



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DO CEARÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
TELECOMUNICAÇÕES**

ÉDIPO MAGALHÃES ALMEIDA

**OBTENÇÃO DE CIRCUITOS COMBINACIONAIS SOMADOR
COMPLETO E SUBTRATOR COMPLETO TOTALMENTE ÓPTICOS
COM INTERFERÔMETRO MACH-ZEHNDER**

**FORTALEZA
2018**

ÉDIPO MAGALHÃES ALMEIDA

**OBTENÇÃO DE CIRCUITOS COMBINACIONAIS
SOMADOR COMPLETO E SUBTRATOR COMPLETO
TOTALMENTE ÓPTICOS COM INTERFERÔMETRO
MACH-ZEHNDER**

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

Área de concentração: **Sistemas de
Telecomunicações**

Linha de pesquisa: **Microondas e
Óptica Integrada**

Orientador: **Prof. Dr. José Wally
Mendonça Menezes**

**Fortaleza
2018**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI

Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- A447o Almeida, Édipo Magalhães.
OBTENÇÃO DE CIRCUITOS COMBINACIONAIS SOMADOR COMPLETO E SUBTRATOR
COMPLETO TOTALMENTE ÓPTICOS COM INTERFERÔMETRO MACH-ZEHNDER / Édipo Magalhães
Almeida. - 2018.
63 f. : il.

Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Engenharia de Telecomunicações,
Campus Fortaleza, 2018.

Orientação: Prof. Dr. José Wally Mendonça Menezes.

1. SIMULAÇÃO OPTSYSTEM. 2. FIBRA ÓPTICA. 3. INTERFERÔMETRO MACH-ZEHNDER. I.
Titulo.

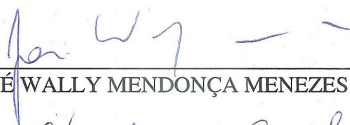
CDD 621.382

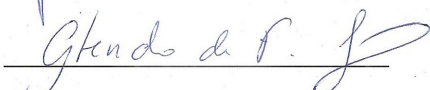


INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
TELECOMUNICAÇÕES

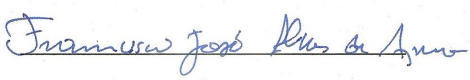
Édipo Magalhães Almeida

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:


Prof. Dr. JOSÉ WALLY MENDONÇA MENEZES (Orientador)


Prof. Dr. GLENDÓ DE FREITAS GUIMARÃES (IFCE)


Prof. Dr. DANIEL XAVIER GOUVEIA (IFCE)


Prof. Dr. FRANCISCO JOSÉ ALVES DE AQUINO (IFCE)


Prof. Dr. FRANCISCO NIVALDO AGUIAR FREIRE (UFC)


Prof. Dr. AMINADABE BARBOSA DE SOUSA (CENTRO UNIVERSITÁRIO ESTÁCIO DO CEARÁ)


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

Fortaleza, 27 de dezembro de 2018

Dedico este trabalho a minha família,
eles que sempre me apoiaram em toda a minha vida acadêmica e contribuíram para
a sua realização.

Agradecimentos

Aos meus pais, Débora Maria Magalhães Almeida e João Batista Franklin de Almeida, e minha irmã, Cíntia Magalhães Almeida, pelo incentivo, apoio e paciência nos momentos que mais precisei em todos esses anos de estudo.

Ao professor Dr. José Wally Mendonça Menezes, por ter me aceitado como orientado, pelos ensinamentos e paciência que tanto contribuíram para realização deste trabalho.

Aos amigos e colegas de graduação e mestrado. Em especial, aos amigos, Matheus Freire, Hítalo Braga, José Alexandre, Kelvia Fragoso, Kaio Jônathas e Kilvia Maria, pela amizade, conhecimento e força que tanto contribuem para manter o foco nos meus objetivos.

À todos os professores que ajudaram para conclusão deste curso. Em especial, Daniel Xavier e Glendo de Freitas. Ao Instituto Federal do Ceará - IFCE e a Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico - FUNCAP pela estrutura e suporte que possibilitaram o desenvolvimento deste trabalho.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém nunca viu, mas pensar o que ninguém ainda nunca pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”

Arthur Schopenhauer

Resumo

Neste trabalho são propostos circuitos combinacionais, somador e subtrator, totalmente ópticos em uma única estrutura de simulação de uma estrutura formada por interferômetros Mach-Zehnder (MZI) assimétricos em série e paralelo com não linearidade presente em um de seus braços. Para a realização das simulações o OptiSystem 13 foi utilizado, e como sinais de entrada foram utilizados pulsos retangulares. Primeiramente, simulamos uma estrutura composta por 3 (três) interferômetros Mach-Zehnder conectados de forma cascadeada para encontrarmos as portas lógicas (XOR, OR e AND) que formam os circuitos combinacionais desejados. Cada MZI é, sequencialmente, composto por acopladores 20:80 e 50:50. Em seguida, essa estrutura foi reunida em um subsistema chamado de Bloco Mach-Zehnder e conectada a mais 2 (dois) blocos idênticos. Os resultados das simulações para essa nova estrutura são analisados através de gráficos que mostram a potência média dos sinais nas saídas para cada entrada do sistema. Assim, é possível encontrar as saídas Soma, Carry Out, Diferença e Borrow Out presente nos circuitos somador e subtrator. Ao final é realizado a discussão dos resultados, além de apresentada uma conclusão e proposição de alguns trabalhos futuros.

Palavras-chave: Interferômetro Mach-Zehnder, Portas Lógicas Ópticas, Circuito Combinacional Somador Completo Totalmente Óptico, Circuito Combinacional Subtrator Completo Totalmente Óptico.

Abstract

This work proposes a full optical adder and subtractor combinational circuits in a single simulation structure using the Mach-Zehnder interferometer (MZI) with non-linearity added in one of its arms. The simulations were performed using the OptiSystem 13 software and the input signals were chosen to be rectangular pulses. First, we simulate a structure composed of 3 (three) Mach-Zehnder interferometers connected in cascade to find the logic gates (XOR, OR and AND) that make up the desired combinational circuits. Each MZI is, sequentially, composed of 20:80 and 50:50 couplers. Then, this structure was mounted in a subsystem called Mach-Zehnder Block and connected to two (2) identical blocks. The results of the simulations for this new structure are analyzed using graphs showing the average power of the signals at the outputs for each input of the system. Thus, it is possible to find/calculate the outputs Sum, Carry Out, Difference and Borrow Out that are present in the adder and subtractor circuits. At the end we discuss the results and present conclusions and some future works.

Keywords: Mach-Zehnder Interferometer, All-optical logic gates, All-Optical Full Adder Circuit, All-Optical Full Subtractor Circuit.

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Símbolos

Lista de Abreviações

1	Introdução	16
1.1	Circuitos Combinacionais Totalmente Ópticos	17
1.2	Objetivos	18
1.2.1	Objetivos Específicos	18
1.3	Organização da dissertação	18
2	Fundamentação Teórica	20
2.1	Propagação de Sinal em Fibras Ópticas	20
2.1.1	Dispersões	21
2.1.2	Atenuação	22
2.2	Efeitos não lineares	23
2.3	Acopladores	24
2.3.1	Acopladores Simétricos	25
2.3.2	Acopladores Assimétricos	25
2.3.3	Matriz de transferência do acoplador	26
2.4	Interferômetro de Mach-Zehnder (MZI)	27

2.4.1	Matriz de transferência do Interferômetro Mach-Zehnder	28
2.5	Equação não-linear generalizada de Schrödinger	29
2.5.1	Equações de modo acoplado	30
2.6	Portas Lógicas	30
2.7	Circuito Combinacionais Aritméticos Fotônicos	31
2.7.1	Circuito Meio Somador	32
2.7.2	Circuito Somador Completo	32
2.7.3	Circuito Meio Subtrator	33
2.7.4	Circuito Subtrator Completo	34
3	Revisão Bibliográfica	36
4	Metodologia	42
4.1	Simulação porta lógica	43
4.2	Simulação circuito combinacional	48
4.3	Circuito Combinacional Somador Completo	51
4.3.1	Saída Soma	51
4.3.2	Saída Carry Out	52
4.4	Circuito Combinacional Subtrator Completo	54
4.4.1	Saída Diferença	54
4.4.2	Saída Borrow Out	55
4.5	Discussão dos resultados	57
5	Considerações finais	60
5.1	Conclusão	60
5.2	Trabalhos futuros	61
	Referências Bibliográficas	62

Lista de Figuras

1	Sistema de comunicação óptica genérico.	17
2	Reflexão interna total em fibras multimodo de índice degrau.	21
3	Esquemático de um acoplador de fibra óptica. A região sombreada mostra onde os modos de duas fibras se sobrepõem	24
4	Esquemático de um Acoplador Simétrico	25
5	Esquemático de um Acoplador Assimétrico, em que os índices M e m referem-se aos núcleos maior e menor, respectivamente	26
6	Interferômetro Mach-Zehnder	28
7	Circuito lógico e tabela verdade das portas lógicas (a) NÃO (NOT); (b) E (AND); (c) NÃO-E (NAND); (d) OU (OR); (e) NÃO-OU (NOR) e; (f) OU EXCLUSIVO (XOR); (g) NOU EXCLUSIVO(NXOR)	31
8	Circuito Meio Somador (a) Circuito lógico; (b) Representação em bloco; (c) Tabela verdade	32
9	Circuito Somador Completo (a) Circuito lógico; (b) Representação em bloco; (c) Tabela verdade	33
10	Circuito Somador Completo a partir de Meios Somadores	33
11	Circuito Somador Completo a partir de Meios Somadores	34
12	Circuito Subtrator Completo (a) Circuito lógico; (b) Representação em bloco; (c) Tabela verdade	34
13	Circuito Subtrator Completo a partir de Meio Subtratores	35
14	Diagrama de blocos para o MZI-SOA	36
15	Esquemático para somador completo e subtrator completo utilizando MZI-SOA	37
16	Diagrama de um MZI baseado em SOA	37

17	Porta NR reversível (a)Diagrama de blocos; (b)Implementação óptica com 4 combinadores de feixe (BC) nas saídas	38
18	Porta NR reversível (a)Diagrama de blocos; (b)Implementação óptica .	39
19	Esquemático baseada em SOA-MZI das portas: (a)XOR (b)AND (c)OR	39
20	Diagrama esquemático para circuito: (a)Meio Somador; (b)Somador Completo	40
21	Esquemático do Interferômetro Mach-Zehnder	40
22	Estrutura de cascadeamento de MZI	41
23	Estrutura do MZI proposto	42
24	MZI proposto	43
25	Estrutura cascadeada com três MZI	44
26	Sinais nas entradas A e B para potência de pico de 5W	44
27	Esquemático do cascadeamento de MZI no OptiSystem	45
28	Gráfico da saída BAR 1 para a porta lógica XOR	46
29	Gráfico da saída BAR 1 para a porta lógica OR	47
30	Gráfico da saída BAR 2 para a porta lógica AND	48
31	Estrutura cascadeada com três Blocos Mach-Zehnder	48
32	Esquemático dos Blocos Mach-Zehnder no Optisystem	50
33	Gráfico da saída Soma	51
34	Gráfico da saída Carry Out	53
35	Gráfico da saída Diferença	54
36	Gráfico da saída Borrow Out	56
37	Gráfico da saída Borrow Out aproximado no ponto $\bar{n}_2$ igual a $3,1 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$	56

Lista de Tabelas

1	Parâmetros de simulação	46
2	Pulsos de entrada da simulação	49
3	Parâmetros de simulação	50
4	Quadro geral da relação de potências e níveis lógicos da saída Soma .	52
5	Quadro geral da relação de potências e níveis lógicos da saída Carry Out	53
6	Quadro geral da relação de potências e níveis lógicos da saída Diferença	55
7	Quadro geral da relação de potências e níveis lógicos da saída Diferença	57
8	Tabela representativa dos níveis lógicos do circuito somador completo com suas respectivas potências nas saídas Soma e Carry Out	58
9	Tabela representativa dos níveis lógicos do circuito subtrator completo com suas respectivas potências nas saídas Diferença e Borrow Out . .	59

Lista de Símbolos

λ	comprimento de onda
n_1	índice de refração do núcleo
n_2	índice de refração da casca
ω	frequência da onda
V_g	velocidade de grupo
β_n	coeficiente de dispersão de ordem n
α	atenuação
γ	parâmetro não-linear
K	coeficiente de acoplamento
$\bar{n}_2$	coeficiente de índice não-linear
A_{eff}	área efetiva
AN	Abertura Numérica
L	comprimento da fibra
C	velocidade da luz no vácuo
ρ	raio do núcleo da fibra

Lista de Abreviações

GVD	Dispersão de Velocidade de Grupo
WDM	Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda
SPM	Auto Modulação de Fase
XPM	Modulação de Fase Cruzada
FWM	Mistura de Quatro Ondas
MZI	Interferômetro Mach-Zehnder
ENLGS	Equação Não-linear Generalizada de Schrödinger
SOA	Amplificador Óptico de Semicondutor
GVD	Dispersão de Velocidade de Grupo
ASK	Modulação em Amplitude por Chaveamento
OOK	Chaveamento On-Off

INTRODUÇÃO

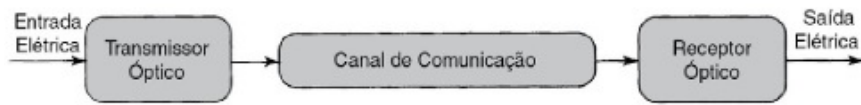
A tecnologia da informação tem trazido enorme impacto na história da humanidade, desde seu surgimento com a invenção do telégrafo até a vertiginosa evolução nas últimas décadas. Hoje o cenário é de ampla convergência das tecnologias de processamento e transmissão de mensagens com as tecnologias de rede e informática, como preconizado há bastante tempo (BRANDÃO; ALCAIM; NETO, 2014). Um sistema de comunicação transmite informação de um lugar a outro, estejam eles separados por alguns poucos centímetros ou por distâncias transoceânicas.

Um sistema de comunicação é composto por uma fonte de informação que gera as mensagens que serão transmitidas, um emissor de sinal (transmissor) que acopla a mensagem a um meio de transmissão (canal) e um receptor de sinal para receber as mensagens e entregá-las ao destinatário. O canal é o meio físico de transmissão que conecta o transmissor ao receptor e pode corresponder a um fio, a um guia de onda ou à própria atmosfera.

Com a evolução das telecomunicações, a busca por velocidades mais altas nas taxas de processamento e transferência de dados são constantes. Neste contexto, um sistema de comunicação que utiliza fibra óptica como o meio físico de transmissão é fundamental, pois apresenta uma menor atenuação, imunidade à interferência eletromagnética e uma maior largura de banda.

Um sistema de comunicação óptico consiste, basicamente, em um transmissor, um canal de comunicação e um receptor como mostrado na Figura 1. Esses três elementos são comuns a todos os sistemas de comunicação.

No entanto, a necessidade de utilização de componentes eletrônicos em sistemas ópticos limitam as taxas de processamentos destes sistemas. Com isso, inúmeros trabalhos de pesquisas de dispositivos totalmente óptico estão sendo desenvolvidas, a fim de se evitar um número excessivo de conversões

Figura 1: Sistema de comunicação óptica genérico.

Fonte: AGRAWAL (2014)

optoeletrônicas.

Como curiosidade, comunicações utilizando luz surgiram bem cedo na história do desenvolvimento, quando os primeiros seres humanos se comunicaram fazendo sinais com as mãos. Essa é, obviamente, uma forma de comunicação óptica, uma vez que não funciona no escuro (AMAZONAS, 2005).

1.1 Circuitos Combinacionais Totalmente Ópticos

O circuito combinacional é aquele em que a saída depende única e exclusivamente das combinações entre as variáveis de entrada.

Podemos utilizar um circuito lógico combinacional para solucionar problemas que necessitam de uma resposta quando acontecerem determinadas situações, representadas pelas variáveis de entrada.

Dispositivos totalmente ópticos de alto processamento utilizados na obtenção de circuitos combinacionais, funções e portas lógicas são necessários para o aumento no processamento de dados requerido em sistemas ópticos.

As portas lógicas ópticas são elementos essenciais nos sistemas de telecomunicações de alta velocidade de última geração para permitir várias funções de processamento de sinal óptico, como comutação, endereçamento, tomada de decisão, regeneração, (de)multiplexação, codificação/decodificação e computação básica ou complexa (KUMAR; KUMAR; RAGHUWANSHI, 2014).

Os circuitos combinacionais ópticos são utilizados para o gerenciamento das contenções e o controle do roteamento em um nó de uma rede comutada de domínio óptico. O cálculo da adição de números binários é uma funcionalidade importante para executar o processamento de cabeçalho de pacotes (SCAFFARDI *et al.*, 2008). Portanto, um circuito digital fotônico complexo, capaz de comparar dois números booleanos, é fundamental.

O uso de interferômetros em fibra óptica estão sendo utilizados por pesquisadores para a obtenção de circuitos combinacionais totalmente óptico, por apresentaram uma grande quantidade de configurações para diversas aplicações. Neste trabalho, o interferômetro de Mach-Zehnder, muito utilizado em filtros e multiplexadores ópticos, é empregado.

1.2 Objetivos

Este trabalho apresenta como objetivo principal a geração de circuitos combinacionais aritméticos somador completo e subtrator completo totalmente ópticos utilizando a estrutura do Interferômetro Mach-Zehnder (MZI) com a fibra óptica de um dos seus braços não linear.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Montar um circuito totalmente óptico com cascadeamento de interferômetros Mach-Zehnder no *software* OptiSystem.
- Encontrar os parâmetros de potência do sinal de entrada, coeficiente de não linearidade e de acoplamento para a obtenção do circuito somador completo e subtrator completo.
- Por meio de simulações, obter portas lógicas XOR, AND e OR.
- Obter circuito somador completo e subtrator completo através de uma única estrutura de simulação.

1.3 Organização da dissertação

Capítulo 2: apresenta a fundamentação teórica sobre os principais componentes ópticos utilizados no desenvolvimento do trabalho, como a teoria da propagação de pulsos em fibras ópticas, acopladores ópticos, matriz de transferência, interferômetro Mach-Zehnder, equação não-linear generalizada de Schrödinger, portas lógicas e circuito combinacionais aritméticos fotônicos.

Capítulo 3: aborda algumas referências bibliográficas que utilizam o OptiSystem para a geração de circuitos combinacionais somador completo e subtrator completo através do uso, principalmente, de interferômetro Mach-Zehnder.

Capítulo 4: disserta sobre a metodologia do desenvolvimento das estruturas utilizadas nas simulações via OptiSystem. Apresentando os cenários propostos para obtenção do circuito somador completo e subtrator completo óptico. Além disso, há também uma discussão sobre os principais resultados obtidos nas simulações.

Capítulo 5: apresenta uma conclusão a respeito das estruturas utilizadas nas simulações e dos resultados obtidos, especificando as principais aplicações e perspectivas com o trabalho desenvolvido para as comunicações ópticas. Ao final, algumas sugestões de trabalhos futuros são propostas.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Propagação de Sinal em Fibras Ópticas

No decorrer da transmissão de um sinal óptico através da fibra, a onda eletromagnética interage com os elétrons em estado ligado de um dielétrico. Essa interação pode produzir efeitos lineares e não lineares.

A constante de propagação β para um sinal com determinado comprimento de onda pode ser definido pela Equação 2.1.

$$\beta_p(\omega) = \beta_L(\omega) + \beta_{NL}(\omega_0) + i\alpha(\omega_0)/2 \quad (2.1)$$

onde $\beta_L(\omega) = n(\omega)\omega/C$ representa os efeitos lineares, $n(\omega)$ é o índice de refração que pode variar de acordo com o material do meio e a frequência do sinal (ω), $\beta_{NL}(\omega_0) = \delta_{NL}(\omega_0/C)$, representa os efeitos não-lineares, em que $\delta_{NL} = n_2 I$, onde n_2 e I representam o índice de refração não-linear e a intensidade do pulso, respectivamente, e α , o parâmetro de perdas da fibra (AGRAWAL, 2005).

Para analisar as alterações no feixe transmitido causados pelos efeitos não lineares em uma fibra óptica, é necessário considerar dois conjuntos de fatores principais: os que reduzem a amplitude do campo óptico, representando uma atenuação e os que modificam a sua forma de onda, caracterizando uma dispersão durante o processo. Estes fatores tem fundamental importância na avaliação de desempenho do sistema (RIBEIRO, 2003).

A resposta de qualquer dielétrico à luz se torna não linear para campos eletromagnéticos intensos, e fibras ópticas não são exceção. Embora a sílica não seja um material intrinsecamente não linear, a geometria de guia de onda que confina a luz em uma pequena seção reta por longos comprimentos de fibra – torna efeitos não lineares muito importantes no projeto de modernos sistemas de ondas luminosas (AGRAWAL, 2014).

2.1.1 Dispersões

Durante uma transmissão, diversos modos de propagação, com diferentes comprimentos de onda, são transmitidos através da fibra óptica com velocidades diferentes, pois a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética é inversamente proporcional ao índice de refração do meio. Portanto, atingem a extremidade final da fibra em intervalos de tempo distintos. Com isso, o sinal óptico sofre um alargamento temporal em relação ao sinal emitido no início da fibra.

Dispersão cromática

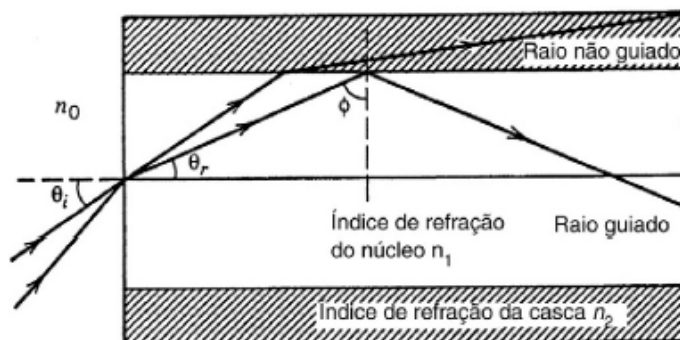
A dispersão cromática, também conhecida como dispersão intermodal, dispersão multipercurso, dispersão multimodo ou ainda dispersão monocromática, ocorre em fibras multimodo, em que a quantidade de modos de propagação é diretamente proporcional ao diâmetro do núcleo e a abertura numérica que é dada pela Equação 2.2.

$$AN = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.2)$$

Possibilitando, assim, haver diversos percursos em seu núcleo.

Consideremos a geometria da Figura 2, na qual raios incidem no centro do núcleo com ângulos θ_i diferentes com o eixo da fibra. Assim, os raios viajam por percursos de diferentes comprimentos. Em consequência, na saída da fibra, esses raios se dispersam no tempo, causando um alargamento do pulso. Esse atraso é definido pela Equação 2.3.

Figura 2: Reflexão interna total em fibras multimodo de índice degrau.



Fonte: AGRAWAL (2014)

$$\Delta T = \frac{L n_1^2}{C n_2} \Delta, \quad (2.3)$$

onde $\Delta = n_1 - n_2/n_1$, n_1 e n_2 são os índices de refração núcleo e casca, respectivamente, L é o comprimento da fibra e C velocidade da luz no vácuo. Analisando a Equação 2.3, percebe-se que quanto maior o valor de Δ maior será o atraso temporal e a AN , e mais raios podem ser direcionados à fibra. Nesta dissertação somente fibra monomodo são utilizadas nas simulações.

Dispersão de velocidade de grupo(GVD)

Uma vantagem de fibras monomodo é a ausência de dispersão modal, pois a energia do pulso é transportada por um único modo. Mas o alargamento temporal do pulso não desaparece, devido a presença de diferentes comprimentos de onda neste modo de propagação, pois na prática não existe luz monocromática. Com isso, os diferentes componentes espectrais do pulso viajam com velocidade de grupo diferentes, efeito conhecido como dispersão de velocidade de grupo (GVD).

Uma componente espectral do pulso com determinada frequência (ω) chegará no final da fibra em um intervalo de tempo $T = L/v_g$, em que v_g é a velocidade de grupo, definida como:

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

para $\beta = \bar{n}\omega/C$, $\bar{n}$ é o índice intermodal.

Sendo $\Delta\omega$ a largura espectral do pulso, o alargamento temporal de um pulso em uma fibra de comprimento L é dado por:

$$\Delta T = \frac{dT}{d\omega} \Delta\omega = L\beta_2 \Delta\omega, \quad (2.5)$$

onde $\beta_2 = d^2\beta/d\omega^2$ é o parâmetro GVD que define quanto o pulso óptico será alargado temporalmente após a propagação na fibra óptica.

2.1.2 Atenuação

A atenuação representa as perdas de potência de uma transmissão em uma fibra óptica, causando a redução do campo óptico. São essas perdas de potência que determinarão a distância entre os repetidores ou entre os amplificadores ópticos do enlace.

Entre as causas mais importantes da perda de potência em uma fibra óptica estão relacionadas a perdas por acoplamento no início e final da fibra, atenuações em emendas e conexões, absorção pelo material, irradiação devido curvaturas, acopladores, espalhamento pelo material, perdas por modos vazantes, entre outros.

Para o comprimento de onda de 1550 nm em fibra monomodo, utilizado nesta dissertação, a atenuação característica pode ser desconsiderada por termos a propagação do pulso em pequenas distâncias.

2.2 Efeitos não lineares

Em altas intensidades de potência, todos os materiais, não somente a sílica, possuem comportamento não linear e seus índices de refração aumentam com a intensidade (AGRAWAL, 2014). Costuma-se utilizar grandes potências em sistemas de comunicações ópticas quando se deseja atingir grandes distâncias e taxas de processamento elevadas. Com isso, os efeitos não lineares tornam-se importantes nesses sistemas, através do termo $\beta_{NL}(\omega_0)$ da Equação 2.1. Nesta seção é mostrado apenas um desses efeitos: automodulação de fase (*Self-Phase Modulation*-SPM) que foi utilizado para a realização desta dissertação.

A automodulação de fase é quando um pulso de luz altera a sua própria fase em virtude da variação da intensidade de luz no sistema óptico. Isso cria uma variação temporal do índice de refração, ou seja, quanto maior a amplitude do sinal maior a alteração no índice de refração. Com isso, altera-se temporalmente a fase da onda criando uma modulação do pulso. Como consequência, a automodulação de fase alarga o espectro óptico do pulso transmitido. A equação representa o índice de refração do núcleo e da casca da fibra de sílica:

$$n'_1 = n_1 + \bar{n}_2(P/A_{eff}), \quad (2.6)$$

onde n_1 é o índice de refração linear da fibra, $\bar{n}_2$ é o índice de refração não linear [m^2W^{-1}], P potência do sinal [W] e A_{eff} a área efetiva do núcleo [μm^2].

Sabendo que a forma do modo não se altera, mas o coeficiente de propagação β se torna dependente da potência, não sendo assim mais constante a partir desse efeito não linear. Com isso, podemos escrever o coeficiente de propagação como:

$$\beta' = \beta + k_0 \bar{n}_2 P / A_{eff} \equiv \beta + \gamma P, \quad (2.7)$$

em que $\gamma = 2\pi\bar{n}_2/(A_{eff}\lambda)$ é um parâmetro de não linearidade. Logo, para um aumento linear, no sentido do eixo de propagação da fibra, o termo γ produz uma variação de fase não linear, que pode ser expressa por:

$$\phi_{NL} = \int_0^L (\beta' - \beta) dz = \int_0^L P(z) dz = \gamma P_{in} L_{eff}, \quad (2.8)$$

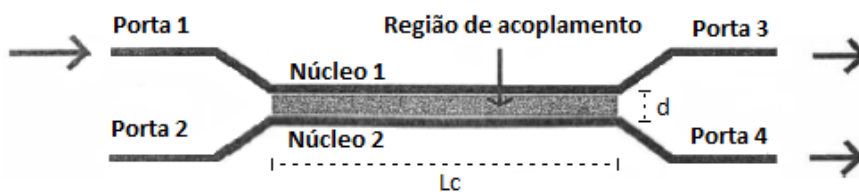
em que $P(z) = P_{in} \exp(-\alpha z)$ e L_{eff} representa o comprimento efetivo de interação. Como essa modulação de fase não linear é autoinduzida, o fenômeno não linear responsável pela mesma é denominado automodulação de fase (SPM) (AGRAWAL, 2014).

2.3 Acopladores

Acopladores de fibra óptica, conhecidos, também, como acopladores direcionais, são um dos dispositivos mais utilizados em sistemas de comunicações óptico. Sua função é dividir coerentemente um feixe óptico proveniente de uma entrada e encaminhá-lo para as demais saídas do dispositivos. Por isso, são tão utilizados por outros outros dispositivos ópticos de sistemas que necessitem dessa divisão de feixe.

Uma maneira de se produzir um acoplador é aproximando-se duas fibras ópticas em paralelo, cujos os núcleos fiquem próximos o suficiente ao longo de uma certa distância para que haja a troca de energia, como mostra a Figura 3. Pela definição da transferência de energia, tem-se que a saída Porta 3 é definida como saída bar e a Porta 4 é chamada de saída cross.

Figura 3: Esquemático de um acoplador de fibra óptica. A região sombreada mostra onde os modos de duas fibras se sobrepõem



Fonte: Elaborado pelo autor

Com os núcleos bastante próximos, os modos fundamentais de propagação de cada núcleo sobrepõem-se parcialmente na região da casca entre os dois núcleos. Provocando a transferência da potência óptica de um núcleo para o outro. Tal transferência está relacionada com a potência crítica P_c , que é a potência necessária

para se obter uma transferência de 50% entre os guias do acoplador. A potência crítica de um acoplador é dada por:

$$P_c = \frac{S\lambda}{n_{NL}L_c}, \quad (2.9)$$

onde S representa a área de seção transversal efetiva do guia de onda, λ é o comprimento de onda no vácuo, n_{NL} é o índice de refração não linear e L_c é o comprimento de acoplamento necessário para a transferência de um guia para outro. O comprimento L_c é definido como:

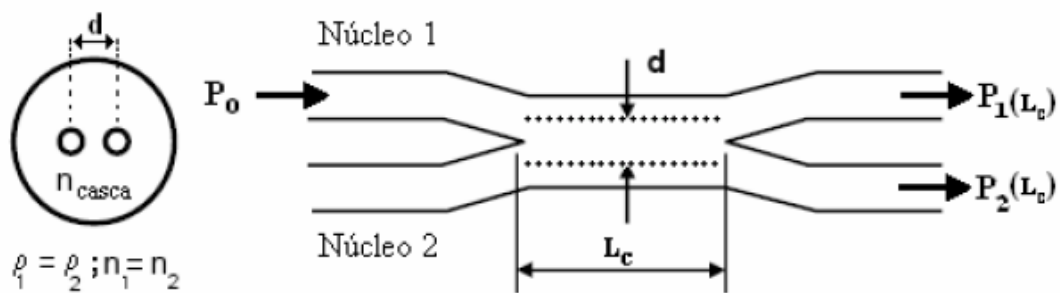
$$L_c = \frac{\pi}{2K}, \quad (2.10)$$

sendo K o coeficiente de acoplamento linear entre os guias adjacentes. Analisando as Equações 2.9 e 2.10, percebemos que a potência crítica é inversamente proporcional ao comprimento de acoplamento.

2.3.1 Acopladores Simétricos

Os acopladores são simétricos quando seus núcleos apresentam o mesmo raio ($\rho_1 = \rho_2$) e, também, iguais índices de refração ($n_1 = n_2$). Ou seja, os acopladores são simétricos quando seus núcleos são idênticos sob todos os aspectos.

Figura 4: Esquemático de um Acoplador Simétrico



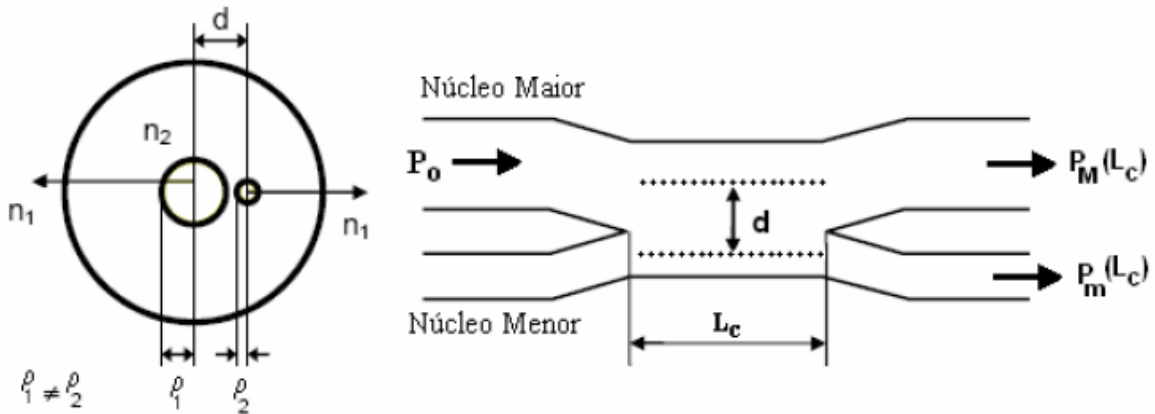
Fonte: MENEZES (2006)

2.3.2 Acopladores Assimétricos

Nos acopladores assimétricos, os seus núcleos podem ter diferentes formas ou tamanhos, diferentes propriedades dispersivas e diferentes dopagens ou

bombeamentos. O processo de acoplamento no acoplador direcional assimétrico ocorre de uma forma mais complicada, em comparação ao Acoplador Simétrico, devido a diferentes velocidades de fases nos dois núcleos.

Figura 5: Esquemático de um Acoplador Assimétrico, em que os índices M e m referem-se aos núcleos maior e menor, respectivamente



Fonte: MENEZES (2006)

2.3.3 Matriz de transferência do acoplador

A energia que sai nas duas portas de saída de um acoplador de fibra depende do comprimento do acoplador L e das potências de entrada. A transferência de energia que ocorre no acoplador é caracterizada pela matriz de transferência que representa todas as propriedades de um acoplador é definida por:

$$\begin{pmatrix} A_3(L) \\ A_4(L) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(KL) & i\sin(KL) \\ i\sin(KL) & \cos(KL) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1(0) \\ A_2(0) \end{pmatrix}, \quad (2.11)$$

onde A_3 e A_4 são as amplitudes dos sinais para as saídas 3 e 4, respectivamente, A_1 e A_2 são as amplitudes dos sinais para as entradas 1 e 2, respectivamente, K é o coeficiente de acoplamento e L o comprimento do acoplador. Se o comprimento do acoplador L é escolhido de tal modo que $KL = \pi/4$ ou $L = L_c/2$, a potência é dividida igualmente entre as duas portas de saída. Tais acopladores são referidos como 50 : 50 ou acopladores 3 dB. Acopladores com $L = L_c$ transferem toda a sua potência de entrada do primeiro núcleo para o segundo (referindo-se como o estado cross), enquanto que toda potência é transmitida para o mesmo núcleo quando $L = 2L_c$ (referindo-se como o estado bar). É importante perceber que um acoplador direcional introduz um deslocamento de fase relativo de $\pi/2$ entre as duas portas de saída,

como indicado pelo fator i presente nos termos da diagonal secundária da matriz de transferência na Equação 2.11.

Sabendo que $\rho = P_1(L)/P_0 = \cos^2(KL)$, assim, a Matriz de Transferência 2.11 agora pode ser descrita como:

$$T_c = \begin{pmatrix} \sqrt{\rho} & i\sqrt{1-\rho} \\ i\sqrt{1-\rho} & \sqrt{\rho} \end{pmatrix}, \quad (2.12)$$

formando uma matriz de transferência constituída somente de um termo o qual representa a relação entre as potências de entrada e saída.

Os acopladores presentes nas estruturas dos MZIs utilizados neste trabalho são totalmente lineares e simétricos.

2.4 Interferômetro de Mach-Zehnder (MZI)

Interferômetro é um dispositivo óptico que divide uma onda em duas, utilizando um divisor de feixe, podendo fazê-las percorrerem distâncias diferentes, através de fibras com comprimentos diferentes, e as recombina usando outro divisor de feixe. Os principais interferômetros são os de Fabry-Perot, Michelson, Sagnac e Mach-Zehnder. O último merece a nossa atenção, uma vez que tem sido bastante empregado com sucesso para geração de circuitos lógicos combinacionais em fibras ópticas (SALES, 2017).

Um interferômetro Mach-Zehnder de fibra óptica é produzido com a conexão de dois acopladores direcionais, seu principal componente, em série. O primeiro acoplador direcional é utilizado para dividir o sinal de entrada em dois, que podem adquirir diferentes fases, se a fibra óptica de um dos braços possuir efeitos não linear, ou se os comprimentos de seus braços forem distintos, antes de se recombinarem no segundo acoplador para gerarem a interferometria entres os sinais, visto na Figura 6.

Basicamente os MZIs são utilizados como filtros ópticos, multiplexadores e demultiplexadores, como blocos construtivos de moduladores, chaves ópticas, conversores de comprimento de onda e portas lógicas. Em interferômetros totalmente ópticos, o deslocamento de fase não linear, necessário ao chaveamento, é produzido pela automodulação de fase ou pela modulação de fase cruzada (MENEZES, 2006).

Figura 6: Interferômetro Mach-Zehnder

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

2.4.1 Matriz de transferência do Interferômetro Mach-Zehnder

Na situação apresentada na Figura 6, nota-se a presença do efeito XPM em um dos braços do MZI, logo teremos como sinal de entrada no segundo acoplador, referente ao braço BAR, representado como:

$$A_1 = \sqrt{\rho_1} A_0 \exp(i\beta_1 L_1 + i\rho_1 \gamma |A_0|^2 L_1). \quad (2.13)$$

No caso do sinal entrada no segundo acoplador pelo braço inferior CROSS, tem-se:

$$A_2 = i\sqrt{1-\rho_1} A_0 \exp(i\beta_2 L_2 + i(1-\rho_1)\gamma |A_0|^2 L_2). \quad (2.14)$$

Em que L_1 e L_2 são os comprimentos dos braços, β_1 e β_2 são as constantes de propagação dos braços BAR e CROSS do interferômetro, respectivamente. Os coeficientes ρ_1 e ρ_2 são as frações de divisão de potência nos acopladores, uma vez que eles podem ter fator de divisão distintos um do outro. Assim, de forma análoga ao procedimento no acoplador, é possível definir uma matriz de transferência para o MZI, definida por (AGRAWAL, 2004):

$$\begin{pmatrix} A_3 \\ A_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{\rho_2} & i\sqrt{1-\rho_2} \\ i\sqrt{1-\rho_2} & \sqrt{\rho_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

Nesta dissertação, somente a entrada do acoplador dos MZIs conectada ao braço BAR apresenta não linearidade e para ambas as entradas não há variação de fase e

amplitude. Então, nas equações 2.12 e 2.13, os termos β_1 e β_2 , respectivamente, são desconsiderados.

2.5 Equação não-linear generalizada de Schrödinger

Nesta seção é apresentada a equação não-linear generalizada de Schrödinger (ENLGS), que descreve matematicamente a propagação do pulso eletromagnético.

No caso da fibra óptica a equação ENLGS é representada por:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \frac{1}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} + \frac{\alpha}{2} A = i\gamma A \left[|A|^2 + \frac{1}{\omega_0} \frac{\partial(|A|^2 A)}{\partial t} - T_R A \frac{\partial |A|^2}{\partial t} \right]. \quad (2.16)$$

onde $A = A(z, t)$ é a amplitude do pulso transmitido como função de z e t , β_1 , β_2 e β_3 são coeficientes de dispersão de primeira, segunda e terceira ordem respectivamente, α é o coeficiente de perdas, γ é o parâmetro de não-linearidade, ω_0 é a frequência do pulso e T_R representa a resposta do ganho Raman. Para o valor de γ tem-se que

$$\gamma = \frac{2\pi\bar{n}_2}{A_{eff}\lambda}, \quad (2.17)$$

$\bar{n}_2$ é coeficiente de índice não linear [$m^2 W^{-1}$], A_{eff} área efetiva do núcleo [μm^2] e λ comprimento de onda [μm]. Para pulso de largura temporal maior que $5ps$, os parâmetros $(\omega_0 T_0)^{-1}$ e T_R/T_0 são tão pequenos ($< 0,001$) que os dois últimos termos na Equação 2.15 podem ser desprezados (AGRAWAL, 2001). Os pulsos apresentados neste trabalho possuem largura temporal de $10ps$. Logo, a Equação 2.15 pode ser reduzida a:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \frac{1}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} + \frac{\alpha}{2} A = i\gamma A |A|^2. \quad (2.18)$$

Nas simulações que foram desenvolvidas nesta dissertação, os fatores de dispersões e atenuação não são levados em consideração, pois o comprimento da fibra é bastante pequeno. Logo, os termos β_1 , β_2 , β_3 e α da Equação 2.18 apresentam valor nulo.

2.5.1 Equações de modo acoplado

Conhecendo a ENLGS para a propagação de um pulso eletromagnético em uma fibra óptica, percebemos que também podemos utilizá-la para a representação do pulso que percorre a fibra presente no acoplador. Mas é necessário inserir um termo que represente a transferência de energia eletromagnética de um núcleo para o outro na região de acoplamento e o efeito XPM, no caso da Figura 6.

Com essa transferência, o campo propagante em um núcleo influencia no campo do outro núcleo. Devido à sobreposição entre os modos, a variação das amplitudes dos pulsos ao longo do comprimento de acoplamento L_c origina uma constante K , já visto anteriormente na matriz de transferência do acoplador, que representa esta interação. Assim, há uma ENLGS para cada saída de um acoplador, chamada de equação do modo acoplado, as quais, em regime não linear com os efeitos SPM e XPM, resultam nas Equações 2.15 e 2.16 (AGRAWAL, 2004).

$$\frac{\partial A_1}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A_1}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A_1}{\partial t^2} = iKA_2 + i\gamma(|A_1|^2 + \sigma|A_2|^2)A_1, \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial A_2}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A_2}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A_2}{\partial t^2} = iKA_1 + i\gamma(|A_2|^2 + \sigma|A_1|^2)A_2, \quad (2.20)$$

em que K representa o coeficiente de acoplamento e σ representa o efeito XPM. Como os acopladores utilizados nas simulações não apresentam perdas e devido ao pulso utilizado ter largura espectral bem menor do que sua frequência central, os coeficientes α e β_3 são descartados. Além disso, os acopladores utilizados são totalmente lineares e não dispersivos, logo os termos β_1 , β_2 e σ são considerados nulos nas Equações 2.18 e 2.19.

2.6 Portas Lógicas

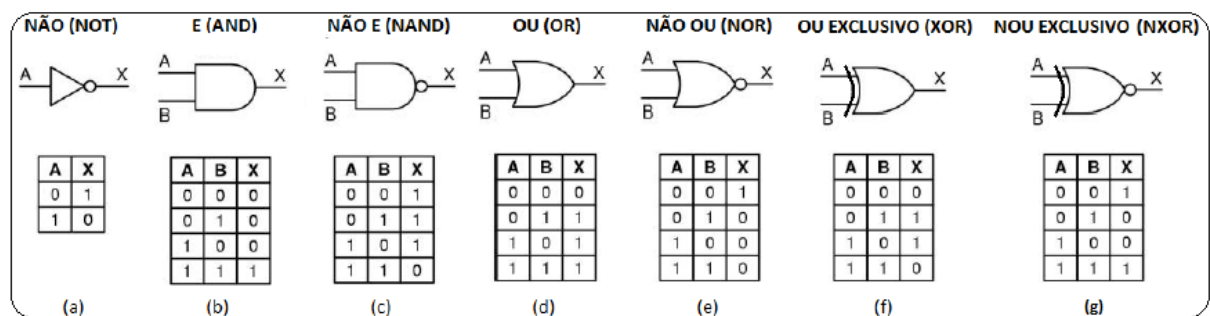
As portas lógicas são dispositivos básicos e essenciais para o desenvolvimento de circuitos digitais eletrônicos como circuitos digitais totalmente ópticos que executam funções booleanas com base nos valores dos sinais de entrada.

O princípio de operação de uma porta lógica totalmente óptica está baseado na alteração das propriedades de transmissão de um meio não linear através de pulsos de controle óptico. Em princípio, todos os meios que apresentam não linearidade

óptica podem ser usados em portas lógicas ópticas, porém um alto coeficiente de não linearidade e uma resposta rápida destes efeitos, na ordem de picosegundos, são geralmente importantes. São também propriedades desejáveis uma independência de polarização e uma largura de banda grande (MENEZES, 2006).

O comportamento das portas lógicas é conhecido pela tabela verdade que apresenta os estados lógicos das entradas e das saídas. Existem vários tipos de portas lógicas, entre elas podemos citar: NOT, AND, NAND, OR, NOR, XOR e NXOR, que estão representadas na Figura 7 juntamente com suas tabelas-verdade.

Figura 7: Circuito lógico e tabela verdade das portas lógicas (a) NÃO (NOT); (b) E (AND); (c) NÃO-E (NAND); (d) OU (OR); (e) NÃO-OU (NOR) e; (f) OU EXCLUSIVO (XOR); (g) NOU EXCLUSIVO(NXOR)



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

O símbolo de cada porta é utilizado para representação no circuito eletrônico que implementa a respectiva função lógica. Já a tabela verdade mostra todas as combinações possíveis de entrada e saída de um circuito lógico.

2.7 Circuito Combinacionais Aritméticos Fotônicos

As redes de interconexão fotônica podem superar as limitações das redes de interconexão eletrônica, garantindo comunicações de alta taxa de bits, transparência de formato de dados e imunidade de campo eletromagnético. Além disso, eles podem reduzir a densidade de fiação e o consumo de energia.

Dentro do conjunto de circuitos combinacionais aplicados para finalidade específica nos sistemas digitais, destacam-se os circuitos aritméticos. Estes são formados pelos circuitos aritméticos Meio Somador, Somador Completo, Meio Subtrator e Subtrator Completo.

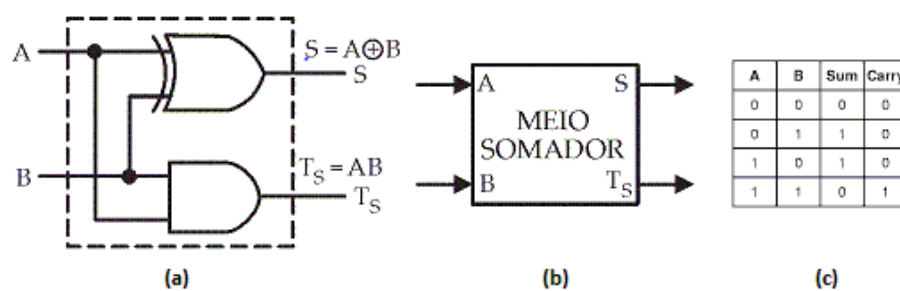
Um circuito aritmético totalmente óptico é utilizado, por exemplo, para calcular

a adição de números booleanos necessários para executar o processamento do cabeçalho do pacote de dados em uma rede. Se alguns pacotes forem roteados para o link errado ou estiverem rotulados incorretamente, eles poderão ser roteados em círculos sem atingir o destino. Esses loops são uma causa de congestionamento da rede e devem ser evitados. Um campo de tempo de vida (TTL: *time-to-live*) no pacote impede a formação de loops. Este campo representa o número máximo de saltos de um pacote e é decrementado após cada nó. Quando o valor do campo é zero, o pacote é descarregado. A implementação dessa funcionalidade requer um circuito de processamento totalmente óptico capaz de realizar a diminuição do número booleano no campo TTL. Esta operação pode ser realizada por meio de um somador totalmente ótico (SCAFFARDI *et al.*, 2008).

2.7.1 Circuito Meio Somador

O circuito Meio Somador, também conhecido como *Half Adder*, realiza a soma de 2 números binários de 1 algarismo, em que cada número é representado por 1 bit. Podemos montar um circuito que possui como entradas A e B, e como saída, a soma dos algarismos (S) e o respectivo transporte de saída (T_s), também denominado como *carry out*. A Figura 8 mostra como representamos o circuito Meio Somador e sua tabela verdade.

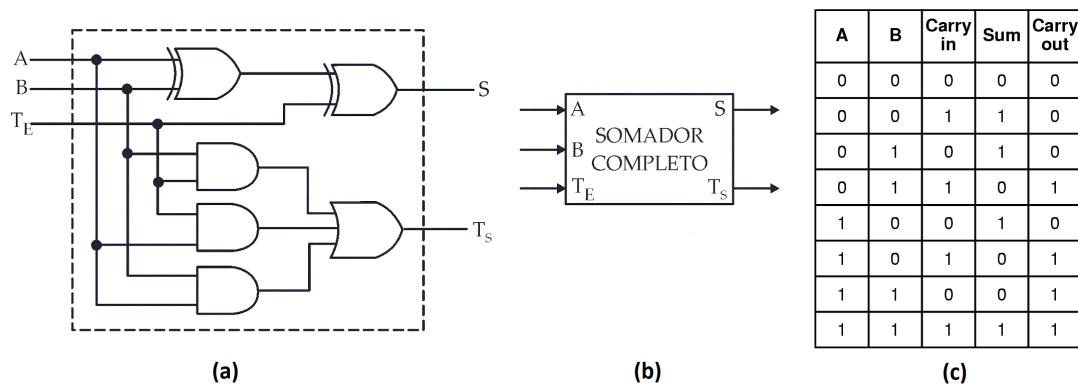
Figura 8: Circuito Meio Somador (a) Circuito lógico; (b) Representação em bloco; (c) Tabela verdade



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

2.7.2 Circuito Somador Completo

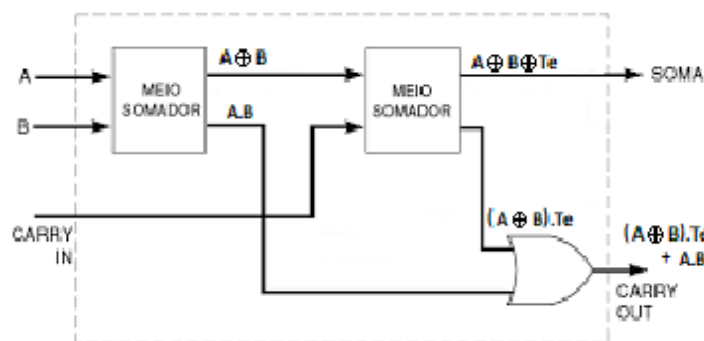
Para se realizar a soma de números binários com mais algarismos, o circuito Meio Somador torna-se insuficiente, pois não possibilita a introdução do transporte de entrada, também conhecido como *carry in*, proveniente do transporte de saída.

Figura 9: Circuito Somador Completo (a) Circuito lógico; (b) Representação em bloco; (c) Tabela verdade

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Com isso, o circuito Somador Completo, também conhecido como *Full Adder*, é um circuito para efetuar a soma completa, considerando o transporte de entrada. A figura 9 mostra como representamos o circuito Somador Completo e sua tabela verdade com a aritmética binária.

Podemos, também, construir um Somador Completo a partir de 2 Meio Somadores, como mostra a figura 10.

Figura 10: Circuito Somador Completo a partir de Meios Somadores

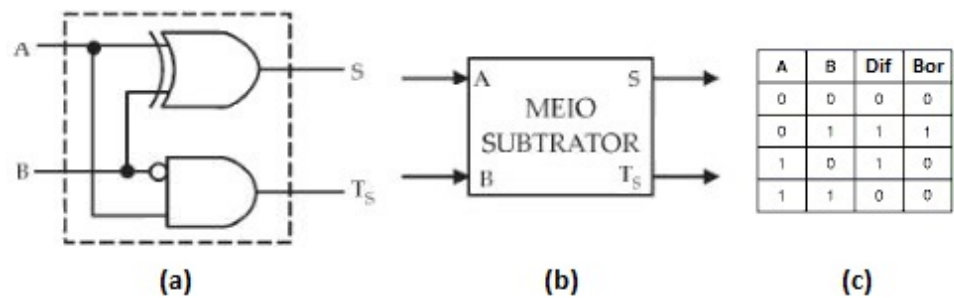
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

2.7.3 Circuito Meio Subtrator

O circuito Meio Subtrator, também conhecido como *Half Subtractor*, realiza a subtração de 2 números binários de 1 algarismo. Podemos montar um circuito que possui como entradas A e B, e como saída, a subtração dos algarismos (S) e o respectivo transporte de saída (T_S), também denominado como *borrow out*. A figura

11 mostra como representamos o circuito Meio Subtrator e sua tabela verdade.

Figura 11: Circuito Somador Completo a partir de Meios Somadores

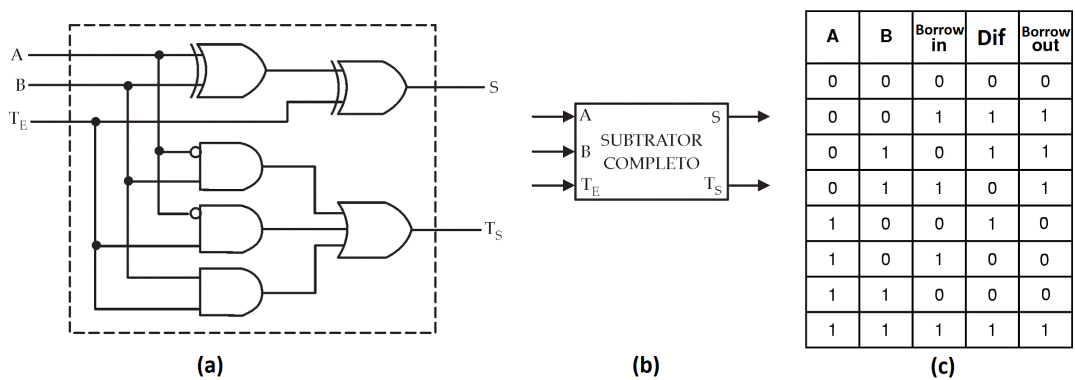


Fonte: Elaborado pelo próprio autor

2.7.4 Circuito Subtrator Completo

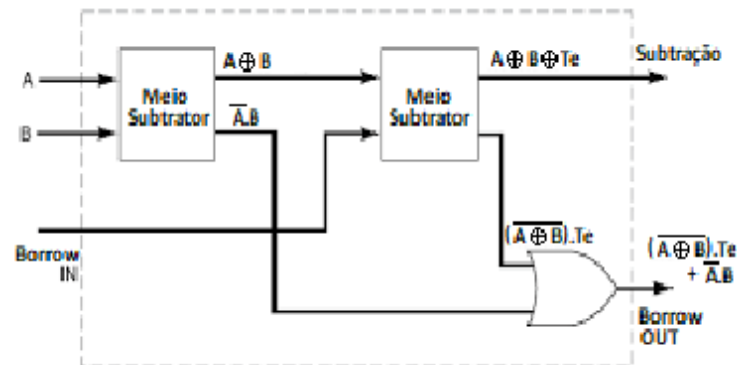
Para se realizar a subtração de números binários com mais algarismos, o circuito Meio Subtrator não é mais suficiente, pois não possibilita a introdução do transporte de entrada, também conhecido como *borrow in*, proveniente do transporte de saída. Com isso, o circuito Subtrator Completo, também conhecido como *Full Subtractor*, é um circuito para efetuar a subtração completa, considerando o transporte de entrada. A figura 12 mostra como representamos o circuito Subtrator Completo e sua tabela verdade.

Figura 12: Circuito Subtrator Completo (a) Circuito lógico; (b) Representação em bloco; (c) Tabela verdade



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Podemos, também, construir um Subtrator Completo a partir de 2 Meio Subtratores, como mostra a figura 13.

Figura 13: Circuito Subtrator Completo a partir de Meio Subtratores

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Notemos que a saída Subtração do Meio Subtrator 2 apresenta a subtração completa de 2 números.

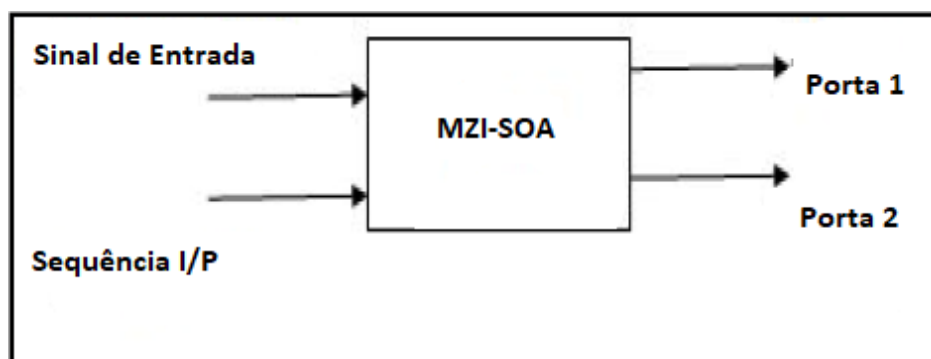
Analisando as saídas dos meios subtratores, notamos que são os termos da expressão de um Subtrator Completo. Se injetarmos duas dessas saídas nas entradas de uma porta OU, teremos na saída o T_s de um Subtrator Completo. O circuito com essa ligação é visto na figura 13.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para fundamentar esta dissertação, são apresentados neste capítulo os trabalhos que utilizaram o Optisystem como *software* para se realizar as simulações e o interferômetro Mach-Zehnder (MZI) como base de referencial teórico, com o intuito de organizar as técnicas utilizadas para o desenvolvimento de um dispositivo capaz de gerar em uma única estrutura um circuito somador e subtrator completos.

Em SRIBHASHYAM *et al.* (2015) foi desenvolvida uma estrutura capaz de encontrar um circuito Somador Completo e uma outra estrutura para um circuito Subtrator Completo, selecionando-se adequadamente os terminais de saída do componente MZI-Amplificador Óptico de Semicondutor (SOA). O dispositivo MZI-SOA é formado por um sinal de entrada que atua como sinal de controle para o SOA que é acoplado ao sinal de entrada com a ajuda de acoplador, como mostra a figura 14. Este acoplador combinado com outro acoplador, juntamente com o SOA, funciona como Interferômetro Mach-Zehnder(MZI).

Figura 14: Diagrama de blocos para o MZI-SOA

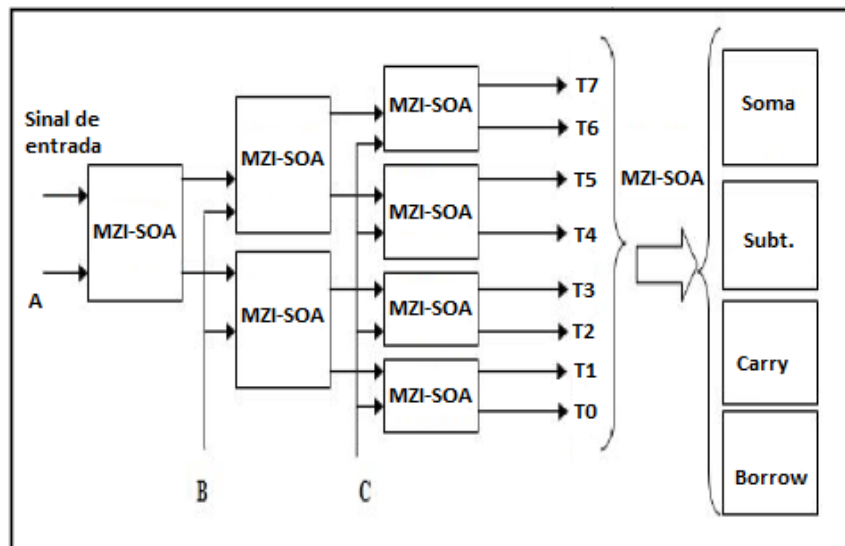


Fonte: SRIBHASHYAM *et al.* (2015)

A implementação do somador completo, bem como do subtrator completo, baseia-se no diagrama esquemático da Figura 15). Consistindo de sete estruturas MZI-SOA e oito terminais denotados por T0, T1, T2, T3, ..., T7 que são usados para encontrar a soma junto com o transporte de saída(*Carry Out*) e a diferença junto

com transporte de saída (*Borrow Out*) do somador completo e subtrator completo, respectivamente.

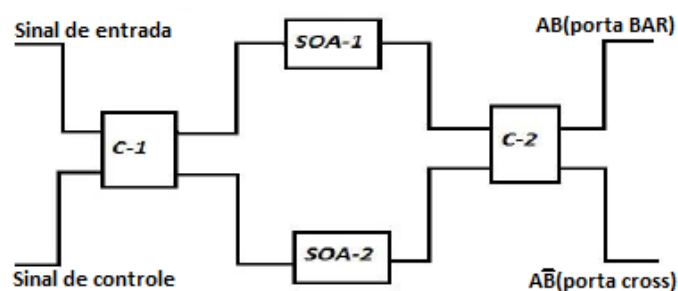
Figura 15: Esquemático para somador completo e subtrator completo utilizando MZI-SOA



Fonte: SRIBHASHYAM *et al.* (2015)

No trabalho de THERESAL, SATHISH e ASWINKUMAR (2015) são desenvolvidas portas lógicas reversíveis baseada em MZI e SOA. Uma função é reversível se, dada a sua saída, sempre é possível determinar a sua entrada, que é o caso quando existe uma relação um-para-um entre estados de entrada e saída. Logo, uma porta lógica que satisfaz a função reversível é denominada como portas lógicas reversíveis. A implementação de portas lógicas reversíveis totalmente óptica é conseguida através de comutadores ópticos baseados em MZI-SOA. Em que um Amplificador Óptico de Semicondutor(SOA) é colocado em cada braço do MZI (SOA-1 e SOA-2) e dois acopladores(C-1 e C-2), como mostra a Figura 16.

Figura 16: Diagrama de um MZI baseado em SOA

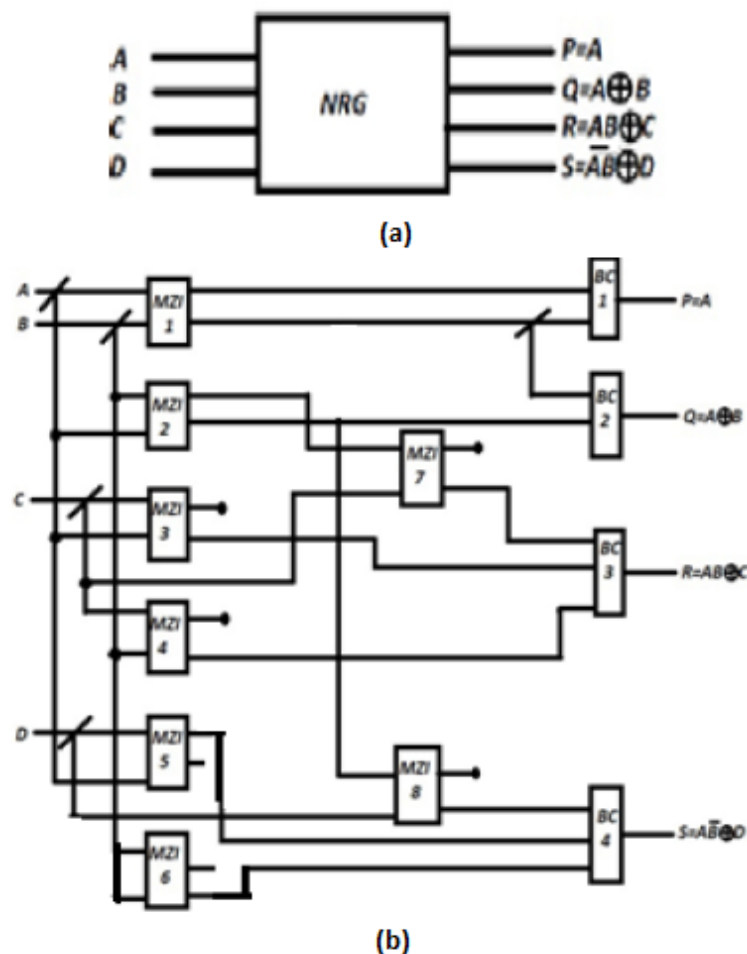


Fonte: THERESAL, SATHISH e ASWINKUMAR (2015)

Logo, uma porta NR (Naveen Raymond) reversível de quatro entradas (A,B,C e

D) e quatro saídas (P,Q,R e S) é desenvolvida utilizando-se oito MZIs, como mostra a Figura 17. Com uma única porta NRG (Gate Naveen Raymond) foi possível encontrar nas saídas um circuito Meio Somador(HA) e Meio subtrator(HS). Em que as entradas A e B são de acordo com a tabela verdade dos circuitos (HA e HS) e as entradas C e D são zero.

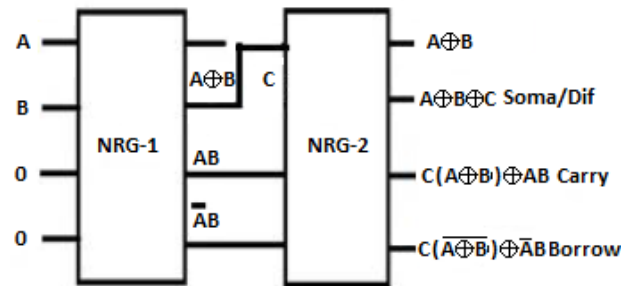
Figura 17: Porta NR reversível (a)Diagrama de blocos; (b)Implementação óptica com 4 combinadores de feixe (BC) nas saídas



Fonte: THERESAL, SATHISH e ASWINKUMAR (2015)

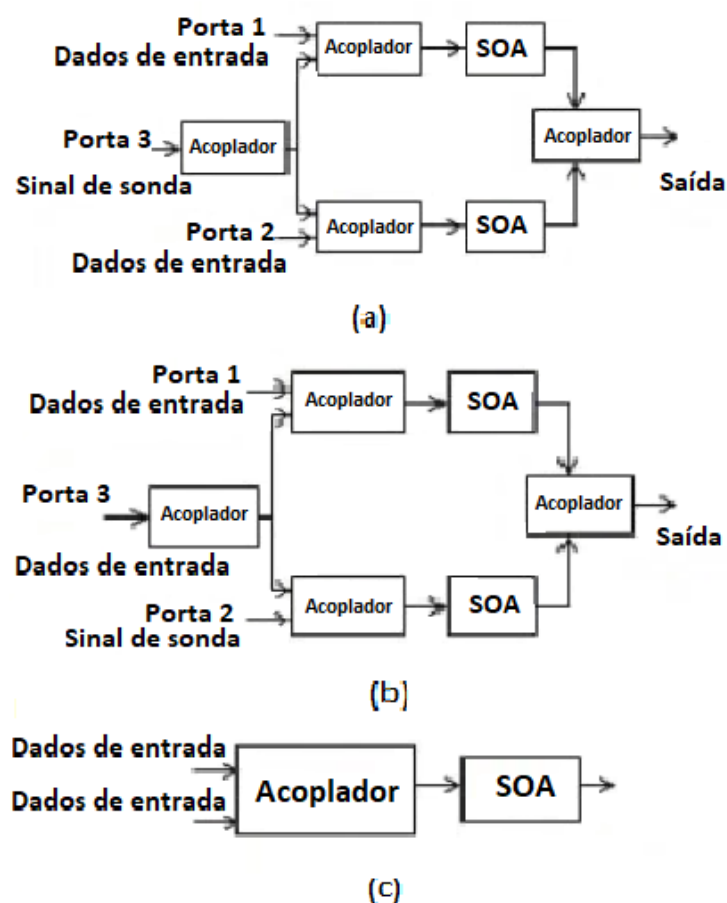
Utilizando-se duas portas NR, o circuito Somador Completo e Subtrator Completo foram projetados, Figura 18. As entradas A e B são conectadas ao NRG-1 e a entrada C ao NRG-2. A soma e o transporte de saída (carry out) são obtidos da saída Q e R do NRG-2, respectivamente. Para o circuito Subtrator Completo, a diferença e o transporte de saída (Borrow out) são obtidas das saídas Q e S do NRG-2, respectivamente.

Em Verma, Ramachandran e Prince (2016) um circuito somador completo

Figura 18: Porta NR reversível (a)Diagrama de blocos; (b)Implementação óptica

Fonte: THERESAL, SATHISH e ASWINKUMAR (2015)

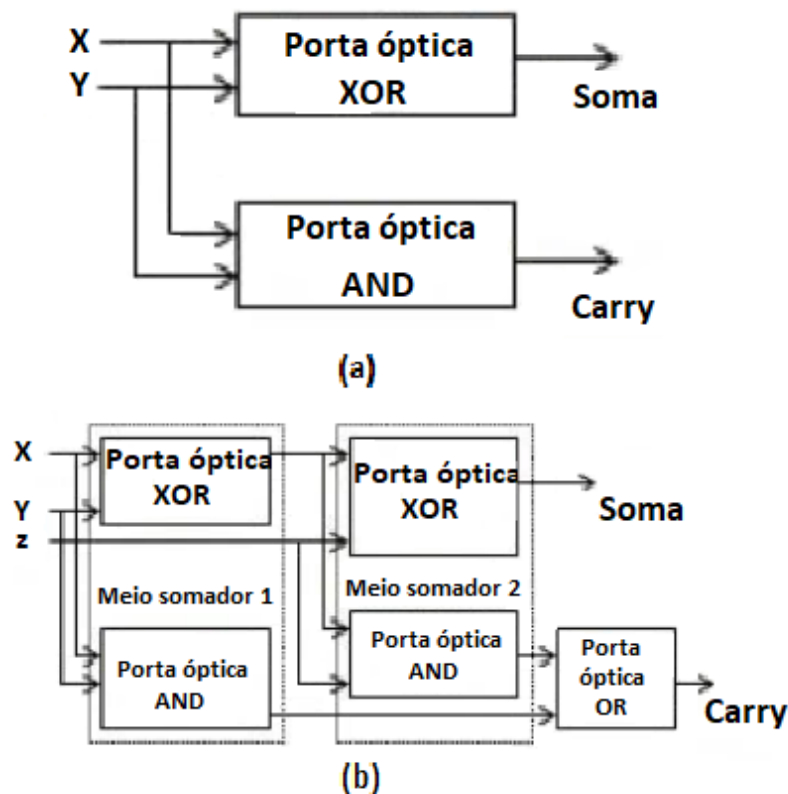
totalmente óptico é desenvolvido com dois circuitos meio somadores e uma porta lógica OR. Além disso, nesse sistema os efeitos não-lineares XPM *Cross Phase Modulation* e XGM *Cross Gain Modulation* foram utilizados na estrutura SOA-MZI no desenvolvimento das portas lógicas XOR, AND e OR com seus devidos sinais de entrada (porta 1 e 2) e um sinal CW (onda contínua) na porta 3, figura 19.

Figura 19: Esquemático baseada em SOA-MZI das portas: (a)XOR (b)AND (c)OR

Fonte: Verma, Ramachandran e Prince (2016)

Obtidas as portas lógicas necessárias, foi desenvolvida a estrutura para o circuito Meio Somador com a porta XOR e AND, Figura 20(a). Logo após, com o cascadeamento de dois meio somadores e uma porta lógica OR, a estrutura do somador completo foi apresentada, Figura 20(b).

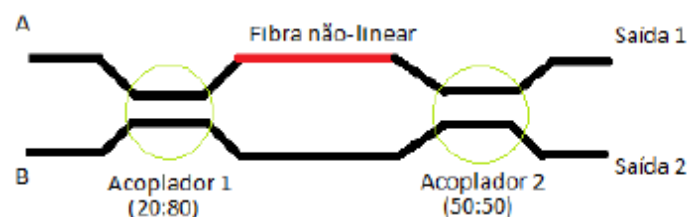
Figura 20: Diagrama esquemático para circuito: (a)Meio Somador; (b)Somador Completo



Fonte: Verma, Ramachandran e Prince (2016)

Em NETO (2017), há a geração de um circuito Somador Completo através de três MZIs. Cada MZI é formado por dois acopladores (20:80 e 50:50) e a fibra óptica presente em seu braço BAR apresenta efeito não-linear de auto-modulação de fase (SPM), como mostra a Figura 21.

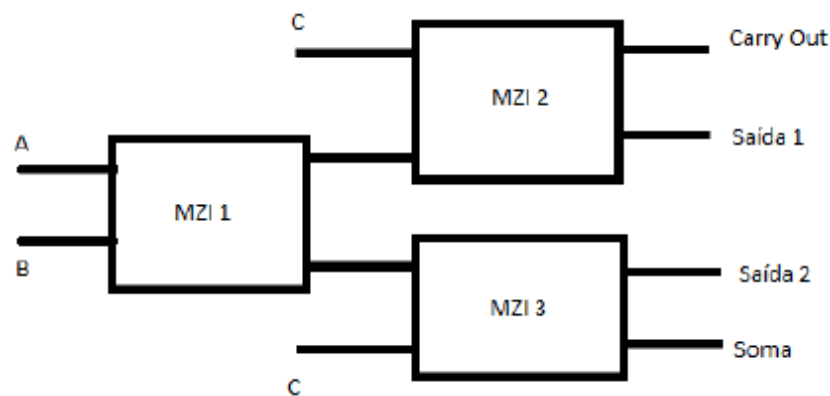
Figura 21: Esquemático do Interferômetro Mach-Zehnder



Fonte: NETO (2017)

Para obter o circuito Somador Completo, foi desenvolvido um dispositivo que utiliza o cascadeamento de três MZIs e, também, foi alterado o índice de refração não-linear ($\bar{n}^2$) do braço BAR do MZI para produzir interferometria, como mostra a Figura 22. Nesse dispositivo, A e B são os sinais de entrada e C é um sinal de controle para o MZI 2 e 3. Temos, então, a soma e o transporte de saída(carry out) nas portas CROSS do MZI 3 e BAR do MZI 2, respectivamente.

Figura 22: Estrutura de cascadeamento de MZI



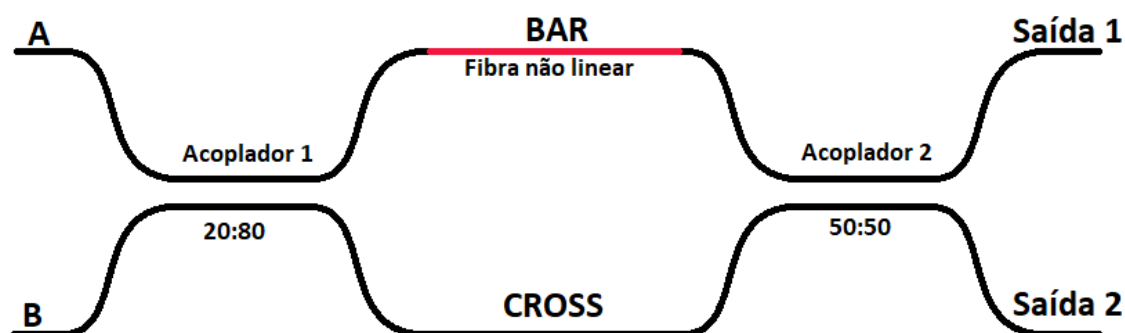
Fonte: NETO (2017)

Percebemos, então, que diversas técnicas foram utilizadas nos trabalhos relacionados para o objetivo de encontrar circuito combinacional somador e subtrator completos totalmente óptico.

METODOLOGIA

Nesta dissertação, é proposto a utilização de Interferômetros de Mach-Zehnder (MZI) com efeito não linear na fibra do seu braço BAR (superior) com o objetivo de construir circuitos combinacionais aritméticos somador e subtrator completos. A Figura 23 mostra a estrutura proposta do MZI com dois sinais de entrada A e B conectados ao Acoplador 1 que irá separá-los para cada braço. O Acoplador 1 possui coeficiente de acoplamento 0.2, logo quer dizer que 80% da energia do sinal da entrada A e 20% da energia do sinal da entrada B irão para o braço BAR do MZI que possui efeito não linear. Em seguida, os sinais de cada fibra do MZI passarão pelo Acoplador 2 simétrico (3dB) que dividirá os sinais igualmente nas direções das saídas 1 e 2.

Figura 23: Estrutura do MZI proposto



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

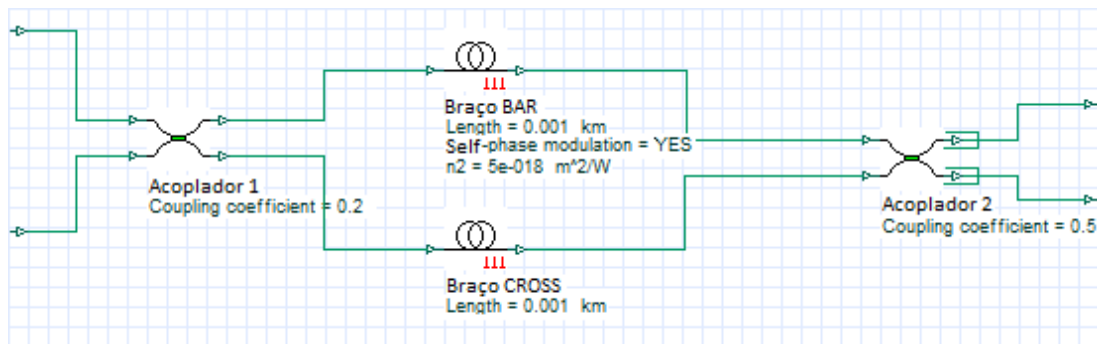
Com o MZI proposto, simulações serão implementadas para a geração de portas lógicas necessárias para se obter um circuito combinacional. Em seguida, as simulações para obtenção dos circuitos combinacionais Somador Completo e Subtrator Completo são implementadas.

Para realizar as simulações é utilizado o *software* OptiSystem (Versão 13, Licença OCS-2014-612NH). Desenvolvido pela empresa canadense Optiwave Corp, o *software* OptiSystem permite o planejamento, testes e a simulação de sistemas ópticos. Amplamente utilizado por pesquisadores e profissionais da área, também

pode exercer significativa influência no âmbito acadêmico, auxiliando estudantes a compreender de forma intuitiva vários elementos presentes no universo das comunicações ópticas (ALMEIDA; NEPOMUCENO; GUIMARÃES, 2014).

Como o desenvolvimento de qualquer projeto deve considerar vários fatores que possam afetar sua implementação, o uso de ferramentas e softwares que permitam simulá-la previamente auxiliam na análise do sistema. Nesse sentido, para sistemas de comunicações ópticas, o *software* OptiSystem fornece um ambiente de simulação poderoso e completo com uma extensa biblioteca de componentes e uma ampla variedade de ferramentas, tornando possível a modelagem dos mais diversos sistemas ópticos (ALMEIDA; NEPOMUCENO; GUIMARÃES, 2014).

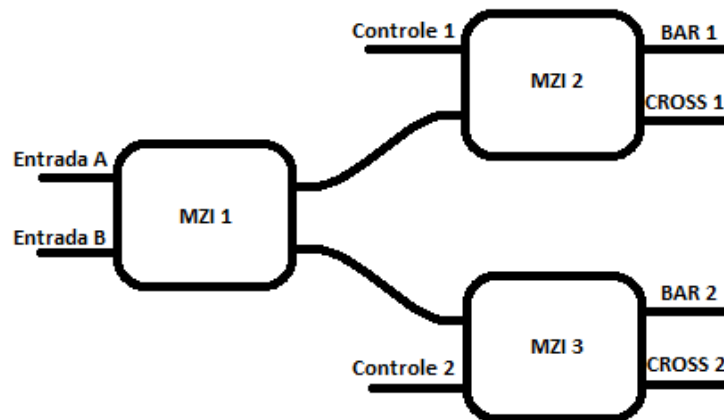
Figura 24: MZI proposto



A Figura 24 representa o esquemático do interferômetro Mach-Zehnder no *software* OptiSystem. Destacando-se os valores do coeficiente de acoplamento dos acopladores, comprimento da fibra óptica em cada braço do MZI, presença de SPM no braço BAR e seu respectivo valor de $\bar{n}_2$.

4.1 Simulação porta lógica

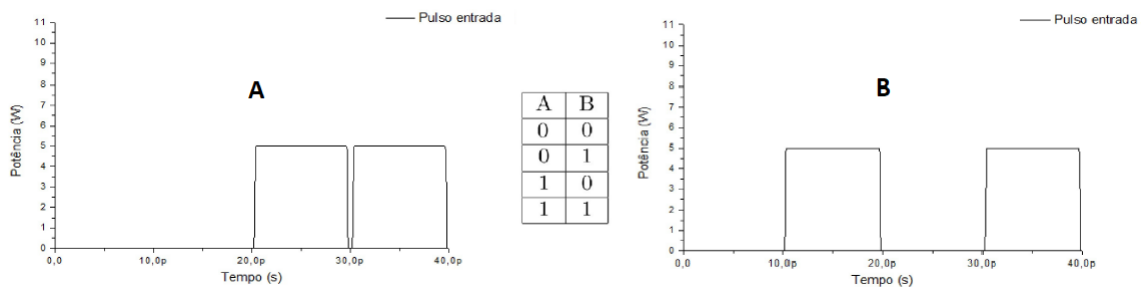
Nesta seção, uma estrutura formada por três MZI ligados de forma cascadeada, ou seja, a saída de um MZI é conectada na entrada de outro MZI. Há, também, duas entradas de controle como mostra na Figura 25. Para a simulação foram inseridas nas entradas dois pulsos retangulares com variação de potência de pico de 1 a 5W, com largura temporal de 10 ps e largura a meia altura (FWHM - *Full Width at Half Maximum*) de 2,4 ps. A aplicação do pulso retangular tem como objetivo buscar uma forma de minimizar as deformações (picos adjacentes de potência) geradas pela não linearidade. Além disso, os controles possuem o mesmo formato de pulso e potência de pico dos sinais das entradas A e B.

Figura 25: Estrutura cascadeada com três MZI

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Com essa estrutura, simulações foram realizadas a fim de encontrar portas lógicas totalmente ópticas necessárias para obtenção do circuito combinacional. Para isso, foi utilizado o efeito não-linear de auto-modulação de fase (SPM) na fibra do braço BAR de cada MZI como mostrado na Figura 23, variando-se o índice de refração não-linear ($\bar{n}_2$) para gerar interferometria.

Nas simulações, foi utilizada a modulação ASK (Amplitude Shift Keying) tipo OOK (On-Off Keying) nos sinais de entrada e controle, ou seja, o pulso retangular presente em cada entrada é representado pelo bit 1 e a sua ausência significa o valor 0. Na Figura 25 tem-se os sinais que representam o conjunto de bits 0 e 1 que são usados nas entradas.

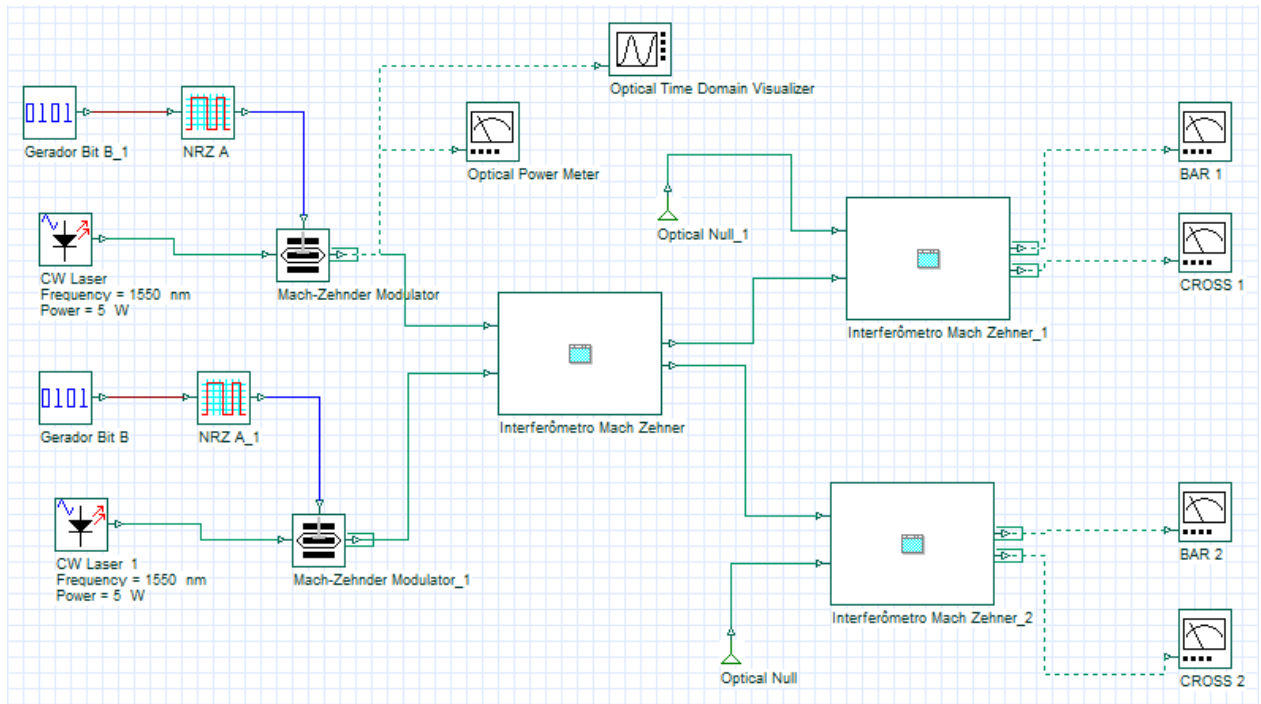
Figura 26: Sinais nas entradas A e B para potência de pico de 5W

Na Figura 26, as entradas $A = [(0),(0),(1) \text{ e } (1)]$ e $B = [(0),(1),(0) \text{ e } (1)]$ são representadas, ambos sendo equivalentes, de forma temporal, as entradas $[(0,0),(0,1),(1,0) \text{ e } (1,1)]$ específicas das portas lógicas.

As simulações então são divididas em quatro etapas determinadas pelos pulsos de controle 1 e 2. Para cada entrada de controle 1 e 2 variando em $[(0,0),(0,1),(1,0) \text{ e } (1,1)]$.

(1,1)] teremos quatro conjunto de bits de entrada [(0,0), (0,1), (1,0) e (1,1)]. Ou seja, têm-se as entradas [(0,0), (0,1), (1,0) e (1,1)] para controle (0,0), depois as mesmas entradas para o controle (0,1) e assim sucessivamente. Como é possível visualizar na Figura 24, há quatro saídas, que são divididas em BAR 1, BAR 2, CROSS 1 e CROSS 2. A Figura 27 representa o esquemático do cascadeamento de MZI no *software* OptiSystem, em que cada bloco representa um MZI.

Figura 27: Esquemático do cascadeamento de MZI no OptiSystem



Para cada potência de pico, tem-se a propagação desse pulso pelo MZI proposto, em que o coeficiente de índice não linear do braço BAR varia de $5 \cdot 10^{-18} m^2 W^{-1}$ até $5 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$, fornecendo gráficos de potência em suas saídas. Os parâmetros dessa simulação e do MZI proposto encontram-se na Tabela 1.

Nesta dissertação, somente irá se analisar os resultados para pulsos de entrada com potência de pico no valor de $5W$ e com sinais de controle 1 e 2 iguais a 0 (ausência de pulso), pois obtiveram os resultados desejados.

Os gráficos apresentam quatro curvas possíveis para entradas de [(0,0), (0,1), (1,0) e (1,1)] variando-se o índice de refração não-linear ($\bar{n}_2$) de $5 \cdot 10^{-18} m^2 W^{-1}$ até $5 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$. A leitura dos gráficos é feita em relação a potência do sinal de uma determinada saída da estrutura para um valor específico de $\bar{n}_2$ que se comporta como uma porta lógica específica.

Após as simulações, são encontradas as portas lógicas XOR, AND e OR para um

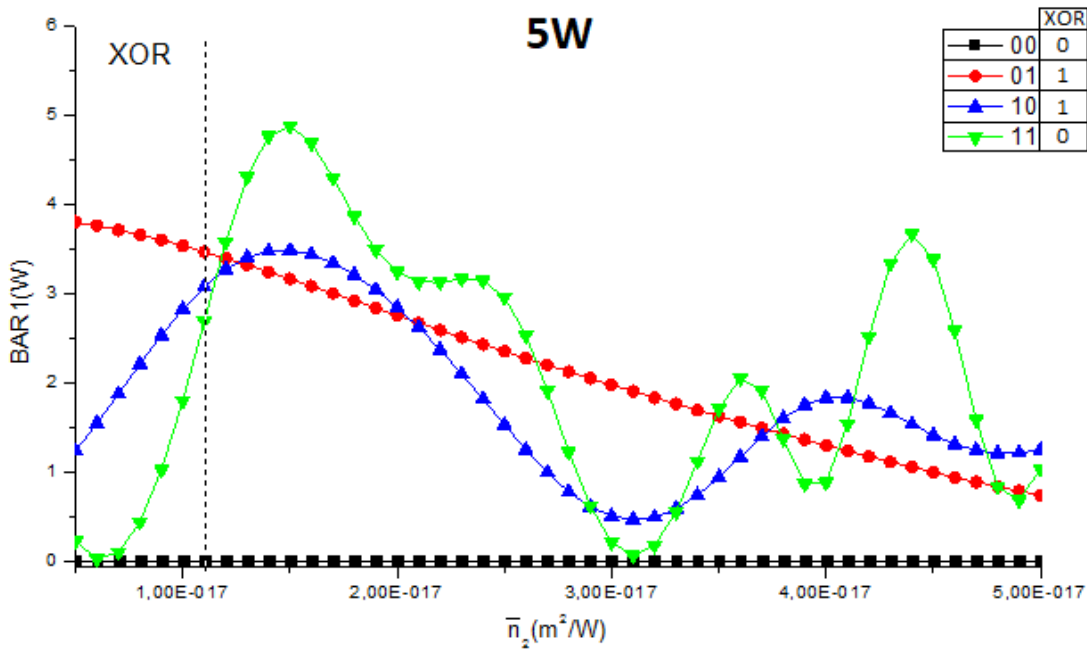
Tabela 1: Parâmetros de simulação

Características	Valor
Quantidade de MZI	3
Sinais de entrada	4 (A,B e Controles 1 e 2)
Comprimento de onda	1550 nm
Largura temporal do pulso	10 ps
FWHM	2.4 ps
Modulação do pulso	OOK
Coef. acoplamento 1º acoplador	20:80
Coef. acoplamento 2º acoplador	50:50 (3dB)
Efeitos não lineares	SPM
Dispersão de 2ª e 3ª ordens	Não há
Potência de pico	1W a 5W
Coeficiente de não linearidade ($\bar{n}_2$)	$5 \cdot 10^{-18} m^2 W^{-1}$ até $5 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$

intervalo de valores específicos de $\bar{n}_2$.

Como mostra a Figura 28, temos que na saída da porta BAR 1 no intervalo de $5 \cdot 10^{-18} m^2 W^{-1}$ até $1,1 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$ para os valores de $\bar{n}_2$, foi encontrada uma saída que se comporta como a saída de uma porta lógica XOR para o controle 00 e potência de pico de 5W.

Figura 28: Gráfico da saída BAR 1 para a porta lógica XOR



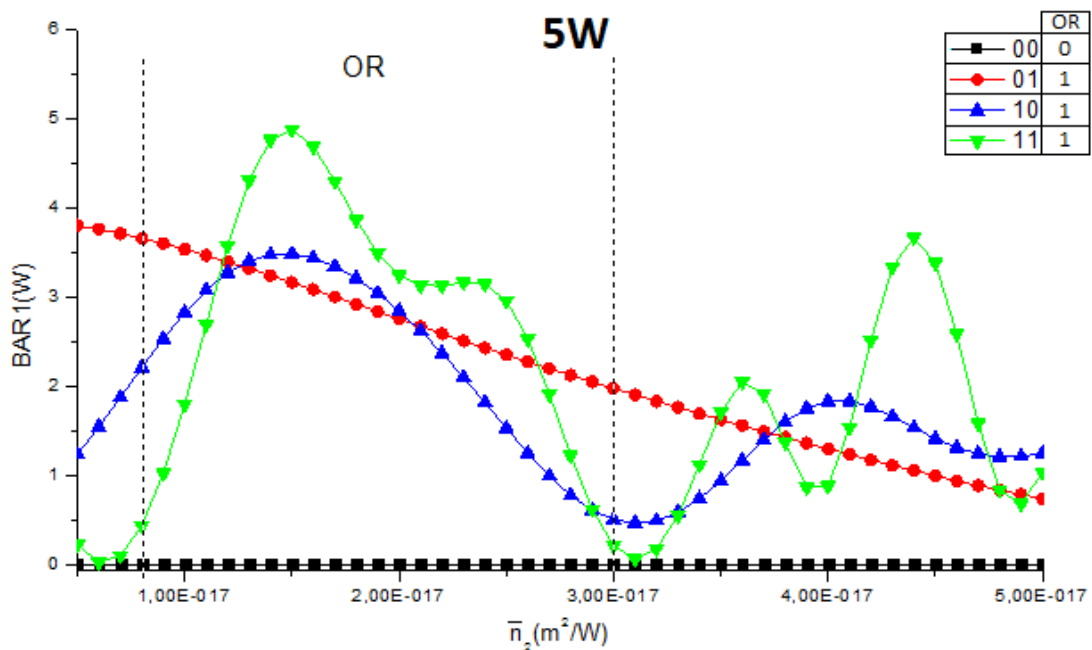
Como estamos trabalhando com intervalo de valores de $\bar{n}_2$ em que teremos a porta lógica, não adotaremos, neste momento, um valor de limiar de potência média, pois teríamos casos com limiares com valores diferentes para cada $\bar{n}_2$. O limiar de

potência específica o nível lógico (0 ou 1) que irá receber um determinado ponto da curva, ou seja, os pontos das curvas acima da reta que representa o limiar de potência equivalem ao nível lógico 1 e os pontos que se encontram abaixo da reta, representam o nível lógico 0.

Note que na Figura 28, a saída (1,1) apresenta valores de potência média menores do que nas saídas (0,1) e (1,0). Caracterizando-se, realmente, a porta lógica XOR. Assim, pode-se traçar limiares de potência.

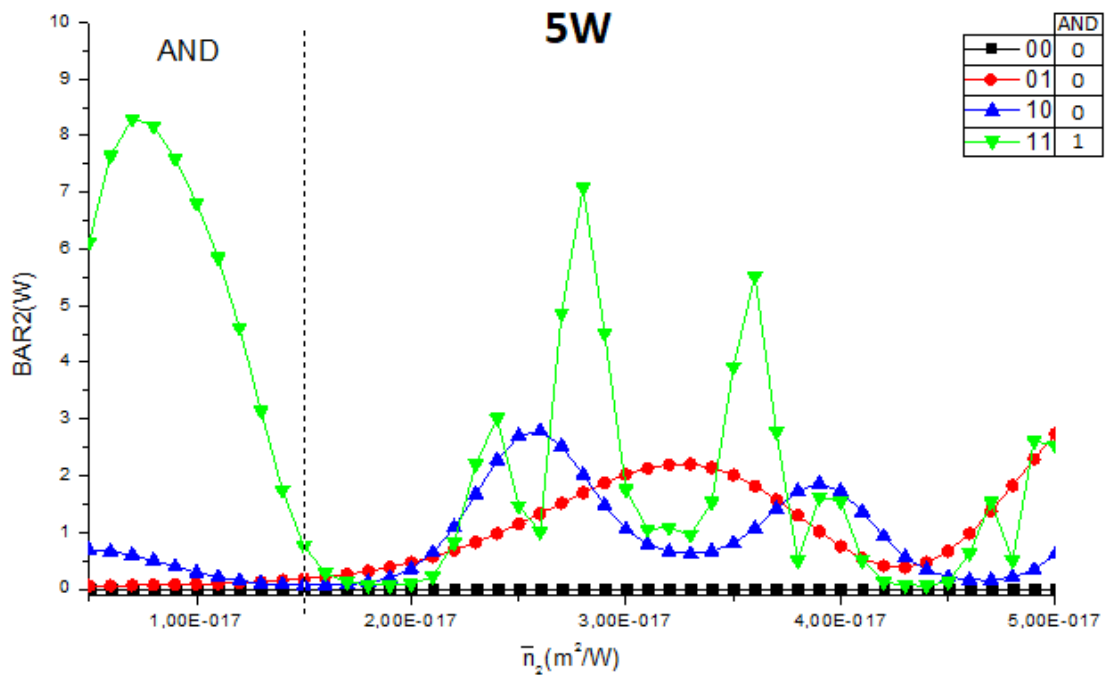
Também na porta BAR 1, mas no intervalo de $8 \cdot 10^{-18} m^2 W^{-1}$ até $3 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$ para os valores de $\bar{n}_2$, encontramos uma saída que se comporta como a saída de uma porta lógica OR, como mostra a Figura 29.

Figura 29: Gráfico da saída BAR 1 para a porta lógica OR



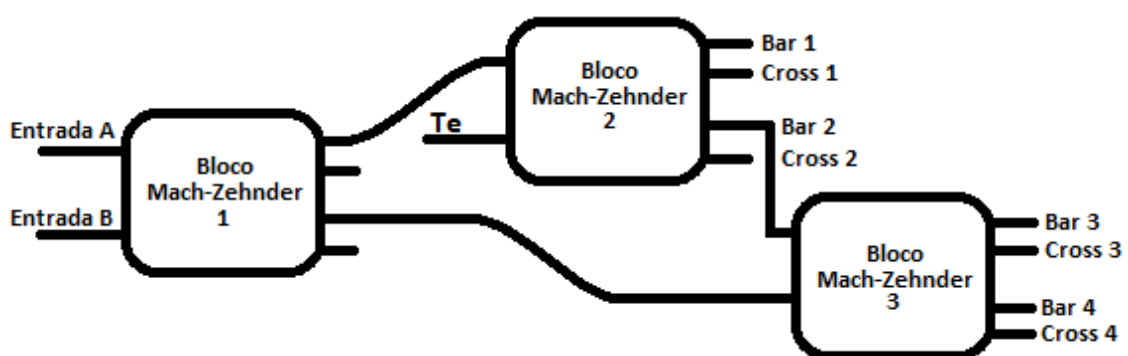
Já na Figura 30, temos os resultados na saída da porta BAR 2, em que no intervalo de $5 \cdot 10^{-18} m^2 W^{-1}$ até $1,5 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$ para os valores de $\bar{n}_2$, há uma saída que se comporta como a saída de uma porta lógica AND. Também, para controle 00 e potência de pico de 5W.

Com as portas lógicas XOR e AND obtidas, temos, então, uma estrutura que já fornece um circuito combinacional Meio Somador para um valor específico de $\bar{n}_2$ escolhido.

Figura 30: Gráfico da saída BAR 2 para a porta lógica AND

4.2 Simulação circuito combinacional

Nesta seção, a estrutura que utilizamos para encontrar as portas lógicas, formada por três MZI ligados de forma cascadeada, foi reunida em um subsystema chamado de Bloco Mach-Zehnder. Então, mais dois blocos idênticos foram criados e interligados entre si de maneira similar a uma estrutura de um somador completo formado por meios somadores, como mostra a Figura 31. Percebe-se, então, que utilizamos apenas as saídas Bar 1 e Bar 2 do Bloco Mach-Zehnder 1 para fazermos a interligação com os demais blocos, pois foram nestas saídas que obtivemos os resultados para as portas lógicas, como mostrado nas simulações da seção anterior.

Figura 31: Estrutura cascadeada com três Blocos Mach-Zehnder

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Com essa estrutura, simulações foram realizadas a fim de encontrar o circuito combinacional somador e subtrator completo totalmente ópticos. Para isso, além das entradas A e B utilizadas anteriormente, introduzimos um novo sinal de entrada T_E no bloco Mach-Zehnder 2 que representa o transporte de entrada *Carry In* e *Borrow In* do circuito somador e subtrator completo, respectivamente. Percebe-se, também, que agora temos oito saídas, que são divididas em BAR 1, CROSS 1, BAR 2, CROSS 2 e assim sucessivamente.

Tabela 2: Pulsos de entrada da simulação

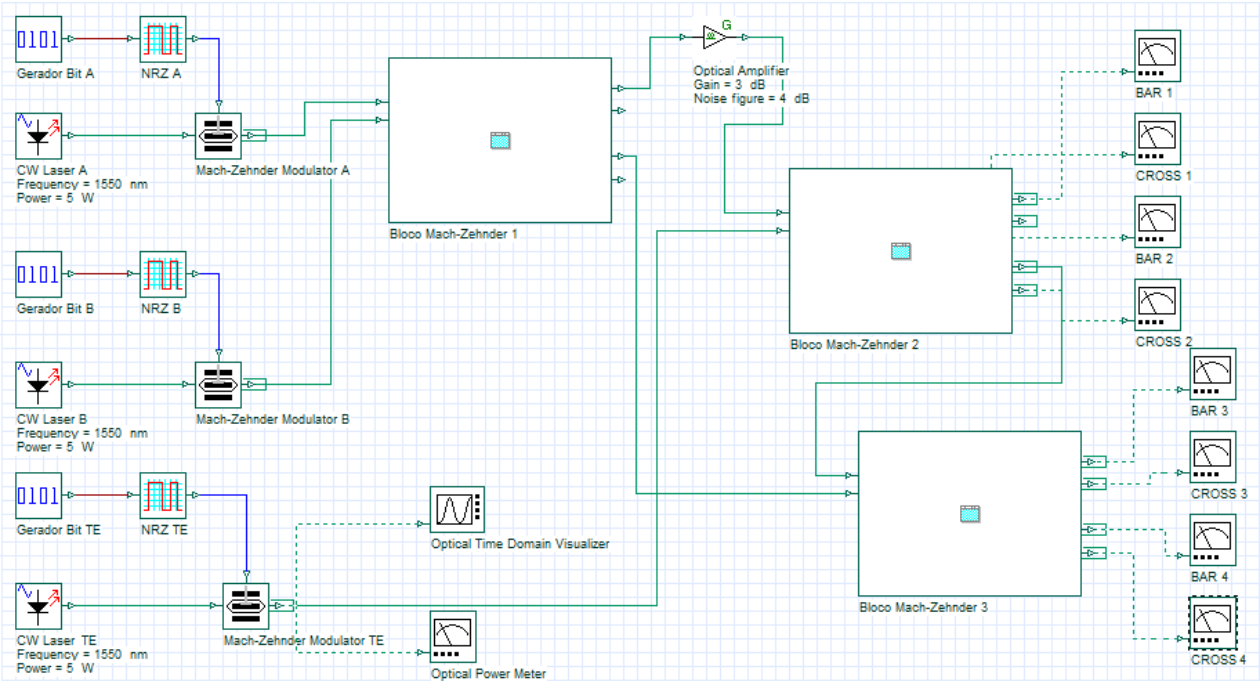
A	B	T_E
0	0	0
0	0	1
0	1	0
0	1	1
1	0	0
1	0	1
1	1	0
1	1	1

As simulações então são divididas em oito etapas determinadas pelos sinais de entrada A, B e T_E . Os pulsos de entrada são então colocados em conjuntos de três bits, seguindo a lógica dos pulsos de entrada de um circuito somador e subtrator completo, como mostra a Tabela 2. Assim serão introduzidos no sistema oito conjuntos de três bits (0,0,0), (0,0,1), (0,1,0), (0,1,1), (1,0,0), (1,0,1), (1,1,0) e (1,1,1) representando os pulsos A, B e T_E , respectivamente. Com isso, os gráficos apresentarão oito curvas possíveis para cada saída, que serão mostradas de acordo com os conjuntos de pulsos de entrada do sistema.

A Figura 32 representa o esquemático da interligação dos Blocos Mach-Zehnder no *software* OptiSystem, em que cada bloco representa um subsystem do cascadeamento dos três MZI utilizados na seção anterior. Além disso, foi utilizado um amplificador óptico ideal de 3dB na saída BAR 1 do Bloco Mach-Zehnder 1, para amplificar os sinais de uma das entradas do Bloco Mach-Zehnder 2, a fim de intensificar o efeito não linear e a interferometria neste sistema.

Os parâmetros do systema proposto que utilizamos nas simulações para encontrarmos os circuitos combinacionadis somador e subtrator completo são

Figura 32: Esquemático dos Blocos Mach-Zehnder no Optisystem



mostrados na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros de simulação

Características	Valor
Quantidade de MZI	9
Sinais de entrada	3 (A,B e T_E)
Comprimento de onda	1550 nm
Largura temporal do pulso	10 ps
FWHM	2.4 ps
Modulação do pulso	OOK
Coef. acoplamento 1º acoplador	20:80
Coef. acoplamento 2º acoplador	50:50 (3dB)
Efeitos não lineares	SPM
Dispersão de 2ª e 3ª ordens	Não há
Potência de pico	5W
Coeficiente de não linearidade ($\tilde{n}_2$)	$5 \cdot 10^{-18} m^2 W^{-1}$ até $5 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$

Nesta dissertação, as saídas que serão analisadas e mostradas são a BAR 1 e a BAR 3 que obtiveram os resultados desejados. Os pulsos nestas saídas serão analisados a nível de potência média e, desta forma, farão que o sistema funcione

como um circuito somador e subtrator completo totalmente óptico.

Os gráficos que serão mostrados a seguir apresentam oito curvas possíveis nas saídas BAR 1 e BAR 3, de acordo com os conjuntos de pulsos de entrada do sistema, já mostrados na Tabela 2. Além disso, eles relacionam os pulsos de saída de acordo com a potência e a variação do coeficiente de não-linearidade($\bar{n}_2$), que varia de $5 \cdot 10^{-18} m^2 W^{-1}$ até $5 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$.

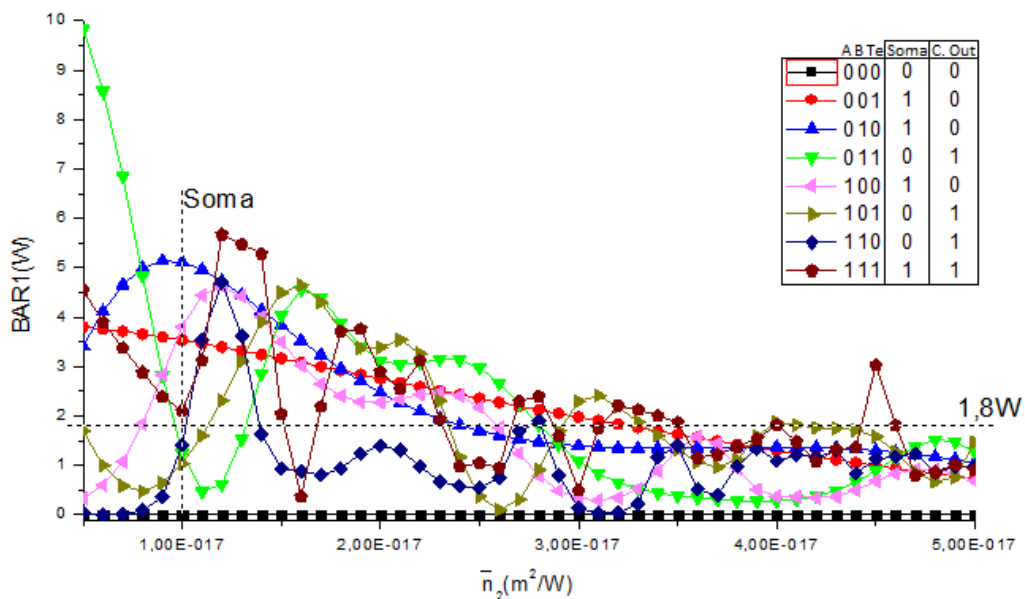
4.3 Circuito Combinacional Somador Completo

Nessa seção, mostraremos os resultados das simulações que utilizamos para encontrar o Circuito Somador Completo Totalmente Óptico. Para melhor compreensão das implementações realizadas com MZI são apresentados gráficos que relacionam o índice de refração não-linear ($\bar{n}_2$) com os níveis de potência do sinal de uma saída de acordo com cada entrada do sistema.

4.3.1 Saída Soma

O gráfico da Figura 33 demonstra que para o valor de $\bar{n}_2$ igual a $1 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$ foi encontrada na saída BAR 1 sinais com níveis de potências que se comportam como a saída Soma de um Circuito Somador Completo.

Figura 33: Gráfico da saída Soma



Como agora estamos selecionando um valor fixo de $\bar{n}_2$ para obtermos os resultados específicos em uma saída, podemos, então, determinar um valor de limiar de potência nessa saída que é de $1,8W$. Com isso, os pontos de cada curva que tiverem valores de potência acima da reta do limiar serão equivalentes ao nível lógico 1 e os pontos que estiverem abaixo receberão nível lógico 0. Desta forma, na saída Bar 1 encontramos a saída Soma de um Circuito Somador Completo.

Tabela 4: Quadro geral da relação de potências e níveis lógicos da saída Soma

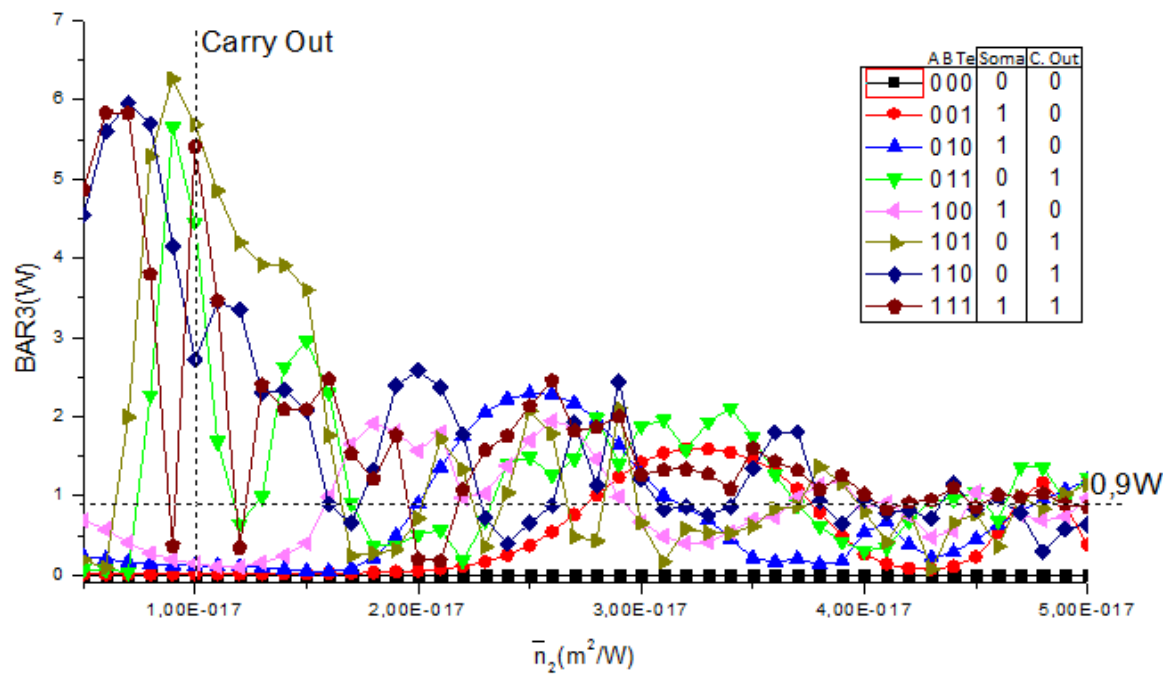
Potência $5W$			$\bar{n}_2 = 1 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$	
Tabela Verdade			Limiar de Potência = $1,8W$	
A	B	T_E	Soma	Potência (W)
0	0	0	0	0
0	0	1	1	3,53
0	1	0	1	5,11
0	1	1	0	1,24
1	0	0	1	3,79
1	0	1	0	1,03
1	1	0	0	1,41
1	1	1	1	2,10

Na Tabela 4 temos a relação dos níveis lógicos da saída Soma com suas respectivas potências para cada entrada do sistema, em que os sinais com potências acima do limiar de $1,8W$ receberão nível lógico 1 e aqueles abaixo receberão nível lógico 0.

4.3.2 Saída Carry Out

O gráfico da saída Carry Out, responsável por armazenar o bit mais significativo como resultado da soma de um circuito somador completo é mostrado na Figura 34. Logo, para o valor de $\bar{n}_2$ também igual a $1 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$, mas na saída Bar 3 do sistema, temos sinais com suas devidas potências que se comportam como a saída Carry Out.

Figura 34: Gráfico da saída Carry Out



O limiar de potência adotado para essa saída é de 0,9W. Sendo assim, os sinais de saída com níveis de potência acima do limiar recebem nível lógico 1 e os sinais abaixo, recebem nível lógico 0. Assim, temos uma saída que se comporta como a saída Carry Out de um Circuito Somador Completo.

Tabela 5: Quadro geral da relação de potências e níveis lógicos da saída Carry Out

Potência 5W			$\bar{n}_2 = 1 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$	
Tabela Verdade			Limiar de Potência = 0,9W	
A	B	T_E	Carry Out	Potência (W)
0	0	0	0	0
0	0	1	0	0,007
0	1	0	0	0,11
0	1	1	1	4,45
1	0	0	0	0,14
1	0	1	1	5,68
1	1	0	1	2,71
1	1	1	1	5,41

Na Tabela 5 temos a relação dos níveis lógicos da saída Carry Out com suas respectivas potências para cada entrada do sistema, em que os sinais com potências

acima do limiar de $0,9W$ receberão nível lógico 1 e aqueles abaixo receberão nível lógico 0.

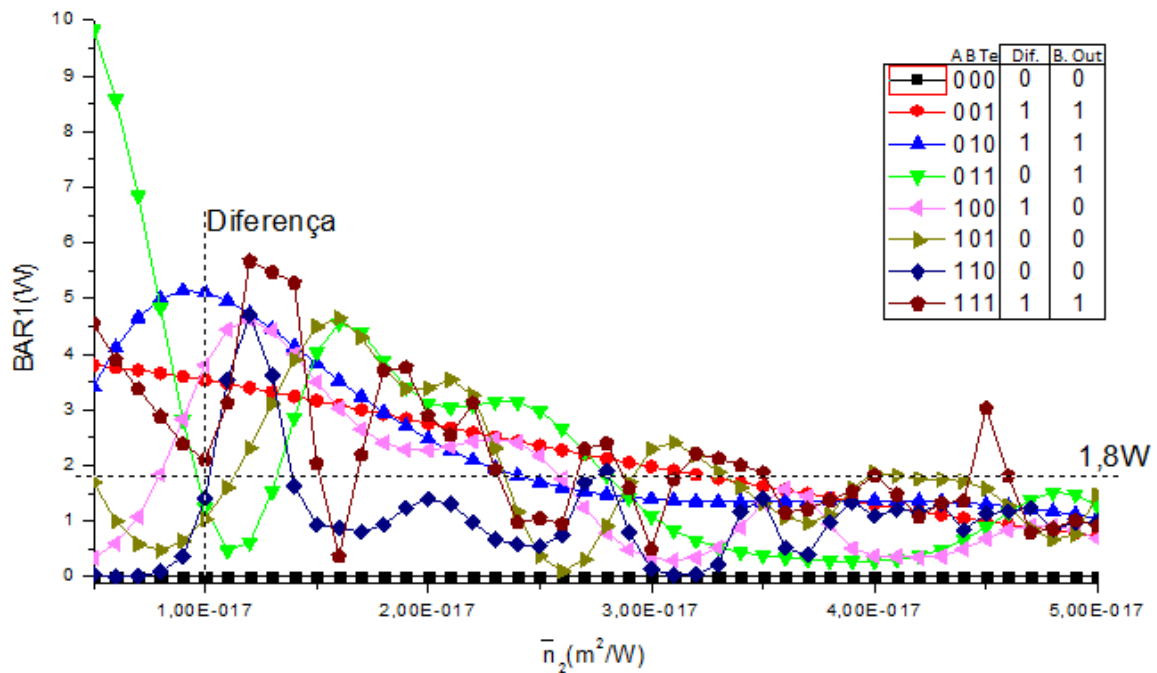
4.4 Circuito Combinacional Subtrator Completo

Os resultados das simulações que utilizamos para encontrar o Circuito Subtrator Completo Totalmente Óptico são mostrados nessa seção. Vale resaltar que obtivemos o circuito subtrator nas simulações utilizando a mesma estrutura do sistema usado para encontrar o circuito somador.

4.4.1 Saída Diferença

Como saída Soma e Diferença são iguais em seus resultados, podemos utilizar a mesma saída BAR 1 para o mesmo valor de $\bar{n}_2$ igual a $1 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$ para encontrarmos sinais com níveis de potências que se comportam como a saída Diferença de um Circuito Subtrator Completo, como mostra a Figura 35.

Figura 35: Gráfico da saída Diferença



Com a utilização do mesmo limiar de potência no valor de $1,8W$, podemos determinar que os pontos de cada curva que tiverem valores de potência acima da reta do limiar serão equivalentes ao nível lógico 1 e os pontos que estiverem abaixo

receberão nível lógico 0. Com isso, na saída Bar 1 encontramos a saída Diferença de um Circuito Subtrator Completo.

Tabela 6: Quadro geral da relação de potências e níveis lógicos da saída Diferença

Potência $5W$			$\bar{n}_2 = 1 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$	
Tabela Verdade			Limiar de Potência = $1,8W$	
A	B	T_E	Diferença	Potência (W)
0	0	0	0	0
0	0	1	1	3,53
0	1	0	1	5,11
0	1	1	0	1,24
1	0	0	1	3,79
1	0	1	0	1,03
1	1	0	0	1,41
1	1	1	1	2,10

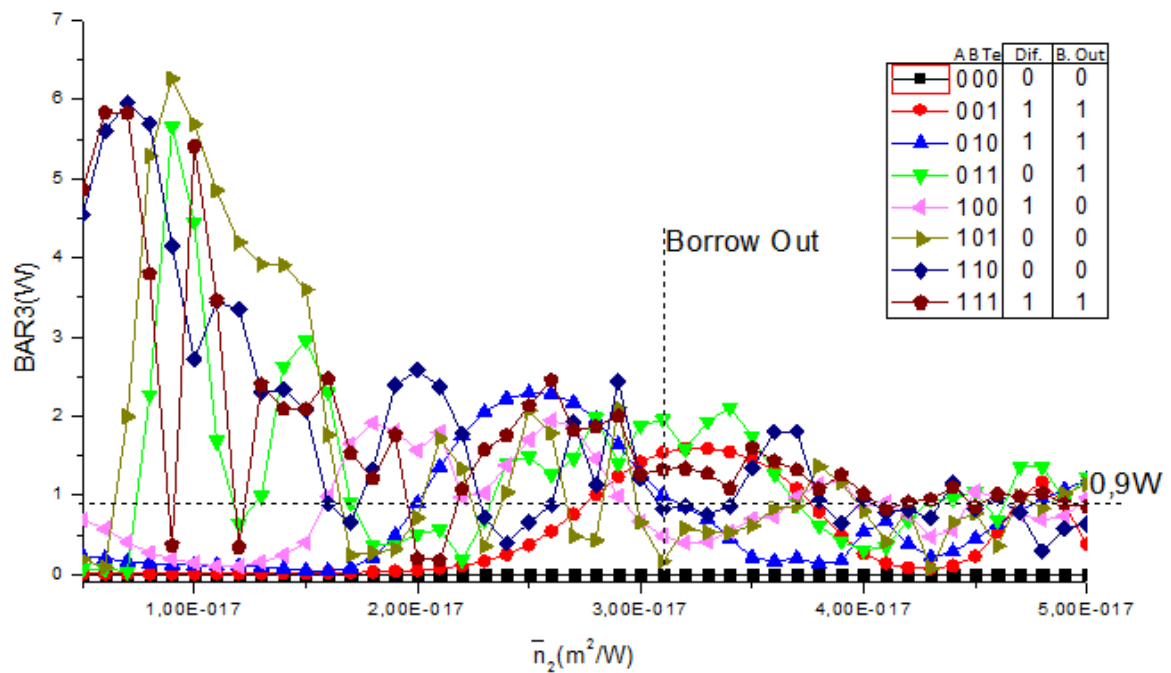
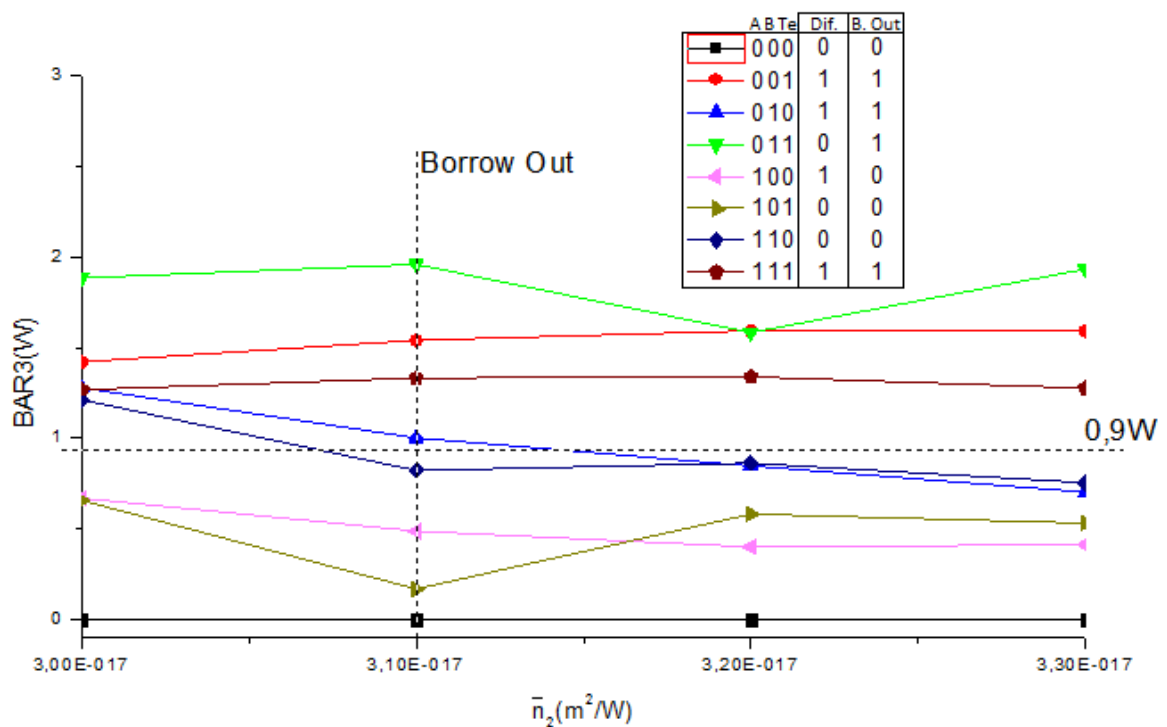
Na Tabela 6 temos a relação dos níveis lógicos da saída Diferença com suas respectivas potências para cada entrada do sistema.

4.4.2 Saída Borrow Out

O gráfico da saída Borrow Out, responsável por armazenar o bit mais significativo como resultado da subtração de um circuito subtrator completo é mostrado na Figura 36. Em que, para o valor de $\bar{n}_2$ também igual a $3,1 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$ na saída Bar 3 do sistema, temos sinais com suas devidas potências que se comportam como a saída Borrow Out.

Para o limiar de potência, adotamos o mesmo valor de potência da saída Carry Out que é $0,9W$. Sendo assim, os sinais de saída com níveis de potência acima do limiar recebem nível lógico 1 e os sinais abaixo, recebem nível lógico 0. Logo, temos uma saída que se comporta como a saída Borrow Out de um Circuito Subtrator Completo.

Como os níveis de potência dos sinais para $\bar{n}_2$ igual a $3,1 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$ estão bem mais próximos, um gráfico aproximado neste $\bar{n}_2$ será mostrado para uma melhor visualização e entendimento. A Figura 37 mostra a aproximação do gráfico no ponto $\bar{n}_2$ igual a $3,1 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$ da Figura 36.

Figura 36: Gráfico da saída Borrow Out**Figura 37:** Gráfico da saída Borrow Out aproximado no ponto $\bar{n}_2$ igual a $3,1 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$ 

Na Tabela 7 temos a relação dos níveis lógicos da saída Borrow Out com suas respectivas potências para cada entrada do sistema.

Tabela 7: Quadro geral da relação de potências e níveis lógicos da saída Diferença

Potência 5W			$\bar{n}_2 = 3,1 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$	
Tabela Verdade			Limiar de Potência = 0,9W	
A	B	T_E	Borrow Out	Potência (W)
0	0	0	0	0
0	0	1	1	1,53
0	1	0	1	1,00
0	1	1	1	1,95
1	0	0	0	0,49
1	0	1	0	0,16
1	1	0	0	0,82
1	1	1	1	1,33

4.5 Discussão dos resultados

Nesta dissertação são realizadas simulações para geração dos circuitos combinacionais somador e subtrator completos a partir de portas lógicas totalmente ópticas. Para isso, utilizamos o interferômetro Mach-Zehnder, os quais possuem diferentes coeficientes de acoplamento entre os acopladores que os compunham, sendo que no primeiro acoplador o coeficiente era de 20:80, enquanto no segundo, era de 50:50 ou 3dB. Além disso, variamos o coeficiente de índice não linear de um dos braços da fibra do interferômetro.

Os resultados foram analisados, primeiramente, utilizando uma estrutura com 3 (três) interferômetros Mach-Zehnder conectados de forma cascadeada para obtenção das portas lógicas fundamentais (XOR, OR e AND) para a geração do circuito combinacional. Feito isso, uma nova estrutura utilizando 9 (nove) interferômetros e apresentando oito saídas foi simulada para que se alcançasse os resultados desejados. Estes resultados foram obtidos utilizando pulsos retangulares para potência de pico de 5W na entrada do sistema.

Após realizadas as simulações, observamos que para a primeira estrutura com 3 (três) interferômetros Mach-Zehnder e 3 (três) entradas A, B e Controle (C), foram encontradas nas saídas BAR 1 e BAR 2 intervalos em que os sinais se comportam como saídas das portas lógicas XOR, OR e AND. Esta estrutura, então, foi reunida

em um subsystema chamado de Bloco Mach-Zehnder. Logo após, utilizando-se 3 (três) Blocos Mach-Zehnder conectados entre si, simulações foram feitas para as entradas A, B e T_E e foi encontrado na saída BAR 1 sinais que se comportam como as saídas Soma e Diferença dos circuitos somador e subtrator completos, respectivamente. Sendo ambas encontradas para o coeficiente de não-linearidade ($\bar{n}_2$) igual a $1 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$. Já a saída BAR 3 se comporta como saídas Carry Out e Borrow Out de um circuito somador e subtrator completos, respectivamente. Sendo que a saída Carry Out foi encontrada para $\bar{n}_2$ igual a $1 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$ e a saída Borrow Out para $\bar{n}_2$ igual a $3,1 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$.

Tabela 8: Tabela representativa dos níveis lógicos do circuito somador completo com suas respectivas potências nas saídas Soma e Carry Out

Entradas			Saída BAR 1		Saída BAR 3	
Potência 5W			$\bar{n}_2 = 1 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$		$\bar{n}_2 = 1 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$	
Tabela Verdade			Limiar de potência = 1,8W		Limiar de potência = 0,9W	
A	B	T_E	Soma	Potência	Carry Out	Potência
0	0	0	0	0W	0	0W
0	0	1	1	3,53W	0	0,007W
0	1	0	1	5,11W	0	0,11W
0	1	1	0	1,24W	1	4,45W
1	0	0	1	3,79W	0	0,14W
1	0	1	0	1,03W	1	5,68W
1	1	0	0	1,41W	1	2,71W
1	1	1	1	2,10W	1	5,41W

A Tabela 8 e 9 mostram as entradas e saídas do circuito somador e subtrator completos totalmente óptico, respectivamente, projetados nesse trabalho. A fim de apresentar que os resultados obtidos em cada saída do sistema como demonstrado, apresentam níveis de potência equivalente para cada nível lógico das saídas que representam os circuitos combinacionais somador e subtrator completo.

Além disso, com o intuito de analisarmos o desempenho do circuito, temos que os intervalos de valores das potências entre os sinais e o limiar são bastante considerável. Facilitando na recepção, já que o receptor identificará da melhor maneira os sinais que receberão nível lógico 0 ou 1, fazendo com que os erros na tomada de decisão sejam minimizados.

Tabela 9: Tabela representativa dos níveis lógicos do circuito subtrator completo com suas respectivas potências nas saídas Diferença e Borrow Out

Entradas			Saída BAR 1		Saída BAR 3	
Potência 5W			$\bar{n}_2 = 1 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$		$\bar{n}_2 = 3,1 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$	
Tabela Verdade			Limiar de potência = 1,8W		Limiar de potência = 0,9W	
A	B	T_E	Diferença	Potência	Borrow Out	Potência
0	0	0	0	0W	0	0W
0	0	1	1	3,53W	1	1,53W
0	1	0	1	5,11W	1	1,00W
0	1	1	0	1,24W	1	1,95W
1	0	0	1	3,79W	0	0,49W
1	0	1	0	1,03W	0	0,16W
1	1	0	0	1,41W	0	0,82W
1	1	1	1	2,10W	1	1,33W

Também, fazendo um comparativo entre o sistema e os resultados obtidos nesse trabalho com aqueles apresentados no capítulo 3, temos uma estrutura de circuito bem mais simples de ser implementada. Sendo a composição do Interferômetro Mach-Zehnder menos complexo e de melhor entendimento. Além disso, os resultados apresentados neste trabalho tanto para o circuito somador completo como para o subtrator completo foram obtidos de uma única estrutura utilizada nas simulações.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, são apresentadas as conclusões acerca dos resultados obtidos nas simulações e sua aplicação. Por fim, são citadas algumas sugestões de trabalhos futuros que podem ser utilizadas para dar continuidade a este trabalho.

5.1 Conclusão

Realizando pesquisa na literatura sobre trabalhos que apresentam estudos de circuitos combinacionais somador e subtrator completo óptico, principalmente os que utilizam interferômetros na organização, percebemos que grande parte desenvolvem configurações relativamente complexas para a obtenção de circuitos combinacionais. Com isso, uma contribuição deste trabalho é a obtenção de circuitos combinacionais ópticos através do desenvolvimento de um dispositivo simples de fácil entendimento e implementação, utilizando MZI, pulsos retangulares e modulação por chaveamento on-off (OOK).

Primeiramente um circuito foi montado no OptiSystem com três MZI cascadeados para obtenção das portas lógicas (XOR, OR e AND) que compõem um circuito somador completo. Em seguida, essa estrutura foi reunida em um único subsystema chamado de Bloco Mach-Zehnder e conectada a mais dois outros blocos idênticos, e após as simulações foi encontrado que para o circuito do dispositivo criado no OptiSystem apresentasse saídas com sinais que se comportassem como circuito somador e subtrator completo óptico. Dessa forma, foram encontradas as saídas Soma, Carry Out, Diferença e Borrow Out presente nesses circuitos combinacionais.

Com os avanços na área das comunicações ópticas, temos que a eliminação de conversões eletro-óptica em sistemas de comutação óptica é linha de pesquisa de diversos estudos. Logo, com os resultados obtidos nas simulações, este trabalho se propõe a contribuir com as pesquisas na área da comutação óptica em sistemas de

telecomunicações.

Somador completo, bem como subtrator completo, são componentes essenciais de qualquer unidade lógica aritmética. A crescente demanda de computação de alta velocidade, bem como o processamento de dados, força as modernas tendências de pesquisa a usar óptica em operações aritméticas e lógicas. Como exemplo de aplicação, há a necessidade de circuitos comutadores totalmente óptico que tomem decisões a respeito de contensão e roteamento de pacotes em redes ópticas, com o objetivo de proporcionar maiores taxas de transmissão, confiabilidade e qualidade dos sistemas.

5.2 Trabalhos futuros

A partir do desenvolvimento deste trabalho, muitas outras possibilidades de estudo foram identificadas. Com isso, como continuidade a este trabalho, sugerimos:

- analisar o sistema para variação na forma dos pulsos de entrada;
- variar o tipo de pulso presente nos controles das estruturas cascadeada;
- aplicar não linearidades diferentes para os braços (bar e cross) do MZI;
- utilizar outros valores para os coeficientes de acoplamento dos acopladores do MZI;
- utilização de outros interferômetros;
- Utilização do amplificador óptico semiconductor (Semiconductor Optical Amplifier - SOA) na estrutura proposta do MZI;
- encontrar estruturas mais complexas como latches e flip-flops.

Referências Bibliográficas

AGRAWAL, G. **Nonlinear Fiber Optics**. [S.l.]: Elsevier Science, 2001. ISBN 9780080479743.

AGRAWAL, Golvind P. **Lightwave technology: components and devices**. [S.l.]: John Wiley Sons, 2004. ISBN 0471215732.

AGRAWAL, Golvind P. **Lightwave technology : telecommunication systems**. [S.l.]: Willey, 2005. ISBN 139780471215721.

AGRAWAL, Golvind P. **Applications of nonlinear fiber optics**. [S.l.]: Academic Press, 2008. ISBN 9780080568768.

AGRAWAL, Golvind P. **Sistemas de comunicação por fibra ópticas**. [S.l.]: Elsevier, 2014. ISBN 9788535264258.

ALMEIDA, E. M.; NEPOMUCENO, R. M.; GUIMARÃES, G. de Freitas. Análise do uso de amplificadores Ópticos em sistemas wdm através da ferramenta de simulação optisystem. **InfoBrasil**, 2014.

AMAZONAS, José Roberto de Almeida. **Projeto de sistemas de comunicações ópticas**. [S.l.]: Manole, 2005. ISBN 8520420702.

BRANDÃO, João Célio Barros; ALCAIM, Abraham; NETO, Raimundo Sampaio. **Princípios de comunicações**. [S.l.]: Interciência, 2014. ISBN 9788571933293.

CASAGRANDE, J. H. B. **Eletrônica Digital 1 – Funções e Portas Lógicas**. <http://www.sj.ifsc.edu.br/~mdoniak/EletronicaDigital1/CAPITULO2%20-%20FUNCOES%20E%20PORTAS%20LOGICAS.pdf> . Accessed: 2018-06-15.

FERREIRA A.C; COELHO, A.G; SOUSA J.R.R; SOBRINHO C.S; MAGALHÃES F.T.C.B; GUIMARÃES G.F; SALES J.C; MENEZES J.W.M; SOMBRA A.S.B. Pam–ask optical logic gates in an optical fiber sagnac interferometer. **Optics Laser Technology**, Elsevier, v. 77, p. 116–125, 2016.

HARBOE P. B.; SOUZA, J. R.; GODOY D. S. Impacto da dispersão, automodulação de fase, modulação de fase cruzada e descasamento de velocidade de grupo na propagação de trens de pulsos em fibra óptica monomodo. *Engvista*, v. 11, p. 67–77, 2009.

KEISER, G. **Comunicações por fibras ópticas**. 4. ed. ed. [S.l.]: Bookman, 2014. ISBN 9788580553970.

- KUMAR, Ajay; KUMAR, Santosh; RAGHUWANSHI, Sanjeev Kumar. Implementation of full-adder and full-subtractor based on electro-optic effect in mach–zehnder interferometers. **Elsevier-Optics Communications**, v. 324, p. 93–107, 2014.
- KUROSE JAMES F.; ROSS, Keith W. **Redes de Computadores ea Internet: uma abordagem top-down**. 5. ed. ed. [S.l.]: Pearson, 2010. ISBN 9788588639973.
- MENEZES, J. W. M. **Implementação de portas lógicas ópticas com acoplador direcional não linear triplo planar simétrico de fibras ópticas**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, FORTALEZA, 2006.
- NETO, M. B. ALMEIDA. **GERAÇÃO DE CIRCUITO SOMADOR COMPLETO TOTALMENTE ÓPTICO UTILIZANDO INTERFERÔMETRO MACH-ZEHNDER**. Dissertação (Mestrado) — Instituto Federal do Ceará, FORTALEZA, 2017.
- RIBEIRO, J.A.J. **Comunicações Ópticas**. Érica, 2003. ISBN 9788571949652. Disponível em: <"<https://books.google.com.br/books?id=vSexAAAACAAJ>">.
- ROY, J. N. Mach-zehnder interferometer based three architecture for all optical logic and arithmetic operations. Elsevier, 2007.
- SALES, J. C. **ESTUDO DOS INTERFERÔMETROS DE MACH- ZEHNDER E DE SAGNAC DE FIBRAS ÓPTICAS TRADICIONAIS E DE CRISTAL FOTÔNICO NA GERAÇÃO DE PORTAS LÓGICAS ÓPTICAS**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, FORTALEZA, 2017.
- SALES J. C.; FILHO, A. F. G. F.; FERREIRA A. C. ; SOUSA J. R. R.; AVILA K. M. V.; CAVALCANTE D. N. S. Mach-zehnder nonlinear interferometer in photonic crystal fibers with nonlinearity profiles. *Journal of Nonlinear Optical Physics and Materials*, v. 24, p. 1550036, 2015.
- SCAFFARDI, M; GHELFI, P.; LAZZERI, E.; POTI, L.; BOGONI, A. Photonic processing for digital comparison and full addition based on semiconductor optical amplifiers. **IEEE Journal of Quantum Electronics**, v. 14, n. 3, 2008.
- SRIBHASHYAM, S.; RAMACHANDRAN, M.; PRINCE, S.; REKHA, B. RAVI. Design of full adder and subtractor based on mzi-soa. **IEEE**, 2015.
- THERESAL, T.; SATHISH, K.; ASWINKUMAR, R. A new design of optical reversible adder and subtractor using mzi. **International Journal of Scientific and Research Publications**, v. 5, 2015.
- TOCCI R.J.; WIDMER, N.S.; MOSS G.L.; MARTINS C.S.A. **Sistemas digitais: princípios e aplicações**. [S.l.]: Prentice Hall Brasil, 2007. ISBN 9788576050957.
- VERMA, Deepika; RAMACHANDRAN, Manohari; PRINCE, Shanthi. Performance analysis for different data-rates of proposed all-optical half-adder and full-adder design. **International Conference on Communication and Signal Processing**, 2016.
- ZHANG MIN; ZHAO, Yongpeng; WANG Ling; WANG Jian; YE Peida. Design and analysis of all-optical xor gate using soa-based mach–zehnder interferometer. **Optics Communications**, Elsevier, v. 223, p. 301–308, 2003.