



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

RODRIGO FRANCO CAVALCANTE

**GERAÇÃO E ANÁLISE DE PORTAS AND E OR TOTALMENTE
ÓPTICAS COM INTERFERÔMETRO DE MACH-ZEHNDER**

FORTALEZA

2017

RODRIGO FRANCO CAVALCANTE

**GERAÇÃO E ANÁLISE DE PORTAS AND E OR TOTALMENTE ÓPTICAS
COM INTERFERÔMETRO DE MACH-ZEHNDER**

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. 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)

CAVALCANTE, RODRIGO FRANCO.

GERAÇÃO E ANÁLISE DE PORTAS AND E OR TOTALMENTE ÓPTICAS COM INTERFERÔMETRO DE MACH-ZEHNDER / RODRIGO FRANCO CAVALCANTE. - 2017.

70 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Engenharia de Telecomunicações, Campus Fortaleza, 2017.

Orientação: Prof. Dr. JOSE WALLY MENDONÇA MENEZES.

1. Optica. 2. Portas Logicas. 3. Interferômetro de Mach - Zehndder. I. Titulo.

CDD 621.382

GERAÇÃO E ANÁLISE DE PORTAS AND E OR TOTALMENTE ÓPTICAS
COM INTERFERÔMETRO DE MACH-ZEHNDER

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. José Wally Mendonça Menezes.

Aprovada em ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Wally Mendonça Menezes (Orientador)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE

Prof. Dr. Daniel Xavier Gouveia (Avaliador)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE

Prof. Dr. Mairton Cavalcante Romeu (Avaliador)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE

Prof. Dr. Amarilio Gonçalves Coelho Junior (Avaliador)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE

Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire (Avaliador)
Universidade Federal do Ceará – UFC

Dedico este trabalho a minha amada esposa Juliana Carla Coelho Cavalcante, ao meu filho Enzo Coelho Cavalcante e a duas pessoas que hoje moram no oriente eterno minha tia Zuma Rodrigues da Silva pelo amor mais puro e verdadeiro que sempre me deu e ao meu irmão, padrinho e avô Joaquim Guimarães Torres da Silva pelos ensinamentos que levarei por toda vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Grande Arquiteto do Universo, que, por nossas obras, nos aproximemos de ti, que és uno, e subsistes por ti mesmo e a quem todos os seres devem a existência. Tudo sabes e tudo dominas invisível aos nossos olhos, guia-nos, para que, sempre perseverantes, cumpramos as tuas leis.

A minha eterna namorada e amada esposa, Juliana Carla Coelho Cavalcante, pela compreensão, companheirismo e acima de tudo pelo total apoio para a realização deste trabalho. Obrigado por fazer parte da minha vida.

Ao meu filho Enzo Coelho Cavalcante, pelo amor mais verdadeiro que pude experimentar nessa vida.

Ao meu irmão Rafael Franco Cavalcante, o qual vi nascer e tenho um enorme carinho, que isso sirva de exemplo para sua caminhada acadêmica.

A minha tia Zuma Rodrigues da Silva (in memoriam) pelo amor mais puro e verdadeiro que pude receber nessa vida e sei onde estiver estará torcendo por mim.

A minha primeira professora Zuraide Rodrigues da Silva que me ensinou as primeiras palavras, sem ela nada seria possível.

As minhas tias Asnar Rodrigues da Silva e Zuleide Silva por estarem sempre ao meu lado em tudo que necessito.

Aos meus avós José Almir Franco da Silva e Raimunda da Silva Franco (Natinha), este pelo exemplo de honestidade e acima de tudo pelos feitos de soldado do Brasil e aquela pelo apoio.

Ao meu irmão, padrinho e avô Joaquim Guimarães Torres da Silva (in memoriam) por ter me ensinado a ser o homem de palavra e responsabilidade que hoje sou.

Ao meu grande amigo José Tarcisio Feitosa por te me apresentado o mundo da Física.

Aos meus comandantes da Marinha do Brasil, Capitães de Fragata Marcelo Gurgel de Souza e Mario Luiz Machado Brandão, aos Capitães de Corveta José Roberto Moura de Souza e James Acampora Bessa Pinto e em especial ao Capitão Tenente Sérgio de Souza Teixeira o primeiro a acreditar nesse projeto.

Ao meu irmão e comandante Osevan Siqueira de Moraes pelo apoio.

Ao meu irmão e orientador professor José Wally Mendonça Menezes ao qual seria impossível expressar a consideração e amizade que nos une, mas acima de tudo pelo apoio. O que nos une será eterno. Obrigado!

Aos professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Telecomunicações (PPGET) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), em especial o professor Dr. Daniel Gouveia Xavier.

Ao meu grande amigo José Alexandre de Castro Bezerra Filho pelo apoio na realização deste trabalho. Sem você não seria possível. Obrigado!

Aos meus colegas e professores do curso de Física: Ronaldo, Bruno, Zidenilton, Diego e em especial o professor Dr. Mairton Cavalcante Romeu o qual considero um irmão pelo apoio e amizade.

Ao meu amigo do curso de Física, Lidsonberg Sousa Rodrigues (in memoriam) que partiu desse mundo de forma repentina. Fica com Deus meu amigo.

Aos meus irmãos espaços pelo mundo.

E por fim aqueles que nunca acreditaram na minha capacidade, vocês me deram força. Obrigado!

“Lembra-te do teu criador nos dias da tua mocidade, antes que venham os maus dias, e cheguem os anos dos quais venham a dizer: Não tenho neles contentamento”. ... “E o pó volte à terra, como era, e o espírito volte à Deus, que o deu”.

(Eclesiastes 12:1-7)

RESUMO

Nessa dissertação, portas lógicas ópticas AND e OR são obtidas através do interferômetro de Mach-Zehnder (MZI) com a presença de não linearidade em fibras ópticas. Como sinais de entrada são utilizados pulso secante hiperbólico. Assim, uma estrutura óptica é criada e implementada no software optisystem onde uma de suas fibras possui não linearidade e os pulsos secante hiperbólico são utilizados como parâmetros de entrada. Em seguida, são realizadas simulações em dois grupos: o primeiro esquemático tem um MZI com dois acopladores 70:30 e 50:50 e controle variando entre 0 e 1 e o segundo esquemático tem dois acopladores 50:50 e 50:50 e controle variando entre 0 e 1, ou seja, teremos dezesseis simulações nesse trabalho. Os resultados serão analisados através de gráficos para potência média, todos esses para as entradas [(0,0), (0,1), (1,0) e (1,1)]. Para todas as simulações são encontradas portas AND e para quatro simulações portas OR.

ABSTRACT

In this dissertation, logic gates AND and OR are obtained by Mach-Zehnder interferometer (MZI) interferometer with the presence of nonlinearity in one of the optical fibers. Hyperbolic secant pulse is used as input signals. Thus, an optical structure is created and implemented in optisystem software where one of its fibers has non-linearity and hyperbolic secant pulses are used as input parameters. Then, simulations are performed in two groups: the first schematic has an MZI with two 70:30 and 50:50 couplers and a control ranging from 0 to 1 and the second schematic has two couplers 50:50 and 50:50 and control varying Between 0 and 1, that is, we will have sixteen simulations in this work. The results will be analyzed through graphs for average power, all of them for the inputs ((0,0), (0,1), (1,0) and (1,1)). For all simulations AND ports are found and for four OR port simulations. At the end, discussions of the results are carried out in addition to presenting a conclusion and proposing some future work.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Ilustração esquemática do telégrafo óptico e seu inventor, Claude Chappe	16
Figura 1.2 – Aumento no produto taxa de bits-distância durante o período 1850 - 2000	
A emergência de uma nova tecnologia é marcada por um círculo negro.....	17
Figura 1.3 - (a) Representação de chave roteadora e (b) Representação das portas lógicas..	18
Figura 2.1 – Representação de uma fibra óptica	22
Figura 2.2 – Seção reta e perfil de índice de refração para fibras de índice em degrau e índice gradual	22
Figura 2.3 – Fenômeno da reflexão da fibra óptica	23
Figura 2.4 – Confinamento da luz por reflexão interna total em fibras de índice em degrau ..	24
Figura 2.5 - Trajetórias de raios em uma fibra de índice gradual	25
Figura 2.6 – Características da fibra óptica	26
Figura 3.1(a) Acoplador Direcional Não Linear (NLDC) e 3.1(b) – Seção transversal do acoplador	32
Figura 3.2 – Acoplador simétrico	33
Figura 3.3 – Acoplador assimétrico	34
Figura 3.4 – Esquema do MZI	36
Figura 4.1 – Configuração proposta	39
Figura 4.2 – Estrutura com dois Interferômetros de Mach-Zehnder de forma continua	40
Figura 4.3 – Estrutura MZI com WDM e SOA	40
Figura 4.4 – Esquema do sistema proposto constituído por fibras de cristal fotônico	41
Figura 4.5 (a) – Esquema do dispositivo e (b) – Circuito baseado no MZI	41
Figura 4.6 – Representação do dispositivo	42
Figura 4.7 – Representação do SOA – MZI na geração da porta lógica AND	42
Figura 4.8 – Configuração da porta XOR totalmente óptica utilizando QD-SOA-MZI	43
Figura 5.1 – Interface gráfica do optisystem	45
Figura 5.2 - Ambiente de simulação do optisystem	45
Figura 5.3 – Representação do Interferômetro de Mach – Zehnder (MZI)	46
Figura 5.4 – Módulo lógico do interferômetro de Mach-Zehnder (MZI)	47
Figura 5.5 – Esquemático do MZI no Optisystem – modelo 01	48

Figura 5.6 – Gráfico da Saída 01 do modelo 01 (controle 0)	50
Figura 5.7- Gráfico da Saída 02 do modelo 01 (controle 0)	50
Figura 5.8 - Gráfico da Saída 03 do modelo 01 (controle 0)	51
Figura 5.9- Gráfico da Saída 04 do modelo 01 (controle 0)	51
Figura 5.10- Gráfico da Saída 01 do modelo 01 (controle 1)	52
Figura 5.11 - Gráfico da Saída 02 do modelo 01 (controle 1)	52
Figura 5.12 - Gráfico da Saída 03 do modelo 01 (controle 1)	53
Figura 5.13- Gráfico da Saída 04 do modelo 01 (controle 1)	54
Figura 5.14 – Representação do Interferômetro de Mach – Zehnder (MZI)	54
Figura 5.15 – Módulo lógico do interferômetro de Mach-Zehnder (MZI)	55
Figura 5.16 – Gráfico da Saída 01 do modelo 02 (controle 0)	58
Figura 5.17 – Gráfico da Saída 02 do modelo 02 (controle 0)	58
Figura 5.18 – Gráfico da Saída 03 do modelo 02 (controle 0)	59
Figura 5.19 – Gráfico da Saída 04 do modelo 02 (controle 0)	59
Figura 5.20 – Gráfico da Saída 01 do modelo 02 (controle 1)	60
Figura 5.21 – Gráfico da Saída 02 do modelo 02 (controle 1)	60
Figura 5.22 - Gráfico da Saída 03 do modelo 02 (controle 1)	61
Figura 5.23 - Gráfico da Saída 04 do modelo 02 (controle 1)	62
Figura 5.24 - Modo esquemático do MZI no programa Optisystem do modelo 01	68
Figura 5.25 - Modo esquemático do MZI no programa Optisystem do modelo 02	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Dados da simulação no Optisystem do modelo 01	49
Tabela 5.2 – Dados da simulação no Optisystem do modelo 02	57
Tabela 5.3 – Analise comparativa dos resultados	62
Tabela 5.4 – Portas Lógicas	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BL – taxa de bits-distância

GVD – velocidade de dispersão de grupo

MMF – fibra multimodo

MZI – interferômetro de Mach – Zehnder

SMF – fibra monomodo

WDM – multiplexagem no comprimento de onda

SPM – auto modulação de fase

XPM – modulação de fase cruzada

NDLC - acoplador direcional não linear

NLSE - equação não-linear de Schorödinger

LISTA DE SÍMBOLOS

α - raio do núcleo.

λ - comprimento de onda da luz.

Δ - diferença relativa do índice núcleo – revestimento.

V – frequência normalizada.

ΔT – intervalo de tempo.

V_g – velocidade de grupo.

$\bar{n}$ - índice modal.

ω – frequência.

L – comprimento da fibra.

c – velocidade da luz no vácuo.

K – coeficiente de acoplamento linear.

A – amplitude do pulso transmitido.

γ – parâmetro de não – linearidade.

SUMÁRIO

1	APRESENTAÇÃO	16
1.1	Introdução	16
1.2	Objetivos	19
1.3	Organização da Dissertação	19
2	COMPONENTES ÓPTICOS	21
2.1	Introdução	21
2.2	Fibra Óptica	21
2.2.1	<i>Fibra de índice em degrau</i>	23
2.2.2	<i>Fibra de índice gradual</i>	24
2.3	Fibra Monomodo	26
2.4	Fibra Multimodo	27
2.5	Dispersões	27
2.5.1	<i>Dispersão modal</i>	28
2.5.2	<i>Dispersão de velocidade de grupo</i>	28
2.6	Não Linearidade na fibra óptica	29
2.6.1	<i>Auto modulação de fase (SPM)</i>	29
2.6.2	<i>Modulação de fase cruzada (XPM)</i>	30
3	ACOPLADORES E INTERFERÔMETRO DE MACH-ZEHNDER	31
3.1	Acopladores	31
3.1.1	<i>Características dos acopladores</i>	31
3.2	Acopladores direcionais e contradirecionais	33
3.3	Acopladores simétricos	33
3.4	Acopladores assimétricos	33
3.5	Acoplador direcional não-linear (NLDC)	34
3.6	Modelagem de acopladores	35
3.7	Acopladores duplos	35
3.8	Interferômetro de Mach-Zehnder (MZI)	36
3.9	Equação não-linear generalizada de Schrödinger	37
3.9.1	<i>Equação não-linear generalizada de Schrödinger na fibra óptica</i>	37
3.9.2	<i>Equação não-linear generalizada de Schrödinger no acoplador</i>	37
3.10	Matriz de transferência do interferômetro Mach-Zehnder	38

4	APLICAÇÕES DO INTERFERÔMETRO DE MACH-ZEHNDER NA GERAÇÃO DE PORTAS LÓGICAS	39
5	A GERAÇÃO DE PORTAS LÓGICAS UTILIZANDO O INTERFERÔMETRO DE MACH – ZEHNDER	44
5.1	5.1 O software optisystem	44
5.2	5.2 Modelo 01 (Coeficiente de Acoplamento 50:50)	46
5.2.1	<i>O interferômetro de Mach-Zehnder - acoplador 50:50</i>	46
5.2.2	<i>Módulo Lógico – acoplador 50:50</i>	46
5.2.3	<i>A simulação no Optisystem</i>	47
5.3	Modelo 02 (Coeficiente de Acoplamento 70:30)	54
5.3.1	<i>O interferômetro de Mach-Zehnder – acoplador 70:30</i>	54
5.3.2	<i>Módulo Lógico – acoplador 70:30</i>	55
5.3.3	<i>A simulação no Optisystem</i>	56
5.4	Discussão dos resultados	62
6	CONCLUSÃO	64
6.1	Conclusão	64
6.2	Trabalhos futuros	64
	Bibliografia	66
	Anexos	68

CAPÍTULO 1 – APRESENTAÇÃO

Muito se tem discutido, recentemente, acerca da velocidade dos sistemas de transmissão de telecomunicações e isso tem despertado cada vez mais o interesse de se conseguir dispositivos totalmente ópticos capazes de processar e tratar informações a velocidade ultra-rápidas.

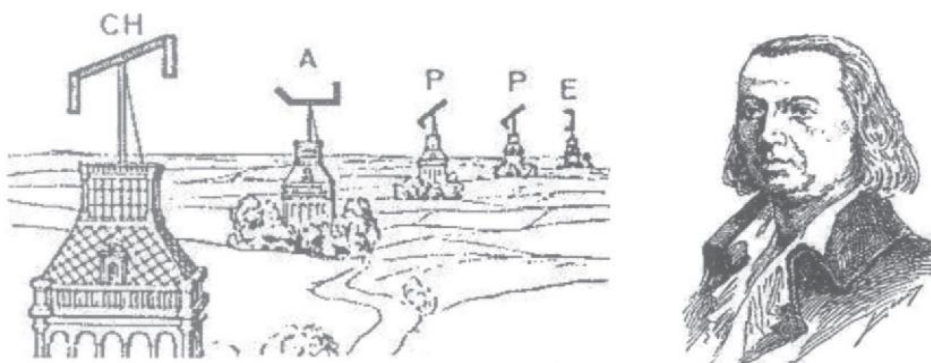
Ao longo deste capítulo apresentaremos um breve histórico das telecomunicações, portas lógicas, dispositivos ópticos e sua velocidade de chaveamento.

1.1 Introdução

Se interpretarmos comunicação óptica em um sentido amplo, observaremos que o uso da luz para propósitos de comunicação data da antiguidade. Espelhos, facho de fogo ou sinais de fumaça eram usados para transmitir uma única peça de informação como, por exemplo, para anunciar a vitória de uma guerra.

Em 1792 Claude Chappe propôs uma transmissão mecânica por uma distância de aproximadamente 100 km de mensagens codificadas, que trazendo para nossa linguagem atual as estações transmissoras atuavam como regeneradores ou repetidores (AGRAWALL,2014).

Figura 1.1 – Ilustração esquemática do telégrafo óptico e seu inventor, Claude Chappe



Fonte: AGRAWALL,2014, p.02

Com o desenvolvimento da tecnologia houve a substituição da luz pela eletricidade iniciando-se assim a era das comunicações elétricas. A taxa de bits (b) pode ser

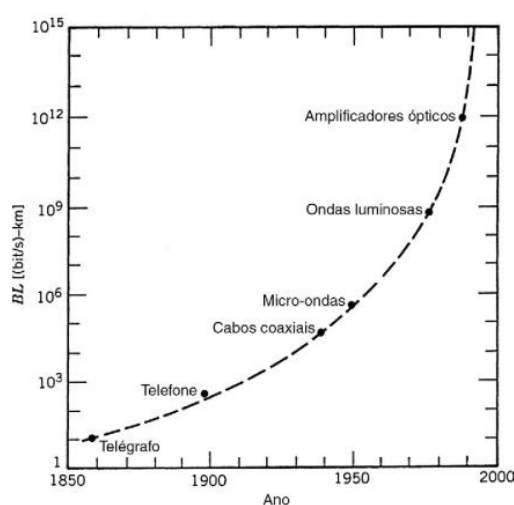
aumentada para 10 bits por segundo (b/s). Com o emprego de novas técnicas de codificação como o Código Morse.

A invenção do telefone em 1876 significou uma grande mudança, pois os sinais elétricos eram transmitidos na forma analógica por meio de uma corrente elétrica de variação contínua.

O desenvolvimento de redes mundiais de telefonia durante o século XX levou a muitos avanços no projeto de sistemas de comunicação elétricos. O uso de cabos coaxiais no lugar de pares de fios aumentou consideravelmente a capacidade de sistemas. (AGRAWALL,2014).

Durante o século XX houve uma evolução do produto taxa de bits – distância (BL), em que B é a taxa de bits e L o espaçamento entre repetidores. A figura 1.2 mostra a evolução da taxa BL no período de 1850 a 2000.

Figura 1.2 – Aumento no produto taxa de bits-distância durante o período 1850 - 2000. A emergência de uma nova tecnologia é marcada por um círculo negro.



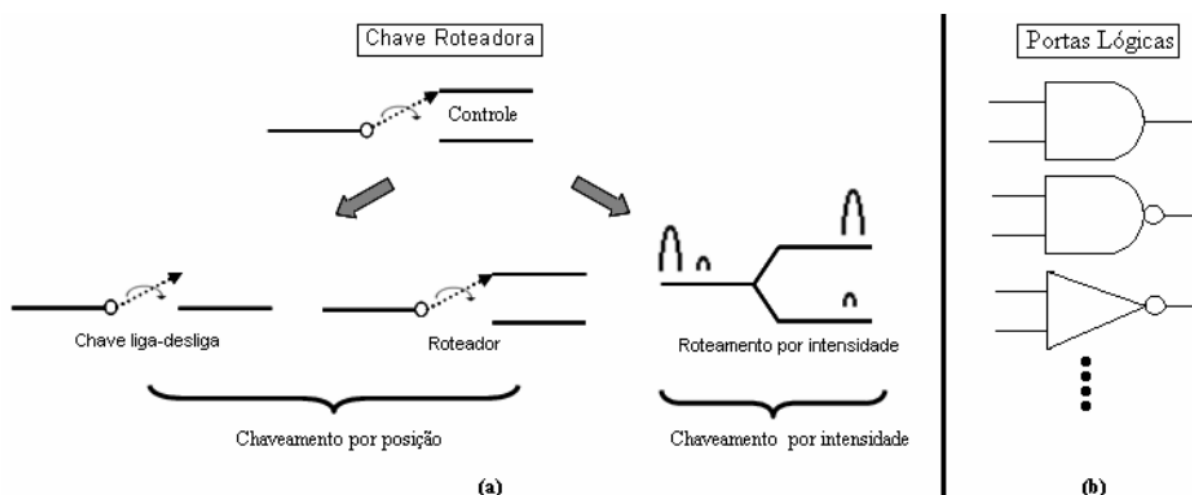
Fonte: AGRAWALL, 2014, p.03

Sabemos que a tecnologia está em constante evolução, sendo assim são esperados sistemas de chaveamento que processem dados de rede a taxas de terabit por segundo (Tbit/s) o que implicará em dispositivos e arquiteturas diferentes das utilizadas atualmente. Estes sistemas futuros podem usar alguns aspectos do chaveamento fotônico e tirar proveito das propriedades inerentes a óptica. A óptica poderá ser utilizada, em operações lógicas paralelas e dispositivos de chaveamento ultra-rápido (MILLER, 1990). Onde os processamentos em

terabit podem ser alcançados usando arranjos paralelos de dispositivos opto - eletrônicos operando em velocidades de megahertz (MHz).

Dispositivos ultra-rápidos podem ser divididos em duas categorias: chave roteadora e portas lógicas. Chave roteadora tem como principal característica ter sua porta de entrada ligada a uma das diversas portas de saída, sendo que o roteamento está baseado na intensidade dos sinais ou por um controle externo. Se somente uma porta de saída é empregada, então a chave roteada trabalha como uma chave liga-desliga. Enquanto a outra categoria portas lógicas é executada de acordo com os valores dos sinais de entrada que obedece a uma operação Booleana na qual é executada de acordo com os valores dos sinais de entrada. A figura 1.3 abaixo representa esquematicamente os dispositivos ultra-rápidos.

Figura 1.3 - a) Representação de chave roteadora e b) Representação das portas lógicas.



Fonte: MENEZES,2006, p.68

Chaves roteadoras e portas lógicas diferem fundamentalmente no modo de controle e na representação da decisão. A chave roteadora representa sua decisão pela posição ou localização do dado, enquanto que a saída da porta lógica tem um nível lógico "0" ou "1". Uma vez que as chaves roteadoras conduzem um dado a partir de uma entrada para uma saída, estes dados transferidos pelas chaves roteadoras podem ser degradados por causa de perdas enquanto nas saídas das portas lógicas digitais o nível dos sinais podem ser regenerados. Operando como um dispositivo de simples entrada e saída, uma porta roteador pode funcionar

como um limitador óptico. Poderíamos citar como exemplo de dispositivo de roteamento o MZI. (MENEZES, 2006)

Outra aplicação importante é a utilização de multiplexadores e demultiplexadores de comprimento de onda em sistemas de comunicação com WDM (multiplexagem no comprimento de onda) para a combinação e separação das diversas portadoras ópticas nos transmissores e receptores (J. A. Brandão Faria, 1994).

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo a geração de portas lógicas ópticas AND e OR utilizando o interferômetro de Mach-Zehnder (MZI) com um dos braços não linear.

De modo a permitir a obtenção do objetivo geral estabelecido, os seguintes objetivos específicos foram determinados:

- a) construção do dispositivo de simulação utilizando o software optisystem.
- b) simulação dos dados variando os acopladores 50:50 e 70:30 do MZI.
- c) coleta dos dados das potências de saída.
- d) análise dos resultados para geração das portas lógicas do tipo AND e OR.

1.3 Organização da Dissertação

Esta dissertação está organizada em seis capítulos. No primeiro capítulo, apresenta-se uma breve introdução contendo a motivação e os objetivos do tema escolhido.

No segundo capítulo, apresenta-se o formalismo teórico referente aos dispositivos ópticos os quais serão necessários para a construção da estrutura que tem como objetivo a geração de portas lógicas AND e OR.

No terceiro capítulo serão apresentados: o interferômetro de Mach-Zehnder (MZI) utilizado na realização das simulações desse presente trabalho, a equação não-linear de Schrödinger e acopladores apresentando suas principais características. Os fundamentos apresentados nesse capítulo juntamente com os descritos no segundo capítulo construirão a base formal para a proposta de geração de portas lógicas.

No quarto capítulo serão apresentadas algumas referências bibliográficas sobre o objeto de estudo do presente trabalho: geração de portas lógicas totalmente ópticas com a utilização do interferômetro de Mach-Zehnder (MZI).

No quinto capítulo serão apresentados os resultados das simulações realizadas no dispositivo construído com o auxílio do software optisystem, com o objetivo de obtenção das portas lógicas totalmente ópticas através do interferômetro de Mach-Zehnder (MZI). E esse objetivo será alcançado com a utilização de efeitos não lineares nas fibras do MZI. As simulações ocorreram variando o controle “0” e “1” como também os acopladores 50:50 e 70:30.

Finalmente o sexto capítulo, apresenta as conclusões gerais, as perspectivas e algumas sugestões para trabalhos de pesquisas futuras e publicações desse trabalho.

CAPÍTULO 2 – COMPONENTES ÓPTICOS

Durante o século XX o campo das telecomunicações passou por grandes transformações, dentre elas poderíamos citar a produção das primeiras fibras ópticas na década de 1920 com o objetivo de aumentar a velocidade de transmissão de informações. Desta forma, uma nova tecnologia foi desenvolvida ao longo de décadas para que as perdas ópticas e os efeitos da não linearidade, dispersão e polarização fossem cuidadosamente compensados.

Ao longo desse capítulo apresentaremos conceitos relacionados à fibra, dispersão e não linearidade na fibra óptica.

2.1 Introdução

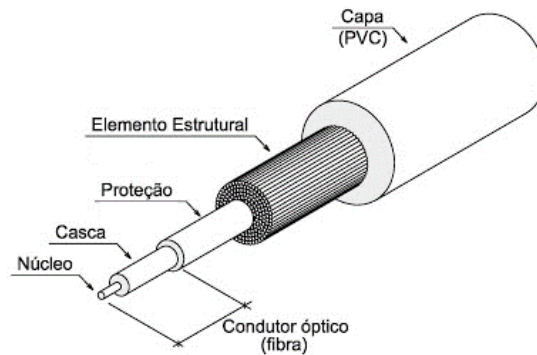
Historicamente as primeiras fibras ópticas foram produzidas na década de 1920 utilizando o princípio da reflexão interna total descoberta em 1854. Porém em 1950 com a adoção de uma camada de casca permitiu considerável melhora nas características do guiamento. Inicialmente as fibras ópticas eram utilizadas na área da medicina na obtenção de imagens em curtas distâncias.

A tecnologia desenvolvida até então não conseguia amenizar altas perdas, com a evolução da ciência essa perda passou a ser de apenas 0,2 (dB/km). A disponibilidade de fibras de baixas perdas não só levou a uma revolução na tecnologia de ondas luminosas, mas também iniciou a era da comunicação por fibra óptica. (AGRAWALL,2014)

2.2 Fibra Óptica

Basicamente uma fibra óptica consiste em um núcleo cilíndrico de sílica envolvido por uma casca de índice de refração menor. A figura 2.1 a seguir representa uma fibra óptica juntamente com os seus componentes básicos.

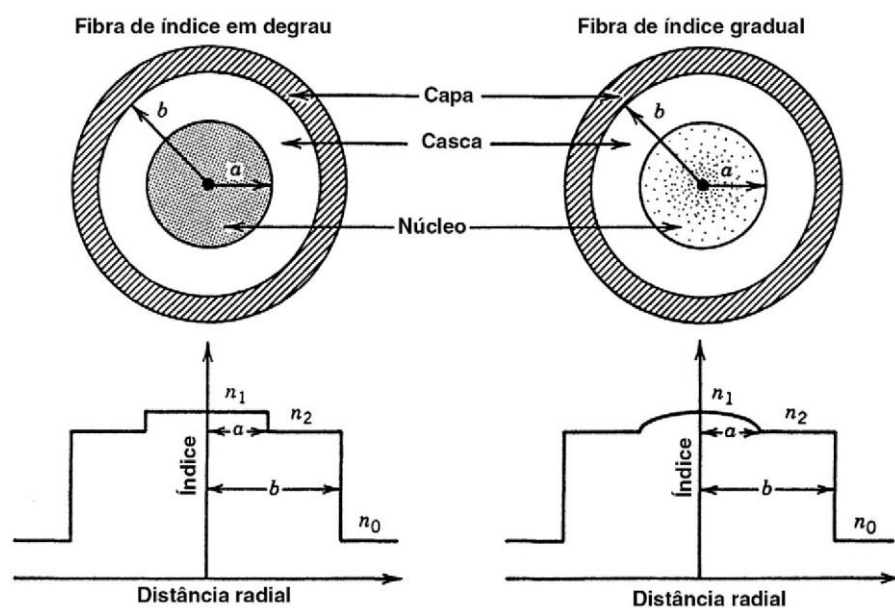
Figura 2.1 – Representação de uma fibra óptica



Fonte: BARRY, 1998, p. 15

Observa-se que as mudanças no índice de refração da interface *núcleo-casca* poderão ocorrer de maneira brusca quando são denominadas fibras de índice em degrau (*step-index fibers*) ou de forma gradual no caso das fibras de índice gradual (*graded-index fibers*). A figura 2.2 mostra de modo esquemático, o perfil de índice e a seção reta dos dois tipos de fibra óptica. (AGRAWALL, 2104)

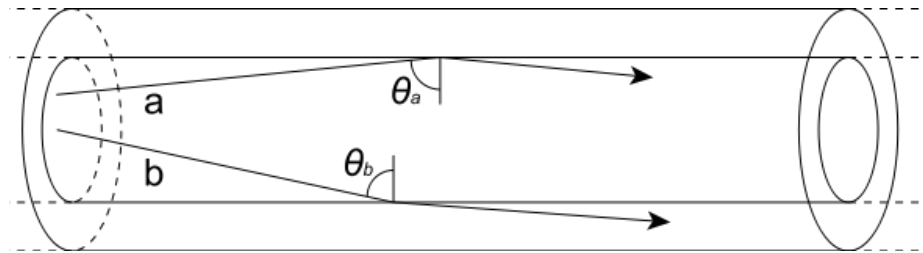
Figura 2.2 – Seção reta e perfil de índice de refração para fibras de índice em degrau e índice gradual.



Fonte: AGRAWALL, 2014, p. 30

Ao se enviar uma luz para o interior de uma fibra óptica ocorrerão sucessivas reflexões internas propagando-se ao longo de sua extensão. A figura 2.3 representa esquematicamente a reflexão da luz em uma fibra óptica. A descrição de óptica geométrica, embora aproximada, é válida quando o raio do núcleo a é muito maior do que o comprimento de onda da luz λ .

Figura 2.3 – Fenômeno da reflexão da fibra óptica



Fonte: AGRAWALL, 2001, p. 26

2.2.1 Fibra de índice em degrau

De acordo com o princípio de funcionamento de uma fibra óptica para que um raio incida no centro do núcleo esse fará com o eixo da fibra um ângulo de incidência (θ_i). Devido à refração da interface fibra-ar, o raio se inclina em direção à normal assim o ângulo θ_r do raio refratado é dado por:

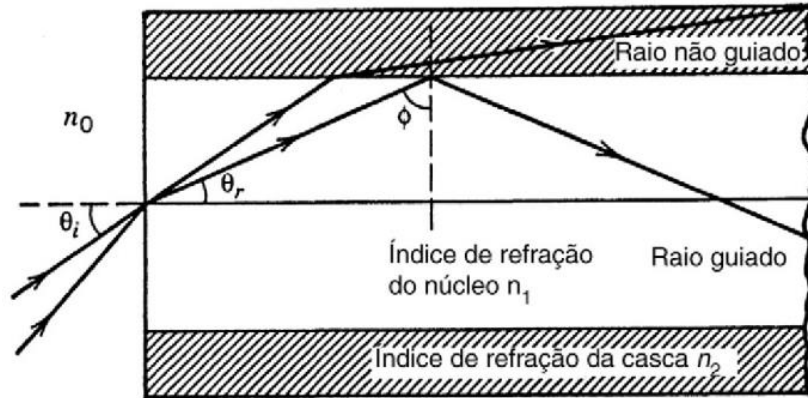
$$n_0 \sin \theta_i = n_1 \sin \theta_r \quad (2.1)$$

em que n_1 e n_0 são os índices de refração do núcleo da fibra e do ar, respectivamente. O raio refratado atinge a interface núcleo-ar e é refratado novamente. Contudo, nessa interface, a refração é possível somente para ângulo de incidência ϕ tais que $\sin \phi < n_2 / n_1$. Para ângulos maiores do que um ângulo crítico ϕ_c , definido por:

$$\sin \phi_c = n_2 / n_1 \quad (2.2)$$

em que n_2 é o índice de refração da casca, o raio sofre reflexão interna total na interface núcleo-casca. Como tais reflexões ocorrem ao longo de todo o comprimento da fibra, todos os raios com $\phi > \phi_c$, permanecem confinados no núcleo da fibra. Esse é o mecanismo básico de confinamento da luz em fibras ópticas. A figura 2.4 representa de modo esquemático o funcionamento de uma fibra de índice degrau.

Figura 2.4 – Confinamento da luz por reflexão interna total em fibras de índice em degrau. Raios com $\phi < \phi_c$ são refratados para fora do núcleo.



Fonte: AGRAWALL, 2014, p.30

2.2.2 Fibra de índice gradual

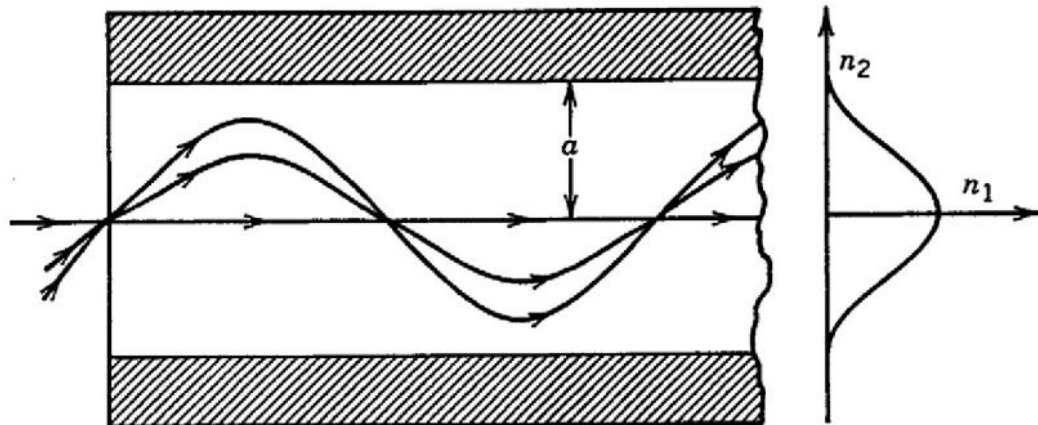
O índice de refração do núcleo de fibras de índice gradual não é constante, mas diminui gradualmente do valor máximo n_1 , no centro do núcleo, para o valor mínimo n_2 , na interface núcleo-casca. A maioria das fibras de índice gradual é projetada para ter diminuição quase quadrática e é analisada por meio do uso de um perfil α dado por:

$$n(\rho) = \begin{cases} n_1[1 - \Delta(\rho/a)^\alpha] & \rho < a \\ n_1[(1 - \Delta) = n_2] & \rho \geq a \end{cases} \quad (2.3)$$

em que a é o raio do núcleo e ρ é a distância radial do eixo ao raio. O parâmetro α determina o perfil de variação do índice de refração. Um perfil de índice em degrau é alcançado no limite de grande valor de α . Uma fibra de perfil parabólico corresponde a $\alpha=2$.

A figura 2.5 representa o percurso de três diferentes tipos de raio em uma fibra do tipo de índice gradual.

Figura 2.5 - Trajetórias de raios em uma fibra de índice gradual.



Fonte: AGRAWALL, 2014, p.33

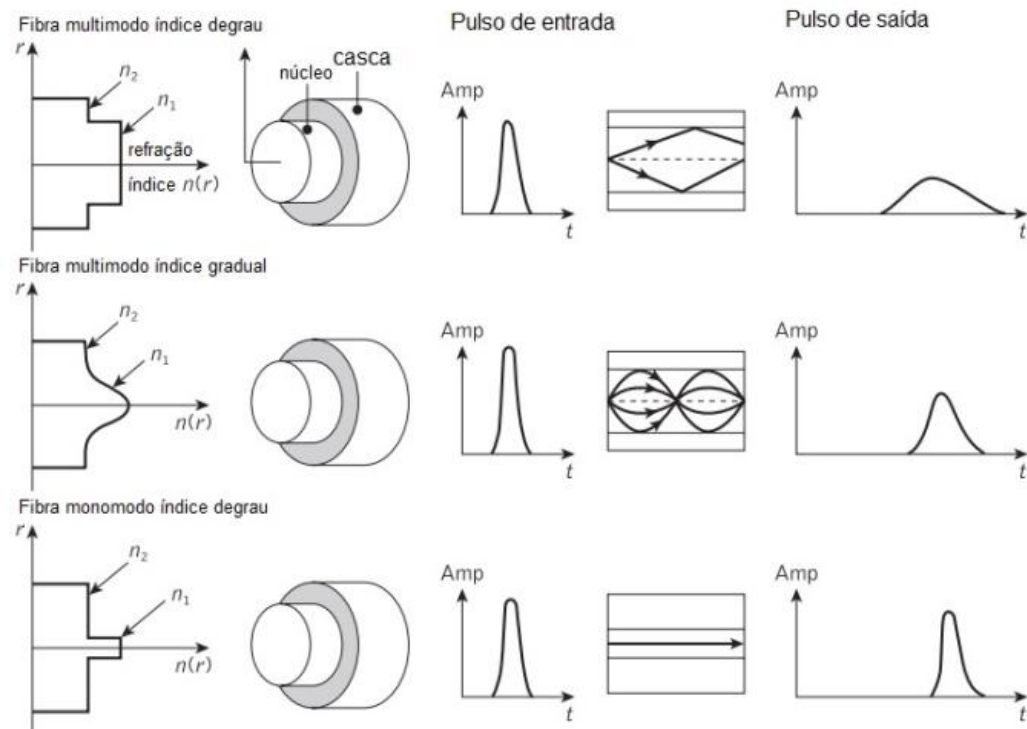
Observando-se cuidadosamente a figura 2.5 pode-se entender que de forma qualitativa a razão da dispersão intermodal ou de multipercurso é reduzida em fibras de índice gradual. A figura representa graficamente o percurso de três diferentes raios, no caso de fibras de índice em degrau, o percurso é mais longo para raios mais oblíquos. Entretanto, a velocidade do raio muda ao longo do percurso, devido às variações do índice de refração, portanto, com a adequada escolha do perfil de índice de refração os raios cheguem ao mesmo tempo na saída da fibra.

De acordo com a tecnologia de construção do núcleo central da fibra, pode ser dividido em duas fibras ópticas em dois grandes grupos:

- a) Fibra óptica do tipo monomodo ou MMF (*multi-mode fibre*).
- b) Fibra óptica do tipo multimodo ou SMF (*single mode fibre*).

A figura 2.6 apresenta de modo esquemático as características da fibra óptica.

Figura 2.6 – Características da fibra óptica



Fonte: AMAZONAS, 2005, p. 46

2.3 Fibra Monomodo

Fibras monomodo são aquelas que se propagam em apenas um único modo, onde o núcleo central possui um índice refrativo representado por $\eta_{\text{núcleo}}$, e a camada de revestimento representado por η_{revest} , onde os mesmos possuem diferentes valores. Nesse estudo analisaremos a geometria da fibra de índice degrau, esta configuração é usada em muitas fibras monomodo convencionais.

A luz pode se propagar numa fibra óptica em um dos modos permitidos, que são distribuições de campo eletromagnético descrito matematicamente por soluções das equações de Maxwell.

As fibras ópticas convencionais podem ser definidas pela diferença relativa de índice núcleo – revestimento (Δ) conforme equação 2.4.

$$\Delta = \frac{\eta_{\text{Núcleo}} - \eta_{\text{Revest}}}{\eta_{\text{Núcleo}}} \quad (2.4)$$

e pela frequência normalizada, V , que determina o número de modos suportados no núcleo para um determinado comprimento de onda da luz, sendo dado cujo α é o raio do núcleo da fibra e λ o comprimento de onda óptico.

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \alpha \sqrt{\eta_{Nucleo}^2 - \eta_{Revest}^2} \quad (2.5)$$

Uma fibra monomodo identifica apenas o modo fundamental, assim, para satisfazer esta condição a frequência normalizada V deve ser inferior a 2,405 (Poli 2007).

2.4 Fibra Multimodo

A principal característica da fibra multimodo é que a mesma é capaz de transmitir o feixe através de vários modos.

A tabela 2.1 apresenta uma comparação entre duas fibras monomodo e multimodo.

Tabela 2.1 – Comparativo entre as fibras monomodo e multimodo

Fibra Monomodo		Fibra Multimodo	
Vantagens	Desvantagens	Vantagens	Desvantagens
Distâncias maiores quando comparadas as fibras multimodo	Pelo fato da pequena dimensão do núcleo da fibra óptica torna-se difícil o alinhamento	Pelo fato do aumento da dimensão do núcleo da fibra óptica torna-se fácil o alinhamento	Distâncias menores quando comparadas as fibras monomodo
Altas taxas de transmissão da ordem de (160Gbit/s)	Alto custo	Baixo custo	Baixa taxa de transmissão

Fonte: Elaborada pelo autor

2.5 Dispersões

Quando sinais ópticos são aplicados em fibras ópticas podem sofrer efeitos causados principalmente por sua propagação, um desses efeitos seria a dispersão o qual causa o alargamento temporal do sinal óptico. Existem basicamente dois tipos de dispersões: modal

e cromática (dispersão material e guia de onda). Nesse trabalho foram estudadas as dispersões: modal e cromática de guia de onda.

2.5.1 Dispersão modal

Este tipo de dispersão só existe em fibras monomodo (degrau e gradual) provocada basicamente pelos vários caminhos possíveis de propagação (modos), todos os modos viajam com a mesma velocidade, pois o índice de refração é constante em todo o núcleo. A principal vantagem das fibras monomodo é a ausência de dispersão intermodal, simplesmente porque a energia do pulso é transportada por um único modo.

Após a inserção de cada raio por diferentes modos chegarão ao final do percurso em tempos distintos, proporcionando um alongamento do pulso no tempo. Esse atraso poderá ser obtido através da equação 2.6.

$$\Delta T = \frac{Ln_1^2}{cn_2} \Delta \quad (2.6)$$

cujo $\Delta = (n_1 - n_2) / n_1$, L é o comprimento da fibra, c é a velocidade da luz no vácuo e n_1 e n_2 os índices de refrações do núcleo e da casca respectivamente. Podemos concluir a partir da equação 2.6 que quanto maior o valor de Δ uma quantidade maior de raios poderão ser acoplados à fibra.

2.5.2 Dispersão de velocidade de grupo

A dispersão de velocidade de grupo (GVD – Group Velocity Dispersion) ocorre quando cada comprimento de onda do pulso óptico viaja com velocidade diferente e como consequência não ocorre a dispersão modal.

Na GVD cada comprimento de onda do pulso viaja com velocidade diferente conseqüentemente o pulso alarga nos domínios do tempo e comprimento de onda ao final do intervalo ΔT o que pode ser observado na equação 2.7.

$$\Delta T = \frac{dT}{d\omega} \Delta \omega = L \beta_2 \Delta \omega \quad (2.7)$$

Se adotarmos $T = L/V_g$, onde V_g é a velocidade de grupo, $\beta = \bar{n}\omega/c$, onde $\bar{n}$ é o índice modal, ω é a frequência, c a velocidade da luz no vácuo e L o comprimento da fibra é fácil notar que a GVD será dada por:

$$\beta_2 = \frac{d^2\beta}{d\omega^2} \quad (2.8)$$

Tomando-se a equação 2.8 e substituindo $\omega = 2\pi c/\lambda$ a representação do GVD no domínio da frequência será dada por:

$$\Delta T = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{L}{V_g} \right) \Delta\lambda = DL\Delta\lambda \quad (2.9)$$

Cujo D é definido como sendo parâmetro de dispersão que pode ser obtido através da soma de outras duas dispersões (material e guia de onda). Segundo Agrawal, (2014) essa dispersão material ocorre quando o índice de refração da sílica muda com a frequência óptica. Segundo Okamoto, (2010) a dispersão de guia de onda é uma dispersão no atraso do tempo causado pelo confinamento da luz na estrutura do guia de onda.

2.6 Não Linearidade na fibra óptica

Durante a transmissão de um sinal óptico através de uma fibra, existem possibilidades de interação entre a luz e o meio através da absorção do sinal e/ou dispersões. Existem outros fenômenos que ocorrem com o sinal ao longo das fibras, um deles é conhecido como efeito não linear. Outro fator seria a grande distância do meio de transmissão, onde pode ocorrer o acúmulo desses efeitos não lineares, piorando a transmissão do sinal.

Serão apresentados a seguir dois desses efeitos não lineares: auto modulação de fase (SPM) e modulação de fase cruzada (XPM).

2.6.1 Auto modulação de fase (SPM)

A auto modulação de fase (*Self Phase Modulation* – SPM) é um fenômeno que depende basicamente de dois fatores: o coeficiente de não linearidade e a potência do próprio sinal. A fase do campo eletromagnético depende do índice de refração do meio e como o índice de refração depende da potência do sinal então a fase depende também da potência, ou

seja, a potência do campo induz a modulação da fase do próprio campo durante a sua propagação na fibra, daí a razão do nome de Auto-Modulação de Fase (SPM).

Visto que o SPM refere a fase que o campo adquire durante a propagação e não a forma do pulso, após uma distância de propagação Z , a magnitude da SPM pode ser obtida pela equação 2.10 (PEREIRA,2012).

$$\phi = \tilde{n}(\omega, |E|^2)K_0Z = (n + n_2|E|^2)K_0Z \quad (2.10)$$

cujo $K_0 = 2\pi/\lambda$. O desvio não linear de fase depende da intensidade do próprio campo elétrico durante a propagação é dado pela equação 2.11.

$$\phi_{NL} = n_2 k_0 |E|^2 Z \quad (2.11)$$

2.6.2 Modulação de fase cruzada (XPM)

O fenômeno da Modulação de Fase Cruzada (Cross Phase Modulation – XPM) ocorre quando dois ou mais pulsos ópticos com comprimentos de ondas diferentes se propagam na mesma fibra. A XPM vem sempre acompanhada da SPM e ocorre porque a variação do índice de refração não depende apenas da intensidade do próprio pulso óptico mas sim pela intensidade de todos os pulsos que propagam na fibra, ou seja a variação de fase não linear induzida num campo elétrico é provocada pela presença de outros campos elétricos com comprimentos de ondas diferentes.

CAPÍTULO 3 – ACOPLADORES E INTERFERÔMETRO DE MACH-ZEHNDER

Conforme apresentado no capítulo 01 os sistemas de transmissão de telecomunicações passam por um aumento contínuo da velocidade o que vem aumentando o interesse de se conseguir dispositivos totalmente ópticos capazes de processar e tratar informações a velocidades ultra-rápidas. Sendo assim vários dispositivos ópticos, passivo ou ativos, forma e continuam sendo desenvolvidos para este propósito. Entre esses dispositivos, podemos citar os acopladores, que desempenham um papel importantíssimo nos circuitos ópticos, e em particular, no estudo de chaveamento de energia a níveis ultra-rápidos. Apresentaremos nesse capítulo os principais conceitos relacionados aos acopladores fibra.

3.1 Acopladores

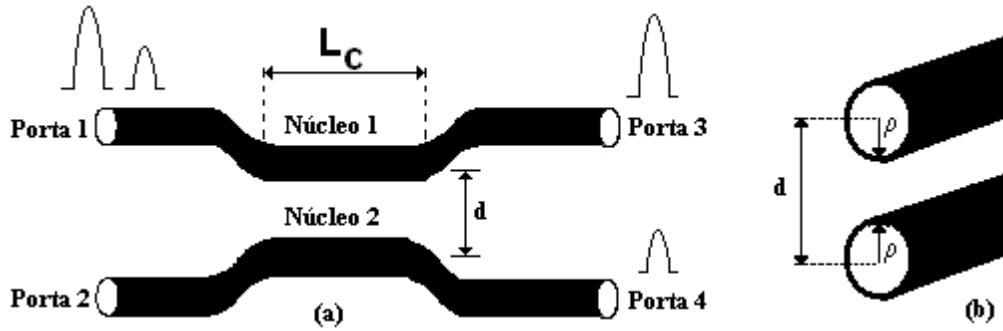
Os acopladores fibra, também conhecidos como acopladores direcionais, constituem os dispositivos essenciais nos sistemas ópticos. Estes são utilizados quando houver necessidade da divisão do feixe óptico em outros dois feixes coerentes. Nesta dissertação, estudaremos focados exclusivamente em acopladores direcionais baseados em fibras.

Em óptica integrada a fabricação de acopladores ópticos ocorre por meio do crescimento de materiais com índices de refração diferentes para construir uma estrutura multicamadas. No caso dos acopladores baseados em fibra é necessária a modificação na estrutura do acoplamento para ocorrer aproximação dos núcleos das fibras. Sendo assim será possível a produção de diferentes taxas de acoplamento pela simples variação das condições de propagação em cada um dos guias.

3.1.1 Características dos acopladores

Os acopladores fibra são constituídos por duas fibras ópticas paralelas separadas por uma distância “ d ”. Os acopladores, na sua configuração mais simples, são geralmente dispositivos de 4(quatro) portas, duas de entrada e duas de saída, cuja função é dividir coerentemente o feixe óptico incidente em uma das portas de entrada e direcioná-lo para as portas de saída. Conforme figura 3.1a e 3.1b.

Figura 3.1(a) Acoplador Direcional Não Linear (NLDC) e 3.1(b) – Seção transversal do acoplador.



Fonte: MENEZES, 2016, p. 17

Observe que seus núcleos são próximos de tal maneira que os modos de propagação de cada núcleo sobrepõem-se parcialmente na região da casca entre os dois núcleos. Esse arranjo é de tal maneira que permite transferência de potência óptica entre os núcleos. Esta transferência de potência está diretamente relacionada com a potência crítica P_C , que é a potência necessária para obter transferência de 50% entre os guias do acoplador. A potência crítica pode ser determinada através da equação 3.1.

$$P_C = \frac{S\lambda}{n_{CL}L_C} \quad (3.1)$$

em que S representa a área da 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 3.1a, o comprimento L_C é definido na equação 3.2.

$$L_C = \frac{\pi}{2K} \quad (3.2)$$

onde K é o coeficiente de acoplamento linear entre os guias adjacentes. Relacionando-se as equações 3.1 e 3.2 podemos concluir que a P_C é inversamente proporcional ao comprimento de acoplamento.

Nas simulações desse trabalho foram utilizados acopladores de fibra na construção da estrutura do interferômetro de Mach-Zender os quais são lineares e simétricos.

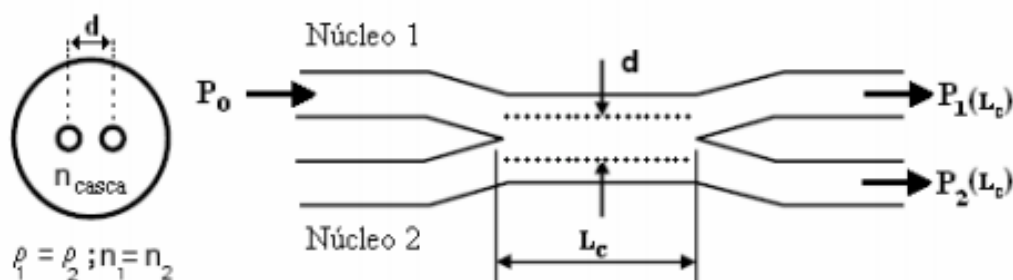
3.2 Acopladores direcionais e contradirecionais

Em um acoplador, se o sentido do campo chaveado for igual ao do campo incidente, esse acoplador é denominado acoplador direcional ou copropagante, caso o sentido seja contrário, ele é denominado contrapropagante ou contradirecional.

3.3 Acopladores simétricos

Basicamente dois fatores definem os acopladores simétricos: raio do núcleo e o índice de refração. Nesse tipo de acoplador os raios dos seus núcleos possuem a mesma medida ($\rho_1 = \rho_2$) assim como os seus índices de refração ($n_1 = n_2$). Sendo assim nos acopladores direcionais simétricos, a diferença entre os dois modos dos núcleos é constante e igual a zero. A figura 3.2 a seguir mostra a representação de um acoplador simétrico.

Figura 3.2 – Acoplador simétrico



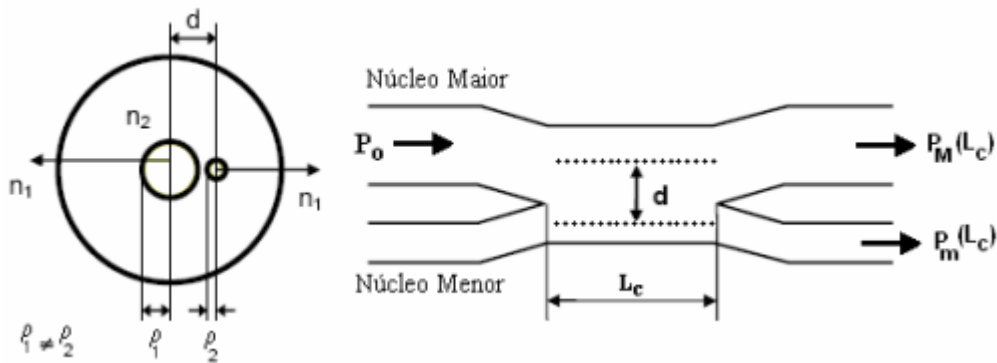
Fonte: MENEZES, 2016, p.72

3.4 Acopladores assimétricos

Os acopladores assimétricos possuem estruturas semelhantes aos acopladores simétricos porém seus núcleos possuem diferentes formas ou tamanhos, por esse motivo o acoplamento em um acoplador direcional assimétrico ocorrerá de forma mais complicada quando comparado ao acoplador simétrico pois teremos diferentes velocidades de fases nos dois núcleos.

A figura 3.3 a seguir mostra a representação de um acoplador assimétrico, note que os índices “M” e “m” referem-se aos núcleos maior e menor respectivamente.

Figura 3.3 – Acoplador assimétrico



Fonte: MENEZES,2016, p.72

3.5 Acoplador direcional não-linear (NLDC)

A partir das equações de Maxwell, é possível obter uma equação de onda para campos que se propagam em um meio dielétrico. Num guia planar ou numa fibra óptica, onde há ausência de cargas livres e propriedades magnéticas apreciáveis, temos que tanto a densidade de corrente J_f quanto a densidade de cargas são nulas. A equação geral descreve a evolução de um campo óptico em um meio dielétrico é dada pela equação 3.3 (AGRAWALL,2001).

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = -\mu_0 \left[\frac{\partial^2 \mathbf{P}(\mathbf{E})}{\partial t^2} \right] \quad (3.3)$$

onde $\mathbf{E}$ é o vetor campo elétrico, μ_0 é a permeabilidade do vácuo, $\mathbf{P}$ é a densidade de polarização em função do campo elétrico e c é a velocidade da luz em função da permissividade ϵ_0 sendo representada pela equação 3.4 (AGRAWALL,2001).

$$c = \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0} \quad (3.4)$$

O efeito da não-linearidade dá origem a vários efeitos, dependendo das condições com que o sinal óptico é bombeado no guia. Dentre eles estão a automodulação de fase (SPM) e a modulação de fase (XPM). Inúmeras são as aplicações para esses efeitos, dentre elas podemos citar o chaveamento óptico, implementação de portas lógicas ópticas e compressão de pulsos.

3.6 Modelagem de acopladores

Para descrever a propagação de pulso neste dispositivo é necessária uma equação de evolução para cada uma das fibras que constituem o acoplador e cada equação deverá conter o termo de acoplamento entre os guias. Nossa abordagem irá considerar somente a presença dos efeitos devido a não-linearidade e a dispersão de velocidade de grupo (β_2).

A modelagem do acoplador é feita por um sistema de equações diferenciais acopladas e este sistema está fundamentado na equação não-linear de Schorödinger (NLSE) sendo o sistema que descreve um acoplador direcional de n fibras semelhantes dado pela equação 3.5.

$$i\frac{\partial A_j}{\partial z} - \frac{1}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A_j}{\partial t^2} + \gamma |A_j|^2 A_j + S_j (A_k, A_j, A_k^*, A_j^*) = 0 \quad (j=1,2,3,\dots,n \text{ e } k \neq j) \quad (3.5)$$

Este sistema de equações para um acoplador com n núcleos acoplados tem n equações diferenciais. O índice j refere-se ao pulso que se propaga na fibra j , k nas demais fibras, e o asterisco representa o complexo conjugado do campo. O termo de acoplamento S_j depende do tipo de processo que gera o acoplamento considerado. Esses processos de acoplamento podem ser lineares ou não lineares nas amplitudes dos pulsos dos guias e ainda podem conter termos cruzados que dependem simultaneamente da amplitude do pulso em evolução e dos demais campos (MENEZES,2006).

3.7 Acopladores duplos

A partir da equação não-linear de Schorödinger (NLSE) podemos escrever as equações que descrevem a dinâmica de um acoplador duplo, em que os efeitos de não linearidade do tipo Kerr, dispersão de velocidade de grupo e acoplamentos lineares são considerados. Assim para, acopladores duplos, como o da figura 3.1a, temos:

$$i\frac{\partial A_1}{\partial z} - \frac{1}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A_1}{\partial t^2} + \gamma |A_1|^2 A_1 + CA_2 = 0 \quad (3.6 \text{ (a)})$$

$$i\frac{\partial A_2}{\partial z} - \frac{1}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A_2}{\partial t^2} + \gamma |A_2|^2 A_2 + CA_1 = 0 \quad (3.6 \text{ (b)})$$

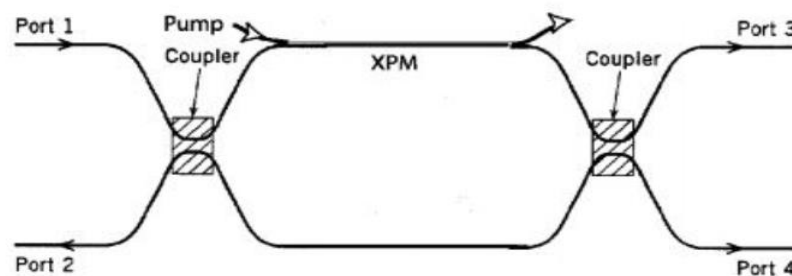
onde A_j é a intensidade de campo no guia j ($j=1,2$), γ é o coeficiente de automodulação de fase e β_2 é a dispersão de velocidade de grupo.

O parâmetro β_2 na equação 3.3 pode assumir um valor positivo ou negativo. No regime de dispersão normal ($\beta_2 > 0$) os efeitos do GVD e SPM podem ser usados para técnicas de compressão de pulsos ao passo que no regime de dispersão anômalo ($\beta_2 < 0$) os efeitos do GVD e SPM permitem que o sistema suporte pulsos solitônicos.

3.8 Interferômetro de Mach-Zehnder (MZI)

O interferômetro Mach-Zehnder (MZI) é uma estrutura capaz de causar interferência entre sinais de luz, originando um padrão chamado de interferometria. Essa estrutura poderá ser criada quando conectamos dois acopladores sequenciados de forma que cada saída do primeiro acoplador seja conectada a entrada do segundo acoplador através de duas fibras. Para se gerar a interferometria devemos alterar a estrutura do MZI, várias maneiras poderão ser utilizadas dentre elas as mais comuns são: utilizar duas fibras de tamanhos diferentes causando o deslocamento de fase (AGRAWALL, 2001) e a modulação de fase cruzada (XPM) que consiste em mudar um dos braços (AGRAWALL 2004). Observe que na figura as portas de entrada recebem a nomenclatura de Port 1 e Port 2 e as portas de saída nomenclaturas Port 3 e Port 4.

Figura 3.4 – Esquema do MZI



Fonte: AGRAWALL, 2004, p.43

Os MZI são constituídos basicamente de dois acopladores direcionais 3 dB interligados através de duas fibras de comprimentos diferentes. Esses MZI são constituídos geralmente de silício e nas regiões do guia de onda e revestido de sílica (SiO_2). Essas estruturas são muito úteis como filtros e multiplexadores/demultiplexadores.

3.9 Equação não-linear generalizada de Schrödinger

A equação não-linear de Schrödinger (NLSE) é o modo utilizado para descrever a propagação do pulso eletromagnético na fibra óptica. Será apresentada a seguir a NLSE na fibra e no acoplador.

3.9.1 Equação não-linear generalizada de Schrödinger na fibra óptica

No caso da fibra óptica a NLSE é representada pela equação 3.7.

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \frac{1}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} + \frac{\alpha}{2} A = i\gamma A \left[|A|^2 + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial(|A|^2 A)}{\partial t} - T_R A \frac{\partial |A|^2}{\partial t} \right] \quad (3.7)$$

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:

$$\gamma = \frac{2\pi\bar{n}_2}{A_{eff}\lambda} \quad (3.8)$$

onde $\bar{n}_2$ é o coeficiente de índice não linear [m^2W^{-1}], A_{eff} área efetiva do núcleo [μm^2] e λ comprimento de onda [μm]. Para pulso de largura temporal maior que 5 ps, os parâmetros $(\omega_0 T_R)^{-1}$ e T_R/T_0 são tão pequenos ($<0,001$) que esses dois últimos termos na equação 3.1 são negligenciados (AGRAWALL, 2007). No presente trabalho os pulsos apresentados possuem largura temporal de 10ps. Sendo assim a equação 3.6 ficará reduzida a:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \frac{1}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} + \frac{\alpha}{2} A = i\gamma A |A|^2 \quad (3.9)$$

neste trabalho, os parâmetros β_1 , β_2 , β_3 e α serão nulos pois para todas as simulações realizadas os fatores de dispersões e atenuação não afetam, somente a não linearidade na fibra do MZI.

3.9.2 Equação não-linear generalizada de Schrödinger no acoplador

Podemos utilizar a equação 3.9 para cada fibra do acoplador para isso teremos que inserir um termo que represente a interação realizada na região de acoplamento e o efeito

XPM conforme mostrado na figura 3.4. sendo assim haverá uma ENLGS para cada saída de um acoplador, chamada de equação do modo acoplado.

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A_1}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A_1}{\partial t^2} = ikA_2 + i\gamma(|A_1|^2 + \sigma|A_2|^2)A_1 \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A_2}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A_2}{\partial t^2} = ikA_2 + i\gamma(|A_2|^2 + \sigma|A_1|^2)A_2 \quad (3.11)$$

onde K representa o coeficiente de acoplamento, e σ é o parâmetro relacionado ao XPM. Note que os coeficientes de α e β_3 não aparecem, pois o acoplador presente nas simulações não apresentam perdas e devido ao pulso utilizado ter largura espectral muito menor do que sua frequência central β_3 é descartado.

3.10 Matriz de transferência do interferômetro Mach-Zehnder

Na situação mostrada na figura 3.4, serão utilizadas as equações 3.10 e 3.11 como sinais de entrada para o segundo acoplador. Observe que o sinal propagado pelo braço bar sofre efeito XPM, logo esse mesmo sinal irá entrar no segundo acoplador pela equação abaixo:

$$A_1 = \sqrt{\rho_1} A_0 \exp(i\beta_1 L_1 + i\rho_1 \gamma |A_0|^2 L_1) \quad (3.12)$$

De modo semelhante entrando pela porta inferior do segundo acoplador teremos:

$$A_2 = i\sqrt{1 - \rho_1} A_0 \exp(i\beta_2 L_2 + i(1 - \rho_1) \gamma |A_0|^2 L_1) \quad (3.13)$$

Note que para ambas as equações, L_1 e L_2 são os comprimentos dos braços, β_1 e β_2 são as constantes de propagação (valores diferentes dos β expressos nas equações (3.7, 3.9, 3.10 e 3.11) e ρ_1 e ρ_2 são as frações de divisão de potência nos acopladores. Assim, semelhante ao procedimento no acoplador, é possível definir uma matriz de transferência para o MZI, abaixo apresentada.

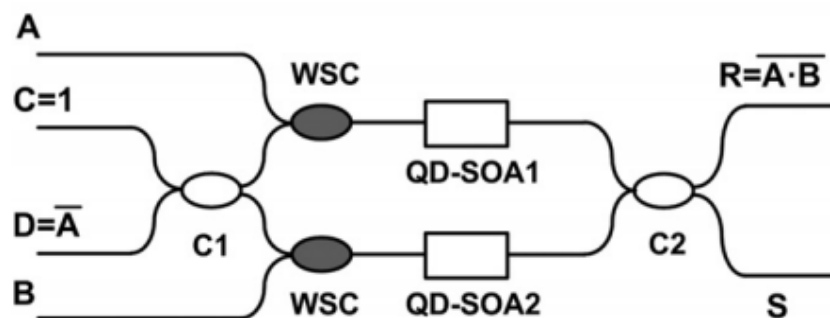
$$\begin{pmatrix} A_3 \\ A_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{\rho_2} & i\sqrt{1 - \rho_2} \\ i\sqrt{1 - \rho_2} & \sqrt{\rho_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} \quad (3.14)$$

CAPÍTULO 4 – APLICAÇÕES DO INTERFERÔMETRO DE MACH-ZEHNDER NA GERAÇÃO DE PORTAS LÓGICAS

Este capítulo apresentará o referencial teórico que foi abordado nesta dissertação, procurando fundamentar os estudos relativos que trabalham com o interferômetro de Mach-Zehnder (MZI) e os efeitos não lineares no desenvolvimento de dispositivos com a finalidade de geração de portas lógicas.

Em E. Dimitriadou, K.E. Zoiros (2011) é possível encontrar uma porta NAND totalmente óptica, incorporando amplificadores ópticos de semicondutores de ponto quântico (QD-SOA) num interferômetro de Mach-Zehnder (MZI). O esquema proposto utiliza o MZI baseado em QD-SOA numa configuração em que o AD-SOA num braço MZI está sujeito à primeira seqüência de dados, o QD-SOA no outro braço não recebe tal entrada, mas é mantido por um regime de ganho de sinal.

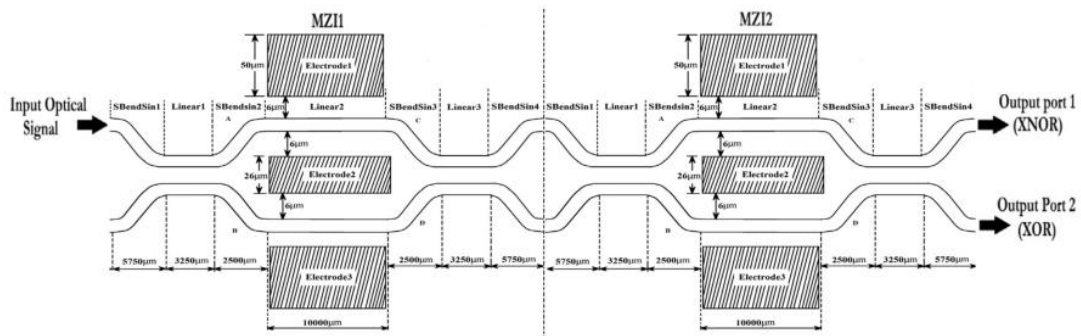
Figura 4.1 – Configuração proposta



Fonte: Dimitriadou, K.E. Zoiros (2011)

No trabalho de Kumar, Kumar & Raghuwanshi (2014) é possível encontrar portas XOR, NXOR e AND com o auxílio de dois interferômetros de Mach-Zehnder (MZI) conectados a uma plataforma contínua. Vale lembrar que em cada um dos MZI tem-se a variação dos índices de refração para cada fibra da estrutura MZI.

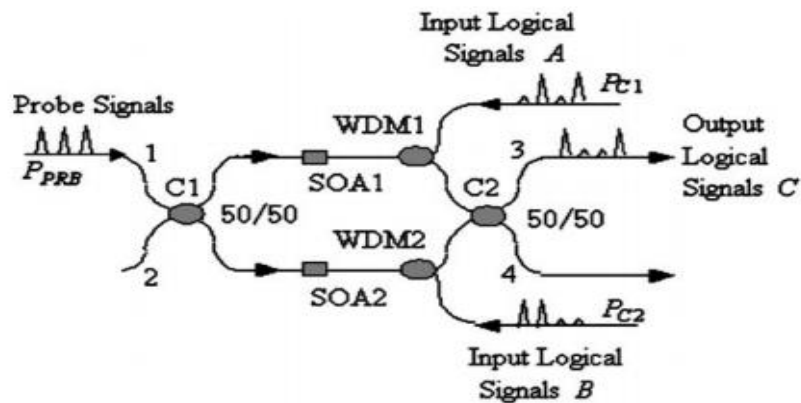
Figura 4.2 – Estrutura com dois Interferômetros de Mach-Zenhder de forma contínua.



Fonte: Kumar, Kumar & Raghuwanshi (2014)

Em Zhang *et al* (2003) há geração de porta lógica XOR usando dois tipos de semicondutores ópticos baseados no Interferômetro de Mach-Zenhder (MZI) utilizando amplificador óptico de semiconductor (SOA) em cada braço do MZI. Conforme mostrado na figura abaixo um sinal de clock é entrada do MZI e depois do primeiro acoplador (50:50), os sinais passam por um SOA e WDM. Na saída do MZI (C) encontra-se a porta lógica XOR.

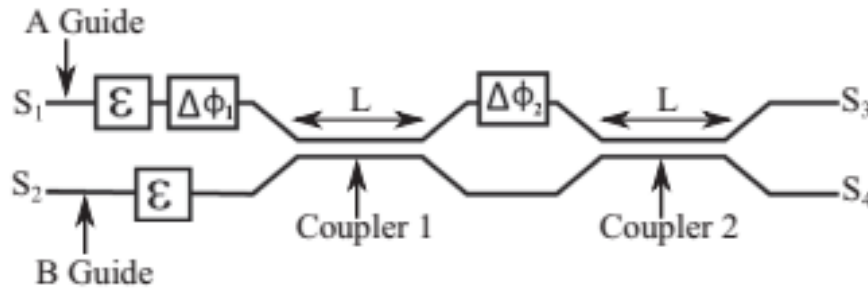
Figura 4.3 – Estrutura MZI com WDM e SOA.



Fonte: Zhang *et al* (2003)

No trabalho de Araujo *et al* (2015) é proposto a obtenção de portas lógicas AND e OR quando dois sinais lógicos são modulados na entrada do Interferômetro de Mach-Zenhder (MZI), de modo que teremos a porta OR na primeira saída e a porta AND na segunda saída. Neste modelo o MZI é constituído por fibra de cristal fotônico não-linear.

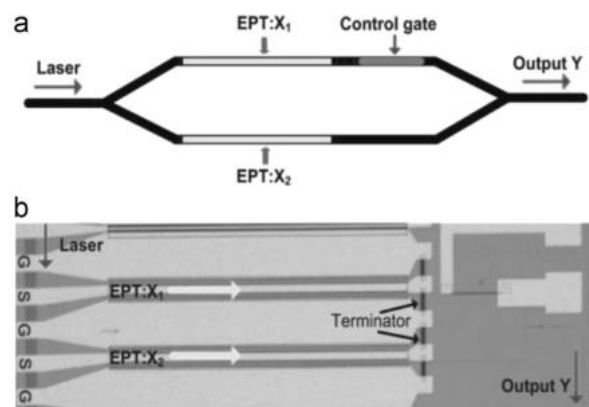
Figura 4.4 – Esquema do sistema proposto constituído por fibras de cristal fotônico.



Fonte: Antonio Araujo *et al* (2015)

Em Ding *et al* (2015) é possível a obtenção de portas lógicas XNOR e XOR direcionada baseada no MZI de silício. O dispositivo trabalha com braços simétricos insensível ao comprimento de onda na faixa de 40nm. O dispositivo tem largura de banda de cerca de 20GHz quando o dispositivos estiver polarizado nos pontos de transmissão máximo ou mínimo é possível obter as portas XNOR e XOR respectivamente a uma velocidade de até 20 Gbps.

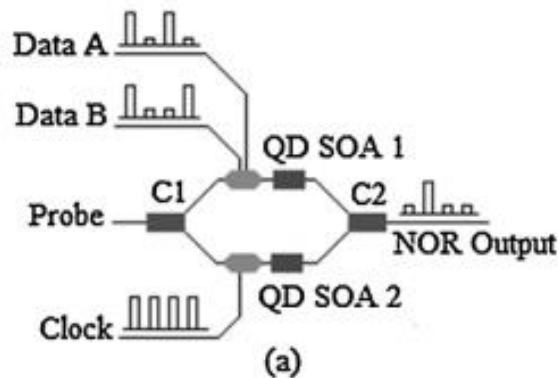
Figura 4.5 (a) – Esquema do dispositivo e (b) – Circuito baseado no MZI.



Fonte: Ding *et al* (2015)

O artigo de Nurmohammadi *et al* (2013) propõe a obtenção de porta lógica NOR baseado no MZI e usando o amplificador óptico de semiconductor quântico (QD-SOA) fim obter operação de taxa de bit alta. O modelo consegue obter porta lógica NOR em dois casos: com e sem impulso de controle óptico.

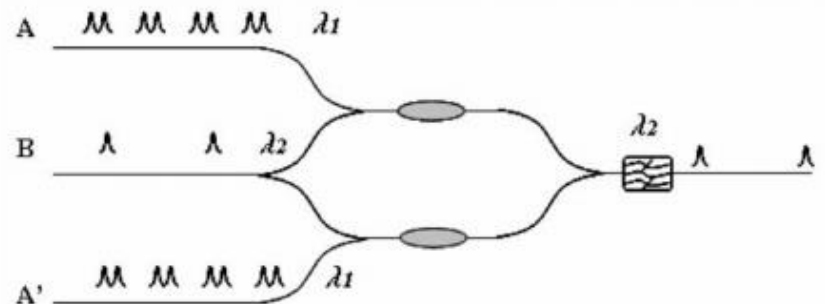
Figura 4.6 – Representação do dispositivo



Fonte: Nurmohammadi *et al* (2013)

Em Don *et al* (2006) a geração da porta lógica AND é demonstrada utilizando o MZI baseado no amplificador óptico semiconductor (SOA). Os resultados são analisados numericamente pela resolução da equação de taxa de SOA. O funcionamento da porta lógica AND é demonstrado experimentalmente a 80Gb/s.

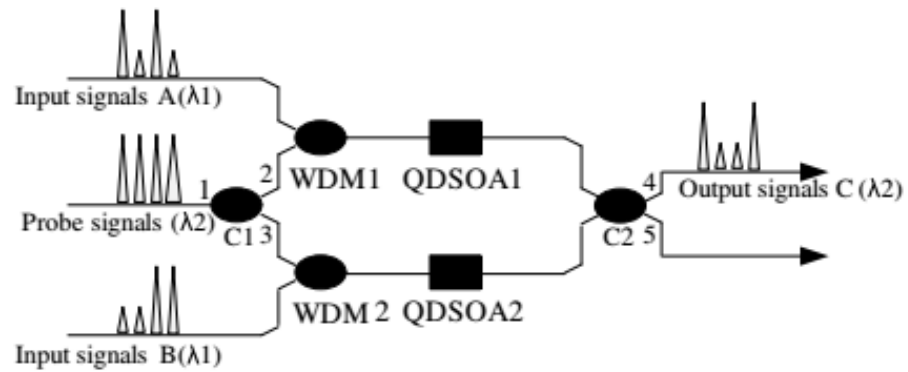
Figura 4.7 – Representação do SOA – MZI na geração da porta lógica AND.



Fonte: Don *et al* (2006)

No artigo de Han *et al* (2008) é apresentado um dispositivo fim obter porta lógica XOR de 100Gb/s baseado na modulação de ganho cruzado (XPM) em um interferômetro não-linear de Mach-Zenhder (MZI) com semicondutores ópticos quânticos (QD-SOA). Simulações numéricas dos parâmetros QD-SOA e parâmetros de sinal óptico são realizadas para elevar o desempenho da porta lógica.

Figura 4.8 – Configuração da porta XOR totalmente óptica utilizando QD-SOA-MZI.



Fonte: Han *et al* (2008)

Para Kumar, Kumar & Raghuwanshi (2013) obtém-se as portas lógicas XOR e AND através de uma estrutura de MZI com amplificador óptico de semicondutor (SOA) em cada fibra do MZI (braço), vale lembrar que os efeitos XPM (*Cross Phase Modulation*) e XGM (*Cross Gain Modulation*) não são descartados e os mesmos atuam sobre as entradas fim gerar as citadas portas lógicas.

CAPÍTULO 5 – A GERAÇÃO DE PORTAS LÓGICAS UTILIZANDO O INTERFERÔMETRO DE MACH - ZEHNDER

Conforme apresentado nos capítulos 03 e 04, é possível gear portas lógicas totalmente ópticas através do interferômetro de Mach-Zennder (MZI). Esse objetivo pode ser alcançado utilizando efeitos não-lineares nas fibras do MZI. Nesse capítulo, será proposto, um MZI com sob efeitos não lineares para geração gerações de portas lógicas AND e OR.

Para tanto utilizou-se o software optisystem para simulação dos blocos lógicos ópticos a partir do usos do MZI e de acopladores com fatores de acoplamento 70:30 e 50:50 e com os quais em processo de cascadeamento destes blocos obtivemos as portas AND e OR.

5.1 O software optisystem®

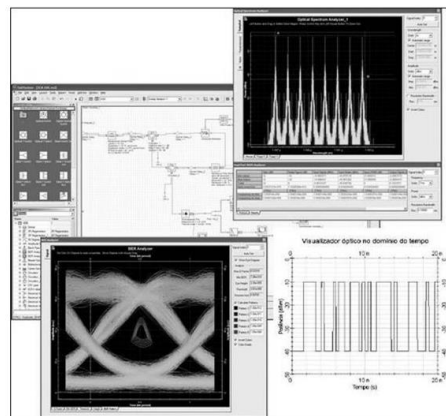
O software Optisystem® foi utilizado nas simulações desse estudo o qual foi disponibilizado pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia de Telecomunicações (PPGET) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE).

O referido software é uma ferramenta que possibilita a realização de simulações de sistemas de telecomunicações e 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, 2010).

A interface gráfica do usuário controla o *layout* dos componentes ópticos, modelos de componentes gráficos e apresentação. O software possui uma extensa biblioteca de componentes ativos e passivos. Criados assim para atender às necessidades de engenheiros de telecomunicações, integradores de sistemas, estudantes e uma ampla variedade de outros usuários (OPTIWAVE, 2010).

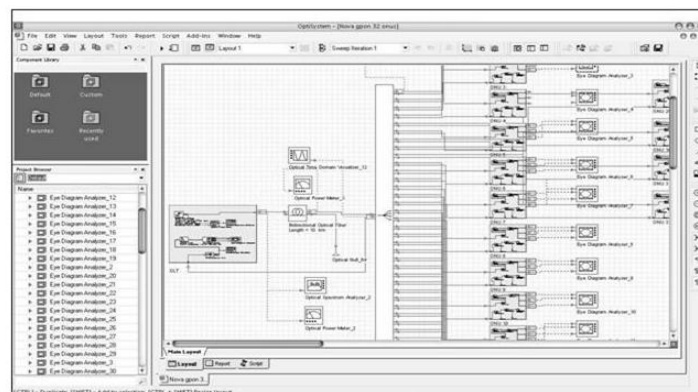
O software optisystem possui uma extensa biblioteca, com mais de 400 dispositivos passivos e ativos, no domínio elétrico e óptico, além de ferramentas de visualização que permitem analisar o desempenho do sistema, como: analisadores de espectro, osciloscópios, medidores de potência e diagrama de olho.

Figura 5.1 – Interface gráfica do optisystem



Fonte: http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialropassiva2/pagina_2.asp

Figura 5.2 - Ambiente de simulação do optisystem



Fonte: http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialropassiva2/pagina_2.asp

Este software apresenta vários benefícios como, por exemplo: permite a simulação de sistemas de redes ópticas de baixo custo; permite uma visão global do desempenho do sistema; acesso direto a configurações de dados que caracterizam o sistema; verificação de vários parâmetros e dispositivos, analisando por fim o desempenho do sistema.

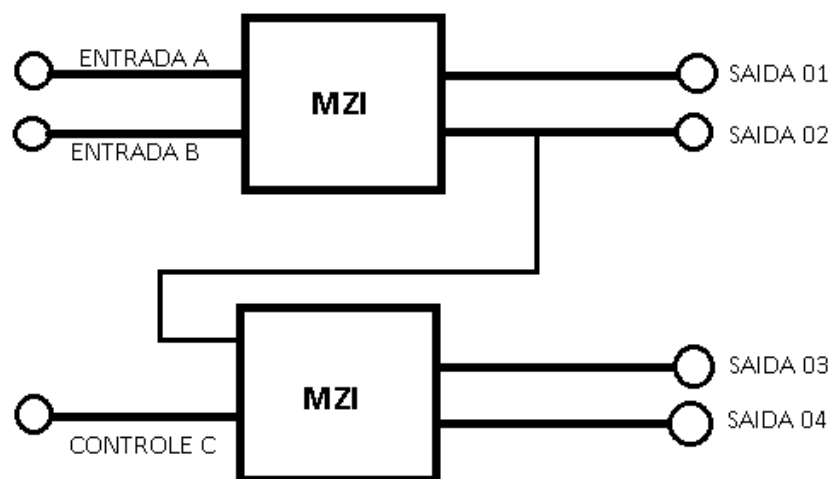
Na figura 5.2 apresentada a tela do OptiSystem®, onde pode-se observar a janela *layout* onde é montado o projeto a ser simulado. Na janela *componente library*, no canto superior a esquerda, seleciona-se os componentes para a montagem do projeto, e na janela *project browser*, que se encontra abaixo da janela *componente library*, pode-se observar os dispositivos usados no projeto.

5.2 Modelo 01 (Coeficiente de Acoplamento 50:50)

5.2.1 O interferômetro de Mach-Zehnder

Nesta seção apresentaremos a estrutura utilizada na geração das portas lógicas representada na figura 5.3. Nela há duas entradas (A e B) convencionais e mais uma entrada de controle (C). Observam-se também dois blocos (quadrados) que representam o interferômetro de Mach-Zehnder (MZI) e acopladores com fatores de acoplamento. Estas estruturas são necessárias para a obtenção das portas lógicas.

Figura 5.3 – Representação do Interferômetro de Mach – Zehnder (MZI)



Fonte: Elaborado pelo autor

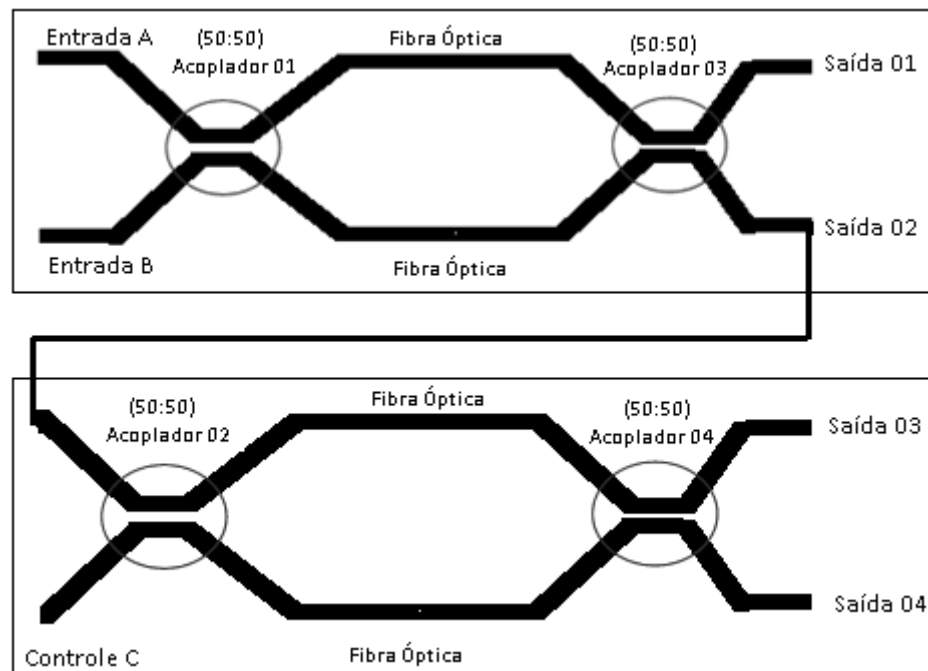
Na figura 5.3 observou-se a presença de dois MZI conectados em forma de cascata, ou seja, a saída em um MZI é conectada na entrada do outro. Além das duas entradas (A e B) convencionais temos uma entrada de controle que são também pulsos secantes hiperbólicos e sempre com a mesma potência de pico dos sinais das entradas A e B.

5.2.2 – Módulo Lógico – acoplador 50:50

O modelo lógico é apresentado na figura 5.4 descreve o interferômetro de Mach-Zehnder proposto para a simulação. Observamos no primeiro MZI duas entradas (A e B) onde são aplicados os sinais que fornecerão energia necessária ao sistema, logo após passarão pelo acoplador (01), separando-se para cada braço (Bar) e (Cross). Após esse momento cada fibra irá se encontrar em outro acoplador (03) obtendo-se finalmente duas saídas (01 e 02).

O segundo MZI é alimentado da seguinte forma: um braço será alimentado pela saída 02 do primeiro MZI e a outra será o controle c, acontecendo assim o processo semelhante ao anterior para que finalmente tenhamos quatro saídas (01, 02, 03 e 04) que fornecerão as informações necessárias para a obtenção das portas lógicas.

Figura 5.4 – Módulo lógico do interferômetro de Mach-Zehnder (MZI)



Fonte: Elaborado pelo autor

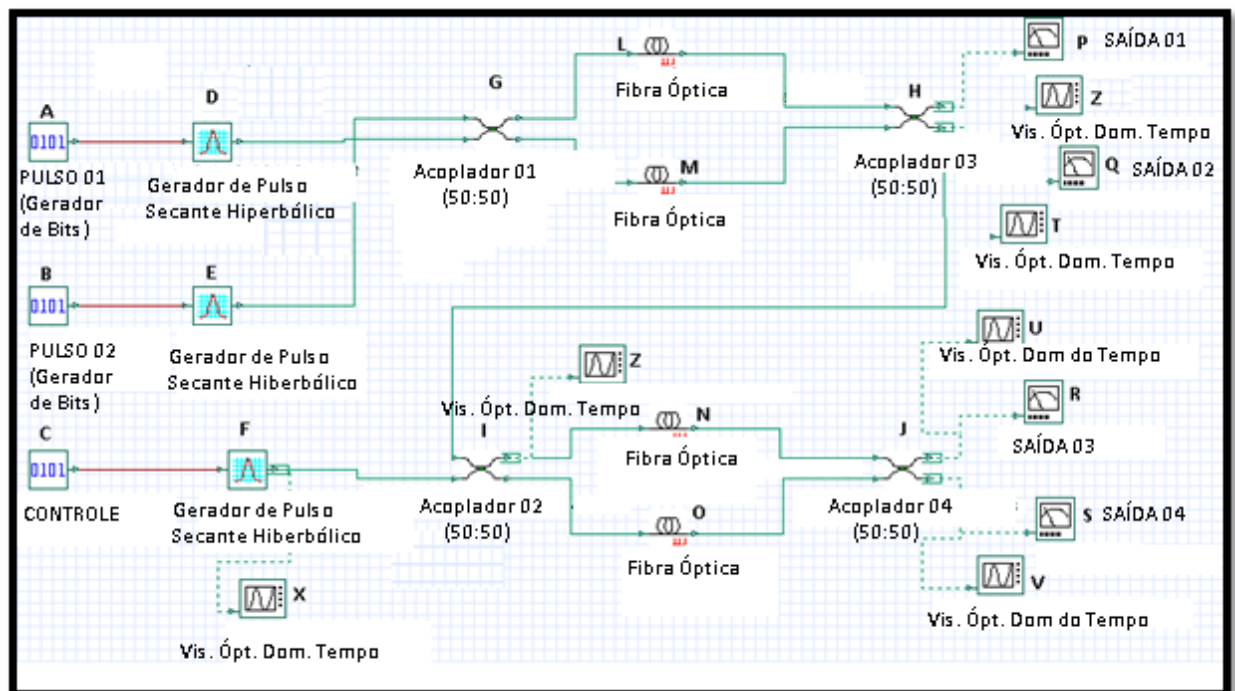
5.2.3 A simulação no Optisystem

No tópico 5.1 foi apresentado o software optisystem® o qual será utilizado nas simulações. O software nos possibilita o planejamento, teste e simulação de links ópticos. Ele permite ao usuário de forma bem simplificada o planejamento de suas ações uma vez que para isso basta localizar os dispositivos em uma das pastas organizadoras e posicionar na área de trabalho para que possam ser interconectados. Em relação aos testes o software possibilita de forma simplificada criar e recriar estes sistemas ópticos e finalmente em relação as simulações existe a possibilidade de alterar dezenas de parâmetros para cada um dos dispositivos presentes na estrutura, sendo assim serão geradas outras simulações após novos posicionamentos de blocos.

Uma estrutura simples (MZI) é composta pelos seguintes componentes: dois geradores de bits e pulso secante hiperbólico, dois acopladores e duas fibras. Um gerador de

bits é conectado a um criador de pulso secante hiperbólico e esses são interligados a cada fibra do primeiro acoplador. As saídas do primeiro acoplador são conectadas às duas fibras dessas são conectadas no segundo acoplador. Uma das entradas do terceiro acoplador é interligada à uma das saídas do segundo acoplador e a outra entrada é alimentada por uma entrada de controle. Nesta simulação, o pulso secante hiperbólico é representado pelo bit 1, logo a ausência de pulso será representado por 0, ou seja, trata-se de uma modulação ASK (*Amplitude Shift Keying*) tipo OOK (*On-Off Keying*) esses sinais representados pelo conjunto de bits 0 e 1, serão as quatro variações das entradas na simulação. O anexo B mostra o esquemático dos blocos já montados.

Figura 5.5 – Esquemático do MZI no Optisystem – modelo 01



Fonte: Elaborado pelo autor

A simulação está dividida em duas etapas as quais determinadas pelo pulso de controle, onde é possível estabelecer duas variações. Então para cada quatro conjunto de bits [(0,0), (0,1), (1,0) e (1,1)] na entrada são simuladas para único valor de controle variando em [(0,0), (0,1), (1,0) e (1,1)] para controle 0, depois as mesmas entradas para o controle 1. Como é possível observar na figura 5.5, há quatro saídas que nos fornecerão as potências de saída, valores esses necessários para a geração das portas lógicas.

A tabela 5.1 relaciona todas as características presentes na simulação realizada no optisystem.

Tabela 5.1 – Dados da simulação no Optisystem do modelo 01

Características	Valor
Coeficiente de acoplamento	50:50 ou 3dB
Comprimento dos braços	1m
Efeitos não lineares	SPM
Dispersão de 2ª e 3ª ordens	Não há
Coeficiente de não linearidade ($\bar{n}_2$)	$1,0 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ até $1,0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$
Comprimento de onda	1550 nm
Área efetiva da fibra	$80 \mu\text{m}^2$
Largura temporal de pulso	10ps

Fonte: Elaborado pelo autor

A simulação proposta nessa dissertação será realizada da seguinte maneira: existem quatro possibilidades para fornecer a entrada de bits ao sistema [(0,0), (0,1), (1,0) e (1,1)] assim como duas possibilidades para o controle (0 e 1). Ou seja, nossa simulação consiste no estudo da variação desses dois fatores.

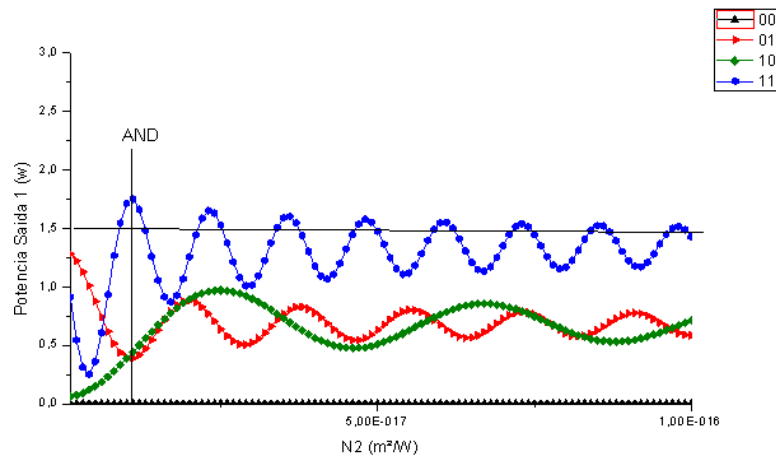
Sendo assim, após a realização das simulações no optisystem obteremos gráficos que irão conter quatro curvas geradas a partir das entradas [(0,0), (0,1), (1,0) e (1,1)], após análise essas curvas nos darão como retorno os níveis lógicos 0 e 1 para que a partir dessas informações possamos gerar as portas lógicas. Após gerar os resultados das potências de pico de 1,0 W até 5,0 W, somente será analisado a resposta para o valor de 3,0W. Pois os valores de potências desses gráficos são os fornecidos pelos medidores de potência, ou seja, apresenta a potencia média, diferente da potência de pico.

A seguir apresentaremos os gráficos gerados nas simulações com o auxílio do software OriginPro8®, o qual foi disponibilizado pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia de Telecomunicações (PPGET) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE). Em seguida analisaremos de forma mais detalhada cada um dos gráficos apresentados.

O gráfico de resultados a seguir apresenta quatro curvas possíveis para entradas [(0,0), (0,1), (1,0) e (1,1)] variando o $\bar{n}_2$ de $1,0 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ até $1,0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$. A leitura

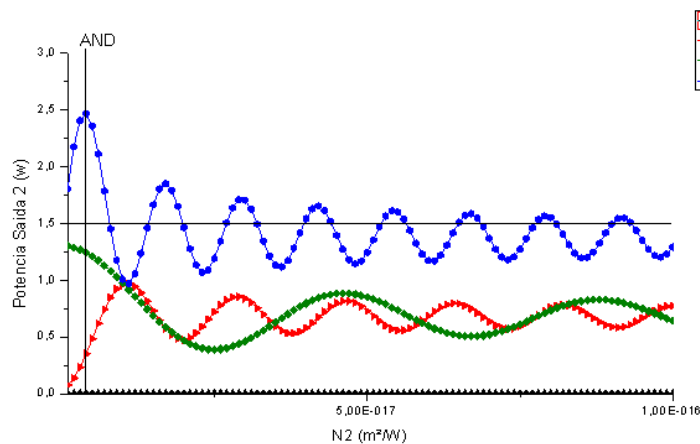
desse gráfico será realizada de modo análogo aos níveis lógicos 0 ou 1, no qual os valores acima da reta representa o nível 1 (bit 1) e os valores abaixo da reta representam o nível 0 (bit 0). Sendo assim para o valor de $\bar{n}_2$ igual a $2,2 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ e Potência Média de 1,5W as saídas [(0,0), (0,1), (1,0)] apresentam valores 0 e a saída (1,1) o valor 1, estados relativos a porta lógica AND.

Figura 5.6 – Gráfico da Saída 01 do modelo 01 (controle 0)



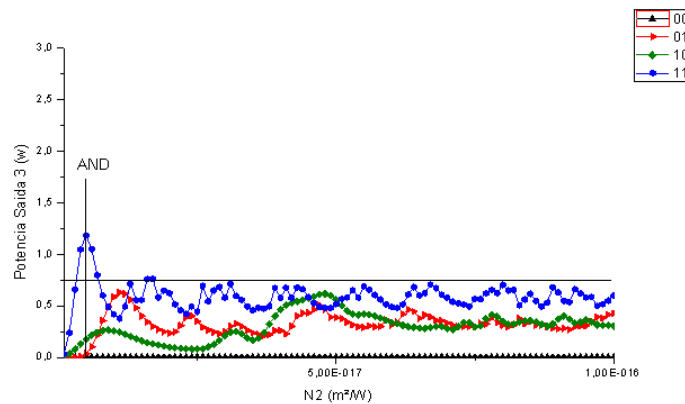
O gráfico de resultados a seguir apresenta quatro curvas possíveis para entradas [(0,0), (0,1), (1,0) e (1,1)] variando o $\bar{n}_2$ de $1,0 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ até $1,0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$. A leitura desse gráfico será realizada de modo análogo aos níveis lógicos 0 ou 1, no qual os valores acima da reta representa o nível 1 (bit 1) e os valores abaixo da reta representam o nível 0 (bit 0). Sendo assim para o valor de $\bar{n}_2$ igual a $4,4 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ e Potência Média de 1,5W as saídas [(0,0), (0,1), (1,0)] apresentam valores 0 e a saída (1,1) o valor 1, estados relativos a porta lógica AND.

Figura 5.7- Gráfico da Saída 02 do modelo 01 (controle 0)



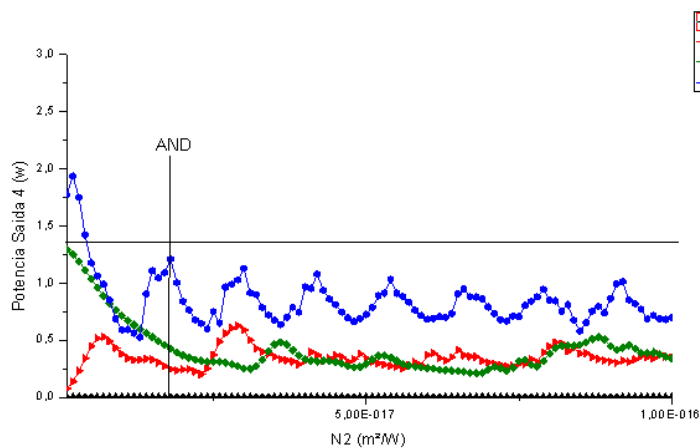
O gráfico de resultados a seguir apresenta quatro curvas possíveis para entradas [(0,0), (0,1), (1,0) e (1,1)] variando o $\bar{n}_2$ de $1,0 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ até $1,0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$. A leitura desse gráfico será realizada de modo análogo aos níveis lógicos 0 ou 1, no qual os valores acima da reta representa o nível 1 (bit 1) e os valores abaixo da reta representam o nível 0 (bit 0). Sendo assim para o valor de $\bar{n}_2$ igual a $4,0 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ e Potência Média de 0,8W as saídas [(0,0), (0,1), (1,0)] apresentam valores 0 e a saída (1,1) o valor 1, estados relativos a porta lógica AND.

Figura 5.8 - Gráfico da Saída 03 do modelo 01 (controle 0)



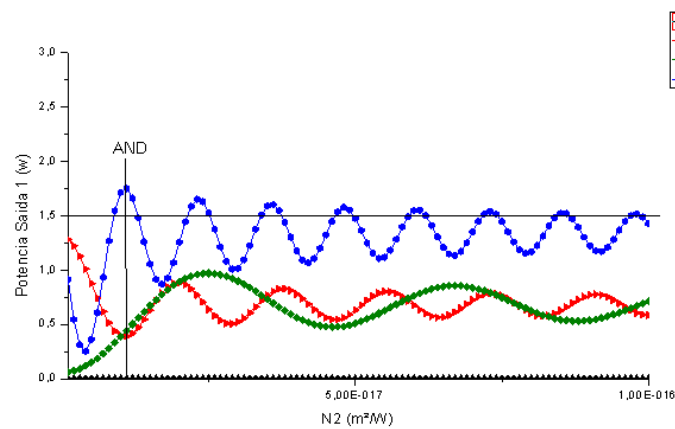
O gráfico de resultados a seguir apresenta quatro curvas possíveis para entradas [(0,0), (0,1), (1,0) e (1,1)] variando o $\bar{n}_2$ de $1,0 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ até $1,0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$. A leitura desse gráfico será realizada de modo análogo aos níveis lógicos 0 ou 1, no qual os valores acima da reta representa o nível 1 (bit 1) e os valores abaixo da reta representam o nível 0 (bit 0). Sendo assim para o valor de $\bar{n}_2$ igual a $2,0 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ e Potência Média de 1,3W as saídas [(0,0), (0,1), (1,0)] apresentam valores 0 e a saída (1,1) o valor 1, estados relativos a porta lógica AND.

Figura 5.9- Gráfico da Saída 04 do modelo 01 (controle 0)



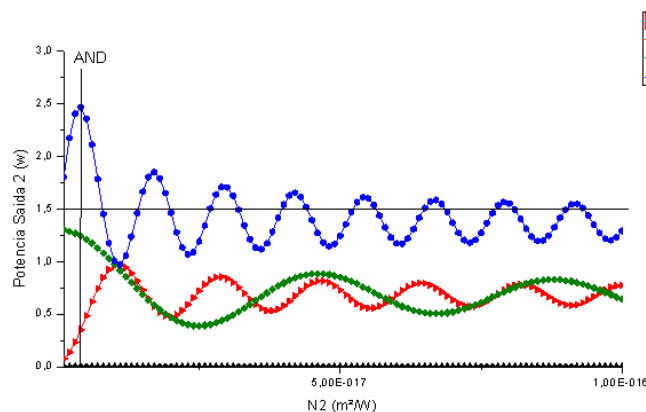
O gráfico de resultados a seguir apresenta quatro curvas possíveis para entradas [(0,0), (0,1), (1,0) e (1,1)] variando o $\bar{n}_2$ de $1,0 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ até $1,0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$. A leitura desse gráfico será realizada de modo análogo aos níveis lógicos 0 ou 1, no qual os valores acima da reta representa o nível 1 (bit 1) e os valores abaixo da reta representam o nível 0 (bit 0). Sendo assim para o valor de $\bar{n}_2$ igual a $9,0 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ e Potência Média de 1,5W as saídas [(0,0), (0,1), (1,0)] apresentam valores 0 e a saída (1,1) o valor 1, estados relativos a porta lógica AND.

Figura 5.10- Gráfico da Saída 01 do modelo 01 (controle 1)



O gráfico de resultados a seguir apresenta quatro curvas possíveis para entradas [(0,0), (0,1), (1,0) e (1,1)] variando o $\bar{n}_2$ de $1,0 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ até $1,0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$. A leitura desse gráfico será realizada de modo análogo aos níveis lógicos 0 ou 1, no qual os valores acima da reta representa o nível 1 (bit 1) e os valores abaixo da reta representam o nível 0 (bit 0). Sendo assim para o valor de $\bar{n}_2$ igual a $1,4 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ e Potência Média de 1,5W as saídas [(0,0), (0,1), (1,0)] apresentam valores 0 e a saída (1,1) o valor 1, estados relativos a porta lógica AND.

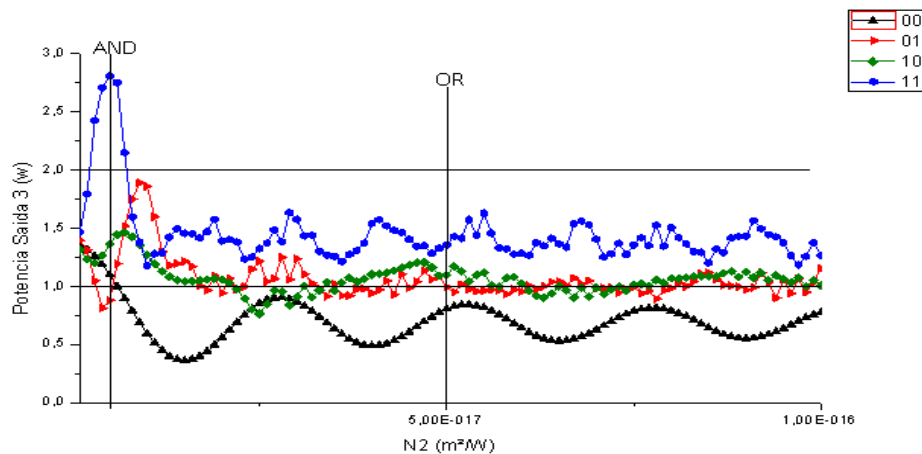
Figura 5.11 - Gráfico da Saída 02 do modelo 01 (controle 1)



O gráfico de resultados a seguir apresenta quatro curvas possíveis para entradas [(0,0), (0,1), (1,0) e (1,1)] variando o $\bar{n}_2$ de $1,0 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ até $1,0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$. A leitura desse gráfico será realizada de modo análogo aos níveis lógicos 0 ou 1, no qual os valores acima da reta representa o nível 1 (bit 1) e os valores abaixo da reta representam o nível 0 (bit 0). Sendo assim para o valor de $\bar{n}_2$ igual a $2,0 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ e Potência Média de 2,0W as saídas [(0,0)] apresentam valores 0 e as saídas [(0,1), (1,0) e (1,1)] o valor 1, estados relativos a porta lógica AND.

Assim como para $\bar{n}_2$ igual a $1,0 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ e Potência Média de 1,0W as saídas [(0,0), (0,1), (1,0)] apresentam valores 0 e a saída (1,1) o valor 1, estados relativos a porta lógica OR.

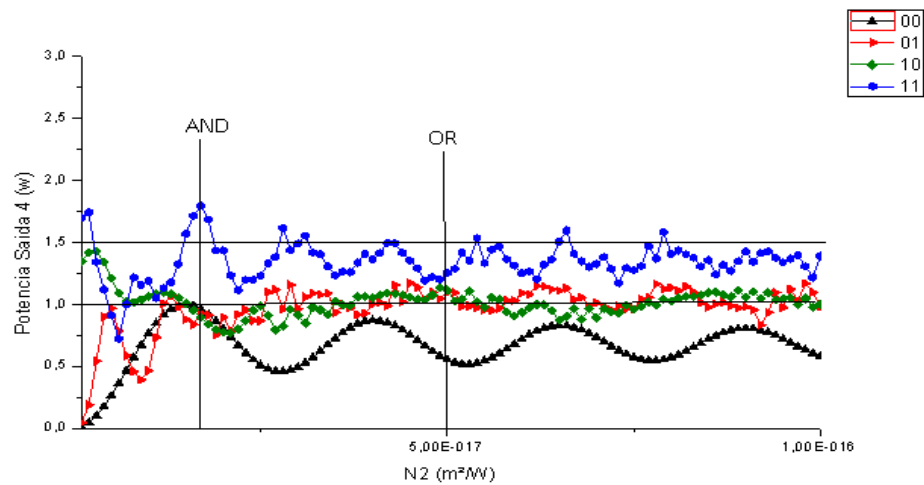
Figura 5.12 - Gráfico da Saída 03 do modelo 01 (controle 1)



O gráfico de resultados a seguir apresenta quatro curvas possíveis para entradas [(0,0), (0,1), (1,0) e (1,1)] variando o $\bar{n}_2$ de $1,0 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ até $1,0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$. A leitura desse gráfico será realizada de modo análogo aos níveis lógicos 0 ou 1, no qual os valores acima da reta representa o nível 1 (bit 1) e os valores abaixo da reta representam o nível 0 (bit 0). Sendo assim para o valor de $\bar{n}_2$ igual a $1,5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ e Potência Média de 1,5W as saídas [(0,0)] apresentam valores 0 e as saídas [(0,1), (1,0) e (1,1)] o valor 1, estados relativos a porta lógica AND.

Assim como para $\bar{n}_2$ igual a $5,0 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ e Potência Média de 1,0W as saídas [(0,0), (0,1), (1,0)] apresentam valores 0 e a saída (1,1) o valor 1, estados relativos a porta lógica OR.

Figura 5.13- Gráfico da Saída 04 do modelo 01 (controle 1)

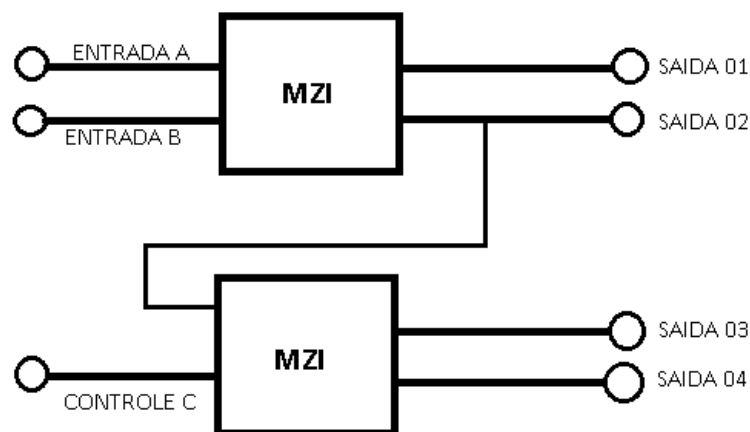


5.3 Modelo 02 (Coeficiente de Acoplamento 70:30)

5.3.1 O interferômetro de Mach-Zehnder – acoplador 70:30

Nesta seção apresentaremos a estrutura utilizada na geração das portas lógicas representada na figura 5.14. Nela há duas entradas (A e B) convencionais e mais uma entrada de controle (C). Observam-se também dois blocos (quadrados) que representam o interferômetro de Mach-Zehnder (MZI) e acopladores com fatores de acoplamento. Estas estruturas são necessárias para a obtenção das portas lógicas.

Figura 5.14 – Representação do Interferômetro de Mach – Zehnder (MZI)



Fonte: Elaborado pelo autor

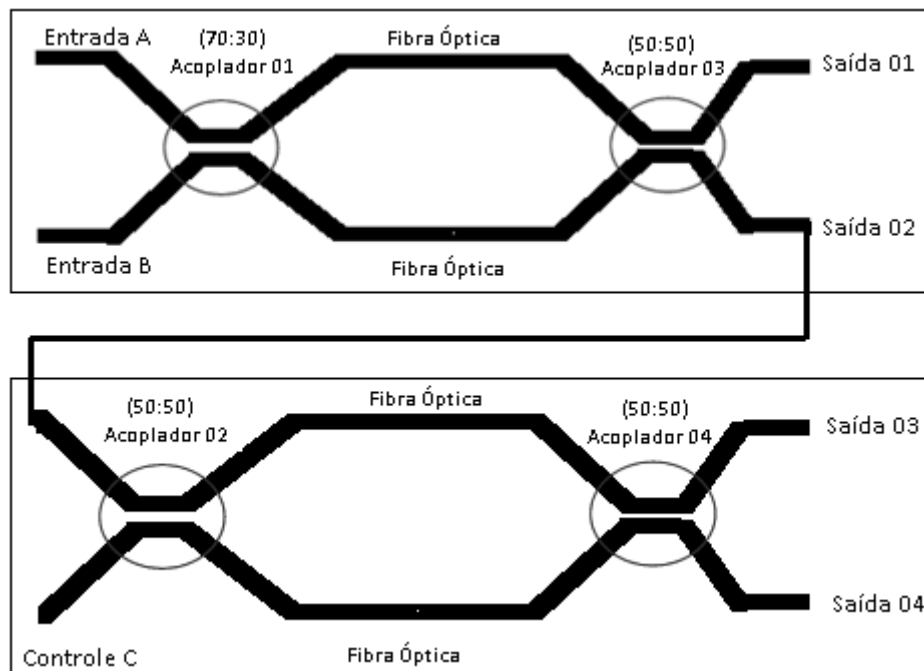
Na estrutura representada acima observamos a presença de dois MZI conectados em forma de cascata, ou seja, a saída em um MZI é conectada na entrada do outro. Além das duas entradas (A e B) convencionais temos uma entrada de controle que são também pulsos secantes hiperbólicos e sempre com a mesma potência de pico dos sinais das entradas A e B.

5.3.2 – Módulo Lógico – acoplador 70:30

O modelo lógico é apresentado na figura 5.14 descreve o interferômetro de Mach-Zehnder proposto para a simulação. Observamos no primeiro MZI duas entradas (A e B) onde são aplicados os sinais que fornecerão energia necessária ao sistema, logo após passarão pelo acoplador (01), separando-se para cada braço (Bar e (Cross)). Após esse momento cada fibra irá se encontrar em outro acoplador (03) obtendo-se finalmente duas saídas (01 e 02).

O segundo MZI é alimentado da seguinte forma: um braço será alimentado pela saída 02 do primeiro MZI e a outra será o controle c, acontecendo assim o processo semelhante ao anterior para que finalmente tenhamos quatro saídas (01, 02, 03 e 04) que fornecerão as informações necessárias para a obtenção das portas lógicas.

Figura 5.15 – Módulo lógico do interferômetro de Mach-Zehnder (MZI)



Fonte: Elaborado pelo autor

5.3.3 A simulação no Optisystem

No tópico 5.1 foi apresentado o software optisystem o qual será utilizado nas simulações. O software nos possibilita o planejamento, teste e simulação de links ópticos. Ele permite ao usuário de forma bem simplificada o planejamento de suas ações uma vez que para isso basta localizar os dispositivos em uma das pastas organizadoras e posicionar na área de trabalho para que possam ser interconectados. Em relação aos testes o software possibilita de forma simplificada criar e recriar estes sistemas ópticos e finalmente em relação as simulações existe a possibilidade de alterar dezenas de parâmetros para cada um dos dispositivos presentes na estrutura, sendo assim serão geradas outras simulações após novos posicionamentos de blocos.

Uma estrutura simples (MZI) é composta pelos seguintes componentes: dois geradores de bits e pulso secante hiperbólico, dois acopladores e duas fibras. Um gerador de bits é conectado a um criador de pulso secante hiperbólico e esses são interligados a cada fibra do primeiro acoplador. As saídas do primeiro acoplador são conectadas às duas fibras essas são conectadas no segundo acoplador. Uma das entradas do terceiro acoplador é interligada à uma das saídas do segundo acoplador e a outra entrada é alimentada por uma entrada de controle. Nesta simulação, o pulso secante hiperbólico é representado pelo bit 1, logo a ausência de pulso será representado por 0, ou seja, trata-se de uma modulação ASK (*Amplitude Shift Keying*) tipo OOK (*On-Off Keying*) esses sinais representados pelo conjunto de bits 0 e 1, serão as quatro variações das entradas na simulação. O apêndice B mostra o esquemático dos blocos já montados.

A simulação está dividida em duas etapas as quais determinadas pelo pulso de controle, onde é possível estabelecer duas variações. Então para cada quatro conjunto de bits [(0,0), (0,1), (1,0) e (1,1)] na entrada são simuladas para único valor de controle variando em [(0,0), (0,1), (1,0) e (1,1)] para controle 0, depois as mesmas entradas para o controle 1. Como é possível observar na figura 5.5, há quatro saídas que nos fornecerão as potências de saída, valores esses necessários para a geração das portas lógicas.

A tabelas 5.2 relaciona todas as características presentes na simulação realizada no optisystem.

Tabela 5.2 – Dados da simulação no Optisystem do modelo 02

Características	Valor
Coeficiente de acoplamento	70:30
Comprimento dos braços	1m
Efeitos não lineares	SPM
Dispersão de 2ª e 3ª ordens	Não há
Coeficiente de não linearidade ($\bar{n}_2$)	$1,0 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ até $1,0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$
Comprimento de onda	1550 nm
Área efetiva da fibra	$80 \mu\text{m}^2$
Largura temporal de pulso	10ps

Fonte: Elaborado pelo autor

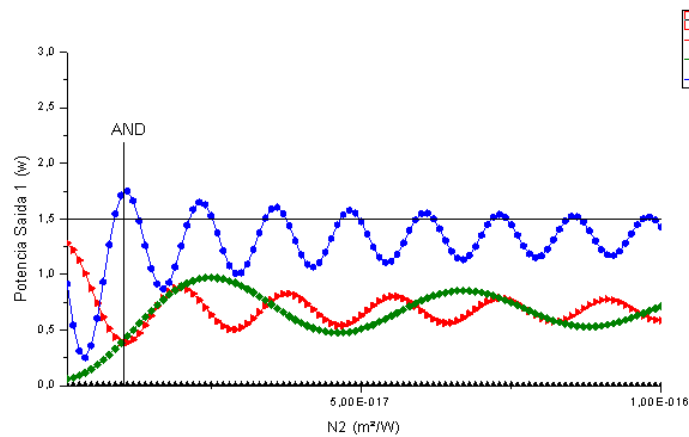
A simulação proposta nessa dissertação será realizada da seguinte maneira: existem quatro possibilidades para fornecer a entrada de bits ao sistema [(0,0), (0,1), (1,0) e (1,1)] assim como duas possibilidades para o controle (0 e 1).

Sendo assim, após a realização das simulações no optisystem obteremos gráficos que irão conter quatro curvas geradas a partir das entradas [(0,0), (0,1), (1,0) e (1,1)], após análise essas curvas nos darão como retorno os níveis lógicos 0 e 1 para que a partir dessas informações possamos gerar as portas lógicas. Após gerar os resultados das potências de pico de 1,0 W até 5,0 W, somente será analisado a resposta para o valor de 3,0W. Pois os valores de potências desses gráficos são os fornecidos pelos medidores de potência, ou seja, apresenta a potencia média, diferente da potência de pico.

A seguir apresentaremos a tabela 5.12 onde poderemos observar os gráficos gerados nas simulações com o auxílio do software OriginPro8, o qual foi disponibilizado pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia de Telecomunicações (PPGET) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE). Em seguida analisaremos de forma mais detalhada cada um dos gráficos apresentados.

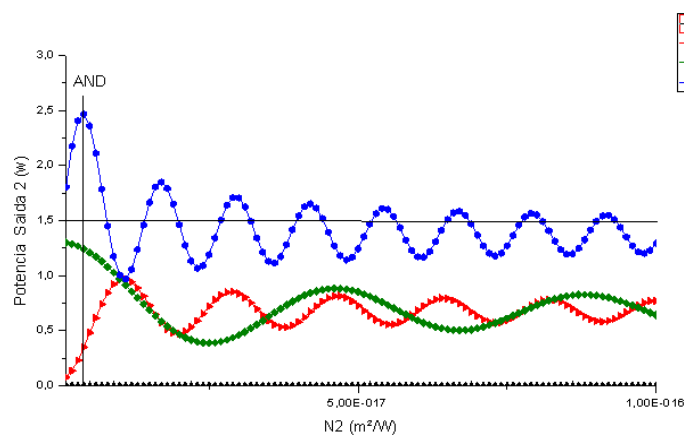
O gráfico de resultados a seguir apresenta quatro curvas possíveis para entradas [(0,0), (0,1), (1,0) e (1,1)] variando o $\bar{n}_2$ de $1,0 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ até $1,0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$. A leitura desse gráfico será realizada de modo análogo aos níveis lógicos 0 ou 1, no qual os valores acima da reta representa o nível 1 (bit 1) e os valores abaixo da reta representam o nível 0 (bit 0). Sendo assim para o valor de $\bar{n}_2$ igual a $7,0 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ e Potência Média de 1,5W as saídas [(0,0), (0,1), (1,0)] apresentam valores 0 e a saída (1,1) o valor 1, estados relativos a porta lógica AND.

Figura 5.16 – Gráfico da Saída 01 do modelo 02 (controle 0)



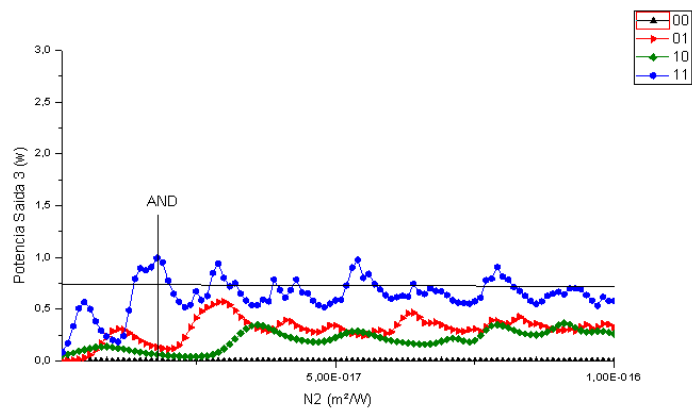
O gráfico de resultados a seguir apresenta quatro curvas possíveis para entradas [(0,0), (0,1), (1,0) e (1,1)] variando o $\bar{n}_2$ de $1,0 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ até $1,0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$. A leitura desse gráfico será realizada de modo análogo aos níveis lógicos 0 ou 1, no qual os valores acima da reta representa o nível 1 (bit 1) e os valores abaixo da reta representam o nível 0 (bit 0). Sendo assim para o valor de $\bar{n}_2$ igual a $2,7 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ e Potência Média de 1,5W as saídas [(0,0), (0,1), (1,0)] apresentam valores 0 e a saída (1,1) o valor 1, estados relativos a porta lógica AND.

Figura 5.17 – Gráfico da Saída 02 do modelo 02 (controle 0)



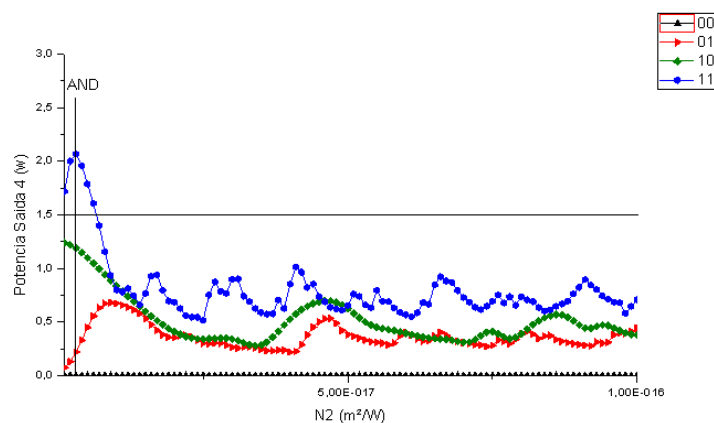
O gráfico de resultados a seguir apresenta quatro curvas possíveis para entradas [(0,0), (0,1), (1,0) e (1,1)] variando o $\bar{n}_2$ de $1,0 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ até $1,0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$. A leitura desse gráfico será realizada de modo análogo aos níveis lógicos 0 ou 1, no qual os valores acima da reta representa o nível 1 (bit 1) e os valores abaixo da reta representam o nível 0 (bit 0). Sendo assim para o valor de $\bar{n}_2$ igual a $2,0 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ e Potência Média de 0,75W as saídas [(0,0), (0,1), (1,0)] apresentam valores 0 e a saída (1,1) o valor 1, estados relativos a porta lógica AND.

Figura 5.18 – Gráfico da Saída 03 do modelo 02 (controle 0)



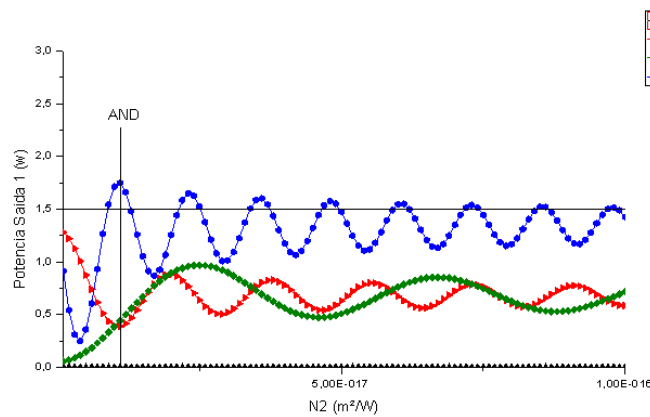
O gráfico de resultados a seguir apresenta quatro curvas possíveis para entradas [(0,0), (0,1), (1,0) e (1,1)] variando o $\bar{n}_2$ de $1,0 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ até $1,0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$. A leitura desse gráfico será realizada de modo análogo aos níveis lógicos 0 ou 1, no qual os valores acima da reta representa o nível 1 (bit 1) e os valores abaixo da reta representam o nível 0 (bit 0). Sendo assim para o valor de $\bar{n}_2$ igual a $2 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ e Potência Média de 1,5W as saídas [(0,0), (0,1), (1,0)] apresentam valores 0 e a saída (1,1) o valor 1, estados relativos a porta lógica AND.

Figura 5.19 – Gráfico da Saída 04 do modelo 02 (controle 0)



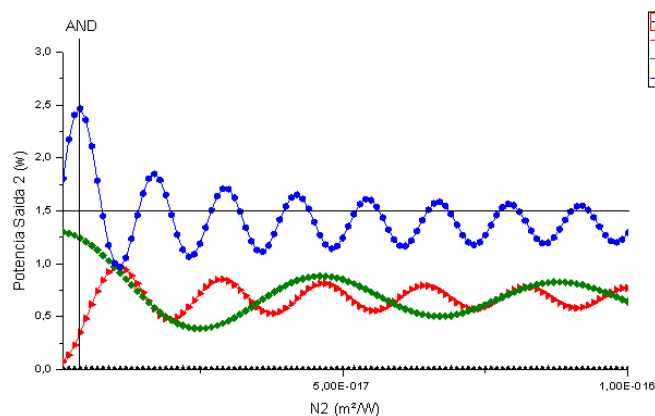
O gráfico de resultados a seguir apresenta quatro curvas possíveis para entradas [(0,0), (0,1), (1,0) e (1,1)] variando o $\bar{n}_2$ de $1,0 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ até $1,0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$. A leitura desse gráfico será realizada de modo análogo aos níveis lógicos 0 ou 1, no qual os valores acima da reta representa o nível 1 (bit 1) e os valores abaixo da reta representam o nível 0 (bit 0). Sendo assim para o valor de $\bar{n}_2$ igual a $9,0 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ e Potência Média de 1,5W as saídas [(0,0), (0,1), (1,0)] apresentam valores 0 e a saída (1,1) o valor 1, estados relativos a porta lógica AND.

Figura 5.20 – Gráfico da Saída 01 do modelo 02 (controle 1)



O gráfico de resultados a seguir apresenta quatro curvas possíveis para entradas [(0,0), (0,1), (1,0) e (1,1)] variando o $\bar{n}_2$ de $1,0 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ até $1,0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$. A leitura desse gráfico será realizada de modo análogo aos níveis lógicos 0 ou 1, no qual os valores acima da reta representa o nível 1 (bit 1) e os valores abaixo da reta representam o nível 0 (bit 0). Sendo assim para o valor de $\bar{n}_2$ igual a $2,7 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ e Potência Média de 1,5W as saídas [(0,0), (0,1), (1,0)] apresentam valores 0 e a saída (1,1) o valor 1, estados relativos a porta lógica AND.

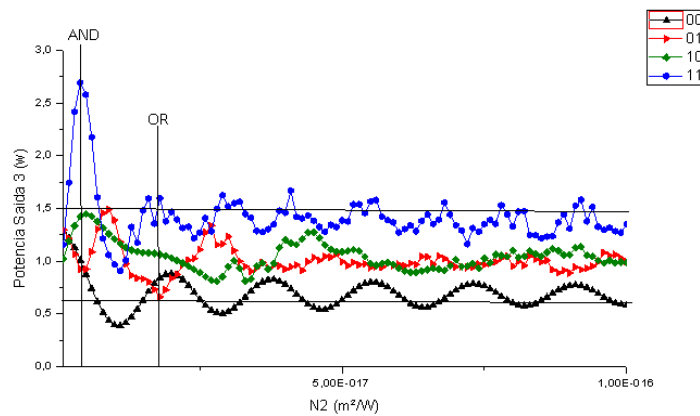
Figura 5.21 – Gráfico da Saída 02 do modelo 02 (controle 1)



O gráfico de resultados a seguir apresenta quatro curvas possíveis para entradas [(0,0), (0,1), (1,0) e (1,1)] variando o $\bar{n}_2$ de $1,0 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ até $1,0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$. A leitura desse gráfico será realizada de modo análogo aos níveis lógicos 0 ou 1, no qual os valores acima da reta representa o nível 1 (bit 1) e os valores abaixo da reta representam o nível 0 (bit 0). Sendo assim para o valor de $\bar{n}_2$ igual a $1,6 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ e Potência Média de 1,5W as saídas [(0,0)] apresentam valores 0 e as saídas [(0,1), (1,0) e (1,1)] o valor 1, estados relativos a porta lógica AND.

Assim como para $\bar{n}_2$ igual a $1,5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ e Potência Média de 0,6W as saídas [(0,0), (0,1), (1,0)] apresentam valores 0 e a saída (1,1) o valor 1, estados relativos a porta lógica OR.

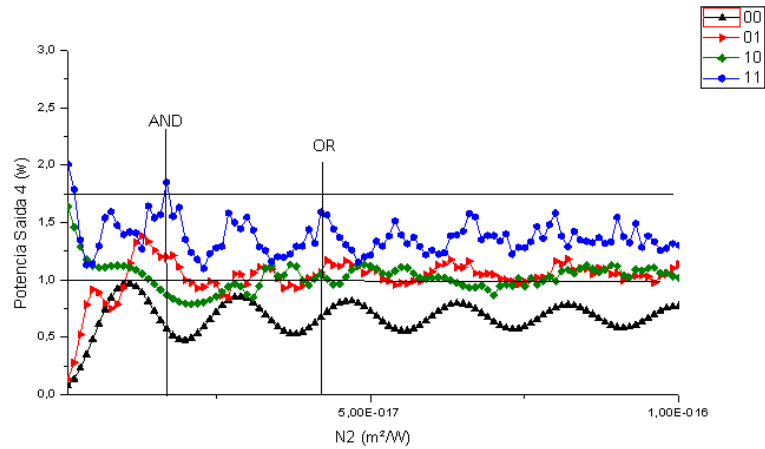
Figura 5.22 - Gráfico da Saída 03 do modelo 02 (controle 1)



O gráfico de resultados a seguir apresenta quatro curvas possíveis para entradas [(0,0), (0,1), (1,0) e (1,1)] variando o $\bar{n}_2$ de $1,0 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ até $1,0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$. A leitura desse gráfico será realizada de modo análogo aos níveis lógicos 0 ou 1, no qual os valores acima da reta representa o nível 1 (bit 1) e os valores abaixo da reta representam o nível 0 (bit 0). Sendo assim para o valor de $\bar{n}_2$ igual a $1,7 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ e Potência Média de 1,75W as saídas [(0,0)] apresentam valores 0 e as saídas [(0,1), (1,0) e (1,1)] o valor 1, estados relativos a porta lógica AND.

Assim como para $\bar{n}_2$ igual a $1,4 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ e Potência Média de 1,0W as saídas [(0,0), (0,1), (1,0)] apresentam valores 0 e a saída (1,1) o valor 1, estados relativos a porta lógica OR.

Figura 5.23 - Gráfico da Saída 04 do modelo 02 (controle 1)



5.4 Discussão dos resultados

Neste trabalho observamos que após realizadas as simulações e tomando como parâmetro para a geração de portas lógicas o valor da potência média foram obtidas portas lógicas AND em todos as dezesseis simulações e em quatro delas também foram obtidas portas OR. Inicialmente estes resultados foram obtidos a partir das saídas [(0,0), (0,1), (1,0) e (1,1)] obtidas do primeiro MZI com acopladores 70:30 e 50:50 e controles 0 e 1 e depois o segundo MZI com acopladores do tipo 50:50 e 50:50.

De forma a analisar os resultados obtidos no presente trabalho será apresentada uma análise comparativa, na tabela 5.3, dos artigos apresentados no capítulo 04 que tiveram como objeto de estudo a geração de portas lógicas com o MZI, considerando as diferentes metodologias adotadas em cada artigo.

Tabela 5.3 – Análise comparativa dos resultados

ARTIGO	PORTAS LÓGICAS					
	AND	NAND	NOR	NXOR	OR	XOR
E. Dimitriadou, K.E. Zoiros (2011)		X				
Kumar, Kumar & Raghuwanshi (2014)	X			X		X
Zhang <i>et al</i> (2003)						X
Araujo <i>et al</i> (2015)	X				X	
Ding <i>et al</i> (2015)				X		X
Nurmohammadi <i>et al</i> (2013)			X			
Don <i>et al</i> (2006)	X					
Han <i>et al</i> (2008)						X

Kumar, Kumar & Raghuwanshi (2013)	X					X
O autor (2017)	X					X

Fonte: Elaborado pelo autor

Os trabalhos apresentados no capítulo 04 obtiveram resultados semelhantes ao modelo proposto nesse trabalho, porém foram utilizadas outras técnicas como, por exemplo, amplificadores ópticos de semicondutor (SOA).

O modelo proposto nesse trabalho obteve portas lógicas AND e OR a partir da análise dos valores obtidos nas potências médias das saídas S1, S2, S3 e S4, onde as melhores portas lógicas foram aquelas portas lógicas que apresentaram uma maior espaço entre as curvas uma vez que se isso ocorrer o sistema ainda irá funcionar mesmo ocorrendo ruído.

Tomemos como exemplo o trabalho de Kumar, Kumar & Raghuwanshi (2014) que obteve como resposta portas AND, NOXR e XOR, porém houve uma alteração nos índices de refração de cada fibra do MZI através da alteração de tensão dos eletrodos presentes nos mesmos.

Sendo assim podemos concluir que o modelo proposto nessa dissertação obtém o mesmo resultado porém utilizando técnicas mais simples o que facilitará a simulação e reduzirá os custos.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÃO

Este estudo permitiu avaliar a geração e obtenção de portas lógicas ópticas AND e OR em estruturas utilizando o interferômetro de Mach-Zehnder (MZI) com acopladores do tipo 50:50 e 70:30.

6.1 Conclusão

Essa dissertação tem como objeto de estudo principal a geração de portas lógicas ópticas através de uma estrutura utilizando um interferômetro de Mach-Zehnder (MZI) com acopladores possuindo coeficientes de acoplamento do tipo 50:50 e 70:30.

Após realização das simulações e análise dos dados obtidos foi visto que é possível a geração de portas lógicas do tipo AND e OR, em ambos os MZI. Para esse tipo de estrutura simples com pulso secante hiperbólico pode-se utilizar com parâmetro para a geração de portas lógicas o valor da potência média.

Sendo assim o objetivo dessa dissertação foi alcançado: geração de portas lógicas ópticas do tipo AND e OR utilizando o MZI com um dos braços não linear.

6.2 Trabalhos Futuros

Ao longo do desenvolvimento das etapas dessa dissertação descritas no capítulo 01, foram identificados alguns aspectos para estudos futuros. Deste modo, sugerem-se algumas recomendações para trabalhos futuros, tais como:

- Obtenção de portas lógicas dos tipos NAND, NOR, NXOR e NOT com a utilização do interferômetro de Mach-Zehnder (MZI).
- Utilizar como parâmetro para obtenção das portas lógicas a potência de pico.
- Aplicar diferentes tipos de pulsos presentes nos controles das estruturas propostas.
- Aplicar diferentes não linearidades em ambos os braços (bar e cross) baseando-se no MZI proposto.
- Ampliar o número de estruturas cascadeadas.

- Aplicar diferentes valores para os coeficientes de acoplamento, por exemplo, 20:80.

BIBLIOGRAFIA

AGRAWAL, Govind P. Lightwave technology: components and devices. John Wiley & Sons, 2004.

AGRAWALL, G. P., Applications of Nonlinear Fiber Optics, Academic Press, New York, 2001.

AGRAWALL, Govind P.; Sistemas de Comunicação por Fibra Óptica. 4ª ed. São Paulo: Campus, 2014

AMAZONAS, José Roberto de Almeida,. Projeto de sistemas de comunicações ópticas, Manole, 2005.

ARAUJO A; OLIVEIRA A; MARTINS F; COELHO A; FRAGA W; NASCIMENTO J. Two all-optical logic gates in a single photonic interferometer. Optical Communications, Elsevier, 2015.

BARRY Paton., Fundamentals of Digital Electronics, Dalhousie University, Copyright 1998 by National Instruments Corporation, 6504 Bridge Point Parkway, Austin, Texas 78730-5039.

CAPUANO, Francisco G.; IDOETA, Ivan Valeije. Elementos de Eletrônica Digital. 40ª ed. São Paulo: Érica.

DING J; YANG L; CHEN Q; ZHANG L; ZHOU P. Demonstration of a directed XNOR/XOR optical logic circuit based on silicon Mach–Zehnder interferometer. Optical Communications, Elsevier, 2015.

DONG H; SUN H; WANG Q; DUTTA N.K; JAQUES J. 80 Gb/s All-optical logic AND operation using Mach-Zehnder interferometer with differential scheme. Optical Communications, Elsevier, 2006.

HAN H; ZHANG M; YE P; ZHANG F. Parameter design and performance analysis of a ultrafast all-optical XOR gate based on quantum dot semiconductor optical amplifiers in nonlinear mach–zehnder interferometer. Optical Communications, Elsevier, 2008.

J. A. Brandão Faria, Óptica Fundamentos e Aplicações, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Setembro de 1994.

KUMAR, Ajay; KUMAR, Santosh; RAGHUWANSHI, Sanjeev Kumar. Implementation of xor/xnor and and logic gates by using mach-zehnder interferometers. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, Elsevier, v. 125, n. 19, p. 5764–5767, 2014.

KUMAR, Ajay; KUMAR, Santosh; RAGHUWANSHI, SK. Implementation of all-optical logic gate using soa-mzi structures. *STM Journals*, p. 2231–0401, 2013.

MENEZES, J. W. M. Implementação de portas lógicas ópticas com acoplador direcional não linear triplo planar simétrico de fibras ópticas. 2006. 112f. Dissertação (Mestrado em Física) – Departamento de Física, Universidade Federal do Ceará, Ceará. 2006.

MILLER, D. A. B., *Device requirements for digital optical processing in Digital Optical Computing*, Ed. R. A. Athale, SPIE Critical Reviews of Optical Science and Technology, CR35, 68 ,1990.

MIN ZHANG; ZHAO YONGPENG; WANG LING, WANG JIAN, YE PEIDA. Design and analysis of all-optical XOR gate using SOA-based Mach-Zehnder interferometer. *Optical Communications*, Elsevier, 2002.

NURMOHAMMADI T; ABBASIAN K; AS’ADI M.J; JAFARI D. Design of an ultrafast all-optical NOR logic gate based on Mach-Zehnder interferometer using quantum-dot SOA. *Optical Communications*, Elsevier, 2014.

OKAMOTO, Katsunari, *Fundamentals of optical waveguides*, Academic press, 2010.

PEREIRA, O.F. Caracterização de fibras ópticas altamente não lineares. 2012. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Departamento de Engenharia , Universidade do Porto, Portugal. 2012.

POLI, F.; CUCINOTTA, A.; SELLERI, S. *Photonic Crystal Fibers*, Springer, 2007.

Redes Ópticas Passivas II: O Software Optisystem. Disponível em: http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialropassiva2/pagina_2.asp-. Acesso em: 02/01/2017.

ANEXO A – PORTAS LÓGICAS

1.1 Introdução

Em 1854, o matemático inglês George Boole (1815-1864), através da obra intitulada **An Investigation of the Laws of Thought** (uma investigação das leis do pensamento), apresentou um sistema matemático de análise lógica conhecido como álgebra de Boole. Isso gerou um grande avanço pois todos os problemas até então conhecidos eram resolvidos por sistemas analógicos, também conhecidos por sistemas lineares.

Porém, em 1938, o engenheiro Claude Elwood Shannon utilizou as teorias da álgebra de Boole para a solução de problemas de circuitos de telefonia com relés, tendo publicado um trabalho chamado de **Symbolic Analysis of Relay and Switching**(análise simbólica de retransmissão e interrupção), introduzindo-se assim a eletrônica digital na área tecnológica.

Esse ramo da eletrônica emprega em seus sistemas um pequeno grupo de circuitos básicos padronizados conhecidos como portas lógicas.

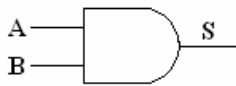
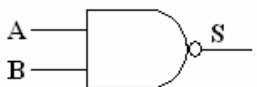
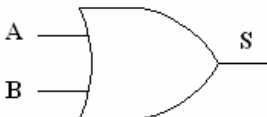
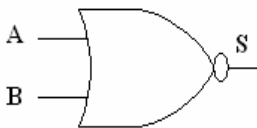
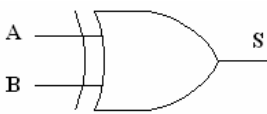
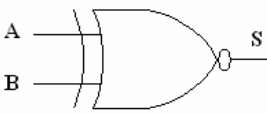
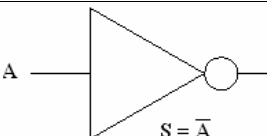
2.1 Portas Lógicas

Como consequência dos postulados da álgebra de Boole obtemos as funções lógicas que são os componentes básicos para criar um circuito lógico digital.

Nas funções lógicas temos apenas dois resultados distintos: o estado 0 (zero) e o estado 1 (um). O estado “0”representará fechamento ou ausência de sinais e o estado “1” representará abertura ou presença de sinais, ou seja, se representarmos por “0” uma situação deveremos representar por “1” a situação contrária.

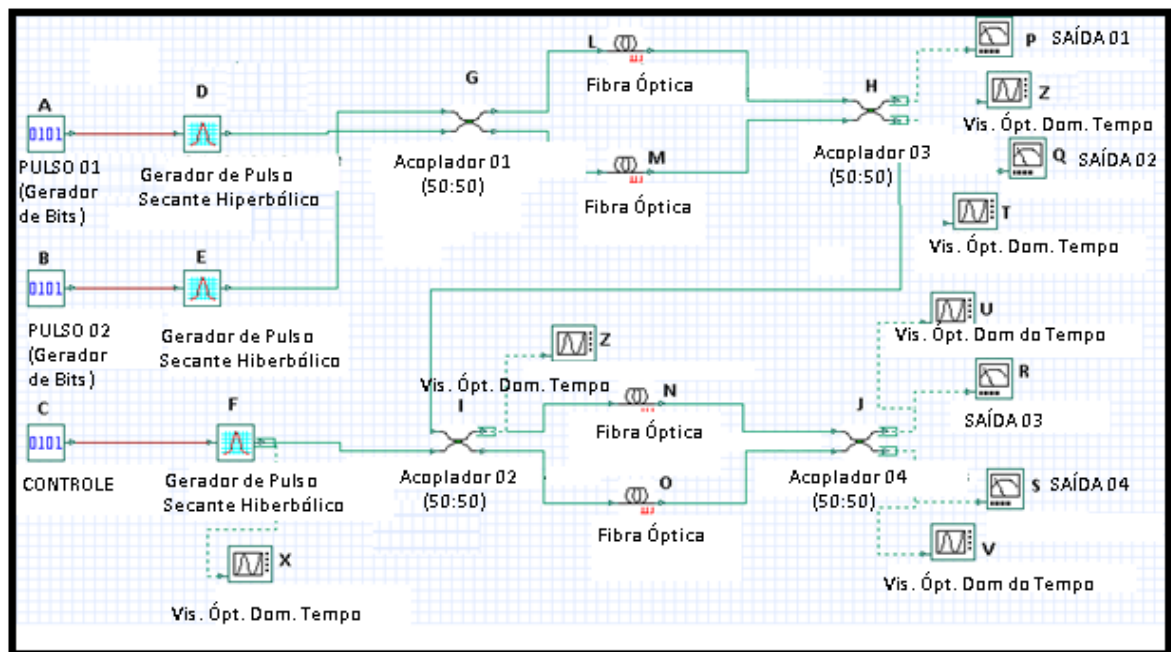
O comportamento das portas lógicas é ditado pela sua Tabela verdade, que apresentamos estados lógicos das entradas e das saídas relativos a uma determinada porta lógica. Temos sete tipos de portas lógicas, são elas: E (*AND*), NÃO-E (*NAND*), OU (*OR*), NÃO-OU (*NOR*),OU - Exclusivo (*XOR*), NÃO - OU - Exclusivo (*NXOR*) e NÃO (*NOT*). A Tabela 5.22, a seguir, apresenta um resumo para estas portas lógicas.

Tabela 5.4 – Portas Lógicas

PORTA	DIAGRAMA LÓGICO	DESCRIÇÃO GERAL	TABELA VERDADE															
E (AND)	 $S = A \cdot B$	Produce uma saída “1”, se todos os sinais de entrada forem “1” caso qualquer um dos sinais de entrada for “0”, a porta produzirá um sinal de saída igual a zero.	<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																
NÃO-E (NAND)	 $S = \overline{A \cdot B}$	Produce uma saída que é o inverso da saída produzida pela porta E (AND), assim sua saída será sempre “0” quando todos os valores de entrada forem iguais a “1”. Caso contrário, o valor da sua saída será “1”.	<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																
OU (OR)	 $S = A + B$	Produce uma saída “1”, se qualquer um dos sinais de entrada for igual a “1”; e produzirá um sinal de saída igual a “0” apenas se todos os sinais de entrada forem “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																
NÃO-OU (OUR)	 $S = \overline{A + B}$	Produce uma saída que é o inverso da saída produzida pela porta OR, assim sua saída será sempre “1” quando todos os valores de entrada forem iguais a “0”. Caso contrário, o valor da sua saída será “0”.	<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																
OU-EXCLUSIVO (XOR)	 $S = (A+B) \cdot \overline{(A \cdot B)} = A \oplus B$	Produce saída “0” quando todos os bits de entrada são iguais, e saída “1” quando os bits de entrada são diferentes.	<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																
NÃO-OU-EXCLUSIVO (NXOR)	 $S = \overline{(A+B) \cdot \overline{(A \cdot B)}} = \overline{A \oplus B}$	Produce saída “1” quando suas entradas possuírem o mesmo valor e “0” quando elas forem diferentes.	<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																
NÃO (NOT)	 $S = \overline{A}$	Inverte o valor da variável de entrada. Se o sinal de entrada for “0”ela produz uma saída“1”, se a entrada for “1” produz saída “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																	

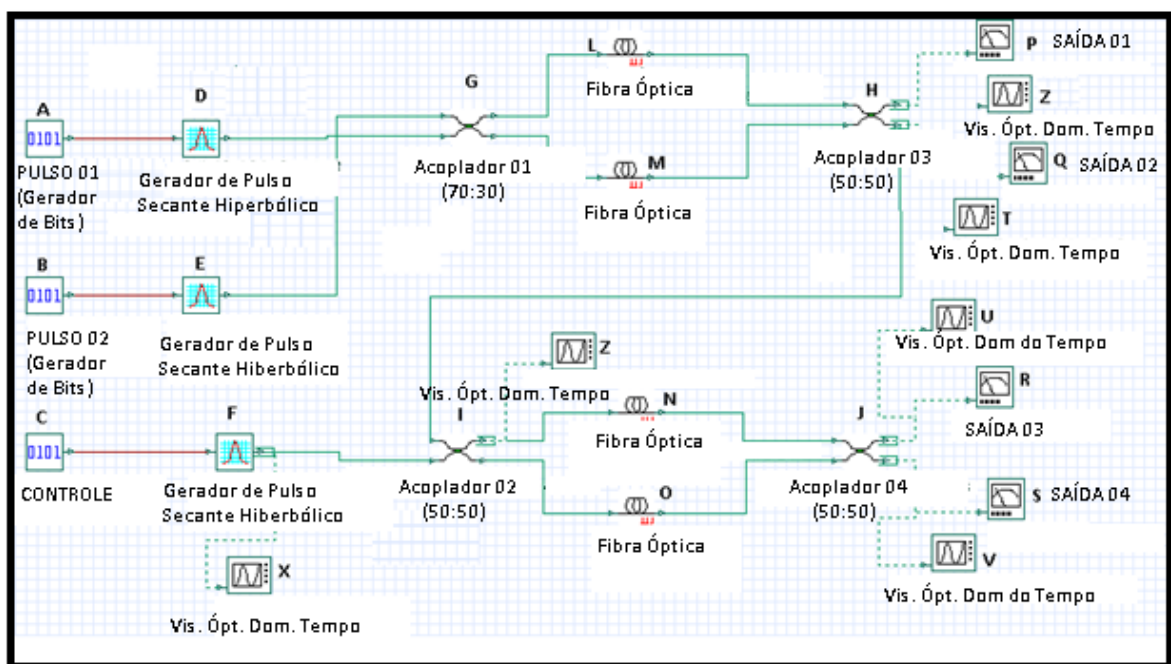
ANEXO B – MODELO ESQUEMÁTICO DA SIMULAÇÃO

Figura 5.24 - Modo esquemático do MZI no programa Optisystem do modelo 01



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.25 - Modo esquemático do MZI no programa Optisystem do modelo 02



Fonte: Elaborado pelo autor