



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DO CEARÁ - IFCE
CAMPUS FORTALEZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
TELECOMUNICAÇÕES**

GEORGE SALES BEZERRA FILHO

**IMPLEMENTAÇÃO DE OPERAÇÕES LÓGICAS EM UM
INTERFERÔMETRO DE MACH-ZEHNDER HÍBRIDO BASEADO EM
FIBRA DE CRISTAL FOTÔNICO**

FORTALEZA

2018

GEORGE SALES BEZERRA FILHO

IMPLEMENTAÇÃO DE OPERAÇÕES LÓGICAS EM UM
INTERFERÔMETRO DE MACH-ZEHNDER HÍBRIDO
BASEADO EM FIBRA DE CRISTAL FOTÔNICO

Dissertação submetida à Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal do Ceará, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Telecomunicações.

Área de concentração: Micro-ondas e óptica integrada

Orientador: Prof. Dr. Wilton Bezerra de Fraga

Fortaleza
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI
Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- B574i Bezerra Filho, George Sales.
Implementação de operações lógicas em um interferômetro de Mach-Zehnder híbrido baseado em fibra de cristal fotônico / George Sales Bezerra Filho. - 2018.
76 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Engenharia de Telecomunicações, Campus Fortaleza, 2018.
Orientação: Prof. Dr. Wilton Bezerra de Fraga.
1. Interferômetro de Mach-Zehnder. 2. Fibra de cristal fotônico. 3. Portas lógicas. I. Título.
CDD 621.382
-



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
COORDENAÇÃO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES

George Sales Bezerra Filho

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de mestre em Engenharia de telecomunicações, sendo aprovada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará e pela banca examinadora:

Assinatura manuscrita de Wilton Bezerra de Fraga em tinta azul.

Professor Dr. Wilton Bezerra de Fraga – (ORIENTADOR)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE

Assinatura manuscrita de Glendo de Freitas Guimarães em tinta azul.

Professor Dr. Glendo de Freitas Guimarães
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE

Assinatura manuscrita de Francisco José Alves de Aquino em tinta azul.

Professor Dr. Francisco José Alves de Aquino
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE

Assinatura manuscrita de José Rubens Rodrigues de Sousa em tinta azul.

Professor Dr. José Rubens Rodrigues Sousa
Universidade de Fortaleza - UNIFOR

Dedico este trabalho a quem sempre me apoia, encoraja, resguarda... MÃE.

Agradecimentos

A Deus;

A minha mãe que esteve ao meu lado em todas as conquistas de minha vida;

Ao prof. Dr. Wilton Bezerra de Fraga por sua orientação ao longo do mestrado e amizade a qual levarei para a vida toda;

Ao prof. Dr. Glendo de Freitas Guimarães pela paciência, companheirismo ao longo de todo mestrado, confiança e amizade;

A profa. Ms Dayse Correa Gonçalves pelos momentos de orientação ao longo da escrita deste trabalho;

Aos colegas de mestrado e amigos Brandon Mendonça, Cleiton Marinho, Clenilson Sousa, Felipe Araripe, João Paulo, Katielle Dantas, Kelvia Aragão, Kilvia Ávila, Mário Henrique e Paulo Renato pelos momentos de aprendizado e descontração ao longo dos dois anos de mestrado;

Aos colegas do laboratório de fotônica e amigos Diego Boto, Luana Maia, Raiane Rocha e Lucas Marcelino pela contribuição com aprendizado, descontração e escrita das mais diversas atividades;

Ao corpo docente do programa de pós-graduação em engenharia de telecomunicações;

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pelo apoio financeiro.

“Somente aqueles que tentam o absurdo, podem alcançar o impossível”.

Albert Einstein

Resumo

Esta dissertação tem por objetivo implementar operações lógicas totalmente ópticas em um interferômetro de Mach-Zehnder (MZI) baseado em fibra de cristal fotônico. As PCFs possuem alto valor do parâmetro de não linearidade (o que a diferencia da fibra óptica convencional), a não linearidade dessas fibras é proveniente de uma estrutura periódica em seu núcleo. O interferômetro é composto por dois acopladores 50 : 50 em série (sendo que um dos acopladores apresenta assimetria em seu núcleo) e possui uma diferença de fase em um dos seus braços. A assimetria é causada pela diferença entre os parâmetros de não linearidade de cada núcleo dos acopladores. Estudou-se também a transmissão de energia quando são considerados os efeitos dispersivos de segunda e terceira ordem e os efeitos não lineares de automodulação de fase, modulação de fase cruzada, espalhamento Raman intrapulso e *self-steepening*, as atenuações (perdas) foram desprezadas devido ao comprimento reduzido dos acopladores (cada acoplador medindo 1,8 cm). Os efeitos são considerados através da equação não linear generalizada de Schrodinger (ENLGS), esta equação é simulada pelo método numérico de Runge-Kutta de quarta ordem clássico. O estudo foi realizado sob modulação *on off keying* - OOK, em que os bits são definidos por pulsos do tipo secante hipérbolica com largura temporal a meia altura de 100 fs. Foram estudados três configurações distintas para o interferômetro de Mach-Zehnder proposto: na primeira configuração tem-se um interferômetro com um acoplador simétrico seguido de um acoplador assimétrico, a segunda configuração apresenta um MZI com um acoplador assimétrico seguido de um acoplador simétrico, por fim, na terceira configuração tem-se o interferômetro com ambos os acopladores assimétricos. Obteve-se com esse estudo, portas e operações lógicas nas três configurações propostas. Na primeira configuração implementou-se as portas AND, operação ZERO e operação $A' \cdot B$. Com a segunda configuração proposta, é possível implementar as portas XOR, porta OR, porta AND, operação ZERO e operação $A' \cdot B$. Na terceira configuração, implementou-se a porta OR, porta AND, a operação ZERO, operação $A' \cdot B$ e a operação $A \cdot B'$.

Palavras-chave: Interferômetro de Mach-Zehnder. Fibra de cristal fotônico. Portas lógicas.

Abstract

This dissertation aims to implement fully optical logic operations in a Mach-Zehnder interferometer (MZI) based on photonic crystal fiber. PCFs have high nonlinearity parameter value (which differs from conventional optical fiber), the non-linearity of these fibers comes from a periodic structure at its core. The interferometer is composed of two 50 : 50 couplers in series (one of the couplers presents asymmetry in its nucleus) and has a phase difference in one of its arms. The Asymmetry is caused by the difference between the non-linearity parameters of each couplers. The transmission of energy was also studied when second order and third order dispersive and the nonlinear effects of phase automodulation, cross-phase modulation, intrapulse Raman scattering and self-steepening, attenuations (losses) were neglected due to the reduced length of the couplers (each coupler measuring 1.8 cm). The effects are considered through the generalized nonlinear equation of Schrodinger (ENLGS), this equation is simulated by the numerical method of Runge-Kutta of fourth order classic. The study was performed under modulation on off keying - OOK, in that the bits are defined by hyperbolic secant pulses with temporal width a half height of 100 fs. Three different configurations were studied for the Mach-Zehnder interferometer proposed: in the first configuration there is an interferometer with a symmetrical coupler followed by an asymmetrical coupler, the second configuration presents an MZI with an asymmetric coupler followed by a symmetrical coupler, finally, in the third configuration has the interferometer with both asymmetric couplers. It was obtained with this study, ports and logical operations in the three configurations proposed. In the first configuration, the AND ports, operation ZERO, and operation $A' \cdot B$ were implemented. With the second configuration, it is possible to implement XOR gate, OR gate, AND gate, operation ZERO and operation $A' \cdot B$. In the third configuration was implemented the OR gate, AND gate, operation ZERO, operation $A' \cdot B$ and operation $A \cdot B'$.

Keywords: Mach-Zehnder interferometer. Photonic crystal fiber. Logical gates.

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Abreviaturas e Siglas

1	Introdução	16
1.1	Objetivos	18
1.1.1	Geral	18
1.1.2	Específicos	18
1.2	Motivação	18
1.3	Organização da dissertação	19
1.4	Produção científica	20
2	Fundamentação teórica	21
2.1	Cristais fotônicos	21
2.2	Fibras de cristal fotônico	22
2.2.1	PCF com propagação baseada em reflexão interna total	23
2.2.2	PCF de núcleo oco	24
2.2.3	PBGF de núcleo sólido	24
2.2.4	PCF híbrida	25
2.3	Propagação de luz em fibras ópticas com regime não linear	25
2.3.1	Equação não linear de Schrodinger	28

2.3.2	Descrição dos efeitos previstos pela ENLGS	30
2.4	Acopladores	35
2.5	Interferômetro de Mach-Zehnder	36
2.6	Modulação de sinais	36
3	Revisão bibliográfica	38
3.1	Dispositivos ópticos	38
3.2	Interferômetro de Mach-zehnder	41
4	Metodologia	47
4.1	Dispositivo e análise	47
5	Resultados	53
5.1	Configuração 1 - MZI com acoplador simétrico seguido de acoplador assimétrico	53
5.2	Configuração 2 - MZI com acoplador assimétrico seguido de acoplador simétrico	57
5.3	Configuração 3 - MZI com acoplador assimétrico seguido de acoplador assimétrico	61
6	Conclusão	67
6.1	Trabalhos futuros	67
	Referências Bibliográficas	69
	Anexo A – Fabricação de uma fibra de cristal fotônico	73
	Anexo B – Método numérico de Runge-Kutta de quarta ordem	74

Lista de Figuras

1	Exemplos de fibras de cristais fotônicos (a) Fibra de Bragg com uma rede unidimensional de camadas periódicas concêntricas. (b) Estrutura periódica bidimensional composta de furos de ar (fibra holey). (c) Fibra holey de núcleo sólido.	17
2	Estruturas de cristais fotônicos	21
3	Fibras de cristal fotônico. (a) PCF híbrida, (b) PCF com núcleo de ar, (c) PCF para aplicações quânticas, (d) PCF de núcleo oco, (e) PCF totalmente sólida, (f) PCF com guiamento por índice de refração	23
4	Pulso óptico submetido a um <i>chirp</i> de frequência	34
5	Exemplo de acoplador de fibra óptica	35
6	Formato NRZ e RZ para pulsos modulados em OOK	37
7	Exemplos de configuração de sistemas que integram um MZI e um SOA. Eles apresentam diferentes componentes e diferentes designs	42
8	Configuração de MZI com tres entradas e dois SOA's	43
9	Configuração de MZI <i>in line</i> para sensoramento.	45
10	Configuração do MZI estudado no presente trabalho.	47
11	transmissão em função da diferença de fase mostrando a conservação da energia do MZI.	50
12	transmissão em função da diferença de fase mostrando a conservação da energia do MZI.	52
13	Gráfico eferente a operação lógica $A' \cdot B$ e a porta AND	54
14	Gráfico para a porta AND e operação lógica $A' \cdot B$	55
15	Gráfico para a operação lógica ZERO	56
16	Gráfico para a porta lógica OR	57

17	Gráfico para a operação lógica ZERO	58
18	Gráfico para a porta lógica AND e operação lógica $A' \cdot B$	59
19	Gráfico para a porta lógica XOR e operação lógica ZERO	60
20	Gráfico para a porta lógica AND e operação lógica $A' \cdot B$	62
21	Gráfico para a porta lógica OR	63
22	Gráfico para a operação lógica ZERO	64
23	Gráfico para a operação lógica $A \cdot B'$	65
24	Algumas etapas do processo de fabricação de uma PCF	73

Lista de Tabelas

1	Tabela verdade referente a operação lógica $A' \cdot B$ e a porta AND	54
2	Tabela verdade para a porta AND e operação lógica $A' \cdot B$	55
3	Tabela verdade para a função lógica ZERO	56
4	Tabela verdade para porta lógica OR	58
5	Tabela verdade para a função lógica ZERO	59
6	Tabela verdade para a porta lógica AND e operação lógica $A' \cdot B$	60
7	Tabela verdade referente a porta XOR e operação lógica ZERO	61
8	Tabela verdade referente a porta lógica AND e a operação lógica $A' \cdot B$	62
9	Tabela verdade referente a porta lógica OR	63
10	Tabela verdade referente a operação lógica ZERO	64
11	Tabela verdade referente a operação lógica $A \cdot B'$	65
12	Compilação das portas lógicas implementadas para as configurações consideradas neste trabalho e suas respectivas fases de análise	66

Lista de Abreviaturas e Siglas

CW	do inglês <i>Continuous Wave</i>
Bit	do inglês <i>Binary digit</i>
GVD	do inglês <i>Group Velocity Dispersion</i>
NLDC	do inglês <i>Non Linear Directional Coupler</i>
OOK	do inglês <i>On-OFF Keying</i>
PAM	do inglês <i>Pulse Amplitude Modulation</i>
PBG	do inglês <i>Photonic Band Gap</i>
PCF	do inglês <i>Photonic Crystal Fiber</i>
SPM	do inglês <i>Self Phase Modulation</i>
XPM	do inglês <i>Cross Phase Modulation</i>
SS	do inglês <i>Self-Steepening</i>
IRS	do inglês <i>Intrapulse Raman Scattering</i>
MZI	do inglês <i>Mach-Zehnder Interferometer</i>
TOD	do inglês <i>third order dispersion</i>
PBGF	do inglês <i>Photonic Band Gap Fiber</i>
WDM	do inglês <i>Wavelength Division Multiplexing</i>
EDFA	do inglês <i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i>
SOA	do inglês <i>Semiconductor Optical Amplifier</i>
HTCR	do inglês <i>Half Taper Collapse Region</i>
OFDM	do inglês <i>Orthogonal Frequency Division Multiplex</i>

MB-OFDM	do inglês <i>Multiband Orthogonal Frequency Division Multiplex</i>
SNR	do inglês <i>Signal to Noise Ratio</i>
ENLS	Equação Não Linear de Schrodinger
ENLGS	Equação Não Linear Generalizada de Schrodinger
RZ	Retorno a Zero
NRZ	Não Retorno a Zero

INTRODUÇÃO

Sistemas de telecomunicações cujos cabos de transmissão são constituídos por fibras ópticas, são capazes de guiar pulsos luminosos por grandes distâncias e com baixas perdas. Fibras ópticas são comumente aplicadas para transmissão de informação a curta e longa distância devido a diversas características tidas como vantagens que viabilizam sua utilização nos atuais sistemas de telecomunicações. Essas fibras, ditas convencionais, podem substituir com vantagens os cabos coaxiais. Algumas vantagens das fibras ópticas convencionais em relação aos cabos coaxiais podem ser elencadas por Agrawal (2014) como:

- Imunidade a interferências eletromagnéticas: por serem feitas de material dielétrico, as fibras ópticas se tornam imunes a interferências causadas por aparelhos elétricos, descargas elétricas atmosféricas e pulsos eletromagnéticos;
- Isolamento elétrico: por ser constituída de vidro ou plástico, a fibra dispensa necessidade de preocupação com aterramentos ou problemas de choque elétrico em caso de rompimento do cabo;
- Compactação: as fibras ópticas possuem dimensões menores quando comparadas aos cabos metálicos de cobre, as dimensões reduzidas da fibra permitem uma melhor utilização dos espaços e de quantidades maiores de cabos a fibra;
- Segurança: fibras ópticas não irradiam luz propagada, dificultando a captação de informação por agentes externos;
- Ampliação de banda larga: com a utilização de técnicas para multiplexação, torna-se possível o aumento de banda passante na fibra sem grandes mudanças nos projetos estruturais de sistemas já construídos;
- Baixa atenuação: fibras ópticas possuem atenuação de 0,2 dB/Km para a janela de 1550 nm, podendo-se aumentar a distância entre repetidores, diminuindo os custos do sistema.

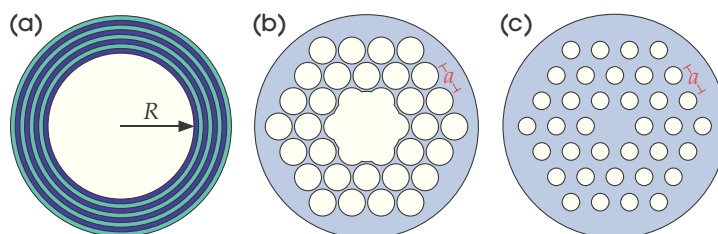
Fibras ópticas convencionais são utilizadas em sistemas de telecomunicações e em pesquisas envolvendo efeitos lineares e dispersivos de baixa ordem como apresentado por Liu, Fan & Xue (2012), onde um sistema com gerenciamento de dispersão para pulsos ultra curtos é implementado; geração de super-continuum descrito por Zhu *et al.* (2015) e Farrell *et al.* (2012); e otimização de sistemas de telecomunicações já existentes.

Recentemente, pesquisas com dispositivos de chaveamento ultra rápido, efeitos não lineares e sensoriamento necessitaram de fibras com parâmetros específicos os quais não eram obtidas através das fibras convencionais. Tornou-se necessário desenvolver novos tipos de fibras. Dentre essas fibras destacam-se (AGRAWAL, 2014):

- Fibras compensadoras de dispersão;
- Fibras mantenedoras de polarização;
- Fibras de cristal fotônico.

Dentre as fibras citadas, as fibras de cristais fotônicos são aplicadas em pesquisas que necessitam da análise de efeitos não lineares ou dispositivos ópticos de chaveamento ultra-rápido para implementação de portas lógicas. Segundo Joannopoulos *et al.* (2011), as fibras de cristais fotônicos (do inglês - *photonic crystal fiber* - PCF) - apresentadas na Figura 1 - são comumente compostas por estruturas periódicas, diferentemente das fibras convencionais formadas por núcleo e casca com estrutura constante.

Figura 1 – Exemplos de fibras de cristais fotônicos (a) Fibra de Bragg com uma rede unidimensional de camadas periódicas concêntricas. (b) Estrutura periódica bidimensional composta de furos de ar (fibra holey). (c) Fibra holey de núcleo sólido.



Fonte: (JOANNOPOULOS *et al.*, 2011).

Fibras de cristal fotônico têm sido foco de pesquisas devido a seu confinamento ideal de campos eletromagnéticos em guias de onda. Elas combinam propriedades das fibras ópticas com os cristais fotônicos, possuindo assim propriedades que não são encontradas em fibras convencionais. As PCFs tem sido frequentemente utilizadas em estudos de dispositivos de chaveamento como acopladores e interferômetros totalmente ópticos.

Dispositivos ópticos de chaveamento de energia (acopladores e interferômetros) são comumente utilizados em sistemas de telecomunicações, possibilitando a divisão do feixe de luz, estabelecendo sistemas de proteção, multiplexação de sinais em enlaces ópticos ou ainda a implementação de portas lógicas. A maioria dos estudos se dá através da análise da propagação em fibra considerando diversos efeitos que influenciam a transmissão de um sinal. Também é de interesse, estudos com dispositivos totalmente ópticos visando a utilização de pulsos com baixa largura temporal e transmissão a altas taxas de dados.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

Este trabalho tem por objetivo geral, propor e analisar um novo modelo de interferômetro de Mach-Zehnder (MZI) (com simetria/assimetria nos acopladores) baseado em fibras de cristais fotônicos sob efeitos não lineares e dispersivos de alta ordem e operando sob modulação On/Off Keying.

1.1.2 Específicos

- Estudo teórico da transmissão de energia ao longo do dispositivo;
- Implementação de operações lógicas totalmente ópticas.

1.2 Motivação

Sistemas com componentes eletro-ópticos podem ocasionar aumento nas taxas de erro de bit e possui limitações na taxa de transferência de dados quando comparados aos sistemas totalmente ópticos. Nesse intuito, dispositivos ópticos de chaveamento são de grande importância para sistemas de telecomunicações devido sua aplicabilidade em implementação de portas lógicas.

O dispositivo proposto é um **interferômetro de Mach-Zehnder** totalmente óptico em fibra de cristal fotônico. Dispositivos totalmente ópticos dispensam a utilização de componentes eletrônicos em sua estrutura, diminuindo custos de projetos do sistema e proporcionando um melhor aproveitamento da capacidade física nos projetos. Esse tipo de dispositivo chama atenção devido a condição do confinamento de campo se aproximar das condições ideais de

propagação do feixe óptico e permitir a propagação de pulsos com largura temporal cada vez mais estreitos.

1.3 Organização da dissertação

Esta dissertação organiza-se da seguinte forma:

- Capítulo 2 - Fundamentação teórica: apresenta de forma objetiva a fundamentação teórica em relação aos tipos de fibras de cristais fotônicos e seu método de propagação; os principais efeitos inerentes a propagação em fibras ópticas: dispersão de velocidade de grupo (GVD), dispersão de alta ordem (TOD), automodulação de fase (SPM), modulação de fase cruzada (XPM), efeitos não lineares de alta ordem: espalhamento Raman intrapulso e self-steepening. É apresentado o funcionamento de um interferômetro de Mach-zehnder. Aborda-se métodos de modulação de sinais em especial o utilizado neste trabalho: OOK;
- Capítulo 3 - Revisão Bibliográfica: traz uma revisão dos estudos sobre o interferômetro de Mach-zehnder convencional e em fibra de cristal fotônico, mostrando uma variedade de aplicações em que este dispositivo pode ser empregado: regime linear e não linear, portas lógicas e sensoriamento. Também mostra-se aplicações em relação a dispositivos ópticos gerais (acopladores e interferômetros);
- Capítulo 4 - Metodologia: expõe a forma como o trabalho foi executado além dos parâmetros e métodos utilizados;
- Capítulo 5 - Resultados: expõe os resultados numéricos para a propagação baseada na equação não linear generalizada de Schrodinger no MZI híbrido em fibra de cristal fotônico com modulação OOK obtidos a partir de simulação numérica. Apresenta-se aplicação do MZI - PCF híbrido na implementação de operações lógicas totalmente ópticas;
- Capítulo 6 - Conclusão do trabalho com base nos resultados discutidos, enfatizando-se os mais relevantes, bem como vantagens do dispositivo proposto.

1.4 Produção científica

O presente trabalho proporcionou publicação de artigo completo em periódico científico qualis CAPES A1:

- BEZERRA FILHO, G. S.; CORREIA, D. G; FRAGA, W. B; GUIMARÃES, G. F. **Obtaining optical logic gates - OR, XOR, AND and logic functions using asymmetric Mach-Zehnder interferometer based on photonic crystal fiber.** Optics and Laser Technology, v. 97, p. 370-378, 2017.

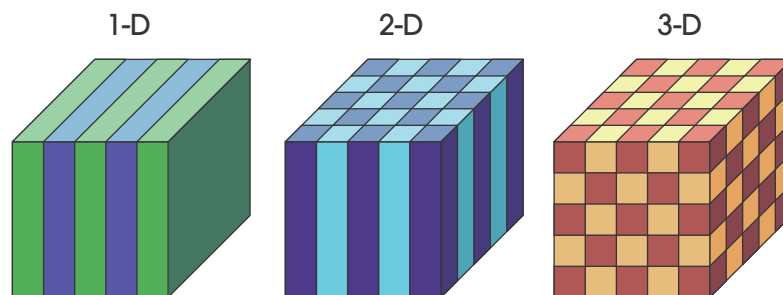
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo apresenta-se os conceitos e teorias a cerca dos principais tópicos abordados no trabalho. Exemplifica-se os conceitos de fibra de cristal fotônico, suas características e geometria do núcleo. Aborda-se os efeitos inerentes a propagação em fibras ópticas: efeitos dispersivos (dispersão de segunda e terceira ordem), efeitos de atenuações (perdas por espalhamento ou micro-macro curvaturas) e efeitos não lineares(modulações de fase cruzada, automodulação de fase e espalhamentos). Também aborda-se dispositivos ópticos como acopladores e interferômetros.

2.1 Cristais fotônicos

Cristais fotônicos podem ser classificados em três tipos de acordo com a variação espacial da rede periódica. Segundo Joannopoulos *et al.*, no caso em que ocorre variação unidirecional ao longo do cristal, ele é denominado unidimensional (1D). Quando a periodicidade ocorre ao longo de um plano, o cristal é classificado como bidimensional (2D). Se a estrutura periódica se estende ao longo de todas as direções espaciais, o cristal fotônico é dito tridimensional (3D). A Figura 2 apresenta uma esquema de redes cristalinas unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais.

Figura 2 – Estruturas de cristais fotônicos



Fonte: (JOANNOPOULOS *et al.*, 2011).

Em cristais fotônicos, as estruturas formadas pela repetição alternada de camadas semicondutoras com índice de refração distintos, juntamente com a estrutura geométrica da

rede cristalina são capazes de filtrar certas faixas de frequências onde pode ou não ocorrer propagação de ondas eletromagnéticas.

2.2 Fibras de cristal fotônico

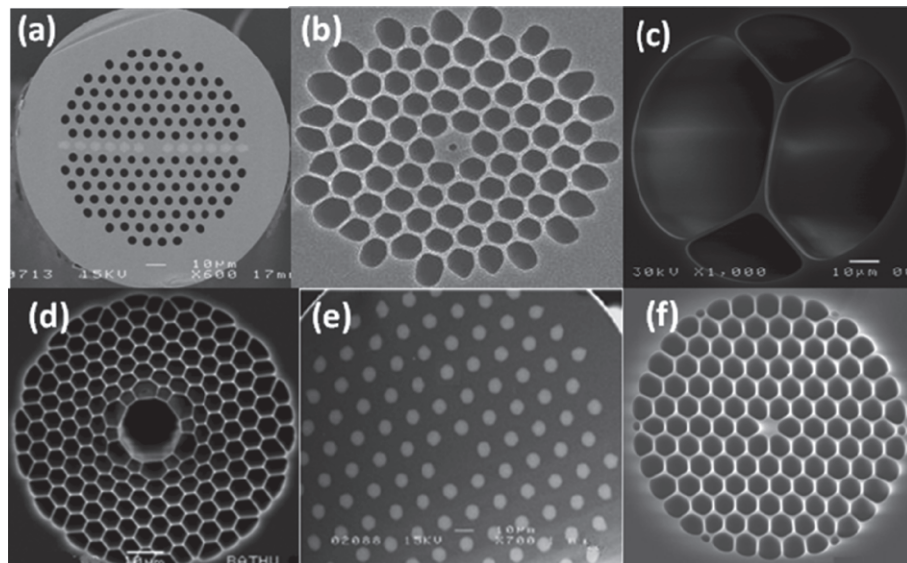
As fibras de cristal fotônico - PCF (*photonic crystal fiber*) são constituídas pela combinação de materiais ópticos como: sílica pura, sílica dopada, ar, líquidos, pontos quânticos e gases, esses materiais foram estudados por Sodré (2010), Wiederheker *et al.* (2007) e Correa & Knight (2008) que também mostram aplicações para essa fibra. A Figura 3 apresenta alguns tipos de PCF que permitem o guiamento e manipulação da luz por dois mecanismos de propagação distintos: efeito de reflexão interna total e efeito PBG (*photonic band gap*).

A Figura 3 (a), mostra uma PCF híbrida; esse tipo de PCF possibilita a propagação da luz utilizando simultaneamente os fenômenos de reflexão interna total e PBG. Na Figura 3 (b), a luz é confinada num furo central que explora interações ópticas em nano escala. A alta intensidade no orifício central torna possível sua utilização para pesquisas que envolvam a interação entre luz-matéria e óptica não-linear.

As PCF apresentam em sua maioria uma periodicidade e simetria em relação a sua geometria de fabricação, contudo é possível utilizar PCF's com simetria reduzida, como apresentado na Figura 3(c). Essa fibra é composta por dois núcleos sólidos e quatro furos de ar com duas dimensões distintas e é utilizada para aplicações quânticas. Na Figura 3(d) é apresentada uma PCF de núcleo oco. Nesta fibra, a luz é guiada no núcleo oco sendo incapaz de escapar para o revestimento da fibra devido o efeito de PBG, essa estrutura pode ser descrita de forma análoga as estruturas de bandas semicondutoras. Na Figura 3(e) tem-se uma PCF totalmente sólida (PBGF - *photonic bandgap fiber*), ela é composta por um núcleo de sílica puro cercado por um cristal fotônico unidimensional (micropostes) na forma de hastes dopadas com germânio. Por fim, na Figura 3(f) é apresentada uma PCF com guiamento por índice de refração. Essa fibra possui um padrão hexagonal de furos de ar e núcleo formado por sílica pura.

O guiamento da luz em PCF's podem ser realizados através do efeito de reflexão interna total ou por meio de PBG dependendo do núcleo e do revestimento da fibra. Neste trabalho, é utilizada uma PCF núcleo oco com propagação baseada no efeito de reflexão interna total. Levando-se em consideração esses mecanismos de propagação, pode-se dividir as PCF's em quatro grandes grupos (SODRÉ, 2010):

Figura 3 – Fibras de cristal fotônico. (a) PCF híbrida, (b) PCF com núcleo de ar, (c) PCF para aplicações quânticas, (d) PCF de núcleo oco, (e) PCF totalmente sólida, (f) PCF com guiamento por índice de refração



(a) FONTE: SODRÉ JÚNIOR, 2010; (b) FONTE: (WIEDERHEKER *et al.*, 2007); (c) FONTE: (SODRÉ, 2010); (d) FONTE: (CORREA; KNIGHT, 2008); (e) FONTE: (CORREA; KNIGHT, 2008); (f) FONTE: (CORREA; KNIGHT, 2008).

- PCF de núcleo oco com propagação baseada no efeito de reflexão interna total;
- PCF de núcleo oco com propagação baseada no efeito antirressonante caracterizando o efeito PBG;
- PBGF totalmente sólido, também baseado no efeito antirressonante para caracterizar o efeito PBG;
- PCF híbrida propaga luz se utilizando da reflexão interna total e do efeito PBG simultaneamente.

As características inerentes a cada uma dessas fibras será discutida nas seções que seguem.

2.2.1 PCF com propagação baseada em reflexão interna total

Esse tipo de PCF possui um núcleo sólido embutido em um cristal fotônico bidimensional, que possui um conjunto de furos de ar. Este núcleo sólido atua como o defeito (retirada de um único orifício de ar no centro do cristal) que caracteriza o cristal fotônico. A existência dos furos de ar constituído por um material com índice de refração menor do que o material que os rodeia, faz com que o índice de refração médio nessa região diminua, permitindo o guiamento da luz por um núcleo sólido.

2.2.2 PCF de núcleo oco

As fibras de núcleo oco operam em regime quase monomodo, a luz é guiada em núcleo oco rodeado por microestruturas periódicas de furos de ar. Os modos são considerados como um, devido a maioria das PCF's de núcleo oco suportarem modos ópticos distintos e mesmo assim, ela ser capaz de excitar seletivamente o modo fundamental.

As PCF's de núcleo oco dependem de um cristal fotônico 2D formado por uma serie de furos de ar. A reflexão interna total não é possível neste tipo de fibra pois o índice de refração da casca (sílica pura e ar) é maior que o índice de refração do núcleo formado apenas por ar. A propagação da luz ocorre por meio de dispersão coerente, onde a luz com comprimentos de onda na banda de propagação é proibida de se propagar no revestimento de cristal fotônico e é confinada no defeito central. Cada banda corresponde a um PBG bidimensional no revestimento do cristal fotônico. Portanto, a luz com comprimentos de onda correspondentes a PBG não podem escapar do núcleo. Essas fibra também são chamadas por fibras de bandgap fotônico (PBGF).

O núcleo oco da PCF é formado retirando-se alguns capilares da região central da fibra, produzindo-se um núcleo com grande diâmetro(melhores chances de se encontrar um modo guiado). O núcleo dessa fibra é rodeado por uma serie de orifícios de ar (com alta densidade de preenchimento de ar) e distância mínima entre cada orifício implementando-se assim as bandas PBG's e a propagação do modo guiado no núcleo.

2.2.3 PBGF de núcleo sólido

Essa fibra é formada por um arranjo periódico de micropostes com alto índice de refração. A motivação para fazer esse tipo de fibra é utilizar as propriedades das PBGF's e possuir uma fibra que é de fácil fabricação (os furos de ar podem ser completamente eliminados do processo de fabricação).

PBGF's totalmente sólidos consistem numa série de micropilares com alto índice de refração inseridas num material com baixo índice de refração. Para a PBGF de sílica, os micropilares são dopados com germânio e depois são incorporados em sílica pura. Nessa fibra, a propagação se dá em bandas restritas de comprimento de onda, que coincidem com os PBG's formados pelo cristal fotônico bidimensional dos micropilares.

Nos PBGF's sólidos, os micropilares com alto índice de refração, permitem o escape da luz do núcleo, caso estejam em ressonância e refletem de volta ao núcleo se foram antirressonantes.

As principais características das PBGF's de núcleo sólido são: baixa atenuação, propagação em um conjunto de janelas de frequência e combinação de índices grupais para diferentes comprimentos de onda devido a múltiplos *bandgaps* (cada micropilar da estrutura pode ser considerado como um guia de onda).

2.2.4 PCF híbrida

Esta PCF é composta de furos de ar e hastes dopadas em torno do núcleo. Os furos de ar são dispostos em padrão hexagonal como nas fibras de propagação por reflexão interna total e um eixo constituído pelas hastes dopadas.

A propagação nessas fibras ocorre da seguinte forma: na Figura 3(a) acima e abaixo da faixa formada pelas hastes dopadas onde se encontram os furos de ar, a luz se propaga através da reflexão interna total, a faixa central que contem as hastes dopadas, formam bandas restritas de frequência que coincidem com as PBG's, obrigando a luz a se propagar com frequências específicas como na fibra PBGF.

2.3 Propagação de luz em fibras ópticas com regime não linear

A propagação de onda em fibras ópticas sendo um fenômeno eletromagnético deve ser governada pelas equações de Maxwell. Por ser um meio dielétrico, fibras ópticas estão sujeitas a polarização elétrica e magnética, tornando-se conveniente utilizar as equações de Maxwell na matéria como apresentadas por Griffiths (2011):

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho, \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (2.4)$$

Nas equações, $\mathbf{E}$ é o vetor campo elétrico, $\mathbf{H}$ o vetor campo magnético, $\mathbf{D}$ é a densidade de

fluxo elétrico, $\mathbf{B}$ a densidade de fluxo magnético, $\mathbf{J}$ a densidade de corrente e ρ é a densidade de cargas do meio. As densidades de fluxos $\mathbf{D}$ e $\mathbf{B}$ que surgem em resposta aos campos $\mathbf{E}$ e $\mathbf{H}$ são relacionadas através das equações:

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}, \quad (2.5)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{M}, \quad (2.6)$$

Nas equações (2.5) e (2.6), $\mathbf{P}$ representa a polarização elétrica, $\mathbf{M}$ a polarização magnética, ϵ_0 é a permissividade elétrica no vácuo e μ_0 representa a permeabilidade magnética no vácuo.

A fibra óptica é um meio não magnético ($\mathbf{M} = 0$) devido a sua composição (sílica) e não possui cargas livres (ρ e $\mathbf{J}$ iguais a zero). Com essas considerações podemos reescrever as equações de Maxwell para fibras ópticas:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (2.7)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (2.8)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0, \quad (2.9)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (2.10)$$

A densidade de fluxo elétrico $\mathbf{D}$ não se altera com as considerações feitas, contudo, a densidade de fluxo magnético pode ser reescrita como:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}, \quad (2.11)$$

Tomando-se o rotacional da equação (2.7) e utilizando $\epsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2}$ onde c é a velocidade da luz obtém-se:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} + \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial t^2}, \quad (2.12)$$

A polarização $\mathbf{P}$ exige uma abordagem de mecânica quântica, porem é possível fazer uma

análise fenomenológica quando a frequência for muito aquém da ressonância do meio, como é o caso de fibras ópticas com comprimento de onda entre 0,5 e 2 μm . A relação é apresentada por Agrawal (2001b) e é expressa da seguinte forma:

$$\mathbf{P} = \epsilon_0(\chi^{(1)} \cdot \mathbf{E} + \chi^{(2)} : \mathbf{E}\mathbf{E} + \chi^{(3)} : \mathbf{E}\mathbf{E}\mathbf{E} + \dots), \quad (2.13)$$

na equação (2.13), $\chi^{(j)}$ é a susceptibilidade de ordem (j) . A susceptibilidade de primeira ordem $\chi^{(1)}$ representa a contribuição do índice de refração linear $n(\omega)$ e da atenuação $\alpha(\omega)$ que segundo Agrawal (2004) podem ser expressas da seguinte maneira:

$$n(\omega) = 1 + \frac{1}{2} \text{Re}[\tilde{\chi}^{(1)}(\omega)], \quad (2.14)$$

$$\alpha(\omega) = \frac{\omega}{nc} \text{Im}[\tilde{\chi}^{(1)}(\omega)], \quad (2.15)$$

A susceptibilidade de segunda ordem $\chi^{(2)}$ é responsável por fenômenos como soma e diferença de frequências, contudo ela é nula para meios simétricos inversos como é o caso da sílica.

O termo $\chi^{(3)}$ é a susceptibilidade de terceira ordem que é responsável por fenômenos como mistura de quatro ondas, índice de refração não linear e ainda induz a susceptibilidade de segunda ordem causando efeitos não lineares como modulação de fase cruzada - XPM (do inglês *Cross phase modulation*), e automodulação de fase - SPM (do inglês *self-phase modulation*).

Considerando as susceptibilidades de primeira e segunda ordem, podemos descrever a polarização $\mathbf{P}$ como:

$$\mathbf{P}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{P}_L(\mathbf{r}, t) + \mathbf{P}_{NL}(\mathbf{r}, t), \quad (2.16)$$

Na equação (2.16), $\mathbf{P}_L$ é o fator linear da polarização e $\mathbf{P}_{NL}$ o fator não linear. Pode-se equacionar cada fator de acordo com suas susceptibilidades:

$$\mathbf{P}_L(\mathbf{r}, t) = \epsilon_0 \int_{-\infty}^{\infty} \chi^{(1)}(t - t') \mathbf{E}(\mathbf{r}, t') dt', \quad (2.17)$$

em que t' é um tempo de propagação posterior ao tempo inicial t .

$$\mathbf{P}_{\text{NL}}(\mathbf{r}, t) = \epsilon_0 \int_{-\infty}^{\infty} dt_1 \int_{-\infty}^{\infty} dt_2 \int_{-\infty}^{\infty} dt_3 \times \chi^{(3)}(t - t_1, t - t_2, t - t_3) : \mathbf{E}(\mathbf{r}, t_1) \mathbf{E}(\mathbf{r}, t_2) \mathbf{E}(\mathbf{r}, t_3), \quad (2.18)$$

As equações (2.12), (2.13), (2.17) e (2.18) fornecem um formalismo geral para o estudo dos efeitos não lineares em fibras ópticas. Além de considerarmos que o fator referente a polarização não linear $\mathbf{P}_{\text{NL}}$ é influenciada apenas pela susceptibilidade de terceira ordem, também podemos considerar que esse fator é uma perturbação a polarização total. Essa aproximação pode ser feita devido os efeitos não lineares serem fracos em fibras de sílica.

Substituindo-se a equação (2.16) na equação (2.12) obtemos a equação de onda para fibra óptica levando-se em consideração efeitos não lineares:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{P}_L}{\partial t^2} + \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{P}_{\text{NL}}}{\partial t^2}, \quad (2.19)$$

2.3.1 Equação não linear de Schrodinger

A equação não linear de Schrodinger rege a propagação de um pulso em fibras ópticas e pode ser obtida a partir da equação 2.19. Segundo Agrawal (2001b), algumas considerações precisam ser admitidas:

- O campo óptico se aproxima do monocromático, ou seja, possui largura espectral $\Delta\omega$ pequeno em relação a frequência de espectro ω_0 do pulso;
- Aproximação da envoltória lentamente variável ou aproximação paraxial, onde assume-se que a função de propagação varia suavemente em uma direção, ou seja, permite que os vetores de campo e polarização sejam descritos por uma função produto que varia lentamente no tempo;
- Admite-se que a polarização do campo óptico é mantida ao longo da fibra em alguma direção de propagação;
- A resposta não linear do meio é instantânea, a susceptibilidade $\chi^{(3)}$ não dependerá da variação temporal a que a propagação está submetida. Esta aproximação elimina a parcela de influência das vibrações moleculares.

As aproximações consideradas limitam derivadas e efeitos de ordem superior como $\frac{\partial^3 \mathbf{A}(\mathbf{z}, t)}{\partial t^3}$. A equação obtida aplicando as considerações feitas até agora é definida como Equação Não

Linear de Schrodinger devido sua semelhança com a equação de Schrodinger para a mecânica quântica:

$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} \mathbf{A} = i\gamma |\mathbf{A}|^2 \mathbf{A}, \quad (2.20)$$

Na equação (2.20), $\mathbf{A} = \mathbf{A}(\mathbf{z}, t)$ é a amplitude de pulso propagado na fibra.

A ENLS descreve o comportamento de pulsos com largura temporal mínima de 1 ps, com amplitude de pulso variando lentamente com o tempo e campo óptico quase monocromático. Quando o pulso possui largura temporal da ordem de fs ou quando é necessário o estudo de efeitos não lineares ou dispersivos de alta ordem, torna-se necessária a generalização da equação (2.20).

A generalização da equação (2.20) exige mais um conjunto de considerações apresentado por Agrawal (2001b):

- Inclusão do termo proporcional a β_3 , que implica num pulso com largura espectral $\leq 100fs$ fazendo com que a condição de pulso quase monocromático seja desprezível;
- A polarização não linear varia com o tempo;
- A aproximação da **envoltória lentamente variável** também pode ser desprezada, assim a resposta da susceptibilidade não linear deixa de ser instantânea;
- Deve-se levar em consideração as respostas as contribuições eletrônicas e vibracionais das moléculas. A resposta eletrônica pode ser considerada instantânea, contudo, a vibracional ocorre com maior lentidão.

A nova equação é definida como equação não linear generalizada de Schrodinger (ENLGS) e descreve a propagação para pulsos considerando efeitos dispersivos e não lineares de alta ordem:

$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} - \frac{1}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 \mathbf{A}}{\partial t^3} + \frac{\beta_4}{24} \frac{\partial^4 \mathbf{A}}{\partial t^4} + \frac{\alpha}{2} \mathbf{A} = i\gamma \left[|\mathbf{A}|^2 \mathbf{A} + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial t} (|\mathbf{A}|^2 \mathbf{A}) - T_R \mathbf{A} \frac{\partial}{\partial t} |\mathbf{A}|^2 \right], \quad (2.21)$$

onde

$$T_R = \int_0^\infty t' R(t') dt', \quad (2.22)$$

Comparando-se as equações (2.21) e (2.20), nota-se a presença dos termos referentes a dispersão de terceira ordem: $-\frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3 \mathbf{A}}{\partial t^3}$ onde $\beta_3 = \frac{d\beta_2}{d\omega}$, *self steepening*: $i\gamma \left[\frac{1}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial t} (|\mathbf{A}|^2 \mathbf{A}) \right]$ e espalhamento Raman intrapulso: $i\gamma \left[-T_R \mathbf{A} \frac{\partial}{\partial t} |\mathbf{A}|^2 \right]$. As considerações feitas para a equação (2.21), são válidas para pulsos com largura temporal mínima próxima a $50fs$.

2.3.2 Descrição dos efeitos previstos pela ENLGS

A ENLGS descreve com precisão fenômenos relacionados a pulsos com duração temporal mínima de $100fs$, em fibras ópticas não-birefringentes e monomodos. Apresenta-se a seguir a descrição para seus efeitos.

2.3.2.1 Atenuação

Caracterizada pelo termo $\frac{\alpha}{2} \mathbf{A}$, responsável pela atenuação na fibra óptica, depende da potência do pulso óptico. A atenuação é definida por fenômenos como: absorção material - onde a energia do pulso é absorvida pela sílica em determinados comprimentos e por impurezas do material adquiridos durante a fabricação da fibra -, espalhamento Rayleigh, que resulta de defeitos estruturais durante a fabricação da fibra devido a moléculas de sílica espalhadas pelo guia de onda modificarem o índice de refração.

Há também as perdas por curvaturas. Ocorre quando o feixe óptico propagante dentro do guia de onda perde parte de sua energia devido a refração modifica pelo ângulo de incidência do feixe.

A atenuação causa uma queda exponencial da potência do pulso a medida que a distância aumenta.

2.3.2.2 Dispersão de velocidade de grupo (GVD - *Group Velocity Dispersion*)

A dispersão é um dos principais fatores relacionados a transmissão em fibras ópticas. Causa o alargamento temporal do pulso óptico, onde a velocidade de grupo referente ao modo propagado depende da frequência. Como consequência, as diferentes componentes espectrais do pulso possuem diferentes velocidades de grupo. Há ainda a influência causada pelo material de que é constituída a fibra.

Considere-se uma fibra óptica monomodo com comprimento L e índice de refração definido por

$$n = \begin{cases} n_1, & r \leq a \\ n_2, & r > a \end{cases} \quad (2.23)$$

sendo a o raio do núcleo.

Uma componente espectral específica de frequência angular leva um tempo para chegar a extremidade da fibra óptica definido por $T = \frac{L}{v_g}$ onde v_g é a velocidade de grupo. Cada componente sofre um atraso temporal chamado atraso de grupo, que é quantitativamente definido como

$$\frac{\tau_g}{L} = (v_g)^{-1} = \frac{d\beta}{d\omega}, \quad (2.24)$$

onde β é a constante de propagação.

Em fibras ópticas monomodo, parte da potência do sinal pode ser transmitida pelo núcleo e parte pela casca, afetando o valor da constante de propagação que pode variar no intervalo

$$n_2 k_0 \leq \beta \leq n_1 k_0, \quad (2.25)$$

sendo k_0 o número de onda.

Pode-se definir um índice de refração modal $\bar{n}$, que é limitado pelos índices de refração do núcleo e da casca, isto é: $n_2 \leq \bar{n} \leq n_1$. Assim a constante de propagação pode ser escrita como:

$$\beta = \bar{n} k_0 = \bar{n} \frac{2\pi f}{c} = \bar{n} \frac{\omega}{c}, \quad (2.26)$$

Substituindo a equação (2.26) na equação (2.24) demonstra-se que

$$v_g = \frac{c}{\bar{n}_g}, \quad (2.27)$$

onde $\bar{n}_g$ é o índice de refração de grupo dado por

$$\bar{n}_g = \bar{n} + \omega \frac{d\bar{n}}{d\omega}, \quad (2.28)$$

com $\bar{n}$ sendo o índice de refração efetivo definido por

$$\bar{n} \simeq n_2(1 + b\Delta), \quad (2.29)$$

em que b representa o índice de refração normalizado.

Marques (2012) define que a GVD é comumente quantificada pela taxa de variação do atraso de grupo em relação ao comprimento de onda por unidade de comprimento:

$$D = \frac{1}{L} \frac{d\tau_g}{d\lambda} = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{1}{v_g} \right) = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \frac{d^2\beta}{d\omega^2} = -\frac{2\pi}{\lambda^2} \left(2 \frac{d\bar{n}}{d\omega} + \omega \frac{d^2\bar{n}}{d\omega^2} \right) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2\bar{n}}{d\lambda^2}, \quad (2.30)$$

onde a derivada parcial $\frac{d^2\beta}{d\omega^2} = \beta_2$ é responsável pelo alargamento temporal dos pulsos ópticos e é designado por coeficiente de dispersão de segunda ordem.

O parâmetro de dispersão D também pode ser considerado como a soma de outros dois tipos de dispersões: a dispersão material D_M e a dispersão de guia de onda D_W .

$$D = D_M + D_W, \quad (2.31)$$

A dispersão material resulta da variação do índice de refração com o comprimento de onda. A dispersão de guia de onda resulta da energia se propagar na casca ao invés de se limitar ao núcleo, depende de parâmetros da fibra como o contraste dielétrico e a variação da frequência com o comprimento de onda. Essas dispersões são dadas por Agrawal (2004):

$$D_M = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_2}{d\lambda^2} \quad (2.32)$$

$$D_W = -\frac{n_2 \Delta}{\lambda c} V \frac{d^2(Vb)}{dV^2}, \quad (2.33)$$

A dependência entre frequência e velocidade de grupo altera a largura dos pulsos propagados, esse alargamento temporal é dado por:

$$\Delta T = \frac{dT}{d\omega} \Delta\omega = \frac{d}{d\omega} \left(\frac{L}{v_g} \right) \Delta\omega = L \frac{d\tau_g}{d\omega} \Delta\omega = L\beta_2 \Delta\omega, \quad (2.34)$$

A equação (2.34) pode ser reescrita em termos do parâmetro de dispersão. Tomando-se $\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}$ e $\Delta\omega = -\frac{2\pi c}{\lambda^2}\Delta\lambda$, a largura temporal toma a forma:

$$\Delta T = -\frac{2\pi c}{\lambda^2}\beta_2 L \Delta\lambda = D L \Delta\lambda, \quad (2.35)$$

em que D representa o parâmetro de dispersão total cuja unidade é $ps/(Km - nm)$.

2.3.2.3 Dispersão de terceira ordem

Caracterizado pelo termo $-\frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial t^3}$ onde $\beta_3 = \frac{d\beta_2}{d\omega}$ é designado por coeficiente de dispersão de ordem superior. A principal influência da dispersão de terceira ordem num pulso óptico é a distorção da forma do pulso fazendo com que ele se torne assimétrico e oscilatório em suas extremidades.

2.3.2.4 Dispersão de quarta ordem

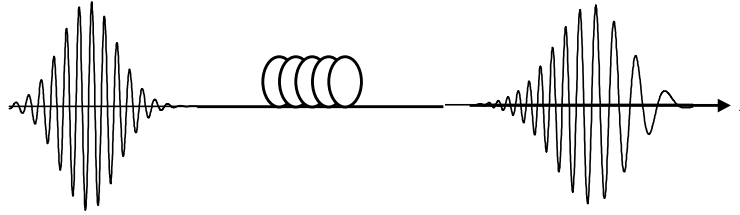
Descrito pelo termo $\frac{\beta_4}{24} \frac{\partial^4 A}{\partial t^4}$, pode ocasionar alargamento com o surgimento de novos picos de pulso óptico, instabilidade modulacional e ganho de intensidade.

2.3.2.5 Automodulação de fase

Caracterizado pelo termo $i\gamma[|A|^2 A]$. Tem sua origem no efeito Kerr (índice de refração não linear). O efeito Kerr manifesta-se a partir da interação do feixe óptico com o meio sob ação de um campo elétrico aplicado. Essa interação resulta em uma modificação no índice de refração relacionadas a termos não lineares da polarização elétrica. O efeito Kerr demonstra a capacidade que algumas substâncias tem de refratar de maneira diferente as ondas luminosas quando colocadas sob ação de um campo elétrico.

A dependência do índice de refração com a potência do sinal incidente na fibra causa a modulação desse sinal, isto é, ocorre uma **automodulação de fase**. Essa modulação adicional ocorre devido a uma variação de fase adicional sofrida pela luz ao se propagar na fibra. A consequência é um alargamento espectral efetivo do pulso (*chirp*).

Para Thyagarajan & Ghatak (2007), o *chirp* de frequência é a tendência que cada componente espectral tem de se agrupar desde as frequências mais baixas até as mais altas e vice versa. A Figura 4 exemplifica esse deslocamento de frequência causado pelo *chirp*.

Figura 4 – Pulso óptico submetido a um *chirp* de frequência

FONTE: (THYAGARAJAN; GHATAK, 2007).

O deslocamento adicional de fase não linear a que o pulso é submetido é dado pela equação:

$$\Phi_{NL} = \int_0^L (\beta' - \beta) dz, \quad (2.36)$$

$$\Phi_{NL} = \int_0^L P(z) dz, \quad (2.37)$$

$$\Phi_{NL} = \gamma PL_{eff}, \quad (2.38)$$

Na equação (2.38), γ produz um deslocamento de fase não linear.

Quando GVD e SPM estão presentes num mesmo sistema e possuem magnitudes semelhantes, pode haver uma compensação entre esses efeitos. A GVD pode alargar pulso e o SPM pode estreitar o mesmo pulso, assim o SPM pode atuar de forma a causar uma compensação da GVD. Essa compensação ocorre através dos *chirps* de frequência gerados por cada efeito.

2.3.2.6 Modulação de fase cruzada

O efeito de XPM tem origem na refração não linear ocasionada pelo efeito Kerr, que se caracteriza pela dependência entre o índice de refração e a intensidade óptica. Resulta na sobreposição entre as intensidades ópticas dos campos evanescentes sendo essa sobreposição fraca mesmo os núcleos do dispositivo estando suficientemente próximos. Assim, o XPM só toma relevância quando dois ou mais feixes de luz interagem entre si sobrepondo um ao outro.

Observa-se que no XPM também ocorre dependência da intensidade óptica com o índice de refração para um comprimento de onda particular e comprimentos de onda vizinhos, assim, quando há XPM, também há o efeito de SPM.

O XPM também causa a modulação do pulso provocando um desvio da frequência assim como o SPM. A diferença é que o XPM é ocasionado quando há dois ou mais pulsos interagindo no mesmo guia de onda. Assim, enquanto no SPM o pulso se auto modula, no XPM um pulso

inicial modula o pulso vizinho.

2.3.2.7 Self-Steepening

Caracteriza na ENLGS pelo termo $i\gamma \left[\frac{1}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial t} (|\mathbf{A}|^2 \mathbf{A}) \right]$. Esse efeito tem origem na dependência entre a velocidade de grupo e a intensidade dos pulsos propagantes, não representa grande limitação aos sistemas de comunicação ópticos. Gera uma frente óptica de choque aos pulsos propagantes na fibra. Esse efeito também é responsável por uma distorção espectral na qual gera um deslocamento do pico de amplitude para frequências inferiores a central (*red shift*) ou superiores a central (*blue shift*). O efeito de *Self-Steepening* pode causar o decaimento de sólitons de ordem superior.

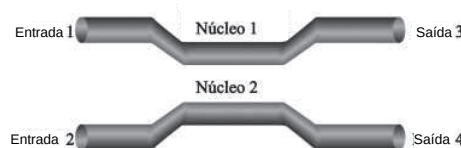
2.3.2.8 Espalhamento Raman intrapulso

Caracterizada pelo termo $i\gamma \left[-T_R \mathbf{A} \frac{\partial}{\partial t} |\mathbf{A}|^2 \right]$. Descreve um tempo finito de resposta para as não linearidades. Causa um decaimento de sólitons de ordem superior. Esse efeito não altera a amplitude dos sólitons, contudo pode alterar sua frequência espectral. Quanto maior é o coeficiente do efeito Raman, menor é a ordem do sólito. Tanto o *Self-Steepening* quanto o espalhamento Raman intrapulso não apresentam fortes limitações aos sistemas de comunicação óptica.

2.4 Acopladores

Acopladores em fibras, são formado basicamente por duas fibras paralelas entre si, seus núcleos são separados por uma distância mínima para que possa ocorrer comutação óptica entre os guias. São basicamente dispositivos de duas entradas e duas saídas que divide fisicamente o feixe óptico.

Figura 5 – Exemplo de acoplador de fibra óptica



FONTE: Autor.

Devido a proximidade dos núcleos, os modos de propagação podem sobrepor-se entre a região que separa os núcleos. Essa sobreposição ocasiona a comutação óptica que é o

acoplamento de onda evanescente entre dois modos, a comutação óptica também provoca a transferência de potência entre os núcleos do acoplador.

No acoplador direcional não linear, o índice de refração possui dependência linear e não linear com a intensidade do campo. Essa dependência dá origem efeitos modulacionais como XPM e SPM.

2.5 Interferômetro de Mach-Zehnder

O interferômetro de Mach-Zehnder (do inglês *Mach-Zehnder Interferometer* - MZI) baseado em fibra óptica é constituído através da ligação entre dois acopladores em série. O primeiro acoplador divide o sinal de entrada em duas partes iguais que adquirem diferentes deslocamentos de fase em cada braço do MZI, após, o sinal interfere novamente no segundo acoplador.

O MZI pode causar diferença de fase usando diferentes comprimentos para os seus braços, já que os campos propagantes tomam caminhos separados fisicamente. Também pode-se causar diferença de fase através de dopagem em um dos braços ou causando uma deformidade da fibra de um dos braços.

O deslocamento de fase total do MZI leva em consideração as fases lineares e não lineares a que o sinal é submetido e podem ser equacionados de acordo com (AGRAWAL, 2001a):

$$\phi_L = \beta_1 L_1 - \beta_2 L_2 \quad (2.39)$$

$$\phi_N L = \gamma P_0 [\rho_1 L_1 - (1 - \rho_1) L_2], \quad (2.40)$$

2.6 Modulação de sinais

Modulação de um sinal é o processo na qual ondas eletromagnéticas recebem informação através de um transmissor. Neste trabalho, a modulação ocorre entre sinais digitais e ópticos. O sinal digital em formato eletrônico é convertido em sinal óptico que pode ser transmitido através da fibra, sendo convertido em sinal digital ao fim da transmissão.

Neste trabalho utiliza-se a modulação *ON/OFF KEYING (OOK)*. Nela o bit 1 é caracterizado pela presença de um pulso de luz introduzido por uma fonte (laser ou led) e o bit 0 é a ausência do pulso. Segundo Ramaswami & Sivarajan (2002), outra forma de se explicar a

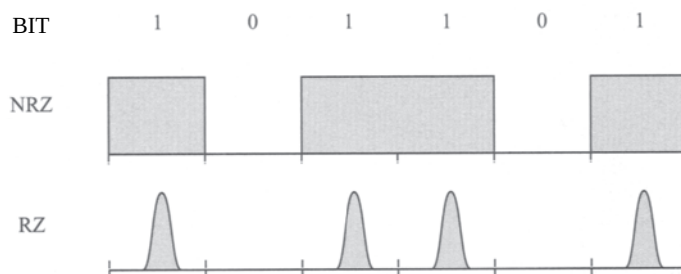
modulação OOK, é que o sinal óptico é simplesmente ligado ou desligado dependendo do bit a ser transmitido.

A modulação OOK pode usar diferentes formatos de sinais, sendo mais comuns os formatos NRZ (não retorno a zero) e o RZ (retorno a zero). No formato NRZ, o pulso de um bit 1 ocupa todo o intervalo de bit e não há pulso para o bit 0. Para o formato RZ, o pulso para o bit 1 ocupa uma fração do intervalo utilizado para comportar o bit transmitido, assim como no formato NRZ, não há pulso transmitido para o bit 0.

O formato NRZ é assim denominado por que a intensidade do sinal não reduz a zero entre dois bits consecutivos. Como consequência, tem-se uma largura de pulso variável de acordo com a sequência de bits enviados. No formato RZ, a intensidade do pulso retorna a zero antes do final da duração do *bit slot*. Portanto no formato RZ, a largura dos pulsos permanece constante e independe da sequência de bits.

A Figura 6 apresenta a modulação OOK para os formatos NRZ e RZ. (No formato RZ o pulso não ocupa toda a área do *bit slot*. No caso do formato NRZ o *bit slot* é totalmente ocupado pelo pulso).

Figura 6 – Formato NRZ e RZ para pulsos modulados em OOK



FONTE: RAMASWAMI; SIVARAJAN - modificado.

No presente trabalho propagou-se um pulso do tipo secante hiperbólica modulado em OOK. O pulso foi escolhido devido as características apresentadas por Kumar, Kumar & Das (2008), de serem não lineares, interagirem fortemente mantendo sua identidade além de serem capazes de transmitir informação com o mínimo de perdas.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O interferômetro de Mach-zehnder tem sido foco de estudo por possibilitar a comutação totalmente óptica sem a conversão eletro-óptica, por aplicações para sensoriamento, como componente de sistemas de transmissão mais complexos. Isso se torna possível devido a ação de efeitos não lineares que ocorrem durante a propagação em meios dopados ou em regime de altas potências.

Diversos estudos vêm sendo realizados com objetivo de viabilizar o processamento de altas taxas de bits através da propagação de pulsos ultra curtos, tanto em dispositivos, quanto em sistemas de comunicação mais complexos. A seguir serão apresentados os estudos realizados com dispositivos ópticos e "em especial" o interferômetro de Mach-Zehnder nos quais são abordados aplicações em sensoriamento utilizando de efeitos não lineares e dispersivos, aplicações em sistemas de telecomunicação, estudos do efeito de um MZI *in line* em fibras de cristais fotônicos e aplicações em comutação totalmente óptica com implementação operações lógicas - foco principal do presente trabalho.

3.1 Dispositivos ópticos

A aplicação de dispositivos ópticos em telecomunicações vai desde comutação de sinais, até sensoriamento de fenômenos físicos. Com a necessidade de se medir grandezas como temperatura, índice de refração, umidade dentre outros; a necessidade de se transmitir altas taxas de dados através de comutação de sinais em WDM - *Wavelength-division multiplexing*; criação de sistemas de comunicações com integração entre dispositivos e aplicação de efeitos lineares e não lineares, os dispositivos ópticos adquirem grande importância.

Estudos com interferômetros, acopladores e fibras de cristal fotônico demonstram as diversas aplicações que se pode obter ao utilizar dispositivos a fibra óptica. Dentre as aplicações mais comuns, está a implementação de operações lógicas. Uthayakumar, Raja & Porsezian (2013) utilizam fibras de cristal fotônico para implementar diversas operações lógicas, as PCF's utilizadas possuem três núcleos dispostos em duas configurações: planar e triangular. A

propagação ocorre em regime linear e obedece a equação de Schrodinger. Com a configuração planar, foram obtidas as portas AND, NAND, OR e NOR. Com a configuração triangular, implementou-se a porta NOT.

O trabalho de Uthayakumar, Raja & Porsezian (2013) com fibra de cristal fotônico de núcleo triplo, proporcionou aplicações de dispositivos em configuração tripla como o estudo numérico apresentado por Coelho *et al.* (2013). Um acoplador em fibra de cristal fotônico é implementado na configuração tripla triangular, ele opera em regime de propagação não linear baseado na equação não linear de Schrodinger. O objetivo do trabalho é implementar operações lógicas se utilizando da modulação por amplitude de pulso - PAM. Dos três núcleos do acoplador, dois recebem sinais de entrada que representam os bits lógicos, esses sinais são pulsos ópticos ultra curtos definidos por secantes hiperbólicas. As portas lógicas implementadas foram a AND e OR totalmente ópticas.

Estudos com portas lógicas também costumam ocorrer através da modificação de parâmetros físicos da fibra, visando a responder a perguntas como: qual a modificação que pode ocorrer com as portas lógicas quando se dopa um pequeno comprimento da fibra? Ou se o diâmetro do núcleo muda qual o impacto na propagação do pulso óptico? Uthayakumar *et al.* (2015) apresenta um estudo de propagação em fibra de cristal fotônico nas configurações triangular e planar - similar a Uthayakumar, Raja & Porsezian (2013), contudo, no estudo de (2015) as fibras possuem os diâmetros dos núcleos diferentes, tornando o dispositivo numa PCF assimétrica. O objetivo foi a implementação portas lógicas totalmente ópticas aproveitando a assimetria do núcleo. Foram obtidas as portas lógicas NOR, NOT, OR, XNOR, XOR e AND para a configuração planar e a porta NOT para a configuração triangular.

Sousa *et al.* (2014) implementa operações lógicas utilizando o interferômetro de Michelson a fibra óptica através de estudo numérico. Esse interferômetro é composto de duas entradas conectadas por um acoplador direcional, nas saídas do acoplador são posicionadas grades de Bragg para refletir o sinal propagado. As portas lógicas foram analisadas nas saídas do dispositivo. A propagação a que o interferômetro está submetido é não linear, regido pela equação não linear generalizada de Schrodinger. Estudou-se o comportamento do dispositivo para três valores de potência de entrada: 150 kW, 177 kW e 196 kW. Para a potência de 150 kW foram implementadas as portas XOR e OR, quando a potência é elevada a 177 kW obtêm-se a porta OR e se a potência tiver valor de 196 kW têm-se as portas OR e NOT. Um estudo similar foi realizado por Sharma & Kumar (2015): implementação de operações lógicas com propagação em regime não linear em dispositivo de fibra de cristal fotônico. O dispositivo proposto é um interferômetro de Sagnac não linear que é composto por um acoplador 3 dB e é

alimentado por dois acopladores WDM que inserem o sinal lógico. A luz interfere num único guia de onda durante a propagação e é dividida ao final da propagação quando analisa-se o sinal de saída. Para o dispositivo proposto, implementaram-se as portas lógicas XOR e XNOR.

Parâmetros da fibra óptica também podem ser medidos através de dispositivos ópticos. Kharraz *et al.* (2016) propõe um dispositivo capaz de medir o coeficiente de não linearidade da fibra utilizando o efeito de mistura de quatro ondas. São utilizados um amplificador a fibra dopada com érbio (EDFA) e grades de Bragg que atuam como filtros ópticos. A medição da não linearidade do meio se baseia no espectro da mistura de quatro ondas quando refletida na grade que caracterizam o filtro. O sensoriamento utilizando dispositivos a fibra óptica é de interesse devido as dimensões compactas que os sensores tomam quando comparados a sensores eletrônicos e a alta sensibilidade que a fibra óptica apresenta. Wu *et al.* (2017) desenvolve um sensor de torção baseado em um interferômetro de Sagnac feito com fibra de cristal fotônico. A medição é feita baseada no efeito fotoelástico quando a torção varia o índice de refração da fibra. O sensor apresenta alta sensibilidade mostrando-se efetivo em suas medições. Hou *et al.* (2017) apresenta um dispositivo interferométrico para varredura de frequência. O dispositivo proposto atua como sistema de medição da diferença de caminho óptico do sinal propagado. O objetivo do estudo é reduzir os erros que afetam as medições do dispositivo. Os resultados mostram um aumento da sensibilidade e por consequência uma redução de erros do dispositivo quando comparado a outros estudos, também atribui-se a possibilidade de aplicações do dispositivo juntamente com o interferômetro de Mach-zehnder ou o interferômetro de Michelson.

Efeitos em fibra são de interesse devido ao que eles podem causar nos pulsos ópticos durante a propagação. Eles podem afetar o sinal de forma que a informação contida no pulso seja perdida, devido a isso se torna importante saber manipular e compensar os efeitos que ocorrem durante a propagação. Correia *et al.* (2015) estuda numericamente a influência do efeitos não lineares: modulação de fase cruzada - XPM e espalhamento Raman inapulso - IRS durante a propagação de pulsos ultra curtos em um acoplador direcional de núcleo duplo. A propagação se baseia na equação não linear de Schrodinger. Foram feitos testes em que se propagavam pulsos do tipo: secante hiperbólica, gaussiano e super gaussiano no acoplador, para cada pulso óptico propagado variaram-se o parâmetro de XPM que define qual tipo de polarização está submetida o pulso, $\frac{1}{3}$ para polarização linear, $\frac{2}{3}$ para polarização elíptica e 2 para polarização circular. Variou-se também os valores do efeito Ramam. Avaliou-se o impacto da mudança desses efeitos na potência crítica do dispositivo. Embora os três pulsos possuíssem a mesma largura temporal, a transmissão de cada um deles se dá de forma distinta no que se refere a potência crítica. O efeito de XPM reduz o valor de potência crítica para os três pulsos, tendo o pulso super gaussiano o menor valor dentre os pulsos estudados. O espalhamento Raman

intrapulso contribui para o aumento da potencia crítica de cada pulso, o estudo mostra de forma geral que o efeito de XPM tem um impacto maior que o espalhamento Raman intrapulso na propagação dos pulsos estudados.

3.2 Interferômetro de Mach-zehnder

No estudo da aplicabilidade de dispositivos para comutação e para implementação de portas lógicas, encontram-se diversos trabalhos que abordam:

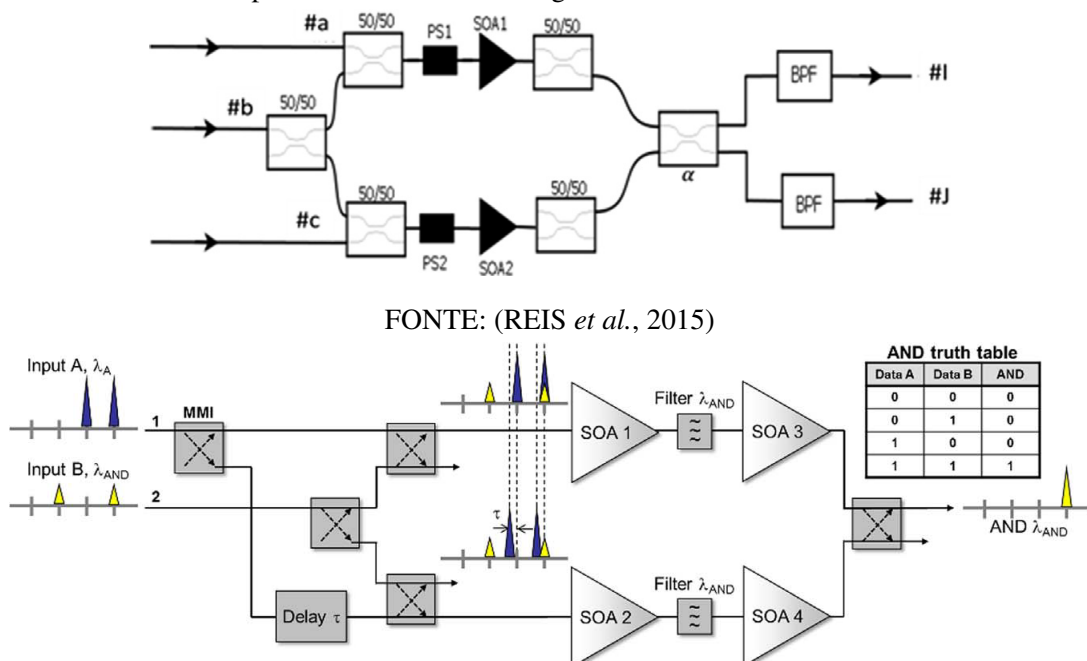
- Utilização de diferentes pulsos ópticos - sóliton, gaussiano e super gaussiano;
- Cascadeamento e combinação de dispositivos ópticos - interferômetros, acopladores e amplificadores;
- Arquiteturas de dispositivos ópticos -fibras, acopladores ou interferômetros com três entradas e três saídas, ou com diferentes modulações.

Sales *et al.* (2017) mostra através de um estudo numérico a possibilidade de se obter a porta lógica OR e a porta lógica XOR totalmente ópticas em um interferômetro de Mach-zehnder em fibra de cristal fotônico com um de seus braços sujeito a dopagem causando a variação de fase característica desse interferômetro. Foi utilizado um pulso do tipo sóliton com largura temporal de $100fs$, esse pulso foi modulado em OOK. As portas lógicas foram obtidas com o interferômetro sujeito a propagação não linear regida pela equação não linear generalizada de Schrodinger - consideraram-se os efeitos de GVD, dispersão de terceira ordem (TOD), efeitos não lineares de SPM, XPM, espalhamento Raman e *self-steepening*.

Em estudos relacionados a implementação de portas lógicas, diferenças mínimas entre dispositivos são suficientes para modificar a porta lógica implementada, em Araújo *et al.* (2015), foi estudado um MZI em fibra de cristal fotônico operando em regime não linear regido pela equação não linear generalizada de Schrodinger, o pulso óptico considerado, bem como sua largura temporal e os efeitos dispersivos e não lineares são os mesmos estudados em Sales *et al.* (2017), contudo a modulação utilizada não é a OOK mas a modulação por amplitude de pulso (PAM - do inglês *pulse amplitude modulation*). A modulação impacta diretamente no resultado final do estudo e amplia as possibilidades de implementação de portas lógicas em dispositivos ópticos especialmente o MZI. Foram implementadas nesse estudo as portas AND e OR totalmente ópticas.

O MZI é caracterizado por uma diferença de fase em um de seus braços, essa diferença de fase pode ser obtida diferenciando os comprimentos dos braços do interferômetro, dopando-se ou modificando as dimensões do núcleo da fibra de um braço em relação ao outro, incluindo um segundo dispositivo em um dos braços e em simulações numéricas, pode-se causar uma diferença de fase genérica em um braço. Aplicações do MZI composto por um amplificador óptico semiconductor (SOA - *semiconductor optical amplifier*) têm ganhado atenção entre estudiosos. Reis *et al.* (2015) e Rendón-Salgado & Gutierrez-Castrejón (2017) utilizam um SOA causando não linearidades em um dos braços do interferômetro. Ambos os estudos apresentam MZI's integrados em sistemas de comutação formado por outros dispositivos como acopladores, esses sistemas tem por função implementar uma porta específica e utilizam pulsos ópticos gaussianos durante a propagação. Reis *et al.* (2015) implementa funções lógicas genéricas, enquanto que o sistema de MZI apresentado por Rendón-Salgado & Gutierrez-Castrejón (2017) apresenta um estudo que tem por resultado uma porta AND. Kotb & Zoiros (2017) também se utilizam de um SOA em seus estudos, é propagado um pulso gaussiano em um sistema composto por um MZI integrado com um SOA, esse sistema implementa especificamente uma porta XOR. A grande diferença entre os estudos feitos com um MZI integrado com um SOA, está no designer do sistema implementado, tem-se sistemas com três entradas ou duas entradas, sistemas que utilizam dois SOAs ou sistemas com um SOA, a Figura 7 apresenta exemplos de sistemas implementados de MZI com SOA.

Figura 7 – Exemplos de configuração de sistemas que integram um MZI e um SOA. Eles apresentam diferentes componentes e diferentes designs

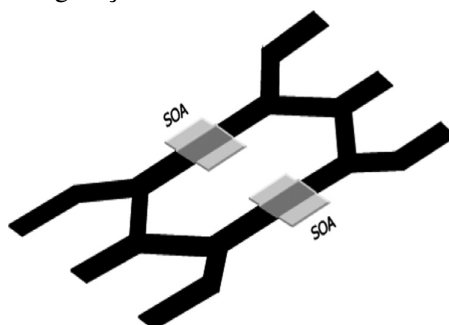


FONTE: (REIS *et al.*, 2015)

FONTE: (RENDÓN-SALGADO; GUTIERREZ-CASTREJÓN, 2017).

O interferômetro de Mach-zehnder também pode ser avaliado quanto a suas entradas, MZI's de três entradas se tornam de interesse devido sua aplicabilidade em implementação de portas lógicas reversíveis, em que é possível se obter na saída do dispositivo os mesmos dados de entrada. Essas portas possuem importância no cascadeamento de dispositivos em sistemas de telecomunicação mais elaborados. Katti & Prince (2016) apresentam um estudo de um sistema que tem como principal componente um MZI 3×3 , ou seja, um MZI com três entradas e três saídas. O dispositivo opera em regime linear sujeito a efeitos dispersivos e propaga um pulso do tipo gaussiano. As portas implementadas na configuração apresentada foram a porta NOT, porta AND, porta XOR e porta XNOR. Assim como nos dispositivos de duas entradas e duas saídas, El-Saeed *et al.* (2016) apresenta um MZI 3×3 implementados com SOA em sua configuração a Figura 8 mostra uma configuração genérica ao MZI proposto. As portas implementadas foram porta OR, XOR, NOR e XNOR. Foram utilizados quatro designers distintos, todos sujeito a não linearidades devido a utilização do SOA e todas as portas são implementadas para pulsos gaussianos. Mandal, Mandal & Garai (2015) estuda uma configuração específica de MZI de três entradas para implementação de portas lógicas reversíveis clássicas como porta de Toffoli e a porta de Fredkin. Para portas mais elaboradas foi necessário que Mandal, Mandal & Garai (2015) utilizasse multiplexadores dentro do sistema que continha o MZI.

Figura 8 – Configuração de MZI com tres entradas e dois SOA's



FONTE: (EL-SAEED *et al.*, 2016).

A maioria dos estudos que envolve aplicações de MZI's em sistemas de telecomunicações utilizam o pulso gaussiano na propagação, entretanto, Kotb (2017) utiliza um sistema com MZI formado por dois SOA's para propagar um pulso do tipo secante hiperbólica em regime não linear e verificar a implementação de portas lógicas. Em seu estudo, Kotb (2017) implementa a porta NOR.

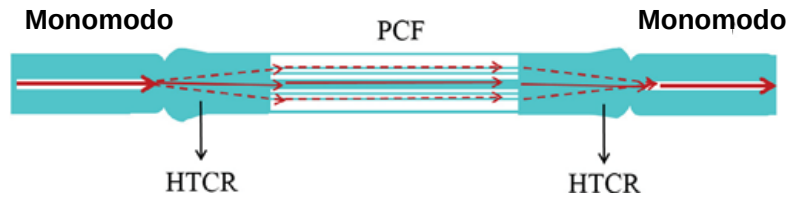
O MZI também pode ser avaliado em regime eletro-óptico quando o dispositivo pode ter uma alimentação óptica ou elétrica e no decorrer da propagação sofrer influência elétrica ou óptica. No trabalho de Ding *et al.* (2017) é apresentado um MZI com alimentação óptica (laser) e nos braços do interferômetro é aplicado um trem de pulsos elétricos que vão definir se os bits serão zero ou um. Em um dos braços do MZI é inserido uma porta de controle que gera os

bits que causarão diferença de fase no interferômetro. O estudo proposto por Ding *et al.* (2017) tem por objetivo implementar portas lógicas usando uma alimentação óptica para o dispositivo e entradas elétricas para a obtenção das portas. Foram obtidas as portas XOR e XNOR.

O trabalho de Kumar *et al.* (2015) também utiliza o regime eletro-óptico para implementar portas lógicas universais (NOR e NAND), o dispositivo proposto são MZI's cascadeados. Um sinal óptico é inserido na entrada do interferômetro e eletrodos são posicionados nos braços do dispositivo, esses eletrodos vão definir as entradas "0" ou "1" através da aplicação de uma tensão aos braços do MZI. Kumar, Chanderkanta & Raghuwanshi (2016) propõe um modelo de dispositivo similar a Kumar *et al.* (2015): um cascadeamento de interferômetros de Mach-zehnder utilizando um regime eletro-óptico, com entrada óptica e os bits sendo definidos por tensões aplicada por eletrodos aos braços do dispositivo. A diferença está nas portas lógicas implementadas, porta Fredkin e porta Feynman, que são portas lógicas reversíveis implantadas costumeiramente em dispositivos de três entradas, no trabalho, Kumar, Chanderkanta & Raghuwanshi (2016) implementa a porta Feynman em um MZI com duas entradas e a porta Fredkin num MZI de três entradas.

Além de aplicações para comutação de sinal e implementação de portas lógicas, o MZI pode ser utilizado para outros fins como apresentado por Zhao *et al.* (2017), em que o MZI é usado para sensoriamento de índice de refração. Um MZI é caracterizado por etapas como: interferência do sinal luminoso em um acoplador, depois dividir esse sinal propagando-o por braços com uma diferença de fase e causar interferência novamente em um segundo acoplador. Nesse estudo, as etapas são alcançadas de forma *in line*, ou seja, os efeitos do MZI são causados em uma única fibra. Zhao *et al.* (2017) nos apresenta um dispositivo formado por uma fibra monomodo seguida de uma PCF e depois, uma fibra monomodo novamente, a Figura 9 mostra o dispositivo proposto. Nas junções de fusão entre as fibras há HTCRs - *half-taper collapse regions*, regiões de deformidade causadas no intuito de dividir o sinal que chega da fibra monomodo (no caso da primeira HTCR) e unir o sinal novamente (segunda HTCR). Essas regiões de colapso causam mudanças no campo evanescente fazendo-os interferir ao longo da PCF. O estudo demonstra um aumento da sensibilidade do sensor quando comparado estudos não utilizam regiões de colapso.

Outra pesquisa, também em sensoriamento, apresenta um estudo teórico onde um MZI é aplicado como sensor de vibração, o MZI apresentado por Jiang *et al.* (2017) não é *in line* como o de Zhao *et al.* (2017), ele é formado por componentes extras como circuladores e fotodetectores. O sensor proposto por Jiang *et al.* (2017) funciona da seguinte forma: duas ondas contínuas são inseridas em circuladores conectados entre si e aos acopladores que

Figura 9 – Configuração de MZI *in line* para sensoriamento.

FONTE: (ZHAO *et al.*, 2017) - modificado.

compõem o interferômetro, é causada uma vibração no braço do interferômetro e essa vibração modula o sinal propagante. A medição é baseada na diferença de fase que o sinal terá ao final da propagação e é medida num fotodetector. O sensor mostrou-se capaz de detectar vibrações em um espaço curto de tempo que foi considerado pelos autores como satisfatório.

O MZI também pode ser aplicado como filtro óptico para selecionar determinadas faixas de frequência em um sistema de telecomunicação. Wu *et al.* (2017) demonstraram um filtro óptico de bandas passantes ajustáveis com dois interferômetro de Mach-zehnder cascadeados. O dispositivo opera em regime dispersivo e apresenta boa capacidade, flexibilidade, facilidade de implementação e bom custo benefício quando comparado a outros filtros. Norgia, Melchione & Donati (2017) também utiliza um interferômetro de Mach-zehnder como filtro óptico para detecção de modulação em frequência (FM). Um sinal AM é convertido em sinal FM e o MZI detecta essa conversão e eleva o desempenho do dispositivo quando comparados a outros dispositivos. Também é feita uma comparação entre a relação sinal ruído (SNR) para as modulações FM e AM, sendo a SNR do sinal FM superior a do sinal AM.

Estudos de efeitos não lineares também são recorrentes no interferômetro de Mach-zehnder, Sales *et al.* (2015) realizou estudo numérico da transmissão, razão de extinção, *crosstalk* e fator de compressão variando-se o parâmetro de não linearidade para três perfis de propagação distintos aplicados ao parâmetro de não linearidade: perfil linear constante, linear crescente e linear decrescente, esses perfis são mostrados nas equações (3.1), (3.2) e (3.3):

$$Q(z) = \beta \quad \text{Perfil linear constante} \quad (3.1)$$

$$Q(z) = \left[\frac{(\beta - 1)z}{L} + 1 \right] \quad \text{Perfil linear crescente} \quad (3.2)$$

$$Q(z) = \left[\frac{(1 - \beta)z}{L} + \beta \right] \quad \text{Perfil linear decrescente} \quad (3.3)$$

onde β para esse caso assume o valor de não linearidade. A propagação é regida pela equação não linear generalizada de Schrodinger para um pulso de $100fs$ definido por uma secante hiperbólica.

Os sistemas de telecomunicações necessitam transmitir altas taxas de informação em um curto período de tempo. Para alcançar esse objetivo, são utilizadas técnicas de multiplexação de sinais como a multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM - *Wavelength-division Multiplex*). O trabalho de Chicharro *et al.* (2017) apresenta a implementação da técnica de multiplexação por divisão de frequência ortogonal multibanda (MB-OFDM). Essa técnica se baseia na transmissão de um sinal OFDM - com a possibilidade de seleção dinâmica da banda de transmissão através do MZI. O estudo ainda consegue reduzir os efeitos dispersivos através da multiplexação.

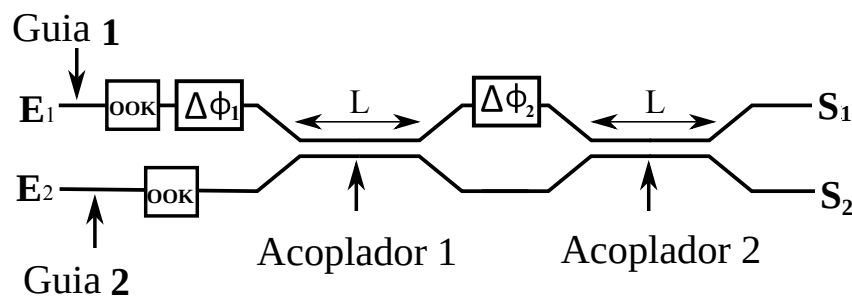
METODOLOGIA

Neste capítulo é exemplificado a forma de análise e a metodologia aplicada ao dispositivo proposto. É apresentada a metodologia de análise dos resultados, o método numérico utilizado e a transmissão de energia do interferômetro de Mach-Zehnder.

4.1 Dispositivo e análise

O interferômetro de Mach-zehnder implementado neste trabalho é descrito na Figura 10 e possui funcionamento similar ao apresentado no capítulo 2. Ele é constituído por dois acopladores direcionais não lineares em fibra de cristal fotônico com comprimento L , sendo que um dos acopladores apresenta assimetria quanto ao parâmetro de não linearidade γ em um dos núcleos. O MZI possui uma diferença de fase extra na entrada do dispositivo que causa uma defasagem no pulso antes da entrada do primeiro acoplador.

Figura 10 – Configuração do MZI estudado no presente trabalho.



FONTE: Autor

Os pulsos ópticos são inseridos na entrada E_1 do guia 1 e E_2 do guia 2 no interferômetro, onde são modulados inicialmente em OOK e sofrem uma primeira diferença de fase genérica. Os pulsos interagem no primeiro acoplador. Ao sair do primeiro acoplador, um dos pulsos sofrerá uma segunda diferença de fase em um dos braços do MZI, para então interferir no segundo acoplador. Nas saídas do segundo acoplador, é feita a análise da energia e das portas lógicas implementadas.

Durante a propagação no dispositivo, os pulsos são regidos pela equação não linear generalizada de Schrodinger para o modo acoplado, que descreve a interação dos pulsos entre dois guias, sendo formada pelo par de equações:

$$i\frac{\partial \mathbf{A}_1}{\partial z} + \frac{i}{v_g} \frac{\partial \mathbf{A}_1}{\partial t} - \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 \mathbf{A}_1}{\partial t^2} - i\frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 \mathbf{A}_1}{\partial t^3} + \frac{\beta_4}{24} \frac{\partial^4 \mathbf{A}_1}{\partial t^4} + \frac{\alpha}{2} \mathbf{A}_1 + \gamma_1 (|\mathbf{A}_1|^2 + \eta |\mathbf{A}_2|^2) \mathbf{A}_1 + i\frac{\gamma_1}{\omega} \frac{\partial (|\mathbf{A}_1|^2 \mathbf{A}_1)}{\partial t} - \gamma_1 \mathbf{A}_1 T_R \frac{\partial |\mathbf{A}_1|^2}{\partial t} + \kappa_0 \mathbf{A}_2 + i\kappa_1 \frac{\partial \mathbf{A}_2}{\partial t} = 0, \quad (4.1)$$

$$i\frac{\partial \mathbf{A}_2}{\partial z} + \frac{i}{v_g} \frac{\partial \mathbf{A}_2}{\partial t} - \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 \mathbf{A}_2}{\partial t^2} - i\frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 \mathbf{A}_2}{\partial t^3} + \frac{\beta_4}{24} \frac{\partial^4 \mathbf{A}_2}{\partial t^4} + \frac{\alpha}{2} \mathbf{A}_2 + \gamma_j (|\mathbf{A}_2|^2 + \eta |\mathbf{A}_1|^2) \mathbf{A}_2 + i\frac{\gamma_j}{\omega} \frac{\partial (|\mathbf{A}_2|^2 \mathbf{A}_2)}{\partial t} - \gamma_j \mathbf{A}_2 T_R \frac{\partial |\mathbf{A}_2|^2}{\partial t} + \kappa_0 \mathbf{A}_1 + i\kappa_1 \frac{\partial \mathbf{A}_1}{\partial t} = 0, \quad (4.2)$$

onde $j = (1,2)$ refere-se ao parâmetro não linear γ_1 e γ_2 respectivamente.

Nas equações (4.1) e (4.2), z é a distância de propagação ao longo da fibra, t é o tempo de propagação, A_1 e A_2 são as amplitudes dos pulsos propagados em cada guia. O termo dependente de β_2 : $\frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2}$ é responsável pela dispersão de velocidade de grupo (GVD), o termo inerente a β_3 : $\frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial t^3}$ é associado a dispersão de terceira ordem (TOD), o termo β_4 é associado a dispersão de quarta ordem, tanto a dispersão de terceira ordem quanto a de quarta ordem podem ser incluídas na dispersão de alta ordem. Os termos κ_0 é coeficiente de acoplamento entre os núcleos dos acopladores e κ_1 é o coeficiente de acoplamento dispersivo definido como $\frac{\partial \kappa_0}{\partial \omega}$.

Os termos associados ao parâmetro de não linearidade γ são os efeitos de automodulação de fase definido por $\gamma(|A_1|^2 + \eta |A_2|^2)A_1$ em que o termo η representa a influência do efeito de modulação de fase cruzada (XPM) em relação a automodulação de fase. O termo $i\frac{\gamma}{\omega} \frac{\partial (|A_1|^2 A_1)}{\partial t}$ define o efeito de self-steepening (SS) em que ω é a frequência angular óptica. O termo $\gamma A_2 T_R \frac{\partial^2 |A_2|^2}{\partial t^2}$ representa o efeito Raman intrapulso (IRS) onde T_R é o coeficiente de espalhamento Raman;

Para resolver o par de equações do modo acoplado, utilizou-se o método de Runge-Kutta de quarta ordem. Ele é usado para resolver equações diferenciais ordinárias dados os valores iniciais da equação. O método foi simulado no *software* MATLAB R2014a (licença: 898894) As variáveis consideradas para a simulação do interferômetro foram:

- Parâmetro de atenuação: $\alpha = 0$;
- Largura temporal do pulso a meia altura: $T_{FWHM} = 100$ fs;
- Distância entre os núcleos da fibra: $C = 2\Lambda$;
- Diâmetro dos furos de ar dos núcleos da fibra e do acoplador PCF: $d = 2 \mu m$;
- Distância entre os furos de ar: $\Lambda = \frac{d}{0,9}$;
- Comprimento do acoplador: $L = 1,8$ cm;
- Comprimento de onda da luz: $1,55 \mu m$;
- Parâmetro de dispersão de velocidade de grupo - GVD: $\beta_2 = -47 \times 10^{-27} s^2/m$;
- Parâmetro de dispersão de terceira ordem - TOD: $\beta_3 = 0,1 \times 10^{-39} s^3/m$;
- Parâmetro de dispersão de quarta ordem: $\beta_4 = 0$;
- Coeficiente de acoplamento: $\kappa_0 = 43,663 m^{-1}$;
- Coeficiente de acoplamento dispersivo: $\kappa_1 = 4,1 \times 10^{-13} m^{-1}$;
- Parâmetro de não linearidade para o caso simétrico: $\gamma_1 = 3,2 \times 10^{-3} Wm^{-1}$;
- Parâmetro de não linearidade para o caso assimétrico: $\gamma_2 = 10 \times 10^{-3} Wm^{-1}$;
- Potência de entrada: $P_0 = 4,56$ kW.

Considerando os pulsos modulados inicialmente da forma:

$$A_1(z,t) = A_0 \text{sech}(\tau), \quad (4.3)$$

$$A_2(z,t) = 0, \quad (4.4)$$

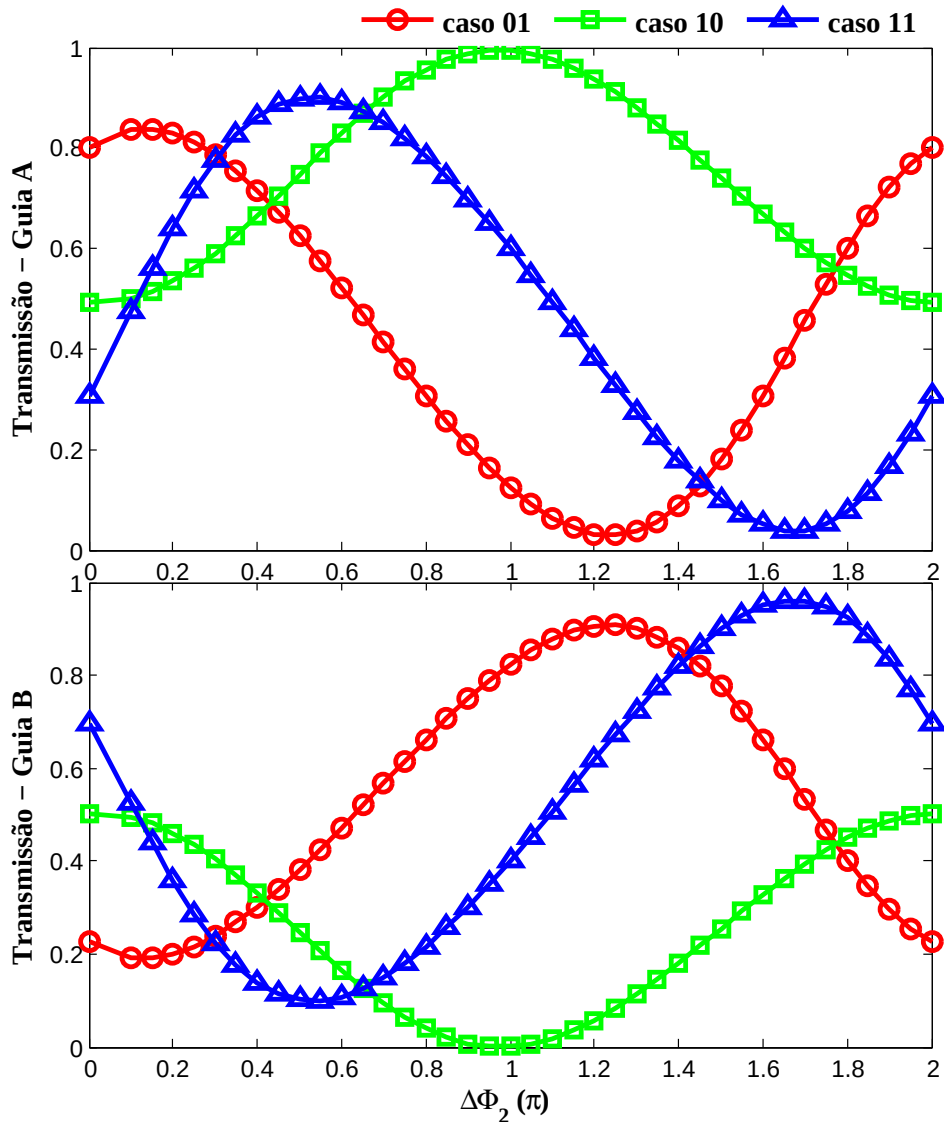
onde $A_0 = \sqrt{P_0}$, pode-se analisar a transmissão de energia onde o pulso $A_1(0,t)$ assumirá os valores lógicos "1" ou "0" dependendo do seu nível de energia. Numericamente a transmissão é definida como a razão entre a energia do pulso de saída pela energia do pulso de entrada, assim tem-se:

$$T_i = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |A_i(z,t)|^2 dt}{\int_{-\infty}^{\infty} |A_1(0,t)|^2 dt}, \quad (4.5)$$

onde i pode assumir os valores da saída: $i = (1,2)$.

Analisou-se o comportamento da transmissão em função da diferença de fase nas saídas do interferômetro. A Figura 11 mostra as saídas S_1 e S_2 para os três casos inseridos nas entradas do MZI.

Figura 11 – transmissão em função da diferença de fase mostrando a conservação da energia do MZI.



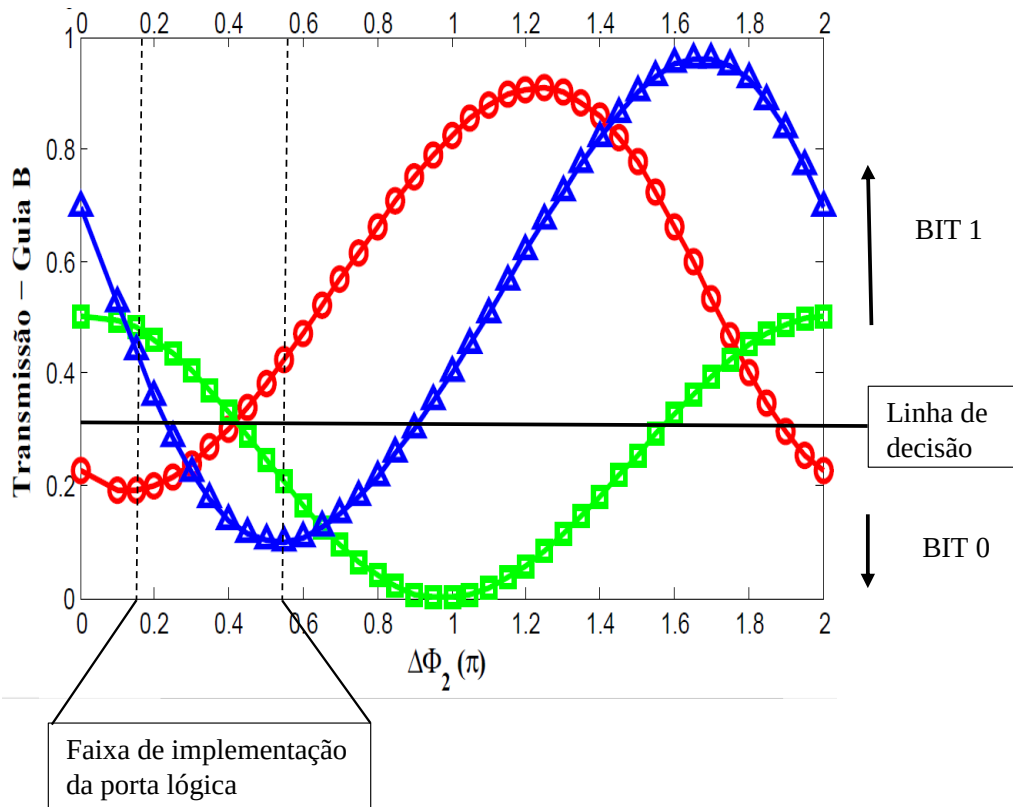
FONTE: Autor

Na Figura 11 percebe-se a complementaridade na transmissão de energia referente a cada caso inserido na entrada do MZI. Essa complementaridade atesta a conservação de energia durante a propagação no dispositivo.

As portas lógicas foram investigadas através dos sinais da saída do interferômetro. Defini-se um limiar de decisão baseado na energia normalizada no valor de 0,3, ou seja, 30% da energia do pulso de entrada. Para valores superiores a 0,3 tem-se bit "1" e valores abaixo, caracterizam bit "0". A linha de decisão auxilia na distinção entre bit 0 e bit 1. Portanto, conforme aplica-se os bits nas portas de entrada do primeiro acoplador, obtêm-se os bits nas portas de saída do segundo acoplador e então se estabelece uma tabela verdade para identificar a porta lógica implementada.

A análise das portas e operações lógicas obtidas se baseia nas variações de fase impostas no dispositivo. O pulso sofre uma variação de fase $\Delta\Phi_1$ (variando de 0 a 2π) na entrada do interferômetro, depois sofre uma segunda variação de fase $\Delta\Phi_2$ (variando de 0 a 2π) no braço do MZI após sair do primeiro acoplador.

Fixa-se $\Delta\Phi_1$ e analisa-se uma variação em $\Delta\Phi_2$, onde escolhe-se uma faixa de fase para análise. As portas foram analisadas para as combinações da entrada 1 (E_1) e entrada 2 (E_2) quando: $(E_1 \ E_2) = (0 \ 1)$, $(E_1 \ E_2) = (1 \ 0)$ e $(E_1 \ E_2) = (1 \ 1)$. Na modulação OOK, o caso de entrada $(E_1 \ E_2) = (0 \ 0)$ sempre resultará num bit 0 na saída do interferômetro. Os critérios definidos para classificar as melhores portas e operações lógicas foram: a faixa de implementação, porcentagem de energia e limiar de decisão de bit. Na Figura 12 são apresentados os principais elementos para análise gráfica das portas.

Figura 12 – transmissão em função da diferença de fase mostrando a conservação da energia do MZI.

FONTE: Autor

A análise da faixa de implementação auxilia na redução de erros quanto aos limites da porta lógica, portas com faixas largas, apresentam maior probabilidade de escolha de uma fase específica onde os bits podem estar bem definidos em relação a linha de decisão. A porcentagem de energia dos pulsos ($E\%$) em relação ao seu valor máximo na fase onde as portas são implementadas informa a quantidade de energia que pode ser aproveitada para transmissão.

O dispositivo proposto apresenta diferenças em relação a outros trabalhos quanto ao tipo de fibra utilizada, modulação e aos efeitos utilizados. Alguns trabalhos utilizam efeito eletro óptico, outros utilizam efeitos de ganho não lineares através de amplificadores ópticos semicondutores ou ainda transmissão em regime de baixa potência, o presente trabalho apresenta um dispositivo totalmente em fibra com regime de alta potência, a arquitetura proposta dispensa dispositivos eletrônicos extras, aumentando a eficiência e vida útil do dispositivo.

RESULTADOS

Foram investigadas portas lógicas para três configurações distintas de interferômetro de Mach-zehnder (ver Figura 10):

- Configuração 1: MZI com acoplador simétrico seguido de acoplador assimétrico;
- Configuração 2: MZI com acoplador assimétrico seguido de acoplador simétrico;
- Configuração 3: MZI com ambos acopladores assimétricos.

Na primeira configuração implementou-se as portas lógicas: AND, operação 0 e operação $A' \cdot B$.

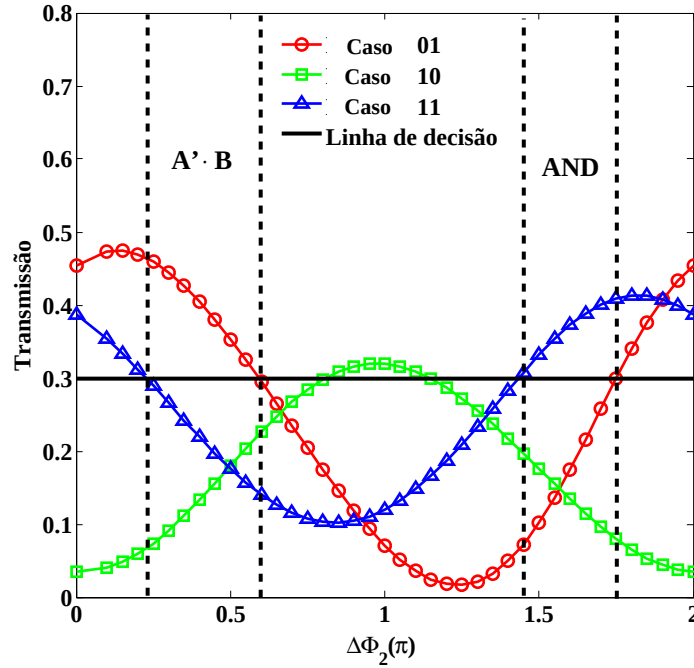
Na segunda configuração tem-se as portas lógicas OR, AND, operação 0 e operação $A' \cdot B$.

Na terceira configuração, as portas lógicas implementadas foram: OR, AND, operação $A' \cdot B$, operação $A \cdot B'$ e operação 0.

5.1 Configuração 1 - MZI com acoplador simétrico seguido de acoplador assimétrico

Na configuração 1, foram implementadas portas lógicas para $\Delta\Phi_1 = 1,4\pi, 0,95\pi$ e $1,95\pi$. Os gráficos das portas lógicas implementadas são apresentados a seguir juntamente com a discussão dos dados obtidos.

Na Figura 13 são apresentadas a porta lógica AND e a operação $A' \cdot B$ na saída S_1 do guia 1 quando $\Delta\Phi_1$ é fixado em $1,4\pi$. A operação $A' \cdot B$ varia de $0,2268\pi$ a $0,5923\pi$ em $\Delta\Phi_2$ e analisou-se a porta para $\Delta\Phi_2 = 0,4963\pi$. A porta AND possui variação de fase $\Delta\Phi_2$ de $1,4337\pi$ até $1,7501\pi$. Os valores de referência máximos de transmissão normalizada para cada caso é: 0,4744 para o caso 01, 0,3194 para o caso 10 e 0,4132 para o caso 11.

Figura 13 – Gráfico referente a operação lógica $A' \cdot B$ e a porta AND

Fonte: autor

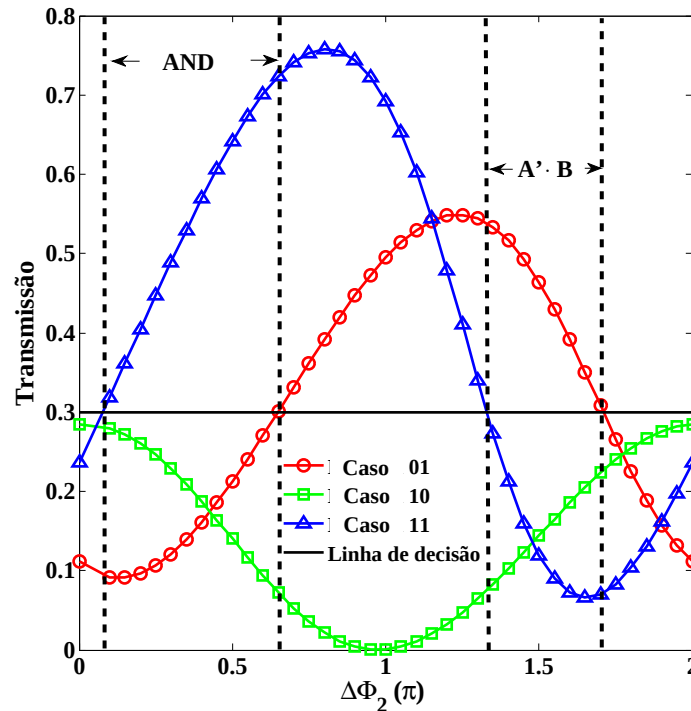
Na Figura 13 destaca-se a operação $A' \cdot B$ por possuir nos casos 01 e 10 maior nível de energia quando comparadas a transmissão da porta AND. Entretanto, o caso 11 da porta AND, apresenta um aproveitamento de 87,07% de energia na transmissão. O caso com menor aproveitamento de energia é o 01 também da porta AND, que possui apenas 31,04% de energia da transmissão. Os demais valores analisados para transmissão e porcentagem da porta AND e da operação $A' \cdot B$ são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1: Tabela verdade referente a operação lógica $A' \cdot B$ e a porta AND

E_1	E_2	S_1	T	$E\%$	S_1	T	$E\%$
0	0	0	-	-	0	-	-
0	1	1	0,3553	74,89	0	0,1482	31,24
1	0	0	0,1780	55,73	0	0,1482	46,40
1	1	0	0,1780	43,08	1	0,3598	87,07
$A' \cdot B$				AND			
$\Phi_1 = 1,4\pi$				$\Phi_1 = 1,4\pi$			
$\Phi_2 = 0,4963\pi$				$\Phi_2 = 1,5662\pi$			

Na Figura 14, analisa-se a saída S_2 do guia de onda 2 quando $\Delta\Phi_1$ é fixado em $0,95\pi$ obtendo-se uma porta AND e a operação lógica $A' \cdot B$. A porta AND pe implementada quando $\Delta\Phi_2$ varia entre $0,0774\pi$ e $0,6492\pi$. A operação $A' \cdot B$ têm faixa de implementação quando a variação de fase $\Delta\Phi_2$ for de $1,3299$ a $1,7094$.

Os níveis de transmissão normalizada máximos dos pulsos referentes a Figura 14 são:

Figura 14 – Gráfico para a porta AND e operação lógica $A' \cdot B$ 

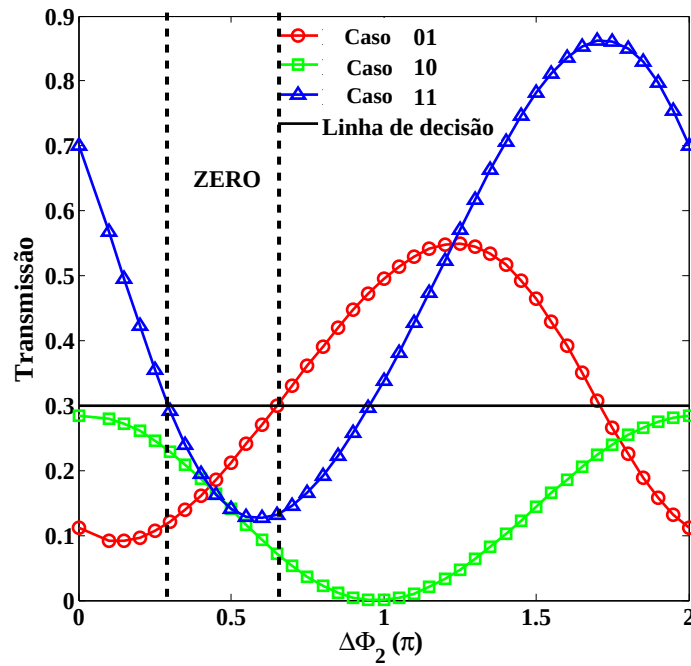
Fonte: autor

0,5488 para o caso 01, 0,2848 para o caso 10 e 0,7578 para o caso 11. A porta AND apresenta para o caso 01, 31,8% de sua energia máxima, o caso 10 apresenta 61,27% e o caso 11 possui 77,8% da energia máxima. Os valores de transmissão da porta lógica AND são verificados quando $\Delta\Phi_2$ é fixada em $0,4272\pi$, nessa fase, as saídas para os casos de entrada apresentam maior variação em sua transmissão. A Análise da operação lógica $A' \cdot B$ é similar a da porta AND e possui seus valores apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Tabela verdade para a porta AND e operação lógica $A' \cdot B$

E_1	E_2	S_2	T	$E\%$	S_2	T	$E\%$
0	0	0	-	-	0	-	-
0	1	0	0,1745	31,8	1	0,4759	86,71
1	0	0	0,1745	61,27	0	0,1357	47,65
1	1	1	0,5895	77,8	0	0,1357	17,91
<i>AND</i>				<i>$A' \cdot B$</i>			
$\Phi_1 = 0,95\pi$				$\Phi_1 = 0,95\pi$			
$\Phi_2 = 0,4272\pi$				$\Phi_2 = 1,4797\pi$			

Na Figura 15 é apresentada a implementação da operação lógica ZERO, em que, para qual quer sinal de entrada com nível alto (bit 1) ou baixo (bit 0) sempre se terá uma saída de nível baixo. A operação é fixada em $\Delta\Phi_1 = 1,95\pi$ e possui intervalo de variação de fase $\Delta\Phi_2$ entre 0,2940 e 0,6492 na saída S_2 do guia de onda 2.

Figura 15 – Gráfico para a operação lógica ZERO

A operação ZERO descrita na Figura 15 apresenta os seguintes valores de transmissão normalizada para a variação de fase $\Delta\Phi_1$ fixa em $1,95\pi$: 0,1759 para o caso 01 quando a energia máxima desse caso vale 0,5488, o caso 10 possui 0,1732 enquanto a transmissão máxima desse caso vale 0,2848 e o caso 11 apresenta 0,1759 para um valor máximo de 0,8615. Os valores que complementam o estudo da operação lógica ZERO são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Tabela verdade para a função lógica ZERO

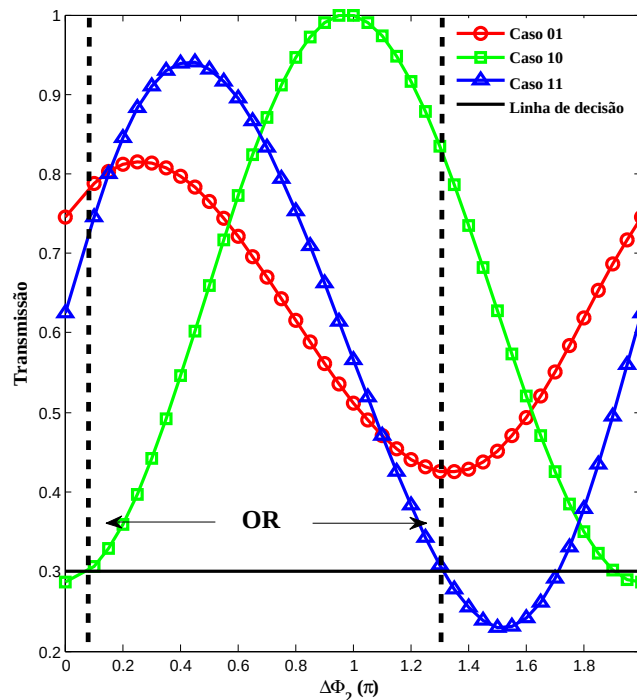
E_1	E_2	S_2	T	$E\%$
0	0	0	-	-
0	1	0	0,1759	32,05
1	0	0	0,1732	60,81
1	1	0	0,1759	20,42
<i>ZERO</i>				
$\Phi_1 = 1,95\pi$				
$\Phi_2 = 0,4272\pi$				

5.2 Configuração 2 - MZI com acoplador assimétrico seguido de acoplador simétrico

Para a configuração 2, as fases referentes a $\Delta\Phi_1$ que apresentaram as melhores portas lógicas foram: $0,3\pi$, $0,95\pi$ e $1,95\pi$. A análise das portas e operação lógicas são descritas a seguir.

A Figura 16 apresenta a porta lógica OR na saída S_1 do MZI quando $\Delta\Phi_1$ é fixado em $0,3\pi$. A porta OR varia em um intervalo $\Delta\Phi_2$ de $0,0682\pi$ a $1,3137\pi$ e foi analisada fixando-se $\Delta\Phi_2$ em $0,676\pi$. Os valores de transmissão máximos para essa porta são: 0,8156 para o caso 01, 1 para o caso 10 e 0,9397 para o caso 11.

Figura 16 – Gráfico para a porta lógica OR



Fonte: autor

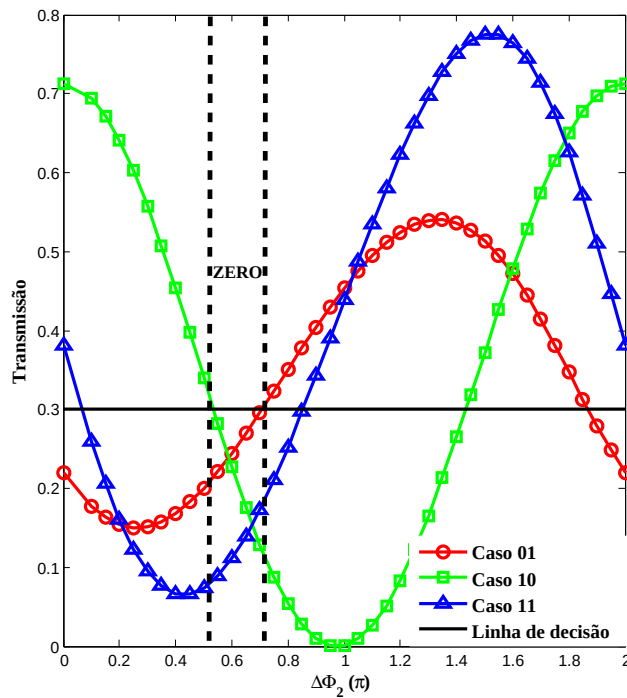
A análise da porta lógica OR apresentada na Figura 16 revela que a maior parte da energia transmitida é aproveitada durante a transmissão. O caso 01 que teve um valor de transmissão igual a 0,6825 obteve 83,68% de aproveitamento da transmissão, o caso 10 teve 0,8487 de transmissão e seu aproveitamento ficou em torno de 84,87%, o caso 11 foi o que apresentou a maior taxa de aproveitamento com 90,32% para seu valor de transmissão que foi de 0,8487. Os valores complementares ao estudo da porta lógica OR são apresentados na Tabela verdade 4.

Tabela 4: Tabela verdade para porta lógica OR

E_1	E_2	S_1	T	$E\%$
0	0	0	-	-
0	1	1	0,6825	83,68
1	0	1	0,8487	84,87
1	1	1	0,8487	90,32

OR
 $\Phi_1 = 0,3\pi$
 $\Phi_2 = 0,676\pi$

Na Figura 17 é apresentada a operação lógica ZERO quando $\Delta\Phi_1$ é fixado em $0,3\pi$ na saída S_2 do guia 2 do MZI. A operação lógica implementada varia de num intervalo de $0,5348\pi$ a $0,7078\pi$ para $\Delta\Phi_2$.

Figura 17 – Gráfico para a operação lógica ZERO

Fonte: autor

A transmissão máxima para cada caso inserido na entrada do MZI vale: 0,7755 para o caso 11, 0,5403 para o caso 01 e 0,714 para o caso 10. A operação ZERO apresenta o caso 11 como o mais bem definido quando comparado aos casos 01 e 10, pois apresenta transmissão muito inferior ao limiar de decisão de bit.

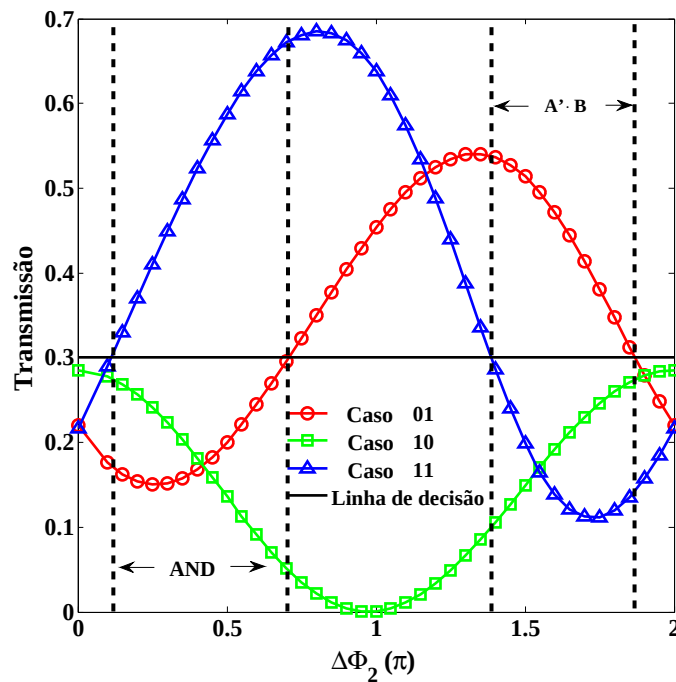
Os valores da transmissão de cada caso e a porcentagem da energia aproveitada pelo pulso de cada caso na operação ZERO são apresentados na Tabela verdade 5, quando $\Delta\Phi_2$ é fixado em $0,5891\pi$ - o ponto de melhor análise para a operação lógica.

Tabela 5: Tabela verdade para a função lógica ZERO

E_1	E_2	S_2	T	$E\%$
0	0	0	-	-
0	1	0	0,2395	44,33
1	0	0	0,2395	33,54
1	1	0	0,1065	13,75

ZERO
 $\Phi_1 = 0,3\pi$
 $\Phi_2 = 0,5891\pi$

Na Figura 18 analisou-se a saída S_2 do guia 2. Foram obtidas a porta AND e a operação lógica $A' \cdot B$ quando $\Delta\Phi_1 = 0,95\pi$. A porta AND varia no intervalo $\Delta\Phi_2$ entre $0,1126\pi$ e $0,7078\pi$, enquanto que para a operação $A' \cdot B$, $\Delta\Phi_2$ varia de $1,3863\pi$ a $1,8692\pi$. Os valores máximos de energia normalizada na transmissão para os casos inseridos na entrada do MZI para $\Delta\Phi_1$ analisada são: 0,6849 para o caso 11, 0,5403 para o caso 01 e 0,2853 para o caso 10.

Figura 18 – Gráfico para a porta lógica AND e operação lógica $A' \cdot B$ 

Fonte: autor

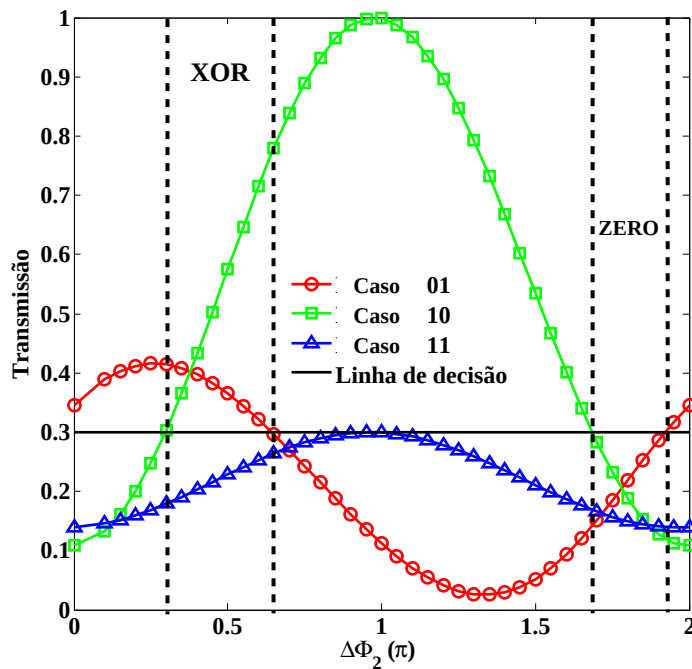
Na Figura 18, destaca-se a porta AND por possuir análise lógica conhecida e mais simples quando comparada com a operação $A' \cdot B$. A porta AND também possui um maior aproveitamento de energia do pulso. Os valores de transmissão da porta AND foram: 0,1734 para o caso 10, 0,1734 para o caso 01 e 0,5356 para o caso 11. Os valores complementares a análise da porta AND e da operação lógica $A \cdot B$ estão contidas na Tabela 6.

A Figura 19 apresenta configuração de saída da porta lógica XOR e operação lógica ZERO

Tabela 6: Tabela verdade para a porta lógica AND e operação lógica $A' \cdot B$

E_1	E_2	S_2	T	$E\%$	S_2	T	$E\%$
0	0	0	-	-	0	-	-
0	1	0	0,1734	32,09	1	0,4969	91,97
1	0	0	0,1734	60,78	0	0,1684	59,02
1	1	1	0,5356	78,20	0	0,1684	24,59
AND					$A' \cdot B$		
$\Phi_1 = 0,95\pi$					$\Phi_1 = 0,95\pi$		
$\Phi_2 = 0,4181\pi$					$\Phi_2 = 1,5449\pi$		

na saída S_1 do interferômetro quando $\Delta\Phi_1$ é fixada em $1,8\pi$. A porta XOR foi analisada quando $\Delta\Phi_2$ é fixada em $0,3775\pi$ dentro de um *range* que varia de $0,2975\pi$ até $0,6423\pi$. A operação ZERO foi implementada quando $\Delta\Phi_2$ varia no intervalo de $1,6846\pi$ a $1,9222\pi$ e sua análise é feita no melhor de fase: $\Delta\Phi_2 = 0,3775\pi$. Os valores normalizados referentes a transmissão máxima para as combinações de entrada são: 0,4156 para o caso 01, 1 para o caso 10 e 0,3001 para o caso 11.

Figura 19 – Gráfico para a porta lógica XOR e operação lógica ZERO

Fonte: autor

Na Figura 19 destaca-se a porta XOR devido ela ter um nível de aproveitamento de transmissão e consequentemente de energia superior ao da operação ZERO: O aproveitamento de energia do caso 01 para a porta XOR foi de 96,80%, quase toda energia é aproveitada na faixa analisada, o mesmo caso para a operação ZERO apresenta 49,37%. O caso 10 da porta XOR possui 40,23% de energia transmitida, enquanto que o mesmo caso para a operação ZERO apresenta 20,52%. Para o caso 11, a porta XOR possui 65,78% de energia transmitida e

operação ZERO têm 50,88%. Em todos os casos, a porta XOR apresentou níveis de transmissão superiores a operação ZERO. Os valores complementares a porta XOR e a operação ZERO são apresentadas na Tabela 7.

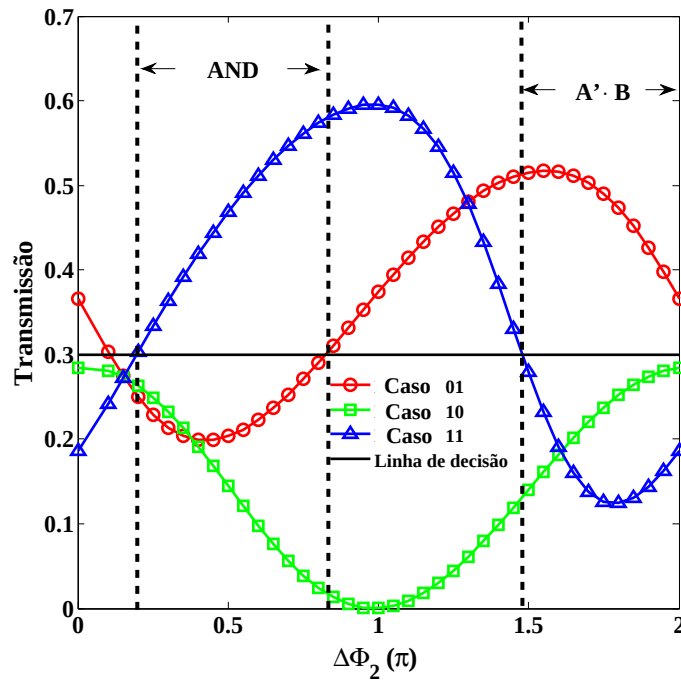
Tabela 7: Tabela verdade referente a porta XOR e operação lógica ZERO

E_1	E_2	S_1	T	$E\%$	S_1	T	$E\%$
0	0	0	-	-	0	-	-
0	1	1	0,4023	96,80	0	0,2052	49,37
1	0	1	0,4023	40,23	0	0,2052	20,52
1	1	0	0,1974	65,78	0	0,1527	50,88
<i>XOR</i>				<i>ZERO</i>			
$\Phi_1 = 1,8\pi$				$\Phi_1 = 1,8\pi$			
$\Phi_2 = 0,3775\pi$				$\Phi_2 = 1,7804\pi$			

5.3 Configuração 3 - MZI com acoplador assimétrico seguido de acoplador assimétrico

A análise das portas e operação lógicas implementadas na terceira configuração, é similar a das seções anteriores. As fases referentes a $\Delta\Phi_1$ que apresentaram as melhores portas foram: $0,35\pi$, $0,9\pi$, $0,55\pi$ e $1,6\pi$.

Na Figura 20, apresenta a implementação da porta AND e da operação lógica $A' \cdot B$ quando $\Delta\Phi_1 = 0,9\pi$, estas portas foram obtidas na saída S_2 do guia 2. A porta AND possui faixa de variação $\Delta\Phi_2$ entre $0,1949\pi$ e $0,8242\pi$. A operação lógica $A' \cdot B$ possui variação de $1,480\pi$ a 2π referentes a $\Delta\Phi_2$. Para $\Delta\Phi_1 = 0,9\pi$, os valores máximos de energia na transmissão para cada caso são: 0,5953 para o caso 11, 0,5171 para o caso 01 e 0,2845 para o caso 10.

Figura 20 – Gráfico para a porta lógica AND e operação lógica $A' \cdot B$ 

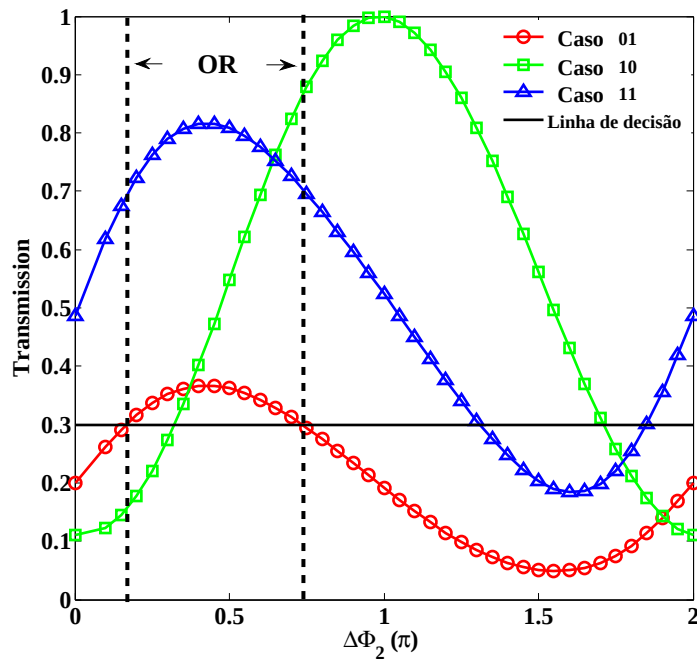
Fonte: autor

A porta AND apresentada na Figura 20 possui faixa de variação de fase superior a da operação $A' \cdot B$. Os valores de transmissão da porta AND quando ela é analisada na fase $\Delta\Phi_2 = 0,3767\pi$ são: 0,2015 referente ao caso 01 e o caso 10 e 0,4008 referente ao caso 11. Pode-se destacar também, o caso 01 da operação $A' \cdot B$ que apresenta alta porcentagem de energia aproveitada da transmissão com (99,61%). Os valores complementares referentes a porta AND e a operação $A' \cdot B$ estão contidos na Tabela 8.

Tabela 8: Tabela verdade referente a porta lógica AND e a operação lógica $A' \cdot B$

E_1	E_2	S_2	T	$E\%$	S_2	T	$E\%$
0	0	0	-	-	0	-	-
0	1	0	0,2015	39,97	1	0,5151	99,61
1	0	0	0,2015	70,82	0	0,1855	65,20
1	1	1	0,4008	67,33	0	0,1855	31,16
<i>AND</i>				<i>A' · B</i>			
$\Phi_1 = 0,9\pi$				$\Phi_1 = 0,9\pi$			
$\Phi_2 = 0,3767\pi$				$\Phi_2 = 1,6092\pi$			

A Figura 21 apresenta a porta lógica OR implementada quando $\Delta\Phi_1$ é fixado em $0,35\pi$ na saída O_3 do interferômetro. A porta lógica implementada varia no intervalo de $\Delta\Phi_2$ entre $0,1678\pi$ e $0,7355\pi$, a análise dessa porta é realizada no ponto de $\Delta\Phi_2 = 0,3717\pi$. A transmissão máxima para cada caso de entrada do MZI apresenta valores normalizados iguais a 0,3665 no caso 01, 1 referente ao caso 10 e 0,8155 no caso 11.

Figura 21 – Gráfico para a porta lógica OR

Fonte: autor

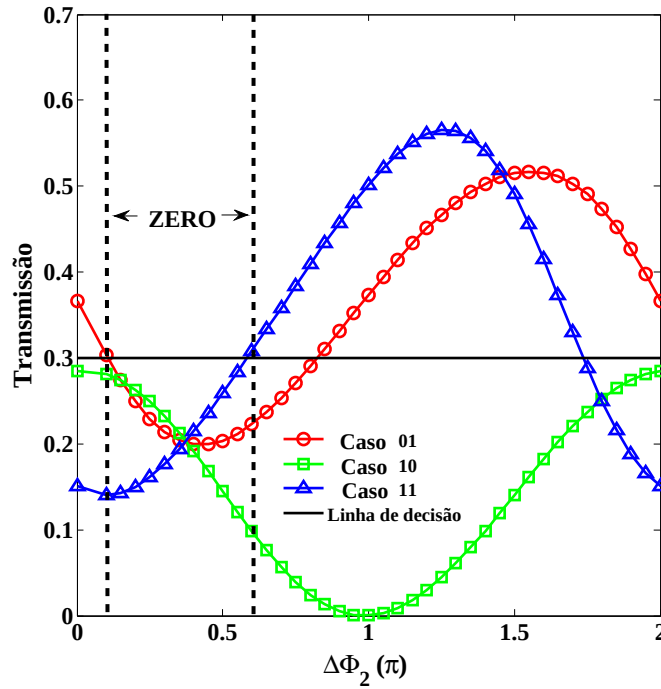
A porta OR implementada na Figura 21 possui duas situações com alto aproveitamento de energia. O caso 01 teve transmissão de 0,3637 e um aproveitamento de energia de 99,24%, o caso 11 teve aproveitamento de 99,42% para um valor de transmissão igual a 0,8108 e o caso 10 é o que apresenta o menor percentual de energia transmitida: 36,37% referente a um valor normalizado de transmissão igual a 0,3637. Os casos 01 e 10 apresentam o mesmo valor de transmissão porém, porcentagens distintas, isso ocorre devido ao diferente nível de energia (transmissão máxima) que estes casos podem alcançar. Os valores referentes a estudos complementares para a porta lógica OR se encontram na Tabela 9.

Tabela 9: Tabela verdade referente a porta lógica OR

E_1	E_2	S_1	T	$E\%$
0	0	0	-	-
0	1	1	0,3637	99,24
1	0	1	0,3637	36,37
1	1	1	0,8108	99,42

OR
 $\Phi_1 = 0,35\pi$
 $\Phi_2 = 0,1678\pi$

Na Figura 22 é analisada na saída S_2 do guia de onda 2 a operação lógica ZERO implementada quando $\Delta\Phi_1$ é fixada em $0,55\pi$ e $\Delta\Phi_2$ varia de $0,1057\pi$ a $0,5837\pi$. Os valores normalizados referentes a transmissão máxima são: 0,5652 para o caso 11, 0,5171 para o caso 01 e 0,2845 referente ao caso 10.

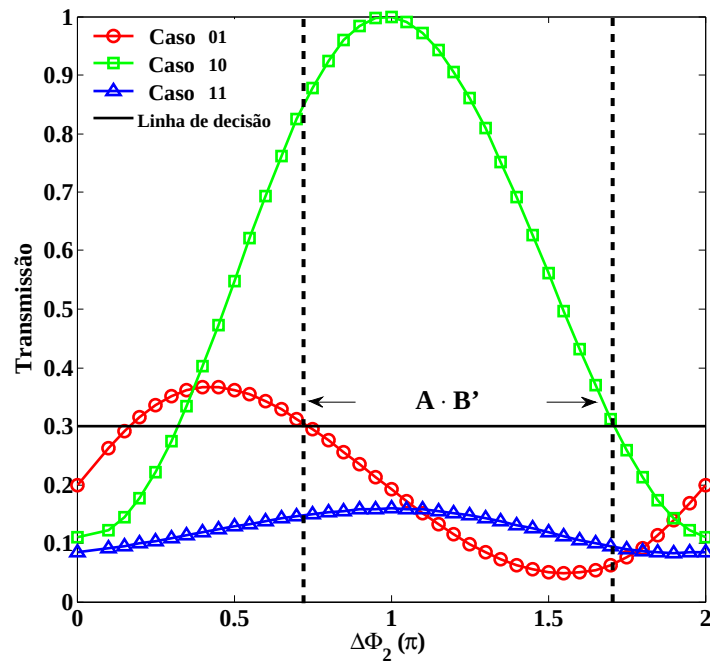
Figura 22 – Gráfico para a operação lógica ZERO

A operação ZERO mostrada na Figura 22 apresenta os três casos de saída com aproximadamente a mesma energia quando $\Delta\Phi_2 = 0,3733\pi$. Os valores normalizados de transmissão para essa função valem 0,2018 para o caso 01 e 0,2034 para os casos 10 e 11. Os valores complementares ao estudo da operação ZERO são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Tabela verdade referente a operação lógica ZERO

E_1	E_2	S_2	T	$E\%$
0	0	0	-	-
0	1	0	0,2018	39,03
1	0	0	0,2034	71,49
1	1	0	0,2034	35,99
<i>ZERO</i>				
$\Phi_1 = 0,55\pi$				
$\Phi_2 = 0,3733\pi$				

Na Figura 23 apresenta-se a implementação da operação lógica $A \cdot B'$ na saída S_1 do guia 1 do MZI quando $\Delta\Phi_1$ vale $1,6\pi$. A operação lógica implementada varia no intervalo referente a $\Delta\Phi_2$ de $0,7355\pi$ a $1,7112\pi$ e sua análise é realizada fixando-se a fase em $1,0838\pi$. Os valores normalizados referentes a transmissão máxima valem 0,3665 para o caso 01, 1 para o caso 10 e 0,1590 para o caso 11.

Figura 23 – Gráfico para a operação lógica $A \cdot B'$ 

Fonte: autor

Pode-se destacar da operação lógica implementada, a longa variação de fase apresentada e o alto percentual de energia aproveitada na transmissão para os casos 10 e 11. Houve 97,78% de aproveitamento no caso 10, com transmissão de 0,9778, 99,25% para o caso 11 que teve 0,1578 de transmissão e o caso 01 que apresentou o menor aproveitamento com 43,06% para um valor de transmissão igual a 0,1578. Os valores referente ao estudo da função lógica $A \cdot B'$ são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11: Tabela verdade referente a operação lógica $A \cdot B'$

E_1	E_2	S_1	T	$E\%$
0	0	0	-	-
0	1	0	0,1578	43,06
1	0	1	0,9778	97,78
1	1	0	0,1578	99,25
$A \cdot B'$				
$\Phi_1 = 1,6\pi$				
$\Phi_2 = 1,0838\pi$				

A Tabela 12 apresenta um resumo das portas lógicas e operação implementadas, com suas respectivas variações de fase para cada cenário de configuração do MZI - PCF híbrido, considerou-se também as porcentagens de energia transmitida em cada caso inserido no MZI.

Tabela 12: Compilação das portas lógicas implementadas para as configurações consideradas neste trabalho e suas respectivas fases de análise

Porta lógica	Configuração do MZI	Φ_1	Φ_2	$E_{00}\%$	$E_{01}\%$	$E_{10}\%$	$E_{11}\%$
AND	1	$1,4\pi$	$1,5662\pi$	-	31,24	46,40	87,07
	1	$0,95\pi$	$0,4272\pi$	-	31,8	61,27	77,8
	2	$0,95\pi$	$0,4181\pi$	-	32,09	60,78	78,20
	3	$0,90\pi$	$0,3767\pi$	-	39,97	70,82	67,33
OR	2	$0,3\pi$	$0,676\pi$	-	83,68	84,87	90,32
	3	$0,35\pi$	$0,1678\pi$	-	99,24	36,37	99,42
XOR	2	$1,8\pi$	$0,3775\pi$	-	96,80	40,23	65,78
$A' \cdot B$	1	$1,4\pi$	$0,4963\pi$	-	74,89	55,73	43,08
	1	$0,95\pi$	$1,4797\pi$	-	86,71	47,65	17,91
	2	$0,95\pi$	$1,5449\pi$	-	91,97	59,02	24,59
	3	$0,9\pi$	$1,6092\pi$	-	99,61	65,20	31,16
$A \cdot B'$	3	$1,6\pi$	$1,0838\pi$	-	43,06	97,78	99,25
ZERO	1	$1,95\pi$	$0,4272\pi$	-	32,05	60,81	20,42
	2	$0,3\pi$	$0,5891\pi$	-	44,33	33,54	13,75
	2	$1,8\pi$	$1,7804\pi$	-	49,37	20,52	50,88
	3	$0,55\pi$	$0,3733\pi$	-	39,03	71,49	35,99

A porta AND, a operação ZERO e a operação $A' \cdot B$ são os mais implementados pelo dispositivo quando consideramos as três configurações. A porta XOR e a operação $A \cdot B'$ foram implementadas em apenas uma configuração. Em relação às porcentagens de energia transmitida, as portas OR e XOR foram as que apresentaram melhores desempenhos nos casos analisados, entre as operações lógicas, tem-se destaque $A' \cdot B$ com alta taxa de energia transmitida.

CONCLUSÃO

A partir do modelo de MZI apresentado, analisou-se três configurações com o objetivo de investigar a implementação de portas lógicas através de simulação numérica. Na primeira configuração, o MZI - PCF apresenta um acoplador simétrico seguido por um assimétrico e as portas e funções lógicas implementadas foram: AND, função ZERO e função $A' \cdot B$.

Na segunda configuração, o MZI - PCF apresentou uma configuração com um acoplador assimétrico seguido por um simétrico, as portas implementadas foram: OR, XOR, AND, função ZERO e função $A' \cdot B$.

Na terceira configuração, utilizou-se dois acopladores assimétricos no modelo do MZI - PCF e implementou-se as portas OR, AND, função $A' \cdot B$, função ZERO e função $A \cdot B'$. Assim, o dispositivo estudado permitiu a obtenção de diferentes portas lógicas a partir da assimetria não linear nos acopladores ópticos.

Assim, as três configurações para o dispositivo podem atuar de forma equivalente a um operador de decisão lógica através das portas OR, AND e XOR, podem atuar também como dispositivo bloqueador de sinal ou chave óptica através da função ZERO e como um circuito de decisão lógica mais complexo através das funções $A' \cdot B$ e $A \cdot B'$ reduzindo assim as dimensões de circuitos lógicos que dependam de diversas operações.

Os resultados e estudos apresentados levam a concluir também que, no MZI - PCF híbrido de três configurações, pode-se modificar a transmissão de energia e o comportamento do pulso ao se modificar a fase, a potência ou os efeitos não lineares. Essas modificações levam a mudanças na comutação óptica do dispositivo, o que pode levar a implementação de portas e funções lógicas apenas mudando um fator não linear ou a potência.

6.1 Trabalhos futuros

- Implementação de operações lógicas no MZI - PCF com acopladores assimétricos utilizando modulação PAM e PPM;

- Implementação de operações lógicas utilizando interferômetro triplo com três entradas lógicas sob modulação OOK, PAM e PPM;
- Implementação de operações lógicas utilizando interferômetro triplo com guia de controle e duas entradas lógicas sob modulação OOK, PAM e PPM.

Referências Bibliográficas

- AGRAWAL, G. P. **Applications of Nonlinear Fiber Optics**. [S.l.: s.n.], 2001.
- AGRAWAL, G. P. **Nonlinear Fiber Optics**. [S.l.: s.n.], 2001.
- AGRAWAL, G. P. **Lightwave Technology: components and devices**. [S.l.: s.n.], 2004.
- AGRAWAL, G. P. **Sistemas de comunicação por fibra óptica**. [S.l.: s.n.], 2014.
- ARAÚJO, A.; OLIVEIRA, A.; MARTINS, F.; COELHO, A.; FRAGA, W.; NASCIMENTO, J. Two all-optical logic gates in a single photonic interferometer. **Optics Communications**, Elsevier, v. 355, p. 485–491, 2015.
- CHICHARRO, F. I.; ORTEGA, B.; DIEGO, M.; MORA, J. Broadband optical sources for low-cost wdm-mb-ofdm networks. **IEEE Communications Letters**, IEEE, v. 21, n. 8, p. 1759–1762, 2017.
- COELHO, A. G.; COSTA, M. B. C.; FERREIRA, A. C.; SILVA, M. G. da; LYRA, M. L.; SOMBRA, A. S. B. Realization of all-optical logic gates in a triangular triple-core photonic crystal fiber. **Journal of Lightwave Technology**, IEEE, v. 31, n. 5, p. 731–739, 2013.
- CORREA, R. A.; KNIGHT, J. C. Novel process eases production of hollow-core fiber. **Laser Focus World**, v. 45, n. 1, p. 67–69, 2008.
- CORREIA, D. G.; ÁVILA, K. M. V.; C.AVALCANTE, D. N. S.; PINTO, P. V. F.; MAGALHÃES, F. T. C. B.; MOURA, L. P.; FERREIRA, A. C.; MENEZES, J. W. M.; GUIMARÃES, G. F. Non-linear switching based on dual-core non-linear optical fiber couplers with xpm and raman intrapulse applied to femtosecond pulse propagation. **Journal of Modern Optics**, Taylor & Francis, p. 1–7, 2015.
- DING, J.; CHEN, Q.; ZHANG, L.; ZHOU, P. Demonstration of a directed xnor/xor optical logic circuit based on silicon mach-zehnder interferometer. **Optics Communications**, Elsevier, v. 395, p. 183–187, 2017.
- EL-SAEED, E. M.; EL-AZIZ, A. A.; FAYED, H. A.; ALY, M. H. Optical logic gates based on semiconductor optical amplifier mach-zehnder interferometer: design and simulation. **Optical Engineering**, SPIE, v. 55, n. 2, p. 025104–1–025104–12, 2016.
- FARRELL, C.; SERRELS, K. A.; LUNDQUIST, T. R.; VEDAGARBHA, P.; REID, D. T. Octave-spanning super-continuum from a silica photonic crystal fiber pumped by a 386 MHz Yb: fiber laser. **Optics Letters**, Optical Society of America-OSA, v. 37, n. 10, p. 1778–1780, 2012.
- GILAT, A.; SUBRAMANIAN, V. **Metodos numéricos para engenheiros e cientistas: uma introdução usando MATLAB**. [S.l.: s.n.], 2008.

GRIFFITHS, D. J. **Eletrodinâmica**. [S.l.]: Pearson, 2011.

HOU, C. B.; WANG, J. G.; YANG, J.; LI, H. Y.; YUAN, Y. G.; PENG, F.; YUAN, L. B. Improved path imbalance measurement of a fiber-optic interferometer based on frequency scanning interferometry. **Meas. Sci. Technol.**, IOP Publishing Ltd, v. 28, p. 1–7, 2017.

JIANG, J.; AN, J.; MA, C.; LI, Z.; LIU, T. A fast positioning algorithm for the asymmetric dual mach-zehnder interferometric infrared fiber vibration sensor. **Infrared Physics & Technology**, Elsevier, v. 85, p. 359–363, 2017.

JOANNOPOULOS, J. D.; JOHNSON, S. G.; WINN, J. N.; MEADE, R. D. **Photonic crystals: molding the flow of light**. [S.l.]: Princeton university press, 2011.

KATTI, R.; PRINCE, S. All optical new 3×3 reversible logic gate using mach-zehnder interferometer. **Opt. Quant. Electron.**, Springer, v. 63, p. 2–18, 2016.

KHARRAZ, O. M.; MOHAMMAD, A. B. B.; FORSYTH, D. I.; AHMAD, H. Measurement of fiber non-linearity on four-wave mixing with an ase source. **Optical Fiber Technology**, Elsevier, v. 32, p. 23–29, 2016.

KOTB, A. Theoretical analysis of soliton nor gate with semiconductor optical amplifier-assisted mach-zehnder interferometer. **Opt. Quant. Electron.**, Springer, v. 180, n. 49, p. 1–11, 2017.

KOTB, A.; ZOIROS, K. E. Performance analysis of all-optical xor gate with photonic crystal semiconductor optical amplifier-assisted mach-zehnder interferometer at 160 gb/s. **Optics Communications**, Elsevier, v. 402, p. 511–517, 2017.

KUMAR, C.; KUMAR, R.; DAS, D. Dynamics of soliton pulse inside optical fiber. **Laser Focus World**, v. 45, n. 1, p. 67–69, 2008.

KUMAR, S.; CHANDERKANTA; RAGHUWANSHI, S. K. Design of optical reversible logic gates using electro-optic effect of lithium niobate based mach-zehnder interferometers. **Applied Optics**, Optical Society of America - OSA, v. 55, n. 21, p. 5693–5701, 2016.

KUMAR, S.; SINGH, G.; BISHT, A.; SHARMA, S.; AMPHAWAN, A. Proposed new approach to the design of universal logic gates using the electro-optic effect in mach-zehnder interferometer. **Applied Optics**, Optical Society of America - OSA, v. 54, n. 28, p. 8479–8484, 2015.

LIU, J.; FAN, W.; XUE, B. Dispersion control in fiber-coupled THz-TDS. **Optik**, Elsevier, v. 123, p. 2230–2232, 2012.

MANDAL, D.; MANDAL, S.; GARAI, S. K. Alternative approach of developing all-optical fredkin and toffoli gates. **Optics & Laser Technology**, Elsevier, v. 72, p. 33–41, 2015.

MARQUES, L. M. P. C. **Compensação de dispersão em sistemas de fibra óptica**. [S.l.: s.n.], 2012.

NORGIA, M.; MELCHIONE, D.; DONATI, S. Exploiting the fm-signal in a laser-diode smi by means of a mach-zehnder filter. **IEEE Photonics Technology Letters**, IEEE, v. 29, n. 18, p. 1552–1555, 2017.

- RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K. N. **Optical Networks: a practical perspective**. [S.l.: s.n.], 2002.
- REIS, C.; CHATTOPADHYAY, T.; PARCA, G.; DIONÍSIO, R.; ANDRÉ, P.; TEIXEIRA, A. All-optical multifunctional logic operations using simultaneously both interferometer output in a symmetric soa-mzi. **Optics & Laser Technology**, Elsevier, v. 68, p. 175–181, 2015.
- RENDÓN-SALGADO, I.; GUTIERREZ-CASTREJÓN, R. 160 gb/s all-optical and gate using bulk soa turbo-switched mach-zehnder interferometer. **Optics Communications**, Elsevier, v. 399, p. 77–86, 2017.
- SALES, J. C.; FILHO, A. F. G. F.; FERREIRA, A. C.; SOUSA, J. R. R.; ÁVILA, K. M. V.; CAVALCANTE, D. N. S.; MAGALHÃES, F. C. T. B.; SOBRINHO, C. S.; PINTO, P. V. F.; GUIMARÃES, G. F.; MENEZES, J. W.; COSTA, D. B.; SOMBRA, A. S. B. Mach-zehnder nonlinear interferometer in photonic crystal fibers with nonlinearity profiles. **Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials**, World Scientific Publishing Company, v. 24, n. 3, p. 1550036–1–1550036–17, 2015.
- SALES, J. C.; FILHO, A. F. G. F.; FERREIRA, A. C.; SOUSA, J. R. R.; SOBRINHO, C. S.; MENEZES, J. W. M.; GUIMARÃES, G. F.; SOMBRA, A. S. B. All-optical xor and or by mach-zehnder interferometer engineered photonic crystal fibers. **Optics and Laser Technology**, Elsevier, v. 94, p. 128–137, 2017.
- SHARMA, S.; KUMAR, J. Numerical analysis of optical logic gate based on nonlinear optical loop mirror with a photonic crystal fiber. **Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials**, World Scientific Publishing Company, v. 24, n. 2, p. 1550019–1–1550019–17, 2015.
- SODRÉ, A. C. Recent progress and novel applications of photonic crystal fibers. **Reports on Progress in Physics**, IOP Publishing, v. 73, p. 1–23, 2010.
- SOUSA, J. R. R.; FILHO, A. F. G. F.; FERREIRA, A. C.; BATISTA, G. S.; SOBRINHO, C. S.; BATOS, A. M.; LYRA, M. L.; SOMBRA, A. S. B. Generation of logic gates based on a photonic crystal fiber michelson interferometer. **Optics Communications**, Elsevier, v. 322, p. 143–149, 2014.
- THYAGARAJAN, K.; GHATAK, A. **Fiber Optic Essentials**. [S.l.: s.n.], 2007.
- UTHAYAKUMAR, T.; RAJA, R. V. J.; PORSEZIAN, K. Realization of all-optical logic gates through three core photonic crystal fiber. **Optics Communications**, Elsevier, v. 296, p. 124–131, 2013.
- UTHAYAKUMAR, T.; RAJA, R. V. J.; PORSEZIAN, K.; GRELU, Ph. Impact of structural asymmetry on the efficiency of triple-core photonic crystal fiber for all-optical logic operation. **Journal of the Optical Society of America**, Optical Society of America - OSA, v. 32, n. 9, p. 1920–1929, 2015.
- WIEDERHEKER, G. S.; CORDEIRO, C. M. B.; COUNY, F.; BENABID, F.; MAIER, S. A.; KNIGHT, J. C.; CRUZ, C. H. B.; FRAGNITO, H. L. Field enhancement within an optical fibre with a subwavelength air core. **Nature Photonics**, Nature Publishing Group, v. 1, p. 114–118, 2007.

WU, J.; SHEN, X.; LUO, X.; HU, X.; PENG, Jing-gang; YANG, L.; LI, J.; DAI, N. Temperature-insensitive torsion sensor with sensitivity-enhanced by processing a polarization-maintaining photonic crystal fiber. **Optics Communications**, Elsevier, v. 401, p. 80–84, 2017.

ZHAO, Y.; XIA, F.; HU, H.; CHEN, M. A novel photonic crystal fiber mach-zehnder interferometer for enhancing refractive index measurement sensitivity. **Optics Communications**, Elsevier, v. 402, p. 368–374, 2017.

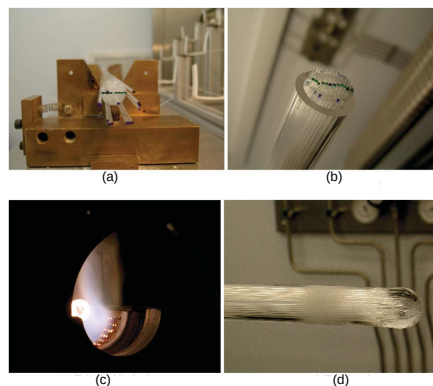
ZHU, H.; WANG, R.; PU, T.; FANG, T.; XIANG, P.; ZHENG, J.; CHEN, D. Optical stealth transmission based on super-continuum generation in highly nonlinear fiber over WDM net work. **Optics Letters**, Optical Society of America-OSA, v. 40, n. 11, p. 2561–2563, 2015.

ANEXO A – Fabricação de uma fibra de cristal fotônico

Segundo Sodré (2010), a fabricação de uma PCF ocorre através do agrupamento de capilares. São criados capilares individuais geralmente feitos de sílica, esses capilares podem ser moldados em diferentes diâmetros e comprimentos, podendo ser sólidos ou ocos. Quando prontos, os capilares são posicionados de forma a se obter a simetria especificada. O agrupamento dos capilares define uma pré-forma da fibra. A pré-forma é levada a uma torre de confecção de fibras onde é aquecida em altas temperaturas e depois é esticada reduzindo as dimensões a valores da ordem de milímetros. Terminado esse primeiro processo, obtém-se a pré-forma intermediária.

Essa pré-forma intermediária ainda é complementada com hastes de vidro extras, definindo o diâmetro final da fibra e parâmetros específicos. A pré-forma é levada novamente a torre para finalização da estrutura da fibra, após esse processo é comum adicionar uma camada extra de um material protetor. A figura 24 mostra alguns dos passos utilizados na fabricação de uma PCF.

Figura 24 – Algumas etapas do processo de fabricação de uma PCF



(a) posicionamento de capilares a fim de se obter um especifica simetria; (b) agrupamento dos capilares para se obter a pré forma da fibra; (c) aquecimento da pré forma da fibra; (d) pré forma finalizada; FONTE: (SODRÉ, 2010).

ANEXO B – Método numérico de Runge-Kutta de quarta ordem

Segundo Gilat & Subramanian (2008), os métodos de Runge-Kutta compõem uma família de técnicas numéricas explícitas de passo simples usadas na solução de EDOs de primeira ordem. Os diferentes métodos de Runge-Kutta são classificados de acordo com sua ordem. Os métodos de Runge-Kutta são mais precisos do que o método explícito de Euler. A sua precisão aumenta (isto é, o erro de truncamento diminui) a medida que a ordem do método aumenta. Em cada passo, no entanto, dependendo da ordem, são necessárias várias avaliações da função para se estimar a derivada de $f(x,y)$.

A forma geral do método de Runge-Kutta de quarta ordem é:

$$y_{i+1} = y_i + (c_1K_1 + c_2K_2 + c_3K_3 + c_4K_4)h \quad (\text{B.1})$$

com

$$K_1 = f(x_i, y_i) \quad (\text{B.2})$$

$$K_2 = f(x_i + a_2h, y_i + b_{21}K_1h) \quad (\text{B.3})$$

$$K_3 = f(x_i + a_3h, y_i + b_{31}K_1h + b_{32}K_2h) \quad (\text{B.4})$$

$$K_4 = f(x_i + a_4h, y_i + b_{41}K_1h + b_{42}K_2h + b_{43}K_3h) \quad (\text{B.5})$$

onde $c_1, c_2, c_3, c_4, a_2, a_3, a_4, b_{21}, b_{31}, b_{32}, b_{41}, b_{42}$ e b_{43} formam um conjunto com treze constantes. Os valores dessas constantes variam com o método de quarta ordem específico.

O **método de Runge-Kutta de quarta ordem clássico** está entre os métodos mais comumente utilizados. As constantes desse método são:

$$c_1 = c_4 = \frac{1}{6} \quad (\text{B.6})$$

$$c_2 = c_3 = \frac{2}{6} \quad (\text{B.7})$$

$$a_2 = a_3 = b_{21} = b_{32} = \frac{1}{2} \quad (\text{B.8})$$

$$a_4 = b_{43} = 1 \quad (\text{B.9})$$

$$b_{31} = b_{41} = b_{42} = 0 \quad (\text{B.10})$$

Com essas constantes, as equações do método de Runge-Kutta de quarta ordem clássico são:

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4)h \quad (\text{B.11})$$

com

$$K_1 = f(x_i, y_i) \quad (\text{B.12})$$

$$K_2 = f\left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}K_1h\right) \quad (\text{B.13})$$

$$K_3 = f\left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}K_2h\right) \quad (\text{B.14})$$

$$K_4 = f(x_i + h, y_i + K_3h) \quad (\text{B.15})$$