



**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**

MAURÍCIO BARROS DE ALMEIDA NETO

**GERAÇÃO DE CIRCUITO SOMADOR COMPLETO TOTALMENTE
ÓPTICO UTILIZANDO INTERFERÔMETRO MACH-ZEHNDER**

FORTALEZA

2017

MAURÍCIO BARROS DE ALMEIDA NETO

GERAÇÃO DE CIRCUITO SOMADOR COMPLETO
TOTALMENTE ÓPTICO UTILIZANDO
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

Orientador: José Wally Mendonça
Menezes

Fortaleza
2017

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)

- A447g Almeida Neto, Maurício Barros de.
Geração de circuito somador completo totalmente óptico utilizando interferômetro Mach-Zehnder /
Maurício Barros de Almeida Neto. - 2017.
54 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Engenharia de Telecomunicações,
Campus Fortaleza, 2017.
Orientação: Prof. Dr. José Wally Mendonça Menezes.
1. Fibra Óptica. 2. Fibra Óptica - Acopladores. 3. Interferômetro Mach-Zehnder. I. Título.
CDD 621.382
-



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

Maurício Barros de Almeida Neto

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:

Orientador: Prof. Dr. José Wally Mendonça Menezes
Universidade Federal do Ceará – UFC

Prof. Dr. Glendo de Freitas Guimarães
Instituto Federal do Ceará – IFCE

Prof. Dr. Francisco José Alves de Aquino
Instituto Federal do Ceará – IFCE

Prof. Dr. Tarique da Silveira Cavalcante
Instituto Federal do Ceará – IFCE

Fortaleza, 6 de novembro de 2017

Dedico este trabalho a minha família,
eles que são e sempre serão o meu pilar me dando forças pra vencer as adversidades.

Agradecimentos

Agradeço a meus pais e minha irmã, eles que me apoiaram e me deram forças.

Agradeço a meu orientador José Wally Mendonça Menezes pelos ensinamentos e pela confiança.

Agradeço meus amigos José Alexandre Castro, Jorge Fredericson, Renan Soeiro, Fillipe Diego, Katielle Dantas, Hugo Lira, amigos de longa data que estiveram presentes nesse período.

Agradeço ao PPGET e a FUNCAP que possibilitaram a realização desse trabalho.

“Descobrir consiste em olhar para o que todo mundo está vendo e pensar uma coisa diferente”.

Roger Von Oech

Resumo

Dispositivos de interferometria estão ganhando maior destaque no processamento óptico de alta velocidade nos últimos anos. Interferômetro Mach-Zehnder(MZI) está sendo utilizado em diversas aplicações de processamento de sinais totalmente ópticos. Dentro desse contexto, esse trabalho possui o objetivo de simular um circuito somador completo totalmente óptico utilizando três interferômetros Mach-Zehnder cascadeados e auto-modulação de fase(SPM) como efeito não-linear para gerar interferometria. Cada MZI possui dois acopladores, sendo usado um coeficiente de acoplamento de 20:80 no primeiro acoplador e 50:50 ou 3dB no segundo. Nas entradas são usados geradores de bits conectados a geradores de pulsos retangulares com potência de pico de 3W. Dessa forma, simulando o sistema com as três entradas A, B e Controle(C), temos respectivamente na entrada do sistema os trios de 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). Os resultados são obtidos e analisados através de gráficos que mostram a potência média, sendo então possível encontrar as saídas Carry Out e Soma e dessa maneira realizar o circuito somador completo. O sistema proposto é capaz de calcular uma operação aritmética de maneira totalmente óptica. As operações aritméticas são importantes por serem utilizadas nas tomadas de decisão em encaminhamento de pacotes em redes de computadores.

Palavras-chave: Interferômetro Mach-Zehnde, Circuito Somador Completo Totalmente Óptico.

Abstract

Interferometric devices have been of great interest for high speed optical processing in recent years. Mach-Zehnder Interferometer(MZI) is been used in several fully optical signal processing applications. In this context, this work presents the simulation of a all-optical full adder circuit using three cascaded Mach-Zehnder interferometers and self-phase modulation(SPM) as nonlinear effect to perform interferometry. Each MZI is formed by two couplers, the first with coupling coefficient 20:80 and the second 50:50 or 3dB. At the inputs, bit generators connected to rectangular pulse generators with a peak power of 3W are used. This way, simulating the system with the three inputs A, B and Control (C), we have at the input of the system the trios of bits (0,0,0), (0,0,1), (0,1, 0), (0,1,1), (1,0,0), (1,0,1), (1,1,0) and (1,1,1). The results are obtained and analyzed through graphs at the medium power level, where it is possible to find the Carry Out and Soma outputs and, thus, to perform the full adder circuit. The proposed system is capable of calculate a arithmetic operation in a fully optical way. Arithmetic operations are important for been used in decision making for packets routing in computer networks.

Keywords: Mach-Zehnder Interferometer, All-Optical Full Adder Circuit.

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Símbolos

Lista de Abreviações

1	Introdução	15
1.1	Objetivos	16
1.1.1	Objetivo Geral	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
1.2	Organização da dissertação	16
2	Componentes Ópticos	17
2.1	Fibra Óptica	17
2.2	Não-linearidade na fibra óptica	19
2.2.1	Automodulação de fase (SPM)	19
2.2.2	Modulação de fase cruzada (XPM)	20
2.2.3	Modulação de ganho cruzada (XGM)	20
2.2.4	Mistura de quatro ondas (FWM)	20
2.3	Acopladores	21
2.3.1	Acoplador simétrico	23
2.3.2	Acoplador Assimétrico	23

2.4	Interferômetro Mach-Zehnder	24
2.5	Equação não linear generalizada de Schrödinger	24
3	Revisão Bibliográfica	27
3.1	Circuito Somador Completo	27
3.2	Portas Lógicas Ópticas	28
3.3	Trabalhos Relacionados	28
4	Metodologia e Resultados	36
4.1	Software Optisystem	36
4.2	Estrutura de simulação	38
4.3	Saída Carry Out	43
4.4	Saída Soma	44
4.5	Discussão de resultados	47
5	Conclusão e Trabalhos Futuros	49
5.1	Conclusão	49
5.2	Trabalhos futuros	50
	Referências Bibliográficas	51
	Apêndice A -- Interferômetro Mach-Zehnder no OptiSystem	53
	Apêndice B -- Resumo de portas lógicas	54

Lista de Figuras

1	Princípio de transmissão através do núcleo de uma fibra óptica	18
2	a) Fibra multimodo índice degrau. b) Fibra multimodo índice gradual. c) Fibra monomodo	18
3	Mistura de quatro ondas	21
4	Esquemático de um acoplador não-linear	22
5	a)Acoplador de fibra não-linear. b)Seção transversal do acoplador . . .	23
6	Acoplador simétrico	23
7	Acoplador assimétrico	24
8	Esquemático de um interferômetro Mach-Zehnder	25
9	Tabela verdade circuito somador completo	27
10	(a) Mach-Zehnder baseado em SOA, (b) Diagrama esquemático de Mach-Zehnder baseado em SOA.	29
11	Estrutura utilizada para montar um somador completo totalmente óptico	29
12	Tabela verdade dos circuitos somador completo e subtrator completo .	30
13	Circuito somador completo	30
14	Diagrama esquemático de um interferômetro Mach-Zehnder totalmente óptico QD-SOA	31
15	Configuração proposta do circuito somador totalmente óptico usando cinco simétricos QD-SOAs baseados em interferômetros MZI	32
16	Esquemático de um somador completo formado por duas portas XOR e quatro portas NOR	33
17	Princípio de operação da porta XOR totalmente óptica.	34

18	Combinação de todos os sinais para obter as saídas totalmente ópticas SUM e CARRY	34
19	Configuração do somador completo totalmente óptico baseado em guias de onda PPLN cascadeados	35
20	Interface gráfica do usuário	37
21	Estrutura de cascadeamento de MZI	38
22	Interferômetro Mach-Zehnder utilizado na simulação	39
23	Estrutura de simulação montada no OptiSystem	40
24	Representação dos bits "0" e "1" na entrada do sistema.	40
25	Variação do índice de não-linearidade no MZI	41
26	Gráfico da saída Carry Out	43
27	Gráfico da saída Carry Out aproximado no ponto $\overline{n_2} 1,8 \cdot 10^{-17}$	44
28	Gráfico da saída Soma	45
29	Gráfico da saída Soma aproximado no ponto $\overline{n_2} 1,8 \cdot 10^{-17}$	46
30	Visão interna do Interferômetro Mach-Zehnder no OptiSystem	53
31	Portas lógicas	54

Lista de Tabelas

1	Resumo das técnicas utilizadas pelos trabalhos relacionados	35
2	Parâmetros de simulação	42
3	Pulsos de entrada da simulação	42
4	Relação de potências e níveis lógicos na saída Carry Out no ponto $\overline{n_2}$ $1,8 \cdot 10^{-17}$	44
5	Relação de potências e níveis lógicos na saída Soma no ponto $\overline{n_2}$ $1,8 \cdot 10^{-17}$	46
6	Tabela representativa dos níveis lógicos do circuito somador completo simulado no trabalho com suas respectivas potências nas saídas Soma e Carry Out no ponto $\overline{n_2}$ $1,8 \cdot 10^{-17}$	47

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
β_n	coeficiente de dispersão de ordem n
α	atenuação
γ	parâmetro não-linear
K	coeficiente de acoplamento
$\overline{n_2}$	coeficiente de índice não-linear
A_{eff}	área efetiva

Lista de Abreviações

ASK	Modulação em amplitude por chaveamento
ENLGS	Equação não-linear generalizada de Schrödinger
FWM	Mistura de quatro ondas
MZI	Interferômetro Mach-Zehnder
OTA	Arquitetura óptica em árvore
PPGET	Programa de Pós Graduação em Engenharia de Telecomunicações
SOA	Amplificador óptico de semicondutor
SPM	Auto modulação de fase
XGM	Modulação de ganho cruzado
XPM	Modulação de fase cruzada
WSC	Acoplador seletivo por comprimento de onda
WDM	Multiplexação por divisão de comprimento de onda
PPLN	Periodically Poled Lithium Niobate (Niobato de lítio periódico) ¹

¹O niobato de lítio periódico(PPLN) é um meio altamente eficiente para processos de conversão de comprimento de onda não-linear. PPLN é usado para duplicação de frequência, geração de frequência de diferença, frequência de soma, geração de oscilação paramétrica óptica e outros processos não-lineares.

INTRODUÇÃO

Está em ascensão a necessidade de encontrar redes de comunicações ópticas mais rápidas que satisfaçam a crescente demanda por taxas de dados maiores. Para acomodar essa demanda, uma nova geração de redes de comunicações ópticas está se movendo em direção a taxas de dados de *Terabits por segundo*. Essas taxas de dados podem ser alcançadas eliminando a conversão dos sinais ópticos para sinais elétricos e assim serem trabalhados apenas no domínio óptico. (NADY; HUSSEIN; ANMAR, 2013)

O crescimento da demanda por largura de banda em função do aumento do tráfego do protocolo IP (Internet Protocol) tem motivado o desenvolvimento de arquiteturas de redes ópticas que suportem este tráfego de forma eficiente (KANEDA, 2005). Uma das razões para o crescente interesse em dispositivos totalmente ópticos tem sido o fato de que eles são capazes de operar a taxas de transmissão muito maiores que aquelas praticadas pelos atuais dispositivos eletrônicos. Com a crescente demanda por serviços de telecomunicações, tais taxas são necessárias para as comunicações a altas velocidades (SMITH, 1984).

Para ser possível atingir maiores taxas de dados com sucesso, redes ópticas avançadas necessitam processamento de sinais totalmente ópticos ultrarápidos como conversão de comprimento de onda, processamento aritmético, funções add-drop, etc (STUBKJAER, 2000).

Os circuitos combinacionais totalmente ópticos são necessários para o gerenciamento das contenções e o controle do roteamento em um nó de uma rede comutada de embalagem óptica. O cálculo da adição de números binários é uma funcionalidade importante para executar o processamento de cabeçalho de pacotes (SCAFFARDI *et al.*, 2008).

Dessa forma, o estudo de circuitos totalmente ópticos baseados em portas lógicas ópticas é de suma importância, por apresentar características relevantes para o

gerenciamento e controle de redes de comunicações ópticas que venham a trabalhar de forma integral com sinais ópticos, não necessitando a conversão eletro-ótica, aumentando a velocidade das taxas de dados existentes.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Obter de um circuito somador completo totalmente óptico através de cascadeamento de interferômetros Mach-Zehnder(MZI).

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Montar um circuito totalmente óptico com cascadeamento de interferômetros Mach-Zehnder no *software* OptiSystem 13.
- b) Analisar o coeficiente de acoplamento dos interferômetros MZI.
- c) Simular o circuito com os diferentes coeficientes de não-linearidade($\overline{n_2}$).
- d) Verificar as saídas a nível de potência do circuito de maneira a encontrar um circuito somador completo totalmente óptico.

1.2 Organização da dissertação

Capítulo 2: Discorre sobre o formalismo teórico sobre dispositivos ópticos necessários para a montagem da estrutura de simulação utilizada nesse trabalho.

Capítulo 3: Aborda o funcionamento de um circuito somador completo. Traz uma revisão bibliográfica dos trabalhos relacionados ao tema executados por outros autores, utilizados como referencial teórico.

Capítulo 4: Demonstra a estrutura utilizada para obtenção do circuito somador completo totalmente óptico, mostra como se desenvolve a simulação e os parâmetros utilizados. Nesse capítulo há também a discussão dos resultados obtidos.

Capítulo 5: Mostra as conclusões gerais e perspectivas e sugestões para trabalhos futuros.

COMPONENTES ÓPTICOS

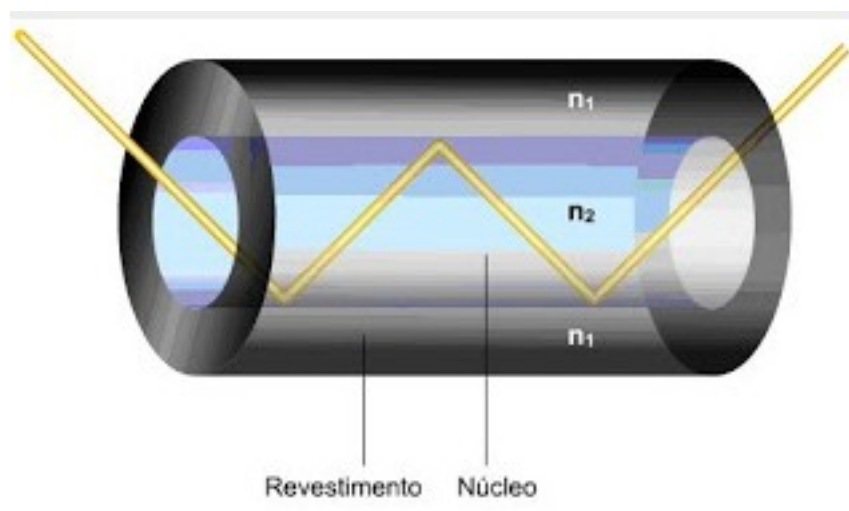
2.1 Fibra Óptica

A fibra óptica corresponde ao meio onde a potência luminosa, injetada pelo emissor de luz, é guiada e transmitida até o fotodetector. Formada por um núcleo de material dielétrico(em geral, vidro), e por uma casca de material dielétrico(vidro ou plástico), com índice de refração ligeiramente inferior ao do núcleo, a fibra óptica propaga luz por reflexões sucessivas. Esta estrutura da fibra óptica, na prática, é envolta por encapsulamentos plásticos de proteção mecânica e ambiental, formando um cabo óptico que pode conter, uma ou mais fibras (PINHEIRO, 2002).

O princípio de funcionamento da fibra óptica está exatamente na diferença de índice de refração entre a casca e núcleo. Com o índice de refração do núcleo(n_1) maior que o da casca(n_2), cria-se uma estrutura capaz de confinar e guiar a onda eletromagnética através de um processo de múltiplas reflexões sucessivas na fronteira entre esses meios, como mostra a Figura 1. O feixe luminoso fica confinado no núcleo, com uma direção de propagação paralela ao eixo longitudinal do sistema.

As fibras ópticas são divididas em dois tipos: monomodo e multimodo. As fibras multimodo possuem um diâmetro do núcleo bem maior comparado com o comprimento de onda da luz guiada e vários modos se propagam no seu interior. Os modos de propagação são soluções espaço-temporais das equações de *Maxwell* para cada fibra, caracterizando configurações de campos elétricos e magnéticos que se repetem ao longo do cabo. Na prática, representam as diferentes possibilidades de propagação da luz pela fibra.

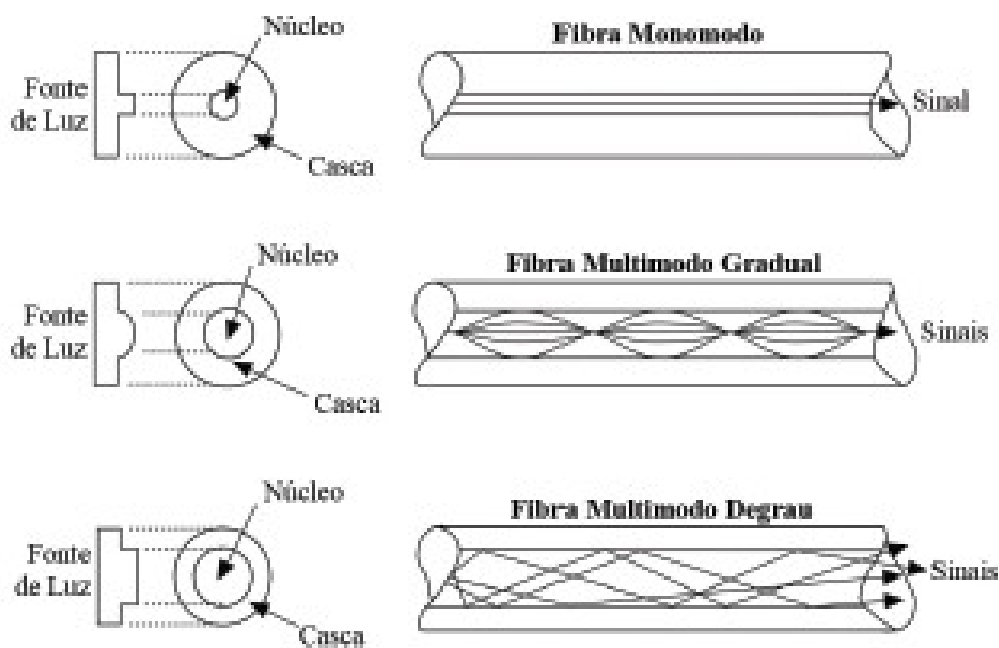
As fibras multimodo podem ser divididas de acordo com a variação do índice de refração entre o núcleo e a casca. Ela pode ser multimodo índice degrau, quando entre o núcleo e a casca existir uma mudança abrupta do índice de refração, ou índice gradual, quando o índice de refração vai se alterando gradualmente entre o núcleo e

Figura 1: Princípio de transmissão através do núcleo de uma fibra óptica

Fonte:(CADMO, 2008)

a casca.

A fibra monomodo possui um diâmetro do núcleo bem menor em relação a fibra multimodo, permitindo a propagação de apenas um modo em seu interior. Ela possui geralmente um diâmetro de $9\mu\text{m}$, enquanto as fibras multimodo possuem um diâmetro de $62,5\mu\text{m}$ (RIBEIRO, 2003). A Figura 2 mostra um esquemático entre essas fibras.

Figura 2: a) Fibra multimodo índice degrau. b) Fibra multimodo índice gradual. c) Fibra monomodo

Fonte: (AMARAL; AMARAL; JANISSEK, 2014)

2.2 Não-linearidade na fibra óptica

No decorrer da transmissão de um sinal de luz através da fibra há a possibilidade de interações entre a luz e o meio através da absorção do sinal e dispersões, mas não há somente essas interações, outros fenômenos ocorrem em uma propagação óptica, uma delas é chamada de efeito não-linear. 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 (em condições normais não possui características não-lineares), 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, 2012).

Como exemplos de efeitos não-lineares temos a auto modulação de fase (SPM), a modulação de fase cruzada (XPM), modulação de ganho cruzada (XGM) e mistura de quatro ondas (FWM).

2.2.1 Automodulação de fase (SPM)

Os efeitos não-lineares SPM, XPM e FWM têm origem na refração não-linear (efeito Kerr), um fenômeno que se caracteriza pela dependência entre o índice de refração e a intensidade óptica. SPM é responsável pela modulação da fase do próprio pulso, o que provoca um desvio da frequência instantânea em relação à frequência central. Este efeito é comumente chamado de chirp de frequência (HARBOE; SOUZA; GODOY, 2009).

A automodulação de fase se refere a mudança de fase autoinduzida experimentada por um campo eletromagnético durante sua propagação em fibras ópticas. Sua magnitude pode ser obtida ao se observar que a fase do campo eletromagnético muda por

$$\varphi = \tilde{n}k_0L = (n + n_2|E|^2)k_0L \quad (2.1)$$

onde $k_0 = 2\pi/\lambda$ e L é o comprimento da fibra. A dependência da intensidade de mudança de fase não-linear $\varphi_{NL} = n_2k_0L|E|^2$ se refere ao efeito SPM, que dentre outras coisas, é responsável por alargamento espectral de pulsos ultracurtos e formação de

sólitons ópticos (AGRAWAL, 2001).

2.2.2 Modulação de fase cruzada (XPM)

No caso da modulação de fase cruzada temos a interferência de um sinal em outro devido ao campo eletromagnético. O valor do campo eletromagnético de um comprimento de onda pode alterar o índice de refração do meio, alterando a velocidade de propagação de outro sinal. Esse fenômeno ocorre quando dois ou mais sinais ópticos são transmitidos simultaneamente no interior de uma fibra óptica usando a técnica WDM (AGRAWAL, 2012).

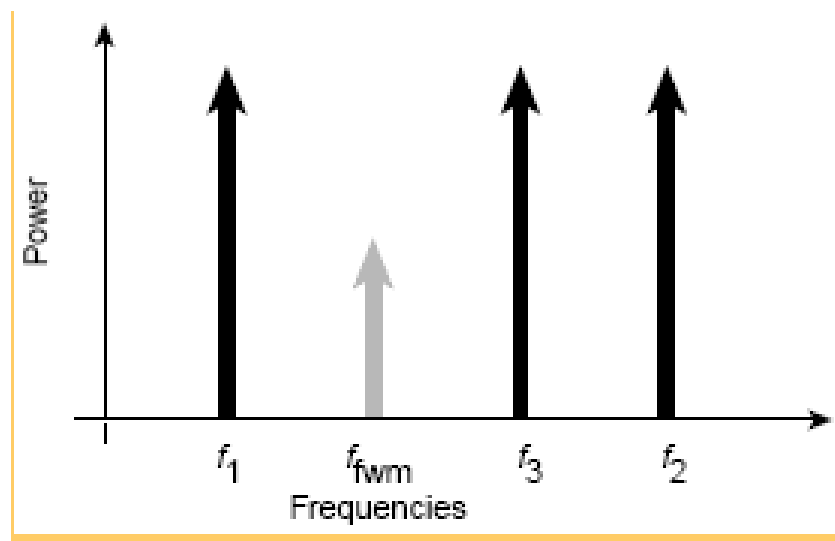
2.2.3 Modulação de ganho cruzada (XGM)

Consiste em um fenômeno onde, através de um sinal modulado em amplitude injetado em um amplificador óptico de semiconductor(SOA), se modula o ganho de outra portadora óptica co-propagante, devido à saturação do meio ativo. Esse efeito pode ser aproveitado para converter, em um comprimento de onda diferente, o trem de pulsos original, porém com inversão de nível de bits.

2.2.4 Mistura de quatro ondas (FWM)

Esse efeito não-linear pode gerar um novo sinal eletromagnético de frequência $f_{fwm}=f_1 - f_2 - f_3$, quando três sinais f_1 , f_2 e f_3 copropagam dentro da fibra. Nos casos em que os sinais são igualmente espaçados, geralmente as novas frequências coincidem na frequência de um sinal existente, interferindo nos sinais dessa frequência (AGRAWAL, 2001).

Quando os sinais não são igualmente espaçados a maioria dos componentes FWM recaem entre sinais existentes e não sobre eles, adicionando um ruído geral no sistema. Em ambos os casos a performance do sistema é afetada com uma perda de potência nos sinais, mas a degradação maior ocorre nos sinais igualmente espaçados (AGRAWAL, 2001).

Figura 3: Mistura de quatro ondas

Fonte: (LEITE, 2004)

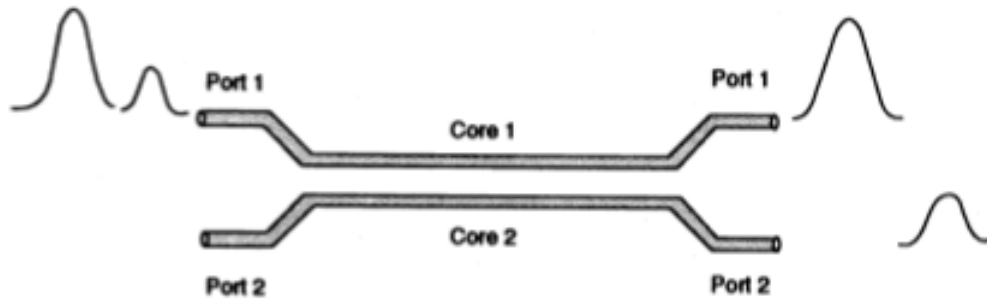
Na Figura 3 é ilustrado o processo em que três canais igualmente espaçados interagem (f_1 , f_2 e f_3), produzindo um quarto canal(f_{fwm}), caracterizando o FWM.

2.3 Acopladores

Os acopladores de fibra ou acopladores direcionais, possuem seu uso relacionado a uma infinidade de dispositivos ópticos que necessitam da divisão de um campo óptico em duas partes uniformes e separadas. São compostos por um dispositivo de quatro portas, sendo duas de entrada e duas de saída.

Sua função é dividir uniformemente um campo eletromagnético incidente em uma das portas de entrada, em duas partes, uma em cada porta de saída, como mostra a Figura 4.

Em óptica integrada, a fabricação de acopladores ópticos se dá por meio do crescimento, ou deposição, de materiais com índices de refração diferentes de forma a construir uma estrutura multicamadas. No caso de acopladores baseados em fibra, é necessária uma modificação na estrutura de acoplamento de maneira a aproximar os núcleos das fibras. Para este fim, três métodos básicos têm sido desenvolvidos: Retirada da maioria da camada de casca por meio de corrosão química, remoção parcial da camada de casca em ambas as fibras por meio de um polimento mecânico controlado ou fusão de duas, ou mais, fibras após um leve entrelaçamento entre elas e um posterior aquecimento (MENEZES, 2006).

Figura 4: Esquemático de um acoplador não-linear

Fonte: (AGRAWAL, 2008)

Sendo assim, a Figura 4 mostra um esquemático onde um acoplador de fibra é fundido, de modo que os núcleos de duas fibras monomodo são reunidas numa região central onde o espaçamento entre os núcleos é comparável aos seus diâmetros. Uma fibra de dois núcleos, designada a ter dois núcleos próximos um do outro em todo seu comprimento, pode também agir como um acoplador direcional. Nos dois casos, os núcleos estão próximos o suficiente que os modo de propagação fundamental em cada núcleo sobrepõe-se parcialmente na região de revestimento entre os dois núcleos (AGRAWAL, 2008).

A proximidade dos núcleos dos acopladores de fibra, e os modos de propagação de cada núcleo se sobrepondo parcialmente na região da casca entre os dois núcleos, provocam um acoplamento de onda evanescente ocorrendo a troca de potência óptica de um núcleo para o outro. Esta transferência de potência está diretamente relacionada com a potência crítica $P_c(W)$, que é a potência necessária para se obter uma transferência de 50% entre os guias do acoplador. A potência crítica para um acoplador é dada pela equação 2.2:

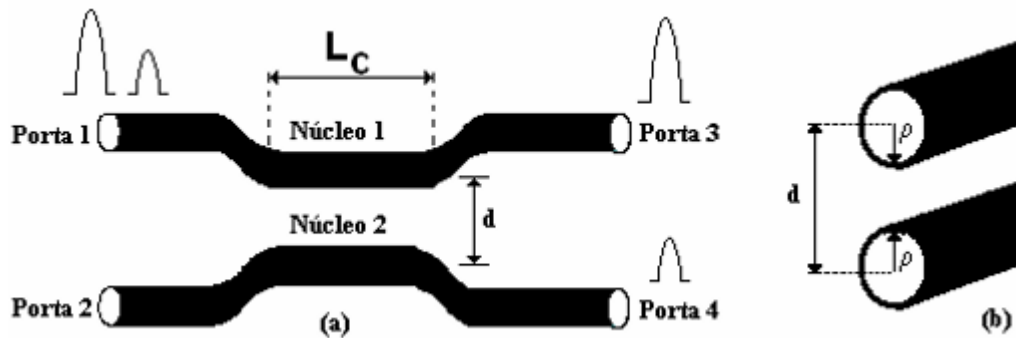
$$P_c = \frac{S\lambda}{n_{NL}L_c} \quad (2.2)$$

em que 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. Para o acoplador da Figura 5(a), o comprimento $L_c(\text{cm})$ é definido pela equação 2.3:

$$L_c = \frac{\pi}{2K} \quad (2.3)$$

sendo K o coeficiente de acoplamento linear entre os guias adjacentes. Como podemos verificar pelas equações 2.2 e 2.3, a potência crítica é inversamente proporcional ao comprimento de acoplamento.

Figura 5: a) Acoplador de fibra não-linear. b) Seção transversal do acoplador

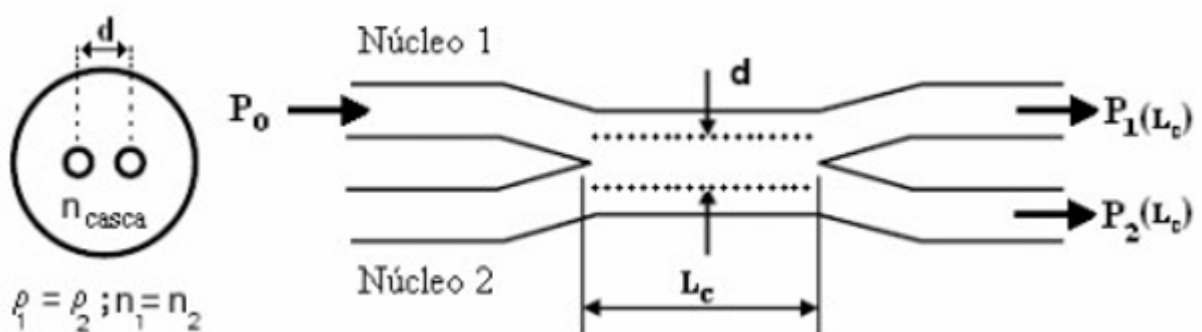


Fonte: (AGRAWAL, 2008)

2.3.1 Acoplador simétrico

Os acopladores são ditos simétricos quando seus núcleos são idênticos sob todos os aspectos, apresentando o mesmo raio $\rho_1 = \rho_2$ e possuindo iguais índices de refração $n_1 = n_2$, como mostra a Figura 6.

Figura 6: Acoplador simétrico



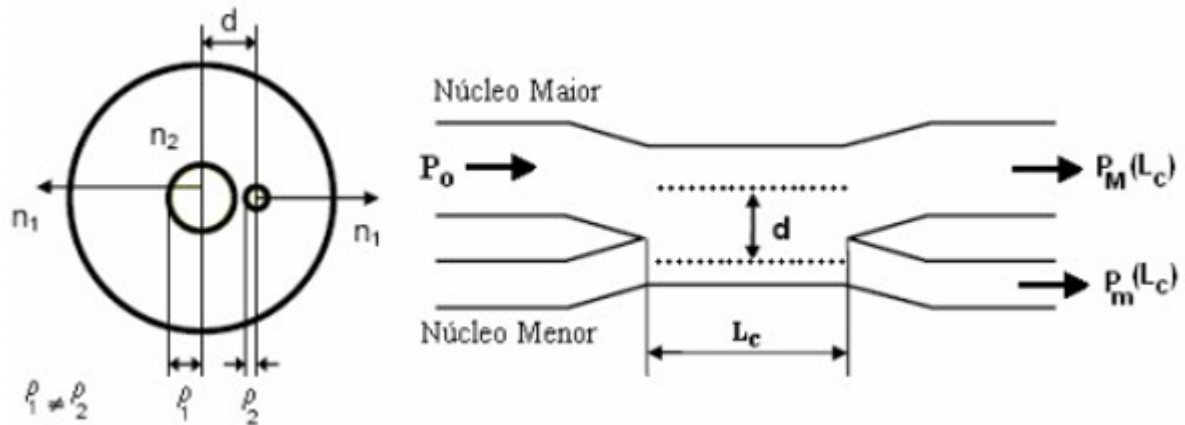
Fonte: (MENEZES, 2006)

2.3.2 Acoplador Assimétrico

Possuem uma estrutura semelhante aos acopladores simétricos, porém seus núcleos possuem formas ou tamanhos diferentes, tornando o acoplamento mais complicado em relação ao simétrico, pois existirão diferentes velocidades de fases

nos dois núcleos. Um acoplador assimétrico é ilustrado na Figura 7, onde "M" e "m" se referem aos tamanhos dos núcleos maior e menor respectivamente.

Figura 7: Acoplador assimétrico



Fonte: (MENEZES, 2006)

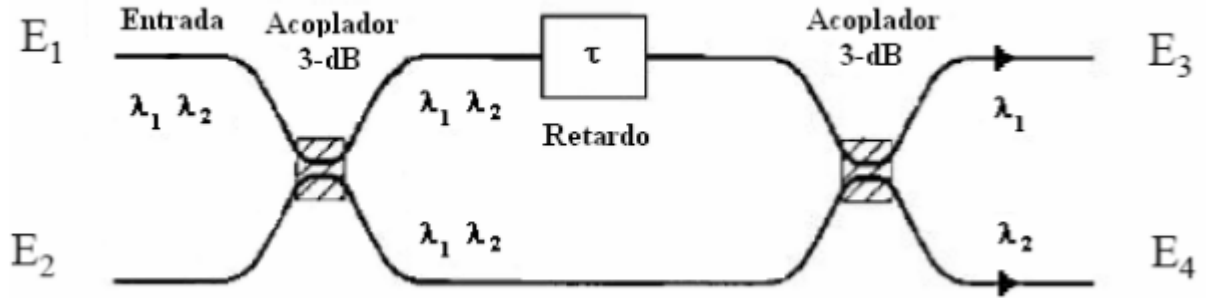
2.4 Interferômetro Mach-Zehnder

Um interferômetro Mach-Zehnder(MZI) é confeccionado a partir da conexão de dois acopladores de fibra em série, como mostra a Figura 8. O primeiro acoplador tem a função de dividir o sinal de entrada em duas partes, que adquirem diferentes deslocamentos de fase, se um dos braços possuir efeitos não-lineares, se os braços possuírem comprimentos diferentes ou se um dos braços possuir um retardo temporal como é o caso da Figura 7, gerando assim interferometria ao se cruzarem no segundo acoplador. A saída E_3 é chamada de BAR, pois está na parte superior do MZI, enquanto a saída E_4 é denominada CROSS, por se localizar na parte inferior do MZI.

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.

2.5 Equação não linear generalizada de Schrödinger

A equação não-linear generalizada de Schrödinger(ENGLS) descreve a propagação de um pulso eletromagnético na fibra óptica, como mostra a equação 2.4.

Figura 8: Esquemático de um interferômetro Mach-Zehnder

Fonte: (MENEZES, 2006)

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial A^2}{\partial t^2} - \frac{i}{6} \beta_3 \frac{\partial A^3}{\partial t^3} + \frac{\alpha}{2} A = i\gamma A |A|^2 + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial |A|^2 A}{\partial t} - T_r A \frac{\partial |A|^2}{\partial t} \quad (2.4)$$

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

$$\gamma = \frac{2\pi \bar{n}_2}{A_{eff} \mathcal{V}} \quad (2.5)$$

sendo $\bar{n}_2$ o coeficiente de índice não-linear [$m^2 W^{-1}$], A_{eff} área efetiva do núcleo [cm^2]. Para um pulso de largura temporal maior que 5 ps, os parâmetros $\frac{1}{\omega_0 T_0}$ e $\frac{T_r}{T_0}$ são tão pequenos (<0,001) que os dois últimos termos da equação 2.4 podem ser desprezados (AGRAWAL, 2001). Os pulsos utilizados na simulação do trabalho possuem 10 ps, logo esses termos serão desprezados. A equação então pode ser reduzida para a forma:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial A^2}{\partial t^2} - \frac{i}{6} \beta_3 \frac{\partial A^3}{\partial t^3} + \frac{\alpha}{2} A = i\gamma A |A|^2 \quad (2.6)$$

Nas simulações realizadas neste trabalho, os fatores de dispersão e atenuação não serão levados em consideração, pois a fibra utilizada possui um comprimento de apenas 1 m, fazendo com que esses fatores se tornem desprezíveis. Sendo assim os coeficientes β_1 , β_2 e β_3 serão zerados, assim como α . Somente a não-linearidade será

considerada na fibra do MZI.

A equação 2.6 pode ser utilizada para a fibra de cada acoplador, mas é necessário inserir um termo que represente a interação realizada entre a região de acoplamento e efeito não-linear XPM. Dessa maneira, temos uma ENLGS para a saída de cada acoplador do MZI, chamadas de equações de modo acoplado. Para as saídas E_3 e E_4 da Figura 8, respectivamente, temos as equações de modo acoplado:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial A^2}{\partial t^2} - \frac{i}{6} \beta_3 \frac{\partial A^3}{\partial t^3} + \frac{\alpha}{2} A = i\kappa A_2 + i\gamma |A_1|^2 + \sigma |A_2|^2 A_1 \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial A^2}{\partial t^2} - \frac{i}{6} \beta_3 \frac{\partial A^3}{\partial t^3} + \frac{\alpha}{2} A = i\kappa A_1 + i\gamma |A_1|^2 + \sigma |A_2|^2 A_2 \quad (2.8)$$

onde K é o coeficiente de acoplamento e σ é o parâmetro relacionado ao XPM. Como o acoplador não apresenta perdas e devido ao pulso utilizado ter largura espectral bem menor do que sua frequência central, os coeficientes α e β_3 são descartados.

Levando em consideração as simulações realizadas nesse trabalho, os termos β_1 , β_2 , β_3 e α da equação 2.6, são desprezados, restando somente a propagação do pulso em uma fibra não-linear. Os acopladores utilizados, por serem totalmente lineares e não dispersivos, possibilitam desprezar os termos β_1 , β_2 e σ das equações de modo acoplado 2.7 e 2.8.

Como sinais de entrada para o segundo acoplador do MZI, podemos utilizar as seguintes equações, onde um dos braços possui não linearidade:

$$A_1 = \sqrt{\rho_1} A_0 \exp(i\beta_1 L_1 + i\rho_1 \gamma |A_0|^2 L_1) \quad (2.9)$$

$$A_2 = i \sqrt{1 - \rho_1} A_0 \exp[i\beta_2 L_2 + i(1 - \rho_1) \gamma |A_0|^2 L_1] \quad (2.10)$$

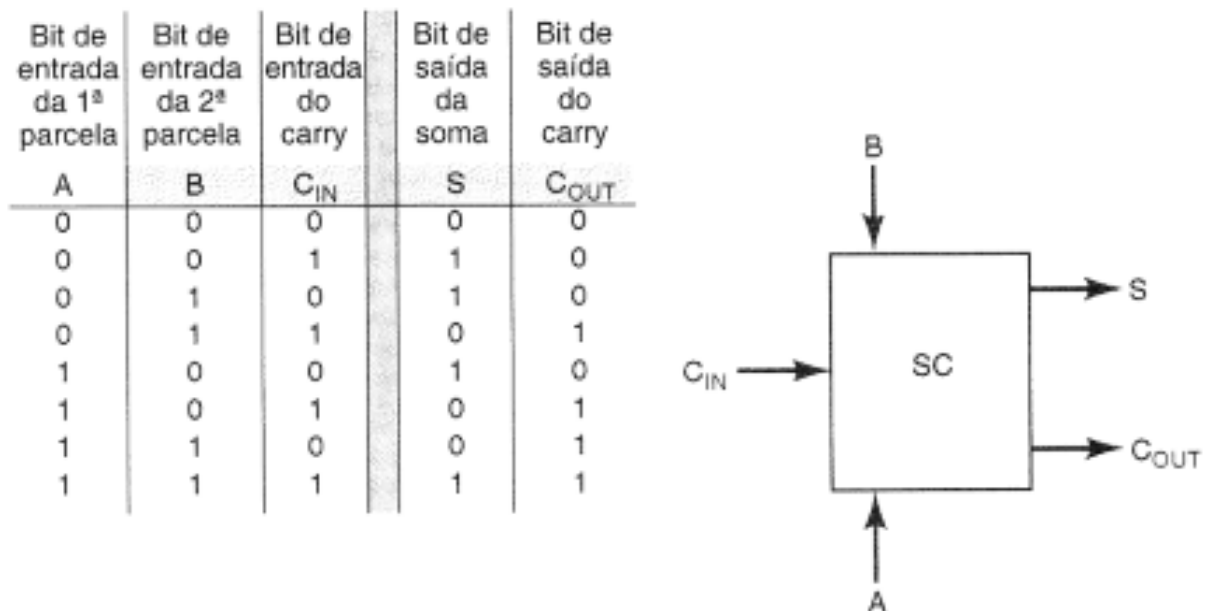
onde L_1 e L_2 são os comprimentos braços do MZI, β_1 e β_2 são as constantes de propagação e ρ_1 e ρ_2 são as frações de divisão de potência nos acopladores.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Circuito Somador Completo

Um somador completo é um circuito que soma uma coluna de três bits, podendo ser construído, listando em uma tabela verdade as saídas para todas as combinações de entrada. Sendo assim, em cada coluna da saída, existe um bit da soma e um bit "vai um" (*carry out*), tomado para a coluna seguinte, especificando dois bits de saída para cada combinação de entrada. Os bits de entrada são chamados de A, B e "vem um" (*carry in*) (MORDKA, 2014). A Figura 9 mostra o somador completo além da tabela verdade desse circuito.

Figura 9: Tabela verdade circuito somador completo



Fonte:(TOCCI *et al.*, 2007)

De uma maneira direta podemos dizer que ao somar os bits das três entradas do circuito, teremos três possíveis resultados: se os três bits forem 0, o resultado da soma

será 0, se um bit for 0 e dois bits forem 1, o resultado da soma será 10. Porém se todos os bits forem 1, o resultado da soma será 11. Assim, o bit de soma armazenará o bit menos significativo, enquanto o de carry armazenará o mais significativo.

3.2 Portas Lógicas Ópticas

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).

Dois diferentes tipos de efeitos não lineares podem ser usados para construir portas lógicas totalmente ópticas. O primeiro tipo inclui efeitos não lineares em que novas componentes de frequências são geradas por dados e sinal de controle incidente no meio. O segundo tipo inclui efeitos não lineares em que a fase ou a amplitude do sinal propagado através do meio é alterada por mudança do índice de refração não linear ou ganho, induzido por sinal óptico de controle (ISLAM, 1992).

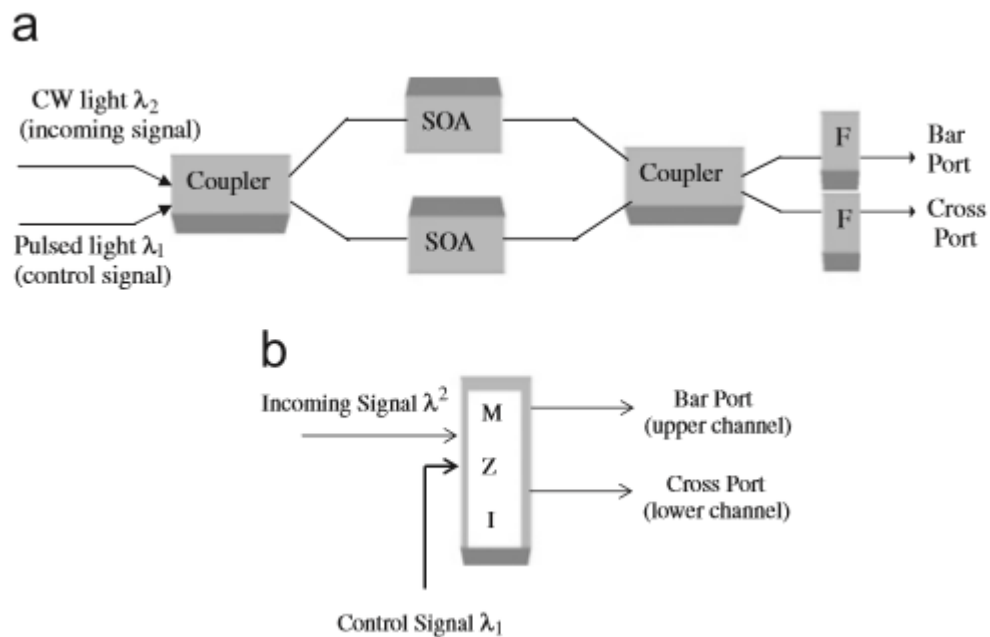
3.3 Trabalhos Relacionados

Nesta seção são apresentados os trabalhos utilizados como base de referencial teórico, buscando organizar as técnicas utilizadas para obtenção do circuito somador completo totalmente óptico.

Em Roy (2007) foi possível encontrar um circuito somador completo totalmente óptico utilizando uma estrutura OTA(Optical Tree Architecture), que consiste num sistema de um único caminho que pode gerar vários galhos ou sub-galhos. Para isso se utilizou o interferômetro Mach-Zehnder baseado em SOA com a ocorrência de XPM(Modulação de fase cruzada), como podemos ver na Figura 10.

Para a realização do somador completo foi montada uma estrutura baseada em

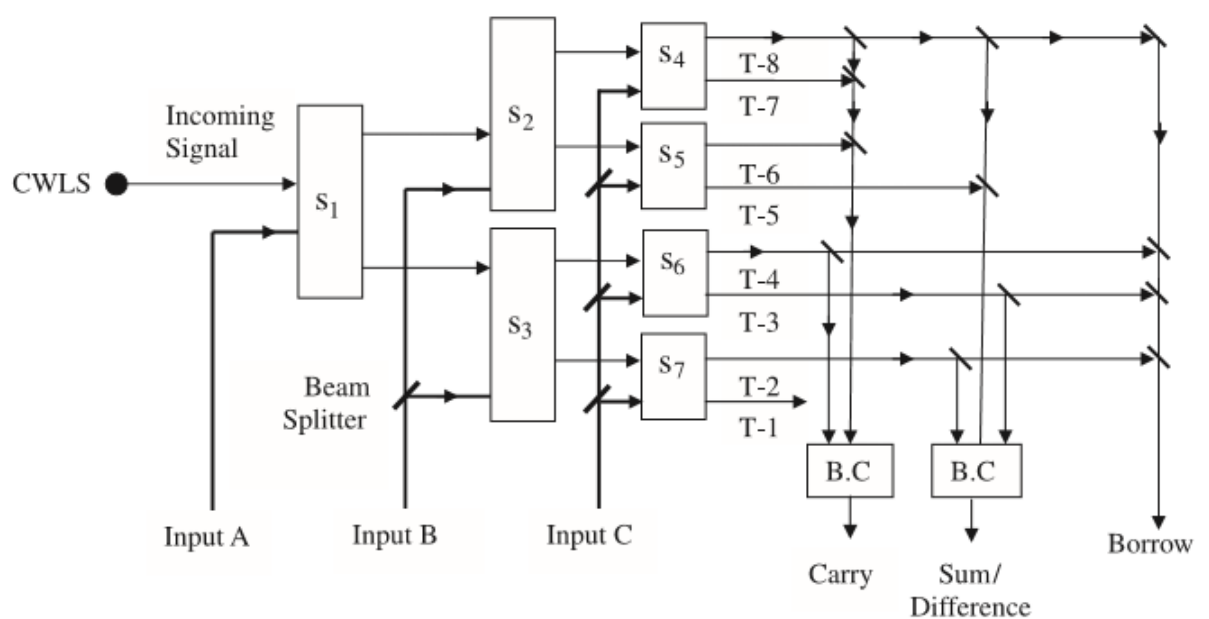
Figura 10: (a) Mach-Zehnder baseado em SOA, (b) Diagrama esquemático de Mach-Zehnder baseado em SOA.



Fonte: (ROY, 2007)

sete interferômetros Mach-Zehnder, cascadeados formando uma grande estrutura, além de utilizar dois combinadores de feixe(B.C.) e dois divisores de feixe(B.S.). A Figura 11 mostra esse esquema.

Figura 11: Estrutura utilizada para montar um somador completo totalmente óptico



Fonte: (ROY, 2007)

Além de um somador completo totalmente óptico, essa estrutura também proporciona a realização de um subtrator, onde a tabela verdade dos dois circuitos é mostrado na Figura 12.

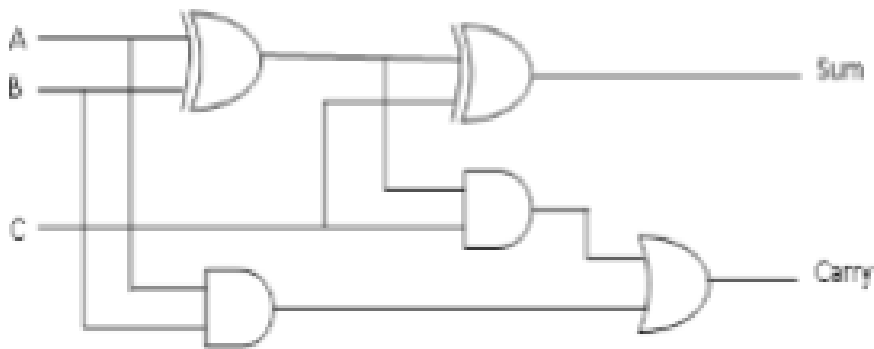
Figura 12: Tabela verdade dos circuitos somador completo e subtrator completo

Input			Output			
A	B	C	Full-adder		Full-subtractor	
			Sum	Carry	Difference	Borrow
0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	1	0	1	1
0	1	0	1	0	1	1
0	1	1	0	1	0	1
1	0	0	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	0
1	1	0	0	1	0	0
1	1	1	1	1	1	1

Fonte: (ROY, 2007)

No trabalho de Nady, Hussein & Anmar (2013) foi criada uma estrutura, onde as portas lógicas de um circuito somador completo como mostradas na Figura 13, foram construídas através de amplificadores ópticos de semicondutor com pontos quânticos(QD-SOA).

Figura 13: Circuito somador completo



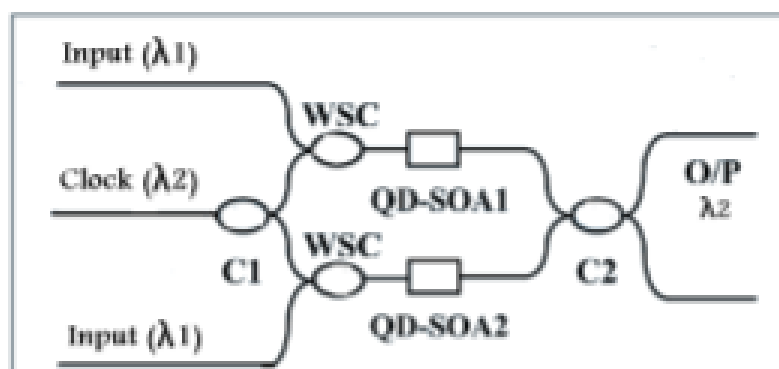
Fonte: (NADY; HUSSEIN; ANMAR, 2013)

O QD-SOA possui uma superioridade se comparado ao SOA devido as suas propriedades físicas. Ele possui como principais vantagens tempos de relaxamento de portadora mais curtos e menor saturação de ganho (USKOV; BERG; MRK, 2004).

O diagrama esquemático de um interferômetro Mach-Zehnder totalmente óptico QD-SOA é ilustrado na Figura 14. Ele consiste de um interferômetro Mach-Zehnder simétrico(3dB), onde em cada braço está localizado um amplificador óptico de semiconductor com pontos quânticos. O *clock* de comprimento de onda (λ_2) é constituído de pulsos consecutivos, e após ser inserido no MZI, é dividido pelo acoplador de 3dB em duas partes iguais que trafegam separadamente ao longo dos QD-SOAs idênticos localizados em seu caminho.

Ao mesmo tempo que o sinal de *clock* é inserido no sistema, dois sinais de entrada com comprimento de onda (λ_1) entram nos braços de cima e de baixo do MZI, até chegarem nos acopladores seletivos de comprimento de onda(WSC). O sinal de dados é pelo menos uma ordem de magnitude mais forte que o sinal de *clock*, para que assim os sinais de entrada sejam os únicos capazes de modificar as propriedades ópticas de cada QD-SOA. Além disso, a dessintonização entre os pulsos de entrada e de *clock* na região de 1550 nm são menores que o alargamento temporal do QD-SOA 1 e 2, respectivamente, fazendo com que os sinais de entrada possam modificar as propriedades não-lineares dos respectivos QD-SOAs induzindo através de XPM uma diferença de fase entre os dois braços do MZI.

Figura 14: Diagrama esquemático de um interferômetro Mach-Zehnder totalmente óptico QD-SOA



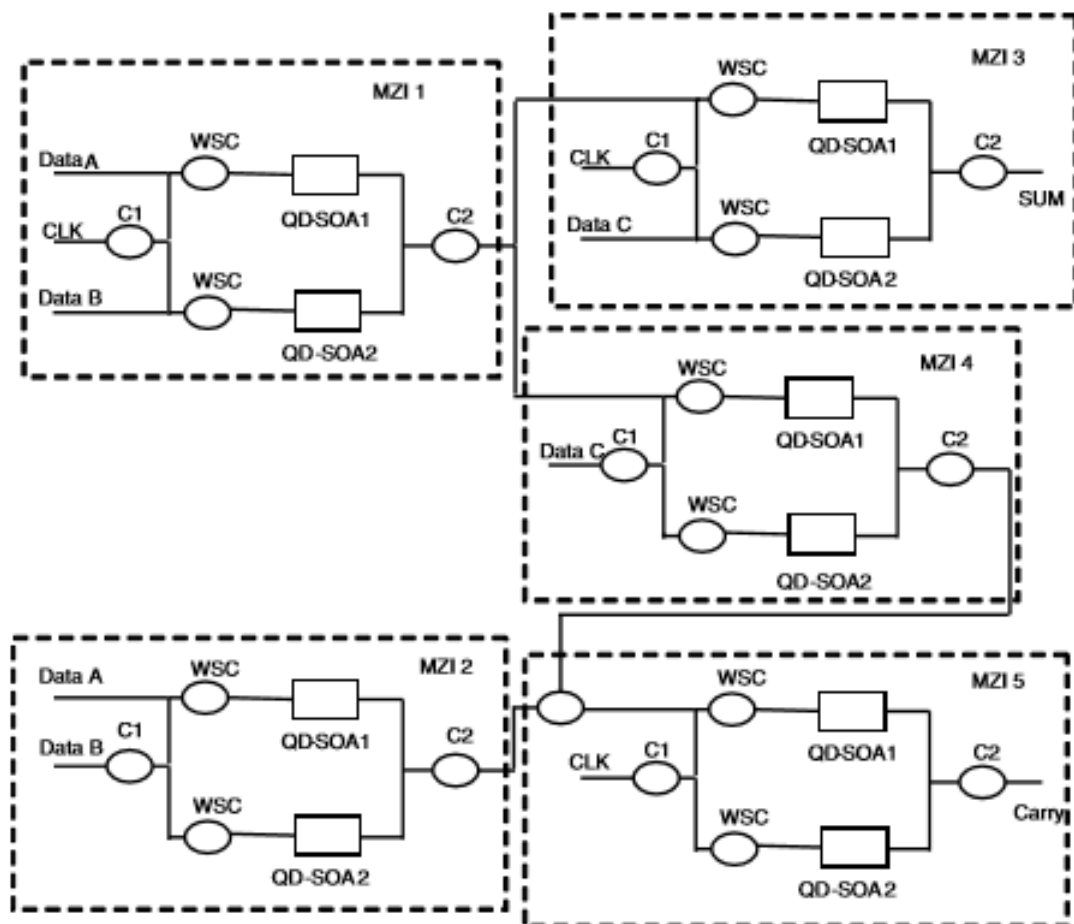
Fonte: (NADY; HUSSEIN; ANMAR, 2013)

O somador completo totalmente óptico será então constituído de cinco estruturas iguais a mostrada na Figura 14. Cada estrutura dessa cumprirá o papel de uma porta lógica, dispostas e conectadas como ilustrado na Figura 13. Sendo assim, o sistema proposto é mostrado na Figura 15. As primeiras e segundas portas(MZI-1 e MZI-2) equivalem respectivamente a primeira porta XOR e a primeira porta AND, com as entradas de dados sendo A e B. Por outro lado, a terceira e quarta portas(MZI-3 e

MZI-4), são respectivamente a segunda XOR e a segunda AND, e os dados de entrada são C e a saída XOR do MZI-1.

Por último, a quinta porta, OR(MZI-5), os dados de entrada são as saídas da AND do MZI-2 e MZI-4.

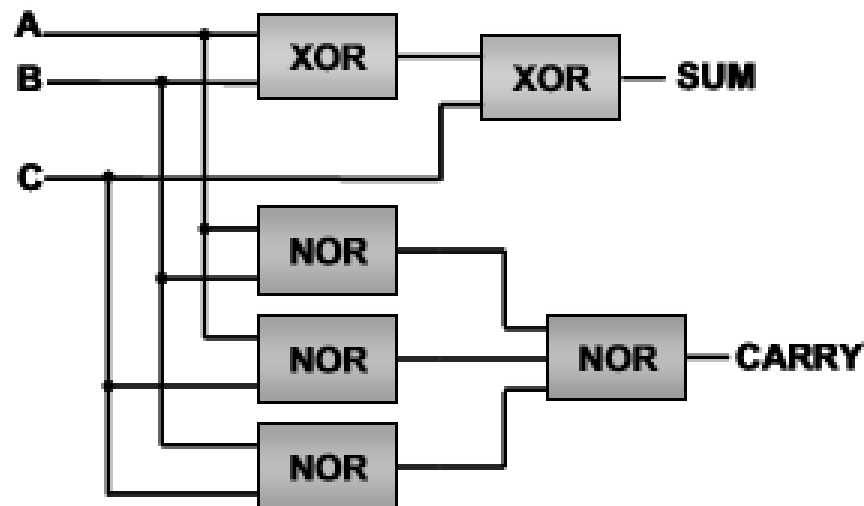
Figura 15: Configuração proposta do circuito somador totalmente óptico usando cinco simétricos QD-SOAs baseados em interferômetros MZI



Fonte: (NADY; HUSSEIN; ANMAR, 2013)

Em Kim *et al.* (2005) o somador completo consistiu de portas XOR e NOR, apenas utilizando o mecanismo de modulação de ganho cruzado(XGM) do amplificador óptico de semicondutor(SOA). Na Figura 16 temos o esquemático do somador completo usado nesse trabalho. Podemos perceber que ainda nessa figura, que o somador completo é composto pelas entradas A, B e C e pelas saídas SUM e CARRY.

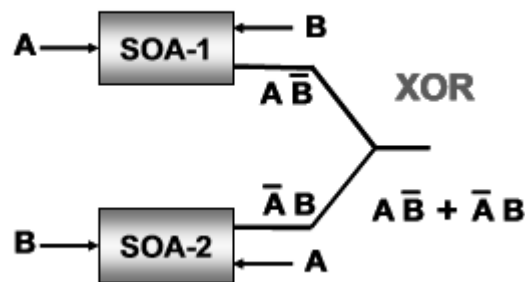
Figura 16: Esquemático de um somador completo formado por duas portas XOR e quatro portas NOR



Fonte: (KIM *et al.*, 2005)

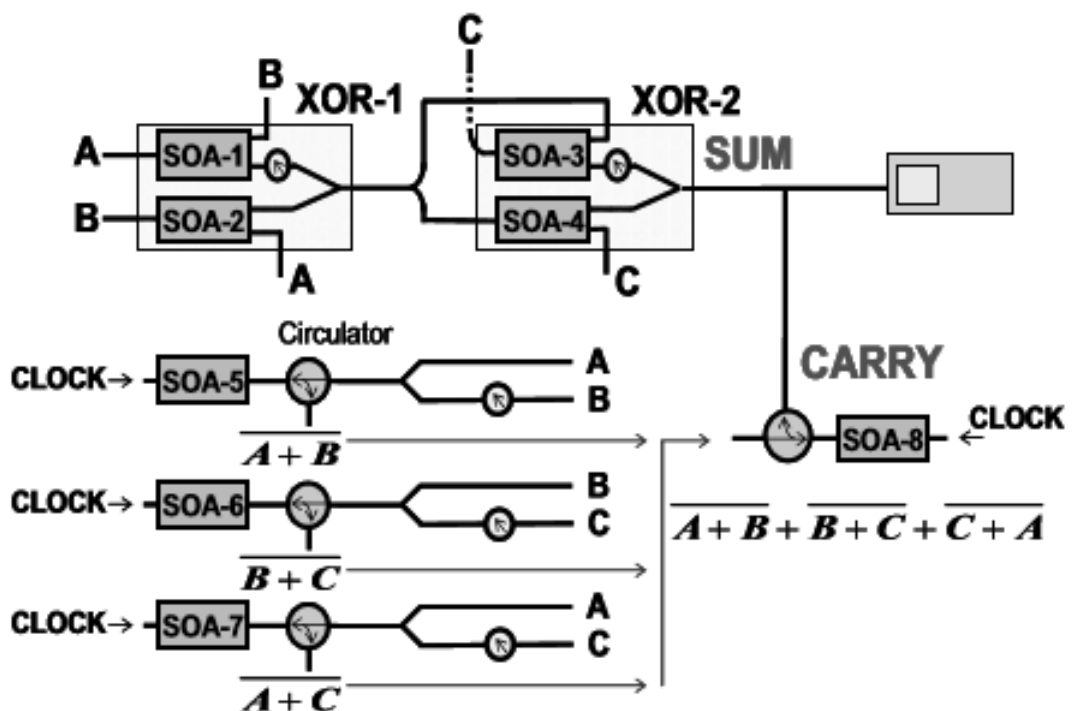
Para realizar opticamente a soma (SUM) de um sinal, duas portas totalmente ópticas XOR foram utilizadas. A Figura 17 mostra o princípio de operação da porta XOR totalmente óptica. Ela é obtida ao se passar um sinal de sonda A e um sinal de bombeamento B pelo SOA-1 e ao mesmo tempo trocando os papéis dos sinais A e B no SOA-2. Ao passar o resultado obtido na primeira XOR juntamente com o sinal C pela segunda XOR, é obtido o sinal de soma (SUM) do somador completo.

O sinal de CARRY é encontrado através das portas NOR. Nas primeiras três portas NOR são encontradas as seguintes expressões booleanas $\overline{A+B}$, $\overline{B+C}$ e $\overline{C+A}$. Fazendo a adição dessas portas temos $\overline{A+B} + \overline{B+C} + \overline{C+A}$. Injetando essas saídas na última porta NOR com um sinal de clock, é encontrada a saída CARRY que pode ser expressada pela expressão booleana $AB + BC + CA$.

Figura 17: Princípio de operação da porta XOR totalmente óptica.

Fonte: (KIM *et al.*, 2005)

A Figura 18 ilustra o processo de combinação de todos os sinais para obtenção das saídas SUM e CARRY totalmente ópticas.

Figura 18: Combinação de todos os sinais para obter as saídas totalmente ópticas SUM e CARRY

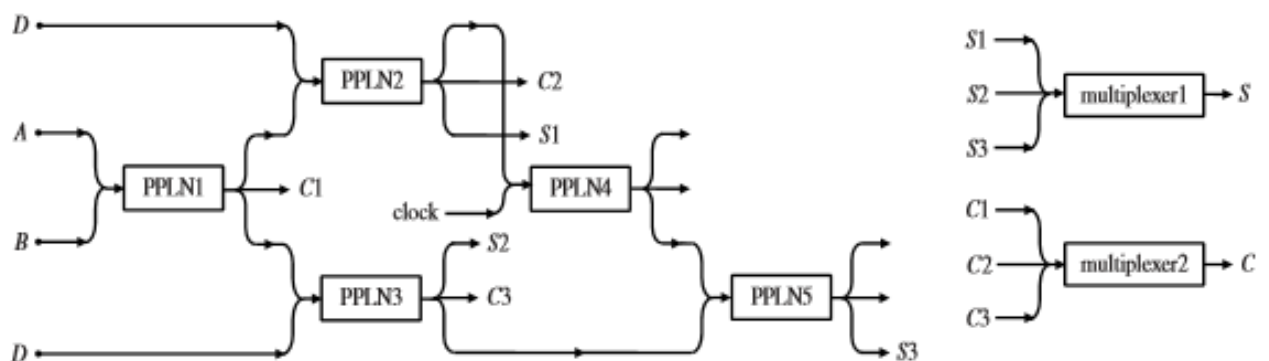
Fonte: (KIM *et al.*, 2005)

No trabalho de Shen *et al.* (2011) é proposto um somador completo totalmente óptico baseado no cascadeamento de não-linearidades de segunda ordem de geração de soma-frequência e geração de diferença-frequência em guias de onda de niobato de lítio periodicamente (PPLN) quasi casadas em fase.

A Figura 19 demonstra a estrutura completa utilizada para montar um somador completo totalmente óptico. Nela são utilizados cinco guias de onda PPLN cascadeados PPLN1, PPLN2, PPLN3, PPLN4 e PPLN5. As entradas do sistema são A, B e D sendo sinais de trem de pulsos e uma onda de *clock* que é o mesmo trem de pulsos com a mesma taxa de bit dos sinais de entrada.

Os sinais S1, S2 e S3 representam os sinais de entrada do multiplexador 1, para obter a saída SUM. Já C1, C2 e C3 são os sinais de entrada do multiplexador 2, para obter a saída CARRY.

Figura 19: Configuração do somador completo totalmente óptico baseado em guias de onda PPLN cascadeados



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

Em resumo, podemos notar que os trabalhos relacionados utilizam diferentes técnicas para atingir o objetivo de encontrar um circuito somador completo totalmente óptico. A Tabela 1 relaciona os autores com as técnicas utilizadas por eles.

Tabela 1: Resumo das técnicas utilizadas pelos trabalhos relacionados

Autor	Técnica utilizada
Roy(2007)	Estrutura OTA utilizando MZI com SOA
Nady, Russein e Anmar(2013)	MZI com QD-SOA
Kim et al.(2005)	SOA com XGM
Shen et al.(2011)	Guias de onda PPLN

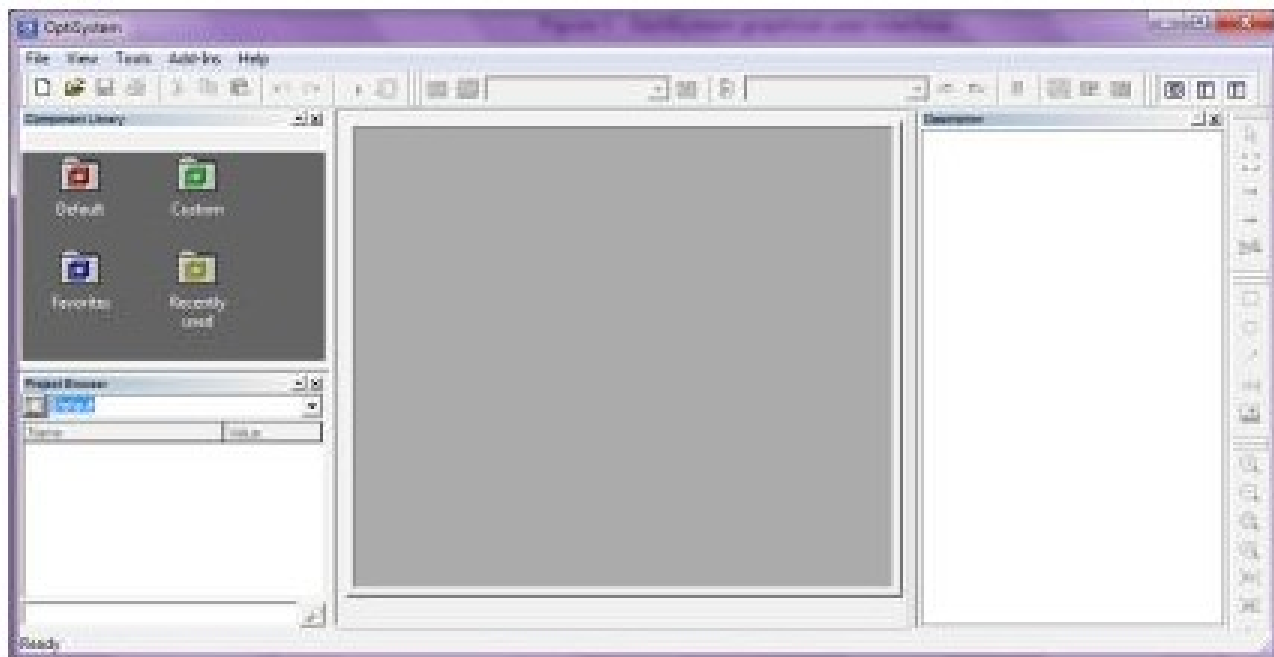
METODOLOGIA E RESULTADOS

No capítulo 4 foram mostrados trabalhos em que foi possível encontrar um circuito somador completo totalmente óptico utilizando diferentes técnicas. Nesse capítulo, será proposto, a geração de um circuito somador completo totalmente óptico utilizando cascadeamento de interferômetros Mazh-Zehnder e não-linearidade em um de seus braços.

4.1 Software Optisystem

O programa OptiSystem foi a ferramenta computacional utilizada nesse estudo, onde ele nos permite que sejam realizadas simulações de sistemas de telecomunicações e de outras aplicações. Para isto, dispõe de várias bibliotecas com diversos componentes utilizados nos sistemas reais, permitindo aos usuários planejar, testar e simular enlaces ópticos na camada de transmissão de redes ópticas modernas (OPTIWAVE, 2017).

O *software* OptiSystem possui uma extensa biblioteca, com mais de 400 dispositivos passivos e ativos, no domínio elétrico e óptico, além de ferramentas de visualização que permitem analisar o desempenho do sistema, como: analisadores de espectro, osciloscópios, medidores de potência e diagrama de olho. Na Figura 20 é ilustrada a interface gráfica do usuário logo ao acessar o software OptiSystem.

Figura 20: Interface gráfica do usuário

Fonte: (OPTIWAVE, 2017)

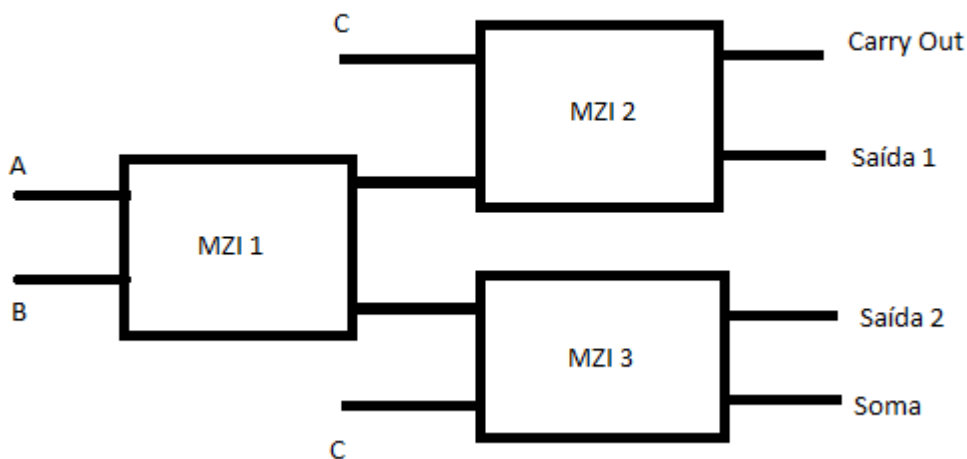
Ainda observando a Figura 20, onde é apresentada a tela do OptiSystem, pode-se observar a janela *layout* onde é montado o projeto a ser simulado. Na janela *componente library*, no canto superior a esquerda, seleciona-se os componentes para a montagem do projeto, e na janela *project browser*, que se encontra abaixo da janela *componente library*, pode-se observar os dispositivos usados no projeto.

A versão utilizada para o desenvolvimento desse trabalho é o OptiSystem 13, disponibilizado pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia de Telecomunicações (PPGET) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE).

4.2 Estrutura de simulação

A estrutura utilizada para simular um circuito somador completo totalmente óptico no software OptiSystem, foi de três interferômetros MZI cascadeados. O cascadeamento ocorre quando a saída de um MZI é ligada na entrada de outro MZI. A Figura 21 ilustra como os MZI estão conectados. Podemos observar que o MZI 1 recebe como entradas A e B. Já o MZI 2 e o MZI 3 recebem como entradas o sinal C(controle) e as saídas do MZI 1, BAR e CROSS, respectivamente.

Figura 21: Estrutura de cascadeamento de MZI



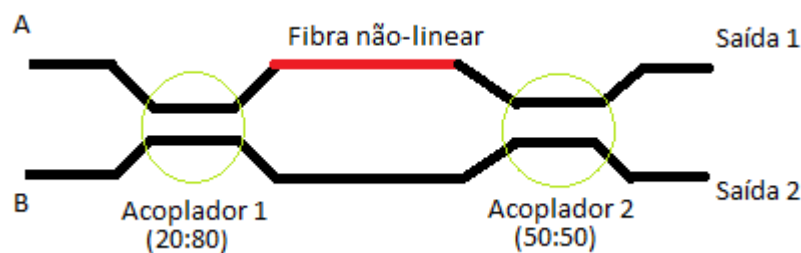
Fonte: o autor

Essa estrutura foi utilizada desde o princípio da pesquisa e simulação, com o intuito de encontrar portas lógicas totalmente ópticas e montar um circuito combinacional com essas saídas. Para isso ocorrer, foi alterado o índice de refração não-linear do braço BAR do MZI para produzir interferometria, utilizando o efeito não-linear de auto-modulação de fase. Além disso, foi alterado o coeficiente de acoplamento do primeiro acoplador de cada MZI do sistema, fazendo com que esse acoplador seja considerado assimétrico, instituindo os seguintes coeficientes de acoplamento: 10:90, 20:80, 30:70: e 40:60. A vantagem de simular um sistema em um software computacionalmente completo como o OptiSystem é de poder fazer alterações desse nível e avaliar os resultados de maneira a não arcar com altos custos de uma simulação desse nível na prática.

Ao analisar as saídas do sistema mostrado na Figura 21, utilizando cada um desses coeficientes de acoplamento foi possível averiguar que em todas as simulações eram

encontradas portas lógicas totalmente ópticas, porém apenas na simulação com o coeficiente de acoplamento 20:80 no primeiro acoplador, as portas lógicas na saída do sistema combinavam de uma forma a se comportar como um circuito somador completo totalmente óptico, sendo essa estrutura de MZI então instituída para as simulações. A Figura 22 apresenta como são montados os MZI usados na simulação.

Figura 22: Interferômetro Mach-Zehnder utilizado na simulação

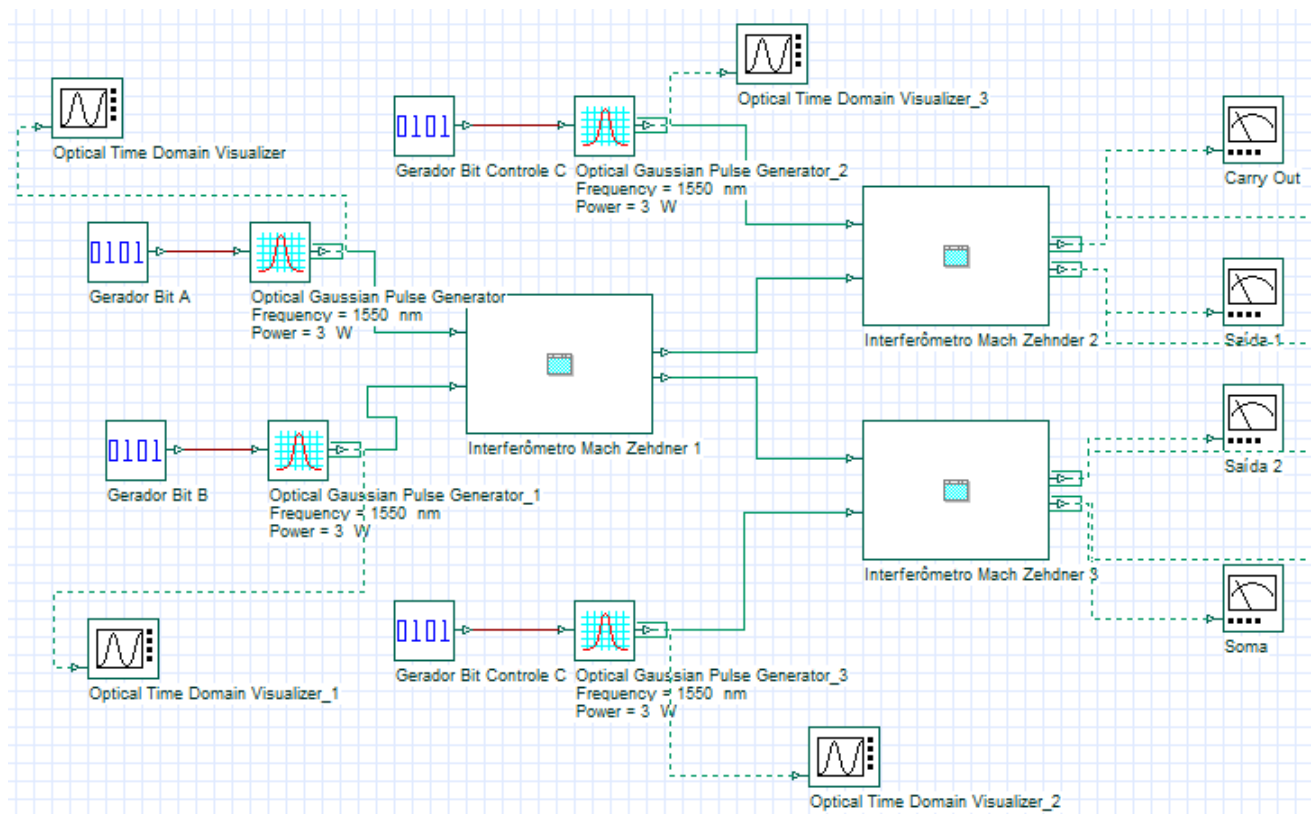


Fonte: o autor

Podemos ver que o MZI possui dois sinais de entrada A e B, que passam primeiramente pelo Acoplador 1 que possui coeficiente de acoplamento de 20:80, logo é um acoplador assimétrico. Os sinais de entrada são então separados e se juntam novamente no Acoplador 2, que possui um coeficiente de acoplamento de 50:50 ou 3dB, sendo um acoplador simétrico. Por último, os sinais são separados novamente entre a Saída 1 e Saída 2.

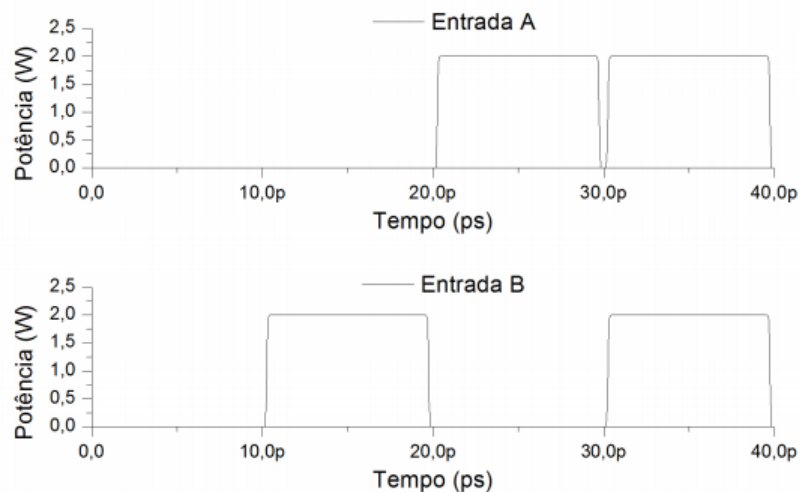
Voltando a Figura 21 e analisando o sistema como um todo, o MZI 2 vai possuir duas saídas, Carry Out, que irá armazenar o bit mais significativo do circuito somador completo e a Saída 1. O MZI 3 também possui duas saídas, a Saída 2 e a saída Soma, responsável por armazenar o bit menos significativo do circuito somador completo.

Além disso, são utilizados quatro geradores de bits e pulso retangular e quatro analisadores de potência são colocados nas saídas. O gerador de bits é conectado a um criador de pulso retangular. Lembrando que são utilizados quatro pulsos, sendo que um dos pulsos que é o de Controle(C), vai ser igual nas duas entradas. Ele é utilizado para garantir a entrada dos pulsos corretamente no sistema de modo a funcionar como um circuito somador completo totalmente óptico. Os pulsos de entrada terão potência de pico de 3W. A Figura 23 ilustra o esquemático do circuito somador completo montado no OptiSystem.

Figura 23: Estrutura de simulação montada no OptiSystem

Fonte: o autor

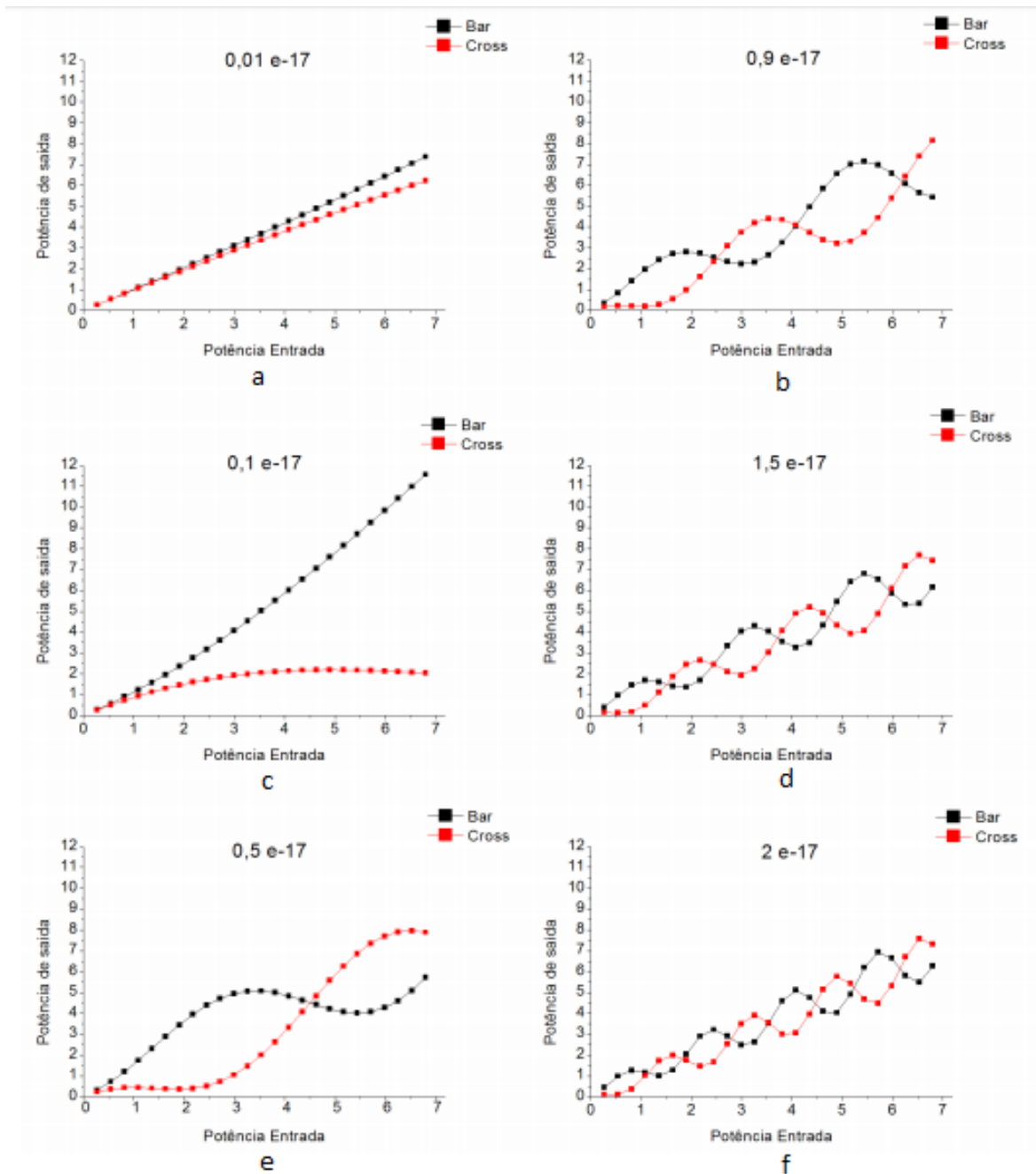
Na simulação, o pulso retangular é representado pelo bit "1", logo a ausência de pulso significa o valor "0". Dessa maneira, estamos trabalhando com uma modulação ASK (*Amplitude Shift Keying*) tipo OOK (*On-Off Keying*). Na Figura 24 temos duas entradas representando os bits "0" e "1".

Figura 24: Representação dos bits "0" e "1" na entrada do sistema.

Fonte: o autor

Todos os parâmetros serão mantidos fixos, exceto o coeficiente de não-linearidade($\bar{n}_2$) do MZI que será variado de $0,5 \cdot 10^{-17}$ até $5 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$. Os valores de não-linearidade foram escolhidos de acordo com a interferometria. A partir de uma simulação no software Matlab, foi possível definir um intervalo de valores onde ocorre interferometria, demonstrados pela Figura 25.

Figura 25: Variação do índice de não-linearidade no MZI



Fonte: o autor

A interferometria entre os braços BAR e CROSS do MZI só ocorre a partir de $0,5 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$ na Figura 25e. Logo, esse valor é utilizado como ponto de partida

e então são variados mais 46 valores chegando a $5 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$. Todos os dados utilizados na simulação no OptiSystem são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros de simulação

CARACTERÍSTICA	VALOR
Quantidade de MZI	3
Coef. acoplamento Acoplador 1	20:80
Coef. acoplamento Acoplador 2	50:50
Comprimento dos braços MZI	1m
Efeitos não-lineares	SPM
Dispersão de 2ª e 3ª ordem	Não há
Potência de pico	3W
Coef. de não linearidade	$0,5 \cdot 10^{-17}$ até $5 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$
Comprimento de onda	1550 nm
Largura temporal do pulso	10ps
Modulação do pulso	OOK

Os pulsos de entrada da simulação são então colocados em conjuntos de três bits, seguindo a lógica dos pulsos de entrada de um circuito somador completo, mostrada na Tabela 3. 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 Controle(C) respectivamente.

Tabela 3: Pulsos de entrada da simulação

A	B	Controle(C)
0	0	0
0	0	1
0	1	0
0	1	1
1	0	0
1	0	1
1	1	0
1	1	1

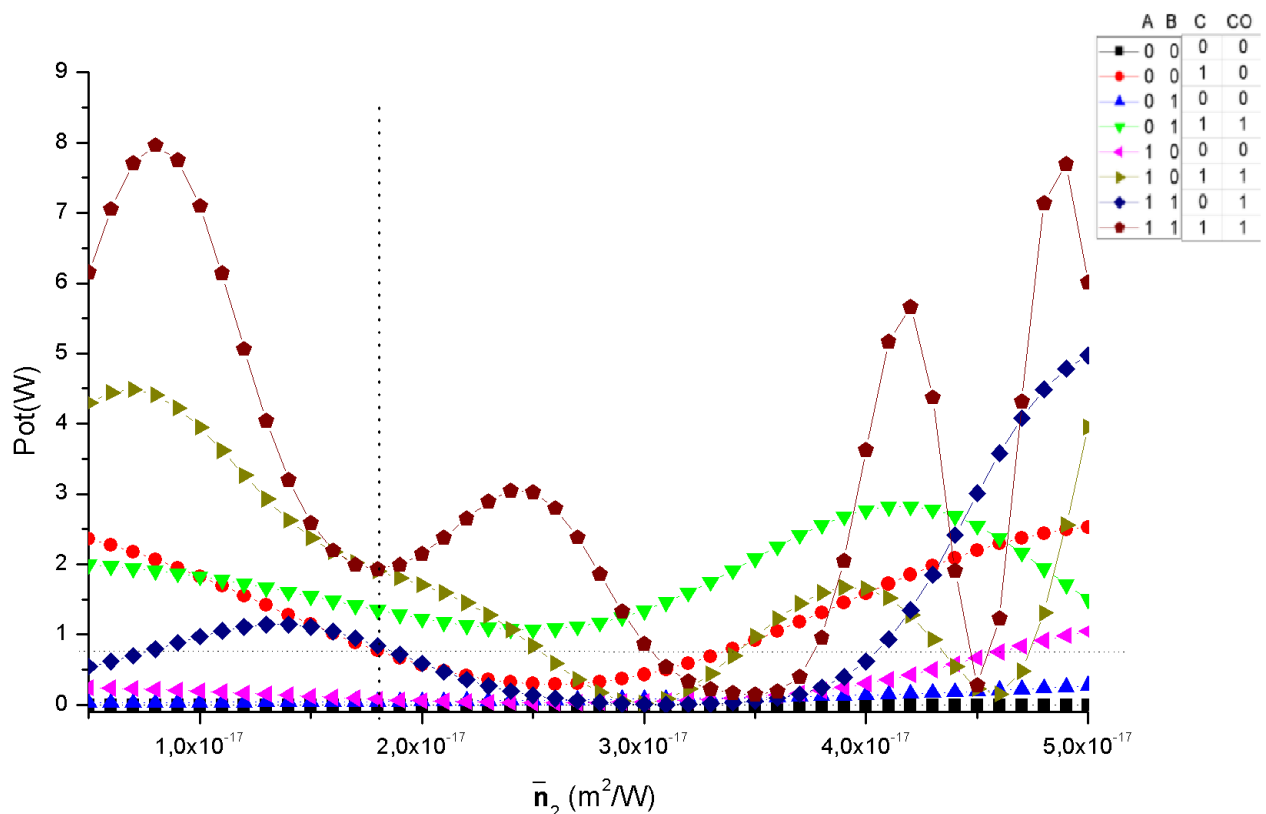
As saídas analisadas serão a Soma e a Carry Out. Os pulsos serão analisados na saída a nível de potência média e formarão portas lógicas necessárias para o funcionamento do sistema como um circuito somador completo totalmente óptico.

Os gráficos que serão mostrados a seguir apresentam oito curvas possíveis nas saídas Carry Out e Soma, de acordo com os conjuntos de pulsos de entrada do sistema, mostrados na Tabela 3. 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 $0,5 \cdot 10^{-17}$ até $5 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$.

4.3 Saída Carry Out

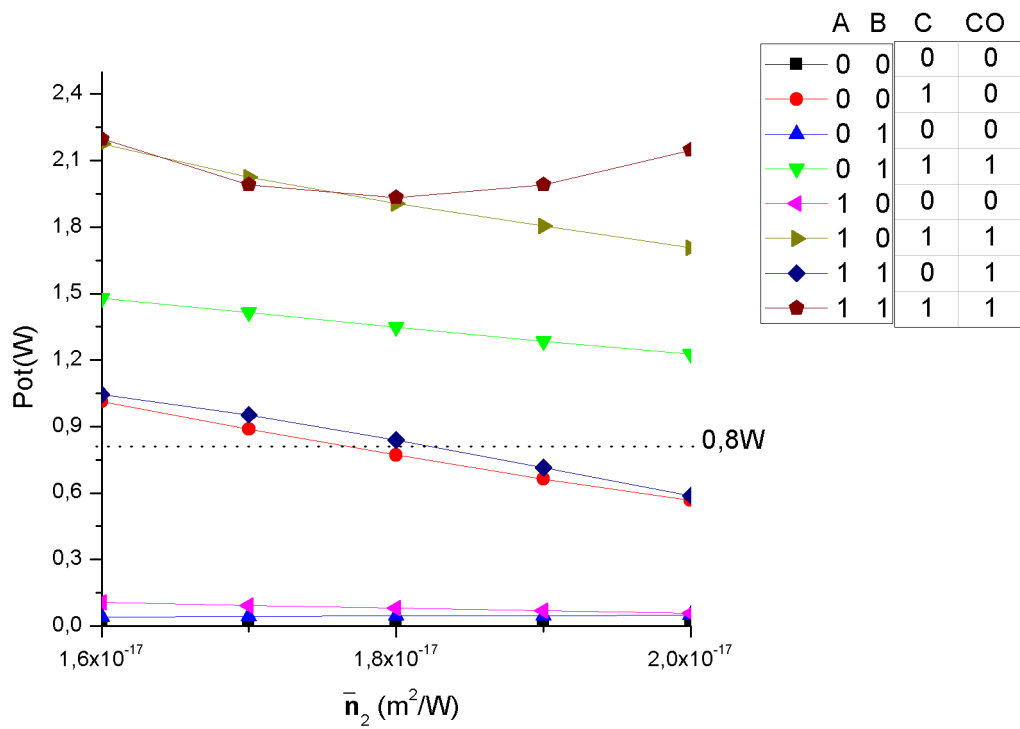
A Figura 26 representa o gráfico da saída Carry Out, responsável por armazenar o bit mais significativo do circuito somador completo. Esse gráfico serve para demonstrar que para o $\bar{n}_2$ de $1,8 \cdot 10^{-17}$ foi encontrada uma saída que se comporta como a saída Carry Out.

Figura 26: Gráfico da saída Carry Out



Para uma melhor visualização do ponto específico em que isso é possível, será mostrado um gráfico aproximado no ponto $\bar{n}_2$ de $1,8 \cdot 10^{-17}$, de forma a dar um *zoom* nessa parte do gráfico, melhorando o entendimento. A Figura 27 mostra o gráfico aproximado no ponto $\bar{n}_2$ $1,8 \cdot 10^{-17}$ do gráfico mostrado na Figura 26. O limiar de potência adotado nessa saída é de 0,8W. Sendo assim, a leitura desse gráfico ocorre com as curvas acima da reta que representa o limiar de potência equivalendo ao nível lógico 1 e as curvas que se encontram abaixo da reta, representando o nível lógico 0. Dessa forma, foi encontrada a saída Carry Out do sistema.

Figura 27: Gráfico da saída Carry Out aproximado no ponto $\bar{n}_2$ $1,8 \cdot 10^{-17}$



A Tabela 4 relaciona os níveis lógicos da saída Carry Out com suas respectivas potências, onde as potências abaixo do limiar de 0,8W são 0 e as potências acima dele são 1.

Tabela 4: Relação de potências e níveis lógicos na saída Carry Out no ponto $\bar{n}_2$ $1,8 \cdot 10^{-17}$

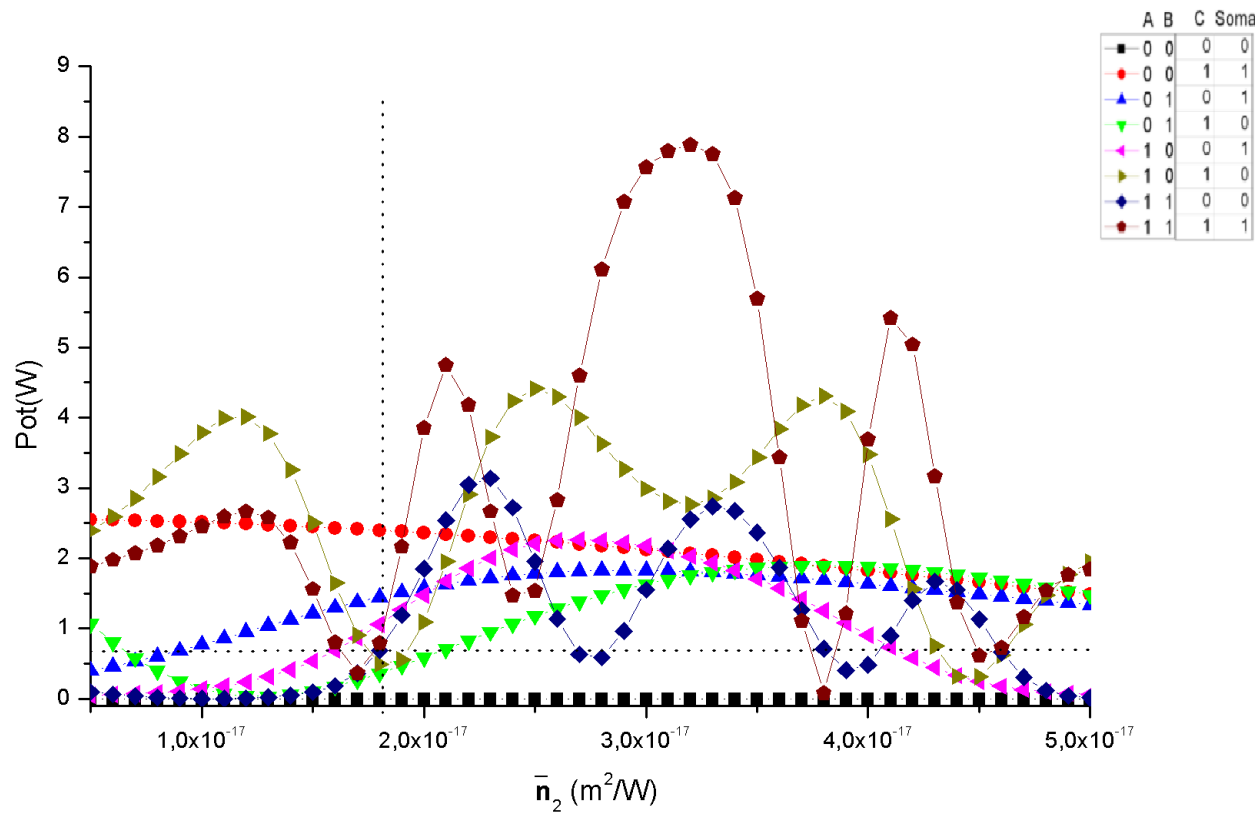
Limiar de potência=0,8W				
A	B	C	Carry Out	Potência
0	0	0	0	0,09W
0	0	1	0	0,76W
0	1	0	0	0,09W
0	1	1	1	1,35W
1	0	0	0	0,05W
1	0	1	1	1,94W
1	1	0	1	0,84W
1	1	1	1	1,44W

4.4 Saída Soma

A saída Soma é representada pelo gráfico da Figura 28. Podemos notar que essa saída também é encontrada no ponto onde o coeficiente de não-linearidade $(\bar{n}_2)$ é

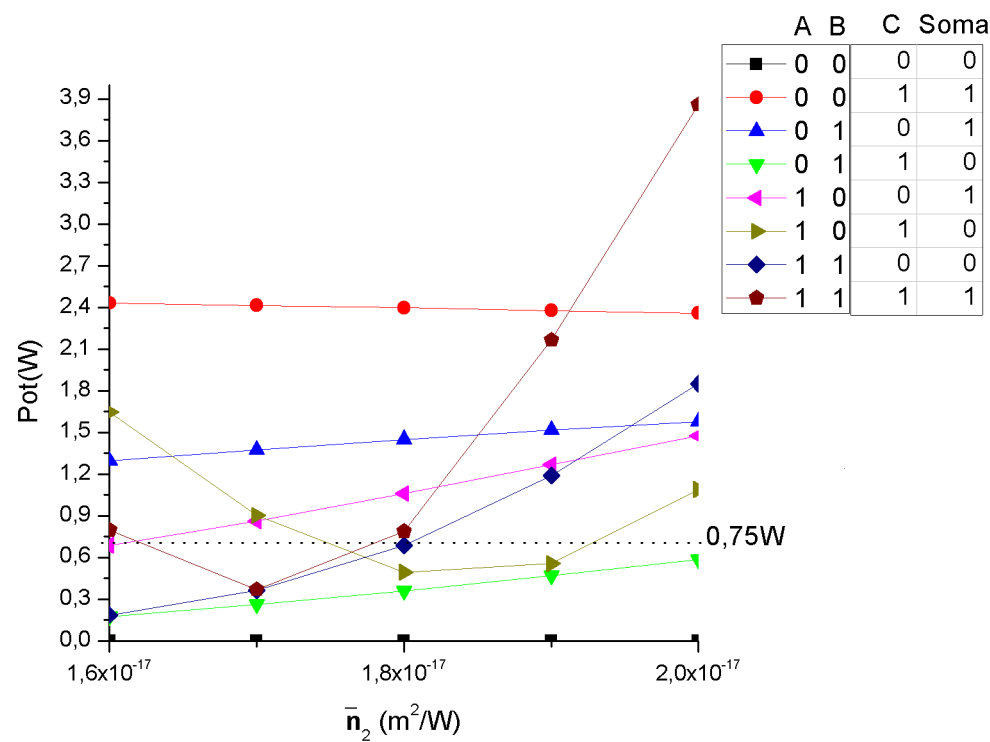
$1,8 \cdot 10^{-17}$.

Figura 28: Gráfico da saída Soma



Para uma melhor visualização da saída Soma, temos uma aproximação(zoom) no ponto $\bar{n}_2$ $1,8 \cdot 10^{-17}$, mostrado pelo gráfico da Figura 29.

Figura 29: Gráfico da saída Soma aproximado no ponto $\overline{n_2} \ 1,8 \cdot 10^{-17}$



O limiar de potência adotado para essa saída é de 0,75W. Sendo as curvas acima do limiar de potência nível lógico 1 e as curvas abaixo, nível lógico 0. Assim temos uma saída que se comporta como a saída Soma de um circuito somador completo. Na Tabela 5 temos a relação entre os níveis lógicos presentes na na saída Soma e seus respectivos níveis de potência.

Tabela 5: Relação de potências e níveis lógicos na saída Soma no ponto $\overline{n_2} \ 1,8 \cdot 10^{-17}$

Limiar de potência=0,75W				
A	B	C	Soma	Potência
0	0	0	0	0,02W
0	0	1	1	2,4W
0	1	0	1	1,45W
0	1	1	0	0,35W
1	0	0	1	1,05W
1	0	1	0	0,5W
1	1	0	0	0,68W
1	1	1	1	0,79W

4.5 Discussão de resultados

Podemos observar, após realizadas as simulações, que para as três entradas do sistema proposto A, B e Controle(C), foram encontradas quatro saídas: Carry Out, Saída 1, Saída 2 e Soma. Dessas saídas, Carry Out e Soma se comportam como saídas de um circuito somador completo, sendo ambas encontradas para um coeficiente de não-linearidade($\bar{n}_2$) de $1,8 \cdot 10^{-17}$.

Esses resultados foram obtidos utilizando pulsos retangulares com potência de pico de 3W na entrada do sistema e cascadeamento de três interferômetros Mach-Zehnder, os quais possuíam 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.

Tabela 6: Tabela representativa dos níveis lógicos do circuito somador completo simulado no trabalho com suas respectivas potências nas saídas Soma e Carry Out no ponto $\bar{n}_2$ $1,8 \cdot 10^{-17}$

Entradas			Saídas			
—			Limiar de potência=0,75W		Limiar de potência=0,8W	
A	B	C	Soma	Potência Soma	Carry Out	Potência Carry Out
0	0	0	0	0,02W	0	0,09W
0	0	1	1	2,4W	0	0,76W
0	1	0	1	1,45W	0	0,09W
0	1	1	0	0,35W	1	1,35W
1	0	0	1	1,05W	0	0,05W
1	0	1	0	0,5W	1	1,94W
1	1	0	0	0,68W	1	0,84W
1	1	1	1	0,79W	1	1,44W

A Tabela 6 mostra as entradas e saídas do circuito somador completo totalmente óptico desenvolvido nesse trabalho, de forma a apresentar que os resultados obtidos nas potências de saída representando níveis lógicos realmente estão em conforme com os níveis lógicos de um circuito somador completo.

Além disso, será feita uma análise comparativa com os trabalhos apresentados no capítulo 4 em relação aos resultados obtidos nesse presente trabalho e a forma como ele foi simulado. Em Roy (2007) foi realizado um circuito somador completo totalmente óptico e assim como neste trabalho, foi utilizado cascadeamento de interferômetros Mach-Zehnder. A diferença entre os trabalhos se encontra na composição e nas quantidades de MZI. O MZI desse trabalho é composto de apenas um braço não-linear, onde se utilizou SPM para gerar interferometria, já no trabalho discutido no capítulo

anterior, ambos os braços do MZI possuíam amplificadores de semicondutor e utilizavam o efeito não-linear XPM para gerar interferometria.

Em relação a quantidade de MZI os dois trabalhos também se diferenciam, pois enquanto o sistema proposto aqui utiliza cascadeamento de três MZI, o sistema proposto por Roy (2007) utiliza sete. Podemos assim perceber que o sistema proposto aqui é bem mais simples, tanto em composição quanto em quantidade de componentes.

No trabalho de Nady, Hussein & Anmar (2013) também foi utilizado interferômetros Mach-Zehnder para a realização do circuito somador completo totalmente óptico. Porém, a composição do MZI também é mais complexa pois utiliza SOA com pontos quânticos e acopladores seletivos em frequência(WSC). Além disso, a estrutura é montada com 5 MZI, funcionando cada qual como uma porta lógica que quando conectadas compõem o sistema, sendo também uma estrutura mais complexa que a apresentada aqui.

Tomando agora como base de comparação os outros dois trabalhos apresentados no capítulo 4, temos propostas de circuitos somador completo totalmente ópticos utilizando técnicas bem diferentes das utilizadas nesse trabalho. Kim *et al.* (2005) utilizou SOA com XGM para montar um sistema baseado em portas XOR e NOR, enquanto Shen *et al.* (2011) baseou seu circuito em guias de onda PPLN cascadeados.

CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusão

Tendo em vista que existe uma grande demanda por maiores velocidades de taxas de transmissão de dados e a comunicação óptica atualmente é a tecnologia existente capaz de suprir essa necessidade, diversos estudos e pesquisas são desenvolvidos nessa área com o intuito de atingir taxas de transmissão comerciais de *Terabits/s*.

Dentre os possíveis avanços na área de fotônica, a eliminação de conversões eletro-ópticas em sistemas de comunicações ópticas, é uma das linhas de pesquisa em foco e alvo de diversos estudos. Um caso importante, por exemplo, é o de circuitos capazes de tomar decisões sobre roteamento e contensão de pacotes em redes ópticas, que atualmente necessitam de conversões eletro-ópticas para funcionarem e que se fossem desenvolvidos dispositivos que conseguissem trabalhar apenas no campo da óptica, iriam operar a taxas de dados bem mais rápidas. Circuitos combinacionais como um circuito somador completo, são dispositivos usados nesse tipo de situação, fazendo com que seja importante desenvolver o estudo desses circuitos de maneira a operar totalmente com óptica.

O circuito foi montado no OptiSystem com três MZI cascadeados, e após algumas simulações foi encontrado que para que o sistema montado no *software* se comportasse como um circuito somador completo totalmente óptico, o coeficiente de não-linearidade do primeiro acoplador de cada interferômetro deveria ser de 20:80 e o segundo de 50:50. Dessa forma, foram encontradas as saídas Soma e Carry Out, que juntamente com as entradas A, B e Controle(C) formam o circuito desejado somador completo totalmente óptico.

5.2 Trabalhos futuros

Alguns aspectos durante a realização desse estudo foram percebidos e servem de recomendações para estudos posteriores, sendo eles:

- Encontrar estruturas mais complexas como latches e flip-flops;
- Aumentar o número de cascadeamento de MZI;

Referências Bibliográficas

AGRAWAL, G. **Nonlinear Fiber Optics**. [S.I.]: Elsevier Science, 2001. (Optics and Photonics). ISBN 9780080479743.

AGRAWAL, G.P. **Applications of Nonlinear Fiber Optics**. [S.I.]: Elsevier, 2008. (Applications of nonlinear fiber optics, v. 10). ISBN 9780123743022.

AGRAWAL, G.P. **Fiber-Optic Communication Systems**. [S.I.]: Wiley, 2012. (Wiley Series in Microwave and Optical Engineering). ISBN 9780470922828.

AMARAL, Julian Torres; AMARAL, Karen Juliana; JANISSEK, Paulo. Potencialidades da análise de fluxo de materiais no processo produtivo de fibras ópticas poliméricas. *Polímeros*, v. 24, n. 3, Maio 2014.

CADMO, Andre.

<http://www.andrecadmo.com.br/2008/08/reflexo-interna-total-um-raio-de-luz.html>: [s.n.], Agosto 2008. Acesso em 4 de dezembro de 2017.

HARBOE, Paula Brandão; SOUZA, José Rodolfo; GODOY, David Santos. 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. *ENGEVISTA*, v. 11, n. 67-77, Julho 2009.

ISLAM, Mohammed N. **Ultrafast Fiber Switching Devices and Systems**. [S.I.]: Cambridge University Press, 1992. (Cambridge Studies in Modern Optics). ISBN 0521431913.

KANEDA, S. Network design and cost optimization for label switched multilayer photonic ip networks. *IEEE J. Select. Areas in Comm*, v. 23, n. 8, 2005.

KIM, Jae Hum; KIM, Sang Hum; SON, Chan Wan; OK, Seong He; KIM, Sung Jim. Realization of all-optical full adder using cross-gain modulation. *Semiconductor Lasers and Applications*, v. 5628, 2005.

LEITE, Léo G. de Magalhães. **WDM - Wavelength Division Multiplexing**. Novembro 2004. Acesso em 15 de julho de 2017. Disponível em: <<https://www.gta.ufrj.br/grad/042/wdm/principal.htm>>.

MENEZES, J. W. M. **Implementação de portas lógicas ópticas com acoplador direcional não linear triplo planar simétrico de fibras ópticas**. [S.I.]: Dissertação(Mestrado em física) - Universidade Federal do Ceará, 2006.

MORDKA, Szajnberg. **Eletrônica Digital: teoria, componentes e aplicações**. [S.I.]: LTC, 2014. ISBN S989e.

NADY, Mohamed; HUSSEIN, Khaild F. A.; ANMAR, Abd-El hadi A. Ultrafast all-optical full adder using quantum-dot semiconductor optical amplifier-based mach-zehnder interferometer. *Progress in Electromagnetics Research B*, v. 54, n. 69-88, Agosto 2013.

OPTIWAVE. <http://www.optiwave.com/site/products/system.html>: [s.n.], 2017. Acesso em 15 de junho de 2017.

PINHEIRO, José Maurício S. **Sistemas de transmissão e meios ópticos**. Julho 2002. Acesso em 16 de julho de 2017. Disponível em: <<http://www.eeec.ufg.br/lguedes/moodle/txdados/fo.pdf>>.

RIBEIRO, J.A.J. **Comunicações ópticas**. [S.l.]: Érica, 2003. ISBN 9788571949652.

ROY, Jitenda Nath. Mach-zehnder interferometer based three architecture for all optical logic and arithmetic operations. Elsevier, Setembro 2007.

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.

SHEN, Jing; YU, Song; LIAO, Ping; CHEN, Zhixiao; GU, Wanyi; GUO, Hong. All-optical full adder based on cascaded ppln waveguides. *IEEE Journal Quantum Electronics*, v. 47, n. 9, Setembro 2011.

SMITH, P. W. Applications of all-optical switching and logic. *The Royal Society*, v. 313, n. 349–355, dezembro 1984. ISSN 0080-4614.

STUBKJAER, K. E. Semiconductor optical amplifier-based all optical gates for high speed optical processing. *IEEE J. Select. Topics Quantum Eletron*, v. 6, n. 1428-1435, 2000.

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.

USKOV, A. V.; BERG, T. W.; MRK, J. Theory of pulse-train amplification without patterning effects in quantum-dot semiconductor optical amplifiers. *IEEE J. Quantum Electron.*, v. 40, n. 306-320, Março 2004.

APÊNDICE B -- Resumo de portas lógicas

Figura 31: Portas lógicas

PORTA	REPRESENTAÇÃO	DESCRIÇÃO	TABELA VERDADE															
NOT (NÃO)		Inverte o sinal de entrada. Se a entrada for 0 então na saída será 1, se na entrada for 1 na saída será 0.	<table><tr><th>A</th><th>S</th></tr><tr><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td></tr></table>	A	S	0	1	1	0									
A	S																	
0	1																	
1	0																	
AND (E)		Se alguma entrada for 0 a saída será 0. Caso contrário será 1.	<table><tr><th>A</th><th>B</th><th>S</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	A	B	S	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1
A	B	S																
0	0	0																
0	1	0																
1	0	0																
1	1	1																
NAND (NÃO-E)		Se alguma entrada for 0 então a saída será 1. Caso contrário será 0. Produz uma saída inversa da porta AND	<table><tr><th>A</th><th>B</th><th>S</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	A	B	S	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0
A	B	S																
0	0	1																
0	1	1																
1	0	1																
1	1	0																
OR (OU)		Se alguma entrada for 1 então a saída será 1. Caso contrário será 0.	<table><tr><th>A</th><th>B</th><th>S</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	A	B	S	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1
A	B	S																
0	0	0																
0	1	1																
1	0	1																
1	1	1																
NOR (NÃO-OU)		Se alguma entrada for 1 então a saída será 0. Caso contrário será 1. Produz uma saída inversa da porta OR.	<table><tr><th>A</th><th>B</th><th>S</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	A	B	S	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0
A	B	S																
0	0	1																
0	1	0																
1	0	0																
1	1	0																
XOR (OU-Exclusivo)		Se as entrada forem iguais a saída será 0. Se forem diferentes será 1.	<table><tr><th>A</th><th>B</th><th>S</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	A	B	S	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0
A	B	S																
0	0	0																
0	1	1																
1	0	1																
1	1	0																
NXOR (NÃO-OU-Exclusivo)		Se as entradas forem iguais a saída será 1. Se forem diferentes será 0. Produz uma saída inversa da porta XOR.	<table><tr><th>A</th><th>B</th><th>S</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	A	B	S	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1
A	B	S																
0	0	1																
0	1	0																
1	0	0																
1	1	1																

Fonte:autor