



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
PRÓ-REITORIA DE ENSINO
IFCE CAMPUS FORTALEZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
TELECOMUNICAÇÕES
MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES

FRANCISCO DIEGO PAULINO BOTO CRUZ

INTERFERÔMETRO DE MACH-ZEHNDER COMPOSTO DE ACOPLADORES DE
TRÊS NÚCLEOS COM GEOMETRIA PLANAR PARA GERAÇÃO DE PORTAS
LÓGICAS COM ENTRADA DE LÓGICA DE CONTROLE

FORTALEZA

2022

FRANCISCO DIEGO PAULINO BOTO CRUZ

INTERFERÔMETRO DE MACH-ZEHNDER COMPOSTO DE ACOPLADORES DE
TRÊS NÚCLEOS COM GEOMETRIA PLANAR PARA GERAÇÃO DE PORTAS
LÓGICAS COM ENTRADA DE LÓGICA DE CONTROLE

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

Orientador: Prof. Dr. Glendo de Freitas Guimarães.

FORTALEZA

2022

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)

C955n Cruz, Francisco Diego Paulino Boto. Interferômetro de Mach-Zehnder Composto de Acopladores de Três Núcleos com Geometria Planar para Geração de Portas Lógicas com entrada de lógica de controle / Francisco Diego Paulino Boto Cruz. 2022.
56 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Engenharia de Telecomunicações, Campus Fortaleza, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Glendo de Freitas Guimarães.

1. Interferômetro de Mach-Zehnder. 2. Fibra de Cristal Fotônico. 3. Efeitos não lineares. 4. Portas lógicas. I. Título.

CDD 621.382



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

FRANCISCO DIEGO PAULINO BOTO CRUZ

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:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Glendo Freitas Guimarães (Orientador)
Instituto Federal do Ceará (IFCE)

Prof. Dr. Francisco José de Aquino
Instituto Federal do Ceará (IFCE)

Prof. Dr. José Rubens Rodrigues de Sousa
Universidade de Fortaleza (UNIFOR)

Prof. Dr. Carlos Alexandre Rolim Fernandes
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico este trabalho aos meus pais, que me mostraram o caminho certo a ser seguido e serviram de referencial para minhas atitudes de dedicação e esforço para servir a uma sociedade melhor. A minha companheira por sempre ter me apoiado na minha trajetória em meu mestrado.

Agradecimentos

A meus pais por todo apoio nas minhas conquistas.

A minha companheira, Cinthia Rebouças, a qual me apoia em todos os caminhos que sigo na minha vida.

Ao prof. Dr. Glendo de Freitas Guimarães por sua orientação, exemplo humano e paciência ao longo de todo mestrado. Jamais esquecerei sua dedicação com os próximos, diante de tempos tão conturbados.

Ao prof. Ms George Sales Bezerra pelos momentos de orientação ao longo deste trabalho. Guardarei para sempre sua amizade, boas lembranças e o seu carácter.

Aos colegas de mestrado e amigos, Luana Samara, Kilbert Amorim, Wellington Dantas, Waleska Feitoza, Priscila Martins e Lyndainês Santos, pelos momentos de aprendizado e descontração ao longo dos 2 anos de mestrado.

Aos colegas de laboratório de fotônica e amigos, Letícia França, Victor Luca, Raiane Rocha, Lucas Marcelino, Kilvia Ávila, Kelvia Aragão, Cleiton Marinho, Clenilson Sousa, Milena Santos, Robson Sampaio, Isaac Miranda, Daniel Cavalcante, Paulo Renato, Tiago Bezerra, Aêdo Braga, Antônio Nunes, Alan Robson, Victor Gabriel Miranda, Ieda Sousa e Glaydiane Mesquita, pelas contribuições com aprendizado, descontração e apoio nas mais diversas atividades.

Ao corpo docente do programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES pelo apoio financeiro.

“Meu nome é Ozymandias, rei dos reis:
Contemplem minhas obras, ó poderosos, e
desesperai-vos!”. (SHELLEY, s. d.)

Resumo

Este trabalho busca simular numericamente e analisar os efeitos não lineares e dispersivos, atuando em um interferômetro de Mach-Zehnder (MZI) constituído de fibra de cristal fotônico (PCF) com três núcleos, bem como visa a analisar a sua aplicação na obtenção de portas lógicas. O objetivo foi estudar o comportamento do interferômetro e sua aplicabilidade na implementação de portas lógicas sob ação dos efeitos de dispersão de velocidade de grupo, dispersão de terceira ordem, efeitos não lineares de automodulação de fase (SPM), modulação de fase cruzada (XPM) e efeitos não lineares de alta ordem como autoinclinação, *Self-Steepening* e o espalhamento Raman intrapulso (IRS). O estudo utilizou a equação não linear de Schrodinger (ENLGS) para os efeitos não lineares, por meio de simulação numérica pelo uso do método numérico de Runge-Kutta de quarta ordem. O interferômetro opera com pulsos do tipo secante hiperbólica, inicialmente ultracurto de 100 femto segundos (*fs*), que se propaga ao longo do dispositivo sob modulação *Pulse Amplitude Modulation* (PAM), onde os bits são definidos por amplitude desses pulsos. Assim, é possível analisar o comportamento do pulso no dispositivo, observar seus efeitos durante a propagação no interferômetro e implementar portas lógicas totalmente ópticas. Obteve-se, neste estudo, as implementações das portas lógicas totalmente ópticas *OR*, *AND* e operação lógica *ZERO*.

Palavras-chave: Interferômetro de Mach-Zehnder. Fibra de Cristal Fotônico. Portas lógicas. Efeitos não lineares.

Abstract

This work seeks to numerically simulate and analyze the nonlinear and dispersive effects acting on a Mach-Zehnder interferometer (MZI) consisting of photonic crystal fiber (PCF) with three cores as well as its application in obtaining logic gates. The objective was to study the behavior of the interferometer and its applicability in the implementation of logic gates under the effects of second-order dispersion, third-order dispersion, non-linear effects of automodulation phase (SPM) and cross-phase modulation (XPM) and high-order nonlinear effects such as Self-steepening and Intrapulse Raman scattering (IRS). The study uses the nonlinear Schrodinger equation for the nonlinear effects, through numerical simulation using the fourth order Runge-Kutta numerical method. The interferometer operates with pulses of the hyperbolic secant type initially ultra-short of 100 femto seconds (fs) that propagate along the device under Pulse Amplitude Modulation (PAM), where the bits are defined by the amplitude of these pulses. Therefore, it is possible to analyze the behavior of the pulse in the device, observe its effects during propagation in the interferometer and implement all-optical logic gates. In this study, the implementations of all-optical logic gates OR, AND and logic operation ZERO were obtained.

Keywords: Mach-Zehnder Interferometer. Photonic Crystal Fiber. Logic Gates. Non-linear effects.

Lista de Figuras

Figura 1 –	(a) Seção transversal de uma fibra de cristal fotônico. (b) Seção de uma região da casca. (c) Seção da região considerada como núcleo.....	18
Figura 2 –	Esquemático das fibras de cristal fotônico planar e triangular respectivamente.....	19
Figura 3 –	Acoplador Direcional com uma ilustração esquemática do processo de chaveamento.....	26
Figura 4 –	Ilustração esquemática de Interferômetro de Mach-Zehnder de 2 entradas e 2 saídas.....	27
Figura 5 –	Ilustração dos pulsos, sendo: A_{ref} o pulso de referência; A_1 o pulso com valor de amplitude equivalente a $(A_{ref} - \varepsilon)$; A_2 o pulso com valor de amplitude equivalente a $(A_{ref} + \varepsilon)$	30
Figura 6 –	Configuração do MZI proposto do trabalho.....	34
Figura 7 –	Elementos gráficos na transmissão em função da diferença de fase.....	38
Figura 8 –	Transmissão e portas lógicas em função da diferença de fase para as configurações: a) bit de controle no guia 3, b) bit de controle no guia 2, c) bit de controle no guia 1.....	41
Figura 9 –	Transmissão e portas lógicas em função da diferença de fase para as configurações: a) bit de controle em nível lógico "0", b) bit de controle em nível lógico "1".....	43
Figura 10 –	Transmissão em função da diferença de fase, mostrando a conservação da energia do MZI de fase 1 - $0,05\pi$	45
Figura 11 –	Transmissão em função da diferença de fase, mostrando a conservação da energia do MZI de fase 1 - $1,25\pi$	46
Figura 12 –	Transmissão em função da diferença de fase, mostrando a conservação da energia do MZI de fase 1 - $1,65\pi$	47
Figura 13 –	Transmissão em função da diferença de fase, mostrando a conservação da energia do MZI de fase 1 - $1,75\pi$	48
Figura 14 –	Transmissão e portas lógicas em função da diferença de fase para as configurações: a) para a saída S_1 , b) para a saída S_2 , c) para a saída S_3	50

Lista de Tabelas

Tabela 1 –	Tabela verdade e transmissão de energia para porta lógica OR de a).....	42
Tabela 2 –	Tabela verdade e transmissão de energia para porta lógica OR de b).....	42
Tabela 3 –	Tabela verdade e transmissão de energia para porta lógica OR de c).....	43
Tabela 4 –	Tabela verdade e transmissão de energia para porta lógica OR de a).....	44
Tabela 5 –	Tabela verdade e transmissão de energia para porta lógica OR de b).....	44
Tabela 6 –	Tabela verdade e transmissão de energia para operação lógica ZERO.....	46
Tabela 7 –	Tabela verdade e transmissão de energia para porta lógica OR.....	47
Tabela 8 –	Tabela verdade e transmissão de energia para porta lógica AND.....	48
Tabela 9 –	Tabela verdade e transmissão de energia para porta lógica OR.....	49
Tabela 10 –	Tabela verdade e transmissão de energia para porta lógica AND de a).....	51
Tabela 11 –	Compilação das portas lógicas implementadas para as configurações consideradas neste trabalho e suas respectivas fases de análise.....	52

Lista de Abreviações

ASK	<i>Amplitude Shift Keying</i>
Bit	<i>Binary digit</i>
Chirp	Variação de Fase no Tempo
ENLGS	Equação Não Linear Generalizada de Schrodinger
GVD	<i>Group Velocity Dispersion</i>
IRS	<i>Intrapulse Raman Scattering</i>
MZI	<i>Mach-Zehnder Interferometer</i>
OOK	<i>On Off Keying</i>
PAM	<i>Pulse-Amplitude Modulation</i>
PBG	<i>Photonic Band Gap</i>
PCF	<i>Photonic Crystal Fiber</i>
RIT	Reflexão Interna Total
SOA	<i>Semiconductor Optical Amplifier</i>
SPM	<i>Self-Phase Modulation</i>
SS	<i>Self-Steepening</i>
TOD	<i>Third Order Dispersion</i>
XPM	<i>Cross-Phase Modulation</i>

Sumário

1	Introdução	13
1.1	Motivação.....	14
1.2	Objetivos.....	14
1.2.1	Objetivos específicos.....	14
1.3	Organização da dissertação.....	15
2	Fundamentação Teórica	17
2.1	PCF – Fibra de Cristal Fotônico.....	17
2.2	Efeitos não lineares na propagação de luz em fibra ópticas.....	19
2.2.1	Atenuação.....	21
2.2.2	Dispersão de velocidade de grupo (GVD – Group Velocity Dispersion).....	21
2.2.3	Dispersão de terceira ordem.....	23
2.2.4	Dispersão de quarta ordem.....	23
2.2.5	Automodulação de fase (SPM – Self-Phase Modulation).....	24
2.2.6	Modulação de fase cruzada (XPM – Cross-Phase Modulation).....	24
2.2.7	Self-Steepening.....	25
2.2.8	Espalhamento Raman Intrapulso (IRS – Intrapulse Raman Scattering).....	25
2.3	Acopladores ópticos.....	25

2.4	Interferômetro Mach-Zehnder.....	27
2.4.1	Aplicações do MZI.....	28
2.5	Modulação.....	29
3	Revisão Bibliográfica	31
3.1	Metodologia da revisão.....	31
3.2	Artigos selecionados na revisão.....	32
4	Metodologia	34
4.1	Dispositivo e análise.....	34
5	Resultados	40
5.1	Perfil 1 – Análise da influência da variação de posição do bit de controle..	40
5.2	Perfil 2 – Análise da influência da variação do nível lógico do bit de controle.....	43
5.3	Perfil 3 – Análise das fases de entrada.....	45
5.4	Perfil 4 – Análise das saídas do interferômetro.....	49
6	Conclusões	53
6.1	Trabalhos futuros.....	54
	Referências Bibliográficas	55

INTRODUÇÃO

Com o crescimento exponencial das comunicações de dados, telecomunicações e tecnologias da informação, existe uma intensa busca e alto investimento em comunicações ópticas e processamento de sinais digitais totalmente ópticos. Estudos em desenvolvimento, sobre aplicações de ondas na região de frequência de terahertz (THz), do espectro eletromagnético (0,1-10 THz), que abrangem um intervalo entre a óptica e a eletrônica, estão sendo utilizados para comunicação sem fio, imagem e segurança (NAGATSUMA *et al.*, 2013; AKYILDIZ; JORNET; HAN, 2014). Para a realização de transmissão e integração desses sinais, é necessária a utilização de dispositivos de comunicação de redes complexas, elementos de acoplamento e portas lógicas, sendo estas últimas dispositivos fundamentais de microprocessadores para executar processamento aritmético binário e circuitos lógicos booleanos. Entretanto, o regime em terahertz sofre com a restrição de dispositivos optoeletrônicos devido à resposta natural limitada dos materiais (BLESSAN; VENKATESWARAN; YOGESH, 2022).

Pesquisas que abordam tópicos relacionados à óptica e a sistemas de comunicação óptica têm uma vasta abrangência na literatura acadêmica (SALES *et al.*, 2017) devido à necessidade de serviços de transmissão de dados, em específico, transmissão em tempo real. A criação de portas lógicas totalmente ópticas contribui para o processamento digital de dados, pois a necessidade de transmissões mais rápidas, em sistemas de transmissão, tem sido cada vez mais desejada. Para a obtenção dessas funções booleanas, foi adotado o modelo de Mach-Zehnder triplo, sendo duas das entradas lógicas e variantes enquanto uma última entrada é destinada a fazer o papel do controle lógico. Com o funcionamento desse dispositivo em uma natureza totalmente óptica, é possível obter perdas muito pequenas comparando com as portas convencionais que, como um dispositivo eletrônico corriqueiro, acaba tendo perdas ligadas ao processamento que faz com que o dispositivo esquente e não tenha um desempenho otimizado.

O interferômetro de Mach-Zehnder (MZI) tem por finalidade causar interferência entre feixes de luz, e, assim como os demais modelos relacionados ao dispositivo, pode ser utilizado para realizar medidas precisas pelo controle de fase da onda luminosa. Para usufruir dos efeitos não lineares possíveis de se obter no estudo, foram utilizadas as Fibras de Cristal Fotônico (PCFs), que já foram utilizadas para diversas aplicações, como obtenção de portas lógicas e

acoplamento não linear. Comparado à tradicional fibra óptica, o coeficiente não linear de uma fibra de cristal fotônico é, geralmente, maior para várias ordens de magnitude e pode ser convenientemente ajustado, alterando a estrutura da fibra.

1.1 Motivação

O estudo proposto tem por motivação o fato de que é necessário desenvolver dispositivos capazes de realizar operações lógicas totalmente ópticas. Esses dispositivos viriam a substituir os dispositivos eletrônicos atuais, os quais estão próximos do limite de transmissão de dados. Além disso, o presente trabalho visa a contribuir para avançar o desenvolvimento científico para futuros trabalhos com dispositivos totalmente ópticos em regime de não linearidade. Com mais um tipo de configuração, é possível dar maior dinamismo aos sistemas de comunicações existentes, também é possível expandir os estudos na área de dispositivos ópticos interferométricos e portas lógicas. Apesar de encontrar, na literatura, diversos trabalhos de dispositivos de fibra óptica, tais como interferômetros para obtenção de portas lógicas, essa área não está esgotada e nem consolidada. Cumpre destacar que não foram encontrados, na literatura, trabalhos nos quais há a utilização de uma entrada lógica óptica controlada em dispositivos de interferômetro de Mach-Zehnder de 3 guias para alterar saídas lógicas totalmente ópticas.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral modelar, estudar e analisar os modelos de interferômetro de Mach-Zehnder (MZI), baseados em fibra de cristal fotônico de três núcleos para geometria planar, com três entradas e três saídas lógicas, sendo uma entrada representada como um bit de controle, considerando efeitos não lineares e com a modulação por amplitude de pulso – Pulse Amplitude Modulation (PAM), para a obtenção de operações lógicas totalmente ópticas.

1.2.1 *Objetivos específicos*

- Gerar modelo computacional para análise das configurações propostas para os interferômetros de Mach-Zehnder;

- Estudar a transmissão de energia no interferômetro de Mach-Zehnder triplo de configuração planar;
- Estudar utilizando a modulação PAM no interferômetro de Mach-Zehnder triplo de configuração planar para obtenção de operações lógicas;
- Comparar e analisar as operações lógicas obtidas em outros trabalhos na literatura.

1.3 Organização da dissertação

Esta dissertação está estruturada em 6 capítulos na seguinte sequência:

- 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 à 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*. Destaca-se o funcionamento de um acoplador óptico e interferômetro de Mach-Zehnder. Aborda-se o método de modulação de sinais utilizado neste trabalho: modulação por amplitude de pulso (PAM);
- Capítulo 3 – Revisão Bibliográfica: traz uma revisão dos estudos sobre o interferômetro de Mach-Zehnder convencional e de três núcleos e em fibra de cristal fotônico, mostrando uma variedade de aplicações em que esse dispositivo pode ser empregado: regime linear e não linear, portas lógicas e sensoriamento para 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 configurações de perfis de propagação baseada na equação não linear generalizada de Schrodinger no MZI triplo em fibra de cristal fotônico, utilizando uma entrada como bit de controle e com modulação PAM, obtidos a partir de simulação numérica. Apresenta-se aplicação do MZI – PCF triplo, utilizando entrada de bit de controle na implementação de operações lógicas totalmente ópticas;

- Capítulo 6 – Conclusão: descreve as considerações finais e uma conclusão geral, ressaltando os principais resultados deixados durante este trabalho de mestrado. Por fim, sugestões para trabalhos futuros são apresentadas no referido capítulo.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, apresenta-se uma fundamentação teórica para concepção da pesquisa desta dissertação. Diante disso, são definidas as notações, os principais conceitos de fibra de cristal fotônico, acopladores, interferômetros e modulação, com as devidas equações básicas de alguns desses modelos, as quais são utilizadas na simulação ao longo desta dissertação.

2.1 PCF – Fibra de Cristal Fotônico

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 (AGRAWAL, 2014). A fibra de cristal fotônico – *photonic crystal fiber* (PCF) é um arranjo periódico estruturado longitudinalmente numa fibra óptica. Normalmente, são feitas de combinações de materiais ópticos, como sílica pura, sílica dopada, ar, líquidos e gases (FRANCISCO, 2004).

Segundo Sodre (2010), a primeira fibra de cristal, fabricada em 1996, foi constituída por núcleo de sílica, e a casca composta por furos de ar em disposição triangular. Nesse sistema, a luz é guiada pelo processo de reflexão interna total sendo considerado o núcleo com índice de refração da sílica e a casca com índice de refração dado pela média ponderada dos índices de refração da sílica e do ar, de acordo com a intensidade do campo em cada região do arranjo periódico.

Na Figura 1, é apresentada a estrutura proposta pelo autor Francisco (2004), por meio da qual se pode observar a região considerada como núcleo e a região considerada como casca.

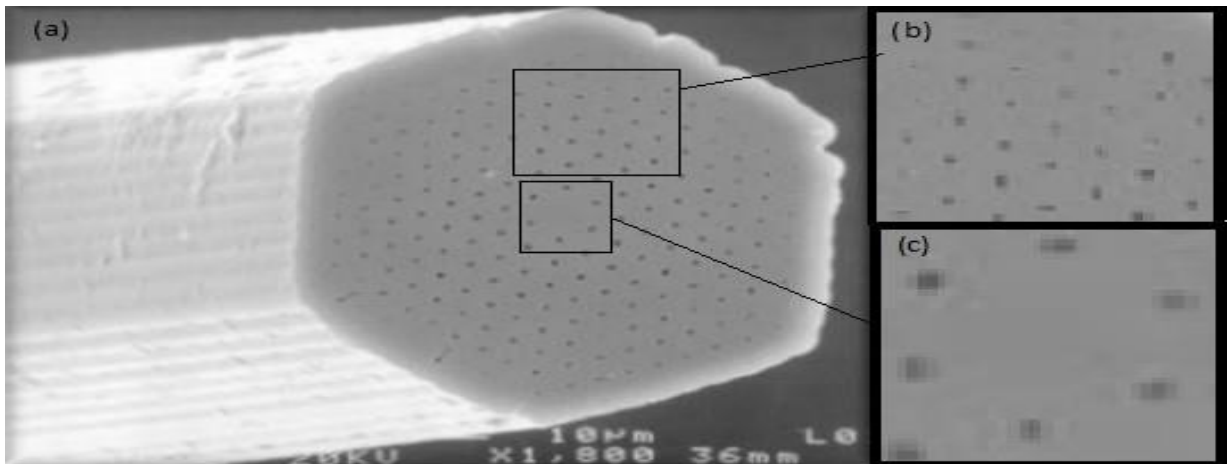


Figura 1 – (a) Seção transversal de uma fibra de cristal fotônico. (b) Seção de uma região da casca. (c) Seção da região considerada como núcleo. Fonte: (FRANCISCO, 2004).

No modelo anterior, o índice do núcleo é maior que o da casca, por isso, considera-se o processo Reflexão Interna Total (RIT). Entretanto, podem-se obter fibras de cristal fotônico, considerando o núcleo da fibra com índice de refração menor que a estrutura em volta. Um exemplo desse modelo seria utilizar o núcleo oco, com ar, envolto com um arranjo periódico.

Nesse modelo de PCF, não se utiliza o modelo de RIT, mas sim o modelo de *band gap* fotônico – PBG (*Photonic Band gap*). Devido à grande intensidade no centro do núcleo, é possível sua utilização para estudos e aplicações que envolvam a interação entre luz e óptica não linear.

O motivo da utilização de PCF nas pesquisas se dá pelo seu confinamento ideal de campos eletromagnéticos em guias de onda. As características das propriedades das fibras ópticas convencionais com as dos cristais fotônicos são combinadas nas PCF, em que suas propriedades se diferenciam das fibras tradicionais.

Atualmente, as fibras PCF estão sendo utilizadas para desenvolvimento de sistemas e dispositivos para telecomunicações, desenvolvimento de sensores ópticos, entre outros. Além disso, frequentemente, elas têm sido utilizadas em estudos de dispositivos de chaveamento, como acopladores e interferômetros totalmente ópticos – como em estudos de Azad e Islam (2010), Koys *et al.* (2013) e Francisco (2004).

Uma característica importante de uma fibra de cristal fotônico está na geometria e na disposição de seus núcleos, com a possibilidade da estrutura da PCF ter vários núcleos como guia.

Em trabalhos como os de Uthayakumar, Raja e Porsezian (2013), apresenta-se um esquema clássico de configurações de geometria triplo planar e triangular, ilustrado pela Figura

2, em que os números 1, 2 e 3 representam os núcleos de cada guia. Os parâmetros considerados para essas estruturas são o diâmetro do furo de ar (d) para a constante de passo (Λ) e separação entre núcleos ($C=2\Lambda$).

Para um PCF triplo, o diâmetro do núcleo (D_c) é igual ao diâmetro do furo de ar ($D_c=d$).

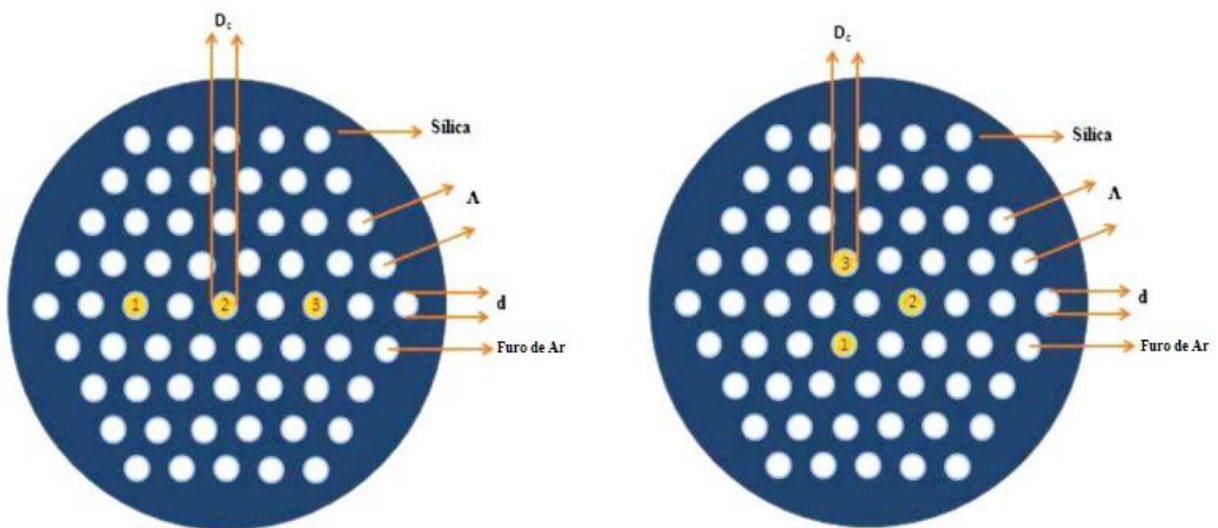


Figura 2 – Esquemático das fibras de cristal fotônico planar e triangular respectivamente. Fonte: adaptada de Uthayakumar, Raja e Porsezian (2013).

Para este trabalho, foi definida uma PCF de três núcleos de furo de ar com propagação baseada no efeito de RIT e de configuração de geometria planar.

2.2 Efeitos não lineares na propagação de luz em fibra ópticas

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

- 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 χ^3 não dependerá da variação temporal que a propagação está submetida. Essa aproximação elimina a parcela de influência das vibrações moleculares.
- Aproximações que restringem derivadas e efeitos de ordem superior como $\frac{\partial^3 A(z,t)}{\partial t^3}$.

A equação obtida, aplicando as considerações feitas até agora, é definida como Equação Não Linear de Schrodinger (ENLS) devido a sua semelhança com a equação de Schrodinger para a mecânica quântica:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} A = i\gamma |A|^2 A, \quad (2.1)$$

Na equação (2.1) acima, $A = A(z,t)$ é amplitude de pulso propagado na fibra e α é o coeficiente de atenuação.

A ENLS descreve o comportamento de pulsos com largura temporal mínima de 1 ps, com amplitude de pulso variando lentamente com o tempo e o 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 (2.1).

A generalização da equação (2.2) exige mais um conjunto de considerações apresentadas por Agrawal (2001):

- Inclusão do termo proporcional a β_3 , que implica num pulso com largura espectral ≤ 100 fs, fazendo com que a condição de pulso quase monocromático seja desprezível;
- A polarização não linear varia com o tempo;
- A resposta da susceptibilidade não linear não sendo instantânea;
- Deve-se levar em consideração as respostas das 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:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \frac{1}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} + \frac{\beta_4}{24} \frac{\partial^4 A}{\partial t^4} + \frac{\alpha}{2} A = i\gamma \left[|A|^2 A + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial(|A|^2 A)}{\partial t} - T_{RA} \frac{\partial |A|^2}{\partial t} \right], \quad (2.2)$$

onde $T_R = \int_0^\infty \dot{R}(\hat{t}) d\hat{t}$ é o coeficiente do efeito Raman usado para o cálculo do efeito de espalhamento. Raman Intrapulso $i\gamma \left[-T_{RA} \frac{\partial |A|^2}{\partial t} \right]$, ω_0 é a frequência na qual o espectro do pulso está centrado.

Os outros termos referentes na (2.2) são: a dispersão de terceira ordem $-\frac{1}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial t^3}$ onde $\beta_3 = \frac{d\beta_2}{d\omega}$ e *self steepening* $i\gamma \left[\frac{i}{\omega_0} \frac{\partial(|A|^2 A)}{\partial t} \right]$.

A ENLGS (2.2) descreve com precisão fenômenos relacionados a pulsos com duração temporal mínima de 100 fs, em fibras ópticas não birrefringentes e monomodos. A seguir é apresentada a descrição de seus efeitos.

2.2.1 Atenuação

A atenuação é caracterizada pelo termo $\frac{\alpha}{2} A$ responsável pela atenuação linear na fibra óptica. Os fenômenos que causam essa atenuação são:

- absorção material, sendo a energia do pulso absorvida pelos materiais da sílica em determinados comprimentos e por impurezas do material adquirido durante a fabricação da fibra;
- espalhamento Rayleigh, o qual resulta de defeitos estruturais durante a fabricação da fibra que modifica o índice de refração pelo guia de onda;
- a ocorrência de perda por curvaturas pela estrutura da fibra óptica.

Em geral, os efeitos de atenuação causam queda exponencial da potência do pulso à medida que a distância aumenta.

2.2.2 Dispersão de velocidade de grupo (GVD – Group Velocity Dispersion)

A dispersão causa o alargamento temporal do pulso óptico, e a velocidade de grupo se refere ao modo propagado que depende da frequência, resultando no fato de que as diferentes componentes espectrais do pulso possuem distintas velocidades de grupo. O material da fibra também causa influência na GVD.

Para uma fibra óptica monomodo com comprimento L e índice de refração definido por

$$x = \begin{cases} n_1 & , r \geq a \\ n_2 & , r < a \end{cases} ,$$

sendo a o raio do núcleo, uma componente espectral específica de frequência angular leva um tempo para chegar à extremidade da fibra óptica, o qual é 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

$$\frac{\tau_g}{L} = (v_g)^{-1} = \frac{d\beta}{d\omega}, \quad (2.4)$$

onde β é a constante de propagação.

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

$$n_2 k_0 \leq \beta \leq n_1 k_0, \quad (2.5)$$

sobre k_0 o número de onda.

Definido um índice de refração modal $\bar{n}$, que é limitado pelos índices de refração do núcleo e da casca, logo: $n_2 \leq \bar{n} \leq n_1$. Assim, a constante de propagação é determinada como:

$$\beta = \bar{n} k_0 = \bar{n} \frac{2\pi f}{c} = \bar{n} \frac{\omega}{c}, \quad (2.6)$$

A partir da substituição das equações (2.3) e (2.6), tem-se:

$$v_g = \frac{c}{\bar{n}_g}, \quad (2.7)$$

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

$$\bar{n}_g = \bar{n} + \omega \frac{d\bar{n}}{d\omega}, \quad (2.8)$$

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

$$\bar{n} \simeq n_2(1 + b\Delta), \quad (2.9)$$

em que b representa o índice de refração normalizado.

A GVD é comumente quantificada pela taxa de variação do atraso de grupo em relação ao comprimento de onda por unidade de comprimento:

$$D = \frac{1}{L} \frac{d\tau_g}{d\lambda} = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{1}{v_g} \right) = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \frac{d^2\beta}{d\omega^2} = -\frac{2\pi}{\lambda^2} \left(2\frac{d\bar{n}}{d\omega} + \omega \frac{d^2\bar{n}}{d\omega^2} \right) = \frac{\lambda}{c} \frac{d^2\bar{n}}{d\lambda^2}, \quad (2.10)$$

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

Existe uma relação entre a frequência e a velocidade de grupo que altera a largura dos pulsos propagados. Esse alargamento temporal é dado por:

$$\Delta T = \frac{dT}{d\omega} \Delta\omega = \frac{d}{d\omega} \left(\frac{L}{v_g} \right) \Delta\omega = L \frac{d\tau_g}{d\omega} \Delta\omega = L\beta_2 \Delta\omega, \quad (2.11)$$

Reformulando a equação (2.11), para termos o parâmetro de dispersão de $\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}$ e $\Delta\omega = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \Delta\lambda$, a largura temporal toma a forma:

$$\Delta T = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 L \Delta\lambda = D L \Delta\lambda, \quad (2.12)$$

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

2.2.3 Dispersão de terceira ordem

Referente ao termo $-\frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial t^3}$ onde $\beta_3 = \frac{d\beta_2}{d\omega}$ 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.

2.2.4 Dispersão de quarta ordem

Descrita pelo termo $\frac{\beta_4}{24} \frac{\partial^4 A}{\partial t^4}$ onde $\beta_4 = \frac{d\beta_3}{d\omega}$, pode ocasionar alargamento com o surgimento de novos picos de pulso óptico, instabilidade modulacional e ganho de intensidade.

2.2.5 Automodulação de fase (SPM – Self-Phase Modulation)

Caracterizado pelo termo $i\gamma|A|^2A$, a automodulação de fase 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 relacionado a termos não lineares da polarização elétrica. O efeito Kerr demonstra a capacidade que algumas substâncias têm de refratar de maneira diferente as ondas luminosas quando colocadas sob ação de um campo elétrico.

A dependência do índice de refração em relação à 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*.

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 por meio dos *chirps* de frequência gerados por cada efeito.

2.2.6 Modulação de fase cruzada (XPM – Cross-Phase Modulation)

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. Além disso, destaca-se que isso 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 ocorre com 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 automodula, no XPM um pulso inicial modula o pulso vizinho.

2.2.7 Self-Steepening

O efeito de *Self-Steepening*, "autoinclinação", caracterizada na ENLGS pelo termo $i\gamma \left[\frac{1}{\omega_0} \frac{\partial(|A|^2 A)}{\partial t} \right]$, tem origem na dependência entre a velocidade de grupo e a intensidade dos pulsos propagantes (KOYS *et al.*, 2013). Esse efeito não linear também causa uma distorção espectral, deslocando o pico de amplitude para uma frequência inferior à central e causando um alargamento espectral maior no sentido das frequências superiores, sendo também responsável pelo decaimento de ordem dos sólitons.

2.2.8 Espalhamento Raman Intrapulso (IRS – Intrapulse Raman Scattering)

O efeito de espalhamento Raman intrapulso, definido pelo termo da equação (2.2) $i\gamma \left[-T_R A \frac{\partial |A|^2}{\partial t} \right]$, descreve um tempo finito de resposta para as não linearidades. Nos pulsos ultracurtos, é responsável pelo 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 (KOYS *et al.*, 2013).

2.3 Acopladores ópticos

Os acopladores em fibras, também conhecidos como acopladores direcionais, são formados basicamente por duas fibras paralelas entre si. Seus núcleos são separados por uma distância mínima d ao longo de um comprimento L_c para que possa ocorrer comutação óptica entre os guias. Seus núcleos são bastante próximos de maneira que os modos fundamentais de propagação de cada núcleo sobrepõem-se parcialmente na região da casca entre os dois núcleos. São basicamente dispositivos de duas entradas e duas saídas que dividem fisicamente o feixe óptico. Na Figura 3, um acoplador direcional faz o chaveamento nos pulsos aplicados na porta 1, onde aparecem as portas 1 e 2 de saídas, dependendo de suas potências de pico.

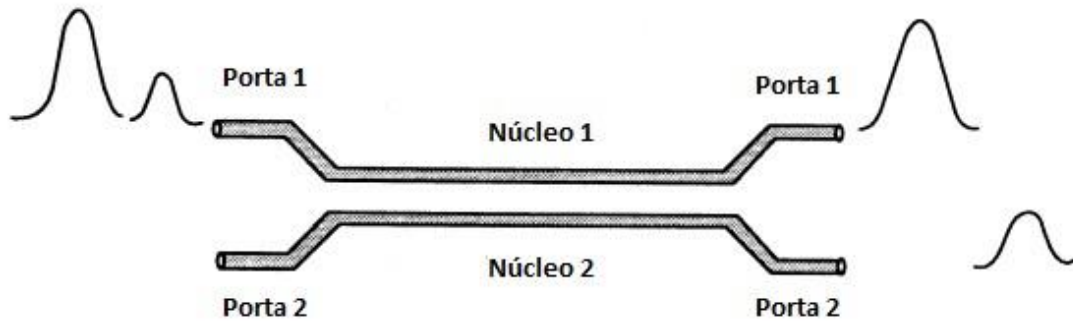


Figura 3 – Acoplador Direcional com uma ilustração esquemática do processo de chaveamento.
Fonte: adaptada de Agrawal (2001).

Devido à proximidade dos núcleos, os modos de propagação podem sobrepor-se entre a região que separa esses 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.

Para acopladores que são chamados simétricos quando seus núcleos são idênticos em todos os aspectos, nos casos de baixa energia de pulso óptico, os efeitos não lineares são desconsiderados, entretanto os efeitos de dispersão na fibra devem ser incluídos e podem ser escritos nas equações (2.13) e (2.14) (AGRAWAL, 2001), conforme é mostrado a seguir:

$$\frac{\partial A_1}{\partial z} + i\frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_1}{\partial T^2} = i\kappa A_2, \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial A_2}{\partial z} + i\frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_2}{\partial T^2} = i\kappa A_1, \quad (2.14)$$

onde k é a constante de acoplamento, $T = t - \frac{z}{v_g}$ e o parâmetro β_2 quantifica para efeitos da dispersão da velocidade de grupo (GVD) para cada núcleo do acoplador de fibra.

No acoplador direcional não linear, o índice de refração possui dependência linear e não linear com a intensidade do campo. Essa dependência dá origem a efeitos modulacionais como XPM e SPM. Assim, o acoplador direcional não linear pode ser equacionado de acordo com Agrawal (2001) em:

$$\frac{\partial A_1}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A_1}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A_1}{\partial t^2} - i\gamma \left[(|A_1|^2 + \eta |A_2|^2) A_1 + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial (|A_1|^2 A_1)}{\partial t} - T_{RA} \frac{\partial |A_1|^2}{\partial t} \right] = \kappa A_2, \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial A_2}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A_2}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A_2}{\partial t^2} - i\gamma \left[(|A_2|^2 + \eta |A_1|^2) A_2 + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial (|A_2|^2 A_2)}{\partial t} - T_{RA} \frac{\partial |A_2|^2}{\partial t} \right] = \kappa A_1, \quad (2.16)$$

Os pulsos regidos pela ENLGS para o modo acoplado de (2.15) e (2.16) descrevem a interação dos pulsos entre 2 guias de ondas com os efeitos de XPM e SPM.

Embora o interesse deste trabalho incida nos acopladores de três núcleos de PCF com efeitos não lineares, nas simulações, com adição de efeitos lineares, são utilizadas as equações ENLGS de modo acoplado de 2 núcleos, devido à interação dos guias na geometria planar permitirem um comportamento semelhante.

2.4 Interferômetro Mach-Zehnder

O interferômetro de Mach-Zehnder (*Mach-Zehnder Interferometer* – MZI) feito em fibra óptica é construído por meio da conexão entre dois acopladores em série, como na Figura 4. O primeiro acoplador divide o sinal de entrada em duas partes que adquirem diferentes deslocamentos de fase em cada braço. Se os comprimentos do braço são diferentes, antes dos sinais interferem novamente no segundo acoplador.

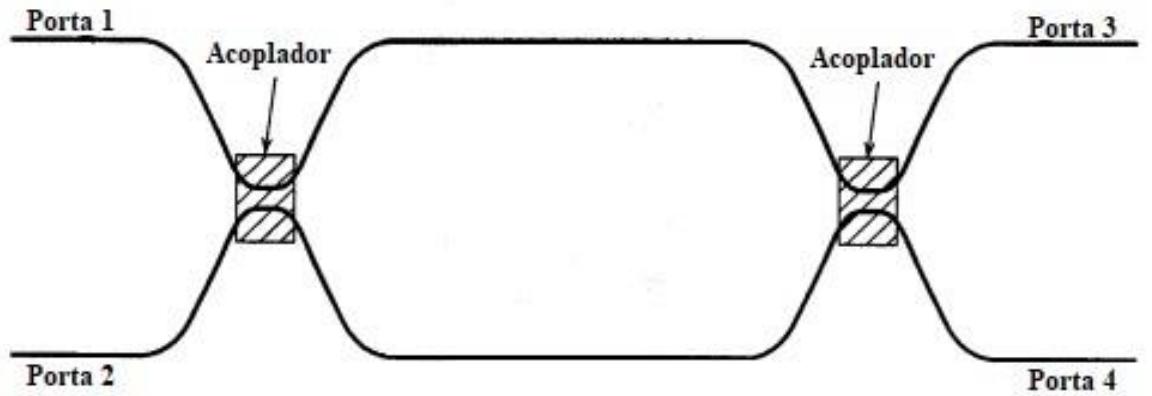


Figura 4 – Ilustração esquemática de Interferômetro de Mach-Zehnder de 2 entradas e 2 saídas. Fonte: adaptado de Agrawal (2001).

O MZI é determinado por uma diferença de fase em um de seus braços, essa diferença de fase pode ser obtida diferenciando as distâncias entre os braços do interferômetro, dopando-se ou alterando as dimensões do núcleo da fibra de um braço em relação ao outro, incluindo um segundo dispositivo em um dos braços. Em simulações numéricas, pode-se causar uma diferença de fase genérica em um braço.

O MZI pode causar diferença de fase usando diferentes comprimentos para os seus braços, já que os campos propagantes tomam rotas separadas fisicamente. Alternativamente, é possível causar diferença de fase por meio 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 φ_L e não lineares φ_{NL} a que o sinal é submetido, as quais podem ser equacionadas de acordo com Agrawal (2001):

$$\varphi_L = \beta_1 L_1 - \beta_2 L_2, \quad (2.17)$$

$$\varphi_{NL} = \gamma P_0 [\rho_1 L_1 - (1 - \rho_1) L_2]. \quad (2.18)$$

Essas equações simplificam consideravelmente um MZI simétrico feito a partir do uso de dois acopladores de 3-dB, logo $\rho_1 = \rho_2 = 0.5$.

2.4.1 Aplicações do MZI

O MZI possui uma variedade de aplicações para dispositivos de comutação de redes e centrais, sendo uma delas a implementação de portas lógicas totalmente ópticas. É possível encontrar, na literatura, estudos com o MZI, os quais abordem a utilização de diversos pulsos ópticos (como sóliton, gaussiano e super gaussiano), cascadeamento de combinações de dispositivos ópticos (entre interferômetros, acopladores e/ou amplificadores) e arquiteturas de dispositivos ópticos (fibras, acopladores e interferômetros com diferentes características físicas).

O MZI pode ser analisado quanto às suas entradas. Um MZI de três entradas se torna relevante devido à 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 de maior complexidade.

Um estudo de Katti e Prince (2016) apresenta um sistema que tem como principal componente um MZI triplo, 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. Em outro trabalho similar, Mandal, Mandal e Garai (2015) utilizam uma configuração SOA-MZI de três entradas para implementação de portas lógicas reversíveis como porta de Toffoli e a porta de Fredkin.

Outros dispositivos que utilizam duas entradas e duas saídas, como apontado por El-Saeed *et al.* (2016), formam uma estrutura SOA-MZI, sendo sujeitos a não linearidades da utilização do amplificador óptico semiconductor (*semiconductor optical amplifier* – SOA) para pulsos gaussianos. A partir de quatro configurações, os autores obtiveram portas OR, XOR, NOR e XNOR.

Estudos utilizando efeitos não lineares também são recorrentes no interferômetro de MachZehnder, como visto em Sales *et al.* (2015), os quais estudaram numericamente a transmissão, razão de extinção *crosstalk* e fator de compressão, modificando o parâmetro de não linearidade para cenários de propagação distintos. A propagação foi regida pela equação não linear generalizada de Schrodinger para pulsos de 100fs(femtosegundo), caracterizados por uma secante hiperbólica.

2.5 Modulação

Modulação de um sinal é o processo no qual ondas eletromagnéticas carregam a informação por meio 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 a partir da fibra, sendo convertido em sinal digital ao fim da transmissão.

A maioria dos sistemas digitais de ondas de luz emprega o formato de chaveamento de mudança de amplitude *Amplitude Shift Keying* (ASK), devido ao seu uso simplificado para transmissores e receptores ópticos. O formato ASK é também conhecido como um tipo de *On-Off Keying* (OOK).

Neste trabalho, utiliza-se a modulação por Amplitude de pulso, *Pulse-Amplitude Modulation* (PAM), na modalidade ASK, com dois níveis de amplitude representados por níveis lógicos "0" e "1".

Essa modulação consiste no aumento e na diminuição da amplitude de entrada do pulso, tomando como amplitude de referência ε , que é responsável pela contabilização da modulação PAM-ASK. Nesse contexto, começando pela amplitude de referência dos pulsos ópticos, para o incremento de amplitude, a modulação representa nível lógico 1 ou bit 1, e para o decremento de amplitude, em relação à amplitude de referência, a modulação representa nível lógico 0 ou bit 0. Esse método é utilizado para qualquer etapa do processo de transmissão. Para amplitudes menores e maiores que a amplitude de referência, o pulso propagado deve representar os bits 0 e 1, respectivamente. Nas situações em que a amplitude tem o mesmo valor da amplitude de referência, o pulso está na região de fronteira sem nível lógico definido.

Na Figura 5 são ilustrados 3 exemplos de pulsos, sendo: A_{ref} o pulso de referência; A_1 o pulso com valor de amplitude equivalente a $(A_{ref} - \varepsilon)$; A_2 o pulso com valor de amplitude equivalente a $(A_{ref} + \varepsilon)$; onde A_{ref} não representa nenhum nível lógico, A_1 representa nível lógico 0 ou bit 0 e A_2 representa nível lógico 1 ou bit 1.

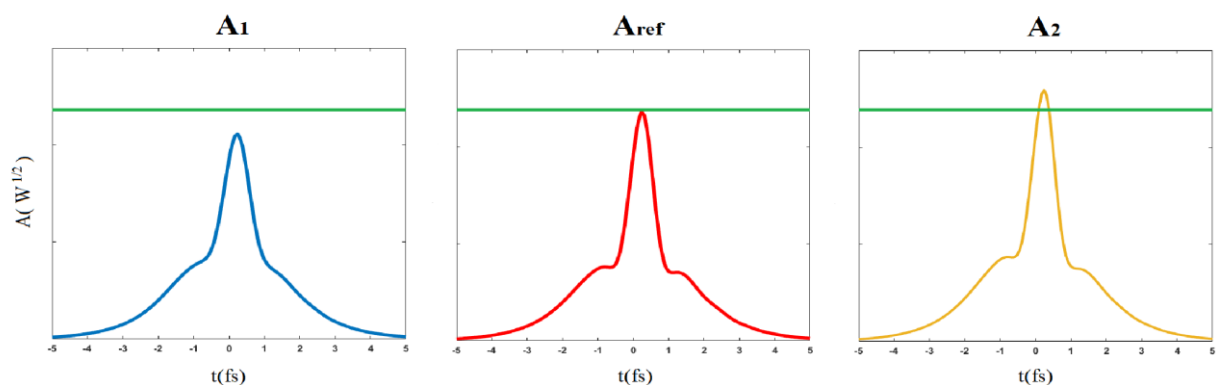


Figura 5 – Ilustração dos pulsos, sendo: A_{ref} o pulso de referência; A_1 o pulso com valor de amplitude equivalente a $(A_{ref} - \varepsilon)$; A_2 o pulso com valor de amplitude equivalente a $(A_{ref} + \varepsilon)$. Fonte: Próprio autor.

No presente trabalho, foram utilizadas, na simulação, as propagações de um pulso do tipo secante hiperbólica modulado em PAM. O pulso foi escolhido devido às características apresentadas por Uthayakumar, Raja e Porsezian (2008), ou seja, devido às características não lineares interagirem fortemente, mantendo sua identidade, além de serem capazes de transmitir informação com o mínimo de perdas.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são abordados a metodologia de pesquisa e os artigos na literatura que estudaram e aplicaram o dispositivo óptico interferômetro de Mach-Zehnder (MZI) de 2 núcleos e 3 núcleos.

3.1 Metodologia da revisão

Com a finalidade de encontrar, na literatura, estudos relacionados à linha de pesquisa deste trabalho, foram escolhidos os seguintes critérios de seleção de artigos:

1. Pesquisa de bases científicas;
2. Filtragem de artigos por método de exclusão;
3. Filtragem de artigos por leitura de resumos.

Para a pesquisa, as bases de dados utilizadas foram a Science Direct, IEEE Xplore e Web of Science.

Inicialmente, a expressão de pesquisa utilizada nas bases de dados foi: “Inteferometer Mach-Zehnder triplo” AND “Optic couplers”. Cumpre destacar que não houve resultados para esses campos, então foi decidido buscar trabalhos que utilizassem a metodologia de dispositivos ópticos com intuito de gerar portas lógicas totalmente ópticas na modelagem.

O método de exclusão de artigo tem os seguintes critérios:

- Artigos publicados em até 5 anos;
- Títulos dos artigos publicados.

Após essa seleção, foi realizada a leitura dos resumos desses artigos para definir similaridades dos temas de estudo.

3.2 Artigos selecionados na revisão

O dispositivo interferômetro de Mach-Zehnder tem sido a essência de diversos estudos devido a este idealizar a possibilidade da comutação totalmente óptica sem a conversão eletro-óptica, como na utilização de sistemas de transmissão de maior complexidade e com maiores taxas de dados. A razão de ser possível é pela ação de efeitos não lineares que ocorrem durante a propagação em meios dopados ou em regime de altas potências.

Os trabalhos encontrados na literatura, os quais abordam MZI, possuem vários campos de estudo de modelagem. O foco dessa seleção foi para a escolha de temáticas ("subáreas?") de trabalhos que envolvessem estruturas de modelagem de MZI triplos, utilizando efeitos não lineares e dispersivos e com finalidade de geração de operações lógicas totalmente ópticas.

Em estudos relacionados à implementação de portas lógicas, diferenças mínimas entre dispositivos são suficientes para alterar a porta lógica implementada. O trabalho de Uthayakumar, Raja e Porsezian (2013) utiliza fibras de cristal fotônico de três núcleos de comutação óptica e uma grande variedade de operações lógicas, com obtenção de diversas portas lógicas OR, AND, NAND, NOR e NOT, sendo a geometria dos três núcleos da fibra de cristal fotônico dividida entre duas configurações: planar e triangular, seguindo a equação linear de Schrodinger para a propagação dos pulsos ópticos. Em continuidade, o trabalho de Uthayakumar e Raja (2018) proporcionou uma implementação de meio somador binário totalmente óptico na fibra de cristal fotônico de três núcleos, obtendo combinações de portas XOR e porta AND e diversas operações lógicas para esse modelo.

Estudos que utilizam interferômetros de Mach-Zehnder PCF, compostos de duas entradas e duas saídas, também têm implementações de portas lógicas. Com base nos trabalhos de Araújo *et al.* (2015), percebe-se que eles fizeram uma análise numérica para uma configuração MZI, constituída de um duplo núcleo de PCF por modulação PAM-ASK. Assim, obteve-se porta OR e AND para a primeira e segunda saída, respectivamente. Destacam-se também os estudos de Filho *et al.* (2018), os quais investigaram numericamente um MZI duplo constituído de PCF para modulação OOK. Em seus estudos, os autores obtiveram portas OR e XOR para pulsos de sólitons, utilizando efeitos não lineares (como SPM e XPM) efeitos dispersivos de terceira ordem.

Sales *et al.* (2017) desenvolveram, num 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 à dopagem, causando a variação de fase característica desse interferômetro. Foi utilizado um pulso sólito com largura temporal de 100 fs, esse pulso foi modulado em OOK (*On Off Keying*). As portas lógicas foram obtidas com o interferômetro submetido à 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.

Alguns trabalhos que envolvem analisar e colocar uma assimetria em um dos braços no interferômetro de Mach-Zehnder, utilizando fibra de cristal fotônico de dois núcleos, como os de Filho *et al.* (2017), apresentam a influência dos efeitos dispersivos de segunda e terceira ordens e não lineares (*SPM*, *XPM*, *self-steepening* e efeito espalhamento Raman intrapulso) para obter portas e funções lógicas totalmente ópticas, como OR, NOT, AND, XOR. A partir da simulação numérica, foram solucionadas as equações de propagação desses pulsos, utilizando o método de Runge-Kutta de quarta ordem juntamente à transformada de Fourier. Cumpre denotar que a modulação dos níveis lógicos é modulação OOK.

METODOLOGIA

Neste capítulo, são discutidos os métodos empregados, neste trabalho, para a modelagem do interferômetro Mach-Zehnder triplo feito de fibra de cristal fotônico, assim como as equações e parâmetros empregados nos algoritmos propostos para o método numérico.

4.1 Dispositivo e análise

A Figura 6 apresenta o interferômetro Mach-Zehnder triplo proposto neste trabalho, o qual apresenta um funcionamento modelado matematicamente como apresentado no capítulo 2 (Revisão Bibliográfica). O dispositivo possui dois acopladores direcionais em fibra de cristal fotônico de comprimento L . O MZI apresenta uma diferença de fase na entrada do dispositivo que causa uma defasagem no pulso antes da entrada do primeiro acoplador.

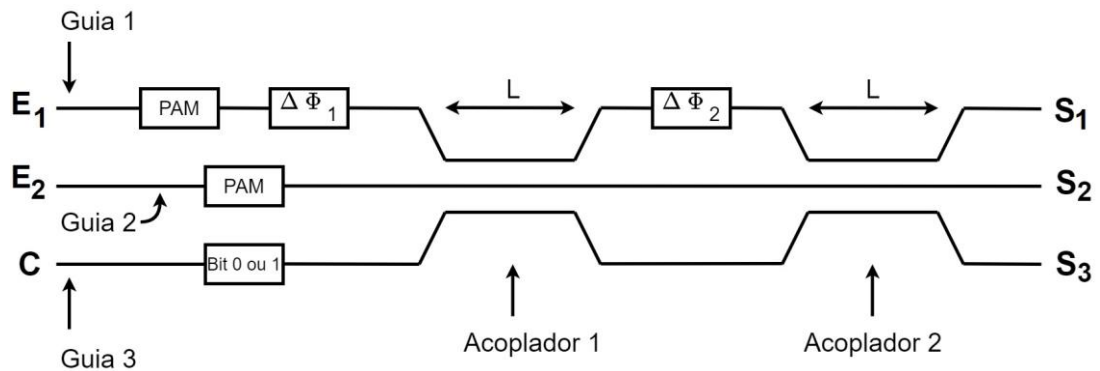


Figura 6 – Configuração do MZI proposto do trabalho. Fonte: Próprio autor

Os pulsos ópticos são inseridos na entrada E_1 , do guia 1, e em E_2 , do guia 2, no interferômetro, onde são modulados inicialmente em PAM e sofrem uma primeira diferença de fase genérica no guia 1. Também é aplicado, no guia 3, um bit de controle C , em que o pulso óptico inserido, modulado em PAM, terá características de bit "0" ou "1", independentes das outras entradas. Os pulsos interagem no primeiro acoplador e, 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 representadas pelas saídas S_1 , S_2 e S_3 .

Durante a propagação no dispositivo do acoplador, os pulsos são descritos pela equação não linear generalizada de Schrodinger para o modo acoplado, a qual descreve a interação dos pulsos entre três guias, sendo formada pelos pares de equações:

$$\begin{aligned}
 i \frac{\partial A_1}{\partial z} + \frac{i}{v_g} \frac{\partial A_1}{\partial t} - \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_1}{\partial t^2} - i \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A_1}{\partial t^3} - \frac{\beta_4}{24} \frac{\partial^4 A_1}{\partial t^4} + \frac{\alpha}{2} A_1 + \gamma(|A_1|^2 + \eta |A_2|^2) A_1 \\
 + i \frac{\gamma}{\omega} \frac{\partial |A_1|^2 A_1}{\partial t} - \gamma A_1 T_R \frac{\partial |A_1|^2}{\partial t} + \kappa_0 A_2 + i \kappa_1 \frac{\partial A_2}{\partial t} = 0,
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

$$\begin{aligned}
 i \frac{\partial A_2}{\partial z} + \frac{i}{v_g} \frac{\partial A_2}{\partial t} - \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_2}{\partial t^2} - i \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A_2}{\partial t^3} - \frac{\beta_4}{24} \frac{\partial^4 A_2}{\partial t^4} + \frac{\alpha}{2} A_2 + \gamma(|A_2|^2 + \eta |A_1 + A_3|^2) A_2 \\
 + i \frac{\gamma}{\omega} \frac{\partial |A_2|^2 A_2}{\partial t} - \gamma A_2 T_R \frac{\partial |A_2|^2}{\partial t} + \kappa_0 (A_1 + A_3) + i \kappa_1 \frac{\partial (A_1 + A_3)}{\partial t} = 0,
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

$$\begin{aligned}
 i \frac{\partial A_3}{\partial z} + \frac{i}{v_g} \frac{\partial A_3}{\partial t} - \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_3}{\partial t^2} - i \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A_3}{\partial t^3} - \frac{\beta_4}{24} \frac{\partial^4 A_3}{\partial t^4} + \frac{\alpha}{2} A_3 + \gamma(|A_3|^2 + \eta |A_2|^2) A_3 \\
 + i \frac{\gamma}{\omega} \frac{\partial |A_3|^2 A_3}{\partial t} - \gamma A_3 T_R \frac{\partial |A_3|^2}{\partial t} + \kappa_0 A_2 + i \kappa_1 \frac{\partial A_2}{\partial t} = 0,
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

Nas equações (4.1), (4.2) e (4.3), z é a distância de propagação ao longo da fibra, t é o tempo de propagação, A_1 , A_2 e A_3 são as amplitudes dos pulsos propagados em cada guia. O termo dependente de $\beta_2 : \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2}$ causa a dispersão de velocidade de grupo (GVD), o termo relativo a $\beta_3 : \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial t^3}$ é relacionado à dispersão de terceira ordem (TOD) e o termo $\beta_4 : \frac{\beta_4}{24} \frac{\partial^4 A}{\partial t^4}$ é associado à dispersão de quarta ordem, sendo que as dispersões de terceira e quarta ordem podem ser incluídas como dispersão de alta ordem. O termo κ_0 é o 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 relacionados ao parâmetro de não linearidade γ são os efeitos não lineares como: a automodulação de fase (SPM), definida por $\gamma(|A_2|^2 + \eta |A_1 + A_3|^2)A_2$, onde a variável η $i\frac{\gamma}{\omega} \frac{\partial |A|^2 A}{\partial t}$ ta a influência do efeito de modulação de fase cruzada (XPM) das outras amplitudes dos pulsos em relação à automodulação de fase; o efeito de *self-steepening* (SS) é definido por $\gamma A T_R \frac{\partial |A|^2}{\partial t}$, em que ω é a frequência angular óptica; o efeito Raman Intrapulso (IRS) é representado por $\gamma A T_R \frac{\partial |A|^2}{\partial t}$, onde T_R é o coeficiente de espalhamento Raman.

Para solucionar as equações de modo acoplado, foi utilizado o método de Runge-Kutta de quarta ordem, o qual possibilita resolver equações diferenciais ordinárias a partir de valores iniciais das equações. Com base nesse método, ocorreu a simulação no *software* MATLAB R2014a.

As entradas iniciais do código para essa simulação foram:

- Parâmetro de atenuação: $\alpha = 0$;
- Largura temporal do pulso a meia altura: $T_{FWHM} = 100\text{fs}$;
- Distância entre os núcleos da fibra: $C = 2\Lambda$;
- Diâmetro dos furos de ar dos núcleos da fibra e do acoplador PCF: $d = 2\ \mu\text{m}$;
- Distância entre os furos de ar: $\Lambda = \frac{d}{0,9}$;
- Comprimento do acoplador: $L = 1,8\ \text{cm}$;
- Comprimento de onda da luz: $1,55\ \mu\text{m}$;
- Parâmetro de dispersão de velocidade de grupo – GVD: $\beta_2 = -47 \times 10^{-27}\ \text{s}^2/\text{m}$;
- Parâmetro de dispersão de terceira ordem – TOD: $\beta_3 = 0,1 \times 10^{-39}\ \text{s}^3/\text{m}$;
- Parâmetro de dispersão de quarta ordem: $\beta_4 = 0$;
- Coeficiente de acoplamento: $\kappa_0 = 43,663\ \text{m}^{-1}$;
- Coeficiente de acoplamento dispersivo: $\kappa_1 = 4,1 \times 10^{-13}\ \text{m}^{-1}$;
- Parâmetro de não linearidade simétrico: $\gamma = 3,2 \times 10^{-3}\ \text{Wm}^{-1}$;
- Parâmetro da modulação PAM do pulso: $\varepsilon = 6\ \text{W}^{1/2}$;
- Potência de entrada: $P_0 = 4,56\ \text{kW}$.

Foram considerados os pulsos modulados inicialmente da forma:

$$A_1(z,t) = (A_0 + \varepsilon) \operatorname{sech}(\tau), \quad (4.4)$$

$$A_2(z,t) = (A_0 - \varepsilon) \operatorname{sech}(\tau), \quad (4.5)$$

$$A_3(z,t) = (A_0 - \varepsilon) \operatorname{sech}(\tau), \quad (4.6)$$

onde $A_0 = \sqrt{P_0}$ será caracterizado na análise de transmissão de energia dos pulsos que assumirá valores lógicos. Também a partir de A_0 é possível definir amplitude de referência como:

$$A_{ref} = \int_{-\infty}^{\infty} |A_0|^2 dt, \quad (4.7)$$

Numericamente, a transmissão é definida em relação entre a energia do pulso de saída pela energia do pulso da referência, onde i pode assumir os valores da saída: $i = (1, 2, 3)$, assim tem-se:

$$T_i = \int_{-\infty}^{\infty} |A_i(z,t)|^2 dt - \int_{-\infty}^{\infty} |A_{ref,i}(0,t)|^2 dt, \quad (4.8)$$

Dependendo do seu nível de energia, é incrementado, no início da transmissão, ε no pulso $A_1(0,t)$ para valores lógicos "1" e decrementando $-\varepsilon$ para valores lógicos "0".

Na configuração proposta de 3 guias de fibra de cristal fotônico, de geometria planar, foi determinado um guia que tem a função de manter, em todo instante, na entrada desse guia, um pulso de estado lógico de "0" ou "1", sendo definido como Bit de controle. Enquanto os pulsos de entrada dos outros guias podem apresentar, em instantes diferentes, estados lógicos "0" ou "1", no guia do Bit de controle, o estado lógico se mantém no mesmo estado lógico ao longo da propagação.

As portas lógicas foram investigadas por meio de sinais da saída do interferômetro após definição das suas fases $\Delta\Phi_1$ e $\Delta\Phi_2$.

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.

Para fins de simulação deste trabalho, a fase $\Delta\Phi_1$ é fixada e, a partir da variação (de 0 a 2π) da fase $\Delta\Phi_2$, é escolhida uma faixa de fase para análise dos dispositivos. As portas foram analisadas para as combinações da entrada 1 (E_1), entrada 2 (E_2) e bit de controle (C). Essas combinações dependem das características e posição geométrica do bit de controle que pode assumir valores lógicos de "0" e "1". No caso da posição do bit de controle estar na entrada do guia 3, é possível considerar combinações para 2 dispositivos diferentes. Assim, para o caso do bit de controle "0" tem-se $(E_1 E_2 C) = (0 0 0)$, $(E_1 E_2 C) = (0 1 0)$, $(E_1 E_2 C) = (1 0 0)$ e $(E_1 E_2 C) = (1 1 0)$; e para o caso de "1", considera-se $(E_1 E_2 C) = (0 0 1)$, $(E_1 E_2 C) = (0 1 1)$, $(E_1 E_2 C) = (1 0 1)$ e $(E_1 E_2 C) = (1 1 1)$.

Os critérios definidos para classificar as melhores portas e operações lógicas foram: a faixa de implementação, em que uma determinada faixa de fases 2 compreende determinada operação lógica das entradas, e transmissão de energia em relação ao limiar de decisão de bit que define que transmissões positivas são consideradas Bit 1, e para transmissões negativas são consideradas Bit 0. Na Figura 7, são apresentados os principais elementos para análise gráfica das portas.

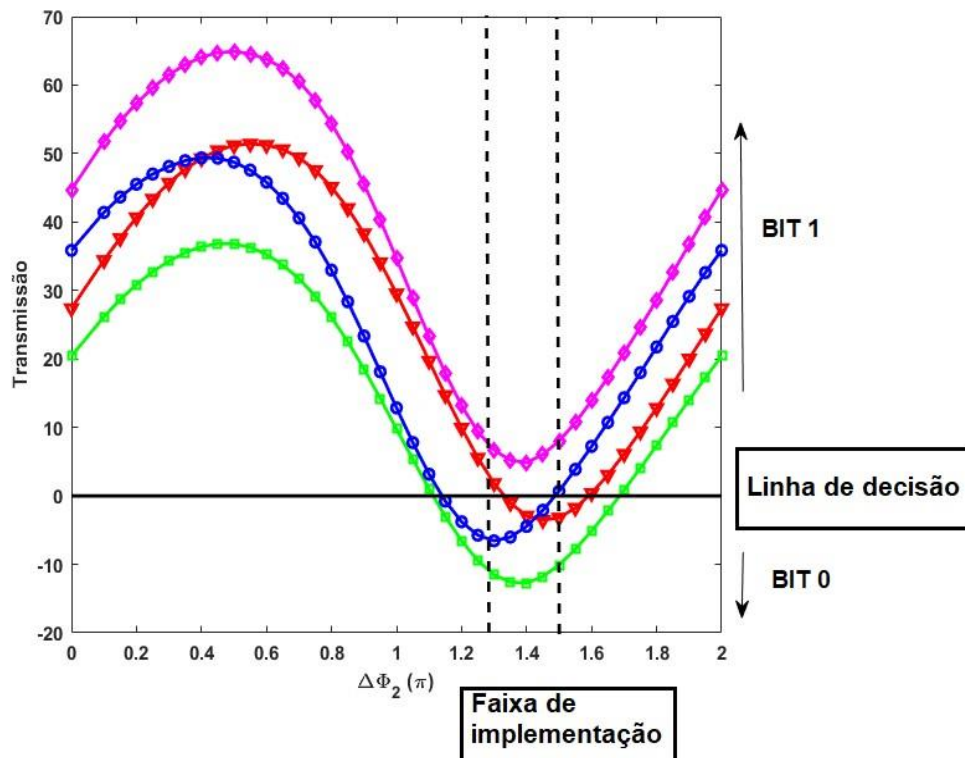


Figura 7 – Elementos gráficos na transmissão em função da diferença de fase. Fonte: Próprio autor.

A análise da faixa de implementação auxilia na redução de erros quanto aos limites da porta lógica. Portas encontradas em faixas de fase $\Delta\Phi_2$ largas apresentam maior probabilidade de escolha de uma fase específica onde os bits podem estar bem definidos em relação à linha de decisão. A transmissão de energia determina o valor de energia nas fases das portas implementadas, informando a quantidade de energia que pode ser aproveitada para transmissão do sinal.

RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados das análises dos gráficos de saída do dispositivo. Foram avaliados os resultados para as saídas dos 3 guias com o objetivo de obtenção de portas lógicas e análise de padrões. Como os dados coletados são numerosos para apresentação neste texto, foram elencados os principais resultados, especificamente, os que demonstram obtenção de portas lógicas relevantes, bem como boa razão de distinção entre níveis lógicos.

Foram realizadas simulações para diversos valores de fase de entrada 1, $\Delta\Phi_1$, e entrada de fase 2, $\Delta\Phi_2$. Para apresentação neste capítulo, foram selecionadas as fases com a maior faixa de implementação e diferentes tipos de portas lógicas obtidas. Os dispositivos propostos apresentam os parâmetros iniciais e as análises das simulações baseadas no capítulo 3 (Metodologia). Para contemplar esses resultados, foram realizadas as seguintes análises de perfil para as simulações:

- Perfil 1: Posição do bit de controle;
- Perfil 2: Nível lógico do controle de bit;
- Perfil 3: Fase de entrada;
- Perfil 4: Saídas dos guias.

5.1 Perfil 1 – Análise da influência da variação de posição do bit de controle

No perfil 1, a posição do guia de bit de controle foi alterada entre os guias 1, 2 e 3. O nível lógico do bit de controle está configurado para nível "1". Os gráficos dessas mudanças são apresentados a seguir juntamente às implementações das portas lógicas do dispositivo.

Na Figura 8 são apresentados os gráficos para o desempenho do MZI, considerando a posição do bit de controle nos diferentes guias. Foram avaliados os resultados para a saída S_2 , do guia 2, utilizando uma fase inicial de $\Delta\Phi_1 = 1,40\pi$. Para todos os gráficos foram obtidas portas lógicas totalmente ópticas tipo OR. Para o gráfico 8 a), onde o guia de controle se encontra no guia 3, com configuração E_1E_2C , a porta lógica OR foi obtida na faixa de variação de fase $\Delta\Phi_2$ que é $0,3674\pi$ até $0,5143\pi$. Para o gráfico 8 b), onde o bit de controle se encontra

no guia 2, com configuração E_1CE_2 , a porta lógica OR foi obtida na faixa de variação de fase $\Delta\Phi_2$ que é $0,3129\pi$ até $0,5897\pi$. Para o gráfico 8 c), com CE_1E_2 , onde o guia de controle se encontra à esquerda, a variação de fase $\Delta\Phi_2$ é $0,3674\pi$ até $0,4745\pi$.

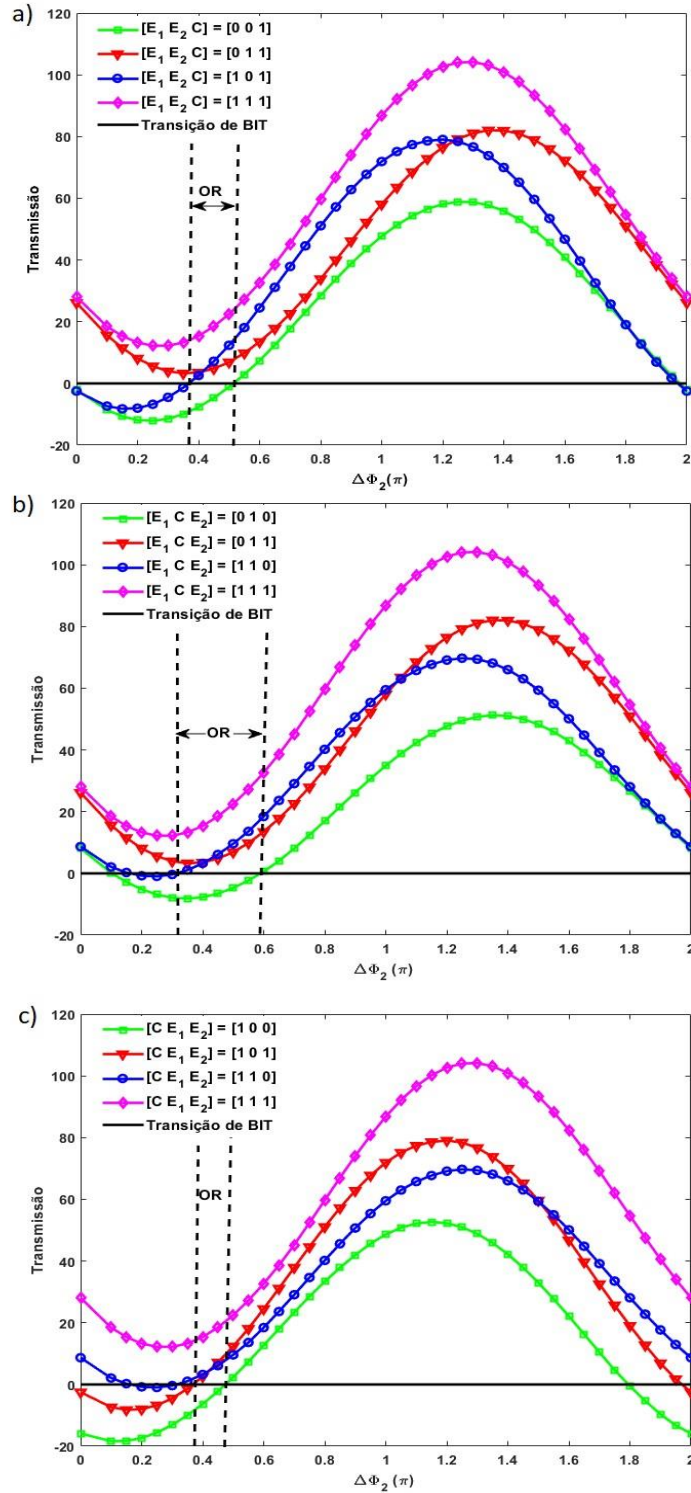


Figura 8 – Transmissão e portas lógicas em função da diferença de fase para as configurações: a) bit de controle no guia 3, b) bit de controle no guia 2, c) bit de controle no guia 1. Fonte: Próprio autor.

Os resultados obtidos para cenários de diferentes posições do bit de controle (guias 1, 2 e 3) apresentaram a mesma função lógica, especificamente a porta lógica OR, entretanto com faixas de fase $\Delta\Phi_2$ ligeiramente distintas. Destaca-se que, apesar dos resultados obtidos da posição do controle, os espectros de fase são aproximados para a porta OR da S_2 , variando apenas os espaços de fase de OR obtido.

Nas tabelas 1, 2 e 3, foram analisadas as transmissões de energia para cada caso das entradas E_1 e E_2 . A Tabela 1 apresenta a tabela verdade juntamente à transmissão de energia, considerando o ponto de fase 2 de $0,4145\pi$, que tem implementação da porta OR totalmente lógica em relação às transmissões de cada caso.

Tabela 1 – Tabela verdade e transmissão de energia para porta lógica OR de a)

E_1	E_2	S_2	T_1
0	0	0	-6,8200
0	1	1	3,9062
1	0	1	3,9062
1	1	1	16,286

Fonte: Próprio autor.

Por sua vez, a Tabela 2 apresenta a tabela verdade juntamente à transmissão de energia, considerando o ponto de fase 2 de $0,4095\pi$, o qual tem implementação da porta OR totalmente lógica em relação às transmissões de cada caso.

Tabela 2 – Tabela verdade e transmissão de energia para porta lógica OR de b)

E_1	E_2	S_2	T_1
0	0	0	-7,5063
0	1	1	3,7825
1	0	1	3,7825
1	1	1	15,9745

Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 3, apresenta-se a tabela verdade juntamente à transmissão de energia, considerando o ponto de fase 2 de $0,4193\pi$, que tem implementação da porta OR totalmente lógica em relação às transmissões de cada caso.

Tabela 3 – Tabela verdade e transmissão de energia para porta lógica OR de c)

E_1	E_2	S_2	T_1
0	0	0	-4,7375
0	1	1	4,3475
1	0	1	4,3475
1	1	1	16,5813

Fonte: Próprio autor.

5.2 Perfil 2 – Análise da influência da variação do nível lógico do bit de controle

No perfil 2, a posição do guia de controle se manteve para o guia 2, também se manteve o parâmetro $\Delta\varphi_1 = 1,65\pi$ do dispositivo, alterando apenas a entrada do equivalente lógico para bit "0" e "1", sendo analisado para saída S_1 .

Na Figura 9, são apresentados dois gráficos com uma variação de fase 1 fixada em $\Delta\Phi_1 = 1,65\pi$ para o guia 2, para lógica de bit de controle "0" e "1" para a) e b), respectivamente. Os gráficos possuem porta OR para diferentes variações de fase 2. Para o gráfico 9 a) E_1CE_2 , a variação de fase 2 é $0,6901\pi$ até $1,8371\pi$ em $\Delta\Phi_2$. Para o gráfico 9 b), a variação de fase 2 é $0,9392\pi$ até $1,9516\pi$ em $\Delta\varphi_2$.

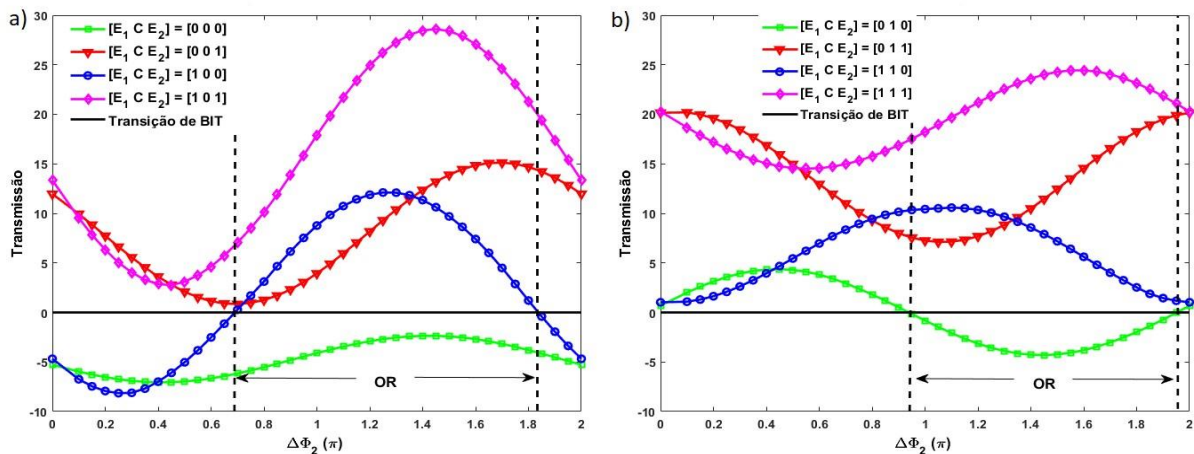


Figura 9 – Transmissão e portas lógicas em função da diferença de fase para as configurações: a) bit de controle em nível lógico "0", b) bit de controle em nível lógico "1". Fonte: Próprio autor.

Para o perfil 2, fixando os parâmetros estabelecidos, destaca-se que, para ambos os dispositivos dessas análises, mesmo apresentando faixas similares de fase 2 para implementação de portas lógicas OR, existem mudanças dos espectros de fase e energia dessas

duas transmissões. Como exemplo, na Figura 9, para os casos $E_1CE_2 = [100]$ e $[110]$, que compreendem a curva azul com símbolos de círculos para a) e b) respectivamente, no ponto de $\Delta\varphi_2 = 0.40\pi$, apresentam diferença de níveis de transmissão ao longo da fase 2, levando o caso $[100]$ a mudar o nível lógico ao longo da fase 2. Em $E_1CE_2 = [000]$ e $[010]$, representados com a curva verde, com símbolos de quadrados, percebe-se que, ao longo da fase 2 de $[010]$, existe uma mudança de nível lógico. Em outros casos, $E_1CE_2 = [001]$ e $[011]$ e $E_1CE_2 = [101]$ e $[111]$, representados pelas curvas vermelhas, com símbolos de triângulos invertidos; e rosa, com símbolos losangos, respectivamente, apesar de não haver mudança de nível lógico ao longo da fase 2, existe diferença dos níveis de transmissão. Logo, existe uma influência relevante do estado lógico do guia escolhido como controle de bit para os espectros de fase e, consequentemente, para a geração de portas lógicas.

Nas saídas S_2 e S_3 , para os parâmetros desse perfil, independentemente do nível lógico do controle de bit, não foram encontradas portas lógicas definidas, apenas expressões booleanas para esse dispositivo.

A Tabela 4 apresenta a tabela verdade juntamente à transmissão de energia, considerando o ponto de fase 2 de $1,3647\pi$, o qual tem implementação da porta OR totalmente lógica em relação às transmissões de cada caso.

Tabela 4 – Tabela verdade e transmissão de energia para porta lógica OR de a)

E_1	E_2	S_2	T_1
0	0	0	-2,4028
0	1	1	11,6915
1	0	1	11,6915
1	1	1	28,1538

Fonte: Próprio autor.

Já a Tabela 5 apresenta a tabela verdade juntamente à transmissão de energia, considerando o ponto de fase 2 de $1,3322\pi$, que tem implementação da porta OR totalmente lógica em relação às transmissões de cada caso.

Tabela 5 – Tabela verdade e transmissão de energia para porta lógica OR de b)

E_1	E_2	S_2	T_1
0	0	0	-4,0462
0	1	1	9,3360
1	0	1	9,3360
1	1	1	22,9125

Fonte: Próprio autor.

5.3 Perfil 3 – Análise das fases de entrada

No perfil 3, é discutida a influência da diferença de fase 1 na resposta dos dispositivos apresentados de resultados de fase 1, usando como base de análise a saída S_1 e o bit de controle no guia 3 em nível lógico "0".

Na Figura 10, é apresentado um gráfico da implementação da operação lógica ZERO, em que, para qualquer sinal de entrada com nível alto (bit 1) ou baixo (bit 0), sempre se terá uma saída de nível baixo, ou seja, independente das entradas lógicas, o dispositivo sempre terá essa saída S_1 de nível baixo. A operação é fixada em $\Delta\phi_1 = 0,05\pi$ e possui intervalo de variação de fase $\Delta\phi_2$ entre $1,4067\pi$ e $1,7456\pi$.

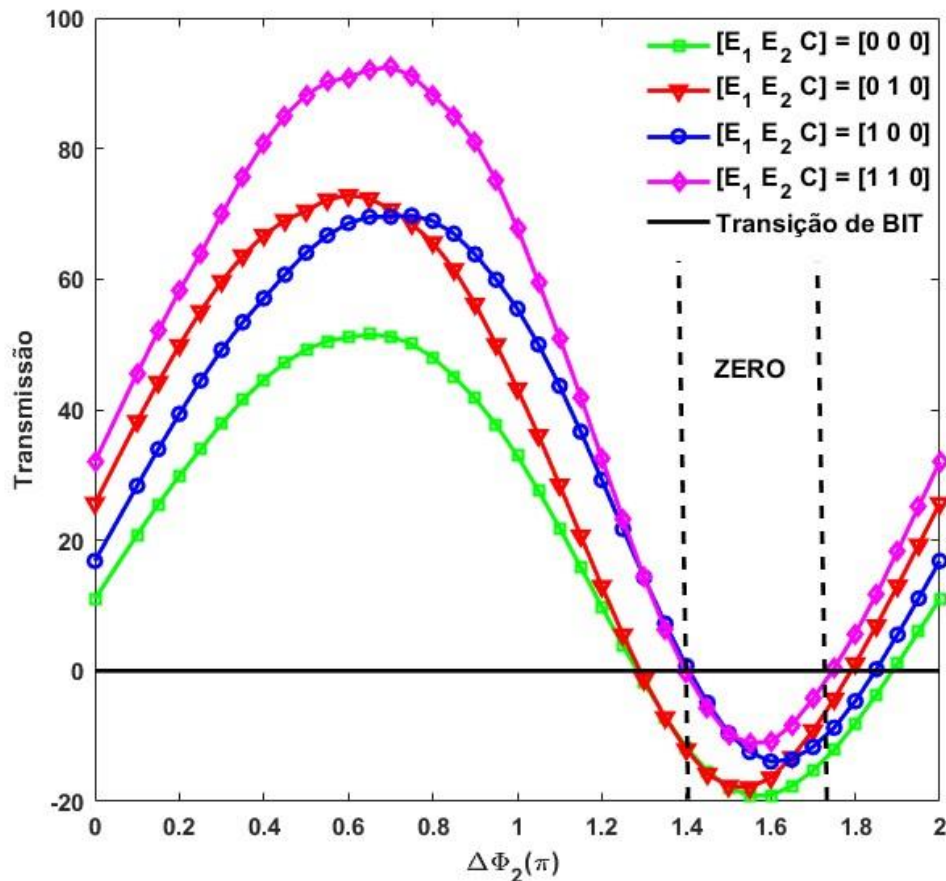


Figura 10 – Transmissão em função da diferença de fase, mostrando a conservação da energia do MZI de fase 1 - $0,05\pi$ Fonte: Próprio autor.

A Tabela 6 apresenta a tabela verdade juntamente à transmissão de energia, considerando que o ponto de fase 2 de $1,6437\pi$ apresenta os valores de transmissão para geração da operação lógica Zero obtida.

Tabela 6 – Tabela verdade e transmissão de energia para operação lógica ZERO

E_1	E_2	S_2	T_1
0	0	0	-8,5836
0	1	1	-13,6181
1	0	1	-13,6181
1	1	1	-17,8204

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 11, é apresentado um gráfico da implementação da operação lógica ZERO em toda a transmissão dos espectros de fase, devido a todos os casos possuírem uma energia na transmissão de nível "0" para $\Delta\phi_1 = 1,25\pi$.

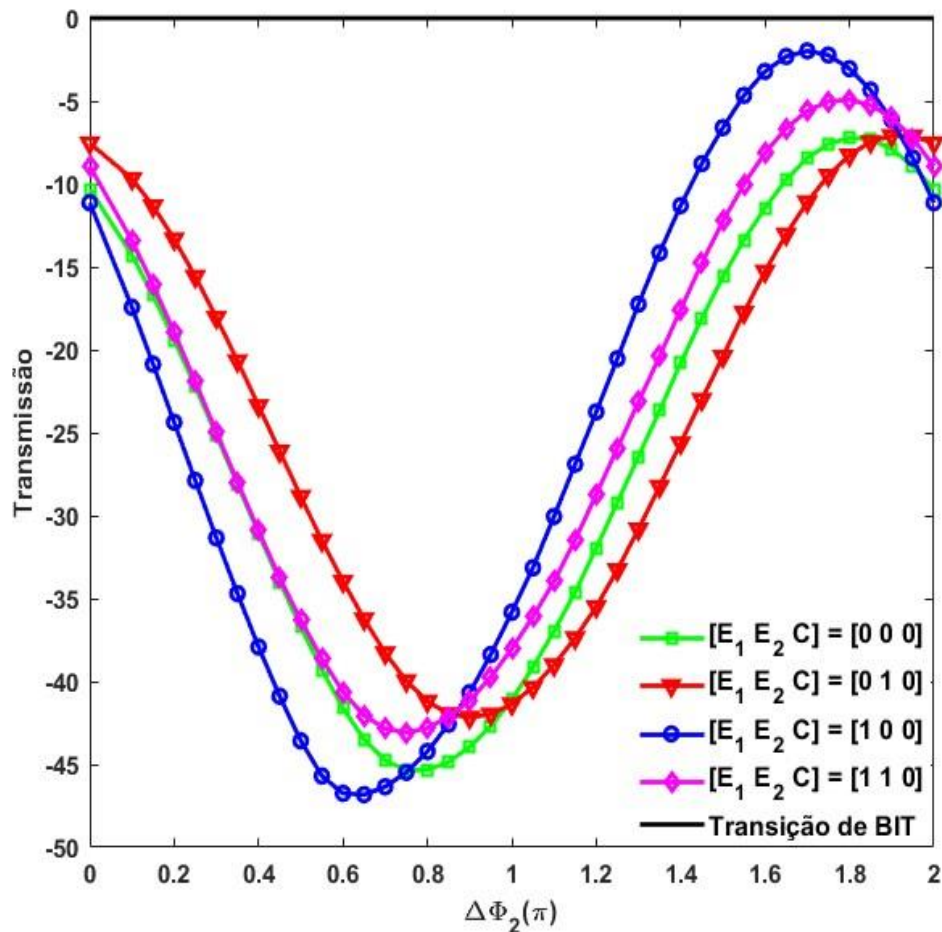


Figura 11 – Transmissão em função da diferença de fase, mostrando a conservação da energia do MZI de fase 1 - $1,25\pi$. Fonte: Próprio autor.

Na Figura 12, é apresentado um gráfico que possui uma fase 1, fixada em $\Delta\Phi_1 = 1,65\pi$. O dispositivo dispõe de uma faixa de porta OR e AND para variações da transmissão da fase 2.

Para a porta OR, a variação de fase 2 é $0,6901\pi$ até $0,9392\pi$ em $\Delta\Phi_2$. Para a porta AND, a variação de fase 2 é $1,8371\pi$ até $1,9516\pi$ em $\Delta\Phi_2$.

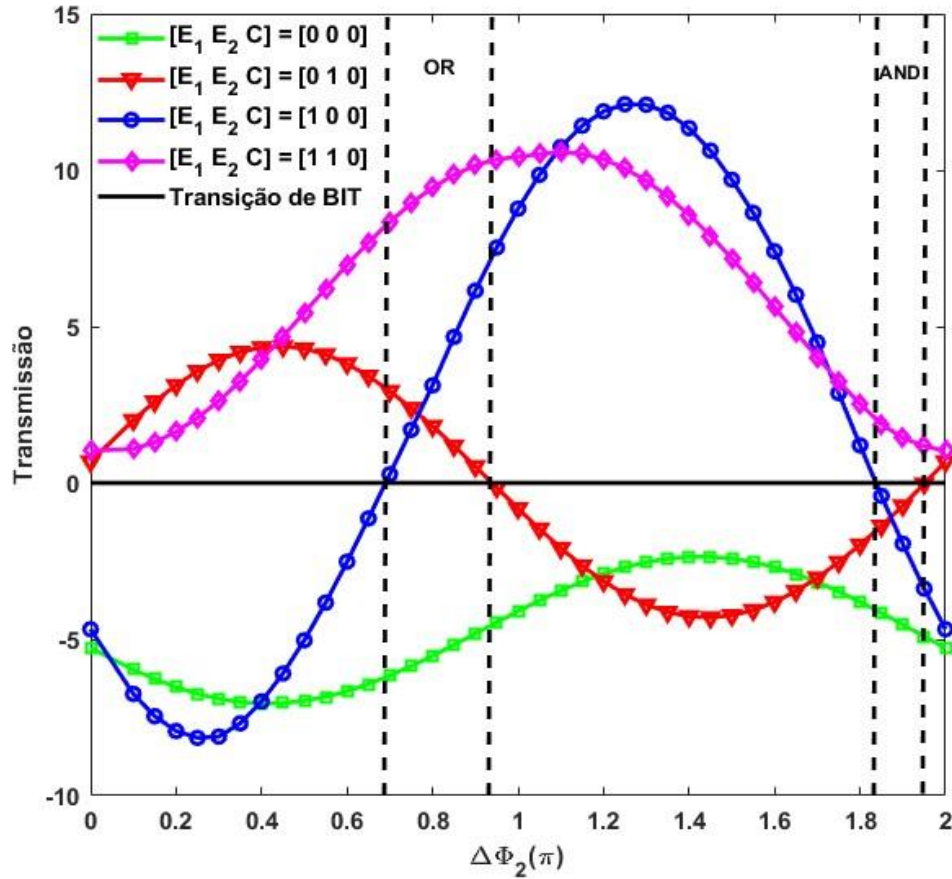


Figura 12 – Transmissão em função da diferença de fase, mostrando a conservação da energia do MZI de fase 1 - $1,65\pi$. Fonte: Próprio autor.

A Tabela 7 apresenta a tabela verdade juntamente à transmissão de energia, considerando o ponto de fase 2 de $0,7673\pi$, o qual tem implementação da porta OR totalmente lógica em relação às transmissões de cada caso. E a Tabela 8 apresenta a tabela verdade juntamente à transmissão de energia, considerando o ponto de fase 2 de $1,8721\pi$, o qual tem implementação da porta AND totalmente lógica em relação às transmissões de cada caso.

Tabela 7 – Tabela verdade e transmissão de energia para porta lógica OR

E_1	E_2	S_2	T_1
0	0	0	-5,7420
0	1	1	2,1929
1	0	1	2,1929
1	1	1	9,1143

Fonte: Próprio autor.

Tabela 8 – Tabela verdade e transmissão de energia para porta lógica AND

E_1	E_2	S_2	T_1
0	0	0	-4,3230
0	1	1	-1,0902
1	0	1	-1,0902
1	1	1	1,6862

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 13, destaca-se um gráfico que possui uma fase 1 fixada em $\Delta\Phi_1 = 1,75\pi$. O dispositivo dispõe de uma faixa de porta OR para diferentes variações de fase 2. A variação de fase 2, para obter a porta lógica OR, é de $1,7951\pi$ até $1,9502\pi$ em $\Delta\Phi_2$.

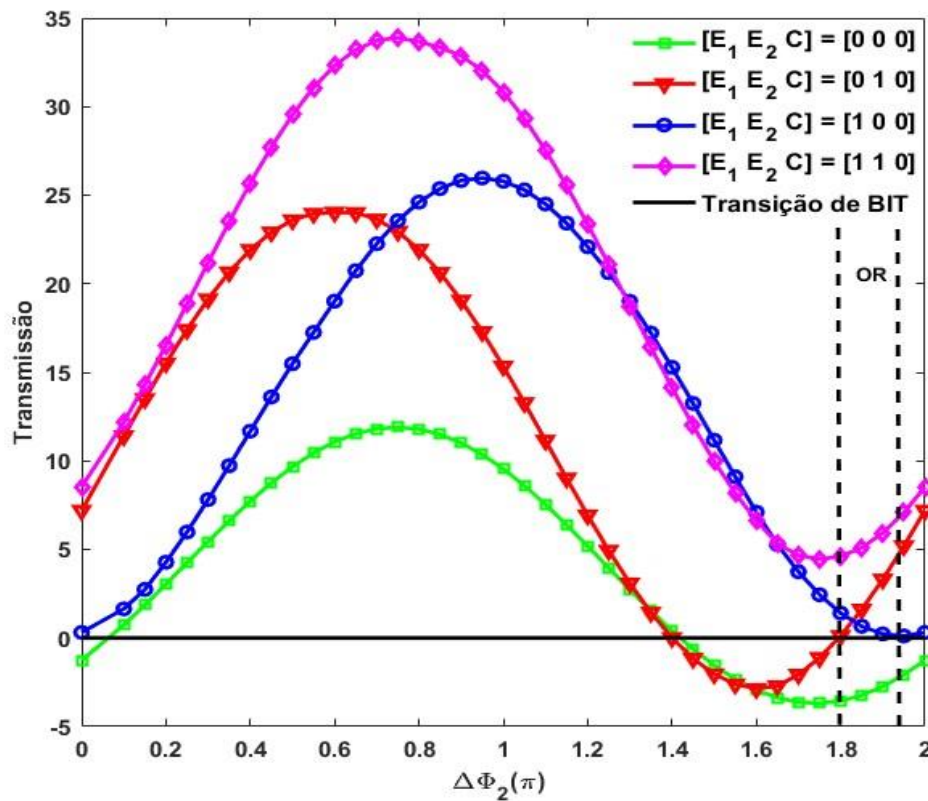


Figura 13 – Transmissão em função da diferença de fase, mostrando a conservação da energia do MZI de fase 1 - $1,75\pi$ Fonte: Próprio autor.

A Tabela 9 apresenta a tabela verdade juntamente à transmissão de energia, considerando o ponto de fase 2 de $1,8288\pi$, que tem implementação da porta OR totalmente lógica em relação às transmissões de cada caso.

Tabela 9 – Tabela verdade e transmissão de energia para porta lógica OR

E_1	E_2	S_2	T_1
0	0	0	-3,3708
0	1	1	0,9774
1	0	1	0,9774
1	1	1	4,8878

Fonte: Próprio autor.

Conclui-se que, no perfil 3, para valores de diferença de fase 1, existe uma gama de possibilidades de portas lógicas e operações lógicas, mesmo fixando os parâmetros de entrada como potência e estrutura geométrica para três guias. Casos como na Figura 12 mostram que, com apenas uma mudança de fase 2, é possível converter o dispositivo para saídas com portas lógicas OR e AND. E, em casos como na Figura 11, o dispositivo terá apenas uma operação, ou seja, porta lógica para qualquer mudança de fase 2.

5.4 Perfil 4 – Análise das saídas do interferômetro

No perfil 4, foram analisadas as saídas S_1 , S_2 e S_3 dos guias. Os gráficos dessa mudança são apresentados a seguir, juntamente às implementações das portas lógicas do dispositivo.

Na Figura 14, são apresentados os gráficos para o desempenho do MZI, considerando a posição do bit de controle no guia 1. Foram avaliados os resultados utilizando uma fase inicial de $\Delta\Phi_1 = 1,60\pi$. Apenas para o Figura 14 a) foram obtidas portas lógicas totalmente ópticas tipo AND. Para o Figura 14 a), com a configuração CE_1E_2 , a porta lógica AND foi obtida na faixa de variação de fase $\Delta\Phi_2$ que é $0,2167\pi$ até $0,8409\pi$.

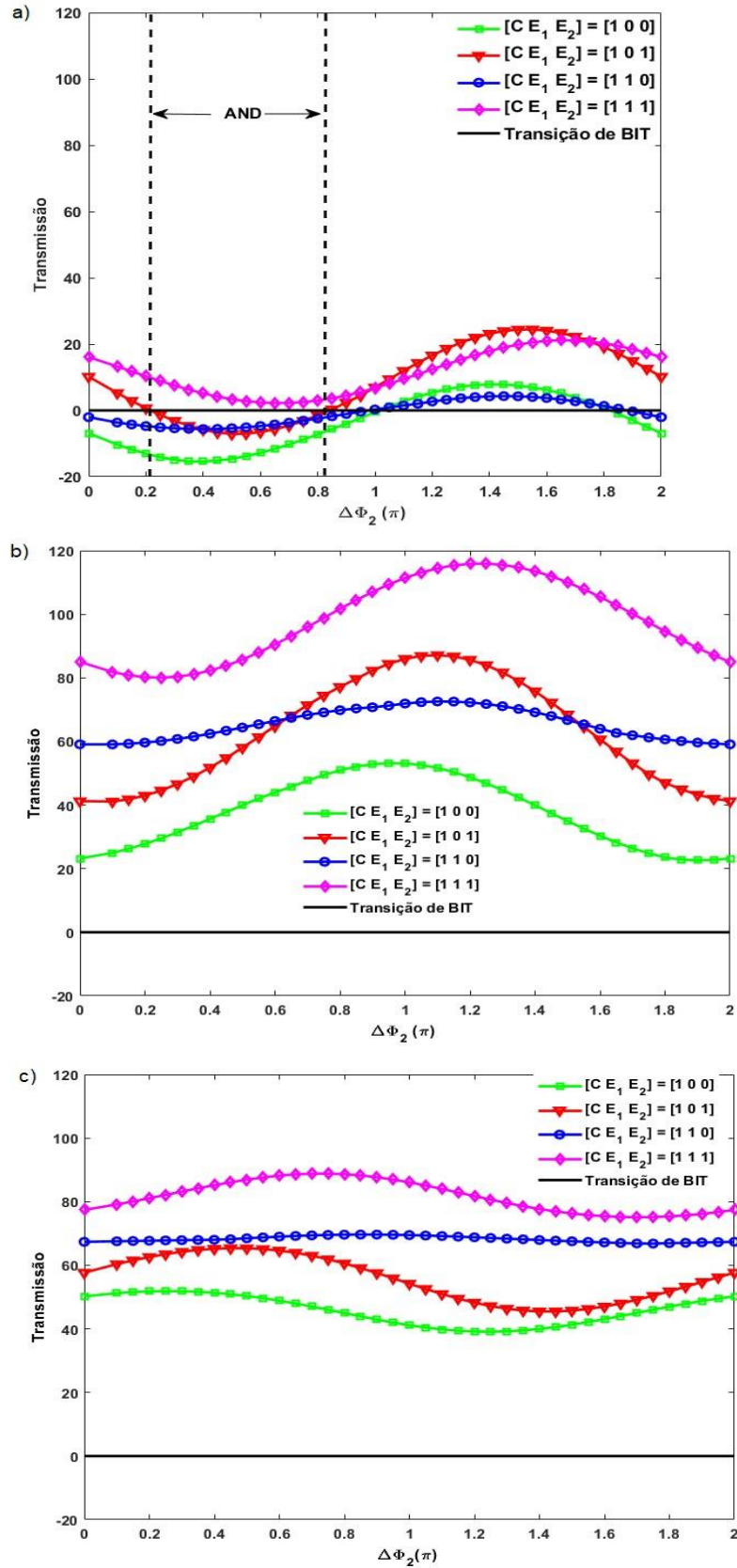


Figura 14 – Transmissão e portas lógicas em função da diferença de fase para as configurações: a) para a saída S_1 , b) para a saída S_2 , c) para a saída S_3 . Fonte: Próprio autor.

Pela comparação de cada saída, existe uma distribuição de energia distinta e notável entre as saídas guias. O gráfico a) da Figura 14 possui um baixo índice de energia na transmissão do dispositivo na saída S_1 , em comparação às outras duas saídas para essa configuração. Entretanto, para essa configuração analisada, foi exatamente na saída onde está o guia, o qual recebe o controle, que foi obtida uma faixa de implementação para uma porta lógica AND totalmente lógica. Isso demonstra o comportamento complexo do dispositivo, devido a efeitos lineares e não lineares que são considerados.

Para as saídas S_2 e S_3 , os níveis de transmissão de cada caso ultrapassam sempre a linha de decisão para bit 1. Para a análise desse tipo de perfil das possíveis saídas para os outros parâmetros de fases iguais, foi bastante comum que duas saídas não apresentassem nenhuma implementação de portas lógicas devido aos valores de todos os casos estarem sempre acima, bit 1, ou abaixo, bit 0, da linha de decisão.

Os valores da implementação de um dispositivo com porta lógica totalmente óptica, AND na saída S_1 , são sintetizados na Tabela 10, considerando o ponto de fase 2 de $0,3904\pi$, o qual tem implementação da porta AND totalmente lógica em relação às transmissões de cada caso.

Tabela 10 – Tabela verdade e transmissão de energia para porta lógica AND de a)

E_1	E_2	S_2	T_1
0	0	0	-15,4047
0	1	1	-5,6064
1	0	1	-5,6064
1	1	1	5,3578

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 11 apresenta um resumo das implementações de portas lógicas e outras operações com suas respectivas variações de fase para cada análise dos perfis para modelos de MZI - PCF Triplo de geometria planar, levando em consideração de parâmetros de posição e nível lógico do Bit de controle, sua saída e diferenças de fase em cada caso apresentando.

Tabela 11 – Compilação das portas lógicas implementadas para as configurações consideradas neste trabalho e suas respectivas fases de análise

Porta Lógica	Perfil do MZI	Posição do Controle de Bit	Controle de bit	Saída	$\Phi 1$	$\Phi 2$
OR	1	E1E2C	1 bit	S2	$1,40\pi$	$0,4145\pi$
	1	E1CE2	1 bit	S2	$1,40\pi$	$0,4095\pi$
	1	CE1E2	1 bit	S2	$1,40\pi$	$0,4193\pi$
	2	E1CE2	0 bit	S1	$1,65\pi$	$1,3647\pi$
	2	E1CE2	1 bit	S1	$1,65\pi$	$1,3322\pi$
	3	E1E2C	0 bit	S1	$1,65\pi$	$0,7673\pi$
	3	E1E2C	0 bit	S1	$1,75\pi$	$1,8288\pi$
AND	3	E1E2C	0 bit	S1	$1,65\pi$	$1,872\pi$
	4	CE1E2	1 bit	S1	$1,60\pi$	$0,3904\pi$
ZERO	3	E1E2C	0 bit	S1	$0,05\pi$	$1,6437\pi$
	3	E1E2C	0 bit	S1	$1,25\pi$	0

Fonte: Próprio autor.

A porta OR é a com maior índice de implementação pelo dispositivo quando consideradas as configurações apresentadas. Em relação à possibilidade de implementações de mais de uma porta, o dispositivo da figura 12 apresenta dois pontos de implementação diferentes, com apenas uma mudança de fase 2, para as portas lógicas OR e AND.

CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram apresentados vários dispositivos MZI compostos de acopladores de fibra de cristal fotônico de três núcleos de geometria planar para obtenção de portas lógicas totalmente ópticas com entrada de lógica de controle por meio de simulação numérica. Para cada perfil, foram analisadas configurações utilizando a entrada de bit de controle.

O primeiro perfil apresentou uma configuração que compara a influência da mudança do guia na geometria planar da entrada do bit de controle, onde foram implementadas portas lógicas OR de diferentes faixas de implementação.

O segundo perfil apresentou uma configuração que compara a influência da alteração do nível lógico da entrada de controle. Nele, foram implementadas portas lógicas OR, com diferenças de transmissão de energia.

Analisando os perfis 1 e 2, houve comportamentos diferentes da modificação da entrada do bit de controle em relação às suas saídas em cada configuração, comprovando, assim, a influência da utilização do bit de entrada de controle para possibilitar encontrar outras portas lógicas num dispositivo MZI - PCF de três núcleos.

O terceiro perfil apresentou uma configuração que altera as fases de entrada dos acopladores para demonstrar como foram feitas as análises para encontrar as possíveis portas lógicas. Aqui, o dispositivo estudado permitiu a obtenção de diferentes portas lógicas, como OR e AND, além de função ZERO, que pode atuar como um dispositivo bloqueador de sinal ou chave óptica no circuito.

O quarto perfil apresentou uma configuração padrão de 3 saídas de um dispositivo MZI para os mesmos parâmetros, demonstrando que nem toda saída vai possuir implementações de portas e funções lógicas. Ainda assim, é possível encontrar implementações de portas lógicas, como a porta AND desse perfil estudado.

Os dispositivos propostos apresentam distinções em relação a outros trabalhos quanto ao tipo de fibra utilizada, geometria, modulação, configuração de entrada de controle e demais efeitos utilizados. Alguns trabalhos utilizam efeito eletro-óptico, outros utilizam efeitos de ganho não lineares por meio de amplificadores ópticos semicondutores ou ainda transmissão em regime de baixa potência. O presente trabalho apresenta um dispositivo totalmente em PCF

com regime de alta potência, a arquitetura proposta dispensa dispositivos eletrônicos complementares, aumentando a eficiência e vida útil do dispositivo.

Os resultados apresentados levam a concluir que o dispositivo MZI - PCF triplo, com entrada lógica de controle, pode modificar a transmissão de energia e o comportamento do pulso com a alteração da diferença de fase, bem como os efeitos não lineares, potência e geometria da disposição da entrada de controle. Essas alterações conduzem mudanças na comutação óptica do dispositivo, o que pode gerar a implementação de portas e funções lógicas, mudando a configuração da geometria e/ou nível lógico da entrada de controle.

6.1 Trabalhos futuros

- implementação de operações lógicas, utilizando interferômetro triplo de geometria planar com guia de controle sob modulação OOK e PPM;
- implementação de operações lógicas, utilizando interferômetro triplo de geometria triangular com guia de controle sob modulação OOK, PAM e PPM;
- utilizar métodos matemáticos de inteligência artificial, como *Machine Learning*, para implementar operações lógicas em dispositivos MZI de 2 entradas e 3 entradas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRAWAL, Govind P. **Applications of Nonlinear Fiber Optics**. San Diego: Academic Press, 2001.

AGRAWAL, Govind P. **Sistemas de comunicação por fibra óptica**. San Diego: Academic Press, 2014.

AKYILDIZ, Ian F; JORNET, Josep Miquel; HAN, Chong. Terahertz band: Next frontier for wireless communications. **Physical communication**, Elsevier, v. 12, p. 16-32, 2014.

ARAÚJO, Antônio; OLIVEIRA, Antônio; MARTINS, Francisco; COELHO, Amarílio; FRAGA, Wilton; NASCIMENTO, José. Two all-optical logic gates in a single photonic interferometer. **Optics Communications**, [S. l.], v. 355, 2015.

AZAD, M.A. Khayer; ISLAM, M.S. Impact of xpm in wdm fiber-optic transmission system in presence of second order gvd. **International Conference on Electrical and Computer Engineering**, v. 10, 2010.

BLESSAN, Tony Mathew; VENKATESWARAN, C.; YOGESH, N. All-optical terahertz logic gates based on coupled surface plasmon polariton sub-wavelength waveguiding in bulk dirac semimetal. **Optik**, [S. l.], v. 257, p. 168795, 2022. Disponível em: <https://www.science-direct.com/science/article/pii/S0030402622001978>. Acesso em: 23 mar. 2022.

EL-SAEED, Eman M.; EL-AZIZ, Ahmed Abd; FAYED, Heba A.; ALY, Moustafa H. Optical logic gates based on semiconductor optical amplifier mach–zehnder interferometer: design and simulation. **Optical Engineering**, [S. l.], v. 55, 2016.

FILHO, G.S.B.; CORREIA, D.G.; FRAGA, W.B. de; 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**, [S. l.], v. 97, 2017.

FILHO, G. S. B; MARTINS, F. L. B; JUNIOR, M. F; ARAÚJO, A. A. R; NASCIMENTO, J. C; COELHO, A. G; FRAGA, W. B de. All-optical logic gates and boolean expressions in a photonic mach–zehnder interferometer. **Journal of Optical Communications**, [S. l.], 2018.

FRANCISCO, Carlos Alberto De. **Fibras ópticas microestruturadas: modelagem e aplicações**. 2004. 101f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Curso de Pós-graduação de Engenharia Elétrica, São Carlos, 2004.

KATTI, Rohan; PRINCE, Shanthi. All optical new 3×3 reversible logic gate using mach-zehnder interferometer. **Optical and Quantum Electronics**, [S. l.], v. 48, 2016.

- KOYS, M.; BUGAR, I.; HREBIKOVA, I.; MESAROS, V.; BUCZYNSKI, R.; UHEREK, F. Spectral switching control of ultrafast pulses in dual core photonic crystal fibre. **Journal of the European Optical Society**, [S. l.], v. 13041, n. 8, 2013.
- MANDAL, Dhoulendra; MANDAL, Sumana; GARAI, Sisir Kumar. Alternative approach of developing all-optical fredkin and toffoli gates. **Optics Laser Technology**, [S. l.], v. 72, 2015.
- NAGATSUMA, Tadao; Horiguchi, Shogo; MINAMIKATA, Yusuke; YOSHIMIZU, Yasuyuki; HISATAKE, Shintaro; KUWANO, Shigeru; YOSHIMOTO, Naoto; TERADA, Jun; TAKAHASHI, Hiroyuki. Terahertz wireless communications based on photonics technologies. **Optics express, Optical Society of America**, [S. l.], v. 21, n. 20, p. 23736-23747, 2013.
- SALES, J. C.; FILHO, A. F. G. F.; FERREIRA, A. C.; SOUSA, J. R. R.; AVILA, K. M. V.; CAVALCANTE, D. N. S.; MAGALHÃES, F. T. C. B.; SOBRINHO, C. S.; PINTO, P. V. F.; GUIMARÃES, G. F.; MENEZES, J. W. M.; COSTA, D. B.; SOMBRA, A. S. B. Mach–zehnder nonlinear interferometer in photonic crystal fibers with nonlinearity profiles. **Journal of Nonlinear Optical Physics Materials**, [S. l.], v. 24, n. 3, 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**, [S. l.], v. 94, 2017.
- SODRE, Arismar Cerqueira. Recent progress and novel applications of photonic crystal fibers. **Reports and Progress in Physics**, [S. l.], n. 73, 2010.
- UTHAYAKUMAR, T.; RAJA, R; PORSEZIAN, K. Dynamics of soliton pulse inside optical fiber. **Laser Focus World**, [S. l.], v. 45, n. 1, 2008.
- UTHAYAKUMAR, T.; RAJA, R; PORSEZIAN, K. Realization of all-optical logic gates through three core photonic crystal fiber. **Optics Communications**, [S. l.], v. 296, 2013.
- UTHAYAKUMAR, T.; RAJA, R Vasantha Jayakantha. Logic gates based all-optical binary half adder using triple core photonic crystal fiber. **Journal of Optics**, [S. l.], v. 20, n. 6, 2018.