

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

REGENERADOR 3R TOTALMENTE ÓPTICO BASEADO EM INTERFERÔMETRO DE
MACH-ZEHNDER DE FIBRA DE CRISTAL FOTÔNICO ALTAMENTE NÃO LINEAR

FABIO BARROS DE SOUSA

DM 26/ 2017

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

2017

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

FABIO BARROS DE SOUSA

REGENERADOR 3R TOTALMENTE ÓPTICO BASEADO EM INTERFERÔMETRO DE
MACH-ZEHNDER DE FIBRA DE CRISTAL FOTÔNICO ALTAMENTE NÃO LINEAR

DM 26/ 2017

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

2017

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

FABIO BARROS DE SOUSA

REGENERADOR 3R TOTALMENTE ÓPTICO BASEADO EM INTERFERÔMETRO DE
MACH-ZEHNDER DE FIBRA DE CRISTAL FOTÔNICO ALTAMENTE NÃO LINEAR

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica – PPGEE da UFPA para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Telecomunicações. Linha de Pesquisa: Eletromagnetismo Aplicado.

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

2017

Dados Internacionais de Catalogação - na – Publicação (CIP) Sistema de
Bibliotecas da UFPA

Sousa, Fabio Barros de, 1985-

Regenerador 3R totalmente óptico baseado em interferômetro de mach-
zehnder de fibra de cristal fotônico altamente não linear / Fabio Barros de Sousa.
- 2017.

Orientador: Marcos Benedito Caldas Costa

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto
de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica , Belém,
2017.

1. Comunicações óticas – modelos matemáticos. 2. Ótica de cristais -
materiais. 3. Fibras óticas. I. Título.

CDD 23. ed. 621.38275

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

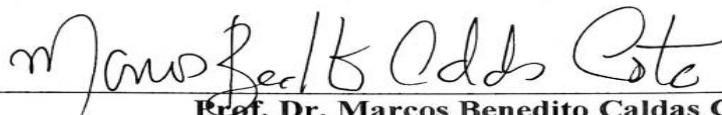
**“REGENERADOR 3R TOTALMENTE ÓPTICO BASEADO EM
INTERFERÔMETRO DE MACH-ZEHNDER DE FIBRA DE CRISTAL
FOTÔNICO ALTAMENTE NÃO LINEAR”**

AUTOR: FABIO BARROS DE SOUSA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE TELECOMUNICAÇÕES.

APROVADA EM 26 / 05 / 2017

BANCA EXAMINADORA:

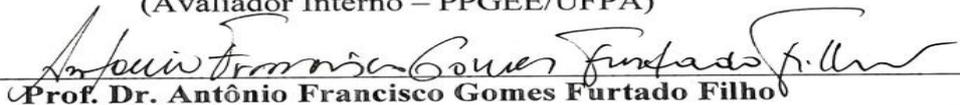


Prof. Dr. Marcos Benedito Caldas Costa

(Orientador – PPGEE/UFPA)

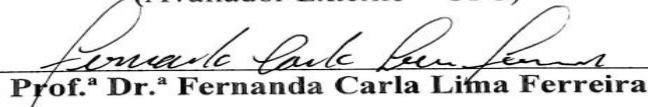
Prof. Dr. Jordan Del Nero

(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)



Prof. Dr. Antônio Francisco Gomes Furtado Filho

(Avaliador Externo – UFC)



Prof.ª Dr.ª Fernanda Carla Lima Ferreira

(Avaliadora Externa – UNIFESSPA)

VISTO:

Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes
(COORDENADOR DO PPGEE / ITEC / UFPA)

Dedico à minha esposa Elizabeth Rego Sabino,
a nossa filha Ana Gabriela Sabino de Sousa e a
minha mãe Maria de Lourdes Barros.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus.

Agradeço a minha família, que apesar da distância, sempre esteve ao meu lado. Pelo incondicional apoio, por tudo! À Elizabeth R. Sabino e Ana Gabriela S. Sousa, pela paciência e apoio durante o curso. Dedico este trabalho a vocês. Amo vocês!

Agradeço aos amigos Jorge E. de Oliveira, Léo C. Parente de Almeida, Elizete R. Sabino, Marcio B. C. Costa, Osmar T. B. de Oliveira e Filerlinge M. de Souza pelas ajudas e incentivos no decorrer do curso. Muito obrigado!

Ao Professor Dr. Marcos Benedito Caldas Costa, por sua excelente orientação desde o início. Por seu apoio e motivação desde sempre. Muito obrigado!

Aos professores Dra. Fernanda Carla Lima Ferreira e Dr. Antônio Francisco Gomes Furtado Filho, que participaram como membros da banca de defesa deste trabalho. Muito obrigado!

Finalmente, agradeço aos demais professores e colegas do PPGEE-UFPA que, de alguma forma, contribuíram para a minha formação e realização deste trabalho.

*“A mente que se abre a uma nova ideia jamais
voltará ao seu tamanho original”.*

(Albert Einstein)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	SISTEMA DE TELECOMUNICAÇÕES POR FIBRAS ÓPTICAS	21
2.1	FIBRAS ÓPTICAS	22
2.1.1	Fibra Monomodo	23
2.1.2	Fibra Multimodo.....	24
2.1.3	Fibras de Cristais Fotônicos	25
2.1.4	Amplificadores Ópticos	29
2.2	REFERÊNCIAS.....	34
3	ÓPTICA NÃO LINEAR	36
3.1	PROPAGAÇÃO DA ONDA EM FIBRAS ÓPTICAS	36
3.2	FATORES QUE DEGRADAM O SINAL EM FIBRAS ÓPTICAS	38
3.2.1	Atenuação	38
3.2.2	Dispersão	39
3.3	EFEITOS NÃO LINEARES EM FIBRAS ÓPTICAS	42
3.3.1	Automodulação de Fase (SPM – <i>Self-Phase Modulation</i>)	44
3.3.2	Modulação de Fase Cruzada (XPM – <i>Cross-Phase Modulation</i>).....	45
3.3.3	Mistura de Quatro Ondas (FWM – <i>Four-Wave Mixing</i>)	47
3.4	MÉTODOS E SIMULAÇÕES NUMÉRICAS.....	54
3.5	REFERÊNCIAS.....	58
4	REGENERAÇÃO DE SINAL ÓPTICO	60
4.1	REGENERADORES DE SINAL ÓPTICO.....	60
4.1.1	Regenerador 2R	62
4.1.2	Regenerador 3R	64
4.2	REFERÊNCIAS.....	67
5	SIMULAÇÕES E RESULTADOS NUMÉRICOS DO REGENERADOR 3 R TOTALMENTE ÓPTICO BASEADO EM INTERFERÔMETRO DE MATH- ZEHNDER	68
5.1	MODELO E PARÂMETROS DO REGENERADOR 3R PROPOSTO	70
5.1.1	Seção de Transmissão.....	70
5.1.2	Seção de Degradação	70
5.1.3	Seção de Regeneração	71
5.1.4	Esquemático do Regenerador 3R.....	74
5.2	RESULTADOS E DISCUSSÕES	75

5.2.1	Formas do Pulso na Saída do Transmissor e Diagramas de olho	75
5.2.2	Variação da Potência do Transmissor	77
5.2.3	Conclusão	79
5.3	REFERÊNCIAS.....	80
6	CONCLUSÃO GERAL	81
6.1	TRABALHOS FUTUROS	82
6.2	PUBLICAÇÕES	83
6.2.1	Congressos – Trabalhos aceitos / publicados	83
6.3	REFERÊNCIAS.....	85

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Componentes básicos de uma Rede de Comunicação por Fibra Óptica [Adaptado de 2].	21
Figura 2.2 - Representação Simples de uma Fibra Óptica.	22
Figura 2.3 - Perfil da Fibra Monomodo.	23
Figura 2.4 - Perfis da Fibra Multimodo.	25
Figura 2.5 - Tipos de Cristais Fotônicos. [Adaptado de 4 e 20].	26
Figura 2.6 - (a) TIR – PCF e (b) PBG - PCF [Adaptada de 18].	27
Figura 2.7 - As três configurações possíveis para um amplificador em redes ópticas.	29
Figura 2.8 - Localização das bandas de transmissão dentro do espectro de atenuação da fibra de sílica [17].	31
Figura 3.1 - Gráfico da atenuação em fibra óptica em função do comprimento de onda [Adaptado de 3].	38
Figura 3.2 - Fenômeno da dispersão em fibra óptica. [Adaptado de 19].	40
Figura 3.3 - Espectro do sinal na saída do receptor (esquerda) e o espectro após a propagação do pulso em uma SMF de 100 km (direita).	45
Figura 3.4 - Diagramas oculares de XPM para 0 dBm (esquerda) e 16 dBm (direita) [8].	47
Figura 3.5 - Efeito de FWM no domínio da frequência [adaptado de 12].	48
Figura 3.6 - Número de bandas laterais de FWM [Adaptado de 10].	49
Figura 3.7 - Sinal de entrada (esquerda) e sinal óptico de saída (direita) do circuito FWM a 0 dBm [8].	51
Figura 3.8 - Interface do software Optisystem.	55
Figura 4.1 - Regenerador 2R de Mamyshev [1].	62
Figura 4.2 - Função de transferência ideal. [adaptado de 4 e 12].	63
Figura 4.3 - Regenerador 2R em conjunto com um laser de auto pulsão [13].	64
Figura 4.4 - Diagrama de bloco do Processo de Regeneração 3R.	64
Figura 5.1 - Transmissor.	70
Figura 5.2 - Sessão de degradação.	71
Figura 5.3 - Interferômetro de Mach-Zehnder com HNL-PCF.	72
Figura 5.4 - Esquemático completo do sistema de regeneração 3R.	74
Figura 5.5 - Formas de onda: (a) transmissor de sinal de saída, (b) após a degradação, (c) sinal após a regeneração.	75

Figura 5.6 - Diagramas de olho: (a) Sessão de degradação, (b) Sessão de pré-regeneração e (c) Sessão de regeneração.....	76
Figura 5.7 - Desempenho do Log da BER e do fator Q na sessão de regeneração.	77
Figura 5.8 - Desempenho do Fator Q e da BER na sessão degradação.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Resumo de Efeitos não Lineares em Fibras Ópticas.....	44
Tabela 3.2- Comparação de diagramas de olho para a dispersão cromática diferente.	52

LISTA DE ACRÔNIMOS

- WDM:** *Wavelength Division Multiplexing* – Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda
- CWDM:** *Coarse Wavelength Division Multiplexing* – Multiplexação Espaçada por Divisão de Comprimento de Onda
- DWDM:** *Dense Wavelength Division Multiplexing* – Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda Denso
- TDM:** *Time Division Multiplexing* – Multiplexação por Divisão de Tempo
- PMD:** *Polarization Mode Dispersion* – Dispersão Modo de Polarização
- OSA:** *Optical Spectrum Analyzer* – Analisador do Espectro Óptico
- EDFA:** *Erbium Doped Fiber Amplifier* – Amplificador a Fibra Dopada de Érbio
- GVD:** *Group Velocity Dispersion* – Dispersão Velocidade de Grupo
- NRZ:** *Non-Return to Zero* – Não Retorno ao Zero
- RZ:** *Return to Zero* – Retorno ao Zero
- FWM:** *Four Wave Mixing* – Mistura de Quatro Ondas
- SPM:** *Self-Phase Modulation* – Automodulação de Fase
- XPM:** *Cross-Phase Modulation* – Modulação de Fase Cruzada
- CW:** *Continuous Wave* – Onda Contínua
- MZI:** *Mach-Zehnder Interferometer* – Interferômetro de Mach-Zehnder
- PhC:** *Photonic Crystal* – Cristal Fotônico
- SOA - MZI:** *Mach-Zehnder Interferometer Based on Semiconductor Optical Amplifiers* – Amplificador Óptico de Semicondutor Baseado em Interferômetro de Mach-Zehnder
- SOA - MI:** *Michelson Interferometer Based on Semiconductor Optical Amplifiers* – Amplificador Óptico de Semicondutor Baseado em Interferômetro de Michelson
- SOA - DI:** *Delayed Interference Based on Semiconductor Optical Amplifiers* – Amplificador Óptico de Semicondutor Baseado em Interferômetro de Michelson
- EAM:** *Electro-Absorption Modulator* - Modulador de Eletro-absorção.
- O-E-O:** Óptico – Elétrico – Óptico
- OFA:** *Optical Fiber Amplifier* – Amplificador de Fibra Óptica
- NOLM:** *Nonlinear Optical Loop Mirror* – Anel Óptico Refletivo Não Linear
- OXC:** *Optical Cross Connects* – Ligação Óptica Cruzada
- BER:** *Bit Error Rate* – Taxa de Erro de Bit
- OSNR:** *Signal-to-Noise Ratio* – Relação Sinal Ruído Óptica
- ASE:** *Amplified Spontaneous Emission* – Emissão Espontânea Amplificada
- HNLF:** *Highly Nonlinear Fiber*
- SMF:** *Single Mode Fiber* – Fibra Monomodo
- DCF:** *Dispersion Compensation Fiber* – Fibra Compensadora de Dispersão
- PCF:** *Photonic Crystal Fiber* – Fibra de Cristal Fotônico
- NLSE:** *Nonlinear Schrödinger Equation* – Equação Não Linear de Schrödinger
- NZ-DSF:** *Non-Zero Dispersion Shifted Fiber* – Fibra com Dispersão Deslocada Não Nula
- DSF:** Fibra com Dispersão Deslocada
- SSFM:** *Split-Step Fourier Method* – Método de Passo Alternado de Fourier
- OGP:** *Optical Gaussian Pulse Generator* – Gerador de Pulso Óptico Gaussiano
- SRS:** *Stimulated Raman Scattering* – Espalhamento Raman Estimulado
- SBS:** *Stimulated Brillouin Scattering* – Espalhamento Brillouin Estimulado
- OH:** Água dissolvida no vidro

LISTA DE SÍMBOLOS

- THz:** Terahertz
Km: Kilômetro
D: Dispersão
 A_{ef} : Área Efetiva da Fibra
 L_{ef} : Comprimento Efetivo da Fibra
G: Ganho
NF: Figura de Ruído
Q: Fator de Qualidade
 \vec{E} : Vetor Campo Elétrico
 \vec{H} : Vetor Campo Magnético
 \vec{D} : Vetor Deslocamento Elétrico
 \vec{B} : Indução Magnética
 ϵ_0 : Permissividade Elétrica
 μ_0 : Permeabilidade Magnética
 \vec{P} : Polarização Elétrica Induzida no Meio
 $\chi^{(j)}$: Susceptibilidade de Ordem J
c: Velocidade da Luz no Vácuo
 ∇^2 : Laplaciano
 ∇ : Operador Nabla
 $P_{entrada}$: Potência de Entrada
 $P_{saída}$: Potência de Saída
 α : Atenuação
dB: Decibel
L: Comprimento da Fibra
 \log_{10} : Logaritmo
S: Inclinação de Dispersão
 β_1 : Parâmetro de Dispersão de Primeira Ordem
 β_2 : Parâmetro de Dispersão de Segunda Ordem
RDS: Inclinação Relativa de Dispersão
 D_{dc} : Dispersão da Fibra Compensadora
 S_{dc} : Inclinação de Dispersão da fibra Compensadora
 L_{PCF} : Comprimento da Fibra de Cristal Fotônico
 L_{SMF} : Comprimento da Fibra Monomodo Padrão
 D_{PCF} : Dispersão da Fibra de Cristal Fotônico
 D_{SMF} : Dispersão da fibra Monomodo Padrão
 γ : Coeficiente de Não Linearidade
 λ : Comprimento de Onda
 n_2 : Índice de Refração Não Linear da Fibra
A: Amplitude Complexa
I: Intensidade Efetiva do Pulso de Luz
n: Índice de Refração
P: Potência Óptica Contida no Pulso
 ϕ : Deslocamento de Fase

ω : Frequência

d_{ijk} : Fator de Degeneração

η : Eficiência de FWM

k : Constante de Interação Não Linear

M : Bandas Laterais

N : Número de Canais

β : Propagação da Luz

$\Delta\beta$: Coeficiente de Propagação da Luz

\hat{D} : Operador Diferencial

\hat{N} : Operador Não Linear

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo investigar por meio de simulações numéricas, um dispositivo capaz de realizar uma regeneração 3R (Reamplificação, Ressincronização e Reformatação) de maneira totalmente óptica dos sinais propagados em um sistema de comunicação por fibra óptica com taxa de bit de 10 *Gbit/s*, potência de transmissão inicial de 0 *dBm* e comprimento de onda de 1550 *nm*. Como aliados ao processo de regeneração, utilizou-se os efeitos dispersivos e os não lineares de automodulação de fase (*Self-Phase Modulation - SPM*), modulação de fase cruzada (*Cross-Phase Modulation - XPM*) e mistura de quatro ondas (*Four – Wave Mixing - FWM*) em um interferômetro de *Mach-Zehnder*, cujo um dos braços é composto por uma fibra de cristal fotônico altamente não linear (HNL-PCF).

As simulações foram realizadas através do *software* comercial OptiSystem da empresa canadense Optiwave Corporation. O desempenho do sistema foi analisado através da comparação entre os valores do fator de qualidade (fator Q), da taxa de erro de bit (BER), do espectro óptico e da relação sinal ruído óptico (OSNR) dos sinais regenerados, pré-regenerados e degradados na entrada e na saída do sistema proposto. Através deste projeto foi possível obter uma regeneração eficiente do sinal, com valores ótimos de OSNR, de fator de qualidade (fator Q) e baixa taxa de erro de bit (BER).

Palavras-Chave: Regenerador 3R, fibra de cristal fotônico, fator de qualidade, taxa de erro de Bits.

ABSTRACT

The present work aimed to investigate by means of numerical simulations, a device able to perform 3R regeneration (Re-amplifying, Re-timing and Re-shaping) fully propagated signal in an optical communication system for optical fiber with bit rate of 10 Gbit/s, the initial transmit power 0 dBm and wavelength of 1550 nm. As an ally to the regeneration process using dispersive and nonlinear effects of self-phase modulation (SPM), cross-phase modulation (XPM) and four-wave mixing (FWM) in a Mach-Zehnder Interferometer, whose one of the arms is composed of a Highly Nonlinear Photonic Crystal Fiber (HNL-PCF).

The simulations were performed using OptiSystem commercial software of company canadian Optiwave Corporation. System performance was analyzed by comparing the values of the quality factor (Q-factor), of the bit error rate (BER), of optical spectrum and the optical signal-to-noise ratio (OSNR) optical signals are regenerated, before regenerated and degraded in the entrance and exit of the proposed system. Through this project, it was possible to obtain an efficient signal regeneration, with optimal values of OSNR, quality factor (Q-factor) and low bit error rate (BER).

Keywords: 3R Regenerator, Photonic Crystal Fiber, Quality Factor, Bit Error Rate.

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda do tráfego de informações nas redes de telecomunicações é um dos fatores cruciais na exigência por sistemas cada vez mais eficientes e robustos. Muito se tem feito para esse propósito, prova disso é a democratização do acesso pessoal aos diversos meios em especial a internet e a telefonia móvel.

Escalabilidade e segurança são os requisitos básicos para a garantia da integração entre os múltiplos serviços que uma rede de telecomunicações pode oferecer, tais como: dados, vídeos, áudios e imagens, todos transportados em um único meio. Nesse sentido, a fibra óptica tem se destacado no suporte desta necessidade de integração e transporte de informações, tendo comprovada a sua superioridade em relação aos outros meios como os cabos metálicos e a comunicação via satélite.

A eficiência energética é também considerada a principal razão da escolha por sistemas totalmente ópticos, pois os componentes eletrônicos aquecem demasiadamente quando operam em grandes faixas de frequência e banda passante, principalmente, devido ao processo de modulação e demodulação dos sinais [1]. É nesta hora que os meios ópticos entram em cena para a substituição desses componentes eletrônicos.

A regeneração totalmente óptica está em constante investigação, ela consiste em tratar os sinais ópticos degradados durante a transmissão em um *link* de fibra óptica e transmiti-los sem distorções, *crosstalk* e ruídos até o receptor.

Para sinais com altas taxas de bits a única opção é a regeneração totalmente óptica. Os regeneradores totalmente ópticos oferecem inúmeras vantagens em comparação aos regeneradores elétricos, dentre elas destacam-se a redução de componentes e custos, além de evitar o gargalo eletrônico. Por essas e outras vantagens que a regeneração elétrica vem sendo substituída pela regeneração totalmente óptica.

As fibras de cristal de fotônico (*Photonic Crystal Fiber - PCF*) tem possibilitado a implantação de sistemas capazes de operar com eficiência diante dos efeitos não lineares e dispersivos em altas frequências e de grande banda passante. Outros dispositivos de cristais fotônicos que tem se destacado são os circuitos integrados de fotônica (*Photonic Integrated Circuits - PIC*).

Diversos trabalhos publicados comprovam que os regeneradores totalmente ópticos são realmente essenciais e eficazes para dirimir os problemas que circundam as redes de comunicações por fibra óptica. Entraves como os efeitos não lineares e o auto custo do projeto poderão ser consideravelmente reduzidos através da implantação da metodologia de regeneração 2R ou 3R.

1.1 MOTIVAÇÃO

No que diz respeito a regeneração totalmente óptica um dos grandes desafios é conseguir criar técnicas capazes de regenerar todo o sinal que passa por uma rede de fibra óptica e demais componentes, de maneira eficiente e confiável, podendo até ser sintonizável e utilizado comercialmente. A implantação de um projeto de um regenerador só acontecerá caso o custo/benefício do sistema seja satisfatório.

Em [2] e outros pesquisadores é mostrado que a implementação da regeneração totalmente óptica com base nos efeitos não lineares, poderá ser a melhor opção para dirimir eventuais deletérios nas redes de telecomunicações.

Por isso se faz necessário desenvolver novas aplicações para a regeneração de sinais ópticos e/ou até mesmo aprimorar os já existentes, pois o aumento de usuários e do fluxo de informações, tem exigido que os sinais cheguem com mínimo de ruído até o seu destino.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O Objetivo deste trabalho é investigar por meio de simulações no *software* Optisystem um regenerador 3R totalmente óptico baseado em fibra de cristal fotônico altamente não linear para a regeneração de sinais através do efeito Kerr. O sinal que será regenerado passará por um loop de fibra monomodo padrão (*Standard Single Mode Fiber* - SSMF) e por amplificadores que serão responsáveis pela degradação, em seguida por filtros e um interferômetro de Mach-Zehnder com um braço de Fibra de Cristal Fotônico Altamente Não Linear (*Highly Nonlinear Photonic Crystal Fiber* - HNL – PCF).

1.3 MÉTODOS DE PESQUISA

A primeira fase da pesquisa consistiu no levantamento bibliográfico acerca das técnicas de regeneração baseadas em efeitos não lineares e supressão desses efeitos.

A segunda fase consistiu na construção do projeto do regenerador 3R totalmente óptico através do *software* de simulação de redes *Optisystem* da *Optiwave Coporation*.

A terceira fase consistiu-se na escolha dos parâmetros fixos da HNL – PCF baseado na literatura e otimizações, onde foram variados os parâmetros como potência de entrada, área efetiva da fibra SMF, coeficiente de dispersão, taxa de bit entre outros.

A quarta fase constituiu-se da coleta dos resultados e escrita da dissertação.

As configurações de *hardware* utilizadas para as simulações através do computador foram: Processador Intel® Core™ i7-7500U (2.7 GHz expansível até 3,5 GHz, Cache de 4 M), Memória de 8GB, DDR4, 2133 MHz (1 x 8GB) e Placa de vídeo NVIDIA® GeForce® 940MX de 4GB, GDDR5.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O primeiro capítulo, mostra um panorama sobre a demanda das telecomunicações e também um apanhado geral sobre a motivação, a justificativa, os objetivos e os resultados pretendidos com o projeto.

O segundo capítulo, aponta o estado da arte sobre as redes ópticas, os tipos de fibras ópticas, os amplificadores a fibra dopada de érbio e a relação entre a OSNR, fator Q e a BER.

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, o método numérico *Split-Step Fourier* e também apresenta resumidamente o *software* *Optisystem*.

O quarto capítulo, apresenta os conceitos da regeneração de sinal óptico, as diferenças entre regeneração elétrica e óptica e entre os regeneradores 2R e 3R.

O quinto capítulo, apresenta os componentes do projeto de um regenerador 3R totalmente óptico baseado em interferômetro de *Mach-Zehnder*. Também os resultados e as discussões das simulações no *software* *Optisystem* que provam a eficiência do regenerador 3R proposto.

O sexto capítulo, apresenta as conclusões gerais e as expectativas para continuação da pesquisa e trabalhos futuros. As referências e os títulos dos trabalhos publicados pelo nosso grupo de pesquisa também são apresentados.

1.5 TRABALHOS CORRELATOS

As telecomunicações ópticas ao longo de seus avanços vêm auxiliando na inter-relação entre os diferentes povos em todo o mundo, de maneira rápida e eficiente, porém com alguns problemas que ainda necessitam ser resolvidos. Os efeitos não lineares prejudicam o bom desempenho dos sistemas ópticos, mas com a utilização de técnicas adequadas, os mesmos não poderão oferecer mais riscos a integridade das informações transmitidas.

Portanto, torna-se importante desenvolver e promover pesquisas nessa área, afim de trazer novas contribuições para o desenvolvimento da humanidade. Nesse sentido a regeneração totalmente óptica de sinais, tem sido apontada como a solução para a melhoria do desempenho e da qualidade dos sistemas de telecomunicações.

Vários trabalhos têm sido publicados nesse sentido, como os Mamyshev que é considerado o precursor desta técnica [2], onde em 1998, apresenta um regenerador 2R baseado em fibra altamente não linear (*Highly Nonlinear Fiber - HNLF*), que desde então tem servido de base para outras pesquisas. Igualmente [3, 4] apresentam regeneradores 2R baseados em SPM, operando em taxas de transmissão de 10 *Gbit/s* e modulação não retorno ao zero (*Non Return to Zero - NZR*). Em [5] é apresentado outro tipo de regeneração 3R baseada em um interferômetro de Mach-Zehnder, operando em uma taxa de bit de 40 *Gbit/s* com o auxílio dos efeitos de SPM e XPM em uma PCF. Já em [6] é utilizado um regenerador 3R baseado em configuração de um anel óptico refletivo não linear (*Nonlinear Optical Loop Mirror - NOLM*) em cascata com fibras altamente não lineares, em que explora o efeito *Kerr* em três fases, afim de restaurar os sinais de dados a uma velocidade de 80 *Gbits/s*. Um coisa em comum em relação aos resultados de todos esses trabalhos citados é a utilização da função de transferência para o regenerador 2R e das métricas fator Q, BER, OSNR para a análise do desempenho do sistema.

1.6 REFERÊNCIAS

- [1] LIMA JUNIOR, Almir Wirth. Célula De Comutação Óptica Em Cristal Fotônico. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Ceará, 2010.
- [2] AGRAWAL, G.P. Fiber-optic communication systems. 3rd. edition Wiley Sons - Interscience, New York, 2002.
- [3] MAT YAACOB, S. N. S. et al. 10GB/S NRZ based on self-phase modulation in all optical 2R regeneration. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 5, N° 2, ISSN 1819-6608, 2015.
- [4] HNAUNG, Soe Soe. Design and Implementation of 10 Gbps All Optical 2R Regenerator. *International Journal of Scientific and Research Publications*, v. 4, n. 6, 2014.
- [5] Xu, S. X., Zhou, L., & Xiao, J. 40 Gb/s Optical 3R-Regeneration Based on XPM and SPM in PCF. In *Advanced Materials Research* (Vol. 571, pp. 180-184). Trans Tech Publications, 2012.
- [6] ANDERSEN, Peter Andreas et al. All-Optical signal processing using highly nonlinear photonic crystal fiber. Technical University of Denmark Danmarks Tekniske Universitet, Department of Electromagnetic Systems Institut for Elektromagnetiske Systemer, 2007.
- [7] 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.
- [8] PEREIRA, Odarley Fernandes. Caracterização de Fibras Ópticas Altamente não Lineares. Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto, 2012.

CAPÍTULO 2

Neste capítulo serão apresentados os aspectos teóricos gerais acerca dos 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.

2 SISTEMA DE TELECOMUNICAÇÕES POR FIBRAS ÓPTICAS

Em qualquer sistema de comunicação existem três elementos chaves: o transmissor, o meio físico e o receptor. Tanto os sistemas elétricos quanto os ópticos têm a mesma função, que é de transportar um sinal de um equipamento de comunicação a outro correspondente em outro local.

Em um sistema óptico é o transmissor que gera a mensagem que será enviada, através do laser, converte os sinais elétricos em ópticos para emití-los ao meio físico responsável pelo guiamento da onda de luz, que contém todas as informações até a parte final, que é o receptor, o qual, através de um fotodetector transforma os sinais ópticos em elétricos.

Os principais fatores que diferenciam um tipo de sistema do outro são a velocidade, a taxa de transmissão, a capacidade (banda passante) e a qualidade das informações transmitidas e recebidas. Nesse sentido, a transmissão por fibra óptica tem melhor desempenho em relação aos cabos metálicos. A figura 2.1 mostra um diagrama de bloco de um sistema genérico de telecomunicações ópticas, que neste caso o canal de comunicação é uma fibra óptica.

Dependendo da complexidade do sistema outros componentes ativos ou passivos, poderão ser inseridos em uma rede óptica, tais como: conectores, acopladores, WDMs, compensadores de dispersão, amplificadores, filtros e atenuadores. O que irá definir a utilização ou não desses componentes é o projeto da rede.

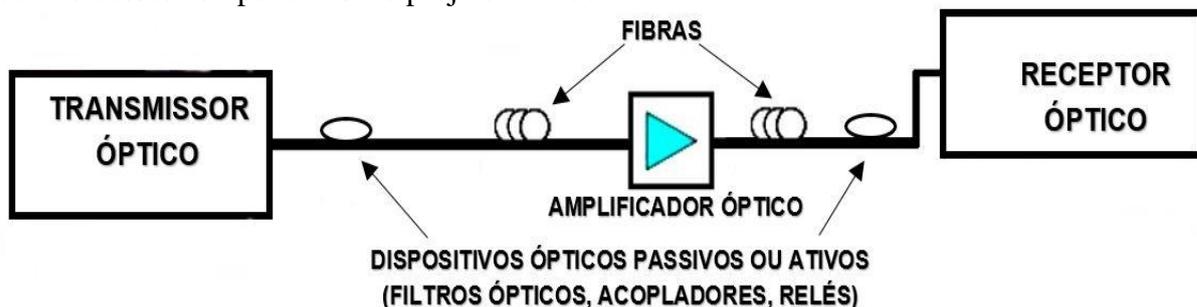


Figura 2.1 - Componentes básicos de uma Rede de Comunicação por Fibra Óptica [Adaptado de 1].

A fibra óptica apresenta várias vantagens em relação ao cabo de metálico, pois não sofre interferências eletromagnéticas, não tem problemas de aquecimento, transmite um volume muito maior de informações, reduz custos de manutenção, peso reduzido, segurança no transporte das informações e matéria prima abundante. Porém as fibras ópticas são passivas de atenuações devido as dobras acentuadas e também aos efeitos dispersivos e não lineares, os quais comprometem o desempenho do sistema, porém com os procedimentos corretos esses problemas podem ser tratados.

Vale enfatizar que existem outros sistemas de comunicação que também são ópticos, como por exemplo os controles remotos de uma televisão, que é uma comunicação por infravermelho, também chamada de sistema de comunicação óptica no espaço livre (FSO - *Free Space Optics Communication*) e o outro caso é a comunicação via satélite. Esses outros sistemas não serão objetos de estudo desta pesquisa, portanto, qualquer referência a comunicações ópticas feitas neste trabalho daqui em diante deverá ser entendida como tendo a fibra óptica como único meio de transporte dos sinais. A seguir serão apresentados os tipos de fibras, suas principais características e aplicações.

2.1 FIBRAS ÓPTICAS

A fibra óptica consiste de um meio dielétrico (sílica ou plástico) cilíndrico capaz de fazer o guiamento da luz. A fibra óptica tem dimensões comparáveis a um fio de cabelo, a mesma é subdividida em três partes: um revestimento primário (a capa), a casca e o núcleo.

O índice de refração do núcleo n_1 que é comum ser um vidro composto de sílica pura (SiO_2) é maior do que o índice de refração da casca (vidro) n_2 , é isso que garante a propagação da luz através do núcleo. A casca tem como principal função reduzir a dispersão devido a descontinuidade da superfície do núcleo e também dar resistência mecânica, protegendo o núcleo de contaminações [1]. E a capa que é composta por material plástico elástico encapsula a casca e o núcleo oferecendo resistência a alguns fatores que poderão comprometer a integridade da fibra.

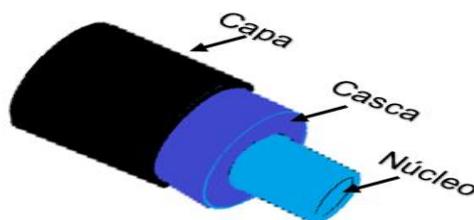


Figura 2.2 - Representação Simples de uma Fibra Óptica.

A classificação das fibras ópticas é determinada pela a forma geométrica de mudança do índice de refração entre a casca e o núcleo [2]. Nas fibras de índice em degrau há uma mudança brusca no índice de refração e nas do tipo gradual o índice de refração diminui gradualmente. As figuras 2.3 e 2.4 mostram os perfis dos dois tipos de fibras ópticas.

O parâmetro V é número de modos guiados numa fibra convencional com raio r e comprimento de onda λ é dado por [1]:

$$V = \frac{2\pi r}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi \cdot r}{\lambda} NA. \quad (2.1)$$

Sendo $NA \approx n_1 \sqrt{2\Delta}$, denominado de abertura numérica e Δ é a diferença de índices.

Tal parâmetro deve ser $V < 2,4$ para que a fibra seja monomodo [2].

Quando V é grande ele pode ser usado para representar estimativamente os modos M de uma fibra multimodo com índice em degrau:

$$M \approx \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi r}{\lambda} \right)^2 (n_1^2 - n_2^2) = \frac{V^2}{2}. \quad (2.2)$$

Quanto ao modo de propagação a fibra óptica está dividida em dois tipos a monomodo e a multimodo, esta outra classificação está diretamente relacionada a banda passante que depende do seu comprimento, forma geométrica e do perfil de índices de refração.

Para melhor compreensão as duas categorias de fibras ópticas serão apresentadas nas seções a seguir de maneira individual.

2.1.1 Fibra Monomodo

A fibra monomodo (SMF – *Single Mode Fiber*), recebe esse nome pois a propagação ao longo do seu núcleo só ocorre de uma maneira. Possui uma diferença no índice de refração do núcleo em relação ao da casca e dimensões variando de $8 - 12 \mu\text{m}$ e $125 \mu\text{m}$ respectivamente.

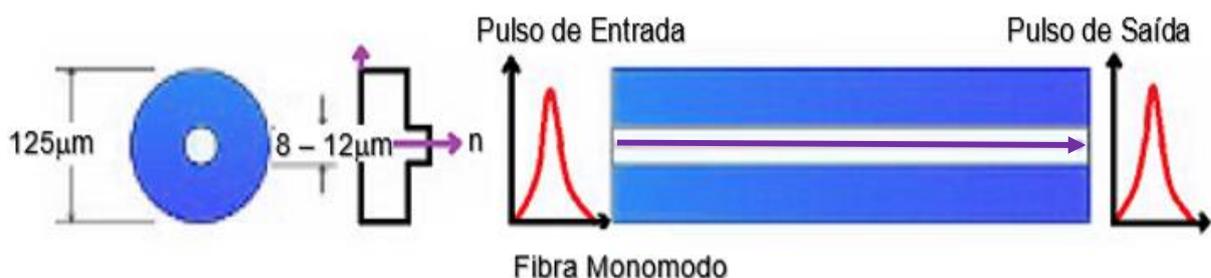


Figura 2.3 - Perfil da Fibra Monomodo.

Tem banda passante mais larga do que as fibras multimodo, baixa atenuação, podendo ultrapassar 50 Km de distância entre repetidores. Dentre os tipos de fibras monomodo vale destacar as mais utilizadas [1]:

- **Standard SMF (ITU G.652)** – é uma fibra comum padronizada para a 2ª janela, com valor de dispersão cromática próximo a zero na região dos 1300 nm e dispersão alta na região dos 1550 nm. Pode apresentar atenuação 0,35 dB/Km em 1310 nm e área efetiva de 72 μm^2 . Já a monomodo com baixo conteúdo de água (ITU G. 652C/D) pode ter dispersão igual a 0,20 dB/Km e área efetiva de 72 μm^2 .
- **DSF (ITU G.653)** – é uma fibra com dispersão deslocada (DSF – *Dispersion Shifted Fiber*), foi projetada para a 3ª janela, tem dispersão cromática zero em 1550 nm, ruim para os sistemas DWDM devido ao aumento dos efeitos de FWM.
- **NZ-DSF (ITU G.655)** – é uma fibra com dispersão deslocada não nula (NZ – DSF – *Non-Zero Dispersion Shifted Fiber*), recomendada para sistema DWDM, possui baixa dispersão, mas não nula em 1550 nm. Pode possuir atenuação igual 0,21 dB/Km em 1550 nm e área efetiva igual a 55 μm^2 .
- **LWP (ITU G.652.C)** – é uma fibra que possui baixa concentração de íons de hidroxila (OH) (LWP – *Low Water Peak*) na região dos 1400 nm, recomendada para sistemas CWDM, permite aplicações na banda E.

Existem também as fibras compensadoras de dispersão (DCF - *Dispersion Compensating Fiber*), a qual tem como função compensar as penalidades causadas pela dispersão cromática em sistemas de comunicações ópticas. Essas fibras podem ter atenuação no valor de 0,21 dB/Km em 1550 nm e área efetiva de 55 μm^2 . São também comumente empregadas em sistemas para a regeneração 2R ou 3R de sinal óptico.

2.1.2 Fibra Multimodo

A fibra multimodo (MMF – *MultiMode Fiber*) possui diversos modos de propagação e pode ter índice em degrau ou gradual.

A figura 2.4 mostra as formas dos índices e os modos de propagação do pulso no núcleo deste tipo de fibra.

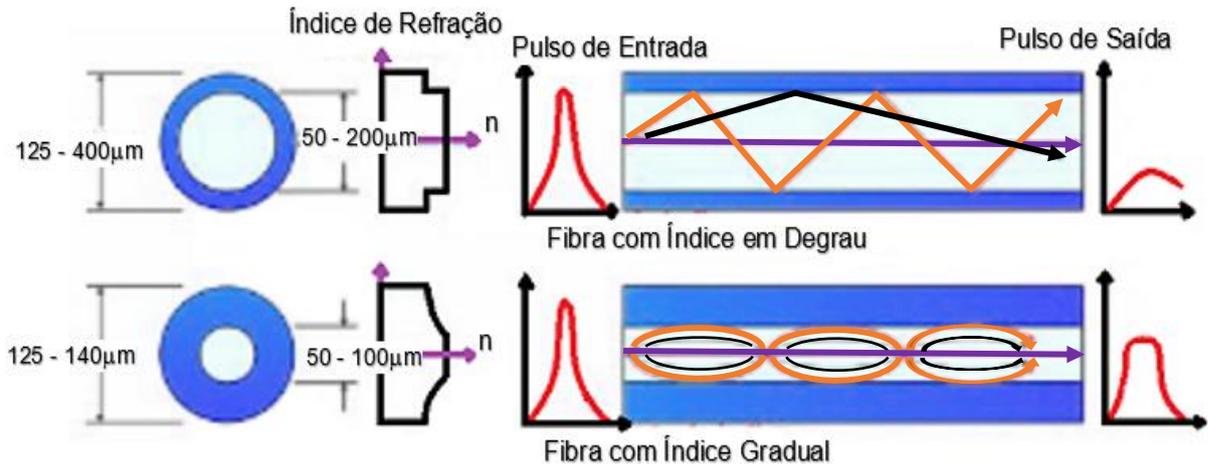


Figura 2.4 - Perfis da Fibra Multimodo.

A fibra óptica multimodo de índice em degrau possui núcleo e casca com diâmetros variando de 50 – 200 μm e 125 – 400 μm respectivamente. 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 variando de 50 – 100 μm e 125 - 140 μm 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.

2.1.3 Fibras de Cristais Fotônicos

Antes de conhecer esse tipo de fibra especial, é preciso saber sobre a origem da teoria dos cristais fotônicos. A fotônica é um ramo da ciência que estuda a luz desde geração, emissão, absorção, amplificação e detecção. Originou-se das teorias de Isaac Newton na identificação dos fenômenos de interferência da luz e na predição das propriedades refletivas de um meio periódico por Lord Rayleigh, por volta de 1880 [4].

O termo cristal fotônico foi cunhado pela primeira vez por Eli Yablonovitch e John Sajeev em suas pesquisas e publicações na revista “*Physical Review Letters*” em 1987 [5]. Após seus trabalhos vários artigos foram publicados relacionados a essas geometrias cristalinas, com o propósito de investigar estruturas capazes de apresentar um *range* de bandas proibidas (*Band Gaps*) na região óptica do espectro eletromagnético.

Os cristais são arranjos periódicos construídos com características de controle sobre a propagação e confinamento da luz em dadas direções e frequências, isto é, são materiais de baixa absorção com índices de refração periódicos os quais são capazes de afetar as propriedades dos fótons (partículas que compõem a luz) [6]. Apresentam-se em (a) uma, (b) duas ou (c) três dimensões, como mostra a figura 2.5:

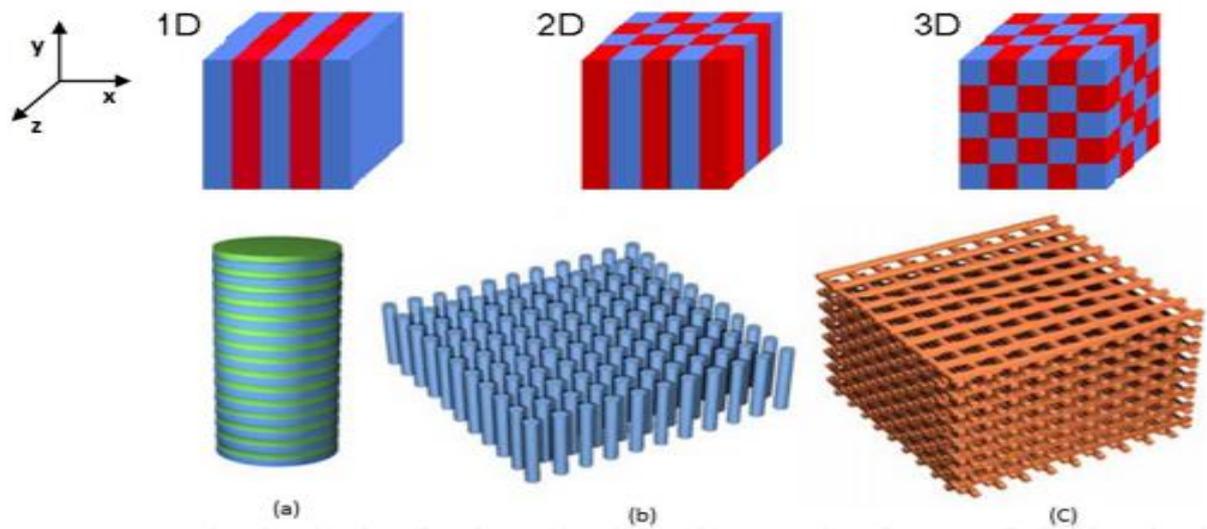


Figura 2.5 - Tipos de Cristais Fotônicos. [Adaptado de 4 e 20].

As cores diferentes (azul e vermelho) nos três tipos de cristais fotônicos que estão na parte superior da figura 2.5, representam materiais com índices de refração diferentes. A maneira como os cristais fotônicos guiam a luz é definida pela solução das equações de Maxwell em um meio dielétrico periódico [6]. O controle sobre a propagação é determinado pela variação da periodicidade na constante dielétrica, o que é considerado como fator determinante para o que se pretende aplicar, dentre as possibilidades destacam-se guias de ondas, cavidades ressonantes, acopladores direcionais, e em especial as fibras de cristais fotônicos [5].

As fibras de cristais fotônicos (PCF – *Photonic Crystal Fiber*) também chamadas de fibras microestruturadas (MOF – *Microstructured Optical Fiber*), pertencem a uma nova categoria de fibras ópticas, o primeiro exemplar a ser registrado foi em 1996, criado por pesquisadores da universidade de Bath, na Inglaterra, liderados por Philip Russell [7, 8], a partir das teorias de Yablonovitch e John.

A criação das primeiras fibras vazadas do inglês “*Holey Fiber*”, possibilitou uma vantagem em relação ao modo de propagação em fibras, pois a partir das descobertas de Russel e outros pesquisadores, geraram diversas publicações em revistas científicas de grande impacto

como a *Science e Nature* [8]. Com essas pesquisas descobriram que através do contraste entre a casca e o índice de refração do núcleo dessas fibras a possibilidade do guiamento da luz de duas maneiras: Por reflexão interna total ou *band Gap* [1], dividindo assim as fibras microestruturadas em duas categorias. A figura 2.6 apresenta uma visão bidimensional das seções transversais das extremidades das estruturas das duas categorias de fibra de cristais fotônicos.

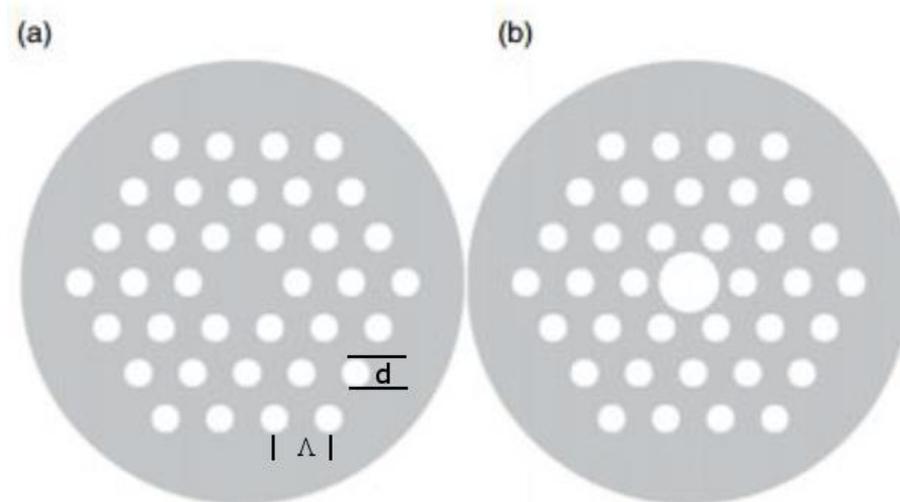


Figura 2.6 - (a) TIR – PCF e (b) PBG - PCF [Adaptada de 9].

A primeira PCF mostrada na figura 2.6 (a) é a do tipo (TIR – PCF – *Total Internal Reflection – Photonic Crystal Fiber*) ou fibra de índice guiado (*index-guiding fiber*) em que o seu modo de propagação é idêntico ao de uma fibra convencional, pois tem um índice de refração do núcleo geralmente $n = 1,45$ (sílica pura) maior do que o da casca $n = 1,00$ (ar), o que dar algumas vantagens operacionais em relação as fibras convencionais que as vezes são dopadas com germânio, além disso suportam um modo único de operação em comprimentos de onda que vão de 300 nm a mais de 2000 nm e têm área efetiva que pode ultrapassar $300 \mu\text{m}^2$ maior do que a da fibra convencional que tem geralmente $80 \mu\text{m}^2$ [1].

E a segunda PCF na figura 2.6 (b) é a do tipo (PBG – PCF – *Photonic Band Gap – Photonic Crystal Fiber*) ou fibra de *bandgap* fotônico, onde a mesma possui um defeito na sua estrutura cristalina, caracterizado pela ausência de um ou mais furos de ar ou capilares de sílica ou qualquer outro material, onde neste caminho é feito o guiamento da luz. O defeito é considerado neste caso o núcleo da PCF (fibra de núcleo oco) diferente da outra PCF que não tem furos de ar na região central (fibra de núcleo sólido).

Neste tipo de PCF o guiamento da luz é feito em uma região estreita do comprimento de onda com uma largura de cerca de 100 – 200 nm, permitindo a propagação de cerca de 98% da potência dos modos guiados [1]. A geometria mais simples de uma fibra microestruturada é a do tipo triangular como mostrada na figura 2.6, mas existem outras PCFs com estruturas variadas e também com diferentes formas de furos ou capilares, que não obrigatoriamente devem ser cilíndricos, e também poderão ter diferentes diâmetros d e distâncias entre os furos (*pitch*) Λ .

A relação $f = d / \Lambda$ denominada de fator de preenchimento, é crucial nos projetos de fabricação das PCFs, onde estes parâmetros poderão determinar para qual aplicação deverão servir, para a relação $d / \Lambda < 0,4$, podem exibir propriedades monomodo.

Em 1999 J.C. Knight e seu grupo conseguiram fabricar uma PCF com alto fator de preenchimento [10], a qual foi capaz de evitar o efeito dispersivo e a absorção óptica presentes na sílica. Essas fibras geralmente são fabricadas apenas com sílica, mas há casos em que dependendo da aplicação poderão ser dopadas com terras raras [1].

A diferença da PCF para uma fibra óptica convencional é que ao longo do seu comprimento existem arranjos de furos de ar, formando uma microestrutura interna da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda, a qual é capaz de controlar as propriedades ópticas da luz como os efeitos de dispersão, as não linearidades e a birrefringência em altos níveis de potência.

As fibras microestruturadas podem ser aplicadas em sensoriamento óptico, laser de fibra, atenuadores variáveis de potência, giroscópios [1] entre outros. As PCFs monomodo com área efetiva do núcleo muito elevada podem guiar em altas potências sem induzir os efeitos não lineares. A compensação de dispersão em enlaces de fibras convencionais poderá ser controlada com comprimentos muito curtos de PCF.

A grande área efetiva dessas fibras permite que em altos níveis de potências os efeitos não lineares que afetam as redes com fibras monomodo padrão sejam consideravelmente reduzidos [1]. Mas em [11] uma PCF altamente não linear (HNL – PCF) foi utilizada para a regeneração 3R de sinais ópticos baseada em alta modulação de fase (SPM – *Self-Phase Modulation*) e modulação de fase cruzada (XPM – *Cross-Phase Modulation*), neste caso a área efetiva da PCF foi reduzida, pois nas HNL-PCFs o índice de não linearidade (cerca de $\gamma = 300W^{-1}Km^{-1}$) é muito maior que o da fibra óptica comum ($\gamma = 2.7W^{-1}Km^{-1}$), por isso uma outra aplicação comum é a geração de supercontínuum [12], pela relação 3.17 pode-se observar o aumento da não linearidade da fibra quando se reduz a sua área efetiva.

Outra característica comum desse tipo de fibra é a dispersão negativa. Nesse sentido vale salientar que a PCF pode ser usada em projetos de telecomunicações ópticas tanto para reduzir quanto para induzir os efeitos não lineares, o que pode justificar a razão da sua utilização é a redução dos custos, a integração do sistema e também a possibilidade de se criar regeneradores totalmente ópticos e sintonizáveis.

2.1.4 Amplificadores Ópticos

Todo sistema de telecomunicação por fibra óptica de média e longa distância, com alta velocidade e alta capacidade de transmissão, exige amplificação, devido aos efeitos cumulativos, os quais são responsáveis pelo enfraquecimento do sinal, ou seja, perdas decorrentes da atenuação e espalhamento, ficando impossível a recuperação da informação no receptor. O amplificador é capaz de solucionar este problema, pois dar ganho ao sinal óptico e aumenta a sua potência [13], permitindo a comunicação entre lugares cada vez mais distantes.

No geral o bom amplificador é aquele que é capaz de amplificar diversos canais de multiplexação por divisão de comprimento de onda (*Wavelength-division Multiplex - WDM*) simultaneamente [1], mas a necessária amplificação leva ao aumento dos ruídos indesejáveis produzidos pelos próprios amplificadores.

Antes de entrar na figura do mérito das vantagens e das penalidades ocasionadas pelos amplificadores é necessário apresentar as três configurações para os amplificadores ópticos em um sistema de telecomunicações por fibra óptica, a figura 2.7 mostra que os amplificadores podem ser utilizados de três formas: amplificador de potência ou *booster*, amplificador de linha e pré-amplificador, esta classificação está diretamente relacionada com a posição em que o amplificador irá ficar no projeto da rede. Há casos em que nestas configurações, os amplificadores podem ser conectados em cascata de modo periódico, com capacidade de amplificar a transmissão de uma sequência de pulsos ópticos por distâncias de até 10.000 Km [2], esses são chamados também de amplificadores híbridos em série ou paralelos.

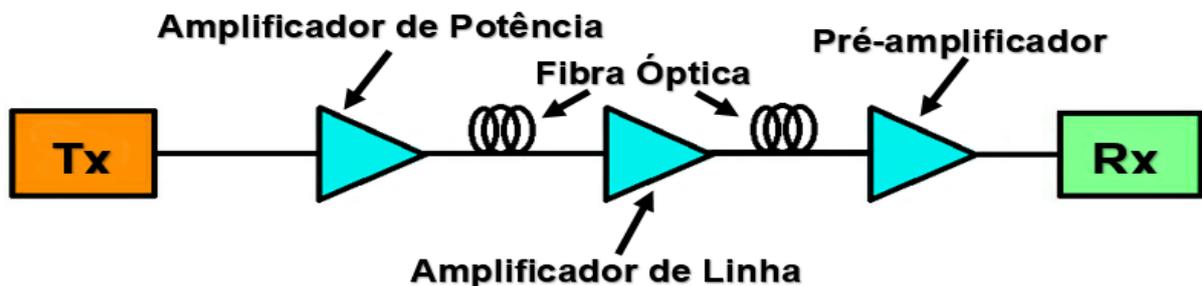


Figura 2.7 - As três configurações possíveis para um amplificador em redes ópticas.

O amplificador de potência ou *booster* é aquele que faz amplificação do sinal logo após a saída do transmissor (Tx), geralmente são utilizados em sistemas de regeneração intermediária em áreas remotas e de difícil acesso como florestas, oceanos e montanhas, pode ser implementado em conjunto com pré-amplificadores.

O amplificador de linha é utilizado no meio do enlace de fibra óptica com o propósito de aumentar o comprimento do enlace, por isso devem ter baixo nível de ruído. Essa configuração pode ser usada para substituir os regeneradores optoeletrônicos, mas existem aplicações híbridas em que o amplificador é usado para compensar a atenuação e o regenerador para compensar a distorção.

O pré-amplificador é utilizado para aumentar a sensibilidade do receptor (Rx), por isso é posicionado antes da detecção do sinal. Este tipo de amplificador deve ter como característica baixo nível de ruído de emissão espontânea amplificada (*Amplified Spontaneous Emission - ASE*), afim de não saturar o fotodetector.

No geral o princípio de funcionamento de um amplificador óptico genérico é determinado pela absorção da energia fornecida a partir de uma fonte de bombeio [1]. Os tipos de amplificadores mais comuns utilizados em redes ópticas são: O amplificador à fibra dopada de Érbio EDFA (*Erbium-Doped Fiber Amplifier*), amplificador Ramam e o amplificador óptico de Semicondutor SOA (*Semiconductor Optical Amplifier*) e amplificador paramétrico. Existem outros amplificadores a fibra dopada no processo de fabricação com íons de terra rara assim como o EDFA (Er^{3+} - *Doped Fiber Amplifier*), tem o amplificador a fibra dopada com Túlio TDFA (Tm^{3+} - *Doped Fiber Amplifier*), o amplificador a fibra dopada com Praseodímio PDFA (Pr^{3+} - *Doped Fiber Amplifier*) entre outros [14]. Em [13] todos esses amplificadores a fibra são apresentados e também atenta para a utilização de amplificadores para explorar bandas de comunicação além da banda C (*Conventional Band*), como por exemplo a banda S (*Short Wavelength Band*). Porém nesta pesquisa, será dado ênfase somente ao tipo de amplificador utilizado nos projetos do regenerador 3R proposto, que no caso será o EDFA.

Os primeiros estudos sobre amplificadores a fibra dopada de terra rara, começaram em 1964 [2], diversos amplificadores foram desenvolvidos durante a década de 1980, mas foi na década de 1990, com os aperfeiçoamentos das propriedades como comprimento de onda de operação que o uso desses dispositivos se tornou prático. Esses avanços contribuíram para a implementação de enlaces ópticos transoceânicos com altas taxas de transmissão, tendo como destaque nesse sentido o amplificador a fibra dopado com érbio, que possibilitou em 1995 a revolução nos sistemas de comunicação WDM, com capacidades superiores a 1 *Tbit/s* [2].

O EDFA é o tipo de amplificador mais comum em sistemas de telecomunicações, trata-se de um segmento de fibra com o núcleo composto por um elemento químico ativo capaz de amplificar o sinal óptico na faixa de 1550 nm (banda C), coincidentemente a janela em que a fibra de sílica apresenta menores perdas. O EDFA também atua, já no final do seu espectro, na faixa de 1590 nm, ou seja, na banda L (*Long Band*) como mostra a figura 2.8.

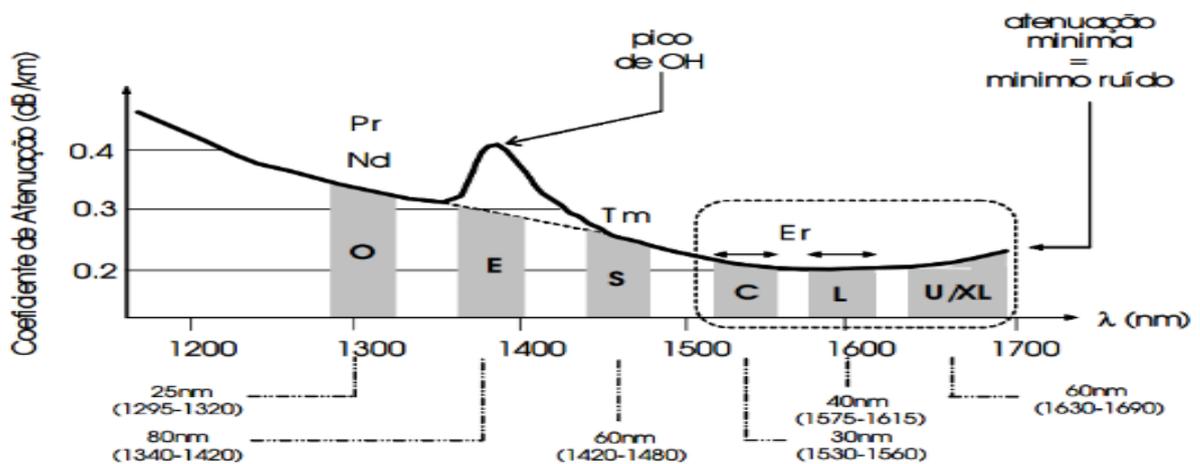


Figura 2.8 - Localização das bandas de transmissão dentro do espectro de atenuação da fibra de sílica [14].

Esse tipo de amplificador serve somente para amplificar enlaces DWDM, pois o range de frequência do EDFA está fora dos enlaces do tipo CWDM, por isso esse último tipo de enlace não é utilizado em longas distâncias, devido à falta de amplificadores que permitam isso [15]. Em sistemas terrestres de longa distância os EDFAs são espaçados em torno de 80 a 100 Kilômetros¹ e em sistemas submarinos de 40 a 60 Kilômetros [16].

Alguns fatores são determinantes para o desempenho de um amplificador, pois no ato da amplificação também insere ruídos indesejáveis resultantes da alta potência de entrada do sistema, isso ocorre devido ao limite de saturação, ou seja, qualquer amplificador degrada a relação sinal ruído (SNR – *Signal to Noise Ratio*) do sinal por causa da emissão espontânea amplificada (ASE – *Amplified Spontaneous Emission*) [2], isso também acontece com o EDFA.

O primeiro parâmetro que se deve levar em consideração em um amplificador é o seu ganho, dado em *dB* (decibel) por:

$$G = 10 \log \left(\frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \right). \quad (2.3)$$

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

¹ Grafia alterada em 2012 pelo Inmetro. Por Exemplo o prefixo “quilo” foi substituído por “Kilo”. Veja em: www.inmetro.gov.br [2].

O processo de ASE deteriora a SNR do sistema, pois é a principal responsável pelo ruído do amplificador [2], a quantificação da degradação adicionada ao sinal pelo amplificador é dada pela figura de ruído NF (*Noise Figure*):

$$NF = \left(\frac{SNR_{entrada}}{SNR_{saída}} \right). \quad (2.4)$$

Como o amplificador sempre adicionará ruído durante o processo de amplificação, pela equação 2.4 o valor da figura de ruído será sempre maior que 1. Em *dB* a figura de ruído é [13]:

$$NF = 10 \log \left(\frac{P_{ASE}}{h\nu\Delta\nu G} + \frac{1}{G} \right). \quad (2.5)$$

Onde P_{ASE} é potência da emissão espontânea amplificada, ν é frequência do sinal, h é a constante de Planck; $\Delta\nu$ a resolução do instrumento de medida (OSA) e G o ganho do sinal. Neste caso assume-se que $G \gg 1$. Para um EDFA prático a figura de ruído varia de 4 a 5 *dB* [1].

A relação sinal-ruído óptico (OSNR – *Optical Signal to Noise Ratio*) é a potência óptica gerada quando o sinal óptico é convertido em corrente elétrica [13], sendo considerada a principal fonte que determina o nível de ruído. Assim a OSNR é a razão entre P_{med} a potência média 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 [1]:

$$OSNR = 10 \log \frac{P_{med}}{P_{ASE}}. \quad (2.6)$$

O desempenho de um receptor óptico depende da OSNR, pois a medida que a potência do ruído ASE cresce o ganho do amplificador diminui e conseqüentemente a OSNR também diminui. Portanto a OSNR é uma métrica que pode ser usada no projeto de instalação de redes e também na verificação do desempenho dos canais ópticos individuais [1].

Outro resultado que também é utilizado para especificar o desempenho do receptor é o fator Q que é dado por [1]:

$$Q = \frac{2\sqrt{2}OSNR}{1 + \sqrt{1 + 4OSNR}}. \quad (2.7)$$

Existe uma relação entre os níveis de ruído do receptor (OSNR) ideal e o melhor fator Q definida por [1]:

$$OSNR = \frac{1}{2} Q(Q + \sqrt{2}). \quad (2.8)$$

E a relação entre a BER e o fator Q no limiar ótimo é expresso por [1]:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right). \quad (2.9)$$

Onde $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-y} dy$ é a função de erro [1].

Assim a taxa de erro de bit varia com o fator de qualidade, em [2, 17] é mostrado que um valor para Q igual a 6, tem como correspondente uma BER de 10^{-9} e uma OSNR de pelo menos 22,24 ou 13,5 dB. São valores ideais para os sistemas ópticos. Com uma OSNR aproximadamente igual a 13,5 dB obtém-se BER iguais ou superiores a 1×10^{-9} .

A OSNR pode ser medida através do analisador de espectro óptico (OSA – *Optical Signal Analyzer*) [1], em geral em projetos de redes ópticas é dado uma margem de segurança de desempenho de 3 a 6 dB, o que assegura que o limiar da BER não se exceda com a variação no tempo dos parâmetros, tais como: saída do transmissor e atenuação de linha ou ruído de fundo. Portanto, a medida que, a BER aumenta a OSNR diminui.

2.2 REFERÊNCIAS

- [1] KEISER, Gerd. *Optical Fiber Communications*. McGraw Hill. Fourth Edition, 2008.
- [2] AGRAWAL, Govind. *Sistemas de comunicação por fibra óptica*. Tradução José Rodolfo Souza. 4. ed. – Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2014.
- [3] KOSHY, Marvin Suraj; PRATHEESH, P. Analysis of SPM and FWM in Optical Fiber Communication System using Optisystem. In: *International Journal of Engineering Research and Technology*. IJERT, 2014.
- [4] FENG, Xian et al. Dispersion controlled highly nonlinear fibers for all-optical processing at telecoms wavelengths. *Optical Fiber Technology*, v. 16, n. 6, p. 378-391, 2010.
- [5] John D. Joannopoulos, Steven G. Johnson, Joshua N. Winn, Robert D. Meade, “*Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*”, Copyright by Princeton University Press, 2008.
- [6] PIRES, Luís et al. *Caracterização das propriedades ópticas de fibras microestruturadas contendo cristais líquidos*. Porto: FEUP, 2013.
- [7] ALMEIDA, Léo César Parente de. *Obtenção e análise da performance de portas lógicas totalmente ópticas baseadas em guias de onda de cristais fotônicos*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará, 2016.
- [8] SPADOTI, Danilo Henrique. *Proposição e Estudo de Fibras Ópticas Microestruturadas Tipo D: Gerenciamento de Dispersão e Alta Birrefringência*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2008.
- [9] OBAYYA, Salah; HAMEED, Mohamed Farhat O.; AREED, Nihal FF. *Computational liquid crystal photonics: fundamentals, modelling and applications*. John Wiley & Sons, 2016.
- [10] DE FRANCISCO, Carlos Alberto. *Fibras ópticas microestruturadas: modelagem e aplicações*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2004.
- [11] Xu, S. X., Zhou, L., & Xiao, J. 40 Gb/s Optical 3R-Regeneration Based on XPM and SPM in PCF. In *Advanced Materials Research* (Vol. 571, pp. 180-184). Trans Tech Publications, 2012.
- [12] POLI, Federica; CUCINOTTA, Annamaria; SELLERI, Stefano. *Photonic crystal fibers: properties and applications*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [13] DE FREITAS GUIMARÃES, Glendo. *Amplificador e conversor de comprimento de onda híbrido TDFA/FOPA para comunicações ópticas*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife – PE, 2006.
- [14] TAVEIRA, Palmerston Donizzeti. *Caracterização e análise de desempenho dos amplificadores ópticos Raman discretos em sistemas de comunicações ópticas na banda O*. Dissertação de Mestrado. Universidade Presbiteriana Mackenzie. São Paulo, 2006.
- [15] DIAS, Aquiles Macedo. *Análise de projetos de redes metropolitanas WDM*. Projeto de Diplomação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS, 2009.

- [16] DA SILVEIRA, Clenilson Rodrigues. Estudo de formatos especiais de modulação digital para comunicações ópticas. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2009.
- [17] PEREIRA, Odarley Fernandes. Caracterização de Fibras Ópticas Altamente não Lineares. Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto. 2012.
- [18] VERMA, Ajeet Singh; JAISWAL, A. K.; KUMAR, Mukesh. An improved methodology for dispersion compensation and synchronization in optical fiber communication networks. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering (IJETA), ISSN, p. 2250-2459, 2013.
- [19] NUNES, Frederico Dias. Sistemas de comunicação óptica. Renovarum, 2001.
- [20] ROBINSON, S.; NAKKEERAN, R. Photonic crystal ring resonator based optical filters. In: Advances in Photonic Crystals. InTech, 2013.

CAPÍTULO 3

3 ÓPTICA NÃO LINEAR

Neste capítulo serão apresentados o estado da arte no que diz respeito as equações que regem a óptica não linear, como as Equações de Maxwell e a sua relação com a propagação da luz e também a Equação não linear de *Schrödinger*, o método numérico *Split-Step Fourier*, uma breve apresentação do Optisystem, que foi software utilizado no desenvolvimento deste trabalho. E também apresenta um estudo dos fatores que degradam um sistema de comunicação e os efeitos não lineares, seus conceitos, suas principais causas e penalidades aos sistemas de comunicações ópticas.

3.1 PROPAGAÇÃO DA ONDA EM FIBRAS ÓPTICAS

A propagação das ondas eletromagnéticas em uma fibra óptica é determinada pelas equações de Maxwell, que para meios livres de cargas e de perdas, são dadas por [1]:

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

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

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

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

Onde o campo elétrico \vec{E} e o magnético \vec{H} , o deslocamento elétrico \vec{D} e a indução magnética \vec{B} . Devido a fibra óptica ser um meio não magnético estão relacionados aos vetores de campo por meio das relações [1]:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}. \quad (3.5)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}. \quad (3.6)$$

Sendo ϵ_0 e μ_0 a permissividade elétrica e a permeabilidade magnética do vácuo respectivamente. Neste caso a polarização magnética induzida \vec{M} é nula [1], por isso é suprimida da equação da indução magnética e \vec{P} é a polarização elétrica induzida no meio que é dada por [5]:

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi^{(1)} \vec{E} + \vec{P}_{NL}. \quad (3.7)$$

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

Calculando-se o rotacional da equação (3.1) e usando-se as equações (3.2), (3.5) e (3.6) é possível obter a equação que descreve os fenômenos ondulatórios dos campos eletromagnéticos da fibra óptica:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{P}}{\partial t^2}. \quad (3.8)$$

Onde $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$ a velocidade da luz no vácuo.

Fazendo $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$, com a permissividade do meio sendo $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ independentemente da posição, assim. $\nabla \cdot \vec{D} = 0 \Leftrightarrow \epsilon \nabla \cdot \vec{E} = 0 \Leftrightarrow \nabla \cdot \vec{E} = 0$

Usando a identidade vetorial, $\nabla \times \nabla \times \vec{E} \equiv \nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \cdot \vec{E} = -\nabla^2 \cdot \vec{E}$, portanto a equação 3.8 poderá ser escrita como:

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{P}}{\partial t^2} \quad (3.9)$$

3.2 FATORES QUE DEGRADAM O SINAL EM FIBRAS ÓPTICAS

Dois fatores limitantes na propagação do pulso em fibras ópticas são a atenuação e a dispersão, apesar de que boa parte desses entraves que ocorriam de maneira mais grave nas redes de comunicações por fibra óptica já foram resolvidos com os avanços das pesquisas e das fabricações das fibras ópticas e dos demais dispositivos. Porém é importante conhecer as principais causas, as consequências e as possíveis soluções para esses problemas que ainda persistem em sistemas ópticos.

3.2.1 Atenuação

As perdas resultantes da propagação do pulso ao longo da fibra, são fatores que contribuem para a redução da potência do sinal enviado do transmissor ao receptor [1, 2]. O coeficiente de atenuação é dependente 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.

A figura 3.1 mostra as janelas de comunicação, com exceção da primeira janela que está na faixa de 800 nm [3] e também é possível visualizar que na faixa em torno de 1550 nm ocorre o mínimo de perdas.

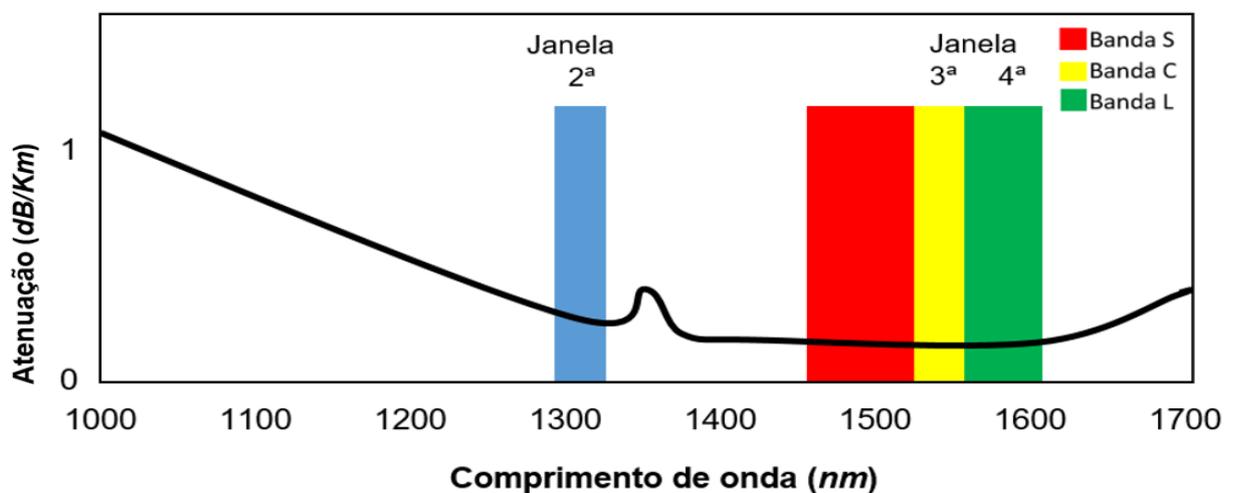


Figura 3.1 - Gráfico da atenuação em fibra óptica em função do comprimento de onda [Adaptado de 3].

Um fator importante em relação a eficiência da transmissão óptica e que sofre influências da atenuação é a potência de saída $P_{saída}$ que em uma fibra de comprimento L é dada por:

$$P_{saída} = P_{entrada} e^{(-\alpha L)}. \quad (3.10)$$

Sendo $P_{entrada}$ a potência de entrada e α a atenuação ou parâmetro de perda da fibra que é expressado em unidade de decibéis por quilometro e é calculada por [2]:

$$\alpha(dB/Km) = -\frac{10}{L} \log_{10} \left(\frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \right) \approx 4,343\alpha. \quad (3.11)$$

Entre as causas mais importantes para a atenuação de um sinal estão a absorção do material e o espalhamento Rayleigh [3]. A absorção material pode ocorrer no processo de fabricação que devido algumas impurezas dos materiais utilizados que poderão influenciar na atenuação global da fibra óptica. O espalhamento Rayleigh acontece devido aos movimentos aleatórios das moléculas da sílica fundida que remete as flutuações aleatórias do índice de refração da fibra no momento da propagação do sinal óptico.

3.2.2 Dispersão

A dispersão consiste em um alargamento espectral do pulso. Este fenômeno está relacionado aos modos de propagação de sinais na fibra óptica, que ocorre em velocidades diferentes, resultando em atrasos, que conseqüentemente leva a distorções dos sinais transmitidos, limitando o desempenho do sistema.

Em sistemas WDM ocorre uma interferência intersimbólica entre os diferentes comprimentos de ondas. O alto valor do coeficiente de dispersão cromática da fibra poderá influenciar no aumento dos efeitos de mistura de quatro ondas (FWM) como é mostrado na tabela 3.2 da sessão 3.3.3.

A dispersão cromática ou dispersão velocidade de grupo (GVD - *Group Velocity Dispersion*) em comprimento de onda λ específico pode ser calculada pela seguinte equação [1]:

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \text{ ps}/(nm.km). \quad (3.12)$$

Sendo c a velocidade da luz no vácuo e β_2 é o parâmetro de GVD o qual determina quanto um pulso se alarga à medida que a luz se propaga na fibra.

Outro parâmetro da fibra que também é muito importante é a inclinação de dispersão (*dispersion slope*), S determinada por [4, 5]:

$$S = \frac{dD}{d\lambda} = \frac{4\pi c}{\lambda^3} \beta_2 + \left(\frac{2\pi c}{\lambda^2} \right)^2 \beta_3 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{Km}). \quad (3.13)$$

A maioria das fibras têm $S > 0$, importante valor para sistemas WDM, canais diferentes têm valores de dispersão diferentes, isso torna difícil compensar a dispersão para todos os canais iguais e simultaneamente [1, 4].

A faixa de compensação de dispersão em sistemas ópticos de banda larga é denominada inclinação relativa da dispersão RDS (*Relative Dispersion Slope*), que pode ser determinada pela relação entre os parâmetros da dispersão cromática e da inclinação de dispersão [5]:

$$RDS = \frac{S_{dc}}{D_{dc}} = \frac{S_s}{D_s} [\text{nm}^{-1}]. \quad (3.14)$$

Onde D_{dc} e S_{dc} são respectivamente o valor da dispersão e da inclinação de dispersão da fibra compensadora, D_s e S_s são os valores da dispersão e inclinação de dispersão da fibra utilizada no enlace óptico em que se deseja fazer compensação. O valor de RDS é utilizado para determinar por exemplo se a fibra compensadora de dispersão é para banda estreita ou para banda larga [5].

Na dispersão pode ocorrer um atraso na chegada dos pulsos de luz no final da fibra, devido aos vários fatores como a dispersão intermodal, dispersão intramodal, dispersão do modo de polarização e efeitos de dispersão de ordem superior [2].

Esse fenômeno ocorre comumente em fibras multimodo de índice em degrau ou gradual, o qual relaciona-se aos vários modos de propagação dos pulsos, alguns chegam em momentos diferentes na saída de fibra, devido aos caminhos diferentes percorridos por cada pulso. Isto ocorre maneira mais significativa em fibras de índice em degrau.

A figura 3.2, mostra como acontece a dispersão em uma fibra óptica, cada cor representa um comprimento de onda diferente, o que ocorre com o sinal de entrada e de saída também pode ser visualizado.

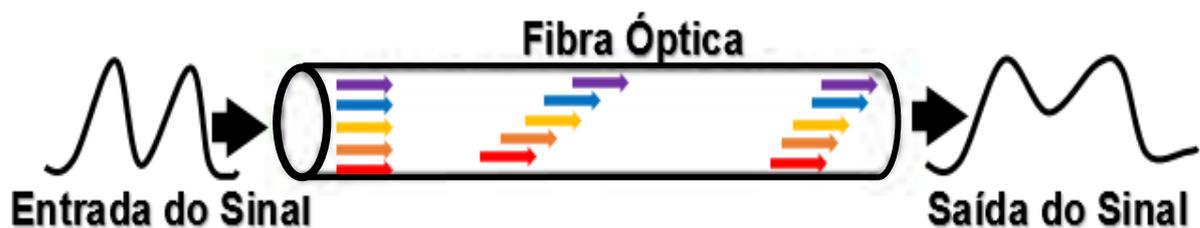


Figura 3.2 - Fenômeno da dispersão em fibra óptica. [Adaptado de 6].

Existe uma relação entre os valores usuais dos coeficientes de dispersão D com comprimento L da fibra. Em projetos de redes de comunicação por fibra óptica em que é

necessário usar dois segmentos de fibras diferentes como uma SMF e uma DCF ou PCF, tendo determinado o comprimento da SMF e o coeficiente de dispersão da SMF e da PCF. É possível determinar por exemplo o comprimento da PCF pela seguinte equação [2]:

$$L_{PCF} = L_{SMF} \times \left| \frac{D_{SMF}}{D_{PCF}} \right|. \quad (3.15)$$

Em [6] são apresentados os valores usuais para o coeficiente de dispersão de algumas fibras e as suas características para o comprimento de onda $\lambda = 1550nm$ em que a SMF tem $D = 17 ps/nm.Km$, possui alta dispersão e baixa não linearidade, a DSF tem $D = 0 ps/nm.Km$, com dispersão nula e alta não linearidade, a NZDSF tem $D = 1.6 ps/nm.Km$, com baixa dispersão e não linearidade moderada e DCF (*Dispersion Compensated Fiber*) tem $D = -80 ps/nm.Km$, com alta dispersão negativa e alta não linearidade. Se fossem usadas como exemplo uma SMF com $50 Km$ de comprimento seria necessário $10,6 Km$ de fibra DCF para a implantação de uma rede de comunicações ópticas para compensação de dispersão.

No geral tanto a atenuação quanto a dispersão são fatores que comprometem o desempenho do sistema de telecomunicações por fibra óptica. Vale ressaltar que esses valores de dispersão e atenuação podem variar de acordo com a otimização que se pretende fazer em um determinado projeto de redes ópticas.

A dispersão é considerada um dos fatores limitantes para os sistemas de transmissão de dados por fibras ópticas, tornando-se mais crítico à medida que a taxa de transmissão se aproxima de $10 Gbit/s$ [5]. Em [7] é mostrado que o alargamento espectral do pulso em link óptico com SMF pode ser consideravelmente compensado com a inserção do tamanho ideal de uma DCF, mas melhores resultados podem ser encontrados com a utilização de fibras microestruturadas, pois são bastante adequadas para compensação de dispersão em sistemas WDM de banda larga [1]. Já em [8] é mostrado que as fibras altamente não lineares também poderão ser usadas para o controle da dispersão.

3.3 EFEITOS NÃO LINEARES EM FIBRAS ÓPTICAS

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]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \frac{1}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} + \frac{\alpha A}{2} = i\gamma |A|^2 A . \quad (3.16)$$

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]:

$$\gamma = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{n_2}{A_{ef}} . \quad (3.17)$$

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 $W^{-1}Km^{-1}$, conforme o tipo de fibra e o comprimento de onda [2].

As não linearidades são classificadas como mostra a tabela 2.1, 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 (3.7), pode ser representada em série de potências crescentes do campo elétrico \vec{E} , como [9, 10]:

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \sum_n \chi^{(j)} E^{(j)} . \quad (3.18)$$

Sendo ε_0 a permissividade do vácuo e $\chi^{(j)}$, 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]:

$$I = \frac{P}{A_{ef}} . \quad (3.19)$$

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

$$n = n_0 + n_2 \frac{P}{A_{ef}} . \quad (3.20)$$

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 [11]:

$$A_{ef} = \frac{\left[\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |F(x, y)|^2 dx dy \right]^2}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |F(x, y)|^4 dx dy} \quad (3.21)$$

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

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: Adaptado de [2].

Pela equação (3.20) pode-se afirmar que a intensidade do sinal de entrada induz o aumento do índice de refração do material. E que n_2 é o responsável pela não linearidade Kerr, através de três efeitos, os quais serão apresentados a seguir.

3.3.1 Automodulação de Fase (SPM – *Self-Phase Modulation*)

Manifesta-se em sistema com único canal, refere-se ao deslocamento de fase auto induzido, capaz de limitar o desempenho do sistema ao longo do comprimento da fibra óptica. Também denominado por *chirping* (gorjeio) de frequência (consiste em um alargamento do espectro do pulso no domínio da frequência, mas mantêm a forma temporal), o qual é dependente da intensidade da potência que incide sobre o índice de refração e do coeficiente de não linearidade da fibra.

Estas variações no índice de refração resultam em mudanças de fase dependentes do tempo. Assim o SPM é determinado por [12]:

$$\phi_{SPM}^{NL} = \gamma |E_1|^2 L_{ef} . \quad (3.22)$$

Em que $|E|$ é o módulo do campo elétrico e L_{ef} é o comprimento efetivo da fibra que leva em conta a absorção da energia ao longo do comprimento da fibra, o qual é definido por [2]:

$$L_{ef} = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha} . \quad (3.23)$$

Através do analisador do espectro óptico (OSA – *Optical Spectrum Analyzer*) é possível visualizar o efeito de SPM, como mostra a figura 3.3.

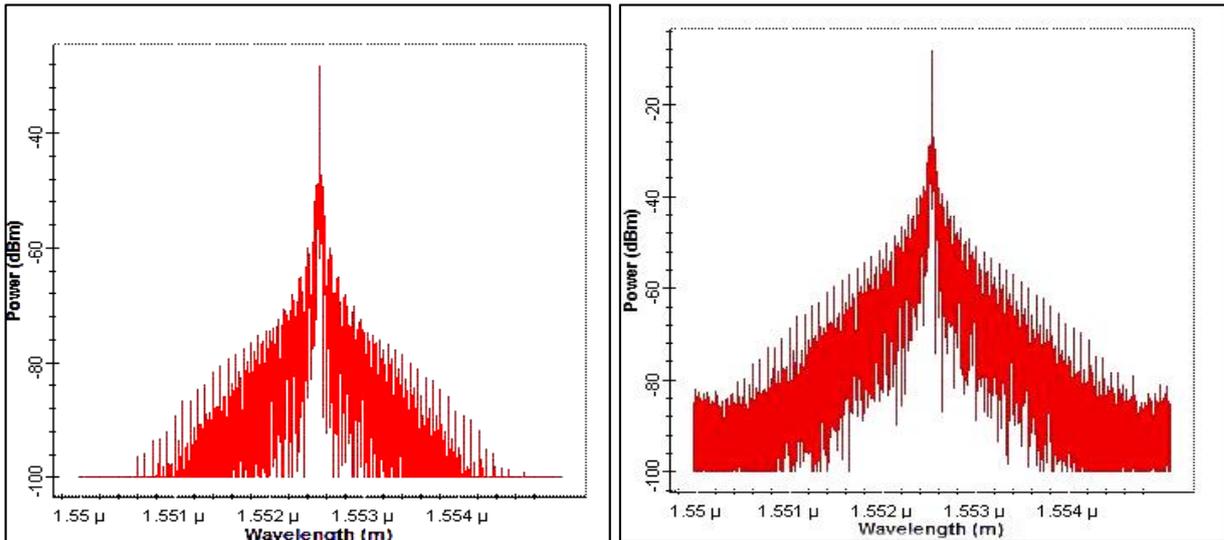


Figura 3.3 - Espectro do sinal na saída do receptor (esquerda) e o espectro após a propagação do pulso em uma SMF de 100 km (direita).

O espectro da esquerda na figura 3.3, refere-se ao sinal na saída do receptor e o da direita o espectro após a propagação do pulso em uma SMF de 100 Km a uma potência de entrada de 16 dBm. Nota-se que ocorreu um considerado alargamento suplementar do pulso, isso mostra a relação entre o efeito de SPM com o aumento da potência de entrada. Esse aumento da largura de faixa compromete o desempenho do sistema.

As degradações ocorridas pelo fenômeno de SPM em uma rede óptica também podem ser observadas e analisadas através do diagrama de olho. A forma e/ou a altura do olho pode indicar se a SPM está comprometendo ou não o desempenho do sistema.

Em [13] foi mostrado que a BER aumentou de $9,8 \times 10^{-7}$ para 0,07 e o fator de qualidade (fator Q) diminuiu de 4,8 para 1,3 com a variação da potência de entrada de -10 dBm para 10 dBm. Portanto, afirma-se que com o aumento da potência de entrada, a BER aumenta e o fator de qualidade (fator Q) diminui, conseqüentemente o efeito da automodulação de fase cresce, assim o sinal enfraquece e a abertura ocular também diminui. Através da variação da taxa de bit e do comprimento da fibra também é possível fazer tais observações do desempenho do sistema em decorrência da SPM.

3.3.2 Modulação de Fase Cruzada (XPM – *Cross-Phase Modulation*)

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 numa mesma fibra óptica como em sistemas WDMs.

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]. Assim 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 [11]:

$$\vec{E} = \frac{1}{2} \hat{x}(E_1 e^{-i\omega_1 t} + E_2 e^{-i\omega_2 t}) + c \bullet c. \quad (3.24)$$

Onde $c \bullet c$ é o complexo conjugado.

Após a propagação ao longo da distância $L = Z$ da fibra, a fase não linear do campo para as frequências ω_1 e ω_2 é dada respectivamente por [11]:

$$\phi_j^{NL} = n_2 \frac{2\pi}{\lambda} (|E_j|^2 + 2|E_{3-j}|^2) Z \quad (3.25)$$

Pela equação (3.25) considerando-se a mesma intensidade de campo elétrico e comprimentos de ondas diferentes, observa-se que a contribuição de XPM (segundo termo da equação) para o desvio de fase é o dobro da SPM (primeiro termo da equação) [2]. Assim na transmissão de apenas luz monocromática a equação (3.25) é simplificada na forma do deslocamento de fase do SPM, mas se $E_{3-j} \gg E_j$, a SPM pode ser desprezada e a equação (3.25), para o desvio de fase no j -ésimo canal é dada por [13]:

$$\phi_{XPM}^{NL} = 2\gamma |E_{3-j}|^2 L. \quad (3.26)$$

O diagrama de olho também é o mais recomendado para análise e visualização do efeito de XPM. Em [12, 13] são apresentadas algumas técnicas de redução de XPM, tais como: as variações no espaçamento entre canais e da taxa de bits. Mostraram que o aumento do espaçamento entre canais pode reduzir os efeitos de XPM, pois o fator Q aumentou e a taxa de erro de bit diminuiu. E no outro caso em uma das simulações é apresentado que com o aumento da taxa de bits, os espectros dos canais se espalharam, aumentando assim a BER e a transferência de potência de XPM como determina a equação (3.26).

Os resultados obtidos em [13], são apresentados através da figura 3.4, pela variação da potência de entrada, onde obteve-se uma BER que aumentou de $5,3 \times 10^{-6}$ para 0,0005 e um fator de qualidade que diminuiu de 4,4 para 3,2, com o aumento da potência de entrada, que neste caso variou de 0 dBm para 16 dBm. Portanto, o efeito de XPM também aumenta, com o aumento da potência de entrada, degradando o desempenho do sistema.

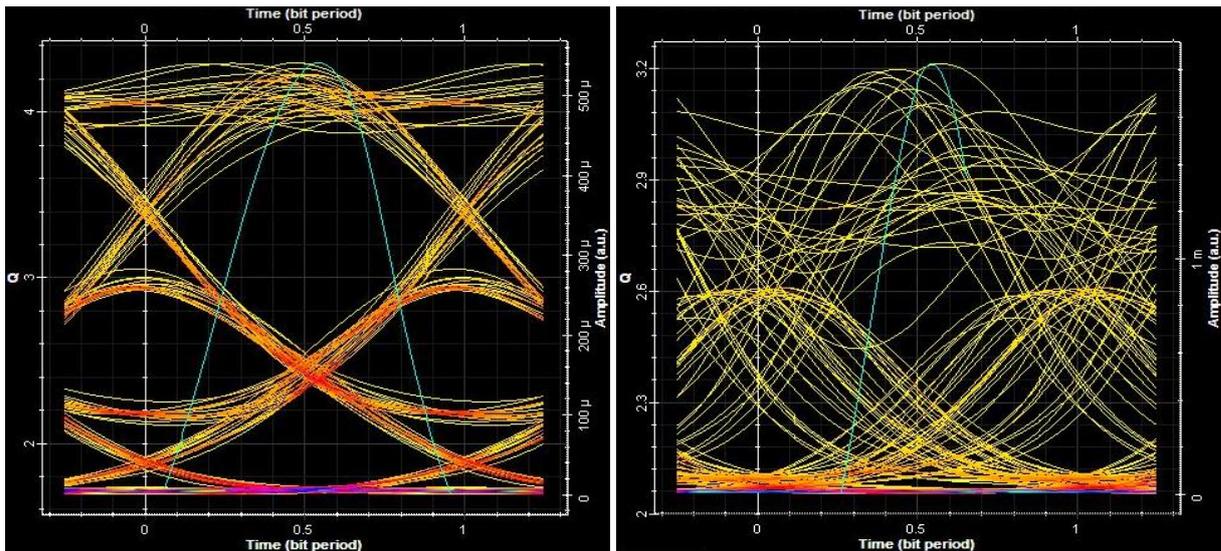


Figura 3.4 - Diagramas oculares de XPM para 0 dBm (esquerda) e 16 dBm (direita) [13].

O efeito de XPM pode acarretar sérios problemas aos 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 [2]. No caso dos com múltiplos canais fica difícil estimar o impacto desse efeito, pois o mesmo age individualmente, sem os efeitos dispersivos, nesse sentido o deslocamento induzido por XPM pode ocorrer somente quando dois pulsos de luz se sobrepõem no espaço e no tempo, assim quando o espaçamento entre canais for grande, pode ocorrer uma redução nos efeitos de XPM, já em canais mais próximos os efeitos de XPM se acumulam [1].

Outro fator também importante que pode influenciar sobre as penalidades de XPM e nos demais efeitos não lineares é o formato de modulação do pulso, por exemplo a do tipo retorno ao zero (RZ – *Return to Zero*) é preferido sobre a codificação não retorno ao zero (NZR – *Non-return to Zero*) devido a sua melhor tolerância aos efeitos não lineares na fibra [14].

3.3.3 Mistura de Quatro Ondas (FWM – *Four-Wave Mixing*)

O efeito de FWM é denominado como um processo paramétrico em que diferentes frequências interferem com as frequências originais em dois ou mais canais, gerando novos produtos espectrais. São ondas parasitas, também chamadas de bandas laterais que podem oferecer sérios problemas aos sistemas, como por exemplo o *crosstalk* (diafonia grave) [2].

A figura 3.5 mostra um exemplo da degradação do sinal devido ao fenômeno de FWM em um sistema WDM com dois e com três canais.

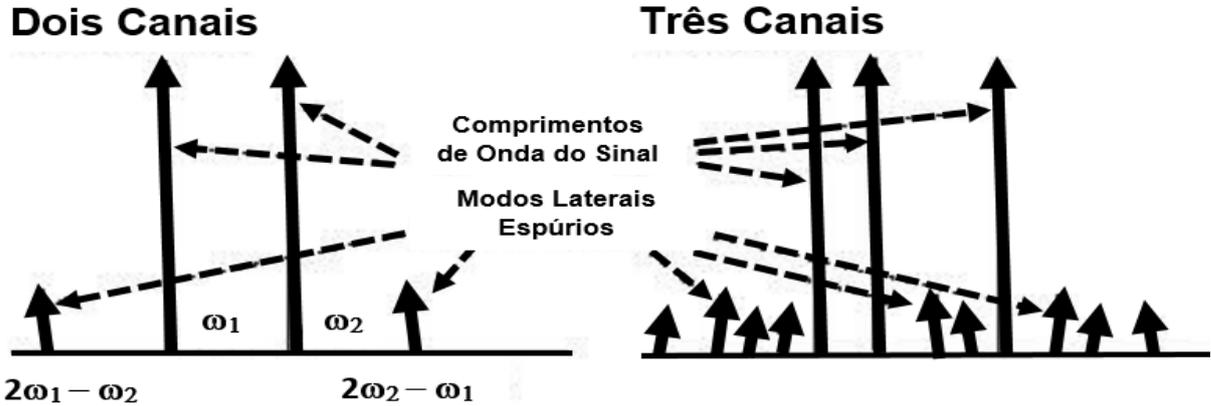


Figura 3.5 - Efeito de FWM no domínio da frequência [adaptado de 15].

Pode-se notar que a interação entre as três frequências originais ω_i , ω_j e ω_k , com $k \neq i, j$, interagem uns com os outros através da susceptibilidade de terceira ordem da fibra óptica, dando origem a nove ondas novas dadas por [16]:

$$\omega_{ijk} = \omega_i + \omega_j - \omega_k \quad (3.27)$$

Onde, $(i, j, k = 1, 2, 3$ respectivamente).

A potência dos produtos de FWM P_{ijk} gerado pelas frequências ω_i, ω_j e ω_k em fibras ópticas de comprimento L pode ser determinada pela seguinte equação [16]:

$$P_{ijk}(L) = \eta(d_{ijk}k)^2 P_i(0)P_j(0)P_k(0)e^{-\alpha L}. \quad (3.28)$$

Onde d_{ijk} é fator de degeneração em que para dois ou três comprimentos de ondas tem valor igual a 3 ou 6 respectivamente [2], P_i, P_j, P_k são valores de potência de três ondas de entrada, L_{ef} é o comprimento efetivo, k é a constante de interação não linear:

$$k = \frac{32\pi^3 \chi^{(3)}}{n_2 \lambda c} \left(\frac{L_{ef}}{A_{ef}} \right). \quad (3.29)$$

E η é a eficiência da FWM é dada por [16]:

$$\eta = \frac{a^2}{a^2 + \Delta\beta^2} \left(1 + \frac{4e^{-\alpha L} \sin^2\left(\frac{\Delta\beta}{2}\right)}{(1 - e^{-\alpha L})^2} \right) \quad (3.30)$$

Onde $\Delta\beta$ é o coeficiente de propagação que pode ser escrito como [16]:

$$\Delta\beta = \beta_{ijk} + \beta_k - \beta_j - \beta_i \quad (3.31)$$

Sendo, β a propagação da luz.

Conseqüentemente, devido ao efeito de FWM ocorrerá um aumento de M bandas laterais de acordo para o número N de canais da seguinte forma:

$$M = \left(\frac{N^3 - N^2}{2} \right) \quad (3.32)$$

Então, para um projeto de sistema de comunicação por fibra óptica com 8 canais serão produzidas 224 bandas laterais. Estas novas frequências causam sérios danos para o desempenho do sistema. Em geral o número destas bandas laterais cresce geometricamente com o aumento do número de canais de comunicação, como mostrado no gráfico da figura 3.6.

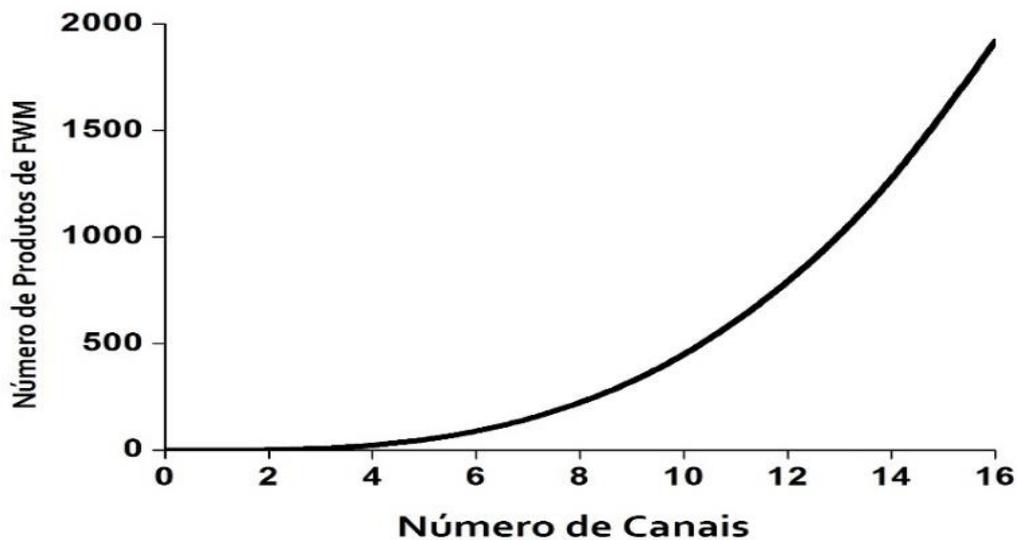


Figura 3.6 - Número de bandas laterais de FWM [Adaptado de 17].

Este fenômeno é também chamado de *crosstalk* de FWM [1], o mesmo é considerado o principal parâmetro para avaliação do desempenho de um sistema WDM, e se apresenta de dois tipos [15]:

- **Crosstalk Heteródino:** São as interferências que ocorrem de forma inter-canal, ou seja, fora da largura de banda do canal que conseqüentemente aumenta a BER e reduz o fator de qualidade.
- **Crosstalk Homódino:** São as interferências de forma intracanal, ou seja, dentro da largura de banda do canal.

Nesse sentido vale enfatizar que o FWM tem sido um fator limitante na criação e implantação de projetos de telecomunicações por fibra óptica, por isso para que uma rede seja considerada confiável é necessário a redução deste efeito. Isso é possível através da variação de alguns parâmetros, sabe-se que a mistura de quatro ondas é independente da taxa de bits [16], mas, depende do índice de refração, da intensidade de potência dos sinais, da baixa dispersão cromática, do aumento da área efetiva e do aumento do espaçamento entre canais [2].

Em [2] são mostrados alguns métodos de supressão de FWM que deram origem a algumas categorias de fibras como a fibra monomodo padrão G.652, a qual tem dispersão de aproximadamente 17 ps/nm.Km para a banda C, porém perde eficiência com taxas de bits de 2,5 ou 10 Gb/s. Devido aos problemas enfrentados pelas fibras G.652 e G653, surgiu a fibra G.655, a qual tem valor de dispersão de 3 a 9 ps/nm.Km na banda C.

Existem outras versões desta fibra as quais são capazes de suprimir os efeitos de FWM, que são: a G.655B recomendada para as bandas S e C, a G.655.D que tem dispersão cromática baixa variando de 2,8 a $6,2 \text{ ps/nm.Km}$ em $1,550 \text{ nm}$ e a fibra G.655.E considerada de média dispersão de 6,06 a $9,31 \text{ ps/nm.Km}$ em $1,550 \text{ nm}$.

Um dos problemas inevitáveis em sistemas ópticos é a acumulação de dispersão cromática ao longo do enlace da fibra, a recomendação para a redução deste problema é a utilização de fibras compensadoras de dispersão.

Para mostrar melhor o que acontece com o desempenho de um sistema óptico em decorrência do efeito de FWM, em [13] isto é apresentado através de um link com uma SMF com dispersão igual a 16 ps/nm.Km para a banda C, com modulação não retorno ao zero (NZR - *Non Return to Zero*), com potência de 0 dBm e espaçamento entre canais de 100 GHz. Na figura 3.7 a esquerda é possível verificar os oito canais do sistema WDM, na saída do transmissor em que sinaliza a faixa de frequência de 193,1 a $193,8 \text{ THz}$. Já na figura 3.7 a direita mostra o que ocorreu com o sinal na saída de uma fibra monomodo padrão (SMF).

Observe que no início não há nenhuma interferência entre canais na saída do transmissor, porém a figura 3.7 a direita, mostra que quando os sinais se propagam ao longo do comprimento da SMF os produtos de FWM surgem, mesmo sem variação de potência de entrada. Como já foi dito anteriormente a intensidade da potência também influencia sobre o efeito de FWM.

Em [13] é mostrado através da análise dos resultados do efeito de FWM no sistema, que quando a potência de entrada é variada por exemplo de 13 à 20 dBm são gerados mais produtos

de FWM. Isso mostra que a medida que a potencia de entrada aumenta o efeito de FWM também aumenta significativamente.

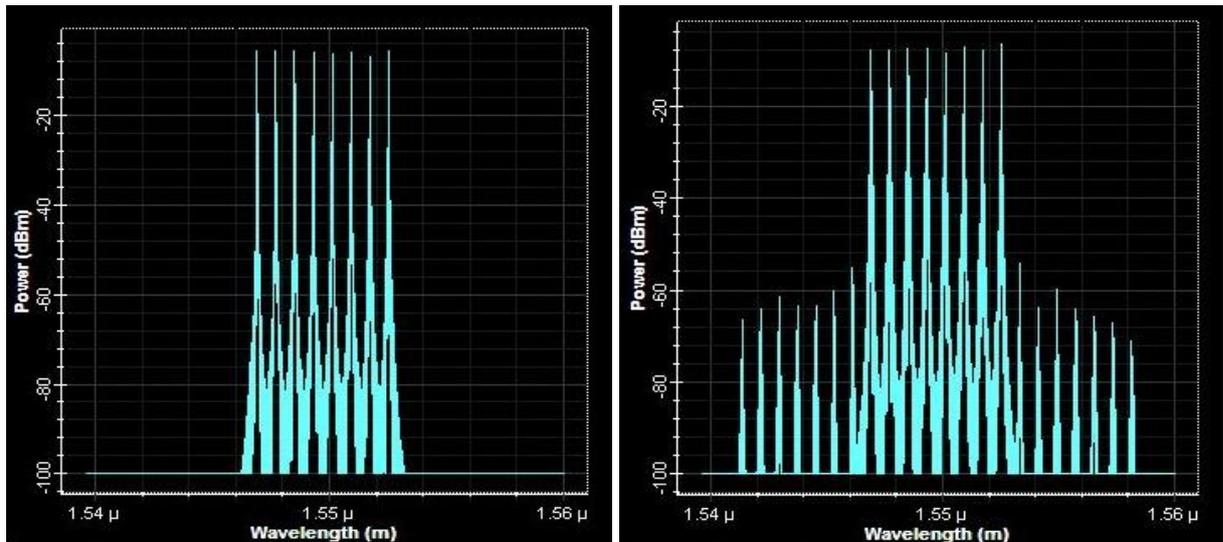


Figura 3.7 - Sinal de entrada (esquerda) e sinal óptico de saída (direita) do circuito FWM a 0 dBm [13].

Para esse mesmo projeto em [13] através do diagrama de olho obteve-se os valores do fator Q obtidos para espaçamentos entre canais de 100 GHz e 200 GHz, foram 4,4 e 5,8 e os valores da BER foram $5,3 \times 10^{-6}$ e $3,2 \times 10^{-9}$ respectivamente, isto é, com o aumento do espaçamento entre canais houve uma redução da potência das bandas laterais, assim o efeito de FWM também foi reduzido.

Uma possível solução para o abrandamento de FWM no sistema dado seria variar o valor da dispersão cromática ou a área efetiva da SMF utilizada e também a taxa de bit do sistema [2]. A análise da intensidade do efeito de FWM em detrimento da dispersão cromática de uma SMF, pode ser observado variando-se esse parâmetro de 10 a 16 ps/nm.Km a uma potência de entrada de 20 dBm, assim quando o valor do parâmetro de dispersão cromática é reduzido os níveis de potência de produtos FWM aumentam.

A tabela 3.2 confirma a mesma análise mostrando que com o aumento do coeficiente de dispersão o fator Q e altura do olho crescem e a taxa de erro de bits decresce, conseqüentemente é reduzido o efeito da mistura de quatro ondas. Isto significa que experimentalmente os produtos de FWM atingem sua potência máxima quando a dispersão das fibras é igual a zero [16].

Tabela 3.2- Comparação de diagramas de olho para a dispersão cromática diferente.

DISPERSÃO CROMÁTICA	FATOR Q	BER	ALTURA DO OLHO
10	3,6	$1,1 \times 10^{-4}$	0,0008
12	3,3	$3,9 \times 10^{-4}$	0,0004
14	4	$2,3 \times 10^{-5}$	0,001
16	4,2	$1,1 \times 10^{-5}$	0,001

Fonte: Próprio autor.

Para a análise do efeito da variação da área efetiva de uma SMF, pode-se fazer uma análise através do diagrama de olho e encontra-se como resultados para uma área efetiva da fibra óptica de $65 \mu m^2$ obtém-se um fator de qualidade igual a 3,7 e BER igual a $7,8 \times 10^{-5}$, já para a fibra óptica de área efetiva igual $80 \mu m^2$ obtém-se um fator de qualidade 4,4 e BER igual a $6,7 \times 10^{-6}$. Neste caso, com o aumento da área efetiva a abertura do olho aumentou de 0,0015 para 0,0027, assim, também aumentou o fator Q e diminuiu a BER. Portanto, com o aumento da área efetiva da fibra os efeitos de FWM são reduzidos.

Isso ocorre porque, de acordo com a equação (3.17), a não-linearidade depende inversamente da área modal efetiva da fibra óptica, nesse sentido os efeitos não lineares em geral podem ser consideravelmente reduzidos com o aumento da área efetiva [1]. Em regime de dispersão anômala ($\beta_2 > 0$) e para $\alpha = 0$ a solução numérica da equação (3.16) mostra que o alargamento espectral induzido por dispersão pode ser consideravelmente reduzido, onde o sinal ficará na forma de uma secante hiperbólica e propagará sem alterar a sua forma, correspondendo a sólitons.

O efeito da FWM é prejudicial para o sistema de WDM, principalmente quando é do tipo DWDM, devido aos cruzamentos de canais que podem interferir um com o outro. Esta característica de transferência de dados para um comprimento de onda diferente, pode possibilitar a realização de técnicas ideais para que determinado sinal seja enviado para o canal desejado.

Entre as aplicações de FWM valem a pena destacar a amplificação paramétrica, a geração de supercontínuum, a conjugação de fase óptica, a demultiplexação de conversão de canal e o comprimento de onda OTDM de canais WDM [15]. Além dessas aplicações, sabendo qual é dinâmica do efeito de FWM é possível trabalhar com técnicas de supressão de FWM através da polarização linear [16], mudanças no comprimento da fibra [17], modulação de

híbrida [15] e também regeneração de sinal 2R ou 3R. De modo geral os efeitos não lineares nem sempre são deletérios para os sistemas de telecomunicações por fibra óptica [1].

3.4 METODOS E SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

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 3.3 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 [18] e de lá para cá vem sendo utilizado em diversos problemas ópticos, como a propagação de ondas atmosféricas, fibras ópticas, lasers, ressoadores e acopladores.

Através 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 (3.16) é escrita de maneira formal [19]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} = (\hat{D} + \hat{N})A \quad (3.32)$$

Sendo \hat{D} o operador diferencial que corresponde a dispersão e a atenuação da fibra e \hat{N} é o operador não linear que envolve as não linearidades da fibra durante a propagação do sinal. Nesse sentido os operadores são determinados por [18]:

$$\hat{D} = -\frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\alpha}{2} \quad (3.33)$$

$$\hat{N} = i\gamma |A|^2 \quad (3.34)$$

Uma solução aproximada é dada por:

$$A(z+h, t) = e^{h\hat{D}} e^{h\hat{N}} A(z, t) \quad (3.35)$$

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

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.

O *software Optisystem* da empresa canadense *Optiwave Corporation* é um simulador baseado em modelagem realista de rede óptica, o mesmo tem sido bastante utilizado para o desenvolvimento de diversos projetos de sistemas de comunicações, pois apresenta uma extensa biblioteca de componentes ativos e passivos no domínio elétrico e óptico tais como: transmissores, fibras, receptores, amplificadores ópticos, multiplexadores, demultiplexadores, e etc., que permitem a alteração de seus parâmetros tanto no geral quanto no particular. 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.

O Optisystem permite planejar, testar e simular qualquer enlace óptico na camada física de um amplo espectro de redes ópticas [20]. A interface deste poderoso *software* é mostrada na figura 3.8.

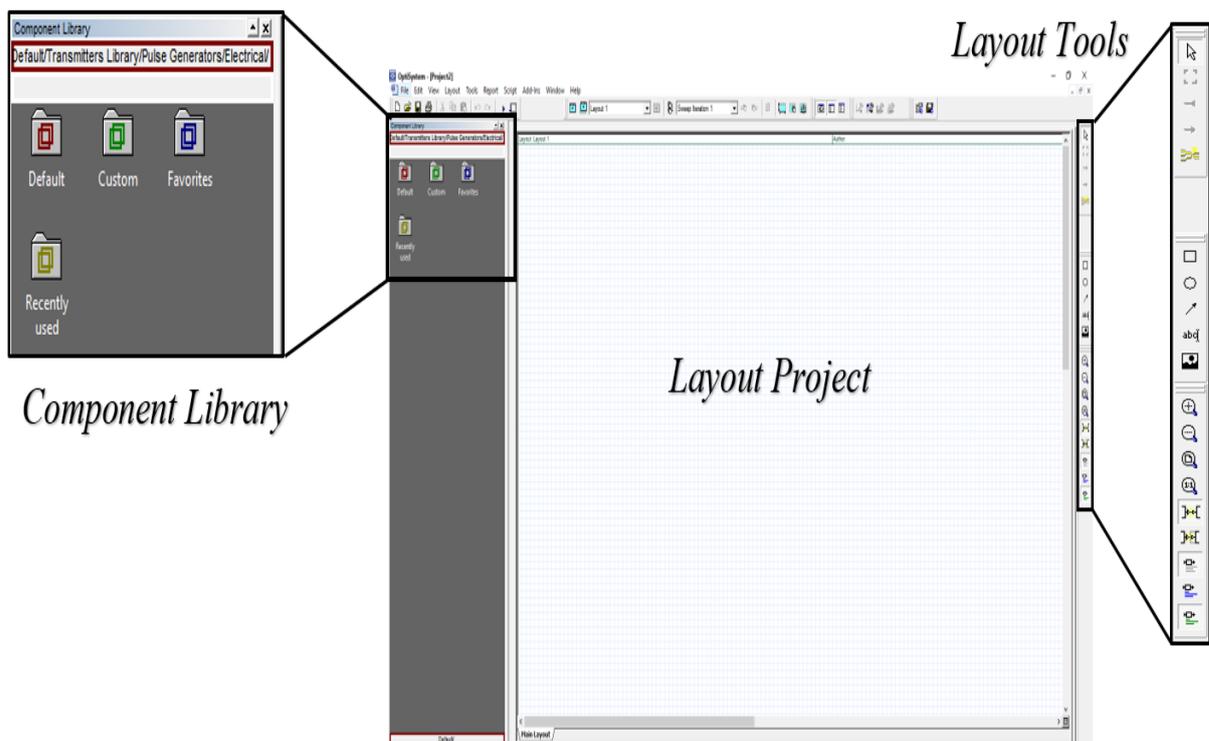


Figura 3.8 - Interface do *software* Optisystem.

Note que a interface gráfica do *software* é bem intuitiva, a mesma é composta basicamente de três partes principais. A *Component Library* em que está localizada todos os componentes ativos e passivos e visualizadores que poderão ser utilizados para a análise do desempenho do sistema. O *Layout Project* é a parte central em que o todo o projeto será criado, com um simples clique e arraste do *mouse* levando os componentes da *component library* até o local desejado no *layout project*. E o *Layout Tools* dispõem de diversas ferramentas como lupa, editor de texto, conectores para subsistemas e também permite inserir imagens.

Quando finalizada a configuração do sistema no Optisystem, a sequência de bits ópticos propagaram pelo enlace por meio da equação não linear de Schrödinger, a qual foi apresentada no capítulo 3. Este simulador de redes de comunicação está em constantes atualizações a sua versão atual é a OptiSystem 14.2.1, que inclui um novo componente de co-simulação C++, mesmo que componente Cpp do Optisystem, o qual é similar ao componente MATLAB, em que o usuário importa os algoritmos personalizados através da biblioteca de link dinâmico (*Dynamic Link Libraries - DLLs*) com qualquer outro componente Optisystem outra forma é o usuário desenvolver no Microsoft Visual Studio 2013 profissional (comercial) ou comunidade (livre) como também no MATLAB [21].

O *software* OptiSystem está disponível para *download* no seu site oficial www.optiwave.com, na versão *trial* ou paga somente para o sistema operacional *Microsoft Windows* 64 bits, além do *software* e dos tutoriais em inglês, neste site também se encontra o OptiPerformer, este outro não permite alterar ou criar uma rede nele, pois o mesmo só serve para visualizar ou apresentar um projeto criado no OptiSystem e que foi salvo para a versão OptiPerformer.

Em fim o Optisystem possui as ferramentas ideais para a otimização de qualquer um dos parâmetros da rede e solução da equação NLS através do método SSF, para que o pesquisador, estudante, engenheiro de telecomunicações e/ou projetista encontrem a configuração ideal e com o menor custo possível.

A varredura dos parâmetros, tais como: a taxa de bit, a frequência, a potência e o comprimento de onda podem ser feitos através dos grupos de parâmetros (*Parameter Groups*), isso só é permitido por meio da ativação do *parameters sweeps* do determinado parâmetro que se quer variar, este procedimento permite encontrar através de um número de interações, uma gama de resultados que poderão determinar por exemplo a eficiência do sistema criado antes que o mesmo seja implementado no mundo real. Esta possibilidade foi explorada no capítulo 5

como também a otimização das fibras utilizadas para a busca da melhor regeneração 3R do sinal óptico.

3.5 REFERÊNCIAS

- [1] AGRAWAL, G.P. Fiber-optic communication systems. 3rd. edition Wiley Sons - Interscience, New York, 2002.
- [2] KEISER, Gerd. Optical Fiber Communications. Mcgraw Hill. Fourth Edition, 2008.
- [3] DE FREITAS GUIMARÃES, Glendo. Amplificador e conversor de comprimento de onda híbrido TDFA/FOPA para comunicações ópticas. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife – PE, 2006.
- [4] DA SILVEIRA, Clenilson Rodrigues. Estudo de formatos especiais de modulação digital para comunicações ópticas. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2009.
- [5] SPADOTI, Danilo Henrique. Proposição e Estudo de Fibras Ópticas Microestruturadas Tipo D: Gerenciamento de Dispersão e Alta Birrefringência. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2008.
- [6] ALMEIDA, Gerson Serra de. Expansão da Capacidade de Transmissão de Sistemas Ópticos Através da Tecnologia WDM: Um estudo de caso sobre o sistema Eletronorte. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará, 2011.
- [7] VERMA, Ajeet Singh; JAISWAL, A. K.; KUMAR, Mukesh. An improved methodology for dispersion compensation and synchronization in optical fiber communication networks. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering (IJETA), ISSN, p. 2250-2459, 2013.
- [8] FENG, Xian et al. Dispersion controlled highly nonlinear fibers for all-optical processing at telecoms wavelengths. Optical Fiber Technology, v. 16, n. 6, p. 378-391, 2010.
- [9] 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.
- [10] YABLONOVITCH, Eli. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics. Physical review letters, v. 58, n. 20, p. 2059, 1987.
- [11] PEREIRA, Odarley Fernandes. Caracterização de Fibras Ópticas Altamente não Lineares. Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto. 2012.
- [12] MURDAS, Ibrahim A.; ABBAS, Talib M.; ABBAS, Zainab A. Numerical Simulation for Self Phase Modulation and Cross Phase Modulation in Optical Fiber. International Journal of Science and Research (IJSR), v. 3, n. 11, 2014.
- [13] SOUSA, Fabio de *et al.* Simulations of SPM, XPM and FWM in Single-Mode Fiber Optic Networks. USP – São Paulo. Proceedings of Workshop on Semiconductors and Micro & Nano – Technology, SEMINATEC, 2017.
- [14] RAO, P. Venkat; PRASHANTH, SB Bhanu. Impact of Residual Dispersion and Power in The Presence of Nonlinearities in RZ Optical Link. International Journal of Innovative

Research in Electrical, Eletronics, Instrumentation and Control Engineering, vol. 4, 6 de jun. 2016.

[15] RASHEED, Iftikhar et al. Novel approaches for suppression of four wave mixing in wdm system using concocted modulation techniques. In: *Frontiers of Information Technology (FIT)*, 2012 10th International Conference on. IEEE, p. 56-61, 2012.

[16] Dehghani, Fatemeh, and Farzin Emami. Suppression of Four Wave Mixing Based on the Pairing Combinations of Differently Linear-Polarized Optical Signals in WDM System. *Journal of Optoelectrical Nanostructures* 1, p.1-8, (2016).

[17] Singh, Mehtab. Analyzing the Effect of Channel Spacing and Chromatic Dispersion Coefficient on FWM in Optical WDM System. *International journal of signal processing, image processing and pattern recognition* 8.11: 99-110, 2015.

[18] 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.

[19] 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

[20] TELECO. Redes Ópticas Passivas II: O Software Optisystem. Disponível em: <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialropassiva2/pagina_2.asp>. Acesso em: 01/01/2017.

[21] Optisystem. Disponível em:< <https://optiwave.com/resources/applications-resources/optical-communication-system-design/> >. Acesso em: 01/01/2017.

Capítulo 4

4 REGENERAÇÃO DE SINAL ÓPTICO

Neste capítulo serão apresentados os conceitos de regeneração de sinal óptico, a diferença entre regeneração elétrica e óptica, função de transferência e os regeneradores 2R e 3R.

4.1 REGENERADORES DE SINAL ÓPTICO

A regeneração de um sinal é considerada uma técnica muito importante para os sistemas de telecomunicações. A propagação de sinais através de uma rede óptica pode sofrer diversos efeitos indesejáveis, ocasionados pelos ruídos de ASE, inseridos pelos amplificadores, que causam distorção e dispersão [1], por isso a regeneração é indispensável para dirimir essas deficiências [2]. Diferentes técnicas de regeneração de sinal têm sido implementadas nas redes de telecomunicações de hoje, a fim de aumentar o desempenho dos sistemas tanto na transmissão quanto na recepção dos sinais.

Nesse sentido as técnicas de regeneração do sinal em sistemas de telecomunicações de fibra óptica, sejam 1R (Reamplificação), 2R (Reamplificação e Reformatação) e 3R (Reamplificação, Reformatação e Ressincronização), têm despertado o interesse de pesquisadores da área em todo o mundo. Tanto para o caso do regenerador 2R quanto para o do regenerador 3R, há a exigência de dispositivo de reformatação.

Alguns regeneradores foram desenvolvidos com a inserção de fibras ópticas: fibras altamente não-lineares (*Highly Non-Linear Fibers* – HNLFs), fibras com dispersão deslocada não nula (*Non-Zero Dispersion Shifted Fiber* – NZ-DSF), fibras compensadoras de dispersão (DCFs – *Dispersion Compensating Fibers*) e fibras de cristal fotônico (*Photonic Crystal Fibers* – PCFs) [3]. Estas fibras podem ser usadas tanto para acentuar, quanto para suprimir os efeitos não-lineares de auto modulação de fase (SPM), modulação de fase Cruzada (XPM) e mistura de quatro ondas (FWM). Além destas técnicas, vários dispositivos não-lineares são também implementados no processamento de sinal óptico, tais como: Anel óptico refletivo não linear (NOLM – *Nonlinear Optical Loop Mirror*), Interferômetro de Mach-Zehnder baseado em amplificadores ópticos de semicondutores (SOA-MZI – *Mach-Zehnder Interferometer based on Semiconductor Optical Amplifier*) ou com o interferômetro de Michelson (SOA-MI –

Michelson Interferometer based on Semiconductor Optical Amplifier), bem como o modulador de Electro-absorção (EAM – *Electro-Absorption Modulator*) [4], entre outros que já foram e que ainda serão criados e implantados.

Dependo da taxa de bits a regeneração poderá ser totalmente óptica, elétrica ou optoeletrônica. Um ponto relevante quanto a escolha de uma tecnologia em detrimento da outra é a questão dos custos e a transparência, portanto na maioria dos casos a configuração totalmente óptica é a mais aplicada, pois evita a conversão de O-E-O (Óptico – Elétrico - Óptico) [2], a qual é dispendiosa para os sistemas de telecomunicações.

A regeneração totalmente óptica está em constante investigação, ela consiste em tratar os sinais ópticos degradados durante a transmissão do sinal por fibras e amplificadores [4] e transmiti-los sem distorções, *crosstalk* e sem ruídos. Para sinais com taxas de bits maiores que 80 ou 160 Gbit/s a única opção é a regeneração totalmente óptica [5]. Os regeneradores totalmente ópticos oferecem inúmeras vantagens em comparação aos regeneradores elétricos dentre elas destacam-se a redução de componentes e custos, além disso evita o gargalo eletrônico. Por essas e outras é que a regeneração elétrica vem sendo substituída pela totalmente óptica.

Em relação ao desempenho de um regenerador vale destacar que o mesmo é responsável por impedir erros durante a transmissão com redistribuição de ruídos em níveis de “1” e “0”, tornando o sinal mais resistente a deterioração e a adição de ruídos, assim, melhora a sensibilidade do receptor [5]. Apesar das vantagens de um regenerador totalmente óptico, existem algumas penalidades que comprometem o bom funcionamento do sistema, como os ruídos e distorções que poderão se acumular ao longo do enlace, principalmente em sistemas de longas distâncias e com vários nós de comutação, por isso faz-se necessário uma regeneração completa.

A regeneração óptica seja ela 2R ou 3R podem ser implementadas baseadas nos efeitos não lineares de auto modulação de fase (SPM), modulação de fase cruzada (XPM) e mistura de quatro ondas (FWM), diversos trabalho já foram publicados nesse sentido.

4.1.1 Regenerador 2R

A regeneração 2R é considerada uma instalação mais simples, pois utiliza menos parâmetros de controle. Esse tipo de regenerador só executa duas funções: Reamplificação e Reformatação do sinal, ou seja, não possui o circuito de recuperação de relógio.

Um dos primeiros trabalhos publicados em que aborda esse tipo de regeneração é atribuído a Mamyshev que em 1998, propôs um regenerador 2R baseado em SPM, para a regeneração de sinais com modulação retorno ao zero RZ (*Return to Zero*) em uma HNLF. Um esquema simples e eficiente na supressão de ruídos “zeros” e flutuações de amplitudes em “uns” [6], como mostra a figura 4.1.

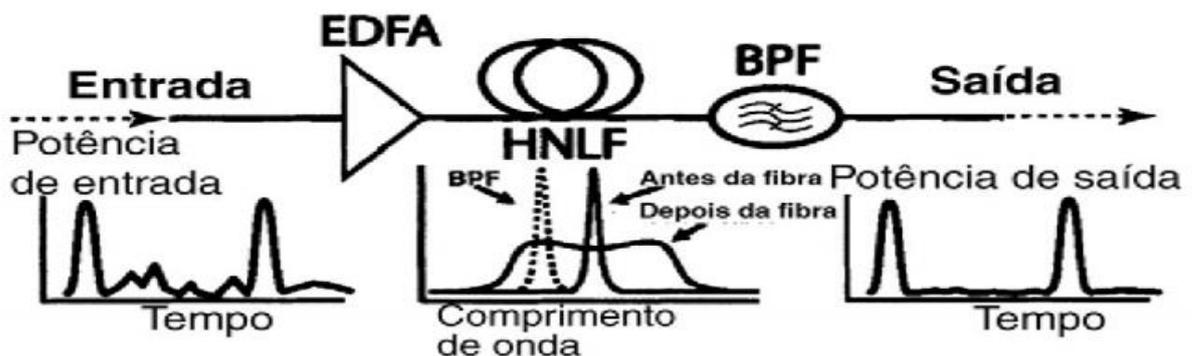


Figura 4.1 - Regenerador 2R de Mamyshev [4].

Neste tipo de regenerador o sinal com ruído e distorções é inicialmente amplificado por um EDFA, logo após o pulso propaga-se em uma fibra altamente não linear, o qual sofre o um alargamento induzido por SPM e por fim, o sinal passa por um filtro passa faixa (BPF – *Band Pass Filter*), capaz de reduzir o ruído e melhorar a forma do pulso no receptor [4].

Um regenerador 2R usando filtragem *offset* também foi relatado em [2], onde a realização da regeneração do sinal RZ degradado é realizada em três seções: transmissão, degradação e regeneração, em 5 loops de 100 Km de SMF e regeneração feita através de filtros gaussianos e 1,5 Km de HNLF. O desempenho deste regenerador foi provado pela função de transferência de potência (intensidade de pulso de saída versus intensidade de pulso de entrada) e a curva de BER.

A interação entre a dispersão e a não linearidade nas fibras também podem servir para otimizar o desempenho de uma rede, através da implantação de um regenerador 2R totalmente óptico baseado em SPM e filtragem espectral com velocidade de transmissão de 40 Gb/s [7], pois fibras com maiores valores de dispersão reduzem o *crosstalk*, porém exigem maiores potências de entrada suficientes para uma regeneração ideal. Por isso a melhor saída é utilizar

HNLFs preferencialmente as microestruturadas, pois têm valor maior do parâmetro de não linearidade como mostrado no capítulo 2. Qualquer dispositivo não linear em que a combinação de efeitos de SPM e XPM produza características não lineares de transferência de potência similares às vistas na figura 4.2 pode ser usado como regenerador 2R [4].

A FWM também tem despertado interesse para a regeneração 2R, uma das razões é que o efeito da mistura de quatro ondas converte a fibra em um amplificador paramétrico [4], que através da saturação de ganho induzida por altas potências, faz com que as flutuações sejam reduzidas. Nas redes WDMs do futuro serão implantados amplificadores de fibra óptica (OFAs – *Optical Fiber Amplifiers*) e ligações ópticas cruzadas (OXCs – *Optical Cross Connects*) [8].

A Função de transferência não linear, também chamada de função tipo S, pode ser utilizada para a implementação de um dispositivo regenerador 2R totalmente óptico tão próximo quanto possível do ideal, como mostra a figura 4.2.

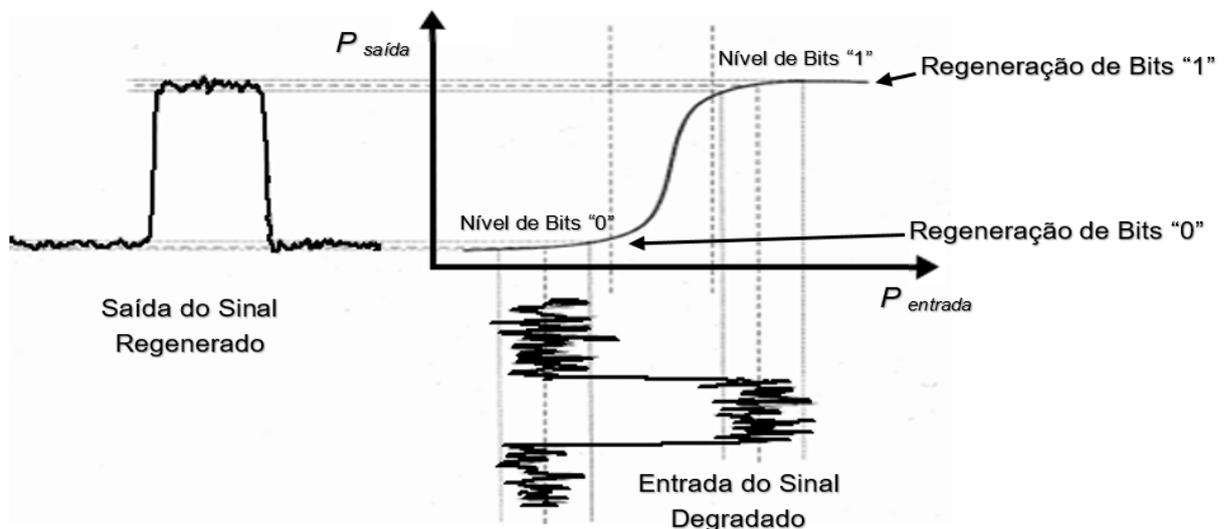


Figura 4.2 - Função de transferência ideal. [adaptado de 2 e 9].

Onde na figura 4.2, $P_{entrada}$ é a potência inicial do sinal degradado, a qual poderá variar para os níveis altos (bits "1") e baixos (bits "0") devido as distorções acumuladas durante a transmissão. E $P_{saída}$ é a potência de saída que pode ser indicada no fim de cada estágio do processo de regeneração e/ou na saída do receptor. Esse processo permite que haja compreensão do ruído de nível "1" e de nível "0" [10], onde o bom desempenho de um regenerador 2R depende da melhoria da razão de extinção e da sua capacidade de supressão de ruído [9].

Projetos com a utilização de filtragem *offset* em conjunto com fibras ópticas com valor de dispersão menor que 0, reduziram respectivamente os ruídos de baixo nível e de alto nível. Obtiveram uma função de transferência com característica ideal, com uma região ampla e plana

para os níveis de ruído de entrada alta “1” e de entrada baixa “0”, apesar da não semelhança a um passo a passo (*step-like*), foi possível alcançar melhoras significativas na BER e no fator de qualidade, além de manter a transparência do comprimento de onda do dispositivo.

Um regenerador ideal deve ter a capacidade de resincronização do sinal, ou seja, deve ser ampliado para um regenerador 3R, como em [11] que propõe um modelo experimental em que tem um regenerador 2R combinado com um módulo de recuperação de relógio como mostra a figura 4.3.

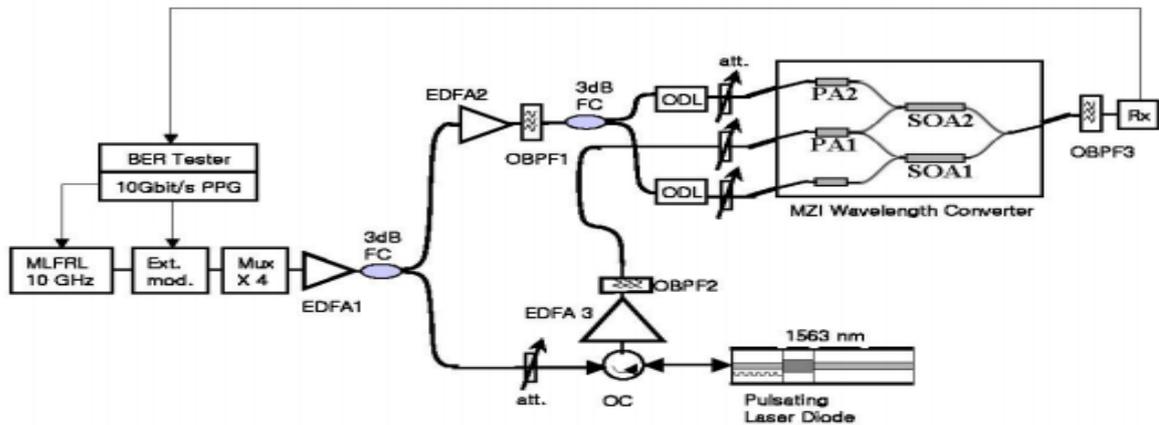


Figura 4.3 - Regenerador 2R em conjunto com um laser de auto pulsão [11].

Neste caso foi usado um interferômetro de Mach-Zehnder como conversor de comprimento de onda para a regeneração 2R (Reamplificação e Reformatação) e um laser auto pulsante para a recuperação do relógio (Resincronização), em que conseguiram uma BER igual a 10^{-9} e penalidade de potência de apenas 1 dB. Em fim este modelo mostra que um regenerador 2R pode ser transformado em um do tipo 3R.

4.1.2 Regenerador 3R

Um regenerador só é considerado completo quando realiza as três funções: Reamplificação, Resincronização e Reformatação do sinal degradado. Este tipo de regenerador é responsável por recuperar o relógio, modelar e também amplificar o sinal distorcido e atenuado.

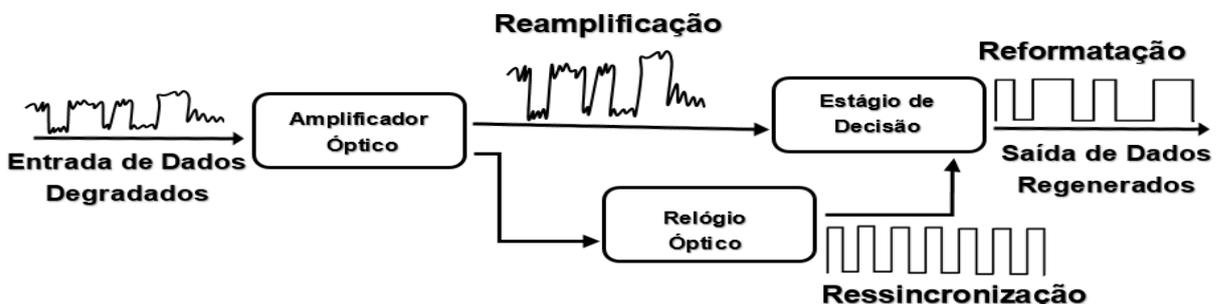


Figura 4.4 - Diagrama de bloco do Processo de Regeneração 3R.

A figura 4.4 apresenta as três funções de um regenerador 3R totalmente óptico, onde inicialmente o sinal degradado é reamplificado em seguida ocorre uma saturação de ganho, com o propósito de deixar a forma do pulso de acordo com a onda quadrada do início da transmissão, mas a degradação acumulada resultou em um deslocamento no período dos bits, por isso, no final do processo o sinal recupera o seu tempo, para que o estágio de decisão torne os dados regenerados na saída do receptor [10].

Vários trabalhos de pesquisas foram desenvolvidos através da modelagem de regeneradores 3R, com os objetivos de criar projetos com capacidade de transmissão de dados em elevada taxa de bits, com custo reduzido, sintonizável, flexível a taxa de bits e com escalabilidade. Em [5] é apresentado um regenerador 3R com configuração com anéis ópticos refletivos não linear (NOLM – *Nonlinear Optical Loop Mirror*) de três estágios em que explora o efeito Kerr em HNLFs, com o propósito de restaurar os sinais de dados em alta velocidade com taxas de bits de 80 e 160 *Gbit/s*.

Em regeneradores 3R baseados em fibra, o comprimento do enlace pode ser consideravelmente reduzido dependendo do índice de refração do material que compõe a fibra, principalmente os diferentes da sílica [4]. As fibras com dispersão descolada (DSFs – *Dispersion-Shifted Fibers*), as fibras de cristal fotônico (PCFs) [3], em especial as altamente não lineares têm chamado a atenção da comunidade científica, em [12] um regenerador foi investigado, através de simulações, sem mudança de frequência e com duplo estágio de mistura de quatro ondas.

Regeneradores baseados em amplificadores de semicondutor (SOAs), tem sido utilizados em sistemas com altas taxas de bits, uma configuração com interferência retardada ou desbalanceada (SOA DI – *Delayed Interference*) é apresentado experimentalmente em [13], onde obtiveram uma capacidade de resincronização que excedeu 6 *ps* a uma velocidade de transmissão de 40 *Gb/s* em que realizou-se um modo de conversão do sinal de entrada RZ para um sinal de saída NRZ, isso garantiu a boa qualidade dos resultados, os quais foram constatados através do diagrama de olho. Combinando-se qualquer regenerador 2R baseado em SOA e um modulador ativado por relógio elétrico ou óptico na taxa de bits do sinal [4], pode-se criar um regenerador 3R baseado em SOA.

O objetivo principal da técnica de regeneração é criar sistemas de telecomunicações mais simples e compactos, através de aplicações capazes de reduzir consideravelmente a incerteza temporal das sequências de bits e de melhorar a função de transferência, a SNR, o fator de qualidade e a BER. E isso vem sendo alcançado com êxito em dispositivos 3R

totalmente ópticos, por isso acredita-se que em um futuro não tão distante as redes com regeneradores elétricos ou optoeletrônicos sejam substituídas por regeneradores totalmente ópticos.

4.2 REFERÊNCIAS

- [1] VERSPURTEN, Sam et al. Experimental demonstration of all-optical 2R regeneration at 10 Gb/s in a MZI-configuration with a single SOA. In: Proceeding Symposium IEEEILEOS Benelux Chapter, 2003.
- [2] HNAUNG, Soe Soe. Design and Implementation of 10 Gbps All Optical 2R Regenerator. International Journal of Scientific and Research Publications, v. 4, n. 6, 2014.
- [3] MAT YAACOB, S. N. S. et al. 10GB/S NRZ based on self-phase modulation in all optical 2R regeneration, 2015.
- [4] AGRAWAL, G.P. Fiber-optic communication systems. 3rd. edition Wiley Sons - Interscience, New York, 2002.
- [5] ANDERSEN, Peter Andreas et al. All-Optical signal processing using highly nonlinear photonic crystal fiber. Technical University of Denmark Danmarks Tekniske Universitet, Department of Electromagnetic Systems Institut for Elektromagnetiske Systemer, 2007.
- [6] MAMYSHEV, P. V. All-optical data regeneration based on self-phase modulation effect. In: Optical Communication, 1998. 24th European Conference on. IEEE, p. 475-476, 1998.
- [7] BAVEJA, Prashant P.; MAYWAR, Drew N.; AGRAWAL, Govind P. Optimization of all-optical 2R regenerators operating at 40 Gb/s: Role of dispersion. Journal of Lightwave Technology, v. 27, n. 17, p. 3831-3836, 2009.
- [8] CIARAMELLA, Ernesto; CURTI, Franco; TRILLO, Stefano. All-optical signal reshaping by means of four-wave mixing in optical fibers. IEEE Photonics Technology Letters, v. 13, n. 2, p. 142-144, 2001.
- [9] SIMOS, H.; BOGRIS, A.; SYVRIDIS, D. Investigation of a 2R all-optical regenerator based on four-wave mixing in a semiconductor optical amplifier. Journal of lightwave technology, v. 22, n. 2, p. 595, 2004.
- [10] MIRANDA, Uriel Ramon Crisóstomo. Investigação de um regenerador totalmente óptico sintonizável baseado em fibra altamente não-linear e efeito de mistura de quatro ondas. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica de Campinas, 2012.
- [11] K. H. Park, H. Ko, D. C. Kim, E. Sim, Y. A. Leem, D. Yee, and M. Y. Jeon. All Optical 3R Regenerator Based on Semiconductor. In: *Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim*, (Optical Society of America, 2007), paper FA1_1, 2007.
- [12] TAVARES, Tainá Soares. Otimização de regeneradores de amplitude sem deslocamento de frequência baseados em mistura de quatro-ondas. Anais do XVII Encontro de Iniciação Científica – ISSN 1982-0178. Pontifícia Universidade Católica – Campinas – SP, 2012.
- [13] LEUTHOLD, J. et al. Novel 3R regenerator based on semiconductor optical amplifier delayed-interference configuration. IEEE Photonics Technology Letters, v. 13, n. 8, p. 860-862, 2001.

CAPÍTULO 5

Neste capítulo serão apresentados o projeto do regenerador 3R baseado em interferômetro de Mach-Zehnder, as simulações, as análises e as discussões dos resultados através da utilização do software comercial Optisystem. Existem inúmeras técnicas de regeneração de sinais de maneira totalmente óptica, mas neste trabalho é investigada a regeneração 3R totalmente óptica através dos efeitos Kerr em um interferômetro de Mach-Zehnder, cujo um dos braços é uma fibra de cristal fotônico altamente não linear, a qual será descrita no decorrer do capítulo.

5 SIMULAÇÕES E RESULTADOS NUMÉRICOS DO REGENERADOR 3 R TOTALMENTE ÓPTICO BASEADO EM INTERFERÔMETRO DE MATH-ZEHNDER

Qualquer rede de comunicação por fibra óptica e outros componentes é passiva de perdas que podem ser leves ou graves, as mesmas são causadas por atenuação, dispersão e efeitos não lineares. A dispersão velocidade de Grupo pode levar ao alargamento e a má formação do pulso, que resultam em um aumento da taxa de erro de bit (BER), baixo fator de qualidade (Q) e OSNR baixa.

Quando o sinal óptico se propaga do transmissor para o receptor, a sua qualidade se degrada devido a obstruções na camada física da rede [1]. Esses problemas são responsáveis pela limitação da taxa de transmissão e pela distância do *link* óptico. Por isso a regeneração completa se faz necessária, para dirimir os eventuais deletérios aos sistemas de comunicação por ondas luminosas.

Diante do exposto, através deste trabalho implementou-se um regenerador 3R baseado na configuração de um conversor de comprimento de onda interferométrico de Mach-Zehnder (MZI), com o propósito de fazer uma regeneração completa (Reamplificação, Reformatação e Ressincronização) do sinal através dos efeitos não lineares para uma taxa de bit de 10 Gb/s e comprimento de onda de 1550 nm, por ser a faixa em que a fibra óptica tem menor atenuação.

O projeto desenvolvido através de simulações numéricas no *software Optisystem*, tem como propósito implementar um regenerador totalmente óptico com características semelhantes às dos regeneradores elétricos convencionais, porém com uma diferença no que tange a não a conversão de sinais ópticos para eletrônicos, pois isso é muito dispendioso para os sistemas de telecomunicações.

O *design* do sistema de regeneração 3R baseado em MZI aqui proposto para a regeneração de sinais ópticos de maneira totalmente óptica está dividido em três seções: Transmissão, Degradação e Regeneração.

Para que o objetivo seja cumprido o pulso passou por três etapas. O sinal emitido pelo transmissor passa pela fibra SMF e DCF seguidas por amplificadores EDFAs e filtros Gaussianos em cascata e por fim o sinal é regenerado no interferômetro de Mach-Zehnder que tem um braço composto por uma HNL-PCF e um filtro gaussiano e um outro por um pulso de bombeio.

Descrições mais detalhadas do sistema proposto neste trabalho e também de todos os processos de transmissão, pré-regeneração e regeneração serão apresentados nas próximas seções. Todos os parâmetros das simulações foram introduzidos de acordo com as referências e *default* do Optisystem.

5.1 MODELO E PARÂMETROS DO REGENERADOR 3R PROPOSTO

O regime de funcionamento do regenerador é baseado no esquema de interferometria, consiste de um sistema simples, o qual não necessitou da utilização de nenhum laser CW e filtro óptico na saída do transmissor. Nosso esquema é uma versão modificada que inclui um MZI com uma HNL-PCF em um dos braços, conforme proposto em [2]. Foram exploradas as vantagens dos efeitos não lineares e dos ruídos amplificados emitidos pelos EDFAs.

O regenerador 3R proposto está dividido em três partes: a primeira é a transmissão, a segunda a degradação e a terceira a regeneração do sinal. Para que seja melhor visualizada a evolução do processo uma etapa intermediária será também incluída, que neste caso será denotada por pré-regeneração, a qual não influencia no processo, pois é somente para a coleta de mais dados e também para comparações.

5.1.1 Seção de Transmissão

Para este projeto, como mostrado no esquemático completo do sistema na figura 5.4. A figura 5.1 mostra o transmissor utilizado, o mesmo é composto de um gerador de sequência de bits pseudo-aleatória (*Pseudo Random Bit Sequence Generator - PRBS*) com taxa de transmissão de 10 Gb/s ligado a um gerador de pulso gaussiano (*Optical Gaussian Pulse Generator - OGP*) que nas simulações, terá potência variando de 0 a 10 dBm no comprimento de onda de 1550 nm , para assim analisar a eficiência do funcionamento do regenerador 3R em um total de 10 interações nas simulações no Optisystem.

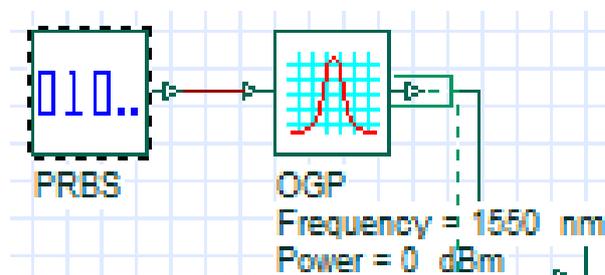


Figura 5.1 - Transmissor.

5.1.2 Seção de Degradação

A parte responsável pela degradação é composta por uma SMF de 100 km de comprimento, com coeficiente de dispersão de 17 ps/nm.Km , inclinação de dispersão de $0,08 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$, coeficiente de atenuação de $0,25 \text{ dB/Km}$, área efetiva de $80 \text{ }\mu\text{m}^2$, índice de refração

do núcleo de $2,6 \times 10^{-20} \mu\text{m}^2/\text{W}$ (sílica) e coeficiente de não linearidade de $1,3 \text{ W}^{-1}\text{Km}^{-1}$. A figura 5.2 mostra a seção de degradação.

O sinal é degradado em todo o enlace que compõe a SMF e os amplificadores. Após a SMF tem uma fibra com compensação de dispersão (DCF) com 20 Km de comprimento e que tem como parâmetros: coeficiente de atenuação de $0,5 \text{ dB/km}$, coeficiente de dispersão de -80 ps/nm.km , inclinação de dispersão de $0,21 \text{ ps/nm}^2.\text{Km}$, área efetiva de $30 \mu\text{m}^2$ e índice de refração de $2,6 \times 10^{-20} \mu\text{m}^2/\text{W}$.

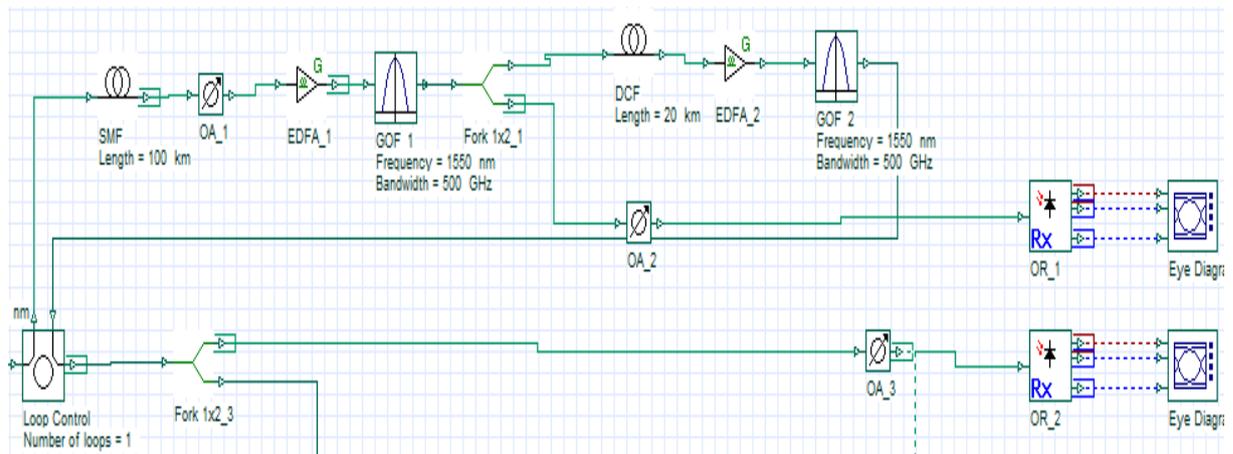


Figura 5.2 - Seção de degradação.

Após a SMF e a DCF, foram utilizados amplificadores a fibra dopada com érbio (EDFAs) de alta potência, com um ganho de 20 dB e 12 dB , ambos com figura de ruído de 4 dB , os quais são usados para recuperar as perdas, após cada EDFA, é inserido um filtro gaussiano com largura de banda de 500 GHz para reduzir os efeitos devido o ruído de emissão espontânea amplificado (ASE) emitido pelos EDFAs. Após a filtragem o sinal é lançado para o sinal é dividido em duas partes, passando pelo módulo de recuperação do pulso de disparo, através da extração do comprimento de onda, assim encaminhando-se para o processo de regeneração do sinal.

5.1.3 Seção de Regeneração

A parte principal do regenerador é mostra a figura 5.3, que consiste em um interferômetro de Mach-Zehnder, cujo tem um dos braços composto por uma fibra de cristal fotônico altamente não linear HNL-PCF, de acordo com [3], a qual tem $1,4 \text{ Km}$ de comprimento, coeficiente de dispersão de -1216 ps/nm.Km , inclinação de dispersão de $-0,26 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$, coeficiente de atenuação de 5 dB/Km , área efetiva de $1,81 \mu\text{m}^2$, índice de refração de $2,6 \times 10^{-20} \mu\text{m}^2/\text{W}$.

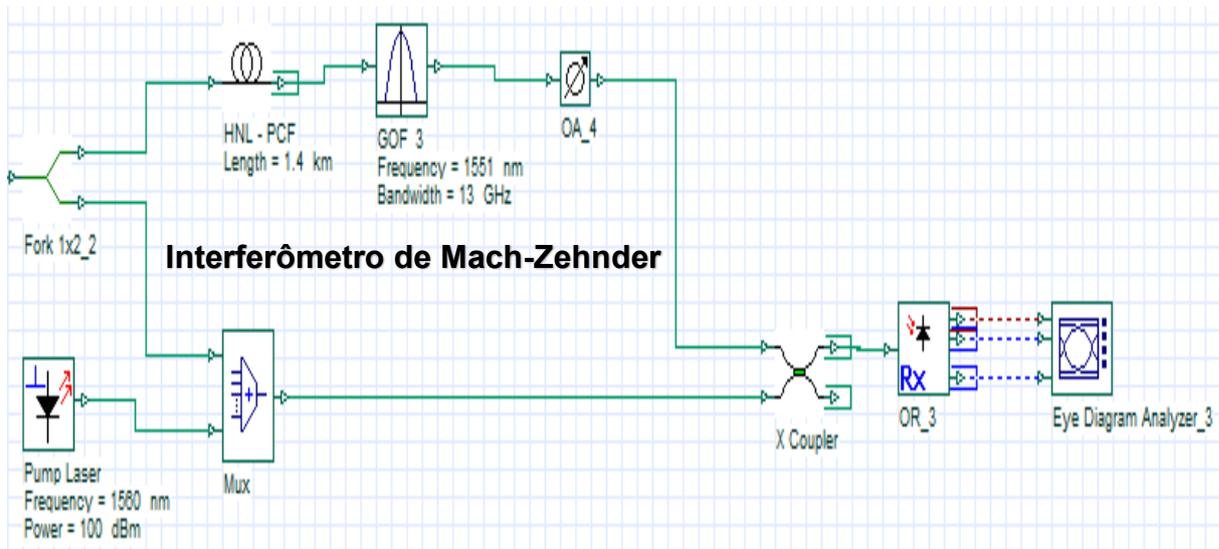


Figura 5.3 - Interferômetro de Mach-Zehnder com HNL-PCF.

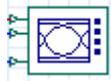
Logo após ser dividido nos dois braços do MZI, o sinal é resincronizado, através de um laser de bombeio com potência inicial de 100 dBm , e frequência de 1560 nm , o qual servirá para a extração do *clock* (recuperação do relógio). A potência de bombeio é superior a do sinal é utilizado para que a resincronização aconteça. O sinal é lançado para a HNL-PCF, a qual é usada para eliminar o boa parte do ruído através do efeito de SPM, juntamente com um filtro gaussiano com comprimento de onda central deslocado para remover o espectro amplificado, resultando em uma limpeza do sinal de dados e uma conversão do comprimento de onda durante o processo de regeneração.

O motivo pela escolha da HNL-PCF foi devido ao seu coeficiente de não linearidade, que na maioria dos casos é maior que o da SMF de sílica [4], como também o fato desse tipo de fibra reduzir a capacidade de potência média dos pulsos controle e também o problema de descasamento de velocidade de grupo, pois de acordo com a equação 3.15 são necessários comprimentos muitos curtos [1], que podem alcançar um número suficiente de efeitos não lineares e também melhorar a integração do sistema.

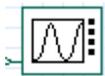
A figura 5.4 mostra o diagrama esquemático completo do sistema de regeneração 3R proposto, que explora os efeitos Kerr da fibra de cristal fotônico altamente não linear, através de um interferômetro de Mach-Zehnder (*Mach-Zehnder Interferometer* - MZI), o qual representa uma estrutura simples, de baixo custo e de desempenho estável. Os capítulos anteriores foram utilizados como base teórica para a criação deste regenerador.

O receptor óptico tem responsividade de 0.7 A/W e corrente escura de 10 mA .

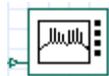
O monitoramento do desempenho do sistema foi feito através dos seguintes instrumentos:



- **Analisador de Diagramas de Olho (*Eye Diagram Analyzer - EDA*):** serve para visualização da taxa de erro de bit (BER), altura do olho e fator de qualidade (Q), este instrumento compara o valor enviado pelo transmissor (“0” ou “1”) com o sinal recebido, para detectar erros de bits, pois o receptor pode interpretar os bits incorretamente devido ao sinal fraco (atenuação) ou distorcido (dispersão);



- **Visualizador Óptico no Domínio do Tempo (*Optical Time Domain Visualizer - OTDV*):** útil para verificar a amplitude do sinal e o formato do pulso na entrada e na saída do sistema;



- **Analisador do Espectro Óptico (*Optical Spectrum Analyzer - OSA*):** responsável por monitorar a relação sinal ruído óptica e também serve para analisar o espectro óptico dos canais de um sistema na saída e após a propagação do pulso no enlace, podendo verificar como varia a atenuação, a dispersão e também os efeitos não lineares em uma fibra óptica ou em qualquer outro componente óptico;



- **Medidor de Potência Óptica (*Optical Power Meter - OPM*):** usado para verificar os níveis de potência gerados pelo transmissor em diferentes pontos do link óptico, o mesmo apresenta valores da potência de ruído, potência do sinal e também a potência total do sistema.

Portanto, a coleta dos resultados para garantir a confiabilidade do desempenho do sistema proposto, foi realizada em função da BER, do fator Q, da OSNR e da amplitude de modulação do pulso óptico.

5.1.4 Esquemático do Regenerador 3R

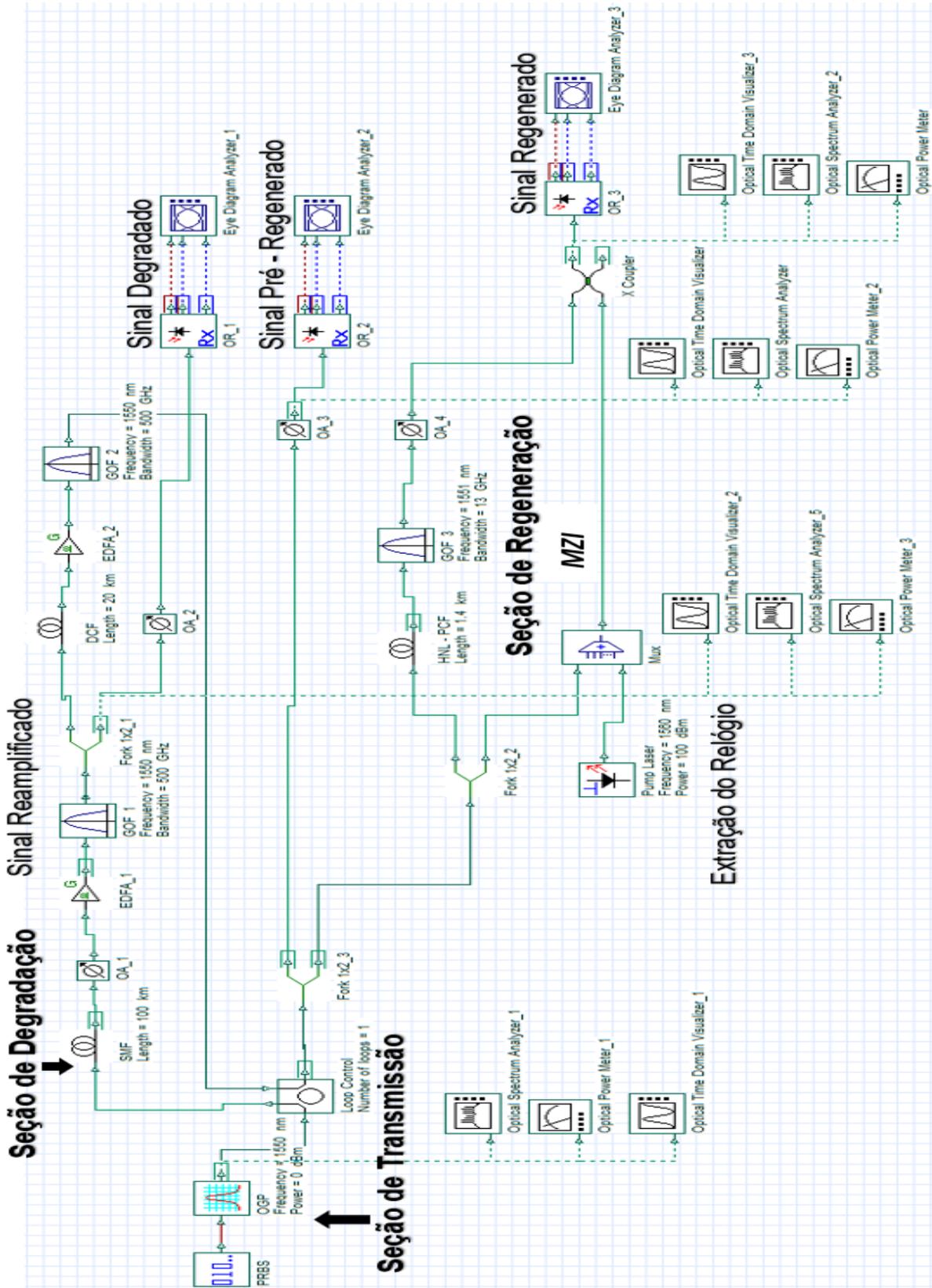


Figura 5.4 - Esquemático completo do sistema de regeneração 3R.

5.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados aparecerão de acordo com as três etapas do processo, que são: de transmissão, de degradação e de regeneração do sinal. Assim os gráficos de mesma categoria serão organizados um do lado do outro para uma melhor visualização e comparação dos resultados. O analisador de taxa de erro de bit (BER), o analisador do espectro óptico, o medidor de potência e o visualizador óptico no domínio do tempo serão os componentes que servirão para as medições e as análises serão feitas de acordo com suas respostas em cada etapa do processo da regeneração 3R baseada em interferômetro de Mach-Zehnder.

5.2.1 Formas do Pulso na Saída do Transmissor e Diagramas de olho

A Figura 5.5 mostra a forma do pulso gaussiano na saída do transmissor, na etapa de degradação e na etapa de regeneração. Note que o sinal na etapa de degradação é ruidoso, isso devido a perda de potência ocasionado pela dispersão e atenuação induzida no loop de 100 Km de SMF. O sinal na cor rosa representa a potência do ruído presente no sinal de entrada após propagação do pulso na seção de degradação, essa interferência reduziu consideravelmente a potência do sinal de entrada. O sinal degradado provoca graves danos ao desempenho do sistema, conforme mostrado pelo olho estressado da Figura 5.6 (a).

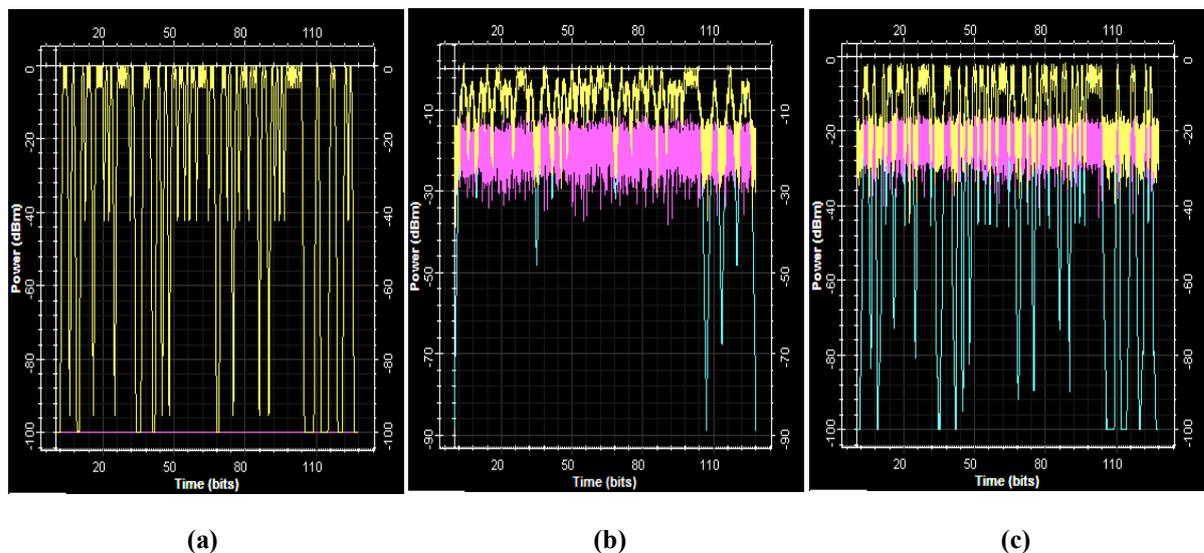


Figura 5.5 - Formas de onda: (a) transmissor de sinal de saída, (b) após a degradação, (c) sinal após a regeneração.

A figura 5.5 (c) mostra o formato de modulação de pulso após o processo de regeneração, ou seja, após a passagem pelo interferômetro de HNL - PCF. Houve uma

melhora na amplitude do pulso, uma considerável redução do ruído e consequentemente um ganho de energia em comparação com o sinal da figura 5.5 (b).

Para a análise do diagrama de olho, foi realizada uma varredura de potência na saída do transmissor, na faixa de 0 dBm para 10 dBm, foi executada para o formato de modulação escolhido. Os valores de BER e do fator Q foram obtidos para cada nível de potência injetado no processo de degradação e de regeneração de sinal.

A figura 5.6 mostra a evolução do processo, neste caso com a potência do sinal de entrada de 0 dBm, os valores do fator de qualidade e da taxa de erro de bit obtidos no processo de degradação foram de fator $Q = 3$ e $BER = 1,3 \times 10^{-3}$. No processo de pré-regeneração obteve-se como resultado um fator $Q = 4,3$ e uma $BER = 8 \times 10^{-6}$ e no processo final de regeneração obteve-se um valor do fator $Q = 26$ e uma taxa de $BER = 2 \times 10^{-143}$. Comparando-se o sinal degradado com o regenerado, houve uma regeneração total de cento e quarenta ordens de grandeza.

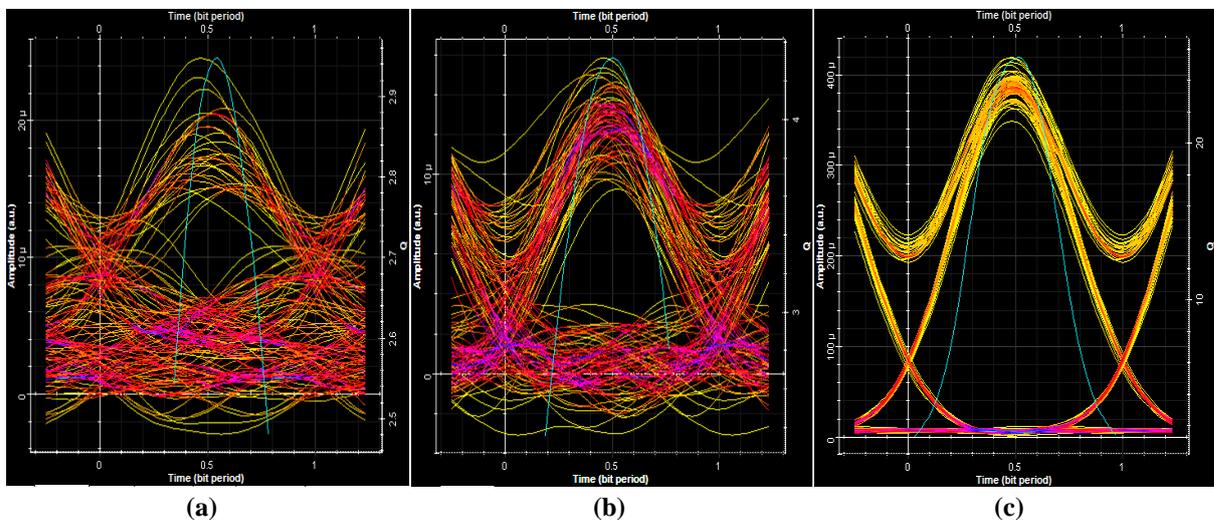


Figura 5.6 - Diagramas de olho: (a) Seção de degradação, (b) Seção de pré-regeneração e (c) Seção de regeneração

Os Diagramas de olho na Figura 5.6 mostram o que ocorreu com o pulso óptico ao se propagar no enlace de fibras SMF e DCF e também pelos outros componentes utilizados no projeto.

O diagrama de olho 5.6 (a) refere-se ao sinal propagado após os 100 Km da SMF, a dispersão levou ao alargamento do pulso misturados com os ruídos de ASE dos EDFAs, o que resultou em um sinal degradado (olho estressado) com altura do olho de $-2,6 \times 10^{-7}$, apesar da filtragem *offset* realizada pelo primeiro filtro gaussiano.

O diagrama de olho 5.6 (b) refere-se ao que aconteceu com o pulso após passar pela fibra DCF, no processo de pré-regeneração em que é possível observar uma melhora do sinal

com uma abertura do olho de $3,7 \times 10^{-6}$, mas os ruídos de níveis “zero” e “um” ainda estão presentes, devido ao processo de reamplificação.

O diagrama de olho 5.6 (c) refere-se ao sinal após a passagem pelo interferômetro de Mach-Zehnder de HNL-PCF, em que foi feita a reformatação do sinal, o tamanho curto da HNL-PCF foi suficiente para reduzir os efeitos não lineares e dispersivos. Porque os resultados tanto do fator de qualidade, quanto da taxa de erro de bit mostraram que ocorreu uma melhora significativa no processo de regeneração do sinal, pois através do efeito de XPM induzido, o ruído foi consideravelmente reduzido, isso foi justificado pelo alto fator Q e a baixa BER na saída no receptor, portanto a abertura do olho aumentou chegando ao valor de $3,4 \times 10^{-4}$.

A OSNR para a seção de degradação foi de $8,2 \text{ dB}$, já para a seção de regeneração foi de $25,5 \text{ dB}$. Pela relação existente desses valores com o diagrama de olho, afirma-se que a BER diminuiu e a OSNR cresceu, portanto, isso garante a eficiência do sistema quanto a regeneração completa do sinal degradado.

5.2.2 Variação da Potência do Transmissor

Em qualquer sistema de comunicações por fibra óptica o valor do fator de qualidade deve ser o maior possível para um valor ideal de potência do transmissor. Pois para baixos níveis de potência, o fator Q limita-se pelo ruído e para altos níveis de potência pelos efeitos não lineares [1]. O sistema de regeneração 3R aqui proposto, foi utilizado para a análise desta afirmação, onde a potência do transmissor foi variada de 0 a 10 dBm . Os gráficos do desempenho do log da BER e do fator Q da sessão de regeneração em função da variação da potência são mostrados na figura 5.7.

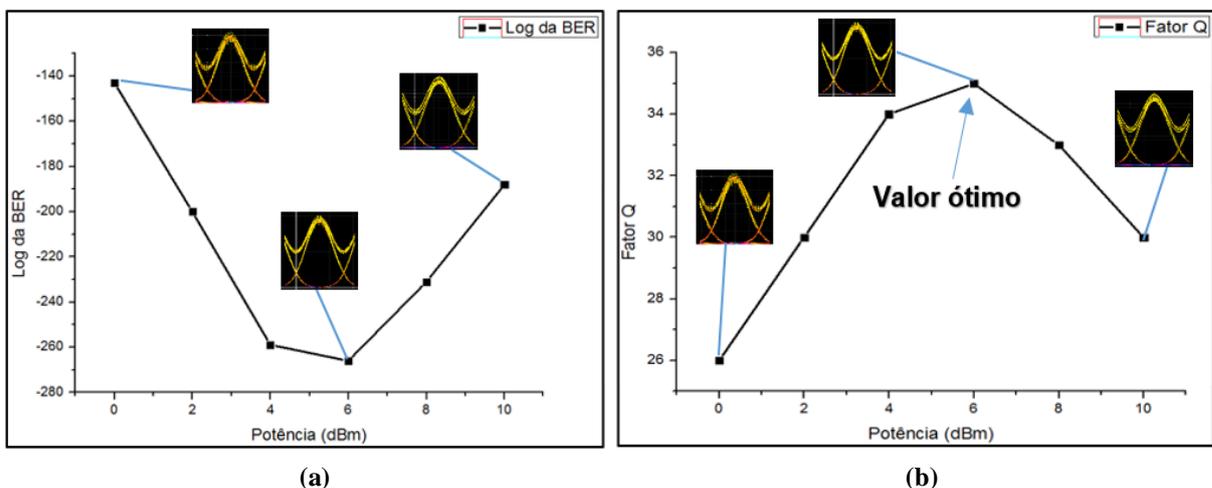


Figura 5.7 - Desempenho do Log da BER e do fator Q na seção de regeneração.

Na análise do desempenho da BER e do fator Q na seção de regeneração foi possível observar pelos gráficos da figura 5.7 que o fator Q, inicialmente, aumenta com a potência de entrada, mas, após alcançar um limiar, então, decresce à medida que a potência aumenta. Portanto, para este caso o valor máximo para o fator de qualidade no intervalo de potência dado foi de $Q = 35$ e a mínima taxa de erro de bit foi de $BER = 9 \times 10^{-266}$ para uma potência de entrada de 6 dBm .

A OSNR da seção de regeneração também teve o melhor valor sendo de 28 dB . Portanto, para o caso da propagação do sinal na seção de regeneração, a taxa de erro de bit aumenta com o aumento dos níveis de potência a partir do limiar de 6 dBm , isso ocorre devido aos efeitos não-lineares, os quais degradam o sinal, resultando também em baixos fatores de qualidade.

O mesmo teste também foi feito para a seção de degradação, os gráficos da figura 5.8 mostram o desempenho da log da BER e também do fator Q para este caso.

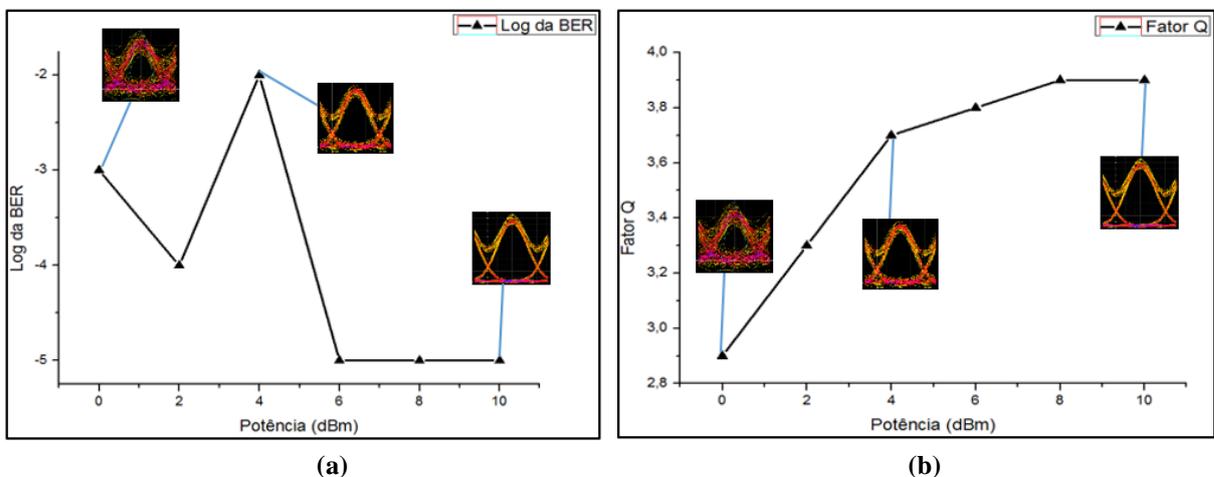


Figura 5.8 - Desempenho do Fator Q e da BER na seção degradação.

Foi observado que a BER para todas as potências de entrada do transmissor para o sinal degradado alcança o maior valor para a potência de 4 dBm e a partir deste limiar a curva inverte sua tendência, ou seja o sinal começa a melhorar comparando-se com a potência inicial de 0 dBm . Assim também a OSNR aumentou de $8,2 \text{ dB}$ para $10,2 \text{ dB}$, conseqüentemente o fator Q também aumentou de $2,9$ para $3,9$ e a BER diminuiu de $1,3 \times 10^{-3}$ para 4×10^{-5} , conforme mostra a figura 5.8. Portanto houve uma melhora do sinal na seção de degeneração quando se aumentou a potência de entrada do transmissor.

Vale ressaltar que as comparações feitas aqui em relação a BER e o fator Q nas seções de regeneração e degradação foram de maneira individual, portanto isso não invalida o bom desempenho do regenerador, pois as melhoras ocorridas na seção de degradação foram úteis

para compensar os problemas dos efeitos não lineares e dispersivos na seção de regeneração. Ou seja neste esquema os efeitos não lineares de SPM, XPM e FWM foram utilizados para a regeneração do sinal. Isso foi provado pelos valores das taxas de erros de bit, das relações sinal ruído e dos fatores de qualidade da seção de regeneração, como mostram os gráficos da figura 5.7 (a) e 5.7 (b), apesar das perdas individuais, esses valores são superiores aos da seção de degradação mostrados na figura 5.8 (a) e 5.8 (b).

5.2.3 Conclusão

Com os resultados obtidos até aqui, pode-se concluir que a partir da metodologia utilizada para a otimização e análise do desempenho da rede, foi possível projetar um regenerador 3R com um interferômetro de Mach-Zehnder com apenas 1.4 Km de PCF, capaz de fornecer ganhos razoáveis, de suprimir grande parte do ruído, o que resultou em alta OSNR e fator Q e conseqüentemente níveis baixos da BER. Apresentando assim, penalidades de diagrama de olho reduzidas. Ficou evidente que a utilização da DCF na seção de pré-regeneração serviu para fornecer uma compensação da dispersão introduzida pelos 100 km de SMF. Assim através deste método simples foi possível de maneira significativa, reamplificar, reformatar e resincronizar o sinal de tal maneira que aumentou a confiabilidade do sistema e também reduziu a complexidade e o custo do projeto. Portanto o sistema aqui apresentado, poderá quem sabe um dia, ser utilizado para a transmissão de longa distância e de alta velocidade.

5.3 REFERÊNCIAS

- [1] AGRAWAL, G.P. Fiber-optic communication systems. 3rd. edition Wiley Sons - Interscience, New York, 2002.
- [2] MAT YAACOB, S. N. S. et al. 10GB/S NRZ based on self-phase modulation in all optical 2R regeneration. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 10, nº 19, october, 2015.
- [3] CASTELLANI, Carlos Eduardo Schmidt. Amplificadores Raman em fibras microestruturadas. Dissertação de Mestrado. Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, 2009.
- [4] HNAUNG, Soe Soe. Design and Implementation of 10 Gbps All Optical 2R. *International Journal of Scientific and Research Publications*, ISSN: 2250-3153, vol. 4, 6 de june, 2014
- [5] KEISER, Gerd. Optical Fiber Communications. Mcgraw Hill. Fourth Edition, 2008. Regenerator. *International Journal of Scientific and Research Publications*, v. 4, n. 6, 2014.
- [6] Xu, S. X., Zhou, L., & Xiao, J. (2012). 40 Gb/s Optical 3R-Regeneration Based on XPM and SPM in PCF. In *Advanced Materials Research* (Vol. 571, pp. 180-184). Trans Tech Publications. 2012.
- [7] ANDERSEN, Peter Andreas et al. All-Optical signal processing using highly nonlinear photonic crystal fiber. Technical University of Denmark Danmarks Tekniske Universitet, Department of Electromagnetic Systems Institut for Elektromagnetiske Systemer, 2007.
- [8] Bhusari Shraddha N.; Deshmukh Vikas U.; Jagdale Shantanu S. Analysis of SPM, XPM, and FWM in Fiber Optic Communication Using OptiSystem. *IJSTE - International Journal of Science Technology & Engineering* | Volume 2 | Issue 07 | January 2016.
- [9] AGRAWAL, G. P. Nonlinear fiber optics. 4.ed. edition, Boston: Academic Press, 2007.
- [10] MIRANDA, Uriel Ramon Crisóstomo. Investigação de um regenerador totalmente óptico sintonizável baseado em fibra altamente não-linear e efeito de mistura de quatro ondas. 2012. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica de Campinas.

Capítulo 6

6 CONCLUSÃO GERAL

No decorrer desta pesquisa foram desenvolvidas várias simulações no software comercial *Optisystem*, através de diversas configurações de regeneradores 2R e 3R baseados em fibras de ópticas de cristais fotônicos (PCF) altamente não lineares [1, 4] caracterizadas com propriedades dispersivas e não lineares e também fibras compensadoras de dispersão (DCF) [9]. Investigou-se numericamente os impactos da interação entre os efeitos não lineares e dispersivos que ocorrem simultaneamente em sistemas de redes de telecomunicações por fibras ópticas, através da variação dos parâmetros das fibras e dos sistemas como: área efetiva, dispersão cromática, inclinação de dispersão, coeficiente de não linearidade, taxas de bits, potências, frequências e espaçamento entre canais.

Todos os resultados obtidos foram em função do espectro óptico, potência de entrada, OSNR e diagrama de olho. Os gráficos foram criados através do software *Origin Pro 8*. Porém não foi necessário desenvolver rotinas em C++ que permitissem caracterizar os vários modelos analisados e também para simular a propagação dos pulsos.

Foi possível obter uma regeneração eficiente do sinal, através da utilização de uma fibra monomodo, uma fibra compensadora de dispersão e filtros, amplificadores e uma fibra de cristal fotônico altamente não linear em um dos braços de um interferômetro de *Mach-Zhender*. Neste trabalho foi possível conseguir valores satisfatórios de OSNR, de fator de qualidade (fator Q) e baixo valor da taxa de erro de bit (BER) através do modelo de regenerador 3R escolhido.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Futuramente, para continuidade e aprimoramento desta pesquisa, pretende-se investigar através de simulações tanto no Optisystem com o Cpp Component e MATLAB quanto no VPIphotonics e outros *softwares de simulações*, outros tipos de regeneradores 2R e 3R. Espera-se também investigar outros efeitos não lineares como Espalhamento Ramam Estimulado (*Stimulated Ramam Scatering - SRS*) e o Espalhamento *Brillouin* Estimulado (*Stimulated Brillouin Scattering - SBS*). Estudar os diferentes métodos de supressão de efeitos não lineares, tais como: modulação híbrida e polarização linear. Investigar as penalidades de amplificadores SOA e RAMAM em sistemas de comunicações ópticas avançados com variados tipos de fibras ópticas. Buscar explorar outras bandas de comunicação além da banda C (*Conventional Band*), como por exemplo a banda S (*Short Wavelength Band*), banda L (*Long Band*). E realizar trabalhos relacionados aos Circuitos Integrados de Fotônica (*Photonics Integrated Circuits - PIC*) e nano antenas de grafeno.

6.2 PUBLICAÇÕES

No decorrer dos dois anos de estudos no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da Universidade Federal do Pará, campus Guamá, Belém e Mestrado Interinstitucional (MINTER) da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (Unifesspa), campus Marabá, ambas no estado do Pará, desenvolvemos alguns trabalhos relacionados a nossa linha de pesquisa de eletromagnetismo aplicado com ênfase em telecomunicações, os quais estão listados a seguir.

6.2.1 Congressos – Trabalhos aceitos / publicados

- 1) Léo César P. de Almeida, Fiterlinge M. de Souza, Jorge E. de Oliveira, Fabio B. de Sousa and Marcos B.C.Costa, “Design and Performance Analysis of All-Optical NAND Logic Gate Based on 2-D Photonic Crystal”, Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo. MOMAG, 2016.
- 2) Léo Cesar P. de Almeida, Fiterlinge M. de Souza, Jorge E. de Oliveira, Fabio B. de Sousa and Marcos B.C. Costa, “Numerical Simulation of All-Optical NAND Logic Gate Based on 2 – D Photonic Crystal using FDTD method”, CNMAC – Congresso de Matemática Aplicada e Computacional, Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics, 2016.
- 3) Souza, F. M., Almeida, L. C. P., Sousa, F. B., Oliveira, J. E., Costa, M. B. C., “Filtro de microondas Rejeita-faixa com estrutura EBG usando o método dos Elementos Finitos”, CNMAC – Congresso de Matemática Aplicada e Computacional, Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics, 2016.
- 4) Souza, F. M., Almeida, L. C. P., Sousa, F. B., Oliveira, J. E., Costa, M. B. C., “Filtro de microondas Rejeita-faixa com estrutura EBG”, ENCOM – Encontro Anual do IECOM COMUNICAÇÕES, REDES E CRIPTOGRAFIA, Fortaleza – CE, Artigos Publicados, 2016.
- 5) L.C.P. de Almeida, J. E. de Oliveira, F. B. de Sousa, F. M. de Souza and M. B. C. Costa “All-Optical NOT Logic Gate Based on DC 2-D Photonic Crystal”, SEMINATEC –

- Workshop on Semiconductors and Micro & Nano – Technology, Campinas. SEMINATEC, Campinas – SP. Proceedings of Workshop on Semiconductors and Micro & Nano – Technology, 2016.
- 6) SOUSA, F. B., ALMEIDA, L. C. P., OLIVEIRA, J. E., SOUZA, F. M., COSTA, M. B. C., “Ultrashort Pulse Switching in a GaAs Nanowire Coupler”, SEMINATEC – Workshop on Semiconductors and Micro & Nano – Technology, Campinas – SP. Proceedings of Workshop on Semiconductors and Micro & Nano – Technology, 2016.
 - 7) Fabio B. de Sousa, Elizete R. Sabino, Márcio B. C. Costa, Fiterlinge M. de Souza, Jorge Everaldo de Oliveira, Osmar Tharlles B. de Oliveira e Marcos B. C. Costa. “Análises da Não Linearidade Kerr em Sistemas de Comunicação por Fibra Óptica”. II Encontro de Pós-Graduação, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA). Anais do Encontro de Pós-Graduação, Marabá – PA, 2017.
 - 8) Fabio B. de Sousa, Elizete R. Sabino, Márcio B. C. Costa, Fiterlinge M. de Souza e Marcos B. C. Costa. “All-Optical 3R Regeneration Based on XPM and SPM in Highly Nonlinear Photonic Crystal Fiber”. I SIMPÓSIO DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA: Espaço de Integração Acadêmica e Científica, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA), Marabá – PA, 2017.
 - 9) SOUSA, F. B., OLIVEIRA, J. E., SABINO, E. R. SOUZA, F. M., COSTA, M. B. C., “Simulations of SPM, XPM and FWM in Single-Mode Fiber Optic Networks”, SEMINATEC – Workshop on Semiconductors and Micro & Nano – Technology, São Paulo – SP. Proceedings of Workshop on Semiconductors and Micro & Nano – Technology, 2017.

6.3 REFERÊNCIAS

- [1] AGRAWAL, G.P. Fiber-optic communication systems. 3rd. edition Wiley Sons - Interscience, New York, 2002.
- [2] KEISER, Gerd. Optical Fiber Communications. Mcgraw Hill. Fourth Edition, 2008.
- [3] Xu, S. X., Zhou, L., & Xiao, J. 40 Gb/s Optical 3R-Regeneration Based on XPM and SPM in PCF. In *Advanced Materials Research* (Vol. 571, pp. 180-184). Trans Tech Publications, 2012.
- [4] PEREIRA, Odarley Fernandes et al. Caracterização de Fibras Ópticas Altamente não Lineares. 2012.
- [5] RASHEED, Iftikhar et al. Novel approaches for suppression of four wave mixing in wdm system using concocted modulation techniques. In: *Frontiers of Information Technology (FIT), 2012 10th International Conference on*. IEEE, p. 56-61, 2012.
- [6] ANDERSEN, Peter Andreas et al. All-Optical signal processing using highly nonlinear photonic crystal fiber. Technical University of Denmark Danmarks Tekniske Universitet, Department of Electromagnetic Systems Institut for Elektromagnetiske Systemer, 2007.
- [7] HNAUNG, Soe Soe. Design and Implementation of 10 Gbps All Optical 2R Regenerator. *International Journal of Scientific and Research Publications*, v. 4, n. 6, 2014.
- [8] John D. Joannopoulos, Steven G. Johnson, Joshua N. Winn, Robert D. Meade, “Photonic Crystals: Molding the Flow of Light”, Copyright by Princeton University Press, 2008.
- [9] VERMA, Ajeet Singh; JAISWAL, A. K.; KUMAR, Mukesh. An improved methodology for dispersion compensation and synchronization in optical fiber communication networks. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering (IJETAE)*, ISSN, p. 2250-2459, 2013.
- [10] TAVEIRA, Palmerston Donizzeti. Caracterização e análise de desempenho dos amplificadores ópticos Raman discretos em sistemas de comunicações ópticas na banda O. Dissertação de Mestrado. Universidade Presbiteriana Mackenzie. São Paulo, 2006.
- [11] MIRANDA, Uriel Ramon Crisóstomo. Investigação de um regenerador totalmente óptico sintonizável baseado em fibra altamente não-linear e efeito de mistura de quatro ondas. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica de Campinas, 2012.
- [12] LEUTHOLD, J. et al. Novel 3R regenerator based on semiconductor optical amplifier delayed-interference configuration. *IEEE Photonics Technology Letters*, v. 13, n. 8, p. 860-862, 2001.
- [13] SIMOS, H.; BOGRIS, A.; SYVRIDIS, D. Investigation of a 2R all-optical regenerator based on four-wave mixing in a semiconductor optical amplifier. *Journal of lightwave technology*, v. 22, n. 2, p. 595, 2004.