



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

ABRAÃO HENRIQUE SALGADO ROSAL

**IMPLEMENTAÇÃO DE PORTAS LÓGICAS UTILIZANDO MODULAÇÃO PPM E
PAM EM DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE INTERFERÔMETRO DE MACH-
ZEHNDER BASEADO EM FIBRAS DE CRISTAIS FOTÔNICOS**

FORTALEZA

2019

ABRAÃO HENRIQUE SALGADO ROSAL

**IMPLEMENTAÇÃO DE PORTAS LÓGICAS UTILIZANDO MODULAÇÃO PPM E
PAM EM DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE INTERFERÔMETRO DE MACH-
ZEHNDER BASEADO EM FIBRAS DE CRISTAIS FOTÔNICOS**

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia de Telecomunicações do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - Campus Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Telecomunicações. Área de concentração: Engenharia de Telecomunicações

Orientador: Prof.^a. Dr. José Wally Mendonça Meneses.

FORTALEZA

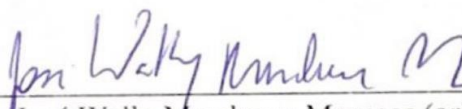
2019

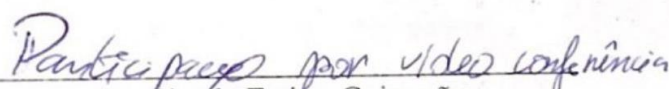


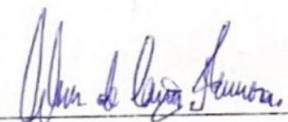
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
TELECOMUNICAÇÕES

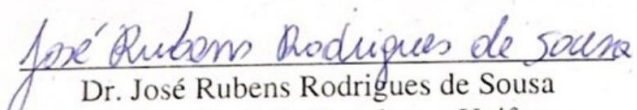
ABRAÃO HENRIQUE SALGADO ROSAL

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:


Dr. José Wally Mendonça Meneses (orientador)
Instituto Federal do Ceará - IFCE


Dr. Glendo Freitas Guimarães
Instituto Federal do Ceará - IFCE


Dr. Alisson da Conceição Ferreira
Instituto Federal do Ceará - IFCE


Dr. José Rubens Rodrigues de Sousa
Universidade de Fortaleza - Unifor


Prof. Dr. Francisco José Alves de Aquino
Coordenador do PROSET
IFCE - Campus Fortaleza

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)

- R788i Rosal, Abraão Henrique Salgado Rosal.
IMPLEMENTAÇÃO DE PORTAS LÓGICAS UTILIZANDO MODULAÇÃO PPM E PAM EM
DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE INTERFERÔMETRO DE MACH-ZEHNDER BASEADO EM
FIBRAS DE CRISTAIS FOTÔNICOS / Abraão Henrique Salgado Rosal Rosal. - 2019.
97 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Engenharia de Telecomunicações,
Campus Fortaleza, 2019.
Orientação: Prof. Dr. José Wally Mendonça Meneses. .
1. Interferômetro de Mach-Zehnder. 2. Fibra de cristal fotônico. 3. Portas lógicas. I. Título.
CDD 621.382
-

A Deus pela sua graça e presença em todos os momentos da minha vida.

Aos meus pais Ana Júlia e Alexandre, pela educação e exemplo de integridade;

Aos meus irmãos, pelo amor e companheirismo.

Aos meus filhos, Kauã Henrique, Carlos Henrique e Samuel Henrique por serem minhas maiores fontes de inspiração e motivação.

A minha companheira Ma. Stephany Emmanuely, por sempre acreditar na minha capacidade intelectual, moral e ser a minha maior encorajadora.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela sua benevolência, sempre renovando minha fé e estando presente nos momentos de glória e de atribulação, permitindo que todos meus sonhos sejam realizados em seu sábio tempo.

Ao meu orientador, Prof.^a Dr. José Wally Mendonça Meneses por toda ajuda teórica para a realização desse trabalho.

Ao Prof.^a Dr. Glendo de Freitas Guimarães, pela colaboração, se mostrando presente e entendendo todos os percalços dessa jornada, desempenhando seu papel com eficiência, sendo sua compreensão e paciência cruciais para a realização e concretização deste trabalho.

Aos integrantes do Laboratório de Fotônica IFCE em especial ao aluno de Pós-Graduação Diego Boto, Prof.^a Me. George e Prof.^a Dr. Alisson, sempre me auxiliando na realização das análises e sanando dúvidas que ocorreram no caminho.

Ao Instituto Federal do Ceará (IFCE), especialmente o Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações, pela minha formação acadêmica e agora pelo título de mestre.

À minha mãe Ana Júlia, por sempre me apoiar em todas as minhas escolhas, sendo mãe e amiga, e ao meu Pai Alexandre, por seu desempenhar no papel de pai com maestria.

Aos meus irmãos Juliana e Beatriz pela torcida, presença e amor.

Aos meus filhos Kauã Henrique, Carlos Henrique e Samuel Henrique meus maiores presentes, minha vida, minha inspiração de vida para todo o sempre.

A minha companheira Ma. Stephany Emmanuely por sempre acreditar em mim, pela ajuda e incentivo em todos os meus passos.

A todos os professores do Departamento de Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal do Ceará, por serem responsáveis pelos meus conhecimentos da minha graduação e mestrado.

Aos membros da banca por possibilitar o enriquecimento desse trabalho e pelas sugestões valiosas.

A todos que se fizeram presentes, contribuindo de alguma forma para que fosse possível a concretização desse trabalho. Os meus sinceros agradecimentos!

“A conquista compõe-se de 1% de inspiração e 99% de transpiração.”

Thomas Edison

RESUMO

Neste trabalho implementamos um dispositivo capaz de fornecer operações lógicas, totalmente ópticas, em um interferômetro de Mach-Zehnder (MZI) composto por fibra de cristal fotônico PCFs. O presente trabalho apresenta configurações distintas de interferômetros, variando entre simétrico e assimétrico. Foram considerados neste estudo pulsos ultracurtos, a análise para obtenção de portas lógicas inclui os efeitos não-lineares advindas da automodulação de fase, os efeitos dispersivos de segunda e terceira ordem, a não-linearidade proveniente de modulação de fase cruzada, espalhamento Raman intrapulso e self-steepening presentes no sistema, as perdas não foram consideradas devido ao exíguo comprimento utilizado nos acopladores (1,8 cm). Os efeitos são analisados através da equação não linear generalizada de Schrodinger (ENLGS), simulada pelo método numérico de Runge-Kutta de quarta ordem. O estudo foi realizado sob dois diferentes tipos de modulação, PPM e PAM, em ambos, os bits são definidos por pulsos do tipo secante hiperbólica com largura temporal a meia altura de 100 fs. Para a modulação PPM foram estudadas quatro configurações distintas de ϵ para o interferômetro de Mach-Zehnder proposto: na primeira configuração utilizasse um $\epsilon = 0,1$ fs, a segunda configuração apresenta um $\epsilon = 1$ fs, na terceira se tem um $\epsilon = 5$ fs e por fim, na quarta configuração utilizou-se um $\epsilon = 10$ fs, todos para um MZI simétrico. Já para a modulação PAM utilizou-se três configurações distintas, onde foram combinados interferômetros de Mach-Zehnder simétricos com assimétricos. Para a primeira configuração utiliza-se o acoplador 1 simétrico e o acoplador 2 assimétrico, a segunda configuração invertemos os acopladores em relação a primeira configuração, para a terceira utilizamos os dois acopladores assimétricos. Obteve-se com esse estudo, portas lógicas para todas as configurações propostas. Em todas as configurações do PPM foram implementadas portas lógicas do tipo OR e AND e para as configurações utilizadas no PAM foram obtidas portas lógicas do tipo OR, AND, NAND e NOR.

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

ABSTRACT

In this work we implemented a device capable of providing fully optical logical operations in a Mach-Zehnder interferometer (MZI) composed of photonic crystal fiber PCFs. The present work presents distinct interferometer configurations, ranging from symmetrical to asymmetrical. In this study, ultrashort pulses were considered, the analysis to obtain logic gates includes nonlinear effects from phase self-modulation, second and third order dispersive effects, nonlinearity from cross-phase modulation, intrapulse Raman scattering and self-steepening present in the system, losses were not considered due to the small length used in the couplers (1.8 cm). The effects are analyzed using the generalized nonlinear Schrodinger equation (ENLGS), simulated by the fourth order Runge-Kutta numerical method. The study was performed under two different modulation types, PPM and MAP, in both, the bits are defined by hyperbolic secant pulses with a temporal width at half height of 100 fs. For the PPM modulation four distinct configurations of ϵ were studied for the proposed Mach-Zehnder interferometer: in the first configuration it used a $\epsilon = 0.1$ fs, the second configuration had a $\epsilon = 1$ fs, in the third one it had a $\epsilon = 5$ fs and finally, in the fourth configuration a $\epsilon = 10$ fs was used, all for a symmetrical MZI. For the PAM modulation, three distinct configurations were used, where symmetrical with asymmetric Mach-Zehnder interferometers were combined. For the first configuration we use the symmetrical coupler 1 and the asymmetric coupler 2, the second configuration we invert the couplers in relation to the first configuration, for the third we use the two asymmetric couplers. This study provided logical gates for all proposed configurations. In all PPM configurations, OR and AND logic gates were implemented and for the configurations used in PAM, OR, AND, NAND and NOR logic gates were obtained.

Keywords: Mach-Zehnder Interferometer. Photonic crystal fiber. Logic gates.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Estrutura de uma Fibra Óptica	11
Figura 2 - Estrutura de cristais fotônicos de 1, 2 e 3 dimensões.....	12
Figura 3 - Fibras de cristais fotônicos.....	14
Figura 4 - Secção transversal de uma PCF de núcleo sólido, com ênfase na matriz e seus principais parâmetros físicos (d e Λ).	15
Figura 5 - Estruturas de Fibras de Cristais Fotônicos	16
Figura 6 - (a) Acoplador Direcional Não-linear (NLDC) com ilustração do processo de chaveamento. Os pulsos aplicados na porta 1 aparecem em portas diferentes de saída, dependendo de suas potências de pico e. (b) seção transversal do NLDC.	25
Figura 7 - Interferômetro de Mach-Zehnder em fibras ópticas.....	26
Figura 8 – Resumo de um Sistema de Comunicação.....	27
Figura 9 - Modulação OOK	29
Figura 10 – Formato NRZ e RZ para pulsos com modulação OOK.....	29
Figura 11 - Modulação PAM	31
Figura 12 - Modulação PPM.....	32
Figura 13 - Configuração do MZI proposto.....	34
Figura 14 – Gráfico para a porta lógica OR, $\Delta\Phi_1 = 0\pi$ e $\Delta\Phi_2 = 0,9\pi$. (a) Pulso óptico na saída S_1 e (b) Pulso óptico na saída S_1 aproximado.	43
Figura 15 - Gráfico para a porta lógica AND, $\Delta\Phi_1 = 1,8\pi$ e $\Delta\Phi_2 = 0,8\pi$. (a) Pulso óptico na saída S_2 e (b) Pulso óptico na saída S_2 aproximado.	45
Figura 16 - Gráfico para a porta lógica AND, $\Delta\Phi_1 = 0,2\pi$ e $\Delta\Phi_2 = 1,2\pi$. (a) Pulso óptico na saída S_1 e (b) Pulso óptico na saída S_1 aproximado.	46
Figura 17 - Gráfico para a porta lógica OR gerada para $\Delta\Phi_1 = 0\pi$ e $\Delta\Phi_2 = 0,7\pi$. (a) Pulso óptico na saída S_1 e (b) Pulso óptico na saída S_1 aproximado.	49
Figura 18 - Gráfico para a porta lógica AND, $\Delta\Phi_1 = 1,3\pi$ e $\Delta\Phi_2 = 0,8\pi$. (a) Pulso óptico na saída S_2 e (b) Pulso óptico na saída S_2 aproximado.	51

Figura 19 - Gráfico para a porta lógica OR, $\Delta\Phi_1 = 1,8\pi$ e $\Delta\Phi_2 = 1,6\pi$. (a) Pulso óptico na saída S_2 e (b) Pulso óptico na saída S_2 aproximado.	57
Figura 20 – Gráfico para a porta lógica AND para o $\Delta\Phi_1 = \pi$ e $\Delta\Phi_2 = 0\pi$. (a) Pulso óptico na saída S_1 e (b) Pulso óptico na saída S_1 aproximado.	59
Figura 21 – Gráfico para a porta lógica AND, $\Delta\Phi_1 = \pi$ e $\Delta\Phi_2 = 0\pi$. (a) Pulso óptico na saída S_2 e (b) Pulso óptico na saída S_2 aproximado.	60
Figura 22 - Gráfico para a porta lógica OR, $\Delta\Phi_1 = 0\pi$ e $\Delta\Phi_2 = 0,6\pi$. (a) Pulso óptico na saída S_1 e (b) Pulso óptico na saída S_1 aproximado.	67
Figura 23 - Gráfico para a porta lógica AND, $\Delta\Phi_1 = \pi$ e $\Delta\Phi_2 = 1,7\pi$. (a) Pulso óptico na saída S_1 e (b) Pulso óptico na saída S_1 aproximado.	69
Figura 24 - Operações lógica para a configuração, $\Delta\Phi_1 = 0,6\pi$ e $\Delta\Phi_2 = [0,8087; 0,9404]\pi$.. Porta lógica OR implementada.	75
Figura 25 - Operações lógica para a configuração, $\Delta\Phi_1 = 0,6\pi$ e $\Delta\Phi_2 = [0,8087; 0,9404]\pi$. Pulso óptico de saída.....	76
Figura 26 - Operações lógica para a configuração, $\Delta\Phi_1 = 1,55\pi$ e $\Delta\Phi_2 = [0,6327; 0,9935]\pi$. (a) Porta lógica NAND implementada (b) Pulso óptico de saída.....	77
Figura 27 - Operações lógica para a configuração, $\Delta\Phi_1 = 1,55\pi$ e $\Delta\Phi_2 = [0,6327; 0,9935]\pi$., pulso óptico de saída.	77
Figura 28 - Operações lógica para a configuração, $\Delta\Phi_1 = 1,5\pi$ e $\Delta\Phi_2 = [0,8084; 0,9404]\pi$. Porta lógica NOR implementada.	78
Figura 29 - Operações lógica para a configuração, $\Delta\Phi_1 = 1,5\pi$ e $\Delta\Phi_2 = [0,8084; 0,9404]\pi$. Pulso óptico de saída.....	78
Figura 30 - Operações lógica para a configuração, $\Delta\Phi_1 = 0,8\pi$ e $\Delta\Phi_2 = [0,8036; 0,9013]\pi$. Porta lógica AND implementada.	80
Figura 31 - Operações lógica para a configuração, $\Delta\Phi_1 = 0,8\pi$ e $\Delta\Phi_2 = [0,8036; 0,9013]\pi$.) Pulso óptico de saída.....	80
Figura 32 - Operações lógica para a configuração, $\Delta\Phi_1 = 0,3\pi$ e $\Delta\Phi_2 = [1,5756; 1,7344]\pi$. Porta lógica AND implementada.	82

Figura 33 - Operações lógica para a configuração, $\Delta\Phi_1 = 0,3\pi$ e $\Delta\Phi_2 = [1,5756; 1,7344]\pi$.
Pulso óptico de saída..... 82

Figura 34 - Operações lógica para a configuração, $\Delta\Phi_1 = 0,4\pi$ e $\Delta\Phi_2 = [1,2763; 1,5442]\pi$. (a)
Porta lógica OR implementada (b) Pulso óptico de saída..... 83

Figura 35 - Operações lógica para a configuração, $\Delta\Phi_1 = 0,4\pi$ e $\Delta\Phi_2 = [1,2763; 1,5442]\pi$.
Pulso óptico de saída..... 83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Resumo de Efeitos não Lineares em Fibras Ópticas.....	21
Tabela 2 - Quadro resumo dos principais tipos de modulação	28
Tabela 3- Termos utilizados na equação.....	35
Tabela 4 - Tabela de variáveis - Geral	37
Tabela 5- Operações lógicas obtidas.....	39
Tabela 6 - Configurações utilizadas.....	41
Tabela 7 – Números de portas lógicas implementadas para a modulação PPM.....	42
Tabela 8 - Portas lógicas geradas com ϵ de 0,1fs.....	42
Tabela 9 – Operações lógica para a configuração, $\Delta\Phi_1 = 0\pi$ e $\Delta\Phi_2 = 0,9\pi$	44
Tabela 10- Variação Δt entre os pulsos	44
Tabela 11 – Operações lógica para a configuração de $\Delta\Phi_1 = 0,2\pi$ e $\Delta\Phi_2 = 1,2\pi$ e para $\Delta\Phi_1 = 1,8\pi$ e $\Delta\Phi_2 = 0,8\pi$	47
Tabela 12 - Variação Δt entre os pulsos	47
Tabela 13 - Portas implementadas para a configuração 2.....	48
Tabela 14 - Operações lógica para a configuração de $\Delta\Phi_1 = 0\pi$ e $\Delta\Phi_2 = 0,7\pi$	50
Tabela 15- Variação Δt entre os pulsos para $\Delta\Phi_1 = 0\pi$ e $\Delta\Phi_2 = 0,7\pi$	50
Tabela 16 - Operações lógica para a configuração, $\Delta\Phi_1 = 1,3\pi$ e $\Delta\Phi_2 = 0,8\pi$	52
Tabela 17 - Variação Δt entre os pulsos.....	52
Tabela 18 - Portas lógicas geradas para o $\epsilon = 1$ fs	53
Tabela 19 - Portas lógicas implementadas para a configuração de $\epsilon = 5$ fs.....	56
Tabela 20 - Operações lógica para a configuração, $\Delta\Phi_1 = 1,8\pi$ e $\Delta\Phi_2 = 1,6\pi$	58
Tabela 21- Variação Δt entre os pulsos	58
Tabela 22 - Operações lógica para a configuração, $\Delta\Phi_1 = \pi$ e $\Delta\Phi_2 = 0\pi$	61
Tabela 23 - Variação Δt entre os pulsos.....	61

Tabela 24 - Portas lógicas geradas para o $\epsilon = 5$ fs	62
Tabela 25 - Portas lógicas implementadas para a configuração de $\epsilon = 10$ fs.....	66
Tabela 26 - Operações lógica para a configuração, $\Delta\Phi_1 = 0\pi$ e $\Delta\Phi_2 = 0,6\pi$	68
Tabela 27 - Variação Δt entre os pulsos	68
Tabela 28 - Operações lógica para a configuração, $\Delta\Phi_1 = \pi$ e $\Delta\Phi_2 = 1,7\pi$	70
Tabela 29 - Variação Δt para as saídas	70
Tabela 30 - Portas lógicas geradas para o $\epsilon = 10$ fs	71
Tabela 31 – arquiteturas propostas para o interferômetro estudado.	74
Tabela 32 – Compilação dos dados implementadas na configuração 1.....	79
Tabela 33 – Porta lógica implementada na configuração 2.	81
Tabela 34 - compilação dos dados referentes as portas lógicas implementadas na configuração 3 do interferômetro proposto.....	84

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
2. OBJETIVOS	9
2.1 Objetivo geral.....	9
2.2 Objetivos específicos.....	9
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
3.1 Fibras Ópticas.....	10
3.2 Cristais Fotônicos	11
3.3 Fibras de Cristais Fotônicos	13
3.3.1 PCF de núcleo oco com propagação baseada no efeito de reflexão interna total	17
3.3.2 PCF de núcleo oco	17
3.3.3 PCF de núcleo sólido	17
3.3.4 PCF híbrido	18
3.4 Propagação de pulso em fibras óptica	19
3.4.1 Efeitos não lineares em fibras ópticas	21
3.4.2 Equação Não-Linear de Schrödinger.....	22
3.5 Acopladores.....	24
3.6 Interferômetro de Mach-Zehnder.....	25
3.7 Modulação	27
3.7.1 Modulação ON/OFF KEYING (OOK)	28
3.7.2 PAM	30
3.7.4 PPM	31
4. METODOLOGIA.....	34
5. RESULTADOS	41
5.1 Análise realizada na modulação PPM	41
5.1.1 Configuração 1 – $\epsilon = 0,1$ fs.....	42
5.1.2 Configuração 2 – $\epsilon = 1$ fs.....	48
5.1.3 Configuração 3 – $\epsilon = 5$ fs.....	56

5.1.4 Configuração 4 – $\epsilon = 10$ fs.....	66
5.2 Análise realizada na modulação PAM.....	74
5.2.1 Configuração 1 – MZI com acoplador simétrico seguido de acoplador assimétrico	75
5.2.2 Configuração 2 – MZI com acoplador assimétrico seguido de acoplador simétrico	79
5.2.3 Configuração 3 – MZI com ambos os acopladores assimétricos	81
6. CONCLUSÃO.....	85
7. REFERÊNCIAS	87

1. INTRODUÇÃO

Em um mundo onde se busca a cada dia a integração, é de suma importância que a disponibilização, aperfeiçoamento e utilização de tecnologias da informação e da comunicação ocorram de forma rápida, eficiente e segura, o desenvolvimento de dispositivos que através de redes de telecomunicações são capazes de tratar e processar informações a velocidades cada vez maiores é imprescindível para o novo modelo de indústria e sociedade. O desenvolvimento do conceito de indústria 4.0 e de internet das coisas (*Internet of Things - IOT*), impulsionam o desenvolvimento de dispositivos capazes de operar com robustez e eficiência em sistemas remotos e cyber-físicos. A invenção do laser, a implementação de fibras ópticas, a introdução de dispositivos ópticos semicondutores, o desenvolvimento do sensoriamento óptico, dentre outros, correspondem a grandes evoluções no campo das comunicações, colocando a telecomunicações em um novo patamar.

A comunicação de dados baseada em fibras ópticas apresentam fenômenos físicos peculiares e de grande interesse na indústria moderna, tais efeitos permitem chaveamento ultrarrápido, maior largura de banda e elevada imunidade à interferência eletromagnética, tendo por essas e outras característica destaque nos últimos anos no campo das comunicações ópticas. Também é considerada a eficiência energética em sistemas totalmente ópticos, pois não há a necessidade de conversão óptico/eletro ou eletro/óptico, garantindo assim alta taxa de transmissão e confiabilidade.

O propósito de um sistema de comunicação é transmitir sinais portadores de informação através de um canal de comunicação, onde o transmissor e o receptor encontram-se em locais físicos distintos. O processo de modulação consiste numa operação realizada sobre o sinal ou dados a transmitir, ao qual produz um sinal adequado para a transmissão sobre determinado meio. A técnica de modulação permite “moldar” as características do sinal a ser transmitido e adaptá-lo às características do meio. Na modulação de pulso, alguns parâmetros do trem de pulso variam conforme o sinal da mensagem. Podemos distinguir a modulação de pulso em duas famílias: modulação de pulso analógica ou contínua, na qual a portadora é uma onda cossenoidal e o sinal modulante é um sinal analógico ou contínuo, e modulação de pulso digital ou discreta, onde a mensagem é transmitida por dois símbolos apenas, a presença de um pulso é representada pelo bit 1 e a ausência pelo bit 0. Para o presente trabalho é estudada a

modulação de pulso digital, onde o sinal de mensagem é representado em uma forma discreta tanto em termos de tempo como de amplitude, permitindo assim sua transmissão na forma digital como uma sequência de pulsos codificados.

O interferômetro de Mach-Zehnder (do inglês *Mach-Zehnder Interferometer* - *MZI*) é um dispositivo óptico que em sua forma mais simplória é composto por um arranjo de espelhos e semi-espelhos, o qual demonstra o fenômeno da interferência da luz pela divisão de um feixe luminoso. O MZI baseado em fibra óptica é formado através da ligação entre dois acopladores em série, e, tem como principais características a capacidade de acomodar comprimentos de caminhos ópticos muito longos em pequenas dimensões físicas, apresentando baixo peso e portáteis. O funcionamento de um MZI em fibra óptica ocorre com o primeiro acoplador dividindo o sinal de entrada em duas partes iguais que adquirem diferentes deslocamentos de fase em cada braço do MZI, logo em seguida ocorre uma nova interferência no segundo acoplador. O interferômetro tem sido bastante utilizado, para medir mudanças de fase entre os dois feixes causados por uma amostra ou uma mudança no comprimento de um dos caminhos, abrindo a possibilidade para a implementação em uma grande variedade de sensores, dentre os quais podemos citar, os sensores de deslocamento, pressão, rotação, aceleração, temperatura, campo magnético e elétrico, dentre outros.

Métodos numéricos são técnicas pelas quais os problemas matemáticos são formulados de maneira que possam ser resolvidos através de operações aritméticas, sendo ferramenta poderosa na análise e resolução de problemas, tendo a capacidade de lidar com um grande número de equações, sejam elas não linearidades e geometrias, que, de um forma geral, são inviáveis de se resolver analiticamente.

Neste trabalho daremos atenção a modulação por posição de pulso (PPM) e a modulação por amplitude de pulso (PAM) objetivando a obtenção de portas lógicas em MZI baseado em fibras de cristais fotônicos (PCF), utilizando para a análise o método numérico de *Runge-Kuta*.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é investigar por meio de simulação via Matlab®, a implementação de portas lógicas totalmente ópticas, utilizando um interferômetro de Mach-Zehnder (MZI), baseado em fibras de cristais fotônicos (PCF) e operando sob modulação por posição de pulso (PPM) e modulação por amplitude de pulso (PAM), a serem implantadas em sistemas de comunicação ópticos.

2.2 Objetivos específicos

- Implementação de portas lógicas utilizando MZI sob regime de modulação PAM e PPM.
- Análise e estudo das melhores configurações para implementação de portas lógicas sob diferentes tipos de modulações e em diferentes fases.
- Comparativo dos resultados para cada configuração de MZI implementados em configurações distintas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Fibras Ópticas

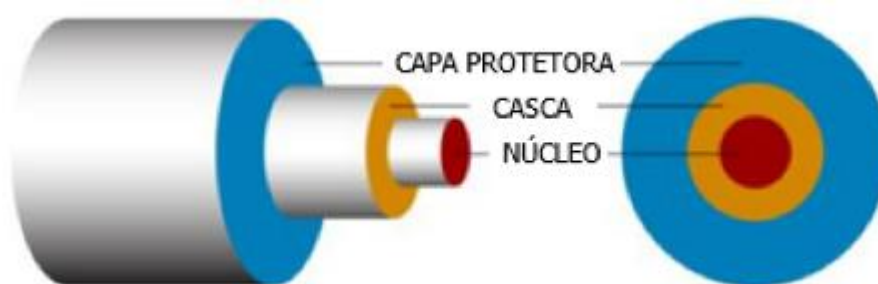
Os primeiros estudos da propagação guiada de um feixe de luz ocorreram em 1842, quando Jean-Daniel Colladon e Jacques Babinet observaram o comportamento de um feixe de luz sendo transmitido através de um jato d'água. Este fenômeno ficou famoso somente em 1870, quando John Tyndall fez uma demonstração pública, demonstrando à sociedade real que a luz poderia ser conduzida. Já em 1880, Alexander Graham Bell inventou o telefone baseado em um sistema de comunicação por luz. Na década de 1960, a invenção de fontes laser (luz monocromática de alta energia) contribuiu para alavancar as pesquisas com fibras ópticas e dar credibilidade às transmissões ópticas para aplicações, principalmente no ramo de telecomunicações. (Nalin, 2014)

O fenômeno de reflexão interna total, responsável pelo guiamento da luz em fibras ópticas, é conhecido desde 1854. Embora fibras de vidro já fossem produzidas na década de 1920, seu uso se tornou prático somente na década de 1950, quando a adoção de uma camada de casca permitiu considerável melhora nas características de guiamento. Antes de 1970, fibras ópticas eram utilizadas principalmente na obtenção de imagens médicas em curtas distâncias. O uso dessas fibras para comunicação era considerado impraticável, devido às altas perdas (1.000 dB/km). Entretanto, a situação sofreu mudança drástica em 1970, quando a perda de fibras ópticas foi reduzida para valores abaixo de 20 dB/km. O progresso adicional resultou, em 1979, em perda de apenas 0,2 dB/km na região espectral nas proximidades de 1,55 nm. A disponibilidade de fibras de baixas perdas não apenas levou a uma revolução na tecnologia de ondas luminosas, mas também iniciou a era da comunicação por fibra óptica. (Agrawal, 2014)

A fibra óptica é um fio com espessura similar à de um cabelo (na ordem de 100 a 200 μ m) e com comprimento que pode chegar a centenas de quilômetros, na qual sinais de luz podem ser transmitidos de um lugar a outro. Basicamente, a estrutura das fibras ópticas convencionais, que são as utilizadas em sistemas de telecomunicação, é composta de um núcleo, uma casca e uma capa protetora polimérica, como descrito na Figura 1. A luz é guiada pelo núcleo da fibra, o qual, assim como a casca, é constituído por material vítreo, no entanto, o núcleo apresenta um índice de refração ligeiramente maior ao da casca devido a pequenas

variações da composição química desses vidros. Esta pequena diferença de índice de refração leva ao confinamento da luz dentro do núcleo, através do fenômeno físico de reflexão interna total da luz, ocorrido na interface núcleo-casca, permitindo o guiamento da luz na fibra óptica apenas pelo núcleo. A capa protetora é composta por um material polimérico que tem a função de aumentar a resistência mecânica da fibra óptica ao manuseio, a curvatura e pressão, bem como de protegê-la de intempéries provenientes do ambiente a qual está inserida. (Nalin, 2014)

Figura 1- Estrutura de uma Fibra Óptica



Fonte: (Kazovskym, et al., 1996) modificada pelo autor

A principal vantagem das fibras ópticas em comunicação, é a sua capacidade de transportar um grande fluxo de informações em grandes distâncias em um pequeno intervalo de tempo. Além de não sofrerem interferências, como de radiações eletromagnética, tornando possível a transmissão de informações e dados com menos ruídos e uma menor chance de erro de bits. A utilização de fibras ópticas possibilita uma diversidade de aplicações as quais não seriam possíveis em condutores metálicos, como por exemplo, em aplicações científicas com o propósito de sensoriamento químico, cirurgias médicas, monitoramento industrial, iluminação, transporte de imagem, dentre outros.

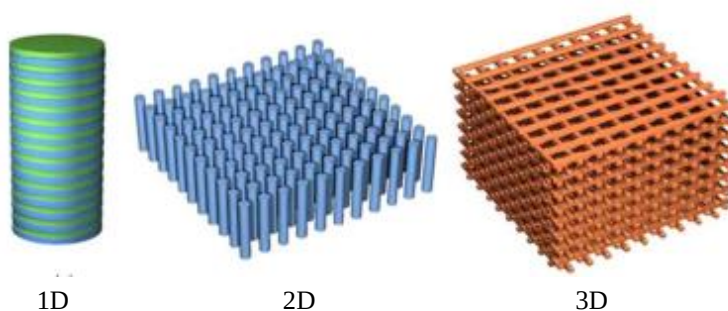
3.2 Cristais Fotônicos

Nas últimas décadas, várias fronteiras foram abertas no campo da ciência. Na óptica um dos objetivos buscados é o controle das propriedades ópticas dos materiais. Uma enorme gama de desenvolvimentos tecnológicos se tornaria possível se pudéssemos projetar materiais que respondam a ondas de luz sobre faixas desejadas de frequências, refletindo-os

perfeitamente, ou permitindo que eles se propaguem somente em certas direções, ou confinando-os de uma forma específica. Os cabos de fibra ótica, que simplesmente servem de guia para a luz, revolucionaram o setor de telecomunicações. A engenharia a laser, a computação de alta velocidade e a espectroscopia são apenas alguns dos próximos passos para colher os benefícios dos avanços na área de óptica. (John D. Joannopoulos, et al., 2008)

Um cristal é um arranjo periódico de átomos ou moléculas. O padrão ao qual as moléculas se agrupam é denominada de rede cristalina. A geometria da rede cristalina juntamente com as propriedades constituintes do cristal dita as propriedades de condução. O cristal por sua natureza apresenta potencial para a propagação de elétrons em sua estrutura. Os cristais fotônicos são compostos por materiais dielétricos que estão distribuídos espacialmente de forma periódica. A periodicidade ocorre em uma, duas ou em três dimensões. A Figura 2 traz exemplos simples de cristais fotônicos uni, bi e tridimensionais, as cores representam materiais com constantes dielétricas diferentes. A característica que define um cristal fotônico é a periodicidade na qual o material dielétrico se apresenta ao longo de seus eixos. (John D. Joannopoulos, et al., 2008)

Figura 2 - Estrutura de cristais fotônicos de 1, 2 e 3 dimensões.



Fonte: (Santos, 2014)

Os cristais fotônicos são projetados para formar uma banda fotônica proibida (PBG, do inglês *Photonic Band Gap*), na qual a luz não se propaga em nenhuma direção, possibilitando desta forma a emissão de luz apenas na região de interesse. Os cristais apresentam características que nos permitem controlar as propriedades da propagação, esse tipo de controle é de grande importância para as tecnologias ópticas.

3.3 Fibras de Cristais Fotônicos

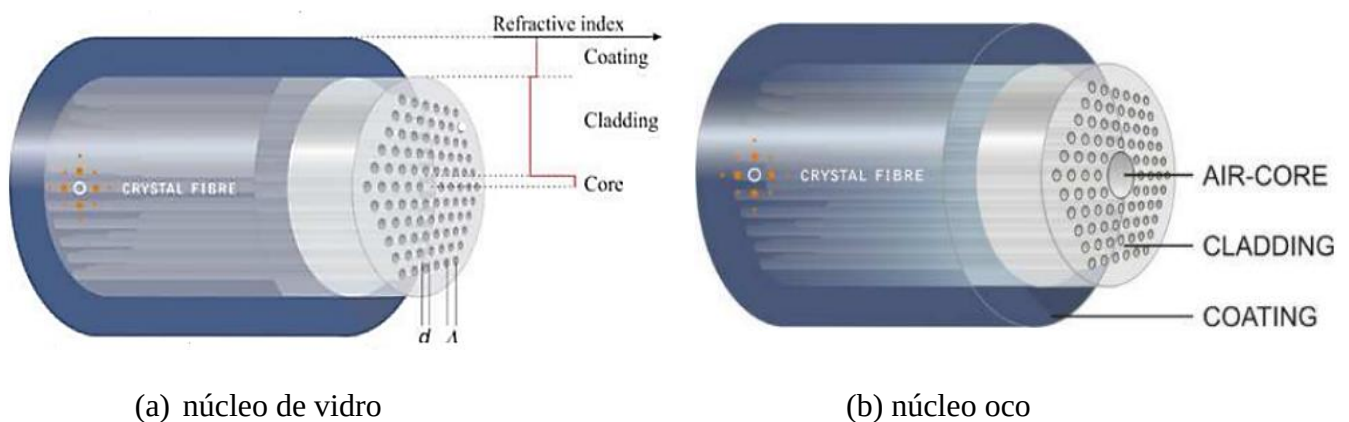
No início da década de 90, pesquisadores conceberam e demonstraram uma nova estrutura de fibra óptica. Inicialmente, foi chamada de fibra perfurada (*hoey fiber*) e mais tarde ficou conhecida como *fibra de cristal fotônico* (PCF) ou fibra micro estruturada. PCF é uma nova classe de fibra óptica baseada nas propriedades dos cristais fotônicos, são constituídas pela combinação de materiais ópticos como: sílica pura, sílica dopada, ar, líquidos, pontos quânticos e gases, esses materiais foram estudados por (Sodre, 2010), (Wiederheker, et al., 2007) e (Correa, et al., 2008) que também mostram aplicações para essa fibra. Devido à sua capacidade de confinar luz em núcleos ocos ou com características de confinamento que não são possíveis em fibra óptica convencional, a PCF está encontrando aplicações em diversas campos, tais como: comunicações por fibra ótica, lasers de fibra, dispositivos não lineares, transmissões de alta potência, sensores de gás altamente sensíveis entre outros.

A diferença entre essa nova estrutura e a de uma fibra convencional é que a casca e, em alguns casos, as regiões centrais de uma PCF contém furos de ar, que se estendem ao longo de todo o comprimento da fibra. Considerando que as propriedades do material do núcleo e da casca definem as características de transmissão de luz das fibras convencionais, o arranjo estrutural de uma PCF cria uma microestrutura interna que proporciona dimensões extras para o controle das propriedades ópticas da luz, como os feixes de dispersão, não linearidade e birrefringência nas fibras ópticas. (Agrawal, 2014) Ao contrário da tecnologia de fibra padrão, que é limitada principalmente pelo salto de índice entre o núcleo e o revestimento, os PCF's podem fornecer uma enorme gama de índices efetivos, que podem ser aplicados eficientemente para desenvolver fibra com baixa ou alta não-linearidade. Além disso, ao adaptar adequadamente o cristal fotônico à fibra, é possível gerenciar com eficiência a dispersão cromática de fibras, alterando sua dispersão de guia de onda.

Nos últimos anos, as PCF's têm se destacado como um novo e excitante campo na tecnologia de fibras ópticas. Muitos tipos de PCF têm sido propostos e fabricados, resultando em interessantes propriedades, como por exemplo: operação monomodo em grandes intervalos de comprimento de onda, grande intervalo espectral de dispersão anômala, alta dispersão negativa para uso como elemento de compensação de dispersão e alta birrefringência, além de efeitos não-lineares, tais como a geração contínua no espectro do visível e regeneração óptica.

As PCF's evoluíram rapidamente de curiosidade científica a produto confeccionado e comercializado no mundo todo. A melhoria contínua dos materiais e das técnicas de fabricação tem levado ao desenvolvimento de PCF's com menos imperfeições e com perdas cada vez menores. Por combinarem as propriedades das fibras ópticas com as dos cristais fotônicos, possuem diversas propriedades únicas, impossíveis de serem conseguidas nas fibras convencionais. Há muitas possibilidades ao projetar as PCF's devido aos vários parâmetros que podem ser manipulados, resultando em uma imensa gama de propriedades obteníveis. (Bastos, 2015)

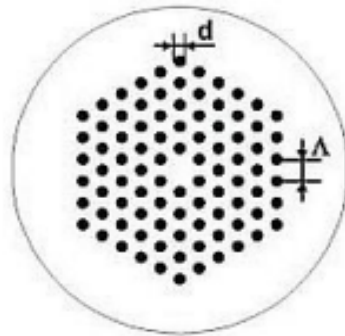
Figura 3 - Fibras de cristais fotônicos



Fonte: (Matos, 2008),

A matriz esburacada tem como principais parâmetros físicos o diâmetro dos buracos (geralmente preenchidos de ar), d , e o espaçamento entre os buracos, Λ . A razão $\frac{d}{\Lambda}$ é de grande importância na determinação de diversas características da PCF. Se mantidas as proporções entre o comprimento de onda (λ) e as características geométricas da PCF (d e Λ), torna-se possível o estudo de dispositivos baseados em PCF independente do comprimento de onda do mesmo.

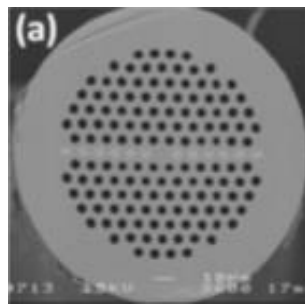
Figura 4 - Secção transversal de uma PCF de núcleo sólido, com ênfase na matriz e seus principais parâmetros físicos (d e Λ).



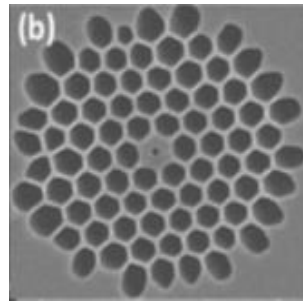
Fonte: (Costa, 2013)

Fibras de cristal fotônico podem ser consideradas um subgrupo de uma classe mais geral de fibras ópticas de microestrutura, onde a luz é guiada por modificações estruturais, e não apenas por diferenças de índice de refração. A Figura 5 apresentam alguns tipos de PCF que permitem o guiamento e manipulação da luz por mecanismos distintos de propagação. A Figura 5(a), apresenta uma PCF híbrida, que foi a primeira a permitir que luz fosse guiada e manipulada por dois mecanismos de propagação diferentes. A Figura 5(b), traz uma PCF com núcleo de ar, essa estrutura permite o guiamento de onda com parâmetros muito notáveis abrindo possibilidades inovadoras para a tecnologia. Figura 5(c) PCF para aplicações quânticas, baseada em dois pequenos núcleos sólidos e quatro orifícios de ar apresentando dois com tamanhos diferentes. Na Figura 5(d) é apresentada uma PCF de núcleo oco, onde a luz é guiada no núcleo oco e é incapaz de escapar devido ao efeito PBG. A Figura 5(e), traz a imagem de uma PCF totalmente sólida (PBGF – *photonic bandgap fiber*). Por fim a Figura 5(f), apresenta uma PCF com guiamento por índice de refração, formada por um padrão hexagonal de furos de ar. (Sodre, 2010)

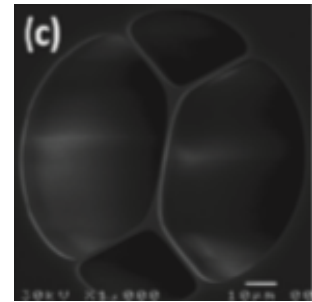
Figura 5 - Estruturas de Fibras de Cristais Fotônicos



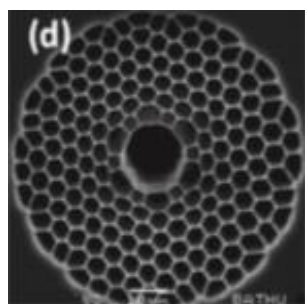
(a) Híbrida;



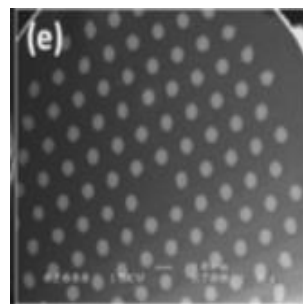
(b) Com núcleo de ar;



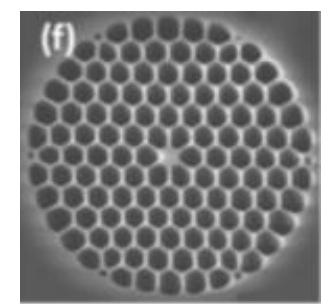
(c) Aplicações quânticas;



(d) Núcleo Oco



(e) Totalmente sólido



(f) Guiamento por índice de refração

Fonte: (a) FONTE: (Sodre, 2010); (b) FONTE: (Wiederheker, et al., 2007); (c) FONTE: (Sodre, 2010); (d) FONTE: (Correa, et al., 2008); (e) FONTE: (Correa, et al., 2008); (f) FONTE: (Correa, et al., 2008)

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

- 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 (PBGF - *photonic bandgap fiber*), totalmente sólido, também baseado no efeito antirressonante para caracterizar o efeito PBG;
- PCF híbrida, propaga a luz se utilizando da reflexão interna total e do efeito PBG simultaneamente.

As características de cada uma desses grupos serão discutidas nas próximas seções.

3.3.1 PCF de núcleo oco com propagação baseada no efeito de reflexão interna total

É o tipo mais básico de PCF, sua propagação é baseada em reflexão interna total, sua estrutura é formada por um núcleo sólido embutido em fibra de cristal fotônico de duas dimensões, com uma matriz de orifícios de ar com Λ (*pitch*) na casa de micrômetros, trazendo uma estrutura tradicionalmente no formato hexagonal. O núcleo sólido é formado basicamente pela introdução de um defeito no cristal fotônico e apresenta um índice de refração maior do que o do revestimento, permitindo assim o guiamento da luz.

3.3.2 PCF de núcleo oco

As PCF's de núcleo oco fornecem uma operação quase monomodo ao guiar a luz, os furos são circundados por revestimentos micro estruturados e são formados por um arranjo periódico de buracos de ar e sílica. Uma fibra de núcleo oco guia a luz essencialmente dentro de uma região oca, de modo que apenas uma porção menor da potência óptica se propaga. Usa-se um mecanismo de orientação baseado em um *bandgap* fotônico.

As atrações das fibras de núcleo oco são principalmente que a orientação primária no ar minimiza os efeitos não lineares e possibilita um alto limiar de dano. De fato, tornou-se possível orientar a luz em comprimentos de onda em que a transparência do material de vidro é relativamente baixa. Além disso, pode-se explorar a alta intensidade óptica no ar ou em algum outro gás preenchido na fibra.

Um problema geral das fibras de núcleo oco é que as suas perdas de propagação são substancialmente mais altas do que para as fibras de núcleo sólido. (Cavaleiro JC, et al., 1998)

3.3.3 PCF de núcleo sólido

Embora algumas das propriedades mais espetaculares dos PBGF's sejam encontradas em fibras com núcleos vazios, a orientação PBG também pode ser observada quando o núcleo é sólido (Sodre, 2010). Aqui, o campo está confinado a um núcleo sólido e a região de revestimento consiste tipicamente de um arranjo de regiões de alto índice embutidas

em material de sílica. Como outras fibras PBG, as fibras PBG de núcleo sólido apenas orientam a luz em uma região espectral limitada. Este efeito de filtragem em combinação com o núcleo dopado possibilita a aplicação em novos comprimentos de onda. A orientação em PBGF's totalmente sólidos pode ser descrita pelo modelo antirresonante refletor de ondas ópticas (Natalia M. Litchinitser, 2004). Este modelo tem sido amplamente utilizado no campo da óptica integrada. O modelo ARROW assume que a luz é confinada ao núcleo pela reflexão antirresonante das camadas de alto índice no revestimento.

As PBGF's de núcleo sólido apresentam algumas características como: 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 presente na estrutura pode ser considerado como um guia de onda independente.

A combinação de uma fibra PBG de núcleo sólido dopado de propriedades especiais de dispersão fornece um novo caminho para as comunicações de ópticas

3.3.4 PCF híbrido

O PCF híbrido apresentado na Figura 5(a) é composto de furos de ar e hastes de sílica dopadas com germânio dispostas ao redor de um núcleo de sílica não dopada. Os orifícios de ar são dispostos em um padrão hexagonal, enquanto as hastes de alto índice substituem uma única fileira de furos de ar ao longo de um dos eixos do PCF, formando um PBG unidimensional nessa direção.

A orientação de luz nos PCF's híbridos pode ser explicada da seguinte forma. Ao longo do eixo y, o núcleo tem um índice de refração maior do que o índice de refração efetivo do revestimento, portanto, ao longo deste eixo, a luz pode ser guiada por reflexão interna total a partir de dois semi-espacos de sílica "holey". Por outro lado, ao longo do eixo x não é possível, uma vez que as hastes têm um índice maior em comparação com o núcleo. Nesse caso, o confinamento ocorre apenas em bandas restritas de comprimento de onda, que coincidem com as PBG's. (Natalia M. Litchinitser, 2004)

3.4 Propagação de pulso em fibras óptica

Para uma compreensão dos fenômenos não-lineares em fibras ópticas, é necessário considerar a teoria da propagação de ondas eletromagnéticas em meios não-lineares dispersivos. Como todos os fenômenos eletromagnéticos, a propagação de campos ópticos em fibras é governada pelas equações de Maxwell. (Agrawal, 2001)

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

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (3.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho, \quad (3.3)$$

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

Onde $\mathbf{E}$ e $\mathbf{H}$ são vetores de campo elétrico e magnético, respectivamente, e $\mathbf{D}$ e $\mathbf{B}$ são densidades de fluxo elétricas e magnéticas. O vetor de densidade de corrente $\mathbf{J}$ e ρ correspondem os vectores de densidade de corrente e de carga, respectivamente. Na ausência de cargas livres, como é o caso das fibras ópticas, $\mathbf{J} = 0$ e $\rho = 0$.

As densidades de fluxo $\mathbf{D}$ e $\mathbf{B}$ surgem em resposta aos campos elétricos e magnéticos $\mathbf{E}$ e $\mathbf{H}$ que se propagam no interior do meio e estão relacionados a eles através das seguintes relações:

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

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

Onde ϵ_0 é a permissividade do vácuo igual a $8,854 \times 10^{-12} \text{ Farad/m}$, μ_0 é a permeabilidade ao vácuo igual a $4\pi \times 10^{-7} \text{ Henry/m}$, e $\mathbf{P}$ e $\mathbf{M}$ são as polarizações elétricas e magnéticas induzidas. Para um meio não magnético, como fibras ópticas que são meios isotrópicos não magnéticos compostos basicamente por sílica, $\mathbf{M} = 0$.

As equações de Maxwell podem ser usadas para obter a equação de onda que descreve a propagação de luz em fibras ópticas. Tomando a onda da Eq. (3.1) e usando Eqs. (3.2), (3.3), e (3.6), pode-se eliminar $\mathbf{B}$ e $\mathbf{D}$ em favor de $\mathbf{E}$ e $\mathbf{P}$ e obter a equação que descreve os fenômenos ondulatórios dos campos eletromagnéticos da fibra óptica:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} + \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial t^2}. \quad (3.7)$$

Onde c é a velocidade da luz no vácuo e define-se como $\mu_0 \epsilon_0 = 1/c^2$.

Para completar a descrição, é necessária uma relação entre a polarização induzida $\mathbf{P}$ e o campo elétrico $\mathbf{E}$. Em geral, a avaliação de $\mathbf{P}$ requer uma abordagem de mecânica quântica. Embora essa abordagem seja frequentemente necessária quando a frequência óptica está próxima de uma ressonância média, uma relação fenomenológica da forma (3.8) pode ser usada para relacionar $\mathbf{P}$ e $\mathbf{E}$ longe de ressonâncias médias.

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 (\chi^1 \cdot \mathbf{E} + \chi^2 : \mathbf{E}\mathbf{E} + \chi^3 : \mathbf{E}\mathbf{E}\mathbf{E} + \dots), \quad (3.8)$$

Este é o caso das fibras ópticas na faixa de comprimento de onda de 0,5 a 2 μm , que é de interesse para o estudo de efeitos não-lineares.

Na equação (3.8), $\chi^{(j)}$ 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:

$$n(\omega) = 1 + \frac{1}{2} \text{Re}[\tilde{\chi}^1(\omega)], \quad (3.9)$$

$$\alpha(\omega) = \frac{\omega}{nc} \text{Im}[\tilde{\chi}^1(\omega)], \quad (3.10)$$

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.

Os efeitos não-lineares de menor ordem nas fibras ópticas se originam da susceptibilidade de terceira ordem $\chi^{(3)}$, que é responsável por fenômenos como geração de terceiro harmônico, mistura de quatro ondas e refração não-linear (Shen, 1984). Se incluirmos apenas os efeitos não-lineares de terceira ordem regidos por $\chi^{(3)}$, a polarização induzida consiste em duas partes, de modo que:

$$\mathbf{P}(r, t) = \mathbf{P}_L(r, t) + \mathbf{P}_{NL}(r, t), \quad (3.11)$$

Onde a parte linear $\mathbf{P}_L$ e a parte não linear $\mathbf{P}_{NL}$ estão relacionadas com o campo elétrico pelas relações gerais. (Agrawal, 2001)

$$P_L(r, t) = \varepsilon_0 \int_{-\infty}^{\infty} x^1(t - t') \cdot E(r, t') dt', \quad (3.12)$$

$$P_{NL}(r, t) = \varepsilon_0 \int_{-\infty}^{\infty} dt_1 \int_{-\infty}^{\infty} dt_2 \int_{-\infty}^{\infty} dt_3 \times x^3(t - t_1, t - t_2, t - t_3) : E(r, t_1)E(r, t_2)E(r, t_3), \quad (3.13)$$

As Equações (3.7), (3.8), (3.12) e (3.13) 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 P_{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.

O estudo da maioria dos efeitos não-lineares em produtos ópticos envolve o uso de pulsos curtos com larguras que variam de $10 n_s$ a $10 f_s$. Quando tais pulsos ópticos se propagam dentro de uma fibra, tanto os efeitos dispersivos quanto os não-lineares influenciam sua forma e espectro. Substituindo-se a Equação (3.11) na Equação (3.7) obtemos a equação de onda para fibra óptica levando-se em consideração efeitos não lineares:

$$\nabla^2 E - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial^2 P_L}{\partial t^2} + \mu_0 \frac{\partial^2 P_{NL}}{\partial t^2}. \quad (3.14)$$

Onde as partes linear e não linear da polarização induzida estão relacionadas ao campo elétrico $E(r, t)$ através das Eqs. (3.12) e (3.13), respectivamente.

3.4.1 Efeitos não lineares em fibras ópticas

Os efeitos não lineares prejudicam a transmissão dos sinais nos sistemas de comunicações por fibra óptica e por isso precisam ser tratados. Esses efeitos são classificados quanto ao índice e quanto ao espalhamento ou em três grandes classes: *dispersivos*, *absortivos* e *paramétricos*, como demonstrado na Tabela 1.

Tabela 1- Resumo de Efeitos não Lineares em Fibras Ópticas

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

Fonte: (Oliveira, 2018), modificado pelo autor

Os efeitos dispersivos estão ligados ao $\chi^{(3)}$, com espalhamento não-linear (*non-linear Scattering*) do campo elétrico causado pelas vibrações moleculares da sílica na fibra. Destacamos dois efeitos (Dora Juan Juan Hu, 2017):

- Espalhamento Ramam Estimulado (SRS - *Stimulated Ramam Scatering*).
- Espalhamento Brillouin Estimulado (SBS - *Stimulated Brillouin Scattering*).

Já os efeitos absoritivos estão relacionados ao índice refração não linear do meio guiado na fibra. São efeitos associados aos efeitos *Kerr*:

- Auto modulação de Fase (SPM - *Self Phase Modulation*).
- Modulação de Fase Cruzada (XPM - *Cross Phase Modulation*).
- Instabilidade Modulacional.
- Modulação de Ganho Cruzado (XGM - *Cross-Gain Modulation*).
- Transparência Auto Induzida.

Para os efeitos paramétricos encontramos a ligação com o $\chi^{(3)}$ e $n^{(2)}$, espalhamento não linear, ocorrem em tudo, e associado aos efeitos *Kerr*. Um efeito que nesse caso é:

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

Neste estudo foi utilizado fibras de cristal fotônico utilizadas no interferômetro de MZI com pulsos da ordem de f_s , onde se faz necessário o uso da Equação Não-Linear Schrödinger descrita em AGRAWAL, 1989.

3.4.2 Equação Não-Linear de Schrödinger

A equação Não-Linear de Schrödinger (ENLGS) é a equação que melhor descreve o comportamento de sóliton em fibra. Partindo das equações acima e realizando considerações físicas como largura de pulso, entre outras, e tomando como base outras expressões, pode-se obter a Equação Não-Linear Schrödinger.

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} A = i\gamma |A|^2 A, \quad (3.15)$$

Quando o pulso possui largura temporal da ordem de f_s ou quando é necessário o estudo de efeitos não lineares ou dispersivos de alta ordem, torna-se necessária a generalização da equação (3.15).

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \frac{1}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} + \frac{\beta_4}{24} \frac{\partial^4 A}{\partial t^4} + \frac{\alpha}{2} A = i\gamma |A|^2 A + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial t} (|A|^2 A) - T_R A \frac{\partial}{\partial t} |A|^2 \quad (3.16)$$

onde

$$T_R = \int_0^\infty t' R(t') dt', \quad (3.17)$$

Dentro do interesse das Telecomunicações, a ENLGS descreve, com boa precisão, o comportamento de pulsos quase monocromáticos que tenham largura temporal mínima de $1 p_s$, amplitude lentamente variável no tempo, polarizabilidade linear e que se propagam por fibras que mantenham a polarização do sinal. Além disso, esta equação ainda admite que a propagação se dê em comprimentos de onda nos quais o coeficiente é suficientemente grande e as não-linearidades são relativamente fracas.

Seus efeitos são:

- Atenuação - provoca uma queda exponencial da potência do pulso.
- Dispersão de velocidade de grupo (GVD – Group Velocity Dispersion) - é o atraso diferencial que as várias componentes espectrais do pulso ou do sinal propagante experimentam, pode ser dividida em dispersão material e de guia de onda. (Rudge, 2010)
- Dispersão de terceira ordem $\chi^{(3)}$ - 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.
- Dispersão de quarta ordem $\chi^{(4)}$ - pode ocasionar alargamento com o surgimento de novos picos de pulso óptico, instabilidade modulacional e ganho de intensidade.
- Auto modulação de fase (SPM) - a dependência do índice de refração com a potência do sinal incidente na fibra causa a auto modulação 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*).

- Modulação de fase cruzada (XPM) – 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.
- Self-Steeping – 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.
- Espalhamento Raman Intrapulso - 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.

3.5 Acopladores

De um modo geral, os acopladores, na sua configuração mais simples, são constituídos de duas fibras ópticas paralelas separadas por uma distância “d”, contem 4 portas (duas entradas e duas saídas) cuja função é dividir coerentemente o feixe óptico incidente em uma das portas de entrada e direcioná-lo para as portas de saída, são regularmente usados para uma enorme gama de aplicações relacionadas a fibras ópticas (Malmeida, et al., 2007). 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. Tal acoplamento de onda evanescente entre os dois modos provoca a transferência da potência óptica de um núcleo para o outro. Esta transferência de potência está diretamente relacionada com a potência crítica PC, que é a potência necessária para se obter uma transferência de 50% entre os guias do acoplador. A potência crítica para um acoplador dada por:

$$P_c = (A_{eff}\lambda)/(n_{NL}L_c), \quad (3.18)$$

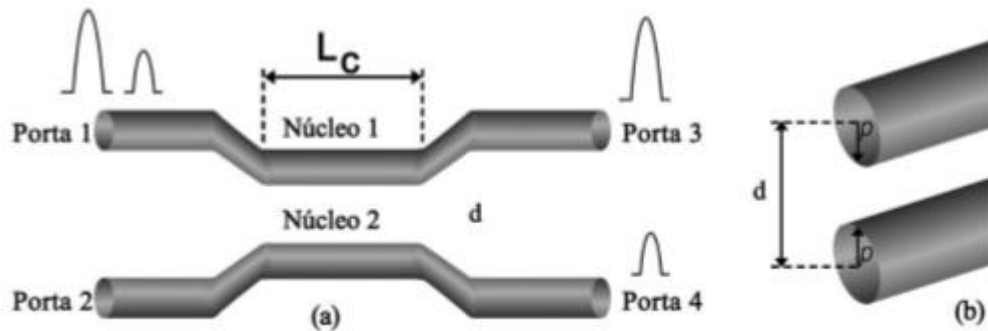
onde L_c é dado por:

$$L_c = \pi/2K, \quad (3.19)$$

e K é o coeficiente de acoplamento linear entre os guias adjacentes. (Bastos, 2015)

Para baixa potência de luz o feixe óptico se propaga periodicamente entre os guias que constituem o acoplador. As potências mais altas induzem uma mudança no índice de refração e deterioram as características de transmissão. Tais transmissões são inibidas para potências acima da potência crítica. No acoplador direcional não linear, o índice de refração apresenta dependência linear e não linear com a intensidade do campo. Essa dependência dá origem a efeitos modulacionais tais como XPM e SPM. (Filho, 2018)

Figura 6 - (a) Acoplador Direcional Não-linear (NLDC) com ilustração do processo de chaveamento. Os pulsos aplicados na porta 1 aparecem em portas diferentes de saída, dependendo de suas potências de pico e. (b) seção transversal do NLDC.



Fonte: (Bastos, 2015)

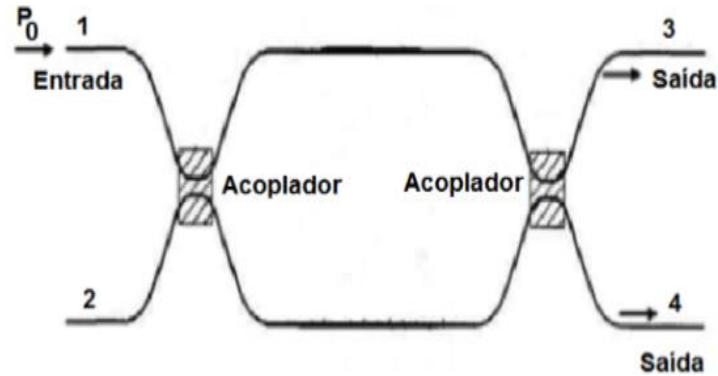
Os acopladores desempenham um papel extremamente importante em circuitos ópticos, em particular, no estudo de chaveamento óptico de pulsos.

3.6 Interferômetro de Mach-Zehnder

O interferômetro de Mach-Zehnder (do inglês *Mach-Zehnder Interferometer* - MZI), como demonstrado na Figura 7, é um dispositivo óptico formado por dois acopladores em série, onde um feixe de luz incide na entrada 1 do primeiro acoplador (servindo como divisor), que é então dividido em duas partes que se propaga nos dois braços dos acopladores. Na presença de assimetria, os dois feixes originados da entrada 1 irão sofrer deslocamentos de fases

diferentes à medida que se propagam. Os feixes se unem no segundo acoplador, indo para um dos seus braços de saída (detectores).

Figura 7 - Interferômetro de Mach-Zehnder em fibras ópticas.



Fonte: (Queiroz, 2015)

A intensidade da luz na saída do interferômetro é dependente da diferença de fase causada no braço do sensor. A equação 3.20, mostra a relação entre a intensidade e a saída de fase

$$I = \frac{I_0}{2} (1 + \cos(\alpha)). \quad (3.20)$$

Na equação o termo I se refere à intensidade de luz na saída do interferômetro, I_0 a intensidade de luz na entrada do interferômetro e α é a intensidade de fase da luz nos dois braços. (D.Jiménez, et al., 1996)

A possibilidade de ocorrência de diferença de fase nos braços de um MZI, possibilita sua utilização como sensor óptico, pois devido a sua interação pode ser relacionada como os parâmetros que desejamos calcular. Em um dispositivo ideal, a diferença de fase é causada apenas por ações externas. Entretanto, caso o comprimento dos braços do MZI seja diferente, uma diferença de fase aparecerá devido à diferença de caminho óptico entre eles. (Camilo, 2014)

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, 2001):

$$\Phi_L = \beta_1 L_1 - \beta_2 L_2, \quad (3.21)$$

$$\Phi_N L = \gamma P_0 [\rho_1 L_1 - (1 - \rho_1) L_2]. \quad (3.22)$$

3.7 Modulação

O propósito de um sistema de comunicação é entregar um sinal de uma fonte de informação em um formato reconhecível a um usuário final, com a fonte e o usuário fisicamente separados. Para fazer isso, o transmissor modifica o sinal de mensagem para uma forma apropriada à transmissão através do canal. Essa modificação é realizada por meio de um processo conhecido como modulação, o qual envolve variar algum parâmetro de uma portadora de acordo como o sinal de mensagem. O receptor recria o sinal da mensagem original a partir de uma versão degradada do sinal transmitido depois da propagação através do canal. A Figura 8 exemplifica de forma resumida um sistema de comunicação.

Modulação é o processo no qual a informação a transmitir numa comunicação é adicionada a ondas eletromagnéticas. O transmissor adiciona a informação numa onda básica de tal forma que poderá ser recuperada na outra parte através de um processo reverso chamado demodulação. Alguns esquemas de modulação são menos sensíveis aos efeitos de ruído e distorção do que outros. (Haykin, 2004)

Figura 8 – Resumo de um Sistema de Comunicação



Fonte: Autor

Entre outros aspectos, a operação de modulação permite:

- Deslocar o espectro do sinal a transmitir para a banda de frequências mais apropriada/disponível;
- Produzir um sinal modulado com um espectro mais estreito (ou mais largo) que o sinal original;
- Tornar o sistema de transmissão mais robusto relativamente a algum tipo de ruído e/ou interferência;
- Adaptar a sensibilidade do receptor às características do canal.

Podemos classificar o processo de modulação em modulação de onda contínua e modulação de pulso. Na modulação de onda contínua (CW), uma onda senoidal é utilizada como portadora, já na modulação de pulso a portadora consiste em uma sequência periódica de pulsos retangulares, pode ser do tipo analógica ou digital. Nos dois grupos a transmissão pode ser efetuada em banda base ou com recurso a portadoras (eléctricas ou ópticas). No entanto, a transmissão de sinais analógicos em banda base está, normalmente, limitada a sistemas de transmissão a muito curtas distâncias, uma vez que esta solução é muito pouco imune aos efeitos do ruído e interferência. (Moreira, 1999)

A Tabela 2 apresenta de forma resumida os principais tipos de modulação.

Tabela 2 - Quadro resumo dos principais tipos de modulação

PORTADORA INFORMAÇÃO	ANALÓGICA	DIGITAL
	MODULAÇÕES ANALÓGICAS	MODULAÇÃO DE PULSOS
ANALÓGICA	Amplitude: AM Frequência: FM Fase: PM	Amplitude: PAM Largura: PWM Posição: PPM OOK
DIGITAL	MODULAÇÕES DIGITAIS	
	Amplitude: ASK Frequência: FSK Fase: PSK Quadratura: QAM	Código de Linha:

Fonte: Autor

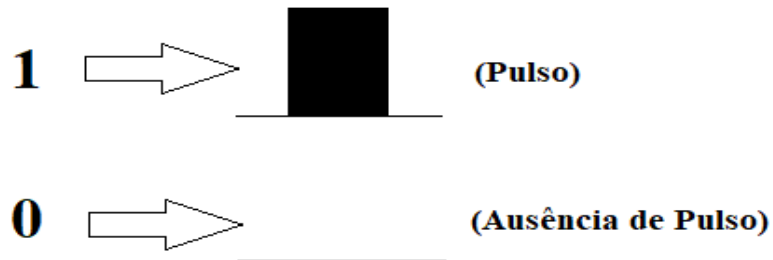
Aplicaremos neste trabalho para fim de estudo as modulações por Amplitude de pulso (PAM) e por posição de pulso (PPM).

3.7.1 Modulação ON/OFF KEYING (OOK)

Na modulação *ON/OFF KEYING* (OOK), a fonte de luz é ativada ou desativada durante cada tempo, como mostrado na Figura 9 . Cada bit “1” é codificado em um pulso óptico e cada bit “0” é codificado em um bit desligado (sem campo). Claramente, a taxa de bits máxima da fonte está diretamente relacionada à taxa na qual a fonte pode ser ligada e desligada. Como os lasers e os LEDs podem atuar a taxas de até centenas de mega-hertz, a modulação OOK

representa um procedimento simples para produzir taxas de bits relativamente altas. Na verdade, as taxas de gigabit podem ser alcançadas pelo entrelaçamento de fluxos de bits OOK de vários lasers diferentes.) Os pulsos de luz da sequência de bits OOK são transmitidos como um feixe de laser pulsado em um sistema espacial ou podem ser inseridos no núcleo da fibra um link de fibra ótica. (Robert M.Gagliardi)

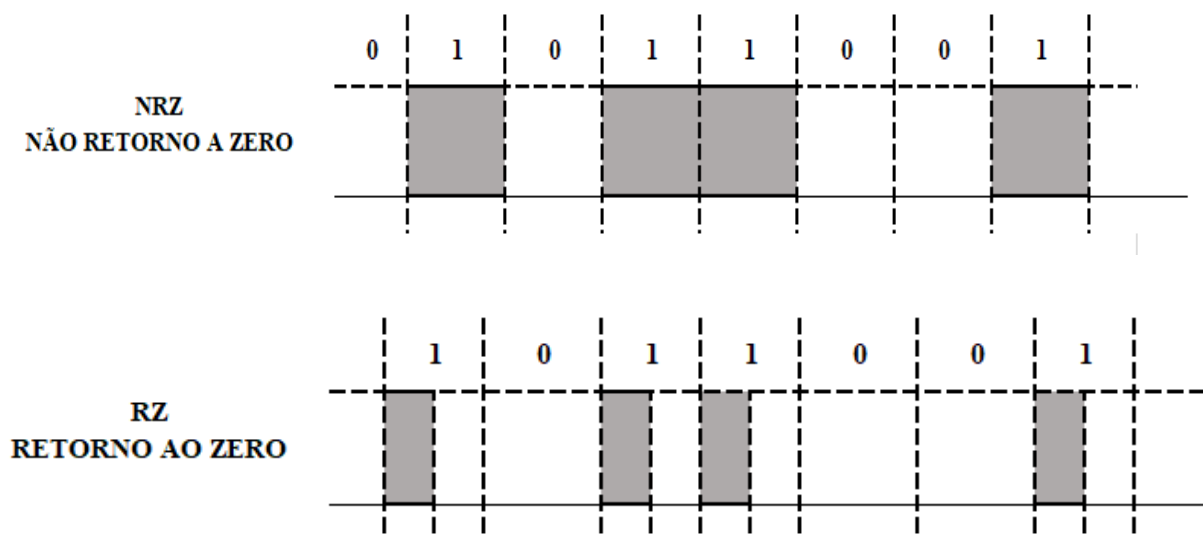
Figura 9 - Modulação OOK



Fonte: Autor

A modulação OOK utiliza diferentes formatos de sinais, sendo mais comuns os formatos NRZ (não retorno a zero) e o RZ (retorno a zero), exemplificados na Figura 10. 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.

Figura 10 – Formato NRZ e RZ para pulsos com modulação OOK



Fonte: Autor

O formato NRZ é assim denominado, por conta 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 modulação OOK é muito popular e bastante usada em aplicações de controle. Isto é em parte devido à sua simplicidade e baixos custos de implementação além de ter a vantagem de permitir que o transmissor fique ocioso durante a transmissão de um "zero", economizando energia. Sistemas de comunicações óptica têm adotado amplamente esse tipo de modulação.

3.7.2 PAM

A modulação em amplitude do pulso (*Pulse Amplitude Modulation - PAM*) consiste na utilização de impulsos com amplitudes diferentes para representar símbolos diferentes, como demonstrado na Figura 11. Na modulação PAM a amplitude dos pulsos, regularmente espaçados é variada proporcionalmente aos valores amostrados do sinal contínuo de mensagem.

O sinal PAM é representado por:

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x_k p(t - kT_s), \quad (3.23)$$

onde x_k pertence a um conjunto de M símbolos, que representam a amplitude do k -ésimo símbolo da mensagem e $R_s = \frac{1}{T_s}$ é a taxa de símbolo. O pulso consiste de uma onda com qualquer outro formato, que deve cumprir as seguintes condições:

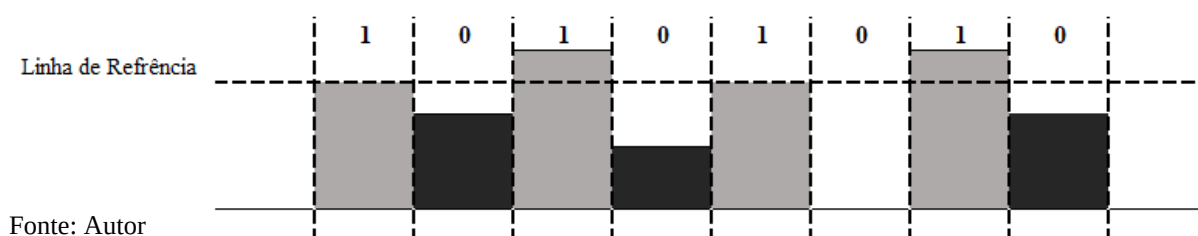
$$p(t) = \begin{cases} 1 & t = 0 \\ 0 & t = \pm T_s, \pm 2T_s, \dots \end{cases} \quad (3.24)$$

A transmissão de um sinal PAM impõe requisitos bastantes rigorosos sobre as respostas de magnitude e fase do canal devido à duração relativamente breve dos pulsos transmitidos. Além disso, o desempenho sob ruído de um sistema PAM jamais pode ser melhor do que a transmissão de sinal em banda base. Consequentemente, é considerado que para

transmissão em longas distâncias, o PAM seria usado somente como um meio de processamento de mensagem para multiplexação por divisão de tempo, a partir da qual é feita uma conversão subsequente em outra forma de modulação de pulso.

A maioria dos sistemas de ondas de luz digitais que utiliza a modulação PAM emprega a modalidade de chaveamento de deslocamento de amplitude (ASK) porque seu uso simplifica consideravelmente o design de transmissores e receptores óticos. A Modulação por Chaveamento de Amplitude (ASK) consiste em alterar o nível de amplitude da portadora em função de um sinal de entrada com níveis de amplitude discretos. O formato ASK também é conhecido como uma espécie de *On-Off Keying* (OOK). (Agrawal, 2005; Mestdagh, 1995)

Figura 11 - Modulação PAM



Fonte: Autor

A modulação PAM-ASK em comunicações ópticas se utiliza de um valor de referência e de uma fonte de luz, lasers e/ou LEDs. Cada bit “1” é codificado quando a amplitude do pulso emitido atinge o valor de referência e cada bit “0” é codificado quando esse valor de referência não é alcançado. A taxa de bits máxima da fonte está diretamente relacionada à taxa na qual o valor de referência é atingido ou não. Como os lasers e os LEDs podem atuar a taxas de até centenas de mega-hertz, a modulação PAM representa um procedimento simples para produzir taxas de bits relativamente altas. Os pulsos de luz da sequência de bits PAM-ASK podem ser transmitidos em sistemas de comunicações ópticas com bastante confiabilidade.

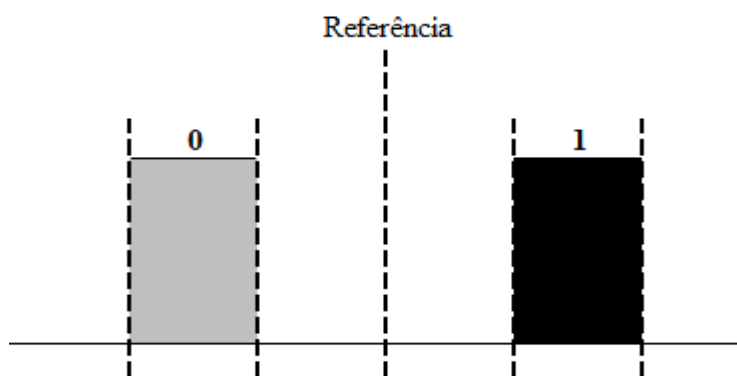
3.7.4 PPM

A modulação da posição de pulsos (PPM - *pulse position modulation*), é o método de codificação de informações em um sinal através da variação da posição dos pulsos. O sinal não-modulado consiste de uma série contínua de pulsos com frequência, duração

e amplitude constantes. Durante a modulação, as posições dos pulsos são modificadas de modo a refletir as informações que estão sendo codificadas.

A modulação em PPM ocorre como representada na Figura 12. Com esse método, há uma separação temporal nominal entre pulsos sucessivos. Para transmitir um símbolo binário “0”, o pulso é transmitido ligeiramente mais cedo. Para transmitir um símbolo binário “1”, o pulso é transmitido ligeiramente mais tarde. O receptor detecta esse instante anterior/posterior e, conseqüentemente, demodula o sinal. Separações típicas entre pulsos tem a variação na ordem de fentossegundos a nano segundos, resultando em altas taxas de transmissão. (Haykin, 2004)

Figura 12 - Modulação PPM



Fonte: Autor

Uma das principais dificuldades de implementação desta técnica é que o receptor dever ser sincronizado corretamente para ajustar o *clock* local com o início de cada símbolo. Conseqüentemente, é frequentemente implementada como modulação por posição de pulso diferencial, pelo qual cada posição de pulso é codificada relativamente ao pulso anterior, tal que o receptor deve apenas medir a diferença no tempo de chegada dos pulsos sucessivos. É possível limitar a propagação de erros para símbolos adjacentes, sendo que um erro na medida do *delay* diferencial de um pulso afetará apenas dois símbolos, em vez de afetar todas as medições sucessivas.

Os sistemas PAM e PPM, possuem pulsos projetados para terem duração curta de forma que na maior parte de cada intervalo de transmissão eles apresentam tensão nula. Os principais motivos para este procedimento são:

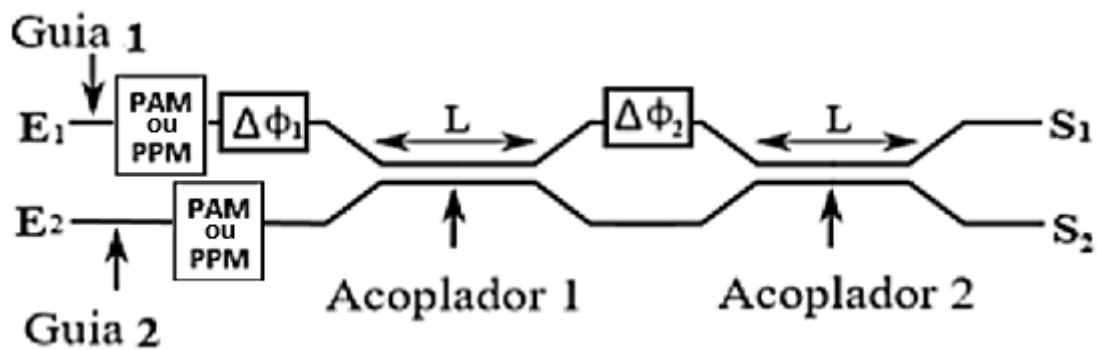
- A utilização de pulsos com ciclo de trabalho estreito consegue-se economia de potência.
- O intervalo ocioso entre dois pulsos consecutivos pode ser preenchido por outros pulsos representando diferentes mensagens, processo chamado de Multiplexação por Divisão do Tempo (TDM).

O sistema PPM apresenta uma melhor relação sinal/ruído que o PAM, sendo por isto atrativo em sistemas de comunicação óptica, onde tende-se a ter pequena ou nenhuma interferência

4. METODOLOGIA

Neste trabalho utilizamos um interferômetro de Mach-zehnder com funcionalidade similar ao relatado na seção 3.6. O dispositivo utilizado apresentou duas configurações de MZI, utilizando acopladores simétricos para a modulação PPM e assimétricos e simétricos para a modulação PAM, a variação de simetria ocorrida na modulação PAM é provocada pela variação de gama (γ), descrito na Tabela 4. Além da simetria ou assimetria o dispositivo é composto de fibras de cristais fotônicos com dimensão L . O MZI proposto apresenta diferença de fase $\Delta\phi_1$ e $\Delta\phi_2$ extra na entrada do primeiro e do segundo acoplador, causando assim uma defasagem no pulso independente da modulação utilizada. A Figura 13 demonstra o modelo de MZI utilizado no presente trabalho.

Figura 13 - Configuração do MZI proposto



Fonte: Filho, 2018, modificado pelo autor

Os pulsos ópticos são inseridos nas entradas E_1 e E_2 do interferômetro, onde são modulados em PAM e PPM, cada modulação foi estudada e analisada de forma isolada. Na primeira interação o pulso sofrerá uma diferença de fase $\Delta\phi_1$. Os pulsos interagem no primeiro acoplador. Após a primeira interação não linear, os pulsos sofreram uma segunda diferença de fase $\Delta\phi_2$ em um dos braços do MZI, após $\Delta\phi_2$ o pulso interage com o segundo acoplador. Após as duas interações é feita a análise das portas lógicas que foram implementadas no processo.

A propagação dos pulsos no dispositivo é regida pela Equação 3.16 desenvolvida para o modo acoplado:

$$i \frac{\partial A_1}{\partial z} + \frac{i}{v_g} \frac{\partial A_1}{\partial t} - \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_1}{\partial t^2} - i \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A_1}{\partial t^3} + \frac{\beta_4}{24} \frac{\partial^4 A_1}{\partial t^4} + \frac{\alpha}{2} A_1 + \gamma_1 (|A_1|^2 + n|A_2|^2) A_1 + i \frac{\gamma_1}{\omega} \frac{\partial (|A_1|^2 A_1)}{\partial t} - \gamma_1 A_1 T_R \frac{\partial |A_1|^2}{\partial t} + k_0 A_2 + i k_1 \frac{\partial A_2}{\partial t} = 0 \quad (4.1)$$

$$i \frac{\partial A_2}{\partial z} + \frac{i}{v_g} \frac{\partial A_2}{\partial t} - \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_2}{\partial t^2} - i \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A_2}{\partial t^3} + \frac{\beta_4}{24} \frac{\partial^4 A_2}{\partial t^4} + \frac{\alpha}{2} A_2 + \gamma_j (|A_2|^2 + \eta|A_1|^2) A_2 + i \frac{\gamma_j}{\omega} \frac{\partial (|A_2|^2 A_2)}{\partial t} - \gamma_j A_2 T_R \frac{\partial |A_2|^2}{\partial t} + \kappa_0 A_1 + i \kappa_1 \frac{\partial A_1}{\partial t} = 0 \quad (4.2)$$

onde $j = (1,2)$ refere-se ao parâmetro não linear γ_1 e γ_2 , caracterizando a assimetria nos acopladores. (Filho, 2018)

A Tabela 3 demonstra os termos utilizados nas Equações (4.1) e (4.2).

Tabela 3- Termos utilizados na equação

(continua)

z	Distância de propagação ao longo da fibra
T	Tempo de propagação
A_1	Amplitude do pulso na guia 1
A_2	Amplitude do pulso na guia 1
Termo dependente de β_2 : $\frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2}$	Responsável pela GVD
Termo inerente a β_3 : $\frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial t^3}$	Responsável pela TOD
β_4	Responsável pela quarta ordem
k_0	Coeficiente de acoplamento entre os núcleos dos
k_1	Coeficiente de acoplamento dispersivo: $\frac{\partial k_0}{\partial \omega}$

Tabela 3 - Termos utilizados na equação

(conclusão)

Termos associados a γ_1 e γ_2	Efeito de auto modulação de fase: $\gamma(A_1 ^2 + n A_2 ^2)A_1$	
	Onde n representa:	XPM em relação a auto modulação de fase.
Termo: $i \frac{\gamma}{\omega} \frac{\partial(A_1 ^2 A_1)}{\partial t}$	Efeito <i>Self-Steepening</i> :	
	Onde w representa:	Frequência angular óptica
Termo: $\gamma A_2 T_R \frac{\partial^2 A_2 ^2}{\partial t^2}$	Efeito Raman Intrapulso (IRS)	
	Onde T_r representa:	Coefficiente de espalhamento Raman

Fonte: Autor.

Para a resolução da Equação 4.1 e 4.2, foi utilizado o método numérico de *Runge-Kutta* de quarta ordem e utilizada a transformada de *Fourier* Equação 4.5 para transformar a equação em ordinária. A transformada de Fourier pode representar qualquer função contínua por partes e minimiza o erro entre a função e sua representação. O método *Runge-Kutta* consiste em um método de passo simples que requer apenas derivadas de primeira ordem e pode fornecer aproximações precisas com erros de truncamento da ordem de h^2 , h^3 , h^4 , etc. Ele é usado para resolver equações diferenciais ordinárias dados os valores iniciais da equação.

Fórmula geral:

$$y_{i+1} = y_i + h\phi(x_i, y_i, h). \quad (4.3)$$

onde ϕ , chamado de função incremento, é uma aproximação conveniente para $f(x,y)$ no intervalo $x_i \leq x \leq x_{i+1}$.

Fórmula para o método numérico de quarta ordem (h^4):

$$\begin{aligned}
 y_{i+1} &= y_i + \frac{h}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4), \\
 k_1 &= f(x_i, y_i), \\
 k_2 &= f(x_i, \frac{h}{2}, y_i + \frac{h}{2}k_1),
 \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$k_3 = f(x_i, \frac{h}{2}, y_i + \frac{h}{2}k_2),$$

$$k_4 = f(x_i, h, y_i + hk_3).$$

onde k_1 , k_2 e k_3 são aproximações das derivadas em vários pontos no intervalo da integração $[x_i, x_{i+1}]$.

Fórmula geral da transformada de *Fourier*:

$$F(S) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-2\pi sx} dx. \quad (4.5)$$

onde x e s é adimensional, x é uma medida do tempo t e s corresponde ao tempo inverso ou a frequência.

As interações foram simuladas no software MATLABR2014a (licença: 898894). As variáveis utilizadas no algoritmo para a simulação foram:

Tabela 4 - Tabela de variáveis gerais

(continua)

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 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	$\beta_4 = 0$

Tabela 4- Tabela de variáveis gerais

(conclusão)

Coeficiente de acoplamento	$k_0 = 43,66 \text{ m}^1$
Coeficiente de acoplamento dispersivo	$k_1 = 4,1 \times 10^{-13} \text{ m}^{-1}$
Parâmetro de não linearidade para o caso simétrico	$\gamma_1 = 3,2 \times 10^{-3} \text{ Wm}^{-1}$
Parâmetro de não linearidade para o caso assimétrico	$\gamma_1 = 3,2 \times 10^{-3} \text{ Wm}^{-1}$
	$\gamma_2 = 10 \times 10^{-3} \text{ Wm}^{-1}$
Potência de entrada	$P_0 = 4,5 \text{ kW}$
Número de pontos na janela do tempo	$np = 512$

Fonte: Autor.

Os pulsos aplicados foram modulados inicialmente em PAM e PPM na forma:

$$A_1(z, t) = A_0 \text{sech}(\tau), \quad (4.5)$$

$$A_2(z, t) = 0, \quad (4.6)$$

onde $A_0 = \sqrt{P_0}$, a transmissão de energia assumirá valores lógicos “1” ou “0” dependendo dos parâmetros analisados em cada uma das modulações aplicadas. De forma numérica a transmissão de energia, independente da modulação aplicada, é definida como razão entre a energia do pulso de saída pela energia do pulso de entrada, assim tem-se:

$$T_i = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |A_i(z, t)|^2 dt}{\int_{-\infty}^{\infty} |A_1(0, t)|^2 dt}, \quad (4.6)$$

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

As portas lógicas desenvolvidas em suas diferentes modulações foram investigadas através dos parâmetros de saída do interferômetro da seguinte forma:

- Na modulação PAM foi definido um limiar de decisão, para valores superiores ao valor de referência tem-se como retorno o bit “1” e para valores abaixo se caracteriza bit “0”, a linha de decisão serve como referência para os parâmetros de análise.
- Na modulação PPM utilizamos como referência o valor zero do eixo das abscissas, todo valor gerado a esquerda desse valor de referência (negativos) é caracterizado como bit “0” e os valores a direita (positivos), bit ”1”.

Portanto, de acordo com as interações ocorridas no primeiro e segundo acoplador, obtemos os bits que formam saídas lógicas. Com os valores obtidos e analisados é estabelecida uma tabela para identificar as portas lógicas implementadas no processo.

A análise das portas e operações lógicas obtidas, baseiam-se nas variações de fase impostas no dispositivo, que pode ocorrer através de dopagem ou distorções na fibra. Para todos os casos os pulsos sofrem variações de fase $\Delta\Phi_1$ (variando de 0 a 2π) na entrada do interferômetro, para caracterizar o interferômetro de Mach-Zehnder, é causada uma segunda variação de fase $\Delta\Phi_2$ (variando de 0 a 2π) no braço do dispositivo. Para as análises em questão é deixado fixo o valor de $\Delta\Phi_1$ e $\Delta\Phi_2$ é variado no intervalo delimitado, só após a variação de $\Delta\Phi_2$ por completo é que $\Delta\Phi_1$ assume o próximo valor. Os acopladores direcionais não lineares são responsáveis pela comutação totalmente óptica

As análises feitas obtiveram operações lógicas OR, NOR, AND e NAND, descritas na Tabela 5:

Tabela 5- Operações lógicas obtidas

	ENTRADA		SAÍDA			
	E ₁	E ₂	PAM			
			PPM		NAND	NOR
			AND	OR		
Bit	0	0	0	0	1	1
	0	1	0	1	1	0
	1	0	0	1	1	0
	1	1	1	1	0	0

Fonte: Autor.

Os critérios definidos para classificar as melhores portas lógicas foram: a faixa de implementação, limiar de decisão de bit e deslocamento do pulso na amplitude e tempo.

Os dispositivos propostos apresentam características inovadoras, quanto ao tipo de fibra utilizada, tipos de modulações e 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 óptico, conseguimos operar o dispositivo em diferentes formas de modulação e todas apresentaram eficiência relevante em sua aplicação. A arquitetura proposta dispensa dispositivos eletrônicos extras, barateando o custo, aumentando a eficiência e apresentando uma maior vida útil.

5. RESULTADOS

Foram investigadas portas lógicas para dois diferentes tipos de modulação, operadas em configurações distintas de interferômetro de *Mach-Zehnder*. Há variação de fase em todas as configurações, o intuito é estudar a melhor configuração e as melhores faixas de implementação de portas lógicas. A Tabela 6 apresenta as modulações e configurações utilizadas.

Tabela 6 - Configurações utilizadas

Modulação	Configuração	
PPM	• Deslocamento – $\epsilon = 0,1$ fs • Deslocamento – $\epsilon = 1$ fs • Deslocamento – $\epsilon = 5$ fs • Deslocamento – $\epsilon = 10$ fs	
	Acoplador 1	Acoplador 2
	• Simétrico • Assimétrico • Assimétrico	• Assimétrico • Simétrico • Assimétrico

Fonte: Autor.

5.1 Análise realizada na modulação PPM

A análise na modulação PPM foi realizada variando o deslocamento (ϵ) em: 0,1; 1; 5 e 10 fs. Para todas as configurações de ϵ os pulsos sofrem variações de fase em $\Delta\Phi_1$ e $\Delta\Phi_2$, ambos sendo variado em no intervalo de 0 a 2π . Em cada interação é deixado fixo $\Delta\Phi_1$ e $\Delta\Phi_2$ é variado tanto na entrada do primeiro como do segundo acoplador. Após $\Delta\Phi_2$ ser variado dentro das fases estipuladas o $\Delta\Phi_1$ irá para a próxima fase de variação. O valor zero (0) da coordenada da abscissa foi escolhido como linha de decisão, os pulsos com pico a direita do valor de referência representam para o sistema o bit 1 (um) e a esquerda representam bit 0 (zero). O procedimento foi repetido para todas as configurações e em todas foram obtidas portas lógicas do tipo AND e OR, a Tabela 7 apresenta as portas lógicas obtidas para a presente configuração.

Tabela 7 – Números de portas lógicas implementadas para a modulação PPM

Portas	OR	AND
	161	201
Total	362	

Fonte: Autor.

5.1.1 Configuração 1 – $\epsilon = 0,1$ fs

Na configuração com $\epsilon = 0,1$ fs, foram implementadas portas lógicas do tipo OR e AND para os valores de $\Delta\Phi_1$ fixo em $0\pi; 0,1\pi; 0,2\pi; 1,8\pi; 1,9\pi; 2\pi$, como demonstrado na Tabela 8. Para a configuração foi gerado um total de oito portas lógicas, sendo seis portas do tipo OR e duas portas do tipo AND.

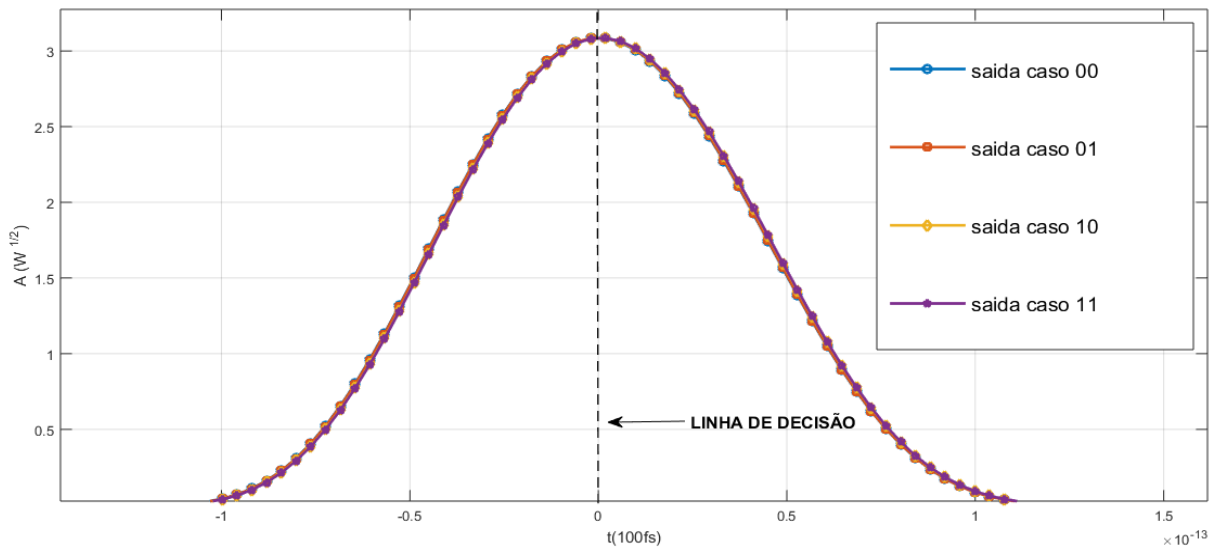
Tabela 8 - Portas lógicas geradas com ϵ de 0,1fs

Porta Lógica	ϵ	Φ_1	Φ_2	Saída	
OR	0,1 fs	0π	$0,9\pi$	S_1	-
			$1,1\pi$	-	S_2
		$0,1\pi$	$1,1\pi$	-	S_2
		$1,9\pi$	$0,9\pi$	S_1	-
		2π	$0,9\pi$	S_1	-
			$1,1\pi$	-	S_2
AND	0,1 fs	$0,2\pi$	$1,2\pi$	S_1	-
		$1,8\pi$	$0,8\pi$	-	S_2

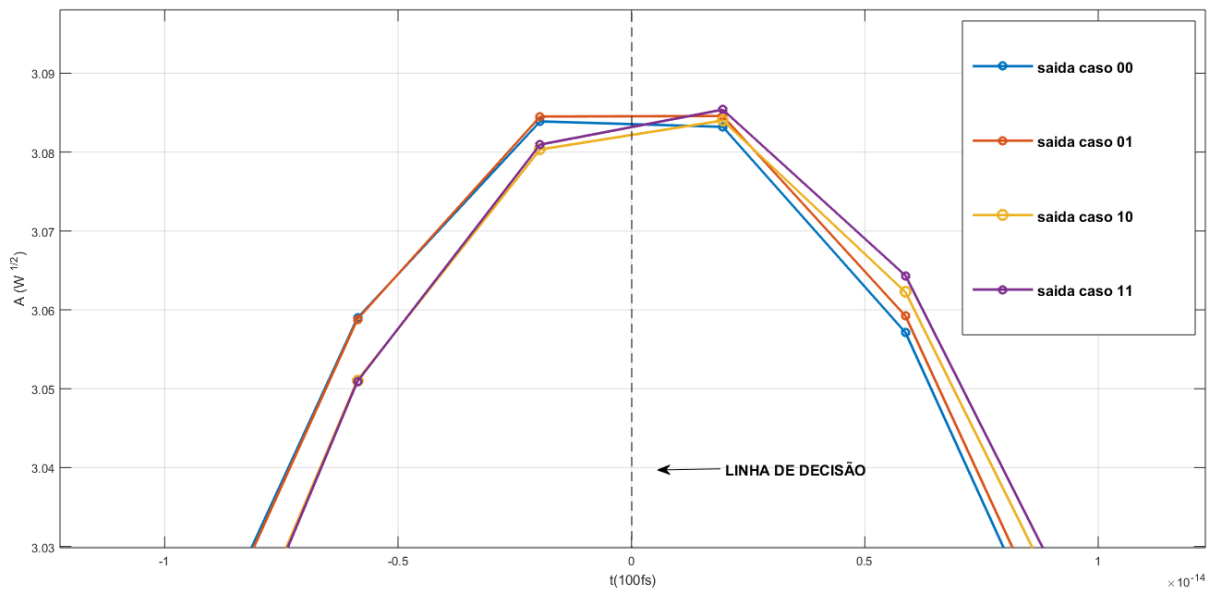
Fonte: Autor.

A Figura 14 apresenta os pulsos geradores da porta lógica OR e a operação lógica resultante na saída S_1 do guia 1, a porta é gerada quando $\Delta\Phi_1$ é fixado em 0π e $\Delta\Phi_2$ assume o valor de $0,9\pi$.

Figura 14 – Gráfico para a porta lógica OR, $\Delta\Phi_1 = 0\pi$ e $\Delta\Phi_2 = 0,9\pi$. (a) Pulso óptico na saída S_1 e (b) Pulso óptico na saída S_1 aproximado.



(a)



(b)

Fonte: Autor

Os pulsos apresentaram deslocamento no tempo na ordem de fs de: $-1,957e^{-15}$ para o caso 00, e de $1,957e^{-15}$ para os demais, como descrito na Tabela 9. Os valores máximos de amplitudes produzidos para cada caso são: 3,084 para o caso 00 e 10; 3,085 para o caso 01 e 3,086 para o caso 11. Os pulsos apresentaram sobreposição, além de estarem muito próximo da

linha de decisão, 0 (zero). A distância entre os pulsos Δt é descrita na Tabela 10. A configuração apresentada resultou em uma porta lógica OR na saída S_1 do guia 1.

Tabela 9 – Operações lógica para a configuração, $\Delta\Phi_1 = 0\pi$ e $\Delta\Phi_2 = 0,9\pi$.

E_1	E_2	S_1	$A(W^{1/2})$	t (fs)
0	0	0	3,084	$-1,957e^{-15}$
0	1	1	3,085	$1,957e^{-15}$
1	0	1	3,084	$1,957e^{-15}$
1	1	1	3,086	$1,957e^{-15}$
OR $\Delta\Phi_1 = 0\pi$ $\Delta\Phi_2 = 0,9\pi$				

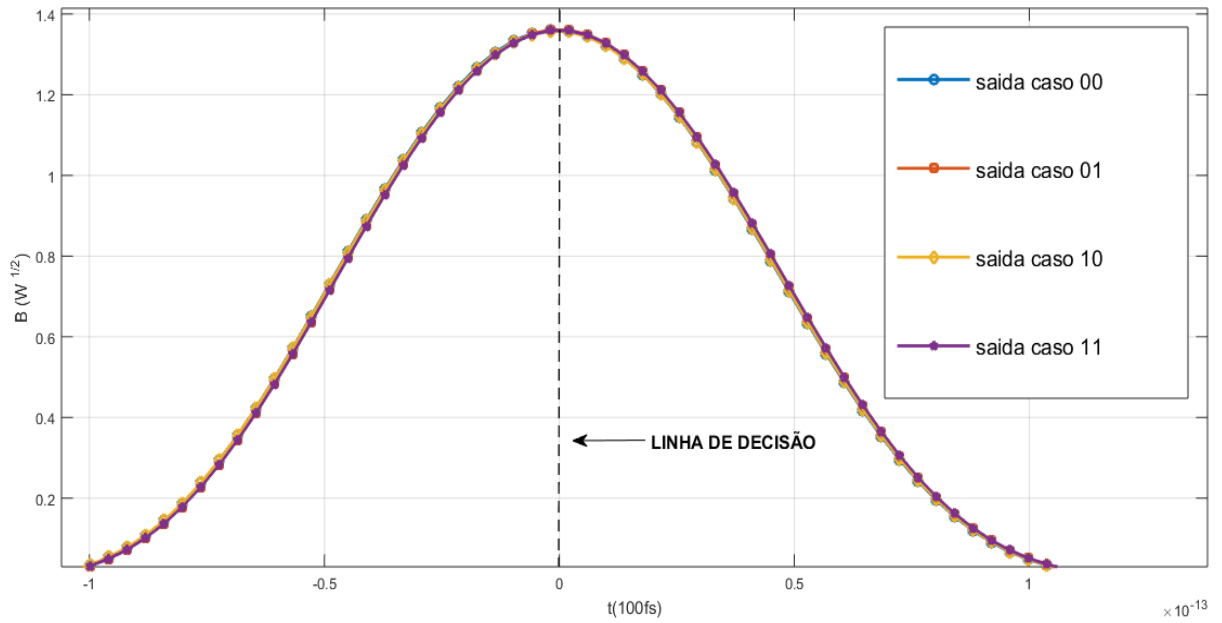
Tabela 10- Variação Δt entre os pulsos

	00	01	10	11
Δt	-	$3,914e^{-15}$	$3,914e^{-15}$	$3,914e^{-15}$
00	-	$3,914e^{-15}$	0	0
01	$3,914e^{-15}$	-	0	0
10	$3,914e^{-15}$	0	-	0
11	$3,914e^{-15}$	0	0	-

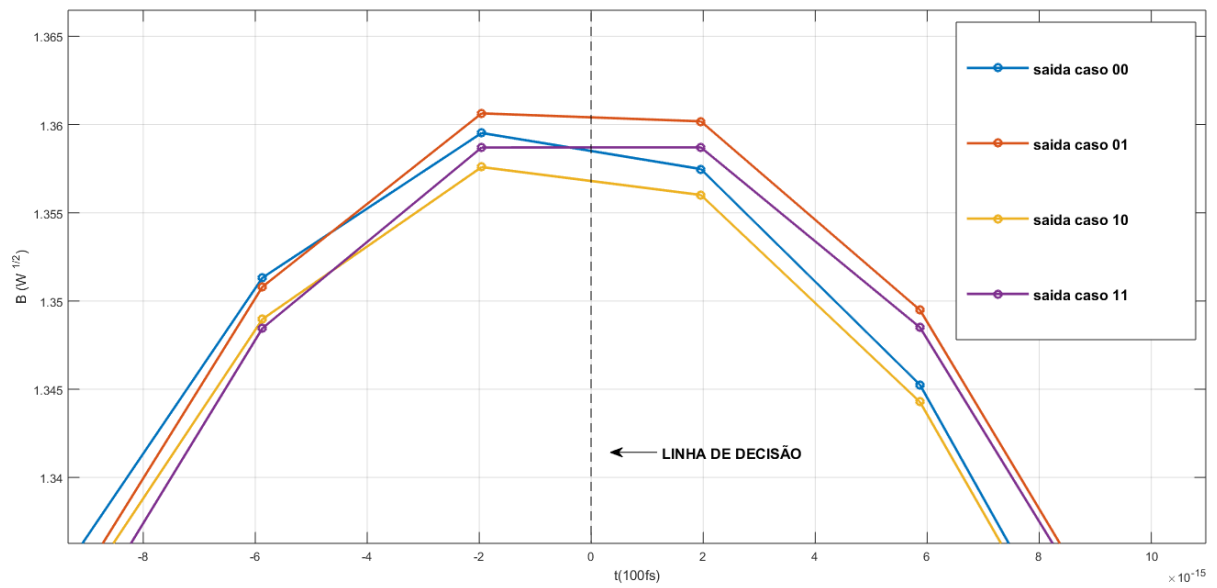
A variação de tempo ocorreu de $-1,957e^{-15}$ a $1,957e^{-15}$, os pulsos gerados para os casos 01;10 e 11 estão equidistantes de 0 e entre si, a saída 00 apresenta variação de $1,957e^{-15}$ a 0 e de $3,914e^{-15}$ para as demais operações. A saída S_2 do guia 2 não apresentou nenhuma porta lógica para a fase.

A porta lógica AND foi gerada em dois casos de combinação de fase estudado para ϕ de 0,1fs, para a combinação de $\Delta\Phi_1 = 0,2\pi$ e $\Delta\Phi_2 = 1,2\pi$ onde a porta ocorreu na saída S_1 do guia 1 e de $\Delta\Phi_1 = 1,8\pi$ e $\Delta\Phi_2 = 0,8\pi$ onde a porta foi gerada na saída S_2 do guia 2. A Figura 15 e 16 apresentam as portas lógicas AND geradas.

Figura 15 - Gráfico para a porta lógica AND, $\Delta\Phi1 = 1,8\pi$ e $\Delta\Phi2 = 0,8\pi$. (a) Pulso óptico na saída S_2 e (b) Pulso óptico na saída S_2 aproximado.



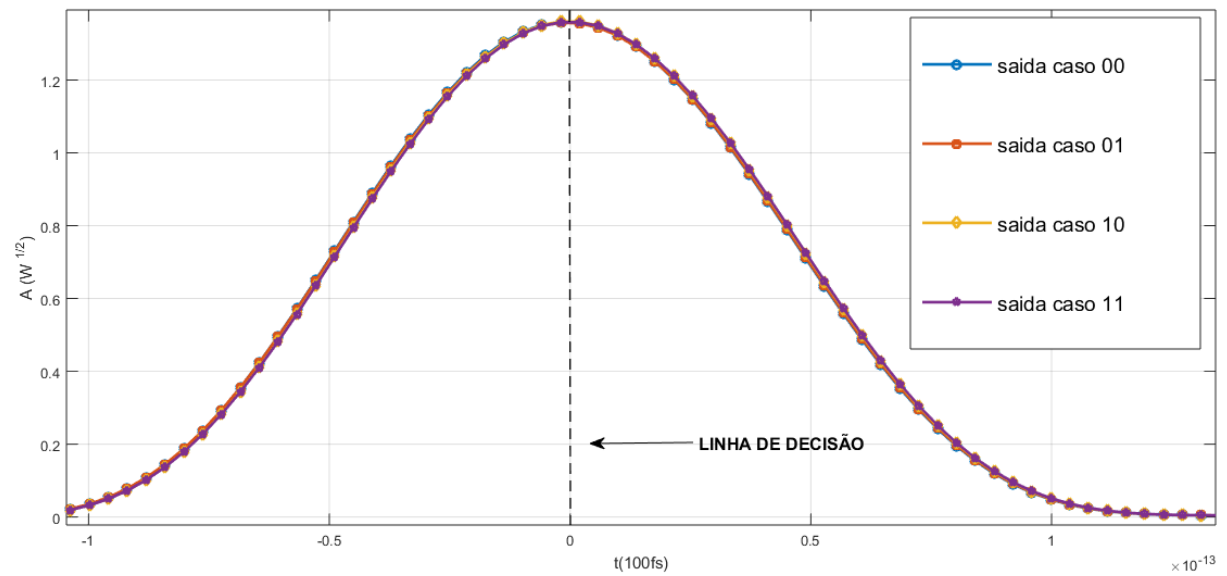
(a)



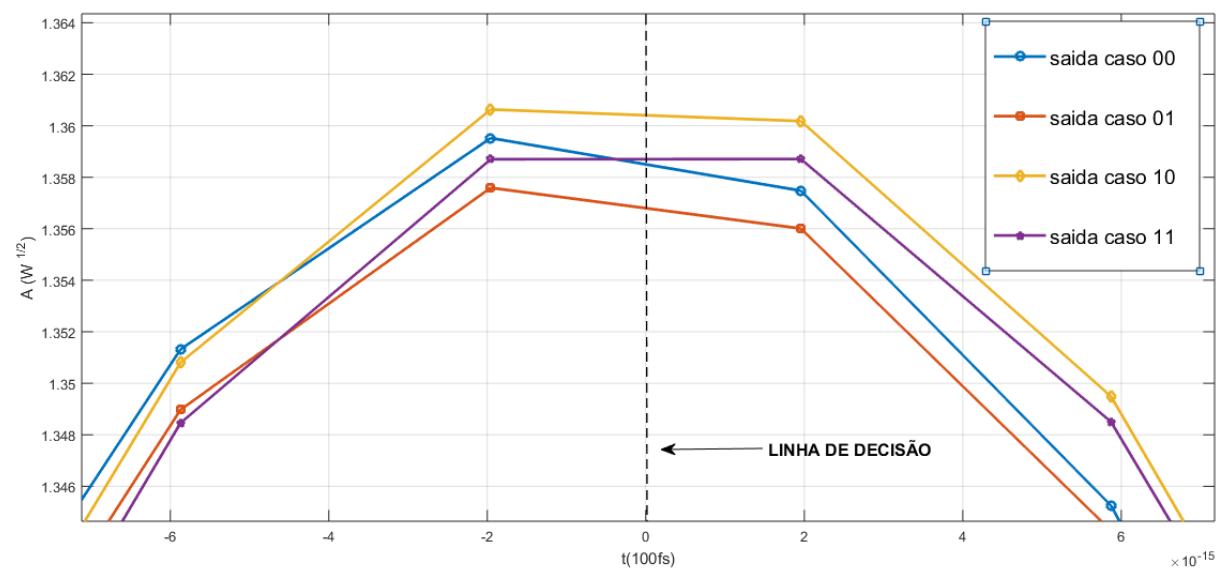
(b)

Fonte: Autor

Figura 16 - Gráfico para a porta lógica AND, $\Delta\Phi_1 = 0,2\pi$ e $\Delta\Phi_2 = 1,2\pi$. (a) Pulso óptico na saída S_1 e (b) Pulso óptico na saída S_1 aproximado.



(a)



(b)

Fonte: Autor

Para a configuração de fase de $\Delta\Phi_1 = 1,8\pi$ e $\Delta\Phi_2 = 0,8\pi$, os pulsos apresentaram deslocamento no tempo idêntico ao produzido na porta lógica OR descrita anteriormente, variando de $-1,957e^{-15}$ a $1,957e^{-15}$. Os valores máximos de amplitudes produzidos para cada caso apresentam uma diminuição em comparação aos observados na porta lógica OR para a

fase demonstrada na Figura 16, as amplitudes apresentadas são de: 1,36 para o caso 00, 1,361 para o caso 01, 1,358 para o caso 10 e 1,359 para o caso 11. A presente configuração resultou em uma porta lógica AND na saída S_1 do Interferômetro.

Tabela 11 – Operações lógica para a configuração de $\Delta\Phi_1 = 0,2\pi$ e $\Delta\Phi_2 = 1,2\pi$ e para $\Delta\Phi_1 = 1,8\pi$ e $\Delta\Phi_2 = 0,8\pi$.

E_1	E_2	S_1	$B(W^{1/2})$	t (fs)	S_2	$B(W^{1/2})$	t (fs)
0	0	0	1,36	$-1,957e^{-15}$	0	1,36	$-1,957e^{-15}$
0	1	0	1,358	$1,957e^{-15}$	0	1,361	$1,957e^{-15}$
1	0	0	1,361	$1,957e^{-15}$	0	1,358	$1,957e^{-15}$
1	1	1	1,359	$1,957e^{-15}$	1	1,359	$1,957e^{-15}$
AND $\Delta\Phi_1 = 0,2\pi$ $\Delta\Phi_2 = 1,2\pi$				AND $\Delta\Phi_1 = 1,8\pi$ $\Delta\Phi_2 = 0,8\pi$			

A variação de tempo para as duas configurações de fases utilizadas ocorreu de $-1,957e^{-15}$ a $1,957e^{-15}$, como descrito na Tabela 11. A saída S_2 do guia 2 da configuração $\Delta\Phi_1 = 0,2\pi$ e $\Delta\Phi_2 = 1,2\pi$ não apresentou nenhuma porta lógica, a saída S_1 do guia 1 da configuração $\Delta\Phi_1 = 1,8\pi$ e $\Delta\Phi_2 = 0,8\pi$ não apresentou nenhuma porta lógica para a combinação de fase utilizada. A distância entre os pulsos Δt é descrita na Tabela 12.

Tabela 12 - Variação Δt entre os pulsos

$\Delta\Phi_1 = 0,2\pi; \Delta\Phi_2 = 1,2\pi$					$\Delta\Phi_1 = 1,8\pi; \Delta\Phi_2 = 0,8\pi$				
	00	01	10	11		00	01	10	11
Δt 00	-	-	-	$3,914e^{-15}$	Δt 00	-	-	-	$3,914e^{-15}$
01	-	-	-	$3,914e^{-15}$	01	-	-	-	$3,914e^{-15}$
10	-	-	-	$3,914e^{-15}$	10	-	-	-	$3,914e^{-15}$
11	$3,914e^{-15}$	$3,914e^{-15}$	$3,914e^{-15}$	-	11	$3,914e^{-15}$	$3,914e^{-15}$	$3,914e^{-15}$	-

Para as duas configurações de porta AND, a variação de tempo ocorreu de $-1,957e^{-15}$ a $1,957e^{-15}$, não foi observado variação entre os pulsos gerados para as saídas 01;10 e 11, para as duas configurações os pulsos estão equidistantes de 0 e entre si, a operação 00 apresenta variação de $1,957e^{-15}$ a linha de decisão “0” e de $3,914e^{-15}$ as demais operações.

A faixa compreendida entre $0,3\pi$ a $1,7\pi$, quando fixado em $\Delta\Phi_1$, não apresentou nenhuma porta lógica para as suas combinações de $\Delta\Phi_2$.

5.1.2 Configuração 2 – $\epsilon = 1$ fs

Para a configuração 2, todas as fases de $\Delta\Phi_1$ com exceção π , apresentaram portas lógicas. Foram gerados no total 96 (noventa e seis) portas, sendo 62 (sessenta e duas) do tipo OR e 34 (trinta e quatro) AND, descrito na Tabela 13. As portas implementadas apresentam um maior espaçamento entre os pulsos, facilitando a leitura dos dados e diminuindo a chance de erro de bit durante a transmissão.

Tabela 13 - Portas implementadas para a configuração 2

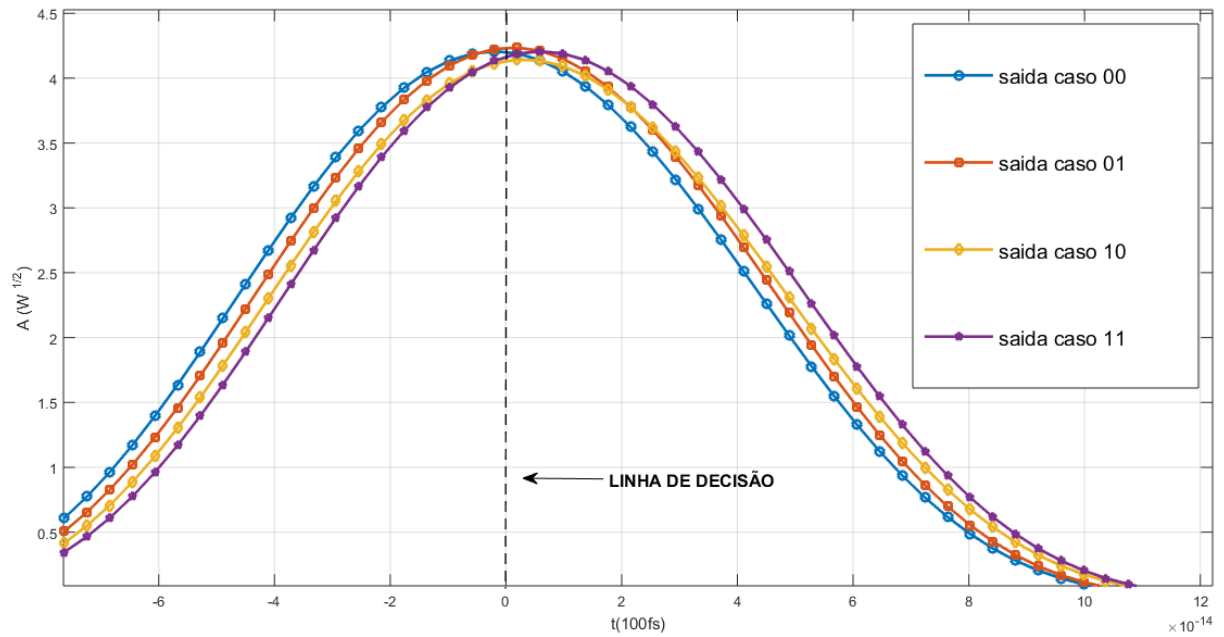
Portas	Fase $\Delta\Phi_1$ e $\Delta\Phi_2$ variando de (0π a 2π)
OR	62 (sessenta e duas)
AND	34 (trinta e quatro)
TOTAL	96 (noventa e seis)

Fonte: Autor

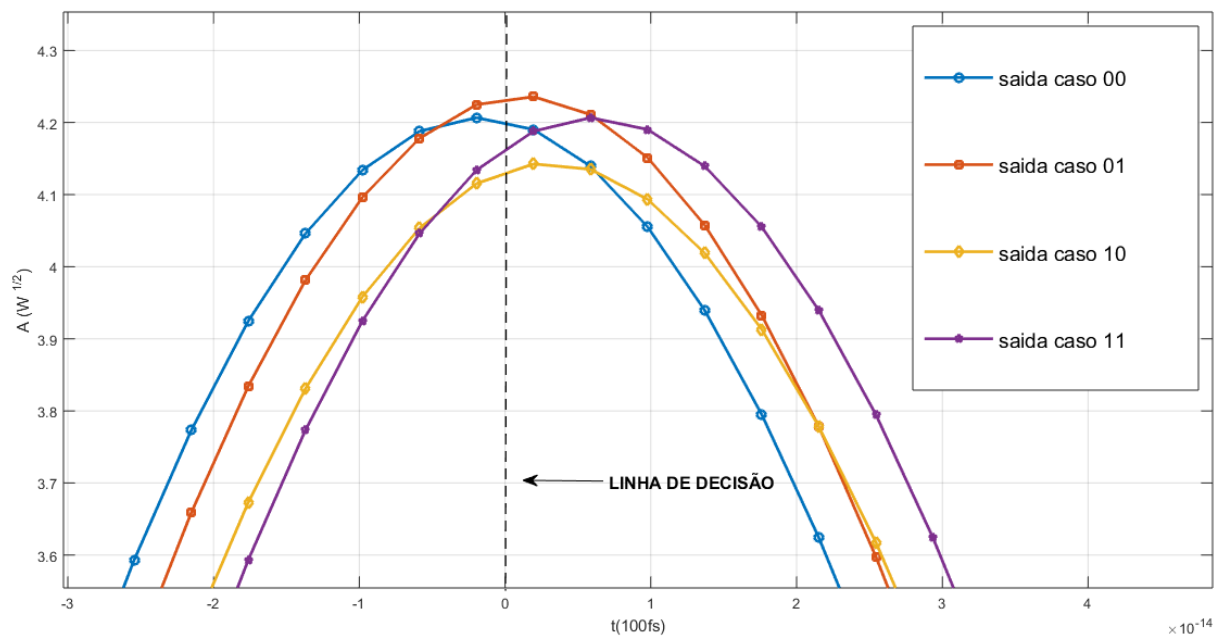
Observamos um significativo aumento de portas lógicas implementadas em comparação com a configuração anterior. A Figura 17 e 18 apresentam as melhores combinações de $\Delta\Phi$ para as portas lógicas implementadas.

A Figura 17 apresenta a porta lógica OR implementada na saída S_1 do guia 1 do MZI quando $\Delta\Phi_1 = 0\pi$ e $\Delta\Phi_2 = 0,7\pi$.

Figura 17 - Gráfico para a porta lógica OR gerada para $\Delta\Phi_1 = 0\pi$ e $\Delta\Phi_2 = 0,7\pi$. (a) Pulso óptico na saída S_1 e (b) Pulso óptico na saída S_1 aproximado.



(a)



(b)

Fonte: Autor

Para a presente configuração, os pulsos apresentaram deslocamento no tempo de $-1,957e^{-15}$ para o caso 00, de $1,957e^{-15}$ para os casos 01 e 10 e de $5,871e^{-15}$ para 11. Os valores máximos de amplitudes produzidos para cada caso são de: 4,207 para o caso 00, 4,236 para o caso 01, 4,143 para o caso 10 e de 4,207 para o caso 11. Os pulsos gerados não apresentam sobreposição. A presente configuração resultou em uma porta lógica OR na saída S_1 do Interferômetro.

Tabela 14 - Operações lógica para a configuração de $\Delta\Phi_1 = 0\pi$ e $\Delta\Phi_2 = 0,7\pi$.

E_1	E_2	S_1	$A(W^{1/2})$	t (fs)
0	0	0	4,207	$-1,957e^{-15}$
0	1	1	4,236	$1,957e^{-15}$
1	0	1	4,143	$1,957e^{-15}$
1	1	1	4,207	$5,871e^{-15}$
OR				
$\Delta\Phi_1 = 0\pi$				
$\Delta\Phi_2 = 0,7\pi$				

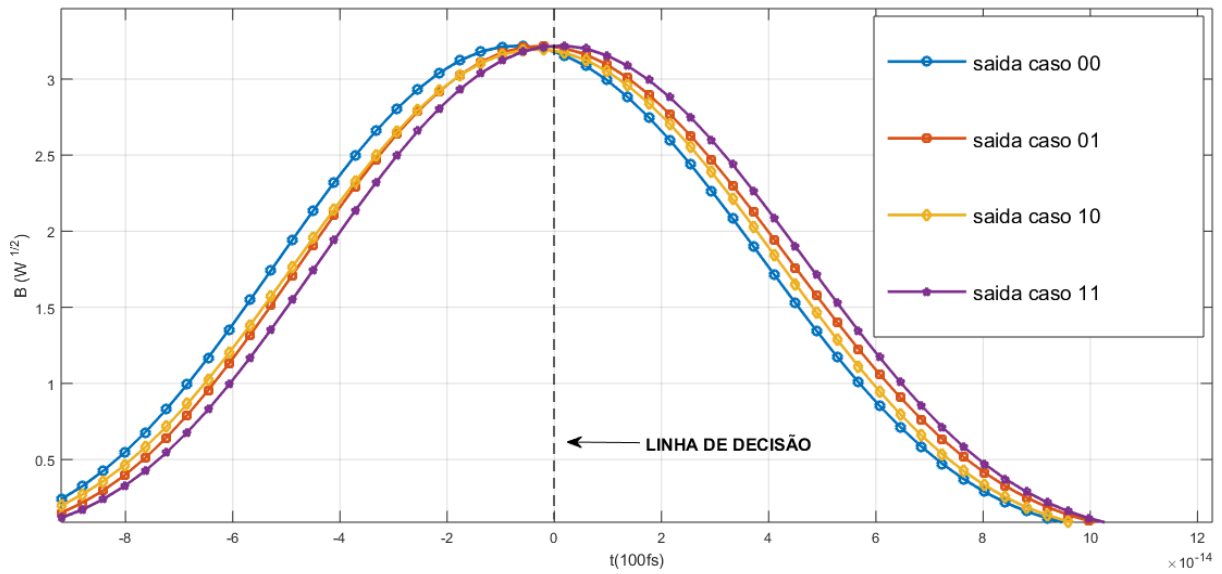
Tabela 15 - Variação Δt entre os pulsos para $\Delta\Phi_1 = 0\pi$ e $\Delta\Phi_2 = 0,7\pi$.

	00	01	10	11
Δt	-	$3,914e^{-15}$	$3,914e^{-15}$	$6,164e^{-15}$
00	-	$3,914e^{-15}$	-	-
01	$3,914e^{-15}$	-	-	-
10	$3,914e^{-15}$	-	-	-
11	$6,164e^{-15}$	-	-	-

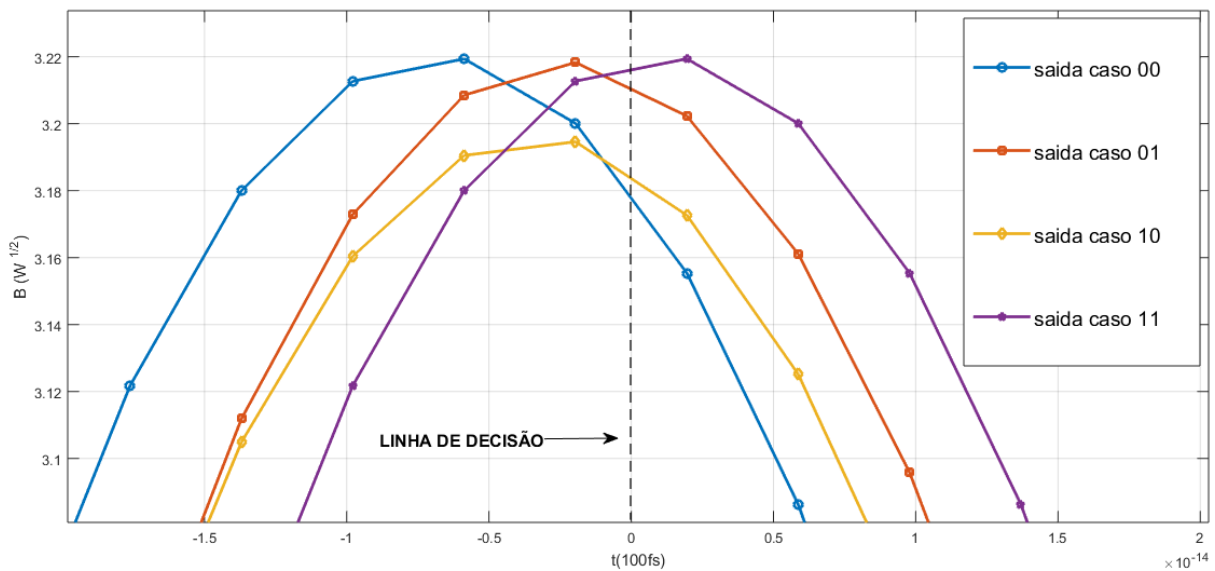
Com o valor fixo da $\Delta\Phi_1$ em 0π e $\Delta\Phi_2$ variando na faixa de $0,5$ a $0,7\pi$, foi implementado portas lógicas do tipo OR, todas ocorridas na saída S_1 do guia 1 do acoplador. A maior janela de implementação de portas lógicas OR foi produzida para as configurações de $\Delta\Phi_1$ fixo em $0,1\pi$ e $0,2\pi$ quando $\Delta\Phi_2$ variou de $1,2\pi$ à $1,5\pi$ e para $\Delta\Phi_1$ fixo em $1,8\pi$ e $1,9\pi$ quando $\Delta\Phi_2$ variou de $1,2\pi$ à $1,5\pi$. A configuração onde $\Delta\Phi_1 = 0\pi$ e $\Delta\Phi_2 = 0,7\pi$ apresentou as melhores características dentre as portas produzidas para a presente configuração.

A configuração de $\epsilon = 1$ fs, apresentou quantidade significativa de portas lógicas do tipo AND, comparado com o $\epsilon = 0,1$ fs tivemos um aumento de 30 (trinta) portas lógicas. A Figura 18 apresenta a porta lógica gerada para a combinação de $\Delta\Phi_1 = 1,3\pi$ e $\Delta\Phi_2 = 0,8\pi$ onde a porta foi implementada na saída S_2 do guia 2 do acoplador. Dentre as 32 portas geradas a presente configuração de fase apresentou as melhores características.

Figura 18 - Gráfico para a porta lógica AND, $\Delta\Phi_1 = 1,3\pi$ e $\Delta\Phi_2 = 0,8\pi$. (a) Pulso óptico na saída S_2 e (b) Pulso óptico na saída S_2 aproximado.



(a)



(b)

Os pulsos apresentaram deslocamento no tempo na faixa de $-5,871e^{-15}$ a $1,957e^{-15}$, como descrito na Tabela 16. Os valores máximos de amplitudes produzidos estão na faixa de 3,218 a 3,195 $W^{1/2}$, demonstrado na Tabela 16. A presente configuração resultou em uma porta lógica AND na saída S_2 do MZI.

Tabela 16 - Operações lógica para a configuração, $\Delta\Phi_1 = 1,3\pi$ e $\Delta\Phi_2 = 0,8\pi$.

E_1	E_2	S_1	$A(W^{1/2})$	t (fs)
0	0	0	3,219	$-5,871e^{-15}$
0	1	0	3,218	$-1,957e^{-15}$
1	0	0	3,195	$-1,957e^{-15}$
1	1	1	3,219	$1,957e^{-15}$
AND $\Delta\Phi_1 = 1,3\pi$ $\Delta\Phi_2 = 0,8\pi$				

Tabela 17 - Variação Δt entre os pulsos

	00	01	10	11
Δt	00	-	$3,914e^{-15}$	$3,914e^{-15}$
	01	$3,914e^{-15}$	-	$3,914e^{-15}$
	10	$3,914e^{-15}$	-	$3,914e^{-15}$
	11	$7,828e^{-15}$	$3,914e^{-15}$	-

O pulso produzido para a operação lógica 00 apresentou o maior deslocamento no tempo, obtendo um $\Delta t = -5,871e^{-15}$ para a linha de decisão e de $7,828e^{-15}$ para a operação 11. Os pulsos não apresentaram sobreposição durante a sua transmissão. A saída S_1 do guia 1 da configuração não apresentou porta lógica para a presente fase analisada.

Para a presente configuração de ϵ , os pulsos apresentaram uma maior distância entre si do que a analisada para a configuração de $\epsilon = 0,1fs$, uma maior distância facilita a leitura dos dados e diminui a possibilidade de erro de bit durante a transmissão.

Em todas as combinações foram geradas portas lógicas, variando em OR e AND e em diversos casos as portas ocorreram de forma simultânea, como descrito na Tabela 18.

Tabela 18 - Portas lógicas geradas para o $\epsilon = 1$ fs

(continua)

$\Delta\Phi_1$	$\Delta\Phi_2$	OR		AND	
0π	$0,5\pi$	S_1	-	-	-
	$0,6\pi$	S_1	-	-	-
	$0,7\pi$	S_1	-	-	-
	$1,3\pi$	-	S_2	-	-
	$1,4\pi$	-	S_2	-	-
	$1,5\pi$	-	S_2	-	-
$0,1\pi$	$0,6\pi$	S_1	-	-	-
	$0,7\pi$	S_1	-	-	-
	$1,2\pi$	-	S_2	-	-
	$1,3\pi$	S_1	S_2	-	-
	$1,4\pi$	-	S_2	-	-
	$1,5\pi$	-	S_2	-	-
$0,2\pi$	$0,6\pi$	S_1	-	-	-
	$0,7\pi$	S_1	-	-	-
	$1,2\pi$	-	S_2	-	-
	$1,3\pi$	S_1	S_2	-	-
	$1,4\pi$	-	S_2	-	-
	$1,5\pi$	-	S_2	-	-
$0,3\pi$	$1,2\pi$	-	S_2	-	-
	$1,3\pi$	-	S_2	-	-
$0,4\pi$	$1,2\pi$	-	S_2	S_1	-
	$1,3\pi$	-	S_2	-	-
$0,5\pi$	$1,2\pi$	-	S_2	S_1	-
	$1,3\pi$	-	S_2	-	-
$0,6\pi$	$1,2\pi$	-	S_2	S_1	-
	$1,3\pi$	-	-	S_1	-
$0,7\pi$	0π	S_1	-	-	-
	2π	S_1	-	-	-
	$1,1\pi$	-	-	S_1	-
	$1,2\pi$	-	-	S_1	-

Tabela 18 - Portas lógicas geradas para o $\epsilon = 1$ fs

(continua)

$\Delta\Phi_1$	$\Delta\Phi_2$	OR		AND	
$0,7\pi$	$1,3\pi$	-	-	S1	-
	$1,4\pi$	-	-	S1	-
$0,8\pi$	0π	-	-	S1	-
	$0,1\pi$	S1	-	-	-
	$0,2\pi$	S1	-	-	-
	$1,1\pi$	-	-	S1	-
	$1,2\pi$	-	-	S1	-
	$1,8\pi$	-	-	S1	-
	$1,9\pi$	-	-	S1	-
	2π	-	-	S1	-
$0,9\pi$	$0,2\pi$	-	-	S1	-
	$1,1\pi$	-	-	S1	-
Π	$0,9\pi$	-	-	S1	-
	$1,1\pi$	-	-	-	S2
$1,1\pi$	$0,9\pi$	-	-	-	S2
	$1,8\pi$	-	-	-	S2
$1,2\pi$	0π	-	-	-	S2
	$0,1\pi$	-	-	-	S2
	$0,2\pi$	-	-	-	S2
	$0,8\pi$	-	-	-	S2
	$0,9\pi$	-	-	-	S2
	$1,8\pi$	-	S2	-	-
	$1,9\pi$	-	S2	-	-
$1,3\pi$	0π	-	S2	-	-
	$0,5\pi$	-	-	-	S2
	$0,6\pi$	-	-	-	S2
	$0,8\pi$	-	-	-	S2
	$0,9\pi$	-	-	-	S2
	2π	-	S2	-	-

Tabela 18 - Portas lógicas geradas para o $\epsilon = 1$ fs

(conclusão)

$1,4\pi$	$0,7\pi$	-	-	-	S_2
	$0,8\pi$	S_1	-	-	-
$\Delta\Phi_1$	$\Delta\Phi_2$	OR		AND	
$1,5\pi$	$0,7\pi$	S_1	-	-	-
	$0,8\pi$	S_1	-	-	S_2
$1,6\pi$	$0,7\pi$	S_1	-	-	-
	$0,8\pi$	S_1	-	-	S_2
$1,7\pi$	$0,7\pi$	S_1	-	-	-
	$0,8\pi$	S_1	-	-	-
$1,8\pi$	$0,5\pi$	S_1	-	-	-
	$0,6\pi$	S_1	-	-	-
	$0,7\pi$	S_1	S_2	-	-
	$0,8\pi$	S_1	-	-	-
	$1,3\pi$	-	S_2	-	-
	$1,4\pi$	-	S_2	-	-
$1,9\pi$	$0,5\pi$	S_1	-	-	-
	$0,6\pi$	S_1	-	-	-
	$0,7\pi$	S_1	S_2	-	-
	$0,8\pi$	S_1	-	-	-
	$1,3\pi$	-	S_2	-	-
	$1,4\pi$	-	S_2	-	-
2π	$0,5\pi$	S_1	-	-	-
	$0,6\pi$	S_1	-	-	-
	$0,7\pi$	S_1	S_2	-	-
	$1,3\pi$	-	S_2	-	-
	$1,4\pi$	-	S_2	-	-
	$1,5\pi$	-	S_2	-	-

Fonte: Autor

5.1.3 Configuração 3 – $\epsilon = 5$ fs

Para a configuração 3, com $\epsilon = 5$ fs todas as fases de $\Delta\Phi_1$ apresentaram portas lógicas. Os resultados obtidos para a presente configuração apresentaram números inferiores de portas lógicas OR quando comparados a de $\epsilon = 1$ fs e números superiores as duas configurações de ϵ já estudadas para a implementação de portas AND. A Tabela 19 apresenta as portas lógicas implementadas e o seu quantitativo.

Tabela 19 - Portas lógicas implementadas para a configuração de $\epsilon = 5$ fs

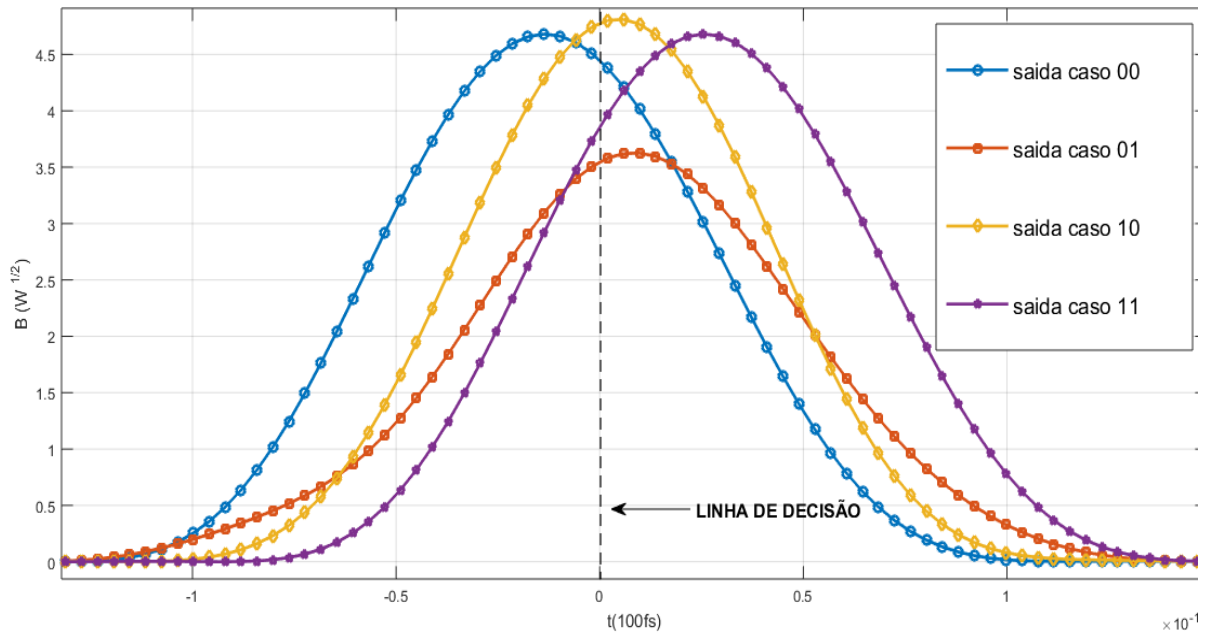
Portas	Fase $\Delta\Phi_1$ variando de (0π a 2π)
OR	58 (cinquenta e oito)
AND	88 (oitenta e oito)
TOTAL	146 (cento e quarenta e seis)

Fonte: Autor

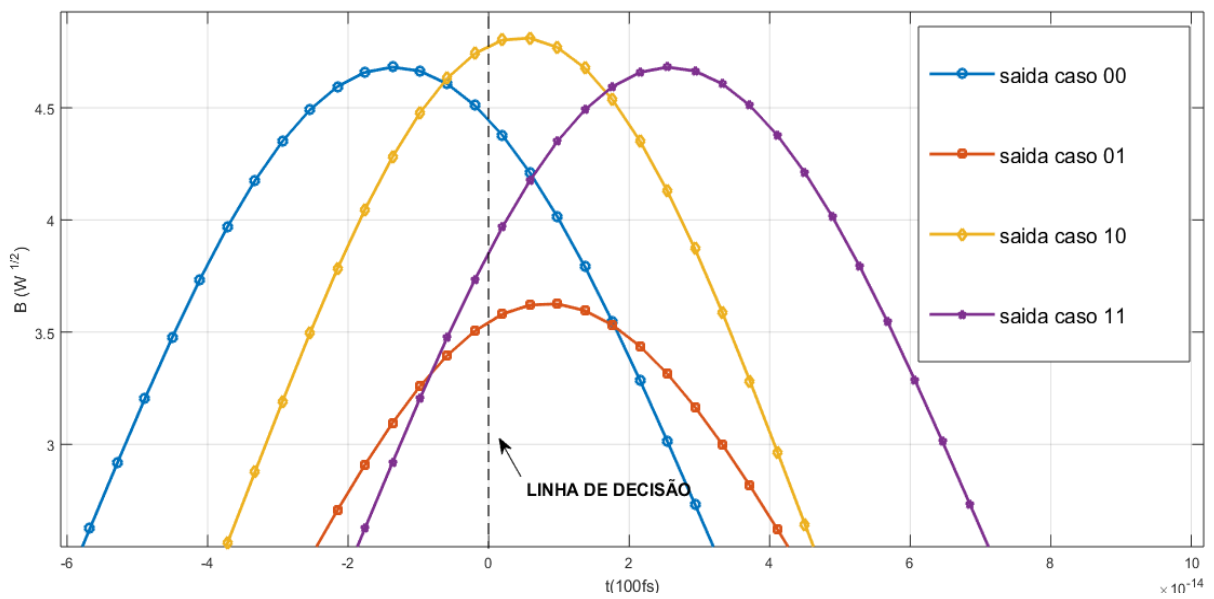
Os valores dos pulsos gerados para todas as fases foram bem mais espaçados no tempo do que para as configurações anteriores. Uma maior distância entre os pulsos do valor de referência e entre si, propicia uma maior confiabilidade da leitura dos dados e diminui a chance de erro de bits durante a transmissão.

A combinação de fase que apresentou as melhores características dentre as 58 portas lógicas OR implementadas foi a de $\Delta\Phi_1 = 1,8\pi$ e $\Delta\Phi_2 = 1,6\pi$, descrita na Figura 19, onde a combinação lógica ocorreu na saída S_2 do guia 2 do acoplador.

Figura 19 - Gráfico para a porta lógica OR, $\Delta\Phi_1 = 1,8\pi$ e $\Delta\Phi_2 = 1,6\pi$. (a) Pulso óptico na saída S_2 e (b) Pulso óptico na saída S_2 aproximado.



(a)



(b)

Fonte: Autor

O espaçamento entre os pulsos e a linha de decisão facilita a leitura dos dados, a porta gerada não apresentou nenhuma sobreposição de pulsos. O deslocamento no tempo Δt

ocorreu na ordem de fs e variou de: $-13,7e^{-15}$ para o caso 00 a $25,44e^{-15}$ para o caso 11, pulsos posicionados na extremidade da transmissão, descrito na Tabela 20. O pulso com maior energia foi o de 10 com $4,811 W^{1/2}$, e o de menor energia foi o de $3,621 W^{1/2}$, ocorrido para o caso 01, como demonstrado na Tabela 21.

Tabela 20 - Operações lógicas para a configuração, $\Delta\Phi_1 = 1,8\pi$ e $\Delta\Phi_2 = 1,6\pi$.

E_1	E_2	S_1	$A(W^{1/2})$	t (fs)
0	0	0	4,681	$-13,7e^{-15}$
0	1	1	3,626	$9,785e^{-15}$
1	0	1	4,811	$5,871e^{-15}$
1	1	1	4,681	$25,44e^{-15}$
OR				
$\Delta\Phi_1 = 1,8\pi$				
$\Delta\Phi_2 = 1,6\pi$				

Tabela 21 - Variação Δt entre os pulsos

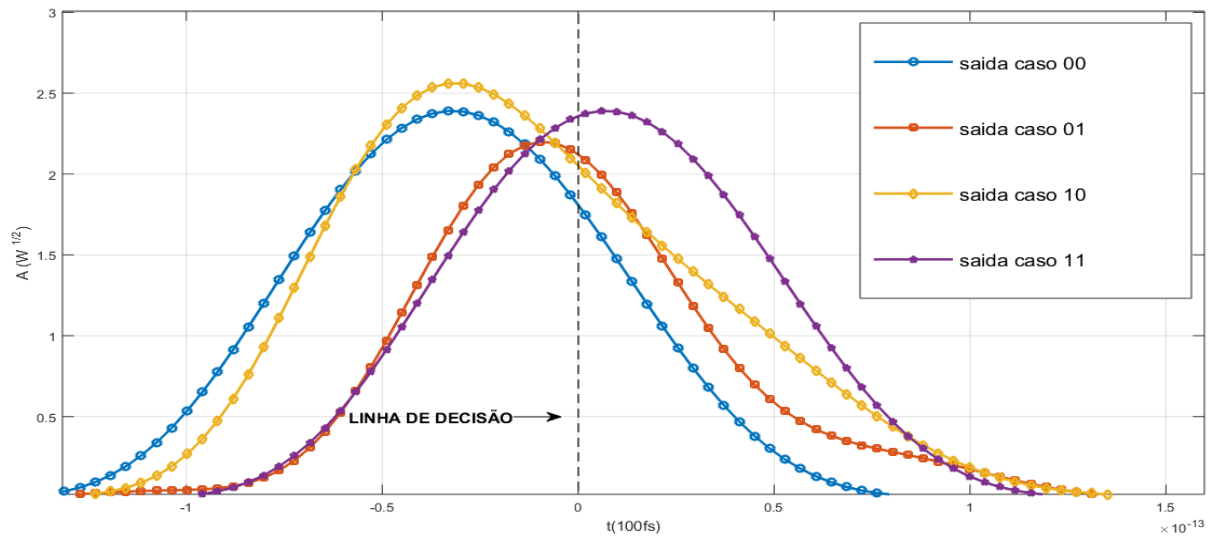
	00	01	10	11
Δt	00	-	$23,485e^{-15}$	$19,571e^{-15}$
	01	$23,485e^{-15}$	-	$15,655 e^{-15}$
	10	$19,571e^{-15}$	$3,914e^{-15}$	-
	11	$39,14e^{-15}$	$15,655 e^{-15}$	$19,569 e^{-15}$

As maiores faixas para a implementação de portas lógicas OR ocorreram para os valores de $\Delta\Phi_1$ fixo em $0,2\pi$ e $\Delta\Phi_2$ na faixa de $0,2\pi$ a $0,5\pi$ e para $\Delta\Phi_1$ fixo em $1,8\pi$ e $\Delta\Phi_2$ na faixa de $1,5\pi$ a $1,8\pi$. Não apresentando grandes janelas de transmissão.

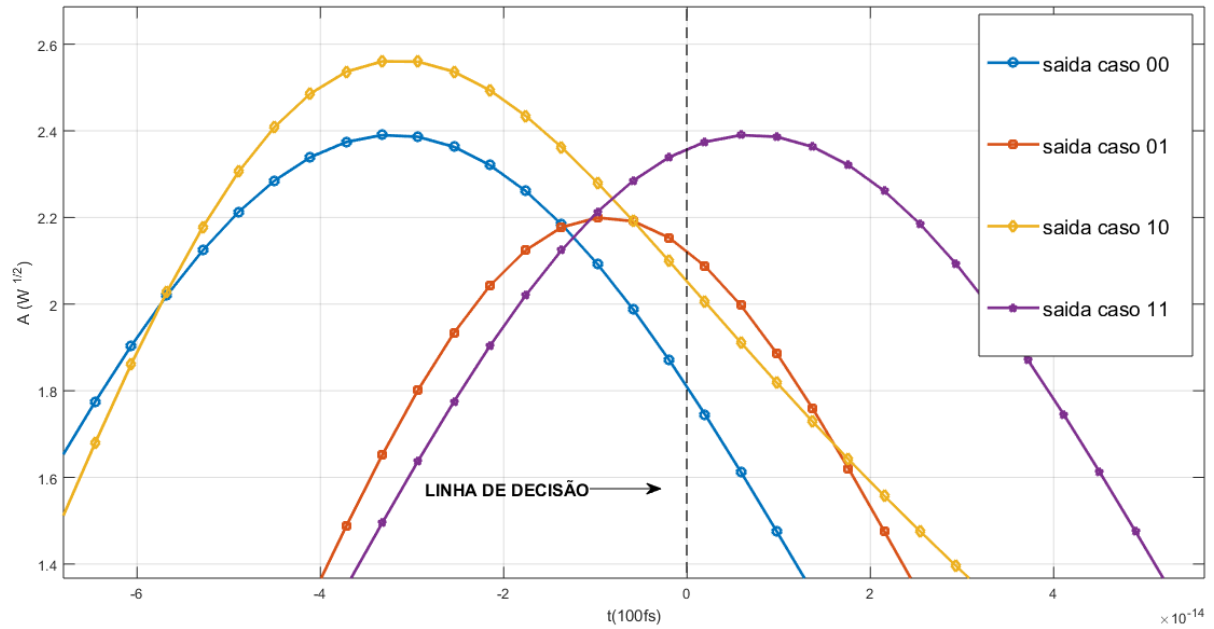
Foi obtida oitenta e oito (88) portas lógicas do tipo AND. As maiores janelas de implementação ocorreram para $\Delta\Phi_1$ fixo em $0,9\pi$, π e $1,1\pi$. Os pulsos apresentaram distância significativa do valor de referência e entre si, favorecendo a leitura da informação e diminuindo a chance de erro de bit. As Figuras 20 e 21 apresentam as portas lógicas geradas para a combinação de $\Delta\Phi_1 = \pi$ e $\Delta\Phi_2 = 0\pi$ onde as portas AND foram implementadas simultaneamente na saída S_1 e S_2 do acoplador.

Para a saída S_1 do guia 1 os pulsos apresentaram deslocamento no tempo na faixa de $-33,27e^{-15}$ fs a $5,871e^{-15}$ fs. Os valores de amplitudes produzidos estão na faixa de $2,56 \text{ W}^{1/2}$ a $2,22 \text{ W}^{1/2}$. O maior nível de energia ocorreu na saída 10 e o menor para a saída 01.

Figura 20 – Gráfico para a porta lógica AND para o $\Delta\Phi_1 = \pi$ e $\Delta\Phi_2 = 0\pi$. (a) Pulso óptico na saída S_1 e (b) Pulso óptico na saída S_1 aproximado.



(a)

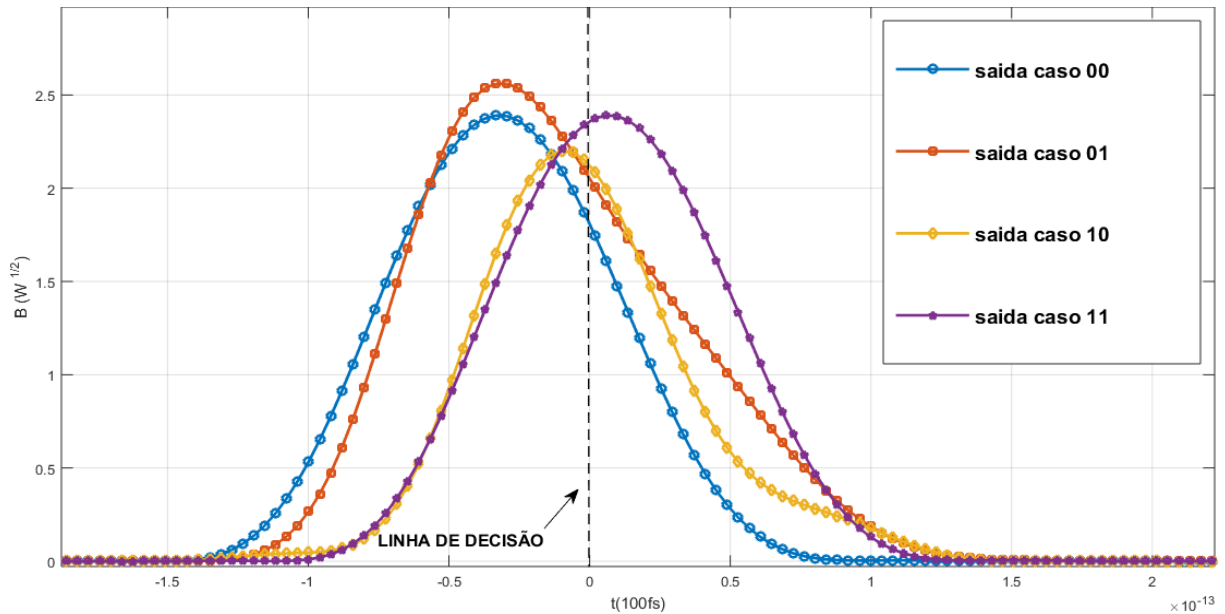


(b)

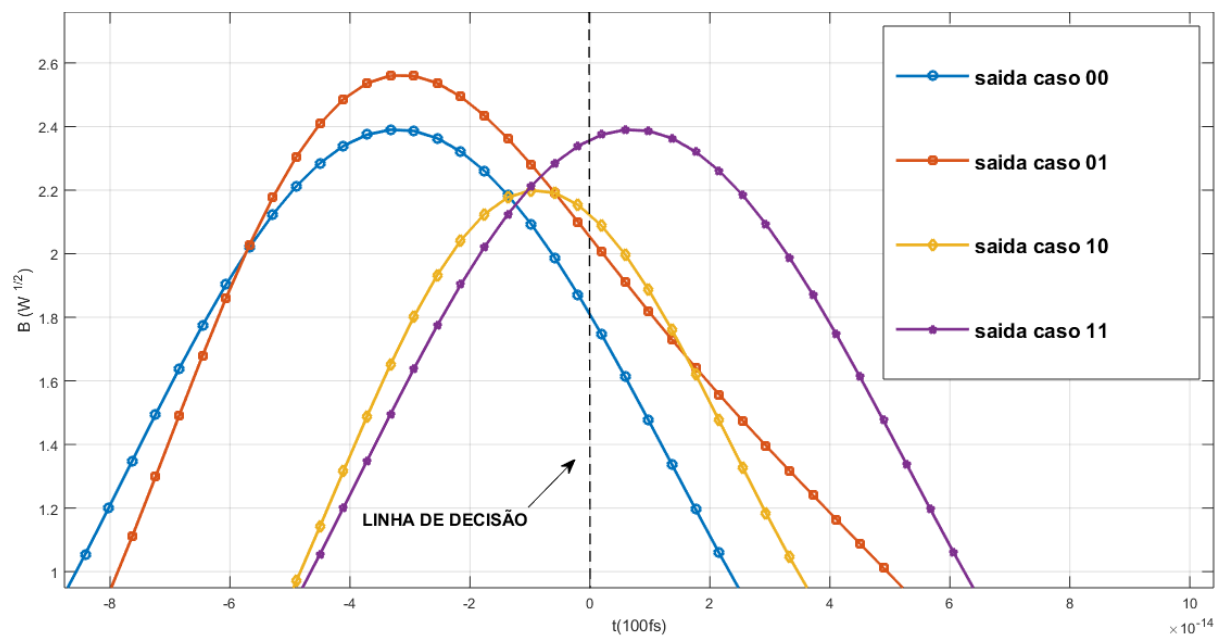
Fonte: Autor

Na saída S_2 do guia 2 os pulsos apresentaram deslocamento e amplitudes idênticos aos apresentados na saída S_1 , ocorrendo inversão de posicionamento e de amplitude entre as saídas 01 e 10. A saída 01 apresenta o maior nível de energia e a 10 a menor.

Figura 21 – Gráfico para a porta lógica AND, $\Delta\Phi_1 = \pi$ e $\Delta\Phi_2 = 0\pi$. (a) Pulso óptico na saída S_2 e (b) Pulso óptico na saída S_2 aproximado.



(a)



(b)

Fonte: Autor

As duas saídas apresentaram portas lógicas AND com um deslocamento considerável dos pulsos do valor de referência e entre si, propiciando uma excelente leitura dos dados, diminuindo assim erros de bits durante a transmissão. A Tabela 22 e 23 descreve os resultados obtidos.

Tabela 22 - Operações lógica para a configuração, $\Delta\Phi_1 = \pi$ e $\Delta\Phi_2 = 0\pi$

E_1	E_2	S_1	$A(W^{1/2})$	t (fs)	S_2	$A(W^{1/2})$	t (fs)
0	0	0	2,39	$-33,27e^{-15}$	0	2,39	$-33,27e^{-15}$
0	1	0	2,2	$-9,785e^{-15}$	0	2,56	$-33,27e^{-15}$
1	0	0	2,56	$-33,27e^{-15}$	0	2,2	$-9,785e^{-15}$
1	1	1	2,39	$5,871e^{-15}$	1	2,39	$5,871e^{-15}$
AND				AND			
$\Delta\Phi_1 = \pi$				$\Delta\Phi_1 = \pi$			
$\Delta\Phi_2 = 0\pi$				$\Delta\Phi_2 = 0\pi$			

Tabela 23 - Variação Δt entre os pulsos

S ₁					S ₂				
					</				

Tabela 24 - Portas lógicas geradas para o $\epsilon = 5$ fs

(continua)

$\Delta\Phi_1$	$\Delta\Phi_2$	OR		AND	
0 π	0,5 π	S ₁	-	-	-
	0,6 π	S ₁	-	-	-
	1,4 π	S ₁	-	-	-
	1,5 π	S ₁	-	-	-
0,1 π	0,3 π	S ₁	-	-	-
	0,4 π	S ₁	-	-	-
	0,5 π	S ₁	-	-	-
	1,3 π	-	S ₂	-	-
	1,4 π	-	S ₂	-	-
0,2 π	0,2 π	S ₁	-	-	-
	0,3 π	S ₁	-	-	-
	0,4 π	S ₁	-	-	-
	0,5 π	S ₁	-	-	-
	1,3 π	-	S ₂	-	-
0,3 π	0,2 π	S ₁	-	-	-
	0,3 π	S ₁	-	-	-
	0,4 π	S ₁	-	-	-
	1,2 π	-	S ₂	-	-
0,4 π	0,1 π	S ₁	-	-	-
	0,2 π	S ₁	-	-	-
	0,3 π	S ₁	-	-	-
	1,2 π	-	S ₂	-	-
0,5 π	0,1 π	S ₁	-	-	-
	0,2 π	S ₁	-	-	-
	1,2 π	-	S ₂	S ₁	-
0,6 π	0,1 π	S ₁	-	-	-
	0,2 π	S ₁	-	-	-
	1,2 π	-	S ₂	S ₁	-
0,7 π	0,3 π	-	-	-	S ₂
0,7 π	0,4 π	-	-	-	S ₂

Tabela 24 - Portas lógicas geradas para o $\epsilon = 5$ fs

(continua)

$\Delta\Phi_1$	$\Delta\Phi_2$	OR		AND	
0,7 π	1,3 π	-	S ₂	-	S ₂
0,8 π	0 π	-	-	S ₁	-
	0,1 π	-	-	S ₁	-
	0,2 π	-	-	S ₁	S ₂
	0,3 π	-	-	-	S ₂
	0,4 π	-	-	-	S ₂
	1,3 π	-	-	S ₁	-
	1,4 π	-	-	S ₁	-
	2 π	-	-	S ₁	-
0,9 π	0 π	-	-	S ₁	S ₂
	0,1 π	-	-	S ₁	S ₂
	0,2 π	-	-	S ₁	S ₂
	0,3 π	-	-	S ₁	S ₂
	0,4 π	-	-	-	S ₂
	0,5 π	-	-	-	S ₂
	1,3 π	-	-	S ₁	-
	1,4 π	-	-	S ₁	-
	1,5 π	-	-	S ₁	-
	1,6 π	-	-	S ₁	-
	1,7 π	-	-	S ₁	-
	1,8 π	-	-	S ₁	-
π	1,9 π	-	-	S ₁	-
	2 π	-	-	S ₁	S ₂
	0 π	-	-	S ₁	S ₂
	0,1 π	-	-	S ₁	S ₂
	0,2 π	-	-	S ₁	S ₂
	0,3 π	-	-	S ₁	S ₂
	0,4 π	-	-	S ₁	S ₂
	0,5 π	-	-	-	S ₂
	1,3 π	-	-	-	S ₂

Tabela 24 - Portas lógicas geradas para o $\epsilon = 5$ fs

(continua)

$\Delta\Phi_1$	$\Delta\Phi_2$	OR		AND	
Π	1,4 π	-	-	S_1	-
	1,5 π	-	-	S_1	-
	1,6 π	-	-	S_1	S_2
	1,7 π	-	-	S_1	S_2
	1,8 π	-	-	S_1	S_2
	1,9 π	-	-	S_1	S_2
	2 π	-	-	S_1	S_2
1,1 π	0 π	-	-	S_1	S_2
	0,1 π	-	-	-	S_2
	0,2 π	-	-	-	S_2
	0,3 π	-	-	-	S_2
	0,4 π	-	-	-	S_2
	0,5 π	-	-	-	S_2
	0,6 π	-	-	-	S_2
	0,7 π	-	-	-	S_2
	1,5 π	-	-	S_1	-
	1,6 π	-	-	S_1	-
	1,7 π	-	-	S_1	S_2
	1,8 π	-	-	S_1	S_2
	1,9 π	-	-	S_1	S_2
	2 π	-	-	S_1	S_2
1,2 π	0 π	-	-	-	S_2
	0,6 π	-	-	-	S_2
	0,7 π	-	-	-	S_2
	1,6 π	-	-	S_1	-
	1,7 π	-	-	S_1	-
	1,8 π	-	-	S_1	S_2
	1,9 π	-	-	-	S_2
	2 π	-	-	-	S_2
1,3 π	0,7 π	S_1	-	-	-

Tabela 24 - Portas lógicas geradas para o $\epsilon = 5$ fs

(conclusão)

$\Delta\Phi_1$	$\Delta\Phi_2$	OR		AND	
1,3 π	1,6 π	-	-	S ₁	-
	1,7 π	-	-	S ₁	-
1,4 π	0,8 π	S ₁	-	-	S ₂
	1,8 π	-	S ₂	-	-
	1,9 π	-	S ₂	-	-
1,5 π	0,8 π	S ₁	-	-	S ₂
1,5 π	1,8 π	-	S ₂	-	-
	1,9 π	-	S ₂	-	-
1,6 π	0,8 π	S ₁	-	-	-
	1,7 π	-	S ₂	-	-
	1,8 π	-	S ₂	-	-
	1,9 π	-	S ₂	-	-
1,7 π	0,8 π	S ₁	-	-	-
	1,6 π	-	S ₂	-	-
	1,7 π	-	S ₂	-	-
	1,8 π	-	S ₂	-	-
1,8 π	0,7 π	S ₁	-	-	-
	1,5 π	-	S ₂	-	-
	1,6 π	-	S ₂	-	-
	1,7 π	-	S ₂	-	-
	1,8 π	-	S ₂	-	-
1,9 π	0,6 π	S ₁	-	-	-
	0,7 π	S ₁	-	-	-
	1,5 π	-	S ₂	-	-
	1,6 π	-	S ₂	-	-
	1,7 π	-	S ₂	-	-
2 π	0,5 π	S ₁	-	-	-
	0,6 π	-	S ₂	-	-
	1,4 π	-	S ₂	-	-
	1,5 π	-	S ₂	-	-

Fonte: Autor

5.1.4 Configuração 4 – $\epsilon = 10$ fs

Para a configuração 4, todas as fases de $\Delta\Phi_1$ apresentaram portas lógicas. Os resultados expostos para a presente configuração apresentaram números inferiores de portas lógicas OR quando comparados a configuração de $\epsilon = 1$ e 5 fs e de portas AND quando comparado com a configuração de $\epsilon = 5$ fs. Foi demonstrado resultado superior de portas AND em comparação as configurações de $\epsilon = 0,1$ e 1 fs.

Entre as quatro configurações estudadas, foi a que apresentou maior influência dos efeitos não lineares de dispersão de terceira e quarta ordem, provocando distorção da forma do pulso, tornando-o assimétrico e oscilatório nas extremidades bem como apresentando novos picos de pulso óptico, instabilidade modulacional e ganho de intensidade.

A Tabela 25 apresenta o quantitativo de portas lógicas implementadas para a presente configuração.

Tabela 25 - Portas lógicas implementadas para a configuração de $\epsilon = 10$ fs

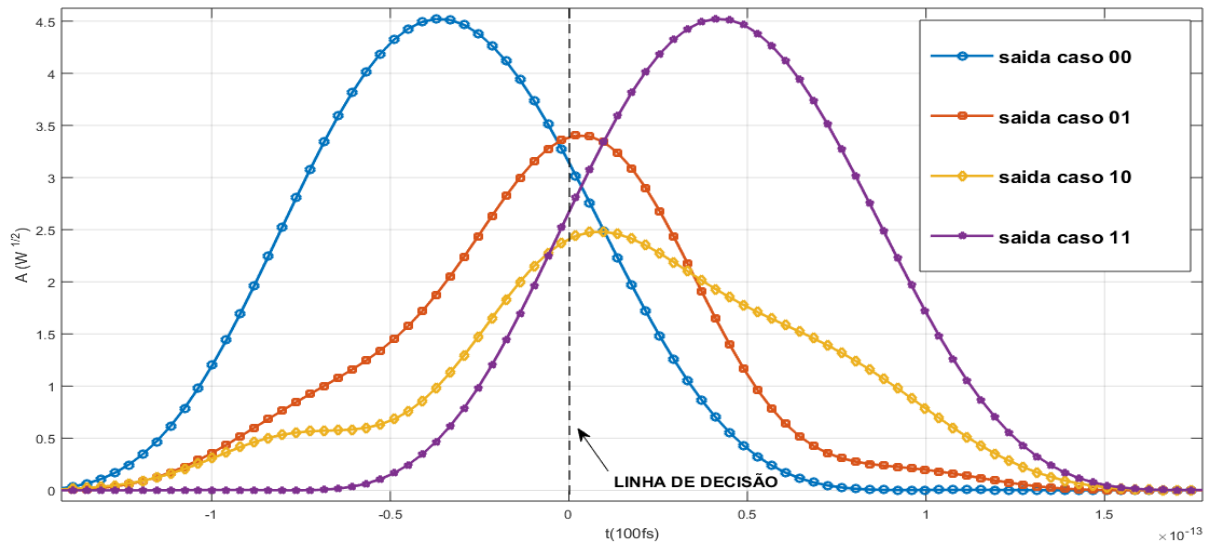
Portas	Fase $\Delta\Phi_1$ variando de (0π a 2π)
OR	34 (trinta e quatro)
AND	77 (setenta e sete)
TOTAL	111 (cento e onze)

Fonte: Autor

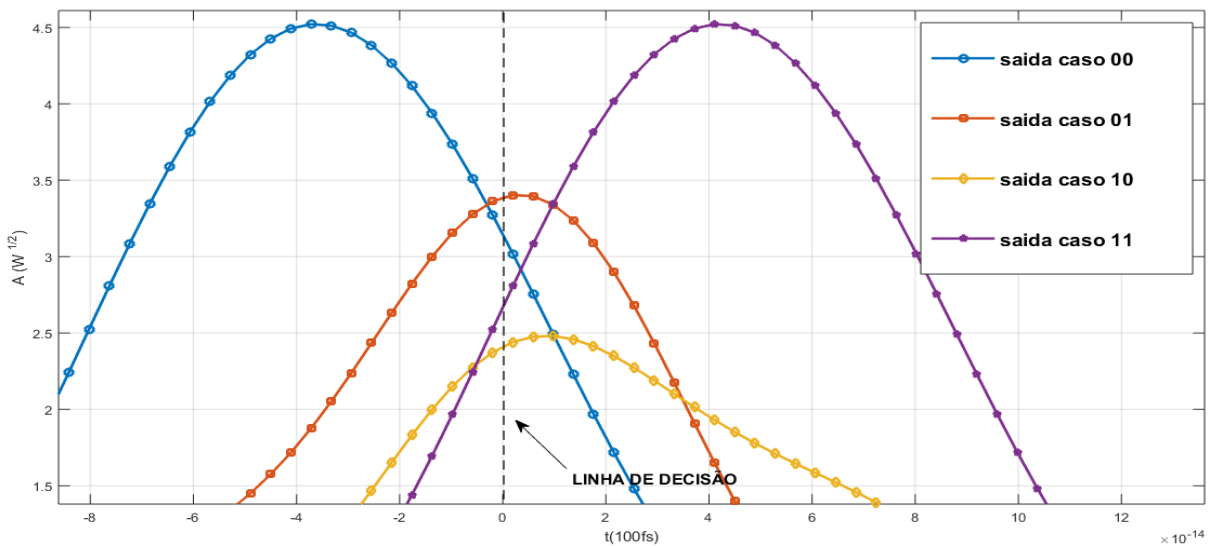
Os valores dos pulsos apresentaram distorções em pelo menos uns dos pulsos de cada porta gerada. Para a presente configuração de ϵ as portas OR implementadas apresentaram qualidade inferior em relação as já estudadas.

A combinação de fase que apresentou menores distorções dentre as 34 portas lógicas OR implementadas foi a de $\Delta\Phi_1 = 0\pi$ e $\Delta\Phi_2 = 0,6\pi$ onde a combinação lógica ocorreu na saída S_1 do guia 1, demonstrado na Figura 22.

Figura 22 - Gráfico para a porta lógica OR, $\Delta\Phi 1 = 0\pi$ e $\Delta\Phi 2 = 0,6\pi$. (a) Pulso óptico na saída S_1 e (b) Pulso óptico na saída S_1 aproximado.



(a)



(b)

Fonte: Autor

Os pulsos apresentaram espaçamento entre si, não apresentaram sobreposição e apresentaram distorções na sua propagação. O deslocamento no tempo Δt ocorreu na ordem de fs e variou de: $-37,18e^{-15}$ para o caso 00 a $41,1e^{-15}$ para o caso 11. O valor máximo de amplitude ocorreu para a saída 00 e foi de $4,521 W^{1/2}$, o valor mínimo ocorreu para a saída 10 e foi de $2,481 W^{1/2}$, descrito na Tabela 26.

Tabela 26 - Operações lógicas para a configuração, $\Delta\Phi_1 = 0\pi$ e $\Delta\Phi_2 = 0,6\pi$

E_1	E_2	S_1	$A(W^{1/2})$	t (fs)
0	0	0	4,521	$-37,18e^{-15}$
0	1	1	3,402	$1,957e^{-15}$
1	0	1	2,481	$9,785e^{-15}$
1	1	1	4,521	$41,1e^{-15}$
OR				
$\Delta\Phi_1 = 0\pi$				
$\Delta\Phi_2 = 0,6\pi$				

A distância entre os pulsos Δt é descrita na Tabela 27, não houve sobreposição dos pulsos para a presente configuração.

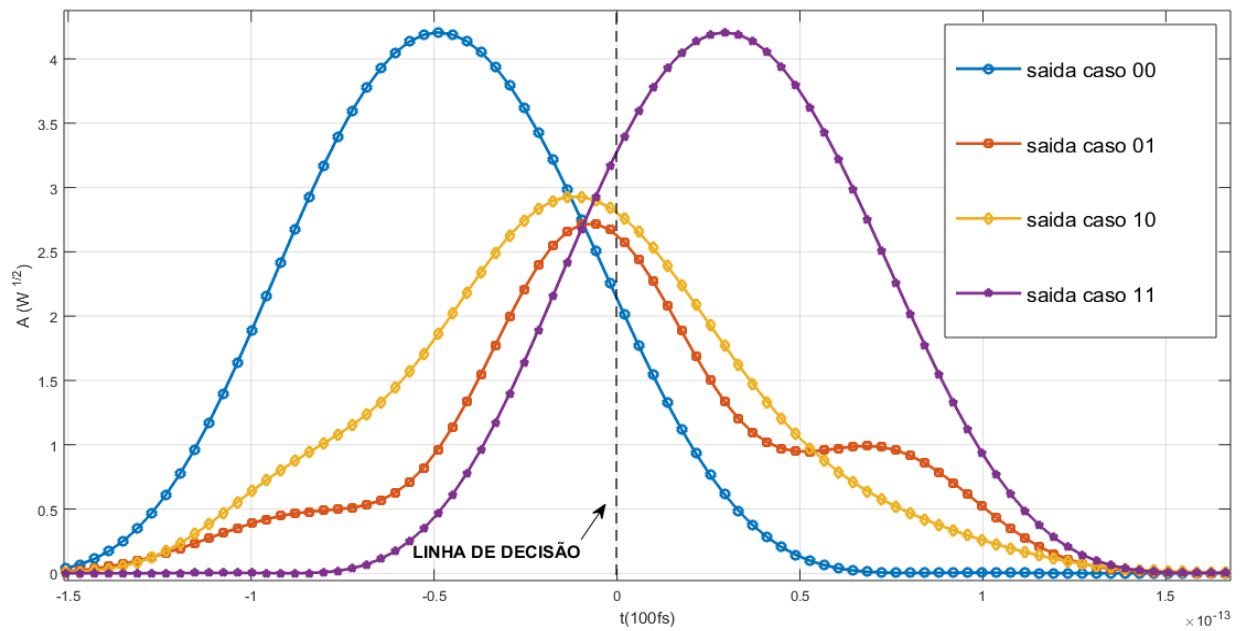
Tabela 27 - Variação Δt entre os pulsos

		00	01	10	11
Δt	00	-	$39,137e^{-15}$	$46,965e^{-15}$	$78,28e^{-15}$
	01	$39,137e^{-15}$	-	$7,828e^{-15}$	$39,143 e^{-15}$
	10	$46,965e^{-15}$	$7,828e^{-15}$	-	$31,315e^{-15}$
	11	$78,28e^{-13}$	$39,143 e^{-15}$	$31,315e^{-15}$	-

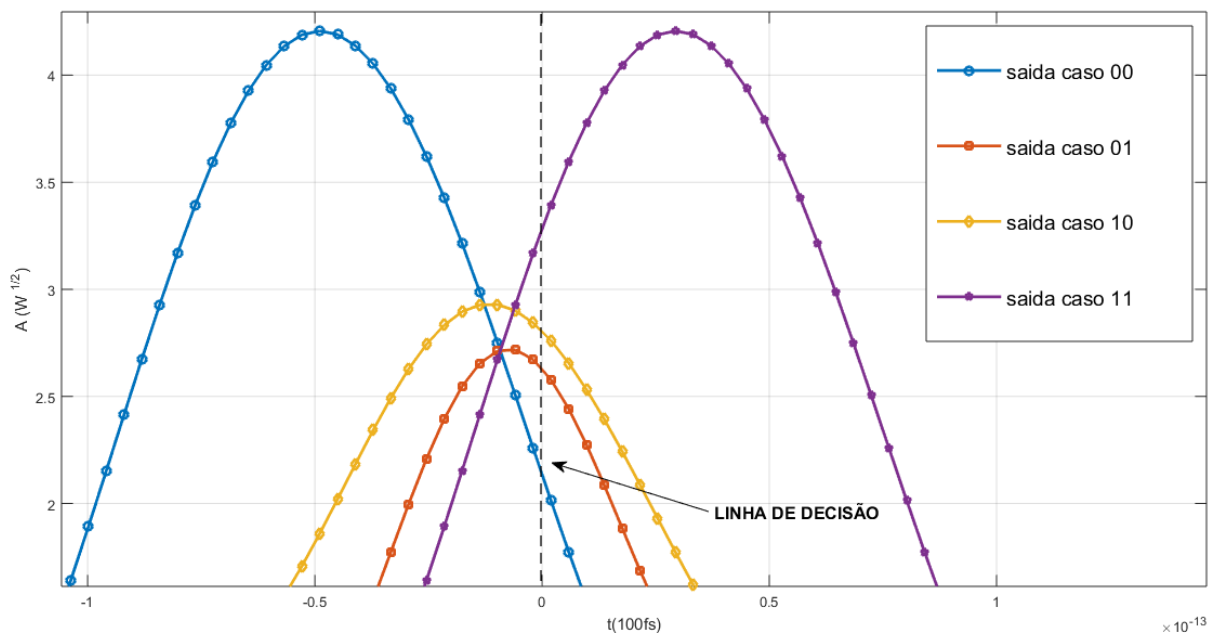
A configuração não apresentou grandes janelas de implementação de portas lógicas OR, ocorrendo em sua maioria de forma isolada e tendo suas principais janelas quando $\Delta\Phi_1$ assume o valor fixo de 0π , $1,9\pi$ e 2π , onde a janela obtida é de duas portas implementadas em sequência.

Para a porta AND a presente configuração obteve setenta e 77 (setenta e sete) portas. As maiores janelas de implementação ocorreram para $\Delta\Phi_1$ fixo em $0,9\pi$, π e $1,1\pi$. Todos os pulsos gerados apresentam distorções em sua forma. A Figuras 23 a porta lógica gerada para a combinação de $\Delta\Phi_1 = \pi$ e $\Delta\Phi_2 = 1,7\pi$ onde a porta AND foi implementada na saída S_1 do acoplador.

Figura 23 - Gráfico para a porta lógica AND, $\Delta\Phi_1 = \pi$ e $\Delta\Phi_2 = 1,7\pi$. (a) Pulso óptico na saída S_1 e (b) Pulso óptico na saída S_1 aproximado.



(a)



(b)

Fonte: Autor

Na saída S_1 do guia 1 os pulsos apresentaram deslocamento no tempo na faixa de $-48,92e^{-15}$ fs a $29,35e^{-15}$ fs. Os valores de amplitudes estão na faixa de $4,207 W^{1/2}$ a $2,718 W^{1/2}$.

como descrito na Tabela 28. A saída 00 e 11 apresentam o maior nível de energia e a saída 01 apresenta o menor nível de energia na transmissão.

Tabela 28 - Operações lógicas para a configuração, $\Delta\Phi_1 = \pi$ e $\Delta\Phi_2 = 1,7\pi$.

E_1	E_2	S_1	$A(W^{1/2})$	t (fs)
0	0	0	4,207	$-48,92e^{-15}$
0	1	1	2,718	$-5,871e^{-15}$
1	0	1	2,929	$-9,785e^{-15}$
1	1	1	4,207	$29,35e^{-15}$
AND $\Delta\Phi_1 = \pi$ $\Delta\Phi_2 = 1,7\pi$				

Mesmo apresentando distorções as saídas apresentam deslocamento satisfatório do valor de referência e não apresentam sobreposição na saída S_1 do acoplador, dados observados na Tabela 29.

Tabela 29 - Variação Δt para as saídas

	00	01	10	11
Δt	00	-	$43,049e^{-15}$	$39,135e^{-15}$
	01	$43,049e^{-15}$	-	$3,914e^{-15}$
	10	$39,135e^{-15}$	$3,914e^{-15}$	-
	11	$78,27e^{-15}$	$35,221 e^{-15}$	$39,135e^{-15}$

Em todas as combinações foram geradas portas lógicas, variando em OR e AND. Os valores de fase que favoreceram uma quantidade menor de portas lógicas ocorreram para $\Delta\Phi_1$ fixo em $0,3\pi$, $0,4\pi$ e $1,7\pi$, apresentando uma única janela.

As portas lógicas geradas simultaneamente não apresentaram qualidade em sua transmissão, apresentando grandes distorções e sobreposições de pulso em pelo menos uma de suas saídas.

A Tabela 30 apresenta as portas lógicas implementadas a presente configuração.

Tabela 30 - Portas lógicas geradas para o $\epsilon = 10$ fs

(continua)

$\Delta\Phi_1$	$\Delta\Phi_2$	OR		AND	
0π	$0,5\pi$	S_1	-	-	-
	$0,6\pi$	S_1	-	-	-
	$1,4\pi$	-	S_2	-	-
	$1,5\pi$	-	S_2	-	-
$0,1\pi$	$0,4\pi$	S_1	-	-	-
	$0,5\pi$	S_1	-	-	-
	$1,3\pi$	-	S_2	-	-
	$1,4\pi$	-	S_2	-	-
$0,2\pi$	$0,3\pi$	S_1	-	-	-
	$0,4\pi$	S_1	-	-	-
	$1,3\pi$	-	S_2	-	-
$0,3\pi$	$0,3\pi$	S_1	-	-	-
$0,4\pi$	$1,2\pi$	-	S_2	-	-
$0,5\pi$	$0,3\pi$	-	S_2	S_1	-
	$1,3\pi$	-	S_2	-	-
$0,6\pi$	$0,2\pi$	-	-	S_1	-
	$0,3\pi$	-	-	S_1	-
	$1,4\pi$	-	S_2	-	-
$0,7\pi$	$0,1\pi$	-	-	S_1	-
	$0,2\pi$	-	-	S_1	-
	$0,3\pi$	-	-	S_1	-
$0,8\pi$	0π	-	-	S_1	-
	$0,1\pi$	-	-	S_1	-
	$0,2\pi$	-	-	S_1	S_2
	$0,3\pi$	-	-	S_1	S_2
	$1,9\pi$	-	-	S_1	-
	2π	-	-	S_1	-
$0,9\pi$	0π	-	-	S_1	-
	$0,1\pi$	-	-	S_1	S_2
	$0,2\pi$	-	-	S_1	S_2

Tabela 30 - Portas lógicas geradas para o $\epsilon = 10$ fs

(continua)

$\Delta\Phi_1$	$\Delta\Phi_2$	OR		AND	
0,9 π	0,3 π	-	-	S ₁	S ₂
	0,4 π	-	-	S ₁	S ₂
	1,4 π	-	-	S ₁	-
	1,5 π	-	-	S ₁	-
	1,6 π	-	-	S ₁	-
	1,7 π	-	-	S ₁	-
	1,8 π	-	-	S ₁	-
	1,9 π	-	-	S ₁	-
	2 π	-	-	S ₁	-
π	0 π	-	-	S ₁	S ₂
	0,1 π	-	-	-	S ₂
	0,2 π	-	-	-	S ₂
	0,3 π	-	-	-	S ₂
	0,4 π	-	-	S ₁	S ₂
	0,5 π	-	-	-	S ₂
	1,5 π	-	-	S ₁	-
	1,6 π	-	-	S ₁	S ₂
	1,7 π	-	-	S ₁	-
	1,8 π	-	-	S ₁	-
	1,9 π	-	-	S ₁	-
	2 π	-	-	S ₁	S ₂
1,1 π	0 π	-	-	-	S ₂
	0,1 π	-	-	-	S ₂
	0,2 π	-	-	-	S ₂
	0,3 π	-	-	-	S ₂
	0,4 π	-	-	-	S ₂
	0,5 π	-	-	-	S ₂
	0,6 π	-	-	-	S ₂
	1,6 π	-	-	S ₁	S ₂
	1,7 π	-	-	S ₁	S ₂

Tabela 30 - Portas lógicas geradas para o $\epsilon = 10$ fs

(continua)

$\Delta\Phi_1$	$\Delta\Phi_2$	OR		AND	
1,1 π	1,8 π	-	-	S ₁	S ₂
	1,9 π	-	-	S ₁	S ₂
	2 π	-	-	S ₁	-
1,2 π	0 π	-	-	-	S ₂
	0,1 π	-	-	-	S ₂
	1,7 π	-	-	S ₁	S ₂
	1,8 π	-	-	S ₁	S ₂
	1,9 π	-	-	S ₁	-
	2 π	-	-	S ₁	-
1,3 π	0,6 π	S ₁	-	-	-
	1,7 π	-	-	-	S ₂
	1,8 π	-	-	-	S ₂
	1,9 π	-	-	-	-
1,4 π	0,6 π	S ₁	-	-	-
	1,7 π	-	-	-	S ₂
	1,8 π	-	-	-	S ₂
1,5 π	0,7 π	S ₁	-	-	-
	1,7 π	S ₁	-	-	S ₂
1,6 π	0,8 π	S ₁	-	-	-
	1,7 π	-	-	-	S ₂
1,7 π	1,7 π	-	S ₂	-	-
1,8 π	0,7 π	S ₁	-	-	-
	1,6 π	-	S ₂	-	-
	1,7 π	-	S ₂	-	-
1,9 π	0,6 π	S ₁	-	-	-
	0,7 π	S ₁	-	-	-
	1,5 π	-	S ₂	-	-
	1,6 π	-	S ₂	-	-
2 π	0,5 π	S ₁	-	-	-
	0,6 π	S ₁	-	-	-

Tabela 30 - Portas lógicas geradas para o $\epsilon = 10$ fs

(conclusão)

$\Delta\Phi_1$	$\Delta\Phi_2$	OR		AND	
2π	$1,4\pi$	-	S_2	-	-
	$1,5\pi$	-	S_2	-	-

Fonte: Autor

5.2 Análise realizada na modulação PAM

Para a modulação PAM a análise ocorre a partir de cada caso de entrada, quando é inserido 00 nas entradas (E_1 e E_2), observa-se os bits nas saídas do interferômetro e define-se qual nível lógico ele representa, o mesmo ocorre para os casos 01, 10 e 11. Os níveis lógicos são definidos em função da variação de fase $\Delta\Phi_1$ e $\Delta\Phi_2$ do interferômetro, ambos sendo variado de 0 a 2π . Em cada interação é deixado fixo $\Delta\Phi_1$ e $\Delta\Phi_2$ é variado dentro da margem estipulada. Após $\Delta\Phi_2$ ser variado dentro das fases estipuladas o $\Delta\Phi_1$ irá para a próxima fase de variação. Verifica-se a faixa de implementação da porta lógica e um ponto específico de análise que define os valores da transmissão.

A escolha do parâmetro de referência para a modulação PAM ($\epsilon = 6$) foi baseada no trabalho de (F. L. B. Martins, 2018) em que os autores afirmam ter um conjunto de ϵ e a partir desse conjunto define-se um ϵ de análise, o parâmetro foi o mesmo para as três configurações estudadas. A tabela 31 resume as configurações implementadas neste trabalho.

Tabela 31 – arquiteturas propostas para o interferômetro estudado.

	Configuração 1	Configuração 2	Configuração 3
Acoplador 1	Simétrico	Assimétrico	Assimétrico
Acoplador 2	Assimétrico	Simétrico	Assimétrico

Fonte: Autor

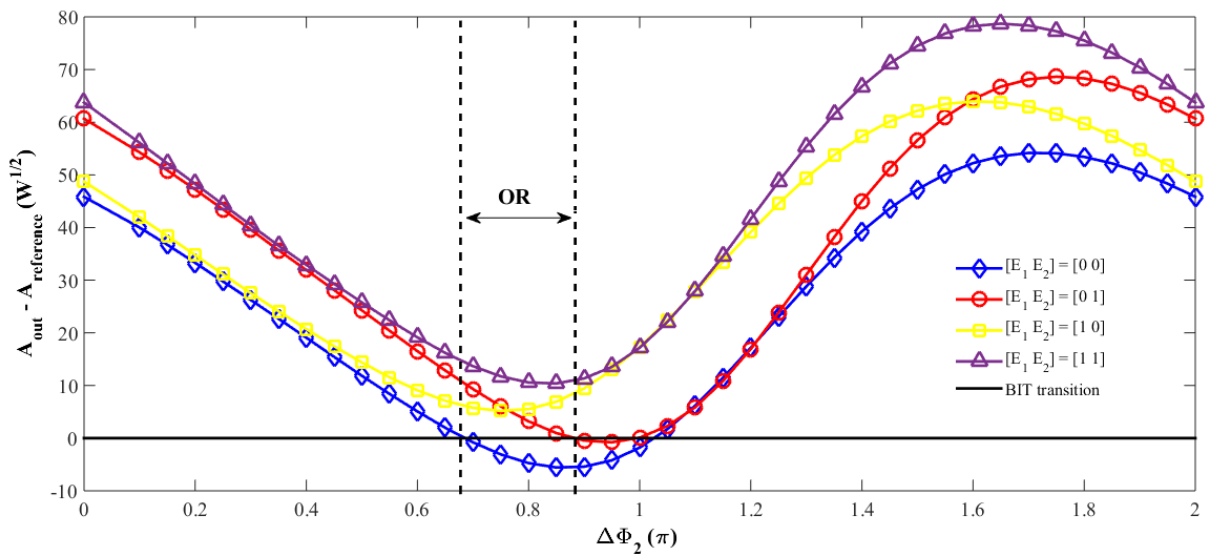
Foram implementadas portas lógicas para as três configurações propostas utilizando a modulação PAM. A seguir são apresentadas a amplitude do pulso de saída em função da variação de fase e os pulsos referentes a cada porta lógica implementada que confirmam a análise da transmissão.

5.2.1 Configuração 1 – MZI com acoplador simétrico seguido de acoplador assimétrico

Na primeira configuração, as portas lógicas foram implementadas em $\Delta\Phi_1$ assumindo os valores de 0.6π , 1.5π e 1.55π . Foram implementadas portas OR, NAND e NOR.

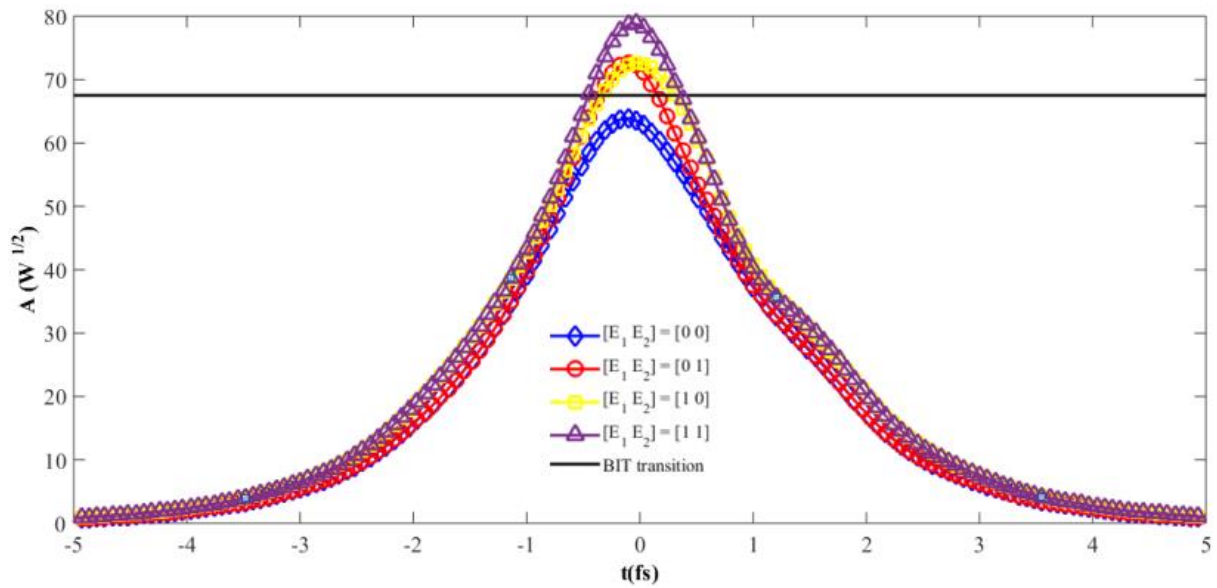
A porta OR apresentada na Figura 24 é implementada quando $\Delta\Phi_1 = 0,6\pi$. Ela é limitada a faixa de $\Delta\Phi_2 = [0,8087; 0,9404]\pi$. Na Figura 25 são apresentados os pulsos de saída referente a cada caso inserido na entrada do MZI confirmando a transmissão apresentada na Figura 24. O caso 11 apresenta maior amplitude em comparação com os casos 01 e 10 e o caso 00 possui menor amplitude caracterizando a porta OR.

Figura 24 - Operações lógica para a configuração, $\Delta\Phi_1 = 0,6\pi$ e $\Delta\Phi_2 = [0,8087; 0,9404]\pi$. Porta lógica OR implementada.



Fonte: Autor

Figura 25 - Operações lógicas para a configuração, $\Delta\Phi_1 = 0,6\pi$ e $\Delta\Phi_2 = [0,8087; 0,9404]\pi$. Pulso óptico de saída.

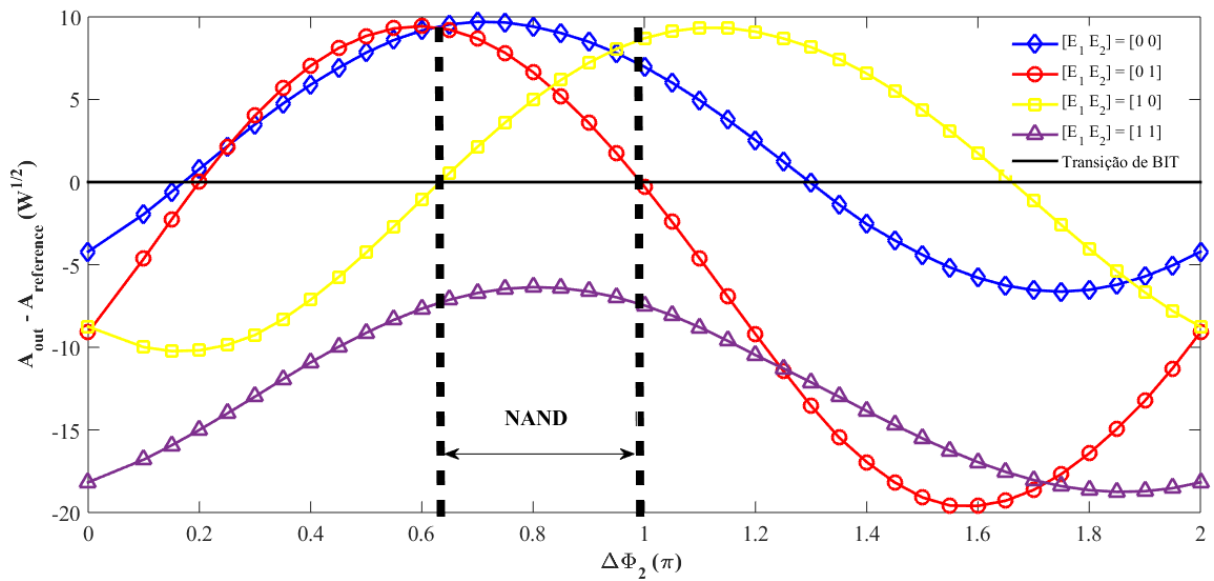


Fonte: Autor

Na Figura 26 tem-se a porta lógica NAND, essa porta lógica destaca-se em relação a outras devido sua capacidade de gerar outras portas e funções lógicas sendo classificada como porta lógica universal.

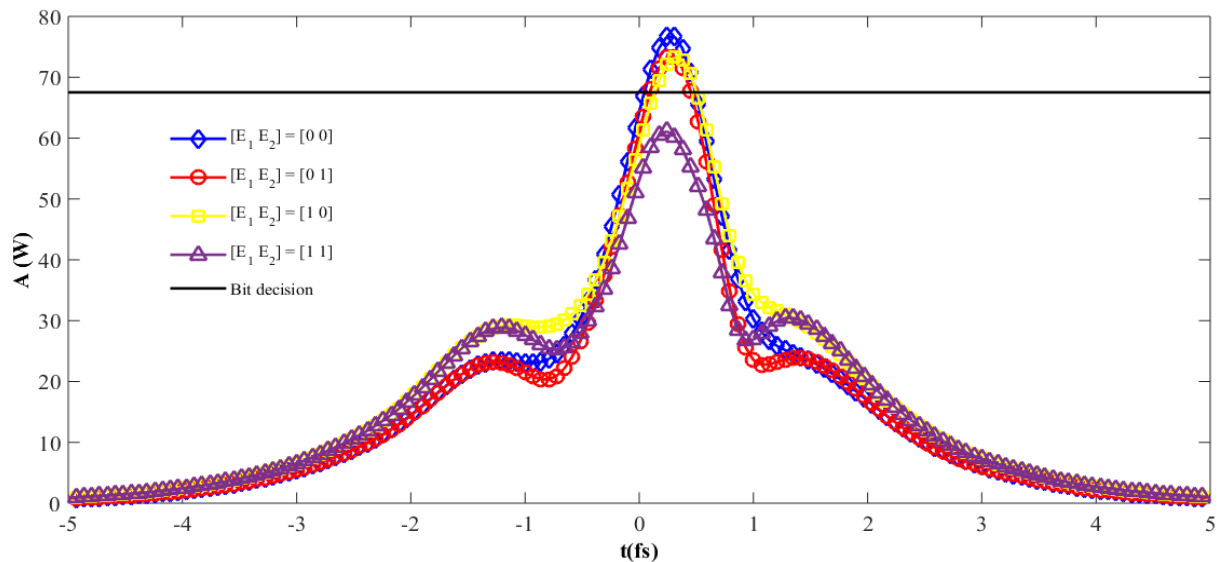
A porta NAND é implementada quando $\Delta\Phi_1 = 1,55\pi$. Sua faixa de implementação em relação a segunda variação de fase é $\Delta\Phi_2 = [0,6327; 0,9935]\pi$. Na Figura 27 é mostrado o pulso da porta NAND confirmando os casos de entrada apresentados na transmissão.

Figura 26 - Operações lógicas para a configuração, $\Delta\Phi_1 = 1,55\pi$ e $\Delta\Phi_2 = [0,6327; 0,9935]\pi$. Porta lógica NAND implementada.



Fonte: Autor

Figura 27 - Operações lógicas para a configuração, $\Delta\Phi_1 = 1,55\pi$ e $\Delta\Phi_2 = [0,6327; 0,9935]\pi$. Pulso óptico de saída.

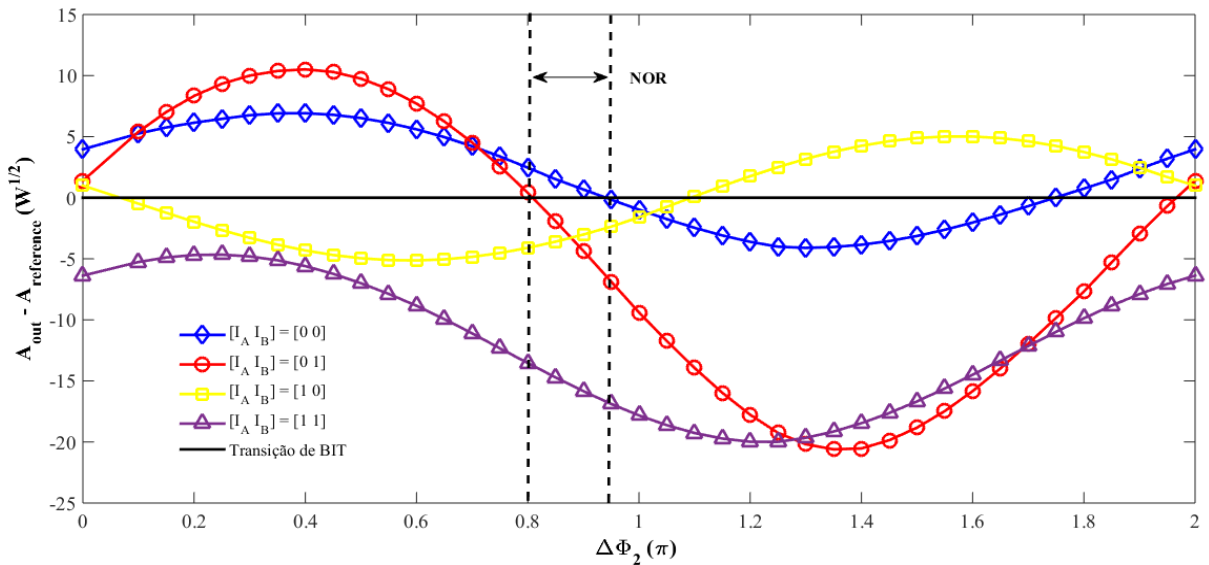


Fonte: Autor

Na Figura 28 é apresentada a porta lógica NOR quando $\Delta\Phi_1 = 1,5\pi$ com faixa de implementação em relação a fase 2 de $\Delta\Phi_2 = [0,8084; 0,9404]\pi$. A porta lógica NOR assim

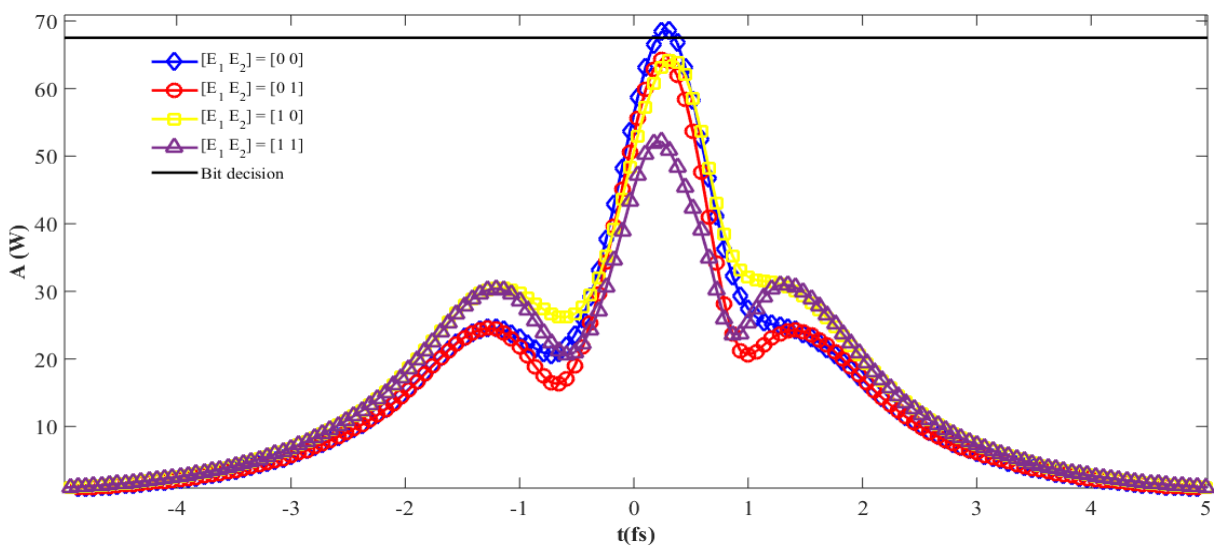
como a NAND apresentam a vantagem de terem funções lógicas compostas por uma NOT caracterizando a inversão das saídas lógicas, podendo assim serem consideradas portas lógicas de maior complexidade. Na Figura 29 mostra-se os pulsos de saída confirmando a transmissão baseada na amplitude dos pulsos mostrada na Figura 28.

Figura 28 - Operações lógicas para a configuração, $\Delta\Phi_1 = 1,5\pi$ e $\Delta\Phi_2 = [0,8084; 0,9404]\pi$. Porta lógica NOR implementada.



Fonte: Autor

Figura 29 - Operações lógicas para a configuração, $\Delta\Phi_1 = 1,5\pi$ e $\Delta\Phi_2 = [0,8084; 0,9404]\pi$. Pulso óptico de saída.



Fonte: Autor

A Tabela 32 compila as portas lógicas implementadas na configuração 1 e apresenta os valores adicionais de análise: $\varepsilon (W^{1/2})$ são as amplitudes de saída para cada caso analisado (00, 01, 10 e 11); $\Delta\Phi_1$ são os valores da primeira variação de fase sintonizável onde é possível se obter as portas lógicas implementadas, Φ_2 é o valor específico de variação de fase onde se analisa as amplitudes das portas lógicas, também informa-se em qual saída do dispositivo (O_1 ou O_2) a porta lógica é implementada.

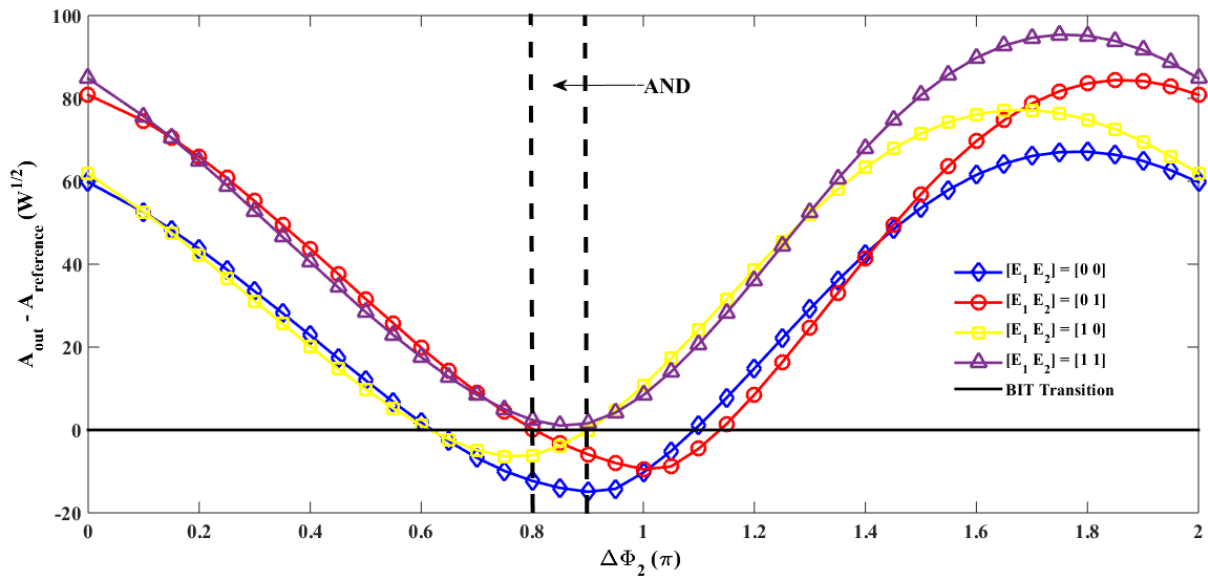
Tabela 32 – Compilação dos dados implementadas na configuração 1.

E_1	E_2	O_1	$\varepsilon (W^{1/2})$	O_1	$\varepsilon (W^{1/2})$	O_1	$\varepsilon (W^{1/2})$
0	0	0	-3,5313	1	9,1669	1	1,0495
0	1	1	5,2754	1	5,7421	0	-3,2752
1	0	1	5,2754	1	5,7421	0	-3,2752
1	1	1	11,417	0	-6,3947	0	-15,3402
		OR			NAND		
		$\Delta\Phi_1 = 0,6\pi$			$\Delta\Phi_1 = 1,55\pi$		
		$\Delta\Phi_2 = 0,7637\pi$			$\Delta\Phi_2 = 0,8318\pi$		
					NOR		
					$\Delta\Phi_1 = 1,5\pi$		
					$\Delta\Phi_2 = 0,8778\pi$		

5.2.2 Configuração 2 – MZI com acoplador assimétrico seguido de acoplador simétrico

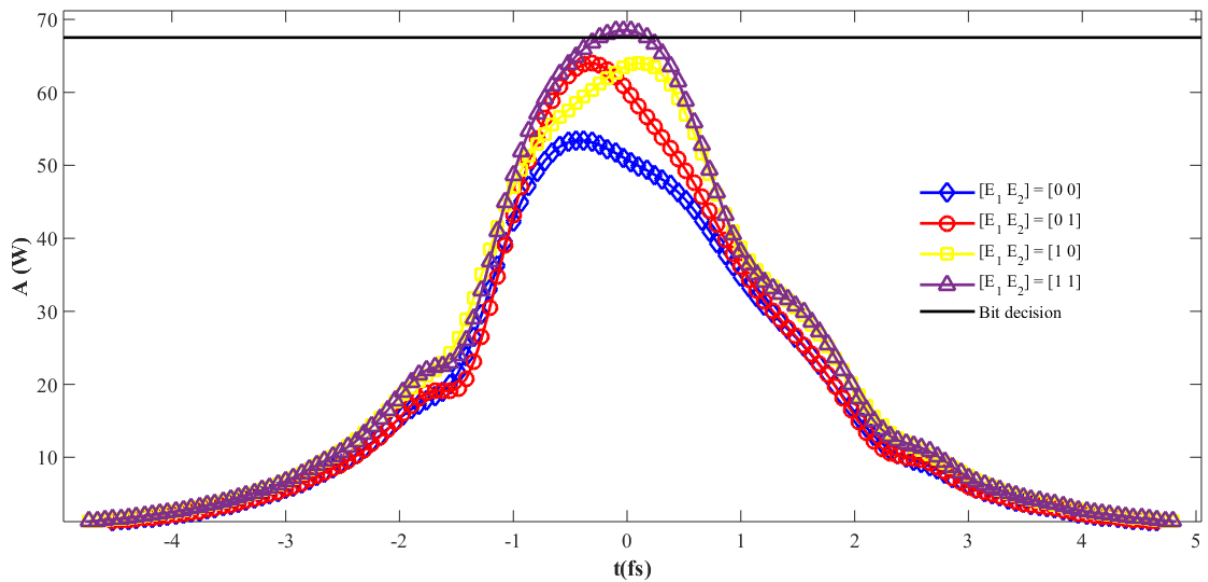
Na segunda configuração implementou-se uma porta lógica AND em $\Delta\Phi_1 = 0,8\pi$. A porta AND implementada na configuração 2, Figura 30 possui faixa de variação em relação a segunda variação de fase vale $\Delta\Phi_2 = [0,8036; 0,9013]\pi$. A porta AND apresenta todos os casos de saída próximos a linha de decisão de bit, sendo necessário o auxílio dos pulsos de saída referentes a cada caso Figura 31.

Figura 30 - Operações lógicas para a configuração, $\Delta\Phi_1 = 0,8\pi$ e $\Delta\Phi_2 = [0,8036; 0,9013]\pi$. Porta lógica AND implementada.



Fonte: Autor

Figura 31 - Operações lógicas para a configuração, $\Delta\Phi_1 = 0,8\pi$ e $\Delta\Phi_2 = [0,8036; 0,9013]\pi$. Pulso óptico de saída.



Fonte: Autor

Na tabela 33 é apresentado os valores das amplitudes de transmissão que confirmam os bits de saída para cada caso, além da fase de análise dos dados da porta lógica AND na saída O_1 do interferômetro proposto.

Tabela 33 – Porta lógica implementada na configuração 2.

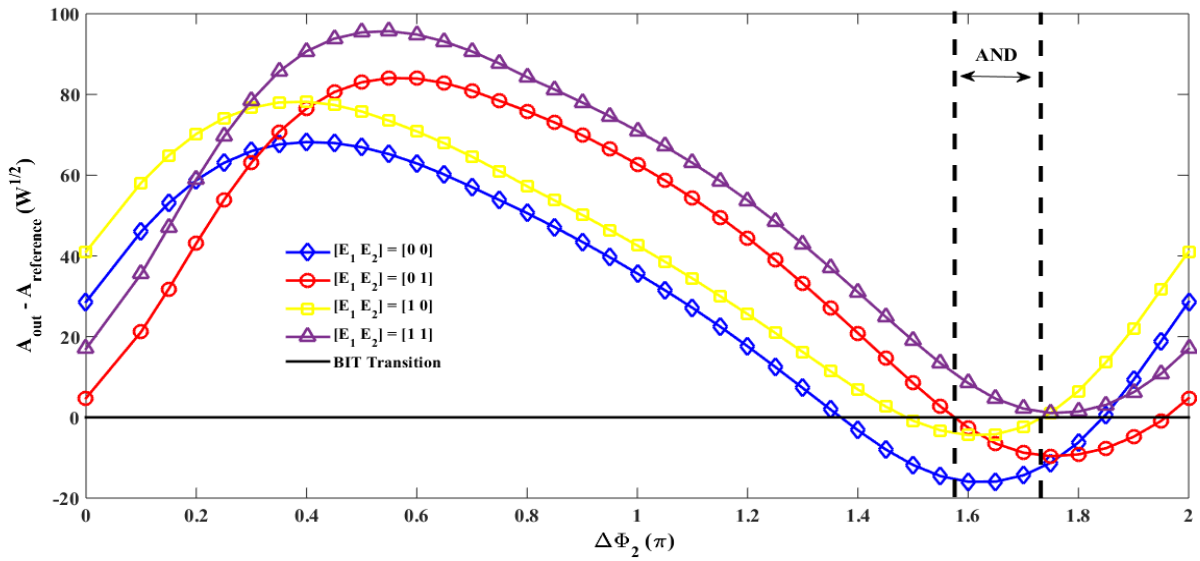
E	E	O₁	$\varepsilon W^{1/2}$
0	0	0	-14,0809
0	1	0	-3,4531
1	0	0	-3,4531
1	1	1	1,1004
OR			
$\Delta\Phi_1 = 0,8\pi$			
$\Delta\Phi_2 = 0,8554\pi$			

5.2.3 Configuração 3 – MZI com ambos os acopladores assimétricos

Na configuração 3 implementou-se portas lógicas nas fases $0,4\pi$ e $0,3\pi$. As portas implementadas foram OR e AND.

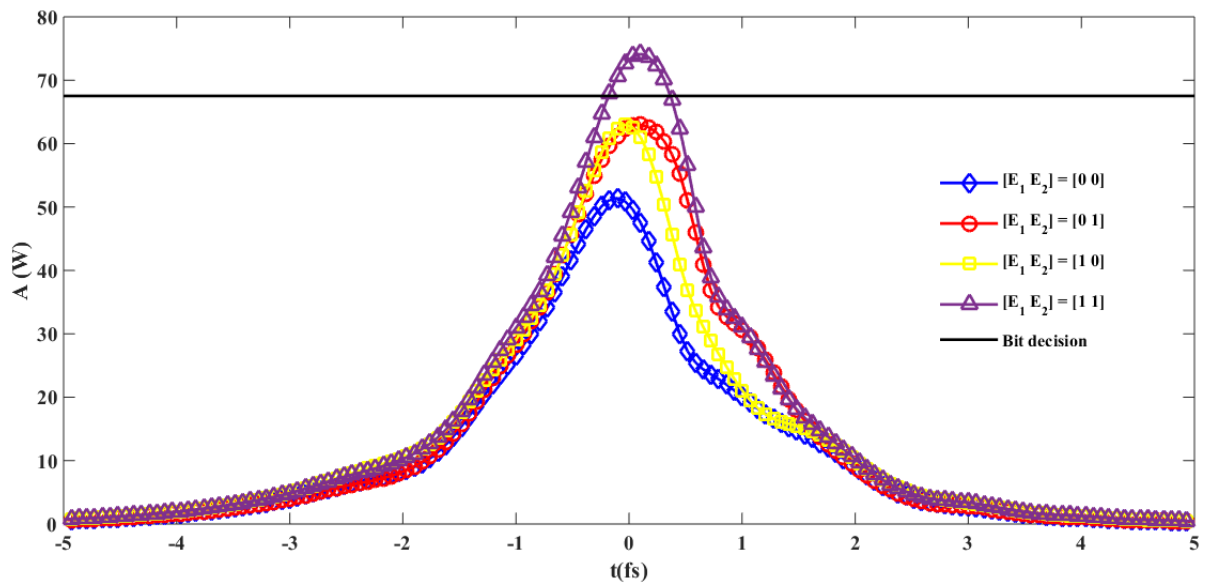
A porta AND apresentada na Figura 32 foi implementada quando $\Delta\Phi_1 = 0,3\pi$, essa porta possui uma pequena faixa de implementação em $\Delta\Phi_2 = [1,5756; 1,7344]\pi$, contudo, os pulsos apresentados na Figura 33 representam bits bem definidos em relação a amplitude de referência.

Figura 32 - Operações lógicas para a configuração, $\Delta\Phi_1 = 0,3\pi$ e $\Delta\Phi_2 = [1,5756; 1,7344]\pi$. Porta lógica AND implementada.



Fonte: Autor

Figura 33 - Operações lógicas para a configuração, $\Delta\Phi_1 = 0,3\pi$ e $\Delta\Phi_2 = [1,5756; 1,7344]\pi$. Pulso óptico de saída.

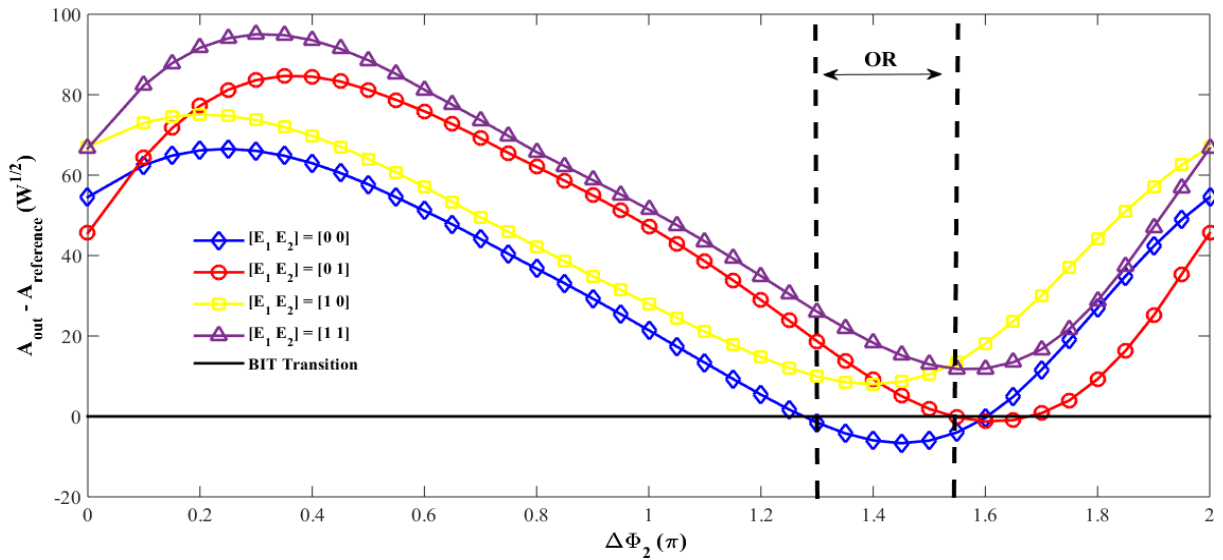


Fonte: Autor

Na Figura 34 é apresentada a porta lógica OR implementada quando $\Delta\Phi_1 = 0,4\pi$ através da variação das amplitudes do sinal ao longo da variação da fase. Observa-se que a faixa

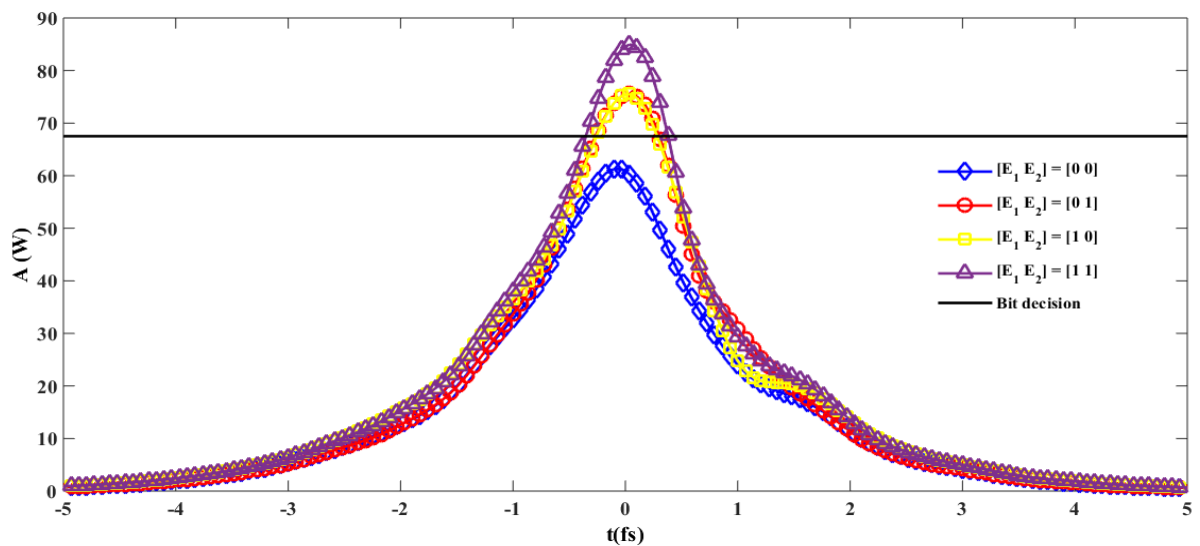
de implementação varia para $\Delta\Phi_2 = [1,2763; 1,5442]\pi$. Na Figura 35 tem-se os pulsos de saída referentes a porta OR que confirmam a análise da transmissão das amplitudes de cada caso.

Figura 34 - Operações lógicas para a configuração, $\Delta\Phi_1 = 0,4\pi$ e $\Delta\Phi_2 = [1,2763; 1,5442]\pi$. Porta lógica OR implementada.



Fonte: Autor

Figura 35 - Operações lógicas para a configuração, $\Delta\Phi_1 = 0,4\pi$ e $\Delta\Phi_2 = [1,2763; 1,5442]\pi$. Pulso óptico de saída.



Fonte: Autor

Na Tabela 34 são compiladas as informações referentes a saída do dispositivo, valores do parâmetro de amplitude na saída do MZI e as fases específicas de análise da porta lógica implementada.

Tabela 34 - compilação dos dados referentes as portas lógicas implementadas na configuração 3 do interferômetro proposto.

E_1	E_2	O_1	$\varepsilon (W^{1/2})$	O_1	$\varepsilon (W^{1/2})$
0	0	0	-6,1387	0	-15,9307
0	1	1	8,1799	0	-4,3153
1	0	1	8,1799	0	-4,3153
1	1	1	17,518	1	6,7439
OR			AND		
$\Delta\Phi_1 = 0,4\pi$			$\Delta\Phi_1 = 0,3\pi$		
$\Delta\Phi_2 = 1,4124 \pi$			$\Delta\Phi_2 = 1,4124\pi$		

Para as configurações estudadas foram obtidas portas lógicas do tipo OR, AND, NOR e NAND, tendo a configuração 1, ao qual se utiliza do acoplador 1 simétrico e acoplador 2 assimétrico, apresentado portas lógicas do tipo NOR e NAND, resultado obtido de forma exclusiva para essa configuração.

6. CONCLUSÃO

Com o modelo de MZI estudado, analisamos configurações distintas de acopladores para a modulação PAM e PPM, o objetivo foi buscar as melhores configurações e fases para a implementação de portas lógicas.

Para a modulação PPM foi utilizada 4 (quatro) configurações de ϵ e utilizado um modelo de MZI – PCF apresentando acopladores simétricos, onde para todas as configurações foram implementadas portas do tipo OR e AND. Na primeira configuração se utilizou o $\epsilon = 0,1$ fs e foi dentre as configurações estudadas a que menos apresentou portas lógicas, as saídas ocorreram muito próxima uma das outras e por vezes apresentando sobreposição dos pulsos nas saída dos acopladores.

Na segunda configuração, foi utilizado o $\epsilon = 1$ fs, as saídas para cada caso apresentaram uma maior distância entre si e para o valor de referência, em comparação a configuração de $\epsilon = 0,1$ fs, favorecendo a análise dos resultados e diminuindo a chance de erro de bits. Dentre as quatro configurações estudadas foi a que apresentou o maior número de portas lógicas do tipo OR

Para a terceira configuração, foi utilizado o $\epsilon = 5$ fs, essa configuração foi a que apresentou os melhores resultados, tendo o maior número de portas lógicas e o maior número de portas AND implementadas. Não apresentando sobreposição entre as saídas e obtendo um Δt que possibilita uma boa leitura dos dados e uma menor chance de ocorrência de erro bits durante a transmissão.

Para a quarta configuração onde o $\epsilon = 10$ fs, os resultados para todas as fases e em todos os casos apresentaram distorções em suas saídas, dificultando em muitas saídas a leitura dos dados.

Para a modulação PAM, foram utilizadas 3 (três) configurações distintas de MZI e utilizado um modelo de MZI – PCF apresentando acopladores simétricos e assimétricos, variando sua simetria ou assimetria de acordo com a configuração estudada. Foram implementadas portas lógicas do tipo AND; OR; NAND e NOR. Na primeira configuração se utilizou a arquitetura na qual o acoplador 1 é simétrico e o acoplador 2 é assimétrico onde foram implementadas portas do tipo OR, NAND e NOR. Dentre as configurações estudadas para a

modulação PAM, foi a que apresentou o maior número de portas lógicas. A porta NAND gerada possui a maior janela dentre as três portas implementadas para a configuração 1.

Na segunda configuração, foi utilizado o acoplador 1 assimétrico e em sequência o acoplador 2 simétrico, na presente configuração foi implementada porta lógica do tipo AND. A segunda configuração não apresentou as melhores condições para implementação de portas lógicas, necessitando de auxílio nos pulsos de saída referentes a cada caso.

Para a terceira configuração, a arquitetura utilizada foi a qual os dois acopladores são assimétricos e as portas obtidas foram do tipo OR e AND. Para a porta AND os bits ficaram bem definidos facilitando a leitura dos dados, para a porta lógica OR obteve uma grande faixa de implementação $\Delta\Phi_2$.

Os resultados e estudo apresentados levam a concluir, que para o MZI - PCF simétrico operando sob regime de modulação PPM, os valores de ϵ menores como o de 0,1 fs e os maiores como o de 10 fs, não apresentam as melhores regiões de implementação de portas lógicas, ficando para os valores intermediário como o $\epsilon = 1$ e 5 fs, as melhores configurações para implementação.

A análise apresentada para a modulação PAM nos levam a concluir que para o MZI com variação de simetria, as melhores configurações ocorreram para a arquitetura a qual o acoplador 1 é simétrico e o acoplador 2 é assimétrico e para a configuração onde os dois acopladores são assimétricos, onde se é implementado o maior número de portas lógicas distintas e com a melhor distinção de bits.

Assim, as configurações e arquitetura para o dispositivo implementado, apresentam diversas possibilidades de uso, podendo atuar de diversas formas, desde como um operador de decisão lógico através de suas portas implementadas, até como dispositivo bloqueador de sinal, chave óptica, dentre outras aplicações.

7. REFERÊNCIAS

- Agrawal, Govind P. 2005.** *Lightwave technology: telecommunication systems*. s.l. : Wiley, 2005.
- Agrawal, Govind P. 2004.** *LightwaveTechnology: componentsanddevices*. 2004.
- Agrawal, Govind P. 2001.** *Nonlinear Fiber Optics*. 2001, 3.
- Agrawal, Govind P. 2014.** *Sistema de Comunicação por Fibra Óptica*. [trad.] José Rodolfo Souza. 4. s.l. : Elsevier Editora Ltda, 2014. p. 41.
- Bastos, Agliberto Melo. 2015.** *Estudo de Acopladores de Fibra Óptica Tradicional e de Cristal e Aplicações: Geração de Portas Lógicas e Sensores de Corrente Elétrica*. Departamento de Engenharia de Teleinformática, Universidade Federal do Ceará. 2015. Tese de Doutorado.
- Camilo, Mauricio Eiji. 2014.** *Produção de Interferômetro Mach-Zehnder Utilizando Guias de Ondas do Tipo Pedestal e Filmes Fino de Bi2O3-WO3-TeO2 para Aplicações em Sensores Ópticos Integrados*. Escola Politécnica, USP. 2014. Tese de Mestrado.
- Cavaleiro JC, Broeng J e Birks TA, Russell PSJ. 1998.** Photonic band gap guidance in optical fibers. *Science*. 1998, Vol. 282, 5393, pp. 1476-1478.
- Correa, R.A. e Knight, J.C. 2008.** Novel process eases production of hollow-core fiber. *Laser FocusWorld*. 1, 2008, Vol. 45, pp. 67-69.
- Costa, Marcos Benedito Caldas. 2013.** *Análise numérica do acoplador duplo não-linear baseado em fibras de cristais fotônicos (NLDC-PCF) operando com PAM e PWM para obtenção de portas lógicas*. Departamento de Engenharia de Teleinformática, Universidade Federal do Ceará. 2013. Tese de Doutoradp.
- D.Jiménez, E.Bartolomé e M.Moreno, J.Munõz, C.Domínguez. 1996.** An integrated silicon ARROW Mach-Zehnder interferometer for sensing applications. *Optical Communications*. 1996, Vol. 132, pp. 437-441.
- Dora Juan Juan Hu, Rebecca Yen-Ni Wong and Perry Ping Shum. 2017.** Photonic Crystal Fiber– Based Interferometric Sensors, Selected Topics on Optical Fiber Technologies and Applications. 2017.

F. L. B. Martins, J. P. T. Rodrigues, F. G. M. Neto, J. C. Nascimento, A. G. Coelho Jr, W. B. Fraga. 2018. Two and three-input all-optical logic gates on a planar three-core photonic Crystal fiber. *Optik*. 154, 2018, Vol. 64, pp. 516-523.

Ferreira, A.C. 2008. *Estudo Numérico do Acoplador Duplo Simétrico de Fibras Ópticas Operando com PPM e PAM para Obtenção de Portas Lógicas*. Departamento de Engenharia de Teleinformática, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza : s.n., 2008. p. 20, Tese de Mestrado.

Filho, George Sales Bezerra. 2018. *Implementação de Operações Lógicas em um Interferômetro de Mach-Zehnder Híbrido baseado em Fibra de Cristal Fotônico*. Departamento de Telemática, Instituto Federal do Ceará. Fortaleza : s.n., 2018. Tese de Mestrado.

Gilat, Amos. 2008. *Métodos Numéricos Para Engenheiros e Cientistas. Uma Introdução com Aplicações Usando o MATLAB*. s.l. : Bookman, 2008. Vol. 1.

Haykin, Simon. 2004. *Sistemas de Comunicação Analógicos e Digitais*. s.l. : Bookman Companhia Editora, 2004. Vol. 4.

John D. Joannopoulos, Steven . Johnson e Joshua N.Winn, Robert D.Meade. 2008. *Photonic Crystals Molding the Flow of Light*. s.l. : Copyright 2008 by Princeton University Pres, 2008.

Kazovskym, Leonid, Benedetto, Sergio e Wilner. 1996. *Optical Fiber Communication Systems* . s.l. : Artech House Publishers, 1996.

Malmeida, K. e Sen, P. K. 2007. Potential of massively deployed sensors applications in substation engineering. 2007, pp. 259-265.

Matos, Christiano J. S. de. 2008. *Fibras de cristal fotônico: Novas plataformas para estudo de óptica não-linear, sensoriameto e dispositivos fotônicos*. Universidade Presbiteriana Mackenzie. 2008.

Mestdagh, D.J.G. 1995. *Fundamentals of Multiaccess Optical Fiber Networks*. s.l. : Artech House: Norwood, 1995.

Moreira, Adriano J. C. 1999. Técnica de Modulação. [Online] fevereiro de 1999. [Citado em: 28 de maio de 2019.] <http://www3.dsi.uminho.pt/adriano/Teaching/Comum/TecModul.html>.

Nalin, Marcelo. 2014. *Fibras ópticas*. s.l. : Química Viva, 2014.

Natalia M. Litchinitser, Steven C. Dunn, Paul E. Steinvurzel, Benjamin J. Eggleton, Thomas P. White, Ross C. McPhedran e C. Martijn de Sterke. 2004. Application of an ARROW model for designing tunable photonic devices. *Optics Express*. 2004, Vol. 12, pp. 1540-1550.

Oliveira, Jackson Moreira. 2018. *Portas Lógicas Totalmente Óptica Baseada em Interferômetro de Michelson com Amplificador Óptico Semicondutor*. Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará. 2018. Tese de Mestrado.

Queiroz, A. S. B. 2015. *Estudo do desempenho de componentes baseados em fibras ópticas especiais: fibras de cristal fotônico e de metamateriais e suas aplicações em comunicações*. Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará. 2015. Tese de Doutorado.

Robert M. Gagliardi, Sherman Karp. 2^a. s.l. : Wiley . Vol. 21.

Rudge, Felipe. 2010. *Dispersão em Fibras Ópticas* . s.l. : Unicamp, 2010.

Santos, Francismari Noronha dos. 2014. *Otimização de Cristais Fotônicos pr meio de Algoritmos Evolutivos*. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Bahia. 2014. Tese de Mestrado.

Shen, YR. 1984. The principles of nonlinear optics. *Wiley-Interscience*. 1984, p. 575.

Sodre, A.C. 2010. Recent progress and novel applications of photonic crystal fibers. *Reports on Progress in Physics, IOP Publishing*. 2010, Vol. 73, pp. 1-23.

Wiederheker, G. S., et al. 2007. Field enhancement within an optical fibre with a subwavelength air core. 2007, Vol. 1.