



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

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM SISTEMA ÓPTICO BASEADO
EM INTERFERÔMETRO DE MACH-ZEHNDER E AMPLIFICADOR
ÓPTICO SEMICONDUTOR**

FÁBIO SOUZA DE ARAÚJO

DM 28/2024

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

2024

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

FÁBIO SOUZA DE ARAÚJO

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM SISTEMA ÓPTICO BASEADO
EM INTERFERÔMETRO DE MACH-ZEHNDER E AMPLIFICADOR
ÓPTICO SEMICONDUTOR**

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

Orientador: Prof. Dr. Marcos Benedito Caldas Costa

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

2024

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

S719a Souza de Araújo, Fábio.
ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM SISTEMA ÓPTICO
BASEADO EM INTERFERÔMETRO DE MACH-ZEHNDER E
AMPLIFICADOR ÓPTICO SEMICONDUTOR / Fábio Souza de
Araújo. — 2024.
61 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Marcos Benedito Caldas Costa
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, Belém, 2024.

1. Interferômetro de Mach-Zenhder (MZI). 2.
Amplificador Óptico Semicondutor (SOA). 3. Grade de Bragg
em Fibra (FBG). I. Título.

CDD 621.3827

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

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM SISTEMA ÓPTICO BASEADO
EM INTERFERÔMETRO DE MACH-ZEHNDER E AMPLIFICADOR
ÓPTICO SEMICONDUTOR**

AUTOR: FÁBIO SOUZA DE ARAÚJO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UFPA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE TELECOMUNICAÇÕES.

APROVADA EM: 18/11/2024

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Marcos Benedito Caldas Costa
(Prof. Dr. Marcos Benedito Caldas Costa - PPGEE / UFPA)

Prof. Dr. Jordan Del Nero
(Avaliador Interno - PPGEE / UFPA)

Prof. Dr. Fabio Barros de Sousa
(Avaliador Externo - UNIFESSPA)

VISTO:

Prof. Dr. NOME
(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

Agradecimentos

A realização desta dissertação foi possível graças ao apoio e à contribuição de pessoas e instituições que, de forma direta ou indireta, estiveram ao meu lado durante este processo.

Em primeiro lugar, agradeço profundamente ao meu orientador, Marcos Benedito Caldas Costa, pela orientação valiosa, pelo incentivo constante e por acreditar no potencial deste trabalho desde o início. Sua expertise e disponibilidade foram fundamentais para o sucesso desta pesquisa.

Agradeço também aos meus pais, Paulo Sérgio Cunha de Araújo e Márcia Valéria Souza de Araújo, pelo apoio incondicional e pelos valores que me ensinaram, sempre me inspirando a seguir em frente. À memória do meu irmão, Paulo Sérgio Cunha de Araújo Júnior, que, apesar de não estar mais entre nós, continua presente em meu coração, dedicando-lhe este trabalho como uma homenagem sincera.

À minha querida esposa, Karina Góes Araújo, minha eterna companheira, agradeço por sua paciência, compreensão e amor em todos os momentos. Aos meus filhos, Caíque Góes Araújo, Cauê Góes Araújo e Bento Góes Araújo, minha maior fonte de inspiração e motivação para seguir adiante, dedico também este esforço.

Agradeço ao grupo de Fotônica e óptica não linear, em especial ao Alan Reis, Igor Miranda, Fábio Sousa e Simone Tavares, pelo apoio e ajuda durante esse período no mestrado.

Por fim, agradeço à Universidade Federal do Pará (UFPA), no programa do PPGEE por todo o suporte acadêmico e às pessoas que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho.

Resumo

O presente trabalho apresenta e explora, através do software OptiSystem, o desempenho de um sistema óptico que combina o interferômetro de Mach-Zehnder, o amplificador óptico semicondutor (SOA) e a Grade de Bragg em Fibra (FBG). O sistema é formado por três partes principais: sessão de transmissão, sessão amplificador óptico semicondutor interferômetro Mach-Zehnder (SOA-MZI) e sessão de recepção. E foram analisados os parâmetros de desempenho: fator de qualidade (Fator-Q) e a taxa de erro de bit (BER) para diferentes sequências de bits e para a variação do tamanho do comprimento da fibra óptica. Em geral, o sistema proposto apresentou um bom desempenho, mostrando-se como projeto viável para aplicação em redes metropolitanas com enlaces de até 50 km.

Palavras-chaves: Interferômetro de Mach-Zehnder (MZI), Amplificador Óptico Semicondutor (SOA), Grade de Bragg em Fibra (FBG).

Abstract

The present work introduces and explores, using the OptiSystem software, the performance of an optical system that combines the Mach-Zehnder interferometer, the semiconductor optical amplifier (SOA), and the Fiber Bragg Grating (FBG). The system is composed of three main parts: the transmission section, the semiconductor optical amplifier Mach-Zehnder interferometer (SOA-MZI) section, and the reception section. The performance parameters analyzed include the quality factor (Q-Factor) and the bit error rate (BER) for different bit sequences and variations in the optical fiber length. Overall, the proposed system demonstrated good performance, proving to be a viable design for metropolitan networks with links up to 50 km.

Key-words: Mach-Zehnder Interferometer (MZI), Semiconductor Optical Amplifier (SOA), Fiber Bragg Grating (FBG).

Lista de figuras

Figura 1 – Componentes básicos de uma Rede de Comunicação por Fibra Óptica.	2
Figura 2 – Representação de uma Fibra Óptica Convencional.	3
Figura 3 – Perfil da Fibra Monomodo.	4
Figura 4 – Perfis da Fibra Multimodo.	6
Figura 5 – Conversor de comprimento de onda baseado na XGM em SOA.	12
Figura 6 – Efeito de FWM no domínio da frequência.	16
Figura 7 – Configurações possíveis para um amplificador em redes ópticas.	19
Figura 8 – Configuração esquemática de um SOA.	21
Figura 9 – Esquema do Acoplador Direcional Duplo Não-Linear de comprimento L_c	24
Figura 10 – Representação das portas do Acoplador Direcional Duplo.	25
Figura 11 – Esquema do funcionamento de uma Rede de Bragg.	27
Figura 12 – Diagrama da perturbação do índice de uma FBG uniforme.	28
Figura 13 – Interferômetro de Mach-Zehnder em fibras ópticas.	31
Figura 14 – Interferômetro de Michelson.	31
Figura 15 – Interferômetro de Michelson em fibras ópticas.	32
Figura 16 – Interferômetro de Sagnac em fibras ópticas.	33
Figura 17 – Diagrama de blocos do sistema proposto.	34
Figura 18 – Transmissores do sistema óptico com SOA-MZI.	35
Figura 19 – Região SOA-MZI combinados com Fibras de Rede de Bragg (FBGs).	36
Figura 20 – Receptor do sistema óptico com SOA-MZI.	37
Figura 21 – Saída do diagrama de olho para uma sequência de 4 bits.	38
Figura 22 – Saída do diagrama de olho para uma sequência de 8 bits.	38
Figura 23 – Saída do diagrama de olho para uma sequência de 16 bits.	39
Figura 24 – Diagramas de olho para 30 km (esquerda) e 40 km (direita).	40
Figura 25 – Diagramas de olho para 50 km (esquerda) e 60 km (direita).	40
Figura 26 – Interface do software Optisystem	44
Figura 27 – Biblioteca de componentes do software Optisystem	45

Lista de tabelas

Tabela 1 – Resumo dos efeitos Não Linearidades em fibras ópticas.	11
Tabela 2 – Configurações aplicadas ao SOA nas simulações	23
Tabela 3 – Resultados das simulações	37
Tabela 4 – Parâmetros de desempenho do sistema para diferentes comprimentos da fibra	39

Lista de abreviaturas e siglas

SOA	Semiconductor Optical Amplifiers
FBG	Fiber Bragg Grating
NLDC	Nonlinear Directional Coupler
CW	Continuous Wave
WDM	Wavelength Division Multiplexing
SiO ₂	dióxido de silício
ITU	International Telecommunication Union
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing
XGM	Cross-Gain Modulation
SNR	Signal-to-Noise Ratio
ASE	Amplified Spontaneous Emission
OBPF	Optical Band-Pass Filter
SPM	Self-Phase Modulation
BER	Bit Error Rate
XPM	Cross-Phase Modulation
FWM	Four-Wave Mixing
EDFA	Erbium-Doped Fiber Amplifier
OSNR	Optical Signal to Noise Ratio
OSA	Optical Signal Analyzer
NLSE	Nonlinear Schrödinger Equation
GVD	Group Velocity Dispersion
MZI	Mach-Zehnder Interferometer

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
2	Sistemas de comunicação por fibras ópticas	2
2.1	Fibras ópticas	3
2.1.1	Fibra Monomodo	4
2.1.2	Fibra Multimodo	5
3	Óptica Não-Linear	7
3.1	Propagação da Onda em Fibras Ópticas	7
3.2	Efeitos Não Lineares em Fibras Ópticas	9
3.2.1	Modulação de Ganho Cruzado (XGM – Cross-Gain Modulation)	11
3.2.2	Automodulação de Fase (SPM – Self-Phase Modulation)	14
3.2.3	Modulação de Fase Cruzada (XPM – Cross-Phase Modulation)	15
3.2.4	Mistura de Quatro Ondas (FWM – Four-Wave Mixing)	16
4	Dispositivos baseados em fibra óptica	18
4.1	Amplificador óptico semiconductor	18
4.1.1	Amplificadores ópticos	18
4.1.2	Amplificador Óptico Semiconductor (SOA)	20
4.1.3	Acoplador Direcional Não Linear (NLDC)	23
4.1.4	Grade de Bragg em Fibra	26
4.1.5	CW Laser	29
5	Interferometria	30
5.1	Interferômetro Mach-Zehnder (MZI)	30
5.2	Outros interferômetros	31
5.2.1	Interferômetro de Michelson (MI)	31
5.2.2	Interferômetro de Sagnac (SI)	32
6	Simulações e resultados numéricos	34
6.1	Projeto do sistema totalmente óptico baseado em SOA-MZI	34
6.1.1	Sessão de transmissão do sistema óptico proposto	34
6.1.2	Sessão SOA-MZI combinado com redes de Bragg em fibra (FBGs)	35
6.1.3	Sessão de recepção	36
6.2	Resultados e discussões	37
7	Considerações finais	41
7.1	Propostas de trabalhos futuros	41
7.2	Trabalhos Publicados	42

A O software OptiSystem	44
B Trabalhos publicados	46
Referências	47

1 INTRODUÇÃO

A evolução dos sistemas de comunicação ao longo de toda a história da humanidade teve, e ainda tem, um papel fundamental no desenvolvimento da sociedade moderna. Nesse cenário, a descoberta e aplicação das fibras ópticas representaram um marco significativo no processo de evolução desses sistemas, possibilitando a transmissão de informações de forma rápida, eficiente e confiável.

As fibras ópticas correspondem a meios dielétricos cilíndricos, geralmente feitos de sílica ou plástico, que são capazes de guiar a luz através do fenômeno da reflexão interna total e que apresentam baixa atenuação e imunidade a interferências eletromagnéticas, além de outras vantagens, quando comparadas aos cabos metálicos convencionais.

Entretanto, para continuar a atender a crescente demanda por largura de banda e qualidade de sinal, diversas pesquisas nos últimos anos se concentram em combinar diferentes tecnologias, visando obter sistemas com melhores desempenhos, para as mais variadas aplicações.

Nessa perspectiva, o presente trabalho apresenta e explora, através do software OptiSystem, o desempenho de um sistema óptico que combina o interferômetro de Mach-Zehnder, o amplificador óptico semiconductor (SOA) e a Grade de Bragg em Fibra (FBG).

Ademais, o restante do trabalho está organizado da seguinte forma:

No capítulo 2 é realizado uma breve revisão a respeito de sistemas de comunicações ópticas, destacando seus elementos fundamentais e dando ênfase no que são fibras ópticas e seus tipos.

No capítulo 3 é destacado o formalismo das equações de Maxwell para fibras ópticas, assim como uma discussão sobre efeitos Não Lineares em fibras.

No capítulo 4 são apresentados alguns dispositivos baseados em fibra óptica, tais como: Amplificador Óptico Semiconductor (SOA), Acoplador Direcional Não Linear (NLDC), Fibra de Grade de Bragg (FBG) e Laser CW.

No capítulo 5 é discutido sobre interferometria, destacando os principais interferômetros ópticos.

No capítulo 6 são mostrados os resultados obtidos com as simulações do OptiSystem, além das análises realizadas através dos mesmos.

E por fim, no último capítulo são feitas as considerações finais a respeito do sistema óptico simulado e analisado neste trabalho.

2 Sistemas de comunicação por fibras ópticas

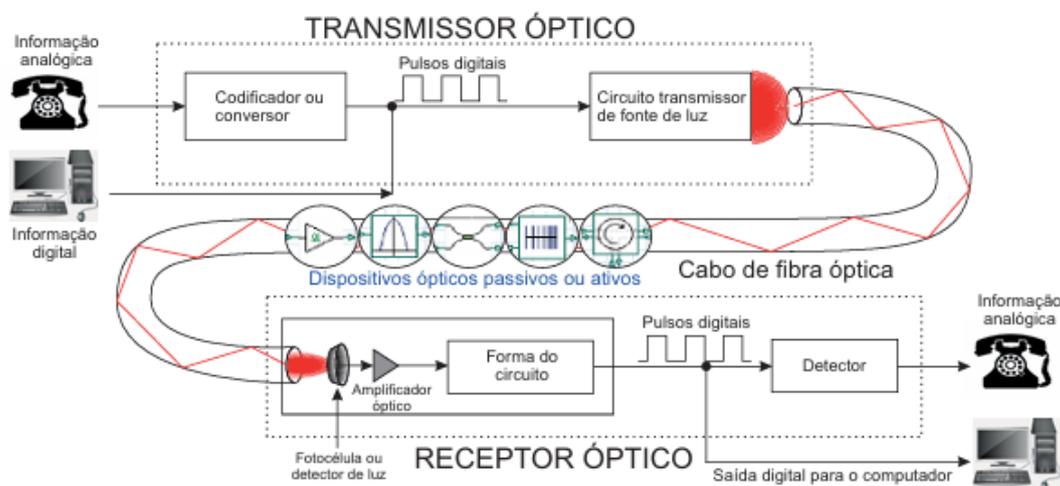
Em qualquer sistema de comunicação, existem três elementos fundamentais: o transmissor, o meio físico e o receptor. Tanto os sistemas elétricos quanto os ópticos compartilham a mesma função: transportar um sinal de um dispositivo de comunicação para outro localizado em um ponto diferente (SOUSA et al., 2017).

Em um sistema óptico, o transmissor é responsável por gerar a mensagem a ser enviada. Utilizando um laser, ele converte os sinais elétricos em sinais ópticos, que são então transmitidos pelo meio físico que guia a onda de luz contendo todas as informações. Na etapa final, o receptor, por meio de um fotodetector, converte os sinais ópticos de volta em sinais elétricos.

Os principais fatores que distinguem os diferentes tipos de sistemas de comunicação são a velocidade, a taxa de transmissão, a capacidade (banda passante) e a qualidade das informações transmitidas e recebidas. Nesse contexto, a transmissão por fibra óptica apresenta um desempenho superior em comparação com os cabos metálicos. A Figura 1 ilustra um sistema genérico de telecomunicações ópticas, onde o canal de comunicação é uma fibra óptica.

Dependendo da complexidade do sistema, podem ser integrados outros componentes ativos ou passivos em uma rede óptica, como conectores, acopladores, multiplexadores, compensadores de dispersão, amplificadores, filtros e atenuadores. A inclusão desses componentes será determinada pelo projeto da rede.

Figura 1 – Componentes básicos de uma Rede de Comunicação por Fibra Óptica.



Fonte: (OLIVEIRA, 2021)

A fibra óptica oferece várias vantagens sobre os cabos metálicos: é imune a interferências eletromagnéticas, não apresenta problemas de aquecimento, transmite um volume significativamente maior de informações, reduz os custos de manutenção, é mais leve, proporciona segurança no transporte de dados e utiliza uma matéria-prima abundante. No entanto, as fibras ópticas podem sofrer atenuações devido a dobras acentuadas e aos efeitos dispersivos e não lineares, que podem comprometer o desempenho do sistema. Felizmente, esses problemas podem ser mitigados com procedimentos adequados.

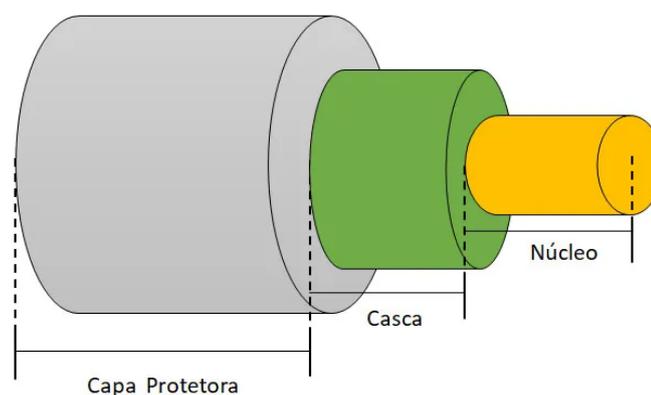
É importante destacar que existem outros sistemas de comunicação óptica, como os controles remotos de televisão, que utilizam infravermelho, conhecidos como sistemas de comunicação óptica no espaço livre (*FSO* - Free Space Optics Communication), e a comunicação via satélite. No entanto, estes sistemas não serão abordados nesta pesquisa. Portanto, todas as referências a comunicações ópticas feitas neste trabalho a partir deste ponto devem ser entendidas como referentes exclusivamente à fibra óptica como meio de transporte dos sinais. A seguir, serão apresentados os tipos de fibras ópticas, suas principais características e aplicações.

2.1 Fibras ópticas

A fibra óptica é composta por um meio dielétrico cilíndrico (geralmente sílica ou plástico) capaz de guiar a luz. Com dimensões comparáveis às de um fio de cabelo, a fibra óptica é subdividida em três partes: o revestimento primário (a capa), a casca e o núcleo.

O índice de refração do núcleo, n_1 , que é tipicamente um vidro composto de sílica pura (SiO_2), é maior do que o índice de refração da casca, n_2 . Esta diferença garante a propagação da luz através do núcleo. A casca, feita de vidro, tem a função principal de reduzir a dispersão causada por descontinuidades na superfície do núcleo e também de fornecer resistência mecânica, protegendo o núcleo de contaminações (KEISER, 2000). Por sua vez, a capa, composta por um material plástico elástico, encapsula a casca e o núcleo, oferecendo proteção contra fatores que possam comprometer a integridade da fibra.

Figura 2 – Representação de uma Fibra Óptica Convencional.



Fonte: (SOUSA et al., 2017)

A classificação das fibras ópticas é baseada na variação geométrica do índice de refração entre a casca e o núcleo (AGRAWAL, 2014). Nas fibras de índice em degrau, o índice de refração muda abruptamente, enquanto nas fibras de índice gradual, o índice de refração diminui de forma progressiva. As Figuras 3 e 4 ilustram os perfis desses dois tipos de fibras ópticas.

O parâmetro V representa o número de modos guiados em uma fibra óptica convencional com raio r e comprimento de onda λ , sendo definido por (KEISER, 2000):

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

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

Para que a fibra seja monomodo $V < 2,4$ (AGRAWAL, 2014).

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

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

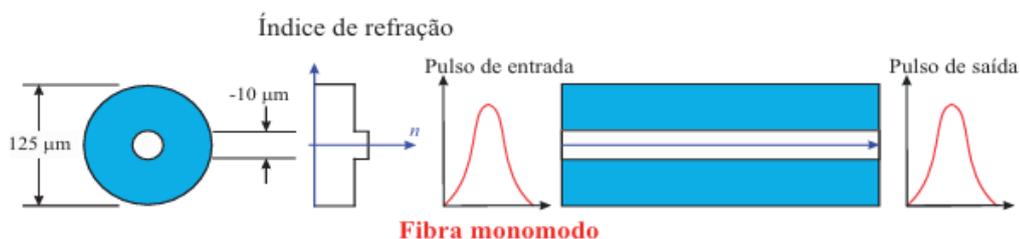
Quanto ao modo de propagação, a fibra óptica é dividida em dois tipos: monomodo e multimodo. Esta classificação está diretamente relacionada à largura de banda, que depende do comprimento, da forma geométrica e do perfil de índices de refração da fibra.

Para uma melhor compreensão, as duas categorias de fibras ópticas serão apresentadas separadamente nas seções seguintes.

2.1.1 Fibra Monomodo

A fibra monomodo (SMF – Single Mode Fiber) é assim denominada porque permite a propagação da luz ao longo do seu núcleo de apenas uma maneira. Apresenta uma diferença no índice de refração entre o núcleo e a casca, com dimensões típicas variando de 8 - 12 μm para o núcleo e 125 μm para a casca.

Figura 3 – Perfil da Fibra Monomodo.



Fonte: (OLIVEIRA, 2021)

Ela possui uma largura de banda maior do que as fibras multimodo, baixa atenuação, e pode alcançar distâncias superiores a 50 km entre repetidores. Entre os tipos de fibras monomodo, destacam-se as mais utilizadas (KEISER, 2000):

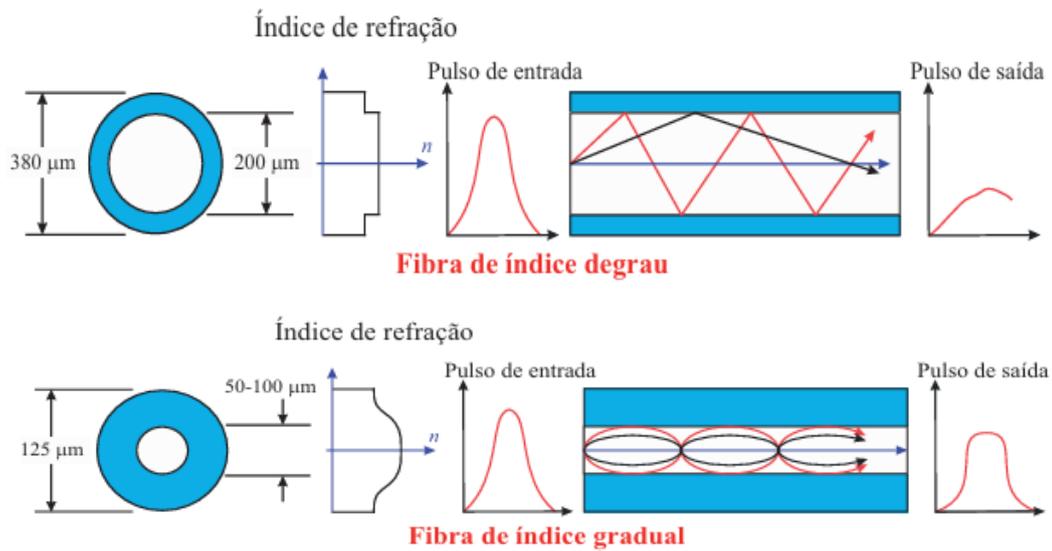
- Standard SMF (ITU G.652): É uma fibra padrão amplamente utilizada para a segunda janela, caracterizada por uma dispersão cromática próxima a zero na faixa de 1300 nm e alta dispersão na faixa de 1550 nm. Essa fibra pode apresentar uma atenuação de 0,35 dB/km em 1310 nm e possui uma área efetiva de $72 \mu m^2$. Por outro lado, a fibra monomodo com baixo teor de água (ITU G.652C/D) pode ter uma atenuação de 0,20 dB/km e a mesma área efetiva de $72 \mu m^2$.
- DSF (ITU G.653): É uma fibra com dispersão deslocada (DSF – Dispersion Shifted Fiber), desenvolvida para a terceira janela, com dispersão cromática zero em 1550 nm. No entanto, é desfavorável para sistemas DWDM devido ao aumento dos efeitos de mistura de quatro ondas (FWM).
- NZ-DSF (ITU G.655): Trata-se de uma fibra com dispersão deslocada não nula (NZ-DSF – Non-Zero Dispersion Shifted Fiber), indicada para sistemas DWDM. Esta fibra apresenta baixa dispersão em 1550 nm, embora não seja nula. Sua atenuação pode ser de 0,21 dB/km em 1550 nm, com uma área efetiva de $55 \mu m^2$.
- LWP (ITU G.652.C): É uma fibra com baixa concentração de íons de hidroxila (OH) (LWP – Low Water Peak) na faixa de 1400 nm, recomendada para sistemas CWDM. Esta fibra é adequada para aplicações na banda E.

Também são encontradas as fibras compensadoras de dispersão (DCF - Dispersion Compensating Fiber), que têm o papel de neutralizar as penalidades resultantes da 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 $55 \mu m^2$. São também frequentemente utilizadas em sistemas para regeneração 2R ou 3R de sinais ópticos.

2.1.2 Fibra Multimodo

A fibra multimodo (MMF – MultiMode Fiber) suporta vários modos de propagação e pode ter um perfil de índice de refração em degrau ou gradual. A Figura 4 ilustra os perfis de índice e os modos de propagação do pulso no núcleo deste tipo de fibra.

Figura 4 – Perfis da Fibra Multimodo.



Fonte: (OLIVEIRA et al., 2018)

A fibra óptica multimodo de índice em degrau possui núcleo e casca com diâmetros que variam de 50 a 200 μm e de 125 a 400 μm , respectivamente. No núcleo, há um material homogêneo com índice de refração constante e superior ao da casca. Este tipo de fibra é considerado inferior às demais devido à sua banda passante estreita e alta atenuação, sendo mais indicado para curtas distâncias.

A fibra óptica multimodo de índice gradual apresenta núcleo e casca com diâmetros variando de 50 a 100 μm e de 125 a 140 μm , respectivamente. Seu núcleo possui um índice de refração que varia gradualmente, o que evita o alargamento do pulso. Devido a essa característica, ela possui uma banda passante mais ampla, proporcionando uma maior capacidade de transmissão em comparação com a fibra de índice em degrau.

3 Óptica Não-Linear

Este capítulo explora o estado da arte das equações que regem a óptica não linear, como as Equações de Maxwell e sua relação com a propagação da luz, além da Equação de Schrödinger não linear. Também é apresentado um estudo sobre os efeitos não lineares que influenciam a transmissão de sinais em sistemas de comunicação óptica, abrangendo seus conceitos, causas principais e impactos.

3.1 Propagação da Onda em Fibras Ópticas

Para compreender os efeitos não lineares em fibras ópticas, é fundamental considerar a teoria da propagação eletromagnética em meios dispersivos não lineares. As Equações de Maxwell são ferramentas essenciais para derivar a equação de onda que descreve a propagação da luz em fibras ópticas, que funcionam como guias de onda de simetria cilíndrica. Esse fenômeno eletromagnético, quando analisado em meios sem fontes, pode ser descrito pelas equações a seguir ([AGRAWAL, 2014](#)):

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \quad (3.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3.2)$$

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

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (3.4)$$

onde \mathbf{E} e \mathbf{H} são os vetores campo elétrico e magnético, \mathbf{D} é o vetor densidade de fluxo elétrico e \mathbf{B} é o vetor indução magnética. Além disso, como a fibra óptica é um meio não magnético, as relações entre os vetores de campo são descritas pelas equações a seguir ([SOUSA et al., 2017](#); [OLIVEIRA et al., 2018](#)):

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

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

Em que ϵ_0 e μ_0 correspondem a permissividade elétrica e a permeabilidade magnética do vácuo, respectivamente. Neste contexto a polarização magnética induzida \mathbf{M} é nula (OLIVEIRA et al., 2018), por isso é suprimida da equação da indução magnética e \mathbf{P} é a polarização elétrica induzida no meio que é dada por (AGRAWAL, 2014):

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

onde \mathbf{P}_{NL} e χ são a componente não-linear da polarização e o termo linear da susceptibilidade.

Podemos determinar a equação que descreve os fenômenos ondulatórios dos campos eletromagnéticos na fibra óptica através das seguintes etapas:

Primeiro calcula-se o rotacional da equação (3.2), resultando em,

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\nabla \times \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3.8)$$

Organizando a equação acima e utilizando a relação (3.6), obtemos,

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{H}) \quad (3.9)$$

Em seguida, substituindo a relação (3.5) na equação (3.4) chegamos a equação (3.10):

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}) \quad (3.10)$$

E por fim, substituindo (3.10) em (3.9), temos,

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}) \right] \quad (3.11)$$

Organizando a equação (3.11) e sabendo que $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ (velocidade da luz no vácuo), resulta em

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial t^2} \quad (3.12)$$

Ademais, considerando $\nabla \cdot \mathbf{D} = \varepsilon \nabla \cdot \mathbf{E} = 0$, com $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ independente da posição e empregando a identidade vetorial $\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} \equiv \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} = -\nabla^2 \mathbf{E}$, obtemos:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu_0 \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} + \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial t^2} \quad (3.13)$$

3.2 Efeitos Não Lineares em Fibras Ópticas

Todo dielétrico, quando exposto a uma alta potência em seu campo eletromagnético, responde de maneira não linear, e as fibras ópticas não são exceção. Em uma fibra óptica real, diversos efeitos não lineares começam a surgir à medida que o nível de potência óptica aumenta, os quais, em certas situações, podem degradar o desempenho do sistema ou, alternativamente, serem úteis para determinadas aplicações (KEISER, 2000).

A propagação do sinal através da fibra óptica pode ser descrita pela Equação de Schrödinger Não Linear Simplificada (NLSE – Non-Linear Schrödinger Equation), derivada das equações de Maxwell (AGRAWAL, 2014):

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \frac{1}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} + \frac{\alpha}{2} A = i \gamma |A|^2 A \quad (3.14)$$

Em que A é a amplitude complexa do sinal óptico, β_1 e β_2 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 óptica é definido por (AGRAWAL, 2014):

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{ef}} \quad (3.15)$$

onde λ , n_2 e A_{ef} correspondem ao comprimento de onda do pulso, índice não linear e área modal efetiva do núcleo da fibra, respectivamente. Para a sílica, γ varia entre 1 e 5 $W^{-1} Km^{-1}$, conforme o tipo de fibra e o comprimento de onda (KEISER, 2000).

As não linearidades são classificadas, conforme demonstrado na tabela 2.1, de acordo com o índice e o espalhamento. Esses efeitos podem ser prejudiciais ao sistema de comunicação por fibra óptica e, se não forem adequadamente tratados, poderão comprometer a eficiência de transmissão dos sinais.

A não linearidade em campos intensos e em frequências ópticas distantes da frequência de ressonância do material exige que a polarização \mathbf{P} da luz na fibra óptica, induzida por dipolos

elétricos e descrita pela equação (3.7), seja representada como uma série de potências crescentes do campo elétrico \mathbf{E} , conforme (CARMO et al., 2010; YABLONOVITCH, 1987):

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 \sum_n \chi^{(j)} \mathbf{E}^{(j)} \quad (3.16)$$

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

A equação (3.16) é válida apenas se as respostas lineares e não lineares da fibra forem locais, resultando em uma refração não linear onde o índice de refração depende da intensidade efetiva do pulso de luz I , conforme descrito em (KEISER, 2000):

$$I = \frac{P}{A_{ef}} \quad (3.17)$$

Essa característica é responsável pela maioria dos efeitos não lineares. O índice de refração n é definido por (KEISER, 2000):

$$n = n_0 + n_2 \frac{P}{A_{ef}} \quad (3.18)$$

Onde n_0 é o índice de refração ordinário do material, n_2 é o índice de refração não linear e P é a potência óptica contida no pulso, medida em Watts, dentro da fibra. Para fibras de sílica, o valor numérico do índice de refração não linear é $n_2 = 2,6 \times 10^{-20} m^2/W$, podendo variar conforme os dopantes utilizados no núcleo (AGRAWAL, 2014). Ademais, A_{ef} é a área efetiva da fibra, calculada a partir de integrais de sobreposição dos modos, que está próxima da área real do núcleo, sendo definida por (PEREIRA et al., 2012):

$$A_{ef} = \frac{[\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |F(x,y)|^2 dx dy]^2}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |F(x,y)|^4 dx dy} \quad (3.19)$$

Em que $|F(x,y)|$ é a distribuição transversal do campo elétrico em função de x e y .

As não linearidades ópticas englobam: Espalhamento Raman Estimulado (SRS - Stimulated Raman Scattering), Espalhamento Brillouin Estimulado (SBS - Stimulated Brillouin Scattering) e o Efeito Kerr. A Tabela 1 resume esses efeitos, destacando que eles são independentes do número de canais WDM.

Diversas pesquisas foram conduzidas para compreender e utilizar os efeitos não lineares. No entanto, neste trabalho, serão abordados apenas os efeitos não lineares relacionados ao índice de refração do meio guiado. Portanto, daqui em diante, qualquer menção a efeitos não lineares será direcionada aos efeitos Kerr, que incluem a Automodulação de Fase (SPM - Self Phase Modulation), a Modulação de Fase Cruzada (XPM - Cross Phase Modulation) e a Mistura de Quatro Ondas (FWM - Four Wave Mixing).

Tabela 1 – Resumo dos efeitos Não Linearidades em fibras ópticas.

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

Fonte: Autor

Através da equação (3.18), podemos inferir que a intensidade do sinal de entrada resulta no aumento do índice de refração do material. O parâmetro n_2 é responsável pela não linearidade Kerr, que se manifesta em três efeitos distintos, os quais serão discutidos a seguir.

3.2.1 Modulação de Ganho Cruzado (XGM – Cross-Gain Modulation)

As variações na densidade de portadores no amplificador afetam todos os sinais de entrada, permitindo que um sinal forte em uma frequência afete o ganho de um sinal mais fraco em outra frequência. Esse fenômeno não linear é conhecido como Modulação de Ganho Cruzado (XGM) (SILVEIRA, 2011; SON et al., 2007).

O XGM altera a forma do sinal de entrada, agindo como um conversor de comprimento de onda através do chaveamento óptico no amplificador (EL-SAEED et al., 2016).

Um conversor óptico de comprimento de onda é um dispositivo que transfere informações de um comprimento de onda para outro. Ele pode empregar a técnica de modulação de ganho cruzado (XGM) para essa finalidade, utilizando amplificadores ópticos semicondutores (SOA). O efeito XGM se manifesta como uma variação no ganho do SOA em resposta à potência de entrada. Um aumento na potência do sinal de entrada leva a um esgotamento na densidade de portadores no SOA, resultando na redução do ganho de amplificação.

Na técnica de conversão de comprimento de onda utilizando XGM, a velocidade e a taxa máxima de transmissão do conversor são determinadas pelos processos dinâmicos na densidade de portadores do SOA, que ocorrem em tempos muito rápidos, da ordem de picossegundos. Isso permite aproveitar as flutuações bit a bit na potência de entrada para alcançar taxas de transmissão em torno de 10 Gb/s. No entanto, existem vários fatores que limitam o desempenho deste tipo de conversor. Estes incluem a sensibilidade à polarização, a degradação da relação sinal-ruído (SNR) devido à emissão espontânea amplificada (ASE), uma pequena razão de

extinção (já que o ganho nunca é reduzido a zero), limitações na velocidade de operação devido aos tempos de recuperação lentos dos portadores e à inversão da sequência de bits. Além disso, a eficiência de conversão depende dos comprimentos de onda de entrada e saída, enquanto a variação na densidade de portadores pode causar distorção na amplitude e modulação de fase no sinal de saída, induzindo um chirp de comprimento de onda que pode limitar significativamente a distância de transmissão (THAKUR; PANDOVE; GUPTA, 2012; ANJU; VIPIN, 2015).

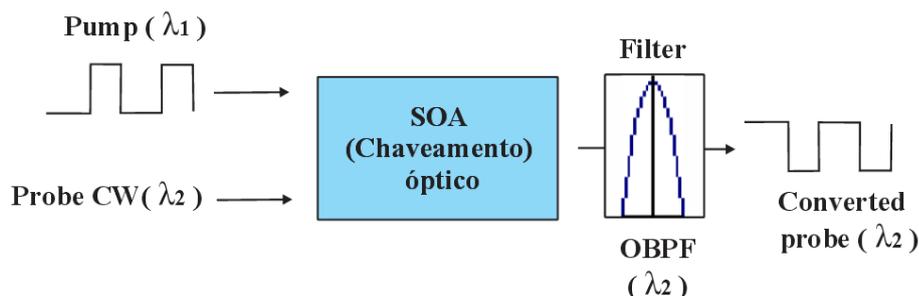
Em geral, a eficiência de conversão na XGM costuma ser inferior ao ganho do SOA, e a figura de ruído no processo de conversão tende a ser maior que a figura de ruído intrínseca do amplificador. Apesar dessas limitações, a técnica XGM é amplamente utilizada devido à sua simplicidade, alta eficiência de conversão (a relação entre a potência de saída e a de entrada), independência de polarização e insensibilidade ao comprimento de onda dos dados de entrada (SILVEIRA, 2011; THAKUR; PANDOVE; GUPTA, 2012; OLIVEIRA et al., 2018).

Na literatura, várias configurações são propostas para aproveitar esse efeito não linear. Diversas funções lógicas foram realizadas utilizando a modulação de ganho cruzado em amplificadores ópticos semicondutores, incluindo implementações de funções lógicas como AND, OR e NOR.

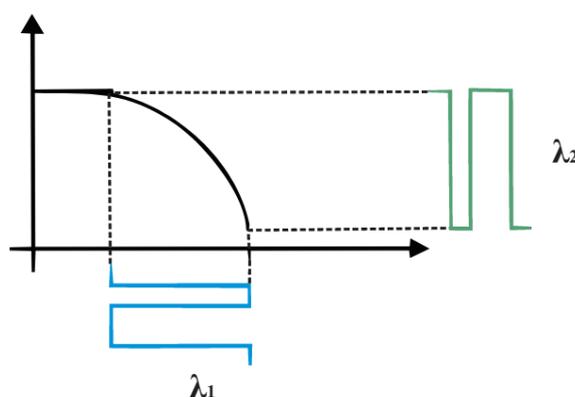
Este fenômeno ocorre quando um sinal modulado em intensidade, na frequência λ_1 , é injetado no SOA junto com um sinal contínuo (CW) na frequência λ_2 (EL-SAEED et al., 2016). Um sinal de alta potência de entrada (0 dBm = 1 mW), conhecido como sinal de bombeamento (Pump), é aplicado ao amplificador óptico semiconductor para esgotar o máximo de portadores na região ativa, resultando na compressão ou variação do ganho do SOA devido à depleção causada pela emissão estimulada na presença de uma fonte de alta potência. Isso amplifica o sinal (OLIVEIRA et al., 2018) e satura o dispositivo, distribuindo o ganho total disponível entre as duas frequências. Quando um sinal de potência mais baixa, como o sinal de sondagem (Probe), é injetado simultaneamente com o Pump, a Probe sofre atenuação devido à absorção dos portadores, enquanto o ganho do Pump aumenta. A modulação do ganho pelo sinal de entrada modula o sinal contínuo fraco na frequência de saída, resultando em uma maior distorção do sinal de saída. Isso ocorre devido à mudança na densidade de portadores, que também induz uma mudança no índice de refração (AGGARWAL; SINGH, 2016).

Figura 5 – Conversor de comprimento de onda baseado na XGM em SOA.

a) Configuração do SOA com XGM.



b) Saturação do ganho



Fonte: Adaptado de (OLIVEIRA et al., 2018)

Filtros ópticos de banda passante (OBPF) de alta qualidade são essenciais para filtrar o sinal na saída do dispositivo conversor, permitindo a passagem do comprimento de onda λ_2 , que foi modulado durante o processo de conversão, enquanto bloqueia o λ_1 . Se tanto o laser do sinal de teste quanto o filtro forem ajustáveis em termos de frequência, então temos um conversor ajustável. Caso contrário, o conversor é considerado fixo (OLIVEIRA et al., 2018).

Se um pulso óptico estiver presente no sinal de bombeamento, o ganho do SOA diminui, resultando em uma baixa amplificação do sinal contínuo de sondagem (OLIVEIRA et al., 2018). Por outro lado, se não houver pulso de luz no sinal de bombeamento, em λ_1 , o ganho do dispositivo aumenta, levando a uma alta amplificação do sinal contínuo em λ_2 . Dessa forma, o sinal de bombeamento de entrada em λ_1 é invertido na saída (SILVEIRA, 2011).

A presença do XGM dentro do amplificador resulta em uma cópia invertida da modulação do sinal de bombeamento na variação de ganho do SOA, que é então refletida no sinal contínuo de sondagem. Dessa forma, o sinal contínuo adquire a mesma modulação que o sinal de bombeamento em diferentes comprimentos de onda. Nesse cenário, a saída convertida é essencialmente uma versão invertida da entrada.

Um exemplo é quando o sinal de bombeamento está em um estado de baixa potência, o SOA não atinge a saturação e, conseqüentemente, o sinal de sondagem experimenta um ganho não saturado. Em contrapartida, em um estado de alta potência, o ganho é saturado e o sinal

de sondagem terá um ganho menor. O grau de redução do ganho depende principalmente da potência do sinal de bombeamento e da corrente de injeção aplicada ao amplificador. Dessa maneira, a modulação do sinal de bombeamento é transferida para o sinal de sondagem, com a polaridade do sinal sendo invertida (THAKUR; PANDOVE; GUPTA, 2012; ANJU; VIPIN, 2015).

Isso pode ser feito em um esquema de co-propagação, onde o sinal contínuo de sondagem e o sinal de informação viajam na mesma direção (SILVEIRA, 2011).

A velocidade com que o XGM pode operar é principalmente determinada pela rapidez com que o ganho do SOA pode se recuperar, e esse tempo de recuperação é reduzido quando o SOA é operado em condições de saturação. Para aumentar a velocidade, o SOA pode ser operado com alta intensidade óptica, diminuindo assim o tempo de recuperação do ganho devido à recombinação estimulada dos portadores (DUTTA; WANG, 2013).

3.2.2 Automodulação de Fase (SPM – Self-Phase Modulation)

Este efeito refere-se ao deslocamento de fase auto-induzido, onde diferentes partes do pulso sofrem mudanças de fase distintas, limitando o desempenho do sistema ao longo do comprimento de fibras ópticas monocal, pois ocorre apenas nesse tipo de fibra. Ele também provoca um alargamento do espectro do pulso no domínio da frequência, enquanto mantém a forma temporal, um fenômeno conhecido como chirp de frequência dos pulsos induzido por SPM. Este efeito é dependente da intensidade da potência incidente, do índice de refração não-linear do amplificador e do coeficiente de não linearidade da fibra. Os efeitos do SPM são mais prevalentes em sistemas com altas potências transmitidas, ampliando os efeitos de dispersão cromática dos pulsos. Isso é particularmente relevante para sistemas de alta taxa de bits, como aqueles de 10 Gb/s ou mais, que possuem limitações significativas devido à dispersão. Em contrapartida, sistemas de taxa de bits mais baixa com altas potências de transmissão podem experimentar um aumento considerável nos efeitos de amplificação de pulso devido à dispersão cromática (SOUSA et al., 2017; DUTTA; WANG, 2013).

O índice de refração para o meio não linear é (SINGH; TIWARI; RAJCHANDANI, 2014):

$$n = n_0 + n_2 I \quad (3.20)$$

As variações no índice de refração resultam em mudanças de fase que dependem do tempo. Dessa forma, o SPM é descrito por (SOUSA et al., 2017):

$$\phi_{SPM}^{NL} = \gamma |E_1|^2 L_{eff} \quad (3.21)$$

Em que $|\mathbf{E}|$ é o módulo do campo elétrico e L_{eff} é o comprimento efetivo da fibra com absorção da energia ao longo do seu comprimento.

Esse fenômeno, também conhecido como efeito Kerr, ocorre porque a fase do feixe de luz depende do índice de refração do meio. O próprio feixe altera o índice de refração, provocando assim a mudança de sua própria fase (SINGH; TIWARI; RAJCHANDANI, 2014).

Com o aumento da potência de entrada, a taxa de erro de bit (BER) aumenta e o fator de qualidade (fator Q) diminui. Como resultado, o efeito de auto-modulação de fase se intensifica, enfraquecendo o sinal e reduzindo a abertura do diagrama de olho.

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

Há uma diferença significativa entre o efeito XGM e o XPM. O XGM baseia-se na modulação do ganho do amplificador óptico semiconductor (SOA) devido a um sinal de entrada forte. Por outro lado, o XPM se baseia na variação do índice de refração do material semiconductor, causada pelo sinal óptico de entrada, que altera a densidade de portadores. Essa variação é percebida como uma modulação de fase por um sinal contínuo de bombeamento (CW) injetado no SOA (OLIVEIRA et al., 2018).

O XPM é semelhante ao SPM, mas com a diferença de que o XPM opera em sistemas multicanais. Isso ocorre com a propagação simultânea de dois ou mais sinais ópticos na mesma fibra, em diferentes comprimentos de onda, como nos sistemas WDM. O XPM está sempre acompanhado pelo SPM. Dessa forma, um feixe afeta outro feixe por meio da mudança no índice de refração, quando feixes de luz em diferentes frequências se propagam simultaneamente. O desvio de fase resultante depende não apenas da potência do próprio canal, mas também da potência dos outros canais na fibra (SOUSA et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2018).

A potência do próprio canal, juntamente com a de outros canais, gera um deslocamento de fase para o J-ésimo canal, conforme descrito pela seguinte expressão:

$$\phi_j^{NL} = \gamma L_{eff} [P_j + 2 \sum_{m \neq j} P_m] \quad (3.22)$$

Os pulsos de sinal, sendo aleatórios, se sobrepõem em pontos instantâneos, resultando no efeito XPM. Isso gera um ruído aleatório no canal e uma alta taxa de erro de bit (BER). Se os pulsos tiverem frequências diferentes, suas velocidades também serão diferentes, criando um intervalo entre eles. No entanto, se começarem a se propagar juntos, tenderão a se separar ao longo da fibra, aumentando a dispersão. Para reduzir essa dispersão, é necessário aproximar as velocidades, o que intensifica o efeito XPM (SINGH; TIWARI; RAJCHANDANI, 2014).

Os efeitos do XPM podem ser mitigados aumentando o espaçamento entre canais, o que resulta em um aumento do fator Q e uma redução na taxa de erro de bit (BER). No entanto,

com o aumento da taxa de bits, há uma maior dispersão dos espectros dos canais, o que leva a um aumento tanto na BER quanto na transferência de potência de XPM (SOUSA et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2018).

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

Esse fenômeno ocorre em fibras multicanais, onde dois, três ou mais sinais podem ser transmitidos na mesma direção. Ele opera de forma semelhante ao processo paramétrico, onde ocorre a interferência de diferentes frequências com as frequências originais, gerando novos sinais em comprimentos de onda espaçados nos mesmos intervalos. Esses novos produtos espectrais são conhecidos como bandas laterais em $(2\omega_1 - \omega_2)$ e $(2\omega_2 - \omega_1)$, resultantes do sinal de mistura (SOUSA et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2018).

Essas bandas laterais viajam junto com as ondas originais e enfraquecem o sinal quando ocorre a mistura dos sinais. O número de sinais recém-gerados é determinado por (OLIVEIRA et al., 2018):

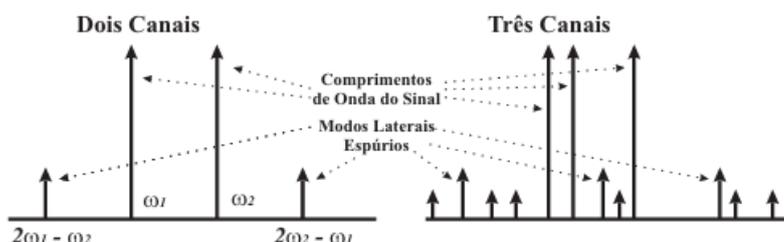
$$FWM = \frac{N^2}{2}(N - 1) \quad (3.23)$$

onde N é o número de componentes de frequência de entrada.

Em sistemas WDM, as bandas adicionais são conhecidas como ondas parasitas, representando um desafio significativo para os sistemas devido ao fenômeno de crosstalk (diafonia). É crucial minimizar esse efeito FWM ajustando diversos parâmetros. Vale ressaltar que a mistura de quatro ondas é independente da taxa de bits, mas depende do índice de refração, da intensidade de potência dos sinais, da baixa dispersão cromática, do aumento da área efetiva e do espaçamento entre os canais (KEISER, 2000; SOUSA et al., 2017).

Na Figura 6 (SOUSA et al., 2017), podemos visualizar a degradação do sinal em um sistema WDM com dois e três canais, resultante do efeito FWM.

Figura 6 – Efeito de FWM no domínio da frequência.



Fonte: (OLIVEIRA, 2021)

Aumentar a intensidade da potência de entrada leva a um aumento significativo no efeito

de FWM. No entanto, ao aumentar o espaçamento entre os canais, há uma diminuição na potência das bandas laterais, o que resulta em uma redução no efeito de FWM.

O casamento de fase não ocorre devido às ondas geradas e às do sinal terem diferentes velocidades de grupo, o que reduz a transferência de potência para as frequências geradas. No caso do FWM, a dispersão varia de acordo com o comprimento de onda, resultando em interferência quando qualquer onda gerada e a onda do sinal têm o mesmo comprimento de onda. Diferenças nas velocidades de grupo e um aumento na dispersão da fibra e no espaçamento entre canais podem diminuir o efeito de FWM ([KEISER, 2000](#)).

4 Dispositivos baseados em fibra óptica

Nos capítulos anteriores, foi apresentada uma variedade de efeitos ópticos que surgem da propagação de pulsos ópticos em fibras ópticas, utilizadas como meio não-linear. Com base nesses efeitos, diversos dispositivos demonstram excelentes resultados ópticos e são amplamente aplicados em áreas como optoeletrônica, telecomunicações, processamento digital totalmente óptico, portas lógicas totalmente ópticas e chaveamento óptico (SOUSA et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2018).

Para se compreender a estrutura do sistema óptico proposto neste trabalho, serão discutidos o funcionamento do amplificador óptico semiconductor (SOA – Semiconductor Optical Amplifier), os conceitos e características dos acopladores de fibras ópticas convencionais, das Fibras de Grade de Bragg (FBGs), bem como o funcionamento do laser de onda contínua (Continuous Wave – CW).

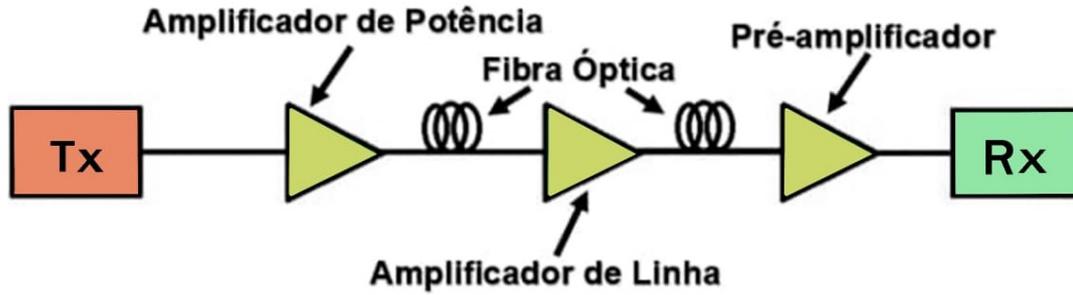
4.1 Amplificador óptico semiconductor

Um amplificador óptico semiconductor (SOA) é um dispositivo optoeletrônico não linear que amplifica um sinal de entrada, oferecendo uma solução prática para diversas funções em dispositivos de processamento de sinal totalmente óptico. Ele é capaz de lidar com sinais complexos e processar taxas de dados de até 40 Gb/s, consumindo significativamente menos energia, cerca de 1W (SAXENA; SAXENA; RIZVI, 2015).

4.1.1 Amplificadores ópticos

Em redes de fibra óptica, diversos tipos de amplificadores são utilizados, como ilustrado na Figura 7. Os mais comuns incluem o amplificador de fibra dopada com érbio (EDFA - Erbium-Doped Fiber Amplifier), o amplificador Raman, o amplificador óptico semiconductor (SOA - Semiconductor Optical Amplifier) e o amplificador paramétrico. Nesta pesquisa, o foco será o amplificador utilizado nos projetos das portas lógicas implementadas, especificamente o Amplificador Óptico de Semiconductor de Onda Propagante (SOA - Travelling-Wave).

Figura 7 – Configurações possíveis para um amplificador em redes ópticas.



Fonte: Adaptado de (SOUSA et al., 2017)

O princípio de funcionamento de um amplificador óptico genérico é baseado na absorção da potência de uma fonte de bombeio (SOUSA et al., 2017). O primeiro parâmetro a ser analisado é seu ganho, medido em decibéis (dB), conforme indicado em (KEISER, 2000):

$$G = 10 \log \left(\frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \right) \quad (4.1)$$

em que $P_{entrada}$ e $P_{saída}$ são as potências de entrada e saída.

Outro parâmetro importante é a relação sinal-ruído (SNR - Signal to Noise Ratio), que determina o desempenho de um amplificador. Durante o processo de amplificação, ruídos indesejáveis são gerados devido ao limite de saturação e à alta potência de entrada, o que degrada a SNR por causa da emissão espontânea amplificada (ASE - Amplified Spontaneous Emission) (AGRAWAL, 2014). O SNR pode ser representado por (SOUSA, 2014):

$$SNR = \frac{P_{sinal}}{P_{ruído}} = \left(\frac{A_{sinal}}{A_{ruído}} \right)^2 \quad (4.2)$$

onde P é a potência e A é a amplitude.

A relação sinal-ruído óptica ($OSNR$ - Optical Signal to Noise Ratio) refere-se à potência óptica gerada quando o sinal óptico é convertido em corrente elétrica (SOUSA et al., 2017), sendo a principal medida do nível de ruído. A $OSNR$ é a razão entre a potência média do sinal na saída do amplificador (P_{med} ou P_{sinal}) e a potência do ruído óptico de ASE (P_{ASE} ou $P_{ruído}$), avaliada em uma certa largura de banda de referência. Esta razão é expressa em decibéis (dB) conforme (KEISER, 2000):

$$OSNR_{dB} = 10 \times \log \left(\frac{P_{sinal}}{P_{ruído}} \right) \quad (4.3)$$

Para especificar o desempenho de um receptor óptico, é essencial considerar a $OSNR$, uma vez que a medida que a potência do ruído (ASE) aumenta, o ganho do amplificador diminui,

resultando em uma redução da *OSNR*. Além disso, utiliza-se o fator de qualidade (fator Q), que está relacionado à qualidade do sinal óptico em termos da relação sinal-ruído no domínio do tempo, conforme a equação (KEISER, 2000):

$$Q = \frac{2\sqrt{2}OSNR}{1 + \sqrt{1 + 4OSNR}} \quad (4.4)$$

Portanto, a *OSNR* é um parâmetro essencial para analisar o desempenho dos canais ópticos individuais. Para uma avaliação mais abrangente do desempenho do receptor, é importante considerar a relação entre o fator Q e a *OSNR*, conforme indicado em (KEISER, 2000):

$$OSNR = \frac{1}{2}Q(Q + \sqrt{2}) \quad (4.5)$$

O desempenho de sistemas digitais pode ser avaliado pela Taxa de Erro de Bit (*BER* - Bit Error Rate), que é a probabilidade de um bit ser incorretamente identificado pelo circuito de decisão do receptor. Por exemplo, uma *BER* de 2×10^{-9} significa, em média, 2 bits incorretos a cada 1 bilhão de bits transmitidos (AGRAWAL, 2005). A relação entre a *BER* e o fator Q no limiar ideal é expressa por (KEISER, 2000):

$$BER = \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \right] \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{e^{-Q^2/2}}{Q} \quad (4.6)$$

em que $\operatorname{erfc}(x)$ é a função de erro complementar, dada por:

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-y^2} dy \quad (4.7)$$

A *BER* varia inversamente com o fator Q , isto é, à medida que o Q -fator aumenta, a *BER* diminui, e conforme a *BER* aumenta, a *OSNR* diminui (AGRAWAL, 2005; SOUSA et al., 2017). Para um desempenho ideal dos sistemas ópticos, esses parâmetros devem atingir valores específicos: um Q -fator de 6, correspondente a uma *BER* de 10^{-9} , e uma *OSNR* de 13,5 dB (SOUSA et al., 2017; AGRAWAL, 2014).

A *OSNR* pode ser medida utilizando um analisador de espectro óptico (*OSA* - Optical Signal Analyzer) (KEISER, 2000), enquanto o Q -fator e a *BER* podem ser avaliados através do Diagrama de Olho.

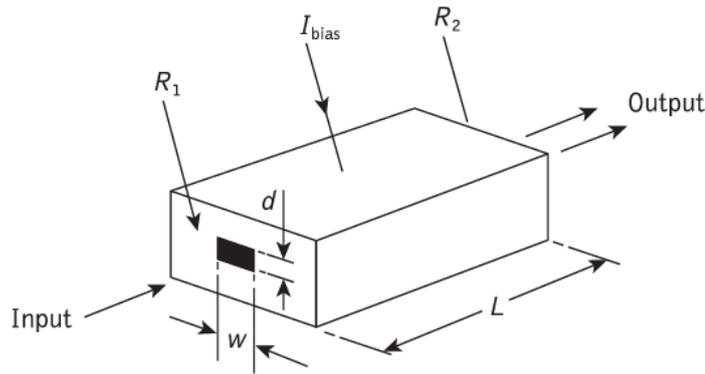
4.1.2 Amplificador Óptico Semicondutor (SOA)

SOAs são atraentes para diversas aplicações de processamento de sinal óptico, como comutação totalmente óptica, conversão de comprimento de onda e regeneração de sinal. Além

disso, podem ser integrados com semicondutores, lasers, moduladores e outros componentes, oferecendo vantagens como baixo consumo de energia, integração homogênea, compacidade, alta velocidade de operação e estabilidade (NEAMA; DESHER, 2017).

Consiste em uma estrutura compacta de guia de ondas, semelhante a um laser, mas sem superfícies refletivas, operando abaixo do limiar de emissão laser. Sua principal vantagem é a facilidade de integração em sistemas subsequentes, o que é essencial para sistemas de comunicação óptica (SENIOR; JAMRO, 2009; SINGH; TIWARI; RAJCHANDANI, 2014).

Figura 8 – Configuração esquemática de um SOA.



Fonte: (SENIOR; JAMRO, 2009)

Alterações no ganho ocorrem dentro da região ativa do SOA quando há injeção de luz e polarização de corrente. Essas mudanças podem ser descritas por meio de uma equação característica de ganho. Definindo g como o ganho interno, obtém-se a Equação 4.8:

$$g(n) = \Gamma v_g g_m(n) = \Gamma v_g \alpha (n - n_0) \quad (4.8)$$

onde α representa a variação do ganho em relação a n (ganho diferencial); n é a densidade de portadores na região ativa; n_0 é a densidade de portadores na transparência; Γ é o fator de confinamento do campo óptico na região ativa; e v_g é a velocidade de grupo do campo incidente. O ganho interno corresponde à taxa de emissão estimulada (AGRAWAL, 2014).

Definindo G como a razão entre as potências de saída e de entrada, tem-se a Equação 4.9:

$$G(n, L) = \frac{P_{out} e^{gL(n)L}}{P_{in}} = e^{gL(n)L} \quad (4.9)$$

em que $P_{out}(n, L) \equiv P(n, z)|_{z=L} = P_e^{gL(n)L} e$, e L é o comprimento do amplificador.

O sinal de entrada fraco é amplificado pela taxa de emissão estimulada, que depende da densidade e da distribuição dos portadores na região ativa do amplificador. Esta região, que atua como um guia de ondas, confina o sinal propagante e permite o ganho através da injeção de uma corrente elétrica externa. Caso o confinamento não seja perfeito, o sinal pode se propagar pelas regiões adjacentes à região ativa. O sinal de saída é acompanhado por ruído ASE (Amplified Spontaneous Emission), gerado durante a amplificação e que não pode ser completamente eliminado. Se as faces do amplificador forem refletivas, podem causar picos no espectro de ganho (OLIVEIRA et al., 2018).

Até o momento, temos considerado o ganho linear, válido apenas para baixos níveis de potência. Quando um sinal de maior energia é injetado no SOA, a concentração de portadores diminui devido à emissão estimulada, resultando em uma redução do ganho do SOA, fenômeno conhecido como saturação de ganho. Nesta condição, o amplificador fica saturado e apresenta um ganho não-linear. Essa saturação afeta todos os comprimentos de onda dentro do espectro de ganho, já que o espectro de ganho do material é amplificado de forma homogênea (SILVEIRA, 2011).

A partir de um determinado ponto, o aumento da corrente deixa de ser tão eficiente devido à dependência do ganho interno com a potência de entrada. Quando a potência incidente no amplificador se aproxima da potência de saturação — o nível em que o ganho é reduzido pela metade — o amplificador deixa de ser linear em relação à potência, e o ganho diminui conforme a potência aumenta. O ganho total, G , é definido pela Equação 4.10.

$$G = \frac{G_0}{1 + \frac{P_{in}}{P_{sat,in}}} \quad (4.10)$$

onde G_0 é o ganho não saturado, também conhecido como ganho para "pequenos sinais", e $P_{sat,in}$ é a potência de saturação de entrada (OLIVEIRA et al., 2018; KUMAR; KUMAR; RAGHUWANSHI, 2013).

Os principais tipos de SOA são: Fabry-Perot (FPA), que possui uma cavidade refletiva parcial; e de ondas propagantes (TW - Travelling-Wave), que propaga a luz através do meio apenas uma vez. Devido a certas desvantagens dos FPAs, os TWs são os mais utilizados (OLIVEIRA et al., 2018).

Os efeitos não lineares tornam o SOA um dispositivo altamente promissor para redes de fibra óptica. Esses efeitos dependem do design do sistema, como o efeito XGM, no qual o ganho do SOA varia em resposta à potência do sinal de entrada. Isso ocorre porque o aumento da potência resulta em uma perda de densidade de portadores no amplificador, em uma escala da ordem dos picossegundos (ps), levando a uma redução do ganho (KUMAR; KUMAR; RAGHUWANSHI, 2013).

As não linearidades do SOA surgem principalmente devido às variações na densidade de portadores dentro do amplificador. Os quatro principais efeitos não lineares são: modulação de fase cruzada (XPM), modulação de ganho cruzado (XGM), modulação de fase intrínseca (SPM) e mistura de quatro ondas (FWM). Esses efeitos permitem a criação de diversas configurações para projetar modelos de portas lógicas totalmente ópticas, aproveitando a emissão estimulada no SOA durante o processo de amplificação. Essas portas podem oferecer conversão de comprimento de onda com alta eficiência energética, ampla faixa de conversão e alta relação sinal-ruído (*OSNR*) para o sinal convertido (AGGARWAL; SINGH, 2016; SINGH; TRIPATHI; DIXIT, 2014).

Foram propostas as portas lógicas AND, OR e NOR para investigar a resposta não linear do amplificador óptico semiconductor (SOA) em relação ao efeito de modulação de ganho cruzado (XGM). Nesse arranjo, o sinal de entrada de dados, combinado com o sinal do laser de onda contínua (CW Laser), é introduzido no SOA, que atua como um elemento não linear ativo. Um filtro óptico é posicionado na saída do amplificador, com sua largura de banda e comprimento de onda ajustados de acordo com a operação da porta lógica desejada. Por exemplo, para obter a operação de detecção das lógicas OR ou NOR, basta ajustar o comprimento de onda do filtro óptico.

Na Tabela 2 (EL-SAEED et al., 2016) a seguir estão listados os parâmetros empregados nas simulações para o SOA.

Tabela 2 – Configurações aplicadas ao SOA nas simulações

Parâmetros do SOA	Valores Atribuídos
Corrente de injeção	0,15 A
Comprimento	500 μm
Largura	3 μm
Altura	80 nm
Fator de confinamento	0,3
Ganho diferencial	$2,78 \times 10^{-20} m^2$
Densidade de transportadora na transparência	$1,4 \times 10^{24} m^{-3}$
Fator de aprimoramento da largura da linha	5
Coefficiente de recombinação de superfície e defeito	$1,43 \times 10^8 s^{-1}$
Coefficiente de recombinação de radiativa	$1 \times 10^{-16} m^3 \cdot s^{-1}$
Coefficiente de recombinação Auger	$3 \times 10^{-41} m^6 \cdot s^{-1}$
Densidade inicial da transportadora	$3 \times 10^{24} m^{-3}$

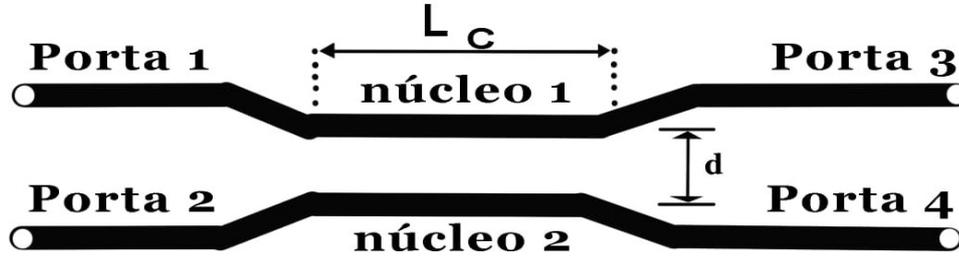
Fonte: Autor

4.1.3 Acoplador Direcional Não Linear (NLDC)

Os acopladores direcionais são dispositivos passivos e unidirecionais formados por duas fibras paralelas. Em um determinado comprimento L_C , seus núcleos são aproximados a uma distância d , permitindo que o campo evanescente de uma fibra excite modos de propagação na

outra. O acoplador possui duas entradas e duas saídas, com a função de receber o pulso óptico de uma das entradas e dividi-lo coerentemente entre as saídas, conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Esquema do Acoplador Direcional Duplo Não-Linear de comprimento L_C .



Fonte: Adaptado de (OLIVEIRA et al., 2018)

A Porta 1 é conhecida como a porta de entrada de potência, enquanto a Porta 4 é chamada de porta acoplada e a Porta 3 é considerada a porta transmitida, ambas servindo como portas de saída. Em acopladores assimétricos, a Porta 3 é a entrada e a Porta 2 é denominada porta isolada, recebendo parte da potência da Porta 3. No entanto, acopladores simétricos são mais comuns, com a Porta 2 terminada com uma carga combinada e não disponível para uso (OLIVEIRA et al., 2018).

A variação das amplitudes A_1 e A_2 (propagação pelos núcleos 1 e 2) devido à sobreposição entre os dois modos ao longo do comprimento de acoplamento L_C , resulta em uma constante k (constante de acoplamento) que quantifica essa interação. A transferência de potência entre os núcleos depende da potência crítica P_C , que é o valor necessário para que a potência de entrada seja dividida igualmente, com 50% transferido para cada uma das portas de saída do acoplador, como no caso de um acoplador de 3 dB. A potência crítica pode ser determinada pela Equação 4.11.

$$P_C = \frac{A_{eff}\lambda}{n_{NL}L_C} \quad (4.11)$$

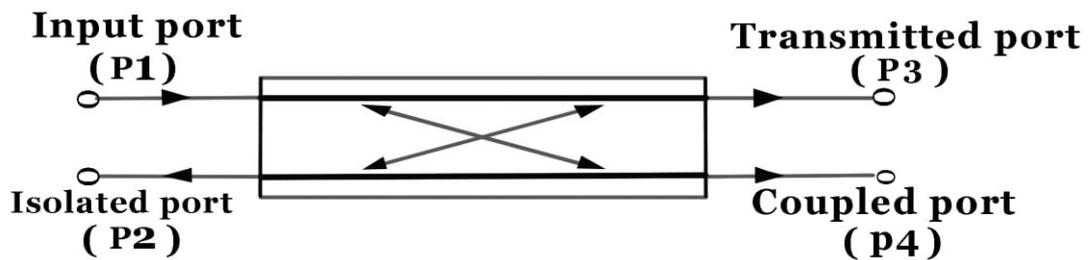
onde A_{eff} é a área efetiva do núcleo da fibra, λ é o comprimento de onda no vácuo, e n_{NL} é o índice de refração não linear. A simetria é quebrada pela aproximação dos núcleos ao longo do comprimento de acoplamento, permitindo a transferência de energia de um guia para o outro, conforme descrito por:

$$L_C = \frac{\pi}{2C} \quad (4.12)$$

em que C representa o coeficiente de acoplamento linear entre os núcleos adjacentes. O comprimento de acoplamento é inversamente proporcional à potência crítica, podendo ser ajustado pela modificação desse comprimento (QUEIROZ, 2015).

Os pulsos aplicados na porta 1 são direcionados para uma das portas de saída, dependendo de suas potências. Considerando a potência do sinal que entra na porta 1 do acoplador (Figura 9) como sendo inferior à potência crítica do acoplador, temos um acoplador linear. Nesse caso, o feixe óptico se propaga periodicamente entre os guias que constituem o dispositivo devido ao acoplamento evanescente. Um sinal de entrada de baixa potência na porta 1 é totalmente transferido para a outra fibra na porta 4, permitindo a interação com troca de energia entre os campos de propagação nos guias de transmissão. Isso resulta no acoplamento de pulsos e na divisão de sinais, com a capacidade de processar informações em velocidades ultrarrápidas e chavear pulsos ultracurtos. Se o sinal que entra na porta 1 tiver uma potência superior à potência crítica, o pulso é simplesmente transmitido na mesma fibra para a porta 3. Caso um pulso entre pela porta de saída (porta 3), ele será transferido para a porta isolada (porta 2) (FRAGA, 2006; FILHO, 2012; AGGARWAL; SINGH, 2016).

Figura 10 – Representação das portas do Acoplador Direcional Duplo.



Fonte: Adaptado de (OLIVEIRA et al., 2018)

Portanto, se a direção do sinal chaveado for a mesma do sinal incidente, temos acopladores direcionais ou copropagantes. Por outro lado, se a direção for oposta, os acopladores são denominados contrapropagantes ou contradirecionais. Os acopladores são amplamente utilizados em outros dispositivos ópticos que necessitam dividir o feixe óptico em dois feixes coerentes ou uni-los caso estejam fisicamente separados (QUEIROZ, 2015).

Dispositivos que utilizam guias de ondas distintos, como acopladores direcionais não lineares assimétricos, têm aplicações significativas na criação de portas lógicas totalmente ópticas e no chaveamento de energia com baixas potências.

As equações que descrevem a dinâmica de um acoplador duplo são derivadas da equação de Schrödinger não linear (NLSE). Esta equação captura a propagação de pulsos em meios que exibem efeitos não lineares do tipo Kerr, dispersão da velocidade de grupo (GVD) e acoplamentos lineares. Para acopladores duplos, como ilustrado na Figura 9, obtemos:

$$i\frac{\partial A_1}{\partial z} - \frac{1}{2}\beta_2\frac{\partial^2 A_1}{\partial T^2} + \gamma|A_1|^2A_1 + CA_2 = 0 \quad (4.13)$$

$$i\frac{\partial A_2}{\partial z} - \frac{1}{2}\beta_2\frac{\partial^2 A_2}{\partial T^2} + \gamma|A_2|^2 A_2 + CA_1 = 0 \quad (4.14)$$

Onde A_j é o pulso propagado na fibra $j = (1, 2, 3, \dots, n)$, γ a automodulação de fase (SPM) e o termo C é o coeficiente de acoplamento linear (SOUSA, 2014).

Para garantir a propagação do sinal dentro do acoplador, os índices de refração n_1 e n_2 dos núcleos devem ser maiores que o índice de refração do meio circundante. Quando ambos os núcleos possuem o mesmo raio e índices de refração iguais ($n_1 = n_2$), o acoplador é considerado simétrico.

4.1.4 Grade de Bragg em Fibra

Nas redes ópticas, um desafio comum é lidar com a dispersão, que pode distorcer os sinais transmitidos. Para mitigar esse problema, utilizam-se componentes como a Grade de Bragg em Fibra (FBG), que é capaz de compensar essas perdas de dispersão durante a transmissão de dados em redes de comunicação óptica (OLIVEIRA et al., 2018).

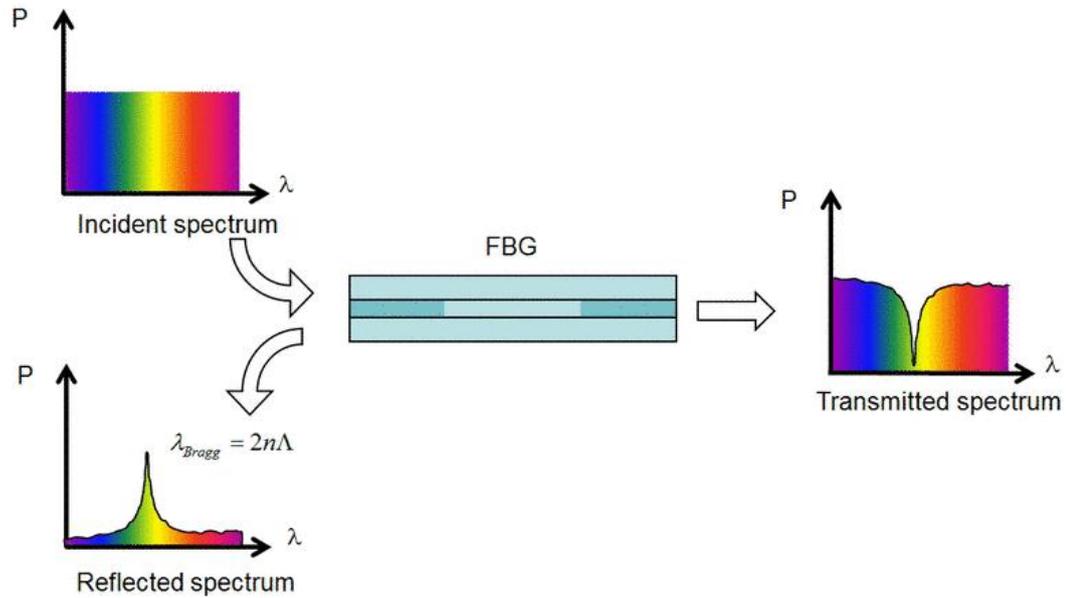
A Grade de Bragg em Fibra (FBG) consiste em uma estrutura que introduz uma variação periódica no índice de refração do núcleo da fibra. Essa variação é capaz de refletir ou transmitir luz dependendo do comprimento de onda da FBG (λ_{Bragg}), que por sua vez é influenciado pela largura do pulso e sua potência. Essa relação está relacionada com a periodicidade da modulação do índice de refração (Λ) e com o índice de refração efetivo do núcleo (n_{eff}), conforme expresso na equação (4.15).

$$\lambda_{Bragg} = 2n_{eff}\Lambda \quad (4.15)$$

Este dispositivo atua como um acoplador bidirecional de energia, além de funcionar como um filtro espectral refletor dentro da fibra óptica. Ele tem a capacidade de refletir ou selecionar uma gama específica de comprimentos de onda, enquanto permanece transparente para outras partes do espectro.

A ilustração da Figura 11 (OLIVEIRA et al., 2018) mostra uma rede de Grade de Bragg sendo irradiada por uma fonte de luz com um amplo espectro. Nesse cenário, uma faixa específica desse espectro de luz, focalizada no comprimento de onda da Bragg, será refletida, enquanto as demais faixas do espectro serão transmitidas.

Figura 11 – Esquema do funcionamento de uma Rede de Bragg.



Fonte: Autor

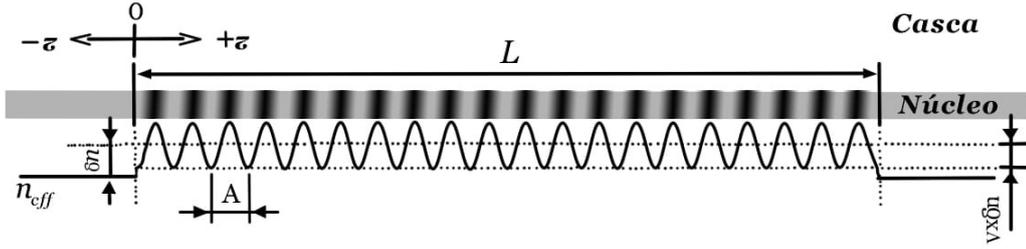
A alteração no índice de refração efetivo do núcleo da fibra (n_{eff}) para os modos guiados de interesse é definida como:

$$\delta n_{eff}(z) = \bar{\delta} n_{eff}(z) \left\{ 1 + v \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} z + \phi(z) \right] \right\} \quad (4.16)$$

onde $\bar{\delta} n_{eff}$ representa a variação do índice de refração do núcleo com o incremento do índice de refração médio ao longo de um período da grade, $\phi(z)$ é a fase da grade, Λ é o período de modulação da grade, geralmente de algumas centenas de nanômetros, e v é a visibilidade das franjas ou a razão de modulação. A variável z indica a posição da grade (SOUSA, 2014).

A perturbação no índice de refração dentro do núcleo da fibra óptica cria, por reflexão, um modo contra-propagante (no sentido $z-$) a partir do modo principal (no sentido $z+$), conforme ilustrado na Figura 12 (SOUSA, 2008). Adotando a convenção de que o eixo z se estende da esquerda para a direita, os parâmetros descritos representam o perfil periódico do índice de refração de uma FBG com comprimento L , exibido como uma curva senoidal.

Figura 12 – Diagrama da perturbação do índice de uma FBG uniforme.



Fonte: Adaptado de (OLIVEIRA et al., 2018)

Com base na teoria de acoplamento de modos ópticos, a refletividade de uma rede de Bragg em relação ao comprimento de onda da luz incidente pode ser deduzida em função do desfasamento:

$$\delta\beta = \beta - \frac{\pi}{\Lambda} \quad (4.17)$$

entre a constante de propagação

$$\beta = \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda} \quad (4.18)$$

e o vetor k da rede $\frac{2\pi}{\Lambda}$ a partir da expressão (FILHO, 2012; OLIVEIRA et al., 2018):

$$R = \frac{k^2 \sinh(SL)}{\delta\beta^2 \sinh^2(SL) + S^2 \cosh(SL)}, \quad |k| > |\delta\beta| \quad (4.19)$$

$$R = \frac{k^2 \sin(QL)}{\delta\beta^2 - k^2 \cos(QL)}, \quad |k| < |\delta\beta| \quad (4.20)$$

Em que:

$$(\delta\beta)L = \frac{2\pi n_{eff}L}{\lambda} - \frac{2\pi n_{eff}L}{\lambda_{Bragg}} \quad (4.21)$$

$$SL = (\delta\beta)L \left[\left(\frac{kL}{(\delta\beta)L} \right)^2 - 1 \right]^{1/2} \quad (4.22)$$

$$QL = (\delta\beta)L \left[1 - \left(\frac{kL}{(\delta\beta)L} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.23)$$

onde λ é o comprimento de onda da luz. Se λ estiver próximo ao comprimento de onda de Bragg, a refletividade segue a equação (4.19); caso contrário, segue a equação (4.20). A refletividade atinge seu valor máximo quando $\delta\beta = 0$ ou, de forma equivalente, quando $\lambda = \lambda_{Bragg}$. Consequentemente, a equação (4.19) fornece a expressão para a refletividade máxima, conforme apresentado em (OLIVEIRA et al., 2018):

$$R_{max} = \tanh^2(kL) \quad (4.24)$$

4.1.5 CW Laser

Considerando o caso mais simples de uma onda contínua (Continuous Wave – CW) incidindo em uma das portas do acoplador, os termos dependentes do tempo podem ser desconsiderados.

Em uma onda contínua ou operação em CW, a distribuição de frequência da luz do laser atinge um estado estacionário. Isso permite explorar o efeito da saturação de ganho no espectro de frequência, que pode ser estabilizado ou ajustado dentro de um certo intervalo. Com o bombeamento em regime contínuo, existe um limiar de pump bem definido, acima do qual a intensidade da luz do laser aumenta linearmente com a potência do pump. Para algumas aplicações, não é apenas a potência da luz do laser que é importante, mas também seu espectro de frequência (QUIMBY, 2006).

5 Interferometria

Um interferômetro óptico é um dispositivo capaz de realizar a interferometria, fenômeno em que a luz é dividida em dois feixes por meio de um divisor. Esses feixes podem percorrer diferentes distâncias ou condições antes de serem redirecionados e recombinados, utilizando outro divisor de feixes (ou o mesmo). A superposição resultante é analisada, uma vez que os feixes ópticos podem interferir de forma construtiva ou destrutiva, dependendo da coerência e do estado de polarização de cada um.

Os interferômetros têm sido amplamente utilizados para implementar diversas operações ópticas, como espectrometria, filtragem, multiplexação e conversão de comprimento de onda, entre outras (QUEIROZ, 2015).

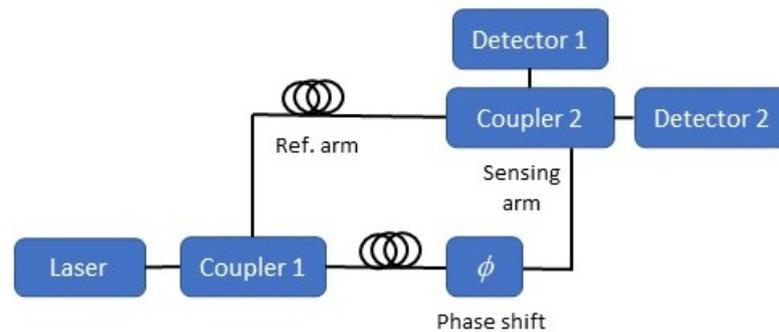
Inicialmente, os interferômetros foram construídos empiricamente em espaço livre, utilizando principalmente espelhos e semi-espelhos. Entre os mais notáveis estão os interferômetros de Mach-Zehnder (MZI), Michelson (MI), Fabry-Perot (FPI), Sagnac (SI), Interferômetro Não-Linear Ultra-Rápido (UNI - Ultrafast Nonlinear Interferometer) e o Interferômetro de Atraso (DI - Delay Interferometer). Com o advento das fibras ópticas, esses dispositivos passaram a ser construídos através das mesmas com o auxílio de acopladores ópticos direcionais (OLIVEIRA et al., 2018; SINGH et al., 2014).

Diversos dispositivos não lineares também são utilizados no processamento de sinais ópticos, incluindo: o Espelho de Anel Óptico Não Linear (NOLM - Nonlinear Optical Loop Mirror), o Interferômetro de Mach-Zehnder baseado em Amplificadores Ópticos de Semicondutores (SOA-MZI - Mach-Zehnder Interferometer based on Optical Semiconductor Amplifier), e o Interferômetro de Michelson com Amplificadores Ópticos de Semicondutores (SOA-MI - Michelson Interferometer based on Optical Semiconductor Amplifier). Além desses, outros dispositivos continuam a ser desenvolvidos e implementados (SILVEIRA, 2011).

5.1 Interferômetro Mach-Zehnder (MZI)

O esquema de um interferômetro de Mach-Zehnder (ver Figura 13) é composto por dois acopladores. Um feixe de luz é direcionado para a entrada 1 do primeiro acoplador, atuando como divisor, onde é então dividido em duas partes que se propagam pelos dois braços dos acopladores. Em presença de assimetria, os dois feixes resultantes da entrada 1 experimentam deslocamentos de fase diferentes ao longo de suas trajetórias. Posteriormente, os feixes se reúnem no segundo acoplador, seguindo para um dos seus braços de saída, onde estão localizados os detectores (QUEIROZ, 2015).

Figura 13 – Interferômetro de Mach-Zehnder em fibras ópticas.



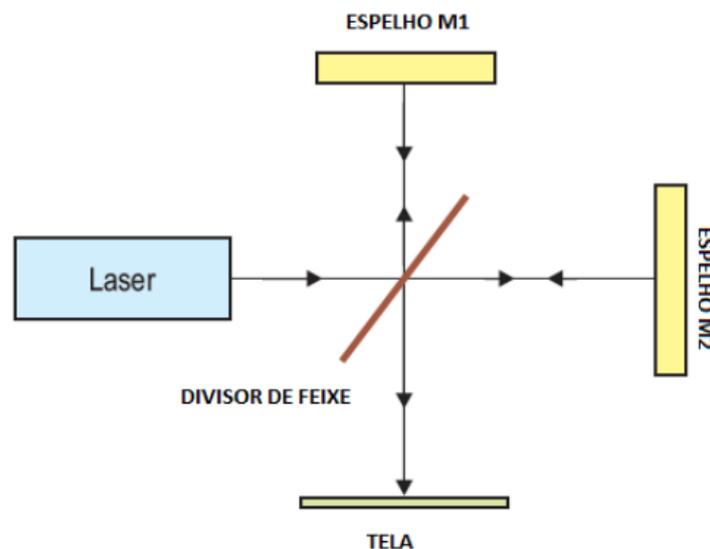
Fonte: Adaptado de (OLIVEIRA et al., 2018)

5.2 Outros interferômetros

5.2.1 Interferômetro de Michelson (MI)

O MI é um interferômetro de dois feixes que utiliza espelhos e divisores de feixe para realizar a divisão de amplitude. Esse tipo de interferômetro é composto principalmente por uma estrutura semi-reflexiva de separação e dois espelhos planos, M_1 e M_2 . Esses três elementos podem ser orientados, e M_2 é ajustável para modificar a distância observada no diagrama.

Figura 14 – Interferômetro de Michelson.

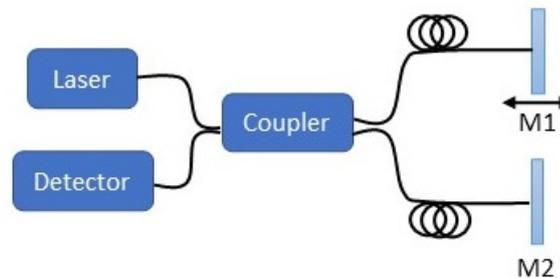


Fonte: Adaptado de (OLIVEIRA et al., 2018)

O princípio do interferômetro de Michelson consiste em uma radiação de uma fonte extensa incidindo sobre um divisor de feixe, que divide a luz em dois caminhos iguais, já que as distâncias entre o divisor de feixe e os dois espelhos (ou duas FBG) devem ser idênticas. Os feixes são então dirigidos aos dois espelhos planos, que os refletem de volta ao divisor de

feixe, onde se reencontram para formar franjas de interferência. Se os feixes percorrem caminhos diferentes, isso pode causar uma diferença de fase entre eles (OLIVEIRA et al., 2018; CLASS,).

Figura 15 – Interferômetro de Michelson em fibras ópticas.



Fonte: Adaptado de (OLIVEIRA et al., 2018)

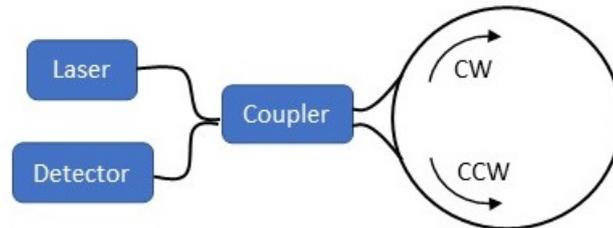
Se os feixes percorrem caminhos que diferem por um número inteiro e meio comprimento de onda, ocorre interferência destrutiva, resultando em um sinal muito fraco no detector. No entanto, se os caminhos forem iguais ou diferirem por um número inteiro de comprimentos de onda, ocorre interferência construtiva, produzindo um sinal forte no detector (SOUSA, 2014).

Na fibra óptica, é possível criar um interferômetro de Michelson ao combinar em série dois componentes ópticos: um acoplador direcional duplo e fibras de grades de Bragg lineares com reflexão total, que desempenham o papel de espelhos, conforme ilustrado na Figura 15 (a) (HU; WONG; SHUM, 2018). Neste arranjo, o interferômetro de Michelson atua como um espelho não linear, pois o sinal que se propaga pelos dois braços do acoplador é obrigado a interferir novamente no mesmo ponto onde foi inicialmente dividido (OLIVEIRA et al., 2018). No interferômetro de Michelson, a interferência entre dois feixes produz uma intensidade de radiação que varia com a frequência, polarização, fase e intensidade dos feixes. Esse processo resulta na formação de um padrão de interferência da radiação, o qual é sensível à diferença no caminho óptico entre os dois feixes (SOUSA, 2014).

5.2.2 Interferômetro de Sagnac (SI)

No diagrama de um interferômetro de Sagnac, também conhecido como espelho óptico não-linear em anel (NOLM - Non-Linear Optical Loop Mirror), há um acoplador direcional duplo. Suas duas portas de saída estão interligadas, formando um anel, o que significa que os dois caminhos ópticos são idênticos, correspondendo às duas direções de propagação (horária e anti-horária). Esse arranjo é altamente estável em torno do anel de fibra óptica (QUEIROZ, 2015).

Figura 16 – Interferômetro de Sagnac em fibras ópticas.



Fonte: Adaptado de (OLIVEIRA et al., 2018)

O interferômetro de Michelson possui semelhanças com o interferômetro de Mach-Zehnder, com a exceção de que no Michelson, o sinal que se propaga em seus dois braços é direcionado a interferir novamente no mesmo acoplador onde foi dividido, atuando como um espelho não linear. Devido a essa característica, ele se assemelha ao interferômetro de Sagnac. No entanto, a diferença reside no fato de que os campos de interferência óptica no Michelson não compartilham o mesmo percurso físico, como ocorre no Sagnac (SOUSA, 2014).

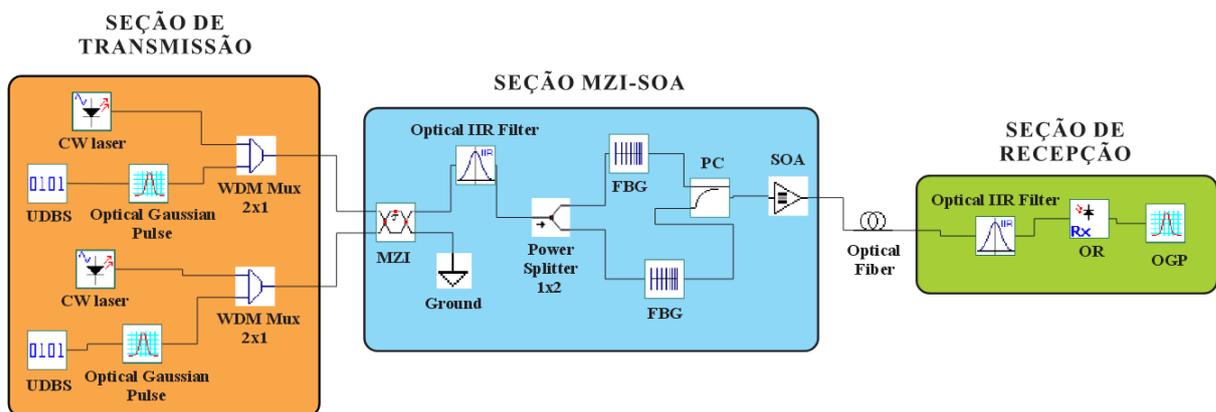
6 Simulações e resultados numéricos

6.1 Projeto do sistema totalmente óptico baseado em SOA-MZI

O sistema óptico proposto neste trabalho inclui uma combinação entre o interferômetro de Mach-Zehnder, o amplificador óptico semiconductor e grades de Bragg em fibra.

O esquema do sistema se divide em três partes principais, que são: seção de transmissão, seção do SOA-MZI combinado com FBGs e seção de recepção do sinal, conforme mostra a Figura 17.

Figura 17 – Diagrama de blocos do sistema proposto.



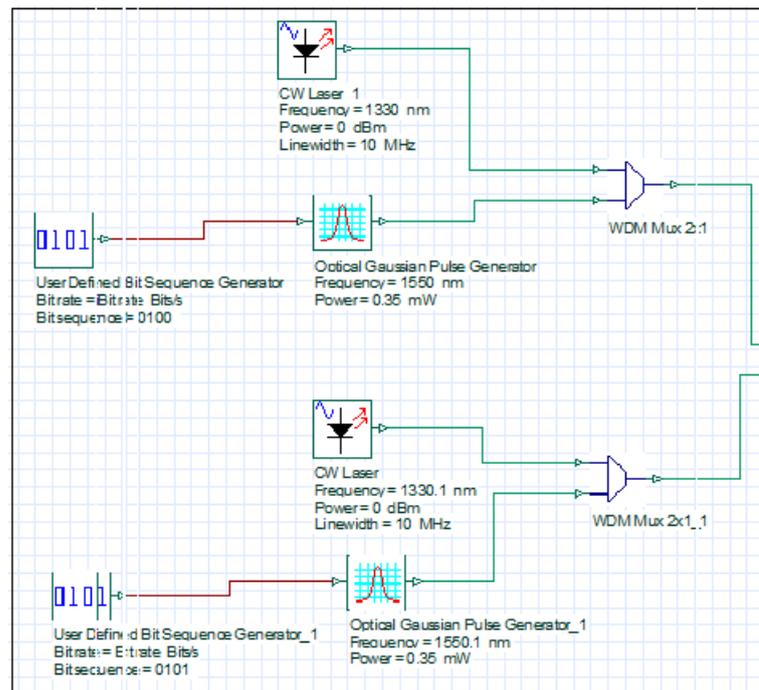
Fonte: Autor

Para um melhor entendimento do sistema simulado, cada uma dessas partes será apresentada separadamente.

6.1.1 Sessão de transmissão do sistema óptico proposto

Conforme pode ser visto pela Figura 18, essa sessão é formada por dois geradores de sequência de bits definidos pelo usuário (*User Defined Bit Sequence Generator - UDBSG*), com taxa de transmissão de 10 Gb/s , cada qual ligado a um gerador de pulso Gaussiano (*Optical Gaussian Pulse Generator - OGPG*) que nas simulações apresenta uma potência de $0,35 \text{ mW}$ e frequências de operação para os comprimentos de onda de 1550 e $1550,1 \text{ nm}$. Além disso, essa sessão conta ainda com dois Lasers CW, operando em 1330 e $1330,1 \text{ nm}$ com potência de entrada variável, e dois multiplexadores WDM Mux 2×1 .

Figura 18 – Transmissores do sistema óptico com SOA-MZI.



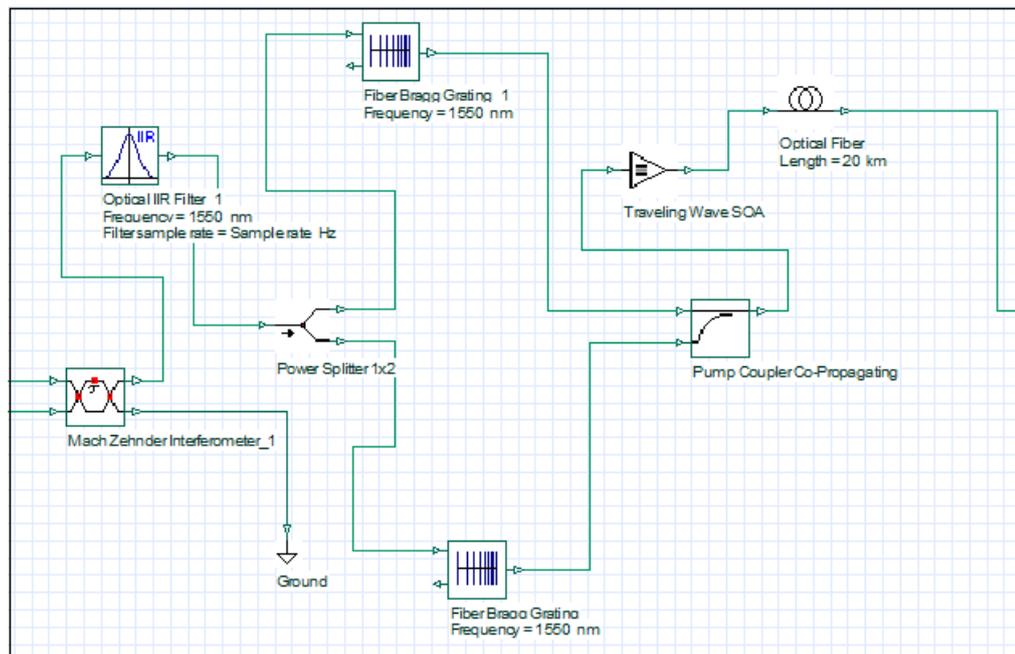
Fonte: Autor

Na prática, são gerados dois sinais A e B, resultantes da multiplexação entre cada sinal do laser CW com o sinal produzido pelo gerador de sequência de bits ligado ao gerador de pulso Gaussiano.

6.1.2 Sessão SOA-MZI combinado com redes de Bragg em fibra (FBGs).

Uma vez gerados, os sinais resultantes são direcionados para a sessão SOA-MZI que é formada por um Interferômetro de Mach-Zehnder, um Filtro óptico IIR com frequência de 1550 nm, um Divisor de potência 1 x 2, duas redes de Bragg em Fibra (FBGs) com frequência de 1550 nm, um Acoplador de bombeio Co-propagante. e um Amplificador óptico semiconductor de onda propagante com corrente de injeção de 0,15 A.

Figura 19 – Região SOA-MZI combinados com Fibras de Rede de Bragg (FBGs).



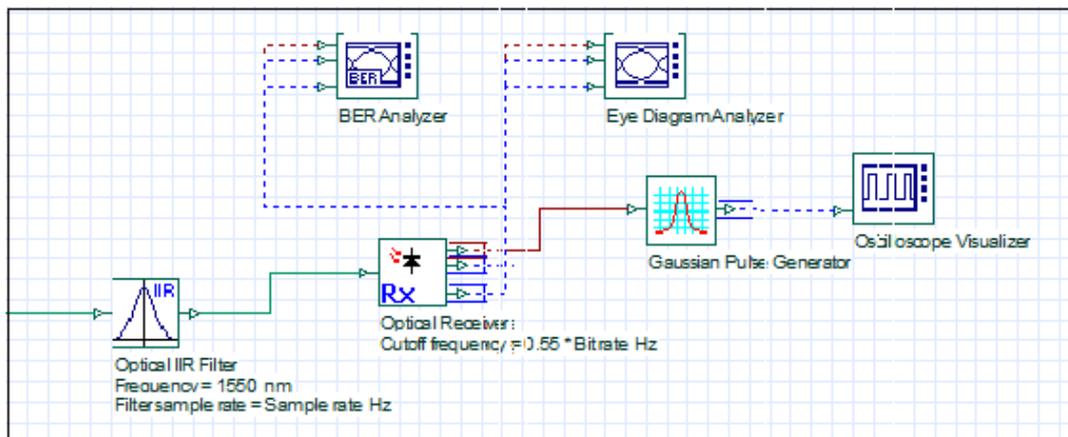
Fonte: Autor

Ao chegarem no interferômetro de Mach-Zehnder (MZI), os sinais A e B interferem entre si produzindo um único sinal que passa pelo Filtro óptico IIR, em seguida o sinal produzido é dividido pelo Power Splitter 1 x 2, que por sua vez seguem para as FBGs. Os sinais resultantes das Fibras de Bragg são novamente acoplados pelo Acoplador de Bomba Co-Propagante e o sinal resultante conduzido para o Traveling Wave SOA. Após todo esse processo, o sinal é transmitido por um enlace de fibra óptica monomodo com tamanho variável.

6.1.3 Sessão de recepção.

A parte final do sistema óptico, apresentado na Figura 20, é constituída por um Filtro Óptico IIR com frequência de 1550 nm e cuja finalidade é rejeitar interferências e componentes de ruídos do sinal vindo da sessão SOA-MZI combinado com FBGs. Um receptor óptico com frequência de corte de $0,55 \cdot \text{Bit rate Hz}$ que é responsável por converter o sinal óptico em elétrico e um gerador de pulso gaussiano. Além disso, foram inseridos um Oscilloscope Visualizer para a visualização do sinal convertido e um BER Analyzer e um Eye Diagram Analyzer para estudo do desempenho do sistema simulado.

Figura 20 – Receptor do sistema óptico com SOA-MZI.



Fonte: Autor

6.2 Resultados e discussões.

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos com as simulações do projeto óptico percorrido na seção anterior. A análise de tais resultados foram realizadas com o intuito de se estudar o desempenho do sistema proposto, que foi realizada a partir da Taxa de Erro de Bit (BER), do Fator-Q e diagrama de olho.

O analisador da Taxa de Erro de Bit (BER) e o analisador de diagrama de olho foram os componentes utilizados para se medir o desempenho do sistema óptico.

Na Tabela 3 pode-se observar os valores da taxa de erro de Bit e Fator-Q para diferentes sequências de bits (4, 8 e 16), variando-se a potência de entrada dos lasers CW em 0, 5 e 10 dBm e mantendo-se o comprimento do enlace de fibra óptica monomodo em 20 km.

Tabela 3 – Resultados das simulações

Sequência de Bits	Potência de entrada					
	0 dBm		5 dBm		10 dBm	
	Fator-Q	BER	Fator-Q	BER	Fator-Q	BER
4	9,468	$1,412 \times 10^{-21}$	9,468	$1,411 \times 10^{-21}$	9,469	$1,409 \times 10^{-21}$
8	15,085	$1,007 \times 10^{-51}$	15,085	$1,007 \times 10^{-51}$	15,085	$1,009 \times 10^{-51}$
16	7,755	$3,950 \times 10^{-15}$	7,755	$3,948 \times 10^{-15}$	7,755	$3,940 \times 10^{-15}$

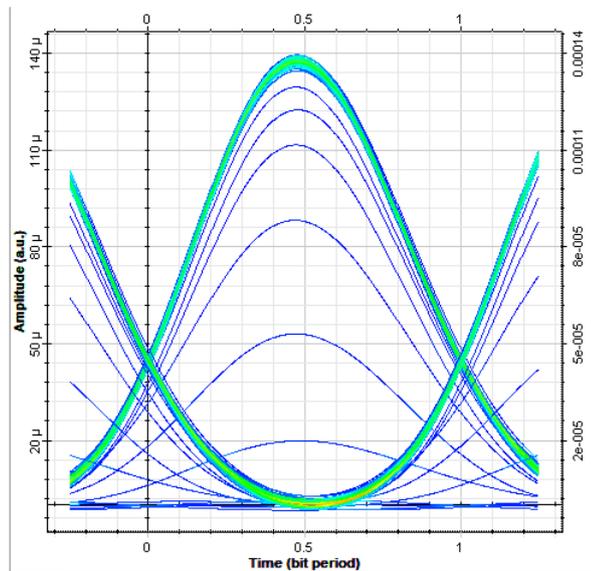
Fonte: Autor

Os resultados exibidos na Tabela acima nos mostram que o Fator-Q e a Taxa de Erro de Bit (BER) não apresentaram nenhuma mudança perceptível em seus valores, na condição em que a sequência de bits é mantida constante e somente as potências de entrada dos lasers CW são alteradas. No entanto, quando analisados para o caso em que as potências de entrada são fixadas e a sequência de bits é variada, observa-se um contraste significativo dos parâmetros

analisados para cada sequência, na qual os melhores valores ocorreram para uma sequência de 8 bits com potências de entrada de 0 dBm e 5 dBm.

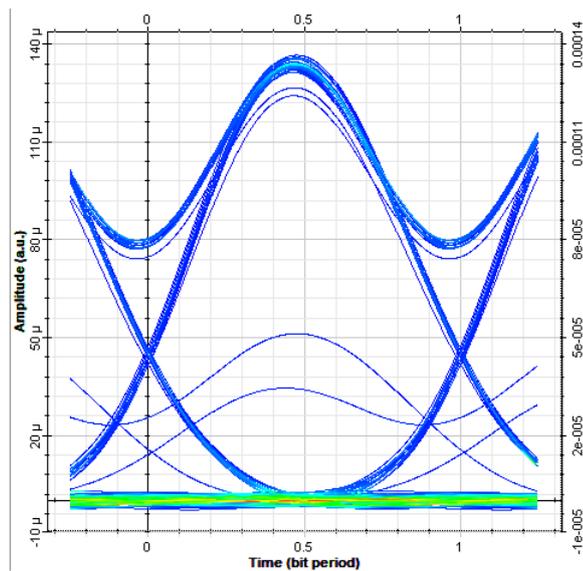
As Figuras 21 - 23 apresentam os diagramas de olho para as três sequências de bits simuladas com potência de entrada de 5 dBm.

Figura 21 – Saída do diagrama de olho para uma sequência de 4 bits.



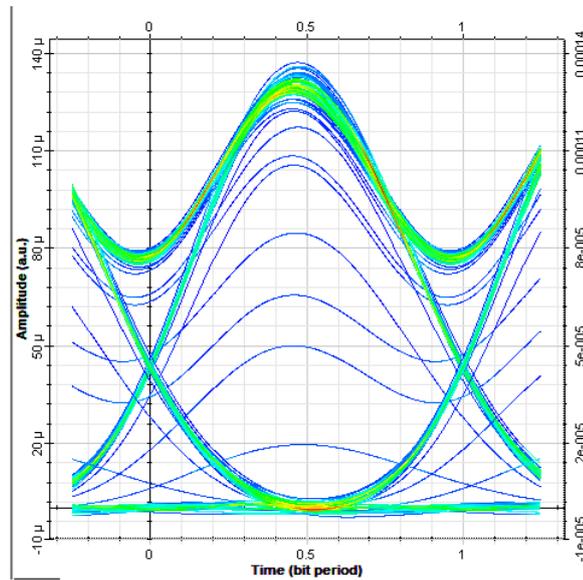
Fonte: Autor

Figura 22 – Saída do diagrama de olho para uma sequência de 8 bits.



Fonte: Autor

Figura 23 – Saída do diagrama de olho para uma sequência de 16 bits.



Fonte: Autor

Os diagramas mostrados acima, nos fornecem uma percepção visual detalhada sobre a qualidade do sinal fornecido pelo sistema proposto, o que está de acordo com os valores presentes na Tabela 3.

A partir deste ponto, as análises do Fator-Q e da BER serão realizadas para diferentes comprimentos de fibra óptica (20, 30, 40, 50 e 60 km), considerando uma sequência de 8 bits e potências de entrada dos lasers CW igual a 5 dBm.

Através da Tabela 4, pode-se verificar a sensibilidade dos parâmetros de desempenho do sistema para diferentes tamanhos do enlace óptico (fibra). Como podemos observar, conforme o comprimento da fibra aumenta menor se torna o Fator-Q e maior a Taxa de Erro de Bits (BER).

Tabela 4 – Parâmetros de desempenho do sistema para diferentes comprimentos da fibra

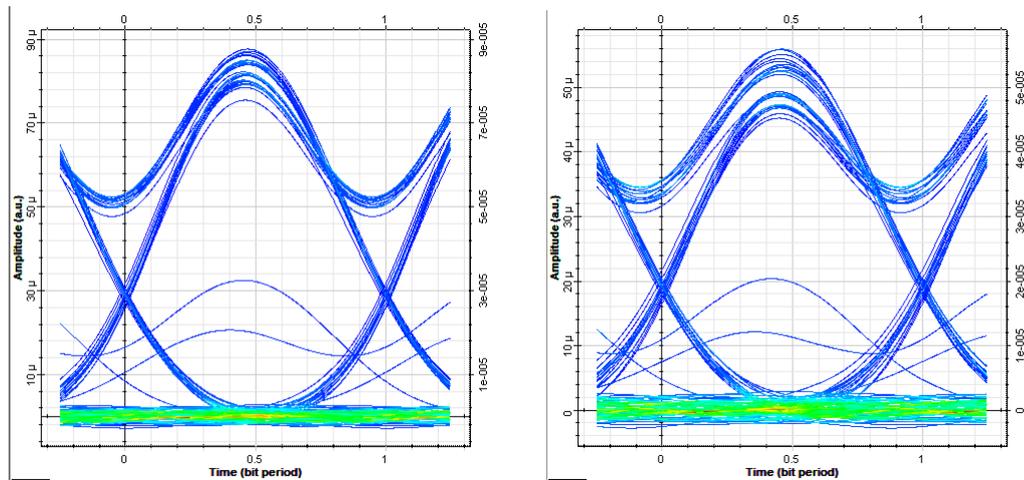
Parâmetro	Comprimento da Fibra (km)				
	20	30	40	50	60
Fator-Q	15,085	11,851	8,940	6,489	4,536
BER	$1,007 \times 10^{-51}$	$9,570 \times 10^{-33}$	$1,861 \times 10^{-19}$	$4,103 \times 10^{-11}$	$1,789 \times 10^{-6}$

Fonte: Autor

Ademais, verifica-se também que os valores ideais para os mesmos parâmetros, isto é, Fator-Q = 6 e BER = 10^{-9} encontram-se entre os comprimentos de 50 à 60 km de fibra.

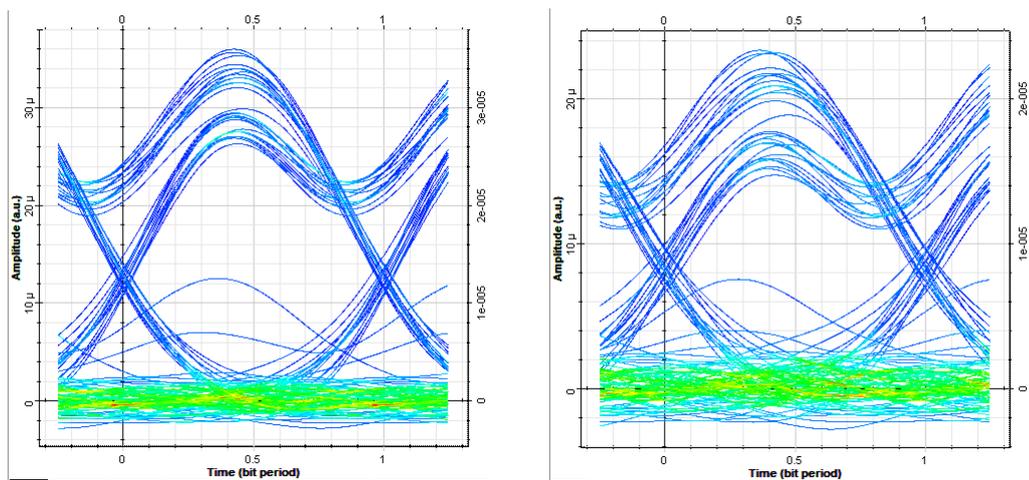
Para uma melhor visualização dessa sensibilidade, as Figuras 24 e 25 mostram os diagramas de olho do sinal recebido para os diferentes comprimentos da fibra óptica.

Figura 24 – Diagramas de olho para 30 km (esquerda) e 40 km (direita).



Fonte: Autor

Figura 25 – Diagramas de olho para 50 km (esquerda) e 60 km (direita).



Fonte: Autor

Através de tais diagramas podemos verificar que a medida que o enlace óptico aumenta mais degradado se torna o sinal recebido.

Dessa forma, o sistema proposto neste trabalho apresenta valores consideráveis para os parâmetros de desempenho do mesmo, mostrando-se eficaz quanto sua aplicação em redes metropolitanas de comunicação para enlaces de fibra de até 50 km.

7 Considerações finais

Neste trabalho foi apresentado o projeto de um sistema totalmente óptico baseado em Interferômetro de Mach-Zehnder (MZI) e Amplificador Óptico Semicondutor (SOA) combinados com redes de Bragg em fibra.

O sistema foi estudado e simulado através do software comercial OptiSystem 7.0 da OptiWave e foram analisados os parâmetros de desempenho do mesmo, isto é, Fator-Q e Taxa de Erro de Bit (BER) para diferentes sequências de bits, potências de entrada e comprimento do enlace óptico.

Os resultados obtidos mostraram que não houve nenhuma variação perceptível nos valores do Fator-Q e da BER para o aumento das potências de entrada, considerando a sequência de bits fixa. Em contra partida, observou-se uma mudança significativa desses parâmetros para diferentes sequências de bits, mantendo as potências de entrada constantes, apresentando os melhores valores para uma sequência de 8 bits com potências de entrada de 0 e 5 dBm.

A sensibilidade do Fator-Q e da BER em relação a variação do enlace óptico, verificou-se uma diminuição do primeiro parâmetro e um aumento do segundo para o aumento do comprimento da fibra, com valores ideais dos mesmos entre 50 e 60 km.

Por fim, o sistema óptico proposto apresentou um desempenho considerável quanto sua aplicação em redes metropolitanas de comunicação óptica para comprimento de fibra monomodo de até 50 km.

7.1 Propostas de trabalhos futuros

Durante a análise do sistema óptico baseado no interferômetro de Mach-Zehnder (MZI) e amplificador óptico semicondutor (SOA), foi possível observar o comportamento do sistema em diversas condições. No entanto, há vários caminhos promissores para a continuidade desta pesquisa, com ênfase no uso do software OptiSystem para simulações mais avançadas.

Um dos trabalhos futuros consiste na investigação do uso de portas lógicas ópticas baseadas no interferômetro de Mach-Zehnder com SOA. Essas portas lógicas podem desempenhar um papel fundamental em circuitos ópticos integrados para processamento de sinais em altas velocidades. Testar e otimizar o desempenho de portas lógicas como AND, OR, e XOR, utilizando a plataforma de simulação OptiSystem, seria uma contribuição relevante para o campo das telecomunicações ópticas. A análise da estabilidade e da eficiência dessas portas em cenários práticos e dinâmicos também poderia ser ampliada.

Outro aspecto importante seria o estudo de configurações alternativas do sistema MZI-

SOA, como a utilização de múltiplos SOAs em cascata ou a exploração de diferentes arquiteturas de interferômetros. Essas variações poderiam ser simuladas no OptiSystem para verificar o impacto sobre o desempenho geral, especialmente em termos de ganho de sinal, redução de ruído e qualidade do sinal recuperado. Explorar essas configurações permitirá identificar alternativas viáveis para o desenvolvimento de sistemas de comunicação óptica mais robustos.

Além disso, recomenda-se o uso de modelos mais complexos para simular a resposta do sistema sob diferentes condições de ruído e interferência, como a dispersão cromática e o ruído de fase. A otimização dessas variáveis poderia levar à criação de soluções mais eficazes para redes de longa distância.

Por fim, há a possibilidade de explorar a integração de técnicas de multiplexação, como a multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM), em conjunto com as configurações simuladas, a fim de investigar a escalabilidade do sistema e a sua aplicação em redes ópticas de alta capacidade.

7.2 Trabalhos Publicados

Como primeiro autor:

- ARAÚJO, Fabio Souza de; SOUSA, FABIO BARROS DE; SILVA, Alan dos Reis; TAVARES, Simone Cristina da Costa; ALMEIDA, L. C. P.; SOUSA, F. M.; COSTA, Marcos Benedito Caldas. Performance Analysis of an Optical System with Mach-Zehnder Interferometer and Semiconductor Optical Amplifier. In: XVIII Workshop on Semiconductors and Micro & Nano Technology, 2024, São Paulo. SEMINATEC (Workshop on Semiconductors and Micro & Nano Technology), 2024.

Como co-autor:

- OLIVEIRA, J. E. ; ARAÚJO, F. S. ; SOUSA, F. B. ; Oliveira, J.M ; Oliveira, L.A ; Silva, H.A.B ; SABINO, E. R. ; SILVA, A. R. ; COSTA, L. F. S ; Fabrício Pinho da Luz . Análise do comportamento de uma porta lógica não totalmente óptica em um acoplamento direcional de cristal fotônico. Revista Brasileira de Desenvolvim, v. 8, p. 30365, 2022.
- SABINO, ELIZABETH REGO ; DE SOUSA, FABIO BARROS ; DE OLIVEIRA, JORGE EVERALDO ; DE OLIVEIRA, JACKSON MOREIRA ; DA SILVA, HUDSON AFONSO BATISTA ; DE OLIVEIRA, LELIS ARAUJO ; SILVA, ALAN DOS REIS ; DE ARAÚJO, FABIO SOUZA ; DA LUZ, FABRÍCIO PINHO ; COSTA, MARCOS BENEDITO CALDAS . Comparison of pre and post-dispersion compensation schemes with RZ, NRZ and Gaussian modulations for 10 GBPS and 40 GBPS transmission rates / Comparação de esquemas de compensação pré e pós-dispersão com modulações RZ, NRZ e Gaussina para

as taxas de transmissão de 10 GBPS e 40 GBPS. *Brazilian Journal of Development*, v. 8, p. 50322-50335, 2022.

- ARAUJO DE OLIVEIRA, LELIS ; DE SOUSA, FABIO ; MOREIRA OLIVERIA, JACKSON ; AFONSO BATISTA DA SILVA, HUDSON ; EVERALDO DE OLIVEIRA, JORGE ; PINHO DA LUZ, FABRÍCIO ; SOUZA DE ARAÚJO, FABIO ; DOS REIS SILVA, ALAN ; BENEDITO CALDAS COSTA, MARCOS . Analysis of the performance of an All-optical Network using Arrayed Waveguide and Fiber Bragg Grating Demultiplexers. *CONJECTURAS*, v. 22, p. 442-459, 2022.
- SILVA, Alan dos Reis ; SOUSA, FABIO BARROS DE ; ARAÚJO, Fabio Souza de ; OLIVEIRA, J. E. ; SANTOS, Marcos Gabriel Fernandes ; COSTA, Marcos Benedito Caldas . Study of a Two-Dimensional Photonic Crystal Demultiplexer based on Graphene. In: SEMINATEC (Workshop on Semiconductors and Micro & Nano Technology), 2024, São Paulo. ANAIS SEMINATEC 2024, 2024.

A O software OptiSystem

A ferramenta computacional empregada neste trabalho é o software OptiSystem da empresa Optiwave System Inc. Trata-se de uma solução avançada que permite projetar, analisar e otimizar virtualmente qualquer tipo de enlace de fibra óptica no nível da camada física. O software possui uma interface gráfica amigável e de fácil compreensão (Graphical User Interface - GUI), que controla o layout, os componentes ópticos, os modelos de componentes e a apresentação de gráficos. A Figura 26 ilustra a GUI do OptiSystem.

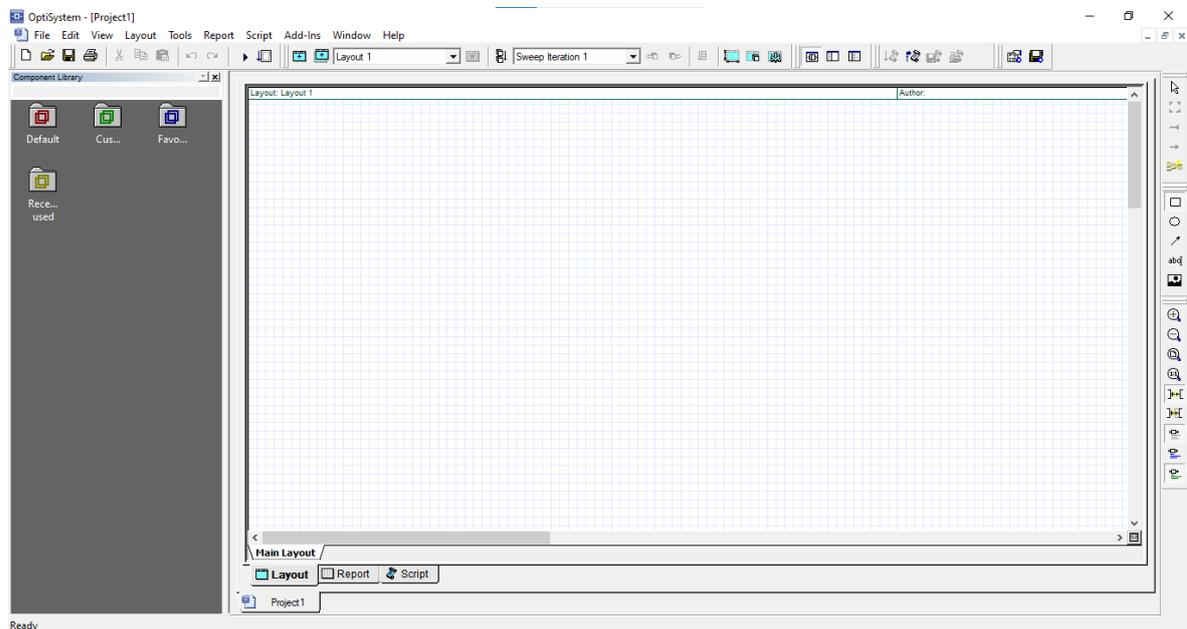


Figura 26 – Interface do software Optisystem

O software possui uma vasta biblioteca de componentes ativos e passivos, tanto no domínio óptico quanto no elétrico, que simulam com precisão o comportamento de dispositivos reais. Estão disponíveis 400 componentes, incluindo lasers, moduladores, multiplexadores/demultiplexadores, fibras ópticas, acopladores, amplificadores, filtros, entre outros. A Figura 27 apresenta a biblioteca de componentes do OptiSystem.

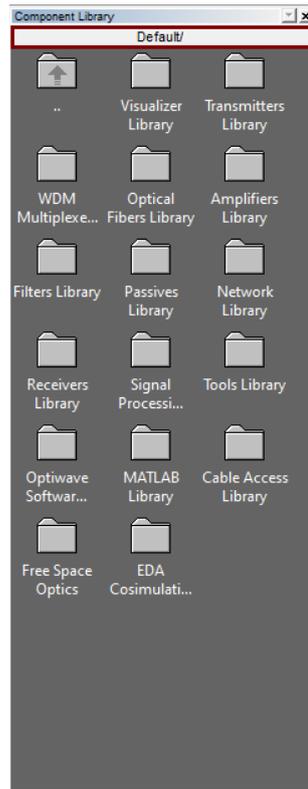


Figura 27 – Biblioteca de componentes do software Optisystem

Ferramentas essenciais de visualização de gráficos, que permitem analisar o desempenho do sistema nos domínios óptico e elétrico, como osciloscópios, analisadores de espectro, analisadores de BER e diagramas de olho, também estão disponíveis na biblioteca de componentes.

B Trabalhos publicados



Brazilian Journal of Development | 30365
ISSN: 2525-8761

Analysis of the behavior of an all-optical not logic gate in a photonic crystal directional coupler

Análise do comportamento de uma porta lógica not totalmente óptica em um acoplador direcional de cristal fotônico

DOI:10.34117/bjdv8n4-491

Recebimento dos originais: 21/02/2022
Aceitação para publicação: 31/03/2022



Brazilian Journal of Development | 50322
ISSN: 2525-8761

Comparison of pre and post-dispersion compensation schemes with RZ, NRZ and Gaussian modulations for 10 GBPS and 40 GBPS transmission rates

Comparação de esquemas de compensação pré e pós-dispersão com modulações RZ, NRZ e Gaussiana para as taxas de transmissão de 10 GBPS e 40 GBPS

DOI:10.34117/bjdv8n7-107

Recebimento dos originais: 23/05/2022
Aceitação para publicação: 30/06/2022



DOI: 10.53660/CONJ-682-816

Analysis of the Performance of an All-optical Network Using Arrayed Waveguide and Fiber Bragg Grating Demultiplexers

Análise do Desempenho de uma Rede Totalmente Óptica Usando Matriz de Guia de Onda e Demultiplexadores com Grade de Bragg em Fibra

Lelis Araujo de Oliveira^{1,2*}, Fabio Barros de Sousa¹, Jackson Moreira Oliveria¹, Hudson Afonso Batista da Silva^{1,2}, Jorge Everaldo de Oliveira¹, Fabrício Pinho da Luz¹, Fabio Souza de Araújo¹, Alan dos Reis Silva¹, Marcos Benedito Caldas Costa^{1,3}

Referências

- AGGARWAL, K.; SINGH, H. G. *Implementation of Optical Logic Unit Based on Nonlinear Properties of Semiconductor Optical Amplifiers*. Tese (Doutorado) — Thapar University, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 12, 23 e 25.
- AGRAWAL, G. *Sistemas de comunicação por fibra óptica*. [S.l.]: Elsevier Brasil, 2014. v. 4. Citado 8 vezes nas páginas 4, 7, 8, 9, 10, 19, 20 e 21.
- AGRAWAL, G. P. *Lightwave technology: telecommunication systems*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2005. Citado na página 20.
- ANJU, M.; VIPIN, V. Simulation and performance analysis of optical wavelength converters based on cross gain modulation (xgm) in soa. *International Journal of Engineering Research and General Science*, v. 3, n. 2, p. 918–22, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 14.
- CARMO, J. F. d. et al. Algumas não-linearidades da fibra óptica em sistemas de multiplexagem por divisão de comprimento de onda. Instituto Nacional de Telecomunicações, 2010. Citado na página 10.
- CLASS, L. Principles of optics. Citado na página 32.
- DUTTA, N. K.; WANG, Q. *Semiconductor optical amplifiers*. [S.l.]: World scientific, 2013. Citado na página 14.
- EL-SAEED, E. M. et al. Optical logic gates based on semiconductor optical amplifier mach–zehnder interferometer: design and simulation. *Optical Engineering*, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, v. 55, n. 2, p. 025104–025104, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 11, 12 e 23.
- FILHO, A. F. G. F. Estudo do desempenho do multiplexador/demultiplexador add/drop baseado na configuração do interferômetro de michelson de fibras ópticas para aplicações em sistemas otdma e ocdma. 2012. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 28.
- FRAGA, W. B. d. Estudo do desempenho de acoplador direcional não linear duplo assimétrico de fibras ópticas operando portas lógicas. 2006. Citado na página 25.
- HU, D. J. J.; WONG, R. Y.-N.; SHUM, P. P. Photonic crystal fiber-based interferometric sensors. *Selected Topics on Optical Fiber Technologies and Applications*, InTech London, UK, p. 21–41, 2018. Citado na página 32.
- KEISER, G. *Optical fiber communications*. [S.l.]: McGraw-Hill New York, 2000. v. 2. Citado 9 vezes nas páginas 3, 4, 5, 9, 10, 16, 17, 19 e 20.
- KUMAR, A.; KUMAR, S.; RAGHUWANSHI, S. Implementation of all-optical logic gate using soa-mzi structures. *STM Journals*, v. 3, n. 3, p. 13–21, 2013. Citado na página 22.
- NEAMA, A. H.; DESHER, I. S. High data rate optical logic or, and not gates at optimum injection current based on soa-mzi. *International Journal of Computer Applications*, v. 1, n. 3, p. 24–32, 2017. Citado na página 21.

OLIVEIRA, J. M. et al. Portas lógicas totalmente ópticas baseado em interferômetro de michelson com amplificador óptico semiconductor. Universidade Federal do Pará, 2018. Citado 18 vezes nas páginas 6, 7, 8, 12, 13, 15, 16, 18, 22, 24, 25, 26, 28, 29, 30, 31, 32 e 33.

OLIVEIRA, L. A. d. *Análise do desempenho de uma rede totalmente óptica usando demultiplexadores AWG e FBG e aplicações em sensores ópticos*. Tese (Tese (Doutorado)) — Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2021. Orientador: Marcos Benedito Caldas Costa. Citado 3 vezes nas páginas 2, 4 e 16.

PEREIRA, O. F. et al. Caracterização de fibras ópticas altamente não lineares. 2012. Citado na página 10.

QUEIROZ, A. S. B. Estudo do desempenho de componentes baseados em fibras ópticas especiais: fibras de cristal fotônico e de metamateriais e suas aplicações em comunicações. 2015. Citado 4 vezes nas páginas 24, 25, 30 e 32.

QUIMBY, R. S. *Photonics and lasers: an introduction*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2006. Citado na página 29.

SAXENA, S.; SAXENA, S.; RIZVI, S. Z. Realization of all-optical nor gate based on four wave mixing, non-linear effect in soa. *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology (IJLTET)*, v. 5, n. 1, p. 138–144, 2015. Citado na página 18.

SENIOR, J. M.; JAMRO, M. Y. *Optical fiber communications: principles and practice*. [S.l.]: Pearson Education, 2009. Citado na página 21.

SILVEIRA, T. G. da. *All-Optical Processing Systems Based on Semiconductor Optical Amplifiers*. Tese (Doutorado) — Universidade de Aveiro (Portugal), 2011. Citado 6 vezes nas páginas 11, 12, 13, 14, 22 e 30.

SINGH, P.; TRIPATHI, D.; DIXIT, H. Designs of all-optical nor gates using soa based mzi. *Optik*, Elsevier, v. 125, n. 16, p. 4437–4440, 2014. Citado na página 23.

SINGH, P. et al. All-optical logic gates: designs, classification, and comparison. *Advances in Optical Technologies*, Wiley Online Library, v. 2014, n. 1, p. 275083, 2014. Citado na página 30.

SINGH, S. K.; TIWARI, N.; RAJCHANDANI, U. Implementation of optical logic gates (ex-or and and nor) using soa-mzi structure. *The International Journal of Science and Technoledge*, GlobeEdu Group, v. 2, n. 7, p. 158, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 14, 15 e 21.

SON, C. W. et al. Realization of all-optical xor, nor, and nand gates in single format by using semiconductor optical amplifiers. *Japanese journal of applied physics*, IOP Publishing, v. 46, n. 1R, p. 232, 2007. Citado na página 11.

SOUSA, F. B. d. et al. Regenerador 3r totalmente óptico baseado em interferômetro de mach-zehnder de fibra de cristal fotônico altamente não linear. Universidade Federal do Pará, 2017. Citado 9 vezes nas páginas 2, 3, 7, 14, 15, 16, 18, 19 e 20.

SOUSA, J. R. R. d. Estudo do desempenho do interferômetro de michelson de fibras de cristal fotônico para aplicações em circuitos lógicos nas configurações on-off e ppm. 2014. Citado 5 vezes nas páginas 19, 26, 27, 32 e 33.

SOUSA, M. J. de. *Síntese de grades de Bragg em fibra: técnicas de aceleração e codificação para algoritmos evolucionários*. Tese (Doutorado) — PhD thesis, UFPA, 2008. Citado na página 27.

THAKUR, V.; PANDOVE, G.; GUPTA, T. Optical wavelength converters based on cross gain modulation and cross phase modulation in soa. *International Journal of Electronics and Computer Science Engineering*, v. 1, n. 3, p. 1274–1280, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 14.

YABLONOVITCH, E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics. *Physical review letters*, APS, v. 58, n. 20, p. 2059, 1987. Citado na página 10.