
10	3,00906	1	2,51783	10^{-1}

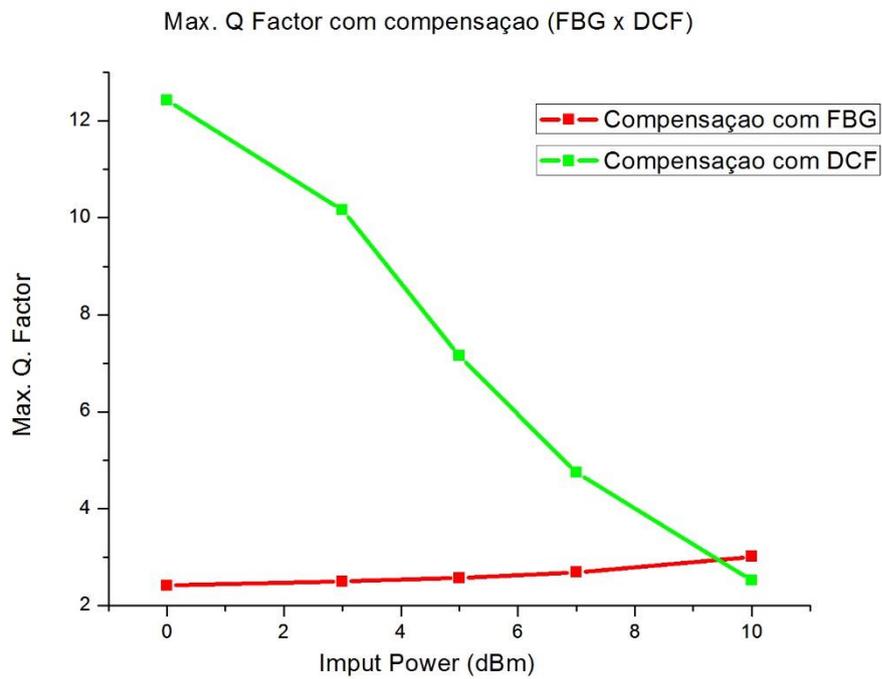


Figura 4.21. Máximo fator de qualidade (Q) com compensação de dispersão com (FBG x DCF) para 120 km.

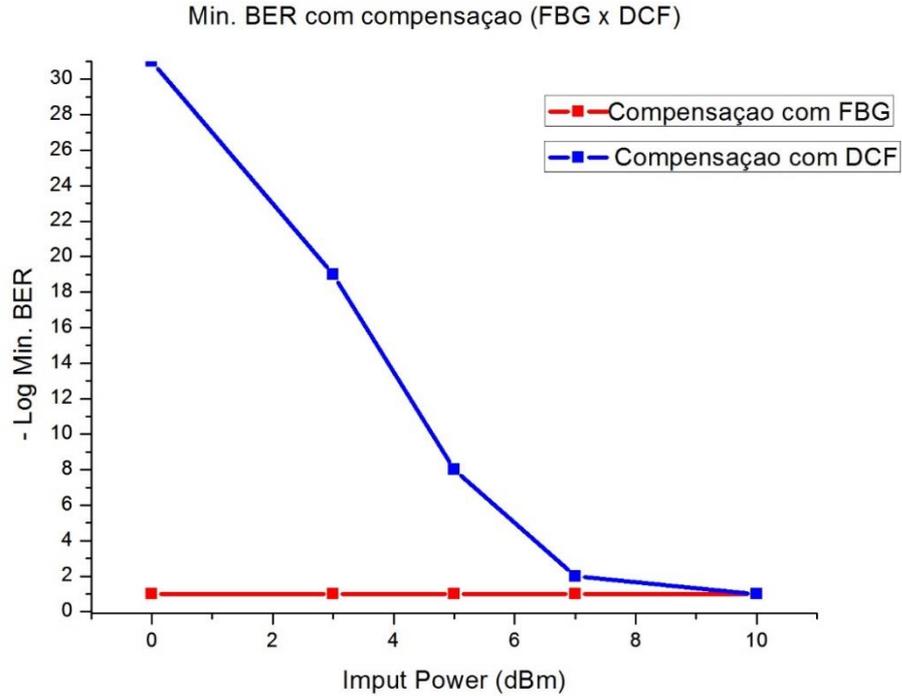


Figura 4.22. Menor taxa de erro de bit (Min. BER) com compensação de dispersão com (FBG x DCF) para 120 km.

Para o enlace de 120 km a uma taxa de 10 Gbps, foi possível observar que a compensação de dispersão com fibra DCF continua obtendo melhores resultados em relação a Grade de Bragg em fibra, pois obteve o valor de 12,41540 de Máximo Fator de Qualidade (Q) e uma taxa de erro de bit (Min. BER) de 10^{-31} , já os valores para FBG foram respectivamente de 2,41717 para o Máximo Fator de Qualidade e 1 para a taxa de erro de bit.

Tabela 4.5: Comparação dos dados da simulação de pós-compensação com FBG e DCF a uma taxa de 10 Gbps a 140 km.

Input Power (dBm)	Compensação com FBG			Compensação com DCF	
	Max. Factor	Q.	Log Min. BER	Max Q. Factor	Log Min. BER
0	0	1		8,72982	10^{-13}
3	0	1		10,57130	10^{-21}
5	0	1		11,71190	10^{-27}
7	0	1		11,85510	10^{-29}
10	0	1		7,49406	10^{-09}

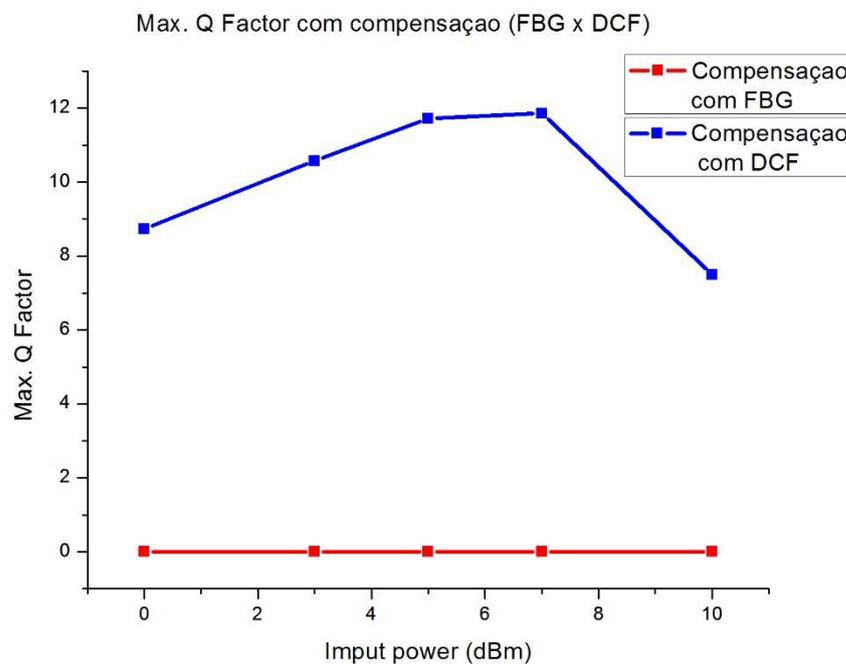


Figura 4.23. Máximo fator de qualidade (Q) com compensação de dispersão com (FBG x DCF) para 140 km.

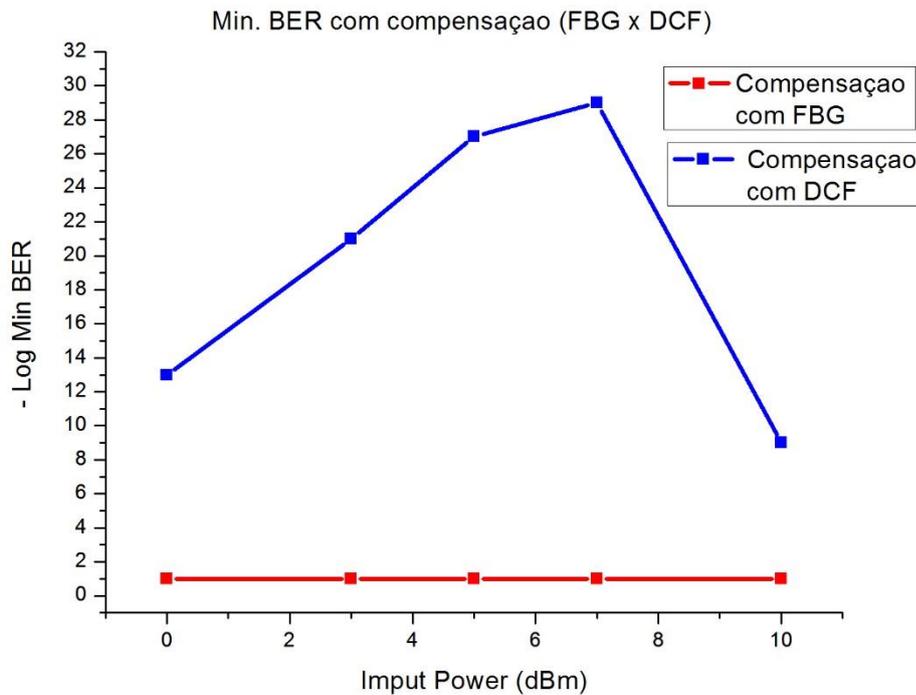


Figura 4.24. Menor taxa de erro de bit (Min. BER) com compensação de dispersão com (FBG x DCF) para 140 km.

Para o enlace de 140 km a uma taxa de 10 Gbps, foi possível observar que a compensação de dispersão com fibra DCF também continua obtendo melhor resultado em relação a Grade de Bragg em fibra, pois obteve o valor de 11,85510 de Máximo. Fator de Qualidade (Q) e uma taxa de erro de bit (Min. BER) de 10^{-29} , já os valores para FBG foram respectivamente de 0 para o Máximo Fator de Qualidade e 1 para a taxa de erro de bit.

Com estes resultados pode-se dizer que a compensação de dispersão com fibra DCF teve melhores resultados nas simulações em relação a Grade de Bragg em fibra, comprovando que seu uso para compensação de dispersão com a técnica de Pós-compensação é melhor que a com Grade de Bragg em fibra.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foram feitas três análises de compensação de dispersão, na primeira analisou-se o desempenho de um sistema DWDM-PON com o uso da técnica de tratamento de dispersão por fibra compensadora de dispersão (DCF), com os resultados obtidos, pode-se afirmar que, utilizando a técnica de pós-compensação, foi possível obter excelentes valores de desempenho em relação ao sistema sem pós-compensação, na segunda análise foram estudados três sistemas de compensação de dispersão, o de Pré-compensação, o de Pós-compensação e o de compensação Mista (simétrica), onde uma ligação a uma fibra DCF foi utilizada para esse fim. Os valores do fator Q e do BER foram comparados e analisados a uma taxa de transmissão de 10 Gb / s. Verificou-se que o fator Q e o OSNR para o sistema de compensação de mista (simétrica) eram os maiores, sendo considerado o melhor esquema de compensação de dispersão entre os três aqui apresentados e por fim na última análise foi verificada a comparação dos métodos de compensação de dispersão, de Pós-compensação com fibra DCF e com grade de Bragg em fibra FBG, com os resultados é possível afirmar que a compensação com DCF oferece maior desempenho para compensação da dispersão em relação a FBG. Estas técnicas de compensação de dispersão diminuem a degradação do sinal, melhorando a transmissão dos dados no sistema, portanto a técnica com a utilização de fibra DCF é melhor do que a FBG para o tratamento da dispersão.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Futuramente, para continuidade e aprimoramento desta pesquisa, pretende-se investigar através de simulações no Optisystem ou em outros softwares de simulações da mesma natureza, outros tipos de demultiplexadores baseados em metodologias robustas, enlaces com fibras de cristal fotônico, fazer também a variação da largura de banda e do número de canais do link,

explorar outras bandas de comunicação além da banda C (*Conventional Band*), como por exemplo a banda L (*Long Band*).

5.2 TRABALHOS PUBLICADOS

No decorrer dos anos de estudos no mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da Universidade Federal do Pará (UFPA), campus Guamá, Belém, Pará, desenvolvemos alguns trabalhos relacionados a nossa linha de pesquisa de eletromagnetismo aplicado com ênfase em telecomunicações, os quais estão listados a seguir.

5.2.1 Revistas – Trabalhos aceitos / publicados

1. Fabio Barros de Sousa, Fiterlinge Martins de Sousa, Jorge Everaldo de Oliveira, Lelis Araujo de Oliveira, Fabricio Pinho da Luz, Jackson Moreira Oliveira, Marcio Benedito Caldas Costa, Waldomiro Paschoal Júnior, b Marcos Benedito Caldas Costa. “Numerical Analysis of the Hybrid Photonic Crystal Fiber and Single Mode Fiber/Fiber Bragg Grating Sensor for Simultaneous Measurement of Temperature and Strain”, *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*. JCTN, 2019, DOI: 10.1166/jctn.2019.7954.
2. Jackson Moreira Oliveira, Hudson Afonso Batista da Silva, Lelis Araujo de Oliveira, Fabio Barros de Sousa, Jorge Everaldo de Oliveira, Fiterlinge Martins de Sousa, Fabricio Pinho da Luz, Marcos Benedito Caldas Costa. “New Design of All-Optical Logic Universal NAND Gate Formed by NOT (A and B) Gates Using Michelson Interferometer Based on Semiconductor Optical Amplifier”, *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*. JCTN, 2019.

5.2.2 Congressos – Trabalhos aceitos / publicados

1. Jackson M. Oliveira, Fabio B. de Sousa, Jorge E. de Oliveira, Marcio B. C. Costa, Fabrício P. da Luz, Fiterlinge M. de Sousa and Marcos B. C. Costa. Michelson

Interferometer based All-optical NOR Logic Gate, VIII Workshop on Semiconductors and Micro & Nano Technology, SEMINATEC, ISBN: 978-85-98123-12-7, São Bernardo do Campo – São Paulo – Brasil, april 19-20, 2018.

2. Marcio B. C. Costa, Fabio B. de Sousa, Jackson M. Oliveira, Jorge E. de Oliveira, Fiterlinge M. de Sousa, Fabrício P. da Luz, Waldomiro P. Jr. and Marcos B. C. Costa. Soliton Formation in Long Distance Optical Fiber Communication System. VIII Workshop on Semiconductors and Micro & Nano Tecnology, SEMINATEC, ISBN: 978-85-98123-12-7, São Bernardo do Campo – São Paulo – Brasil, april 19-20, 2018.
3. Jackson Moreira Oliveira, Fabio Barros de Sousa, Jorge Everaldo de Oliveira, Fiterlinge Martins de Sousa, Marcio Benedito Caldas Costa, Fabrício P. da Luz and Marcos Benedito Caldas Costa. “All-optical OR Logic Gate Using a Semiconductor Optical Amplifier based Michelson Interferometer”, 8º SBMO – SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICRO-ONDAS E OPTOELETRÔNICA 13º CBMAG – CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETROMAGNETISMO, MOMAG, Santa Rita do Sapucaí – Minas Gerais – Brasil, 2018.
4. Marcio B. C. Costa, Fiterlinge M. Sousa, Jorge E. de Oliveira, Fabio B. de Sousa, Elizete R. Sabino, Fabricio P. Luz, Marcos Benedito C. Costa. “Nanoantenna with graphene rectangular patch”, The Workshop on Renewable Energy Sources and Nanotechnology, WREN Belém – Pará – Brasil, 2018.
5. Márcio B. C. Costa, Fiterlinge M. Sousa, Fabio B. de Sousa, Jorge E. de Oliveira, Fabricio P. Luz, Elizete R. Sabino, Jackson M. Oliveira, Marcos Benedito C. Costa. “Design and Analysis of a Graphene-based Nanoantenna for Optical Frequencies”, The Workshop on Renewable Energy Sources and Nanotechnology, WREN Belém – Pará – Brasil, 2018.
6. Fabrício P. da Luz, Fabio B. Sousa, Jorge E. de Oliveira, Fiterlinge M. Sousa, Márcio B. C. Costa, Osmar T. B. de Oliveira, Marcos Benedito Caldas Costa. “Fotovoltaic

Cells of Graphene Nanowires in Distributed Bragg Reflector”, The Workshop on Renewable Energy Sources and Nanotechnology, WREN Belém – Pará – Brasil, 2018.

7. Fabrício P. da Luz; Jorge E. de Oliveira; Fiterlinge M. Sousa; Márcio B. C. Costa; Fabio B. Sousa; Jackson M. Oliveira, Marcos B. C. Costa. “Performance and Analysis Dispersion Compensation Using Fiber Optic Post-Compensation Technique with EDFA”, The Workshop on Renewable Energy Sources and Nanotechnology, WREN Belém – Pará – Brasil, 2018.
8. Fabrício P. da Luz; Fabio B. Sousa, Jorge E. de Oliveira, Fiterlige M. Sousa, Márcio B. C. Costa, Jackson M. de Oliveira, Marcos B. C. Costa. Comparative Analysis of Post-Dispersion Compensation Performance in DWDM-PON System. XIV Workshop on Semiconductors and Micro & Nano Technology - SEMINATEC Campinas – SP, 2019.
9. Fabio B. de Sousa, Fiterlige M. Sousa, Jorge E. de Oliveira, Lelis A. de Oliveira, Fabrício P. da Luz, Osmar T. B. de Oliveira, Jackson M. de Oliveira, Léo C. Parente, Márcio B. C. Costa, Marcos B. C. Costa. All-Optical 2R Regenerator Based in HNL-PCF and FBG-AOF. XIV Workshop on Semiconductors and Micro & Nano Technology – SEMINATEC, Unicamp, Campinas – São Paulo, 2019.
10. Fabrício P. da Luz; Fabio B. Sousa, Jorge E. de Oliveira, Marcos B. C. Costa. Analysis of Chromatic Dispersion Compensation in Fiber Optic Communication Systems. III Simpósio de Produção Científica: Contribuições para o desenvolvimento da pesquisa local. Unifesspa, Marabá – Pará, ISSN: 2594-4304, 2019.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AGRAWAL, Govind. Sistemas de comunicação por fibra óptica. Tradução José Rodolfo Souza. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2014.
- [2] KEISER, Gerd. Optical Fiber Communications. Mcgraw Hill. Fourth Edition, 2008.
- [3] SOUSA, Fabio Barros de. Regenerador 3R Totalmente Óptico Baseado em Interferômetro de Mach-Zehnder de Fibra de Cristal Fotônico Altamente não Linear. Dissertação de Mestrado. PPGEE. Universidade Federal do Pará.
- [4] What is Na Optical Fiber? Disponível em <<https://www.smartoptics.com/article/what-is-an-optical-fiber/>>. Acesso em 03/09/2019.
- [5] PINHEIRO, J. Redes Ópticas de Acesso em Telecomunicações. 320 pag. Elsevier Brasil, 2017.
- [6] BARBOSA, Vinicius de Araujo; METZ, Marcus Murilo; FERNANDES, Guilherme Thyago de Sousa. Redes Ópticas Passivas (PON) o Futuro das Redes: e suas Tendências Mercadológicas. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 03, Ed. 05, Vol. 04, pp. 158-185, Maio de 2018. ISSN:2448-0959. Disponível em <<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/tecnologia/futuro-das-redes>>. Acesso em 03/09/2019.
- [7] EG, Melo; DO, Carvalho; AS, Ferlauto; MA, Alvarado; MNP, Carreno; MI, Alayo. Journal of Applied Physics. Oxide-cladding aluminum nitridep hotonic crystalslab: Design and investigation of material dispersion and fabrication in duced disorder119, 023107 (2016). DOI: 10.1063/1.4939773. Disponível em <<https://www.sbpmat.org.br/pt/tag/cristais-fotonicos/>>. Acesso em 03/09/2019.
- [8] E. Yablonovitchand T. J. Gmitter, “Donor and accepto rmodes in photonic band structures”, Phys. Rev. Lett., vol. 67, No 24, pp. 3380-3383, 1991.
- [9] J. D. Joannopoulos, R. Meade, S. G. Johnson and, J. Winn, *Photonic Crystals – Molding the Flowof Light*, Princeton: Princeton University Press, Second Edition, 2008.
- [10] S. John, “Strong localizati on of photons in certain disordered dielectric superlattices”, *Physical Review Letters*, vol. 58, No 23, pp. 2486-2489, 1987.
- [11] SOUSA, Fábio Barros. Regenerador 3r totalmente óptico baseado em interferômetro de Mach-Zehnder de fibra de cristal fotônico altamente não linear. Dissertação de Mestrado. PPGEE. Universidade Federal do Pará. 2017.
- [12] MATTELART, Armand e Michele. História das Teorias da Comunicação. São Paulo: Loyola, 2009.

- [13] GIOZZA, W. F. *Fibras Ópticas: Tecnologia e Projeto de Sistemas*. São Paulo: Makrons Books, 2008.
- [14] OLIVEIRA, Jackson Moreira. *Portas lógicas totalmente ópticas baseado em interferômetro de Michelson com amplificador óptico semiconductor*. Dissertação de Mestrado. PPGEE. Universidade Federal do Pará. 2018.
- [15] F. B. de Sousa, F. M. Sousa, J. E. de Oliveira, J. M. Oliveira, W. Paschoal Jr., and M. B. C. Costa, "All-Optical 3R Regeneration Based on na Acousto Optical Filterwith Q-Factor Improvement," in *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 2018, 15(6-7), 1871-1875.
- [16] OLIVEIRA, Lelis Araújo de. *Análise do desempenho de uma rede totalmente óptica usando demultiplexadores AWG (Array Wave Guide) e FBG (Fiber Bragg Grating)*. Tese de Doutorado. PPGEE. Universidade Federal do Pará. 2019.
- [17] RUDGE, Felipe. *Dispersão em Fibras Ópticas*. Unicamp – 2009-2010.
- [18] SOUZA, Francisco José Mota de. *Análise teórica de novos circuladores de 3-portas em cristais fototônicos bidimensionais*. Tese de Doutorado. PPGEE. Universidade Federal do Pará. 2012.
- [19] SINGH, Narinder; GOEL, Ashok K. *Analysis of Four Wave Mixing Effect at Different Channel Spacing in DWDM Systems Using EDFA with Single Pump Source*. Na *International Journal of Engineering Sciences*, January, v. 17, p. 382-389, 2016.
- [20] DEHGHANI, Fatemeh; EMAMI, Farzin. *Suppression of Four wave mixing based on the pairing combinations of differently linear-polarized optical signals in WDM system*. *Journal of Optoelectrical Nanostructures*, v. 1, n. 1, p. 1-8, 2016.
- [21] P. Sharma, Mr. B. Koushal, S. Jain. "Performance Analysis of Dispersion Compensation of Optical Fiber Using EDFA". *International Journal of Engineering Research & Technology*. e-ISSN:2278-0181, p. 2559-2566. Vol.2 - Issue 7, July - 2013.
- [22] Emmanuel Desurvire, "Erbium Doped Fiber Amplifiers - Principles and Application", John Wiley & Sons, Inc. Publication
- [22] F. Dehghani; F. Emami, "Suppression of Four Wave Mixing Based on the Pairing Combinations of Differently Linear-Polarized Optical Signals in WDM System". *Journal of Optoelectrical Nanostructures*, v. 1, n. 1, p. 1-8, 2016.
- [23] N. Singh; A. K. Goel, "Analysis of Four Wave Mixing Effect at Different Channel Spacing in DWDM Systems Using EDFA with Single Pump Source", in *International Journal of Engineering Sciences*. ISSN: 2229-6913, Vol. 17, p. 382-389, January 2016.

- [24] Y. Namihira, T. Kawazawa and H. Wakabayashi gives “Polarization Mode Dispersion Measurements in 1520 Km EDFA system” *Electronics Letters*, 23rd, April 1992 Vol. 28 n° 9.
- [25] Emmanuel Desurvire, “Erbium Doped Fiber Amplifiers- Principles and Application”, John Wiley & Sons, Inc. Publication.
- [26] CARMO, J. F. Algumas Não-Linearidades da Fibra Óptica em Sistemas de Multiplexagem por Divisão de Comprimento de Onda. Dissertação de Mestrado. Instituto Nacional de Telecomunicações, 2010.
- [27] YABLONOVITCH, Eli. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics. *Physical review letters*, v. 58, n. 20, p. 2059, 1987.
- [28] PEREIRA, Odarley Fernandes. Caracterização de Fibras Ópticas Altamente não Lineares. Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto. 2012.
- [29] FERREIRA, Alisson da Conceição. Estudo numérico da influência da relaxação da não-linearidade Kerr e aplicações com portas lógicas utilizando PAM em componentes de fibras ópticas: interferômetro de Sagnac e acoplador direcional. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Ceará, 2011.
- [30] VAL, João Lucas Dourado do et al. Modelos Matemáticos e Ferramentas de Simulação para Estudo de Sistemas Ópticos. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2012.
- [31] Optisystem. Disponível em < <https://optiwave.com/resources/applications-resources/optical-communication-system-design/>>. Acesso em 06/11/2019.
- [32] SHARMA A., SINGH I., BHATTACHARYA S., SHARMA S. (2019) Performance Comparison of DCF and FBG as Dispersion Compensation Techniques at 100 Gbps Over 120 km Using SMF. In: Nath V., Mandal J. (eds) *Nanoelectronics, Circuits and Communication Systems*. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 511. Springer, Singapore.
- [33] SHARMA A. et al. Performance Comparison of DCF and FBG as Dispersion Compensation Techniques at 100 Gbps Over 120 km Using SMF. The book series *Lecture*

Notes in Electrical Engineering (LNEE), Nanoelectronics, Circuits and Communication Systems pp 435-449, 2018.

[34] MEENA D., MEENA M.L. (2020) Design and Analysis of Novel Dispersion Compensating Model with Chirp Fiber Bragg Grating for Long-Haul Transmission System. In: Janyani V., Singh G., Tiwari M., d'Alessandro A. (eds) Optical and Wireless Technologies. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 546. Springer, Singapore