

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JACKSON MOREIRA OLIVEIRA

PORTAS LÓGICAS TOTALMENTE ÓPTICAS BASEADO EM INTERFERÔMETRO DE
MICHELSON COM AMPLIFICADOR ÓPTICO SEMICONDUTOR

DM 29 / 2018

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JACKSON MOREIRA OLIVEIRA

PORTAS LÓGICAS TOTALMENTE ÓPTICAS BASEADO EM INTERFERÔMETRO DE
MICHELSON COM AMPLIFICADOR ÓPTICO SEMICONDUTOR

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica – PPGEE da UFPA para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Telecomunicações, com Linha de Pesquisa Eletromagnetismo Aplicado.

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PORTAS LÓGICAS TOTALMENTE ÓPTICAS BASEADO EM INTERFERÔMETRO DE
MICHELSON COM AMPLIFICADOR ÓPTICO SEMICONDUTOR

AUTOR: JACKSON MOREIRA OLIVEIRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA
EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE TELECOMUNICAÇÕES.

APROVADA EM 24 / 08 / 2018

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Marcos Benedito Caldas Costa
(ORIENTADOR – PPGEE/UFPA)

Prof. Dr. Manoel Ribeiro Filho
(AVALIADOR INTERNO – PPGEE/UFPA)

Profa. Dra. Fernanda Carla Lima Ferreira
(AVALIADORA EXTERNA – UNIFESSPA)

VISTO:

Prof. Dra. Maria Emília de Lima Tostes
(COORDENADORA DO PPGEE / ITEC / UFPA)

Dedico à minha esposa Eliane Pereira de Sousa Oliveira, a minha filha Family Joicy Lima Oliveira e aos meus irmãos e meus pais.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus.

Agradeço a minha família, que sempre esteve ao meu lado. Pelo incondicional apoio, por tudo! À Eliane Pereira de Sousa Oliveira e Jamily Joicy Lima Oliveira, pela paciência e apoio durante o curso. Dedico este trabalho a vocês. Amo vocês!

Agradeço aos amigos Fabio Barros de Sousa e Jorge E. de Oliveira, Elizete R. Sabino, Fabrício P. da Luz, Marcio B. C. Costa e Filerlinge M. de Souza pelas ajudas e incentivos. Muito obrigado!

Da mesma forma agradeço aos meus amigos de trabalho do IFPA, principalmente Hudson Afonso, que tanto me incentivou.

Ao Professor Dr. Marcos Benedito Caldas Costa, por sua excelente orientação. Por seu apoio e motivação desde sempre. Por ter acreditado na minha pessoa e ter aceitado a me orientar. Muito obrigado!

Aos professores Dr. Manoel Ribeiro Filho e Dra. Fernanda Carla Lima Ferreira, que participaram como membros da banca de defesa deste trabalho. Muito obrigado!

Finalmente, agradeço aos demais professores e colegas do PPGEE-UFPA que, de alguma forma, contribuíram para a minha formação e realização deste trabalho.

E posteriormente agradeço ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA) que em parceria com a Universidade Federal do Pará (UFPA) e Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA) me proporcionaram a oportunidade de fazer esta pesquisa.

“Geração vai e geração vem; mas a terra permanece para sempre. Levanta-se o sol, e põe-se o sol, e volta ao seu lugar, onde nasce de novo. O vento vai para o sul e faz o seu giro para o norte; volve-se, e revolve-se, na sua carreira, e retorna aos seus circuitos. Todos os rios correm para o mar, e o mar não se enche; ao lugar para onde correm os rios, para lá tornam eles a correr. Todas as coisas são cansadas tais, que ninguém as pode exprimir; os olhos não se fartam de ver, nem se enchem os ouvidos de ouvir. O que foi é o que há de ser; e o que se fez, isso se tornará a fazer; nada há, pois, novo debaixo do sol. Há alguma coisa que se possa dizer: Vê, isto é novo? Não! Já foi nos séculos que foram antes de nós”.

Livro de Eclesiastes 1:4-10

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	MOTIVAÇÃO	21
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO	22
1.2.1	<i>Objetivos específicos</i>	22
1.3	MÉTODOS DE PESQUISA	23
1.4	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	23
1.5	TRABALHOS CORRELATOS	24
1.6	REFERÊNCIAS	25
2	SISTEMA DE TELECOMUNICAÇÕES POR FIBRAS ÓPTICAS	26
2.1	FIBRAS ÓPTICAS	27
2.1.1	<i>Fibra Óptica Monomodo</i>	28
2.1.2	<i>Fibra Óptica Multimodo</i>	28
2.2	PROPAGAÇÃO DA ONDA EM FIBRAS ÓPTICAS	30
2.3	EFEITOS NÃO LINEARES EM FIBRAS ÓPTICAS	34
2.4.1	<i>Modulação de Ganho Cruzado (XGM – Cross-Gain Modulation)</i>	35
2.4.1	<i>Automodulação de Fase (SPM – Self-Phase Modulation)</i>	38
2.4.1	<i>Modulação de Fase Cruzada (XPM – Cross-Phase Modulation)</i>	39
2.4.1	<i>Mistura de Quatro Ondas (FWM – Four-Wave Mixing)</i>	40
2.4	REFERÊNCIAS	41
3	DISPOSITIVOS DE FIBRAS ÓPTICAS	44
3.1	AMPLIFICADOR ÓPTICO SEMICONDUTOR	44
3.1.1	<i>Amplificadores Ópticos</i>	44
3.1.2	<i>Amplificador Óptico Semicondutor (SOA)</i>	47
3.2	ACOPLADOR DIRECIONAL NÃO LINEAR (NLDC)	50
3.3	FIBRA DE GRADE DE BRAGG	52
3.4	CW LASER	55
3.5	REFERÊNCIAS	55
4	INTERFEROMETRIA	58
4.1	INTERFERÔMETRO DE MICHELSON (MI)	59
4.2	OUTROS INTERFERÔMETROS	61
4.2.1	<i>Interferômetro de Mach-Zehnder (MZI)</i>	62
4.2.2	<i>Interferômetro de Sagnac (SI)</i>	62
4.3	REFERÊNCIAS	63
5	PORTAS LÓGICAS	64
5.1	PORTA LÓGICA AND	65
5.2	PORTA LÓGICA OR	66
5.3	PORTA LÓGICA NOR	67
5.4	REFERÊNCIAS	67
6	SIMULAÇÕES E RESULTADOS NUMÉRICOS DAS PORTAS LÓGICAS AND, OR E NOR TOTALMENTE ÓPTICO BASEADO EM INTERFERÔMETRO DE MICHELSON	69
6.1	MÉTODOS E SIMULAÇÕES NUMÉRICAS	69
6.2	PROJETO DA PORTA LÓGICA AND TOTALMENTE ÓPTICA BASEADO EM SOA-MI	74
6.2.1	<i>Sessão de Transmissão da Porta Lógica AND</i>	75
6.2.2	<i>Transmissão com SOA-MI para a Porta Lógica AND</i>	76

6.2.3	<i>Sessão de Recepção da Porta Lógica AND</i>	77
6.2.4	<i>Esquemático Completo da Porta Lógica AND com SOA-MI</i>	77
6.2.5	<i>Resultados e Disciões para a Porta Lógica AND</i>	79
6.2.5.1	<i>Os Resultados para 4 Bits da Porta Lógica AND</i>	81
6.2.5.2	<i>Os Resultados para 8 Bits da Porta Lógica AND</i>	82
6.2.5.3	<i>Os Resultados para 16 Bits da Porta Lógica AND</i>	82
6.2.5.4	<i>Os Resultados para 32 Bits da Porta Lógica AND</i>	83
6.2.6	<i>Conclusão</i>	84
6.3	PROJETO DA PORTA LÓGICA OR TOTALMENTE ÓPTICA BASEADO EM SOA-MI	84
6.3.1	<i>Sessão de Transmissão da Porta Lógica OR</i>	84
6.3.2	<i>Transmissão com SOA-MI para a Porta Lógica OR</i>	85
6.3.3	<i>Sessão de Recepção da Porta Lógica OR</i>	86
6.3.4	<i>Esquemático da Porta Lógica OR com SOA-MI</i>	87
6.3.5	<i>Resultados e Disciões para a Porta Lógica OR</i>	89
6.3.5.1	<i>Os Resultados para 4 Bits da Porta Lógica OR</i>	90
6.3.5.2	<i>Os Resultados para 6 Bits da Porta Lógica OR</i>	91
6.3.5.3	<i>Os Resultados para 8 Bits da Porta Lógica OR</i>	92
6.3.5.4	<i>Os Resultados para 16 Bits da Porta Lógica OR</i>	92
6.3.5.5	<i>Os Resultados para 32 Bits da Porta Lógica OR</i>	93
6.3.6	<i>Conclusão</i>	94
6.4	PROJETO DA PORTA LÓGICA NOR TOTALMENTE ÓPTICA BASEADO EM SOA-MI	94
6.4.1	<i>Sessão de Transmissão da Porta Lógica NOR</i>	94
6.4.2	<i>Transmissão com SOA-MI para a Porta Lógica NOR</i>	95
6.4.3	<i>Sessão de Recepção da Porta Lógica NOR</i>	96
6.4.4	<i>Esquemático da Porta Lógica NOR com SOA-MI</i>	97
6.4.5	<i>Resultados e Disciões para a Porta Lógica NOR</i>	99
6.4.5.1	<i>Os Resultados para 4 Bits da Porta Lógica NOR</i>	100
6.4.5.2	<i>Os Resultados para 8 Bits da Porta Lógica NOR</i>	101
6.4.5.3	<i>Os Resultados para 16 Bits da Porta Lógica NOR</i>	102
6.4.5.4	<i>Os Resultados para 32 Bits da Porta Lógica NOR</i>	102
6.4.6	<i>Conclusão</i>	103
6.5	REFERÊNCIAS	103
7	CONCLUSÃO GERAL	105
7.1	TRABALHOS FUTUROS	105
7.2	PUBLICAÇÕES	105

LISTA DE SIMBOLOS

A	Amplitude
A_{eff}	Área Efetiva da Fibra
A_j	Pulso propagado na fibra
α	Constante de atenuação
\vec{B}	Densidade de Fluxo Magnético
β	Constante de Propagação
β_2	Coefficiente de dispersão de segunda ordem ou cromática, ou GVD
β_3	Coefficiente de dispersão de terceira ordem
c	Velocidade da luz no vácuo
C	Coefficiente de Acoplamento linear
\vec{D}	Densidade de Fluxo Elétrico
dB	Decibel
dBm	decibel com referência de 1 <i>miliwatt</i>
∂	caractere do Diferencial Parcial
\vec{E}	Vetor Campo Elétrico
$erfc(x)$	Função de erro complementar
G	Ganho
G_0	Ganho não-saturado
GHz	Gigahertz
\vec{H}	Vetor Campo Magnético
I_0	Valor médio de corrente de sinal para o nível do bit "0"
I_1	Valor médio de corrente de sinal para o nível do bit "1"
J	Vetor Densidade de corrente
k	Constante de acoplamento do acoplador
L	Comprimento da Fibra
L_c	Comprimento de acoplamento
L_{ef}	Comprimento Efetivo da Fibra
$\log_{10}()$	Logaritmo
λ	Comprimento de onda
\vec{M}	Polarização magnética induzida

mW	miliwatts
N	Número de componentes de frequência de entrada
n	Índice de Refração
n_{NL}	Índice de Refração não linear
n_0	Índice de refração ordinário do material
n_1	Índice de Refração do núcleo da Fibra óptica transmissora
n_2	Índice de Refração da casca da Fibra óptica transmissora
nm	nanômetros
η_{eff}	Índice de refração efetivo.
∇	Operador Nabla
P	Potência Óptica Contida no Pulso
\vec{P}	Polarização Elétrica Induzida no Meio
P_C	Potência crítica do acoplador
P_{med}	Potência média do sinal na saída do amplificador
P_{ASE}	Potência do ruído óptico de ASE
P_{NL}	Componente não-linear da polarização
P_i	Potência do sinal de entrada da fibra
P_{in}	Potência do sinal de entrada do amplificador
P_{out}	Potência do sinal de saída do amplificador
P_{sat}	Potência óptica de saturação
P_t	Potência transmitida
ps	picossegundos
π	Pi, com valor de aproximado de 3,1416
Q	Fator de Qualidade
ρ_f	Densidade de carga
v_g	Velocidade de grupo
ϕ	Deslocamento de Fase
Γ	Fator de confinamento
σ_0	Desvio padrão para o nível do bit "0";
σ_1	Desvio padrão para o nível do bit "1";
γ	Coefficiente de não linearidade da fibra óptica
Λ	Período de modulação da grade Bragg
$\varphi(z)$	Fase da grade Bragg

μm	Unidade de medida em micrometro
μ_0	Permeabilidade Magnética no vácuo
ϵ_0	Permissividade Elétrica no vácuo
$\chi^{(1)}$	Susceptibilidade linear
z	Posição da grade Bragg

LISTA DE ACRÔNIMOS

AND	Porta Lógica E.
ASE	<i>Amplified Spontaneous Emission</i> - Emissão Espontânea Amplificada
BER	<i>Bit Error Rate</i> – Taxa de Erro de Bit
Chirp	neste contexto, significa variação de fase no tempo
CW	<i>Continuous Wave</i> - Onda Contínua
DI	<i>Delay Interferometer</i> - Interferômetro de Atraso
DSF	<i>Dispersion Shifted Fiber</i> - Fibras de Dispersão Deslocada
EDA	<i>Eye Diagram Analyzer</i> –Analisador de Diagramas de Olho
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i> – Amplificador a Fibra Dopada de Érbio
FBG	<i>Fiber Bragg Grating</i> – Fibra de Grade de Bragg
FPA	<i>Fabry-Perot Amplifier</i> - Amplificador Fabry-Perot
FPI	<i>Fabry-Perot Interferometer</i> - Interferômetro de Fabry-Perot
FWM	<i>Four Wave Mixing</i> - Mistura de quatro ondas
GVD	<i>Group Velocity Dispersion</i> - Dispersão de Velocidade de Grupo
HNLF	<i>High Non-Linear Fiber</i> - Fibra Altamente Não-Linear
MI	<i>Michelson Interferometer</i> - Interferômetro de Michelson
MMF	<i>MultiMode Fiber</i> – Fibra Multimodo
MZI	<i>Mach-Zehnder Interferometer</i> - Interferômetro de Mach-Zehnder
NAND	Porta Lógica Não-E.
NLDC	<i>Nonlinear Directional Coupler</i> - Acoplador Direcional Não Linear
NLSE	<i>Nonlinear Schrödinger Equation</i> - Equação Não Linear de Schrödinger
NOR	Porta Lógica Não-OU.
NOT	Porta Lógica Não ou Inversor.
NOLM	<i>NonLinear Optical Loop Mirror</i> – Anel Óptico Refletivo Não Linear
NXOR	Porta lógica Não OU-Exclusivo.
NZDSF	<i>Non Zero Dispersion Shifted Fiber</i> - Fibra de Dispersão Deslocada não nula
NZR	<i>Non-Return to Zero</i> - Não Retorno ao Zero
OBP	<i>Gaussian Optical Filter</i> - Filtro Óptico Gaussiano
OPMV	<i>Optical Power Meter Visualizer</i> - Visualizador do Medidor de Potência Óptica
OR	Porta Lógica OU.
OGPG	<i>Optical Gaussian Pulse Generator</i> – Gerador de Pulso Óptico Gaussiano

OSA	<i>Optical Spectrum Analyzer</i> - Analisador do Espectro Óptico
OSNR	<i>Optical Signal-to-Noise Ratio</i> – Relação Sinal Ruído Óptica
OTDV	<i>Optical Time Domain Visualizer</i> – Visualizador Óptico no Domínio do Tempo
SMF	<i>Single Mode Fiber</i> – Fibra Monomodo
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i> - Relação Sinal Ruído
SI	<i>Sagnac Interferometer</i> - Interferômetro de Sagnac
SOA	<i>Semiconductor Optical Amplifier</i> - Amplificador Óptico Semicondutor
SOA-MI	<i>Michelson Interferometer Based on Semiconductor Optical Amplifier</i> - Amplificador Óptico Semicondutor Baseado em Interferômetro de Michelson.
SOA-MZI	<i>Mach-Zehnder Interferometer Based on Semiconductor Optical Amplifier</i> - Amplificador Óptico Semicondutor Baseado em Interferômetro de Mach-Zehnder.
SPM	<i>Self-Phase Modulation</i> - Auto modulação de Fase
SRS	<i>Stimulated Raman Scattering</i> – Espalhamento Raman Estimulado
SBS	<i>Stimulated Brillouin Scattering</i> – Espalhamento Brillouin Estimulado
TW	Travelling Wave - Ondas propagantes
TW-SOA	Travelling Wave – <i>Semiconductor Optical Amplifier</i> - Amplificador Óptico Semicondutor de Ondas propagantes
UDBSG	<i>User defined bit sequence generator</i> - Gerador de sequência de bit definido pelo usuário
UNI	<i>Ultrafast Nonlinear Interferometer</i> - Interferômetro Não-Linear Ultra-rápido
XGM	<i>Cross-Gain Modulation</i> – Modulação de Ganho Cruzado
XOR	Porta Lógica OU Exclusivo.
XPM	<i>Cross-Phase Modulation</i> - Modulação de Fase Cruzada
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i> - Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Componentes básicos de um Sistema de Comunicação por Fibra Óptica. Adaptado de [2].	27
Figura 2.2 - Representação de uma Fibra Óptica Convencional.	27
Figura 2.3 – Estrutura da Fibra Óptica Monomodo.	28
Figura 2.4 - Estrutura da Fibra Óptica Multimodo.	29
Figura 2.5 - Distâncias máximas de um link para diferentes tipos de fibra óptica em diferentes comprimentos de onda.	30
Figura 2.6 - Distâncias máximas de um link para diferentes tipos de fibra óptica em diferentes comprimentos de onda.	34
Figura 2.7 - Conversor de comprimento de onda baseado na XGM em SOA. Adaptado de [16]	37
Figura 2.8 - Efeito de FWM no domínio da frequência.	41
Figura 3.1 – As três configurações possíveis para um amplificador em redes ópticas.	45
Figura 3.2 – Configuração esquemática de um SOA.	47
Figura 3.3 – Esquema do Acoplador Direcional Duplo Não-Linear de comprimento L	50
Figura 3.4 – Representação das portas do Acoplador Direcional Duplo. Fonte: Adaptado [10]	51
Figura 3.5 – Esquema do funcionamento de uma Rede de Bragg.	53
Figura 3.6 – Diagrama da perturbação do índice de uma FBG uniforme.	54
Figura 4.1 – Interferômetro de Michelson e seus principais componentes.	59
Figura 4.2 – Esquema do Interferômetro de Michelson (a) usando duas fibras e (b) uma fibra.	60
Figura 4.3 – Interferômetro de Michelson em fibras ópticas.	61
Figura 4.4 – Interferômetro de (a) Mach-Zehnder, (b) Michelson e (c) Sagnac.	61
Figura 4.5 – Interferômetro de Mach-Zehnder em fibras ópticas.	62
Figura 4.6 – Interferômetro de Sagnac em fibras ópticas.	62

Figura 5.1 – Circuito lógico e tabela verdade das portas lógicas (a) NÃO (NOT); (b) E (AND); (c) NÃO-E (NAND); (d) OU (OR); (e) NÃO-OU (NOR) e; (f) OU EXCLUSIVO (XOR)...	64
Figura 5.2 – Símbolo da Porta Lógica AND. Adaptado de [10].	66
Figura 5.3 – Símbolo da Porta Lógica OR. Adaptado de [10].	66
Figura 5.4 – Símbolo da Porta Lógica NOR. Adaptado de [10].	67
Figura 6.1 – Interface gráfica do software OptiSystem. Adaptado de [3].	71
Figura 6.2 – Transmissor da Porta Lógica AND Totalmente Óptica com SOA-MI	75
Figura 6.3 – O Amplificador Óptico Semicondutor baseado em Interferômetro de Michelson (SOA-MI) para a Porta Lógica AND .	76
Figura 6.4 – Receptor da Porta Lógica AND Totalmente Óptica com SOA-MI.	77
Figura 6.5 – Esquemático completo do sistema de Porta Lógica AND Totalmente Óptica com SOA-MI	78
Figura 6.6 – Visualizador Óptico no Domínio do Tempo (a) Sequência de Entrada Power A (0100) e (b) Sequência de Entrada Power B (0101), (c) Saída do resultado da simulação para a Porta Lógica AND (0100); (d) Diagrama de Olho da porta AND com entrada de 4-bits e com largura de banda do filtro de 40 GHz .	81
Figura 6.7 – Visualizador Óptico no Domínio do Tempo (a) Sequência de Entrada Power A (01011010) e (b) Sequência de Entrada Power B (000110000), (c) Saída do resultado da simulação para a Porta Lógica AND (000110000); (d) Diagrama de Olho da porta AND com entrada de 8-bits e com largura de banda do filtro de 40 GHz .	82
Figura 6.8 – Visualizador Óptico no Domínio do Tempo (a) Sequência de Entrada Power A (0100001111000011) e (b) Sequência de Entrada Power B (0101110111011100), (c) Saída do resultado da simulação para a Porta Lógica AND (0100000111000000); (d) Diagrama de Olho da porta AND com entrada de 16-bits e com largura de banda do filtro de 40 GHz .	83
Figura 6.9 – Visualizador Óptico no Domínio do Tempo (a) Sequência de Entrada Power A (11011001011100100001011010010110) e (b) Sequência de Entrada Power B (10100110101100110101010100110000), (c) Saída do resultado da simulação para a Porta Lógica AND (10000000001100100001010000010000); (d) Diagrama de Olho da porta AND com entrada de 32-bits e com largura de banda do filtro de 40 GHz .	83
Figura 6.10 – Transmissor da Porta Lógica OR Totalmente Óptica com SOA-MI.	85

Figura 6.11 – O Amplificador Óptico Semicondutor baseado em Interferômetro de Michelson (SOA-MI) para a Porta Lógica OR .	86
Figura 6.12 – Receptor da Porta Lógica OR Totalmente Óptica com SOA-MI.	86
Figura 6.13 – Esquemático completo do sistema de Porta Lógica OR Totalmente Óptica com SOA-MI	88
Figura 6.14 – Resultados do Max. Q-Factor da Porta Lógica OR Totalmente Óptica com SOA-MI	90
Figura 6.15 – Resultados do Min. BER da Porta Lógica OR Totalmente Óptica com SOA-MI	90
Figura 6.16 – (a) Primeira sequência de entrada (0110) e segunda sequência de entrada (1100), resultado do sinal para porta OR (1110); b) Diagrama de Olho e Máximo Fator de Qualidade da porta OR com entrada de 4-bits	91
Figura 6.17 – (a) Primeira sequência de entrada (010010) e segunda sequência de entrada (010011), resultado do sinal para porta OR (010011); b) Diagrama de Olho e Máximo Fator de Qualidade da porta OR com entrada de 6-bits	91
Figura 6.18 – (a) Primeira sequência de entrada (01011010) e segunda sequência de entrada (00110000), resultado do sinal para porta OR (01111010); b) Diagrama de Olho e Máximo Fator de Qualidade da porta OR com entrada de 8-bits	92
Figura 6.19 – (a) Primeira sequência de entrada (0100001111000011) e segunda sequência de entrada (0101110111011100), resultado do sinal para porta OR (0101111111011111); b) Diagrama de Olho e Máximo Fator de Qualidade da porta OR com entrada de 16-bits	93
Figura 6.20 – (a) Primeira sequência de entrada (11011001011100100001011010010110) e segunda sequência de entrada (10100110101100110101010100110000), resultado do sinal para porta OR (11111111111100110101011110110110); b) Diagrama de Olho e Máximo Fator de Qualidade da porta OR com entrada de 32-bits	93
Figura 6.21 – Transmissor da Porta Lógica NOR Totalmente Óptica com SOA-MI	95
Figura 6.22 – O Amplificador Óptico Semicondutor baseado em Interferômetro de Michelson (SOA-MI) para a Porta Lógica NOR	96
Figura 6.23 – Receptor da Porta Lógica NOR Totalmente Óptica com SOA-MI	97

Figura 6.24 – Esquemático completo do sistema de Porta Lógica NOR Totalmente Óptica com SOA-MI	98
Figura 6.25 – (a) Primeira sequência de entrada (0100) e segunda sequência de entrada (0101), Saída de sinal do resultado simulado na porta lógica NOR (1010) de 4 bits para 40 GHz de largura de banda do filtro; b) Diagrama de Olho e Máximo Fator de Qualidade da porta NOR com entrada de 4-bits para 40 GHz	101
Figura 6.26 – (a) Primeira sequência de entrada (01011010) e segunda sequência de entrada (00110000), Saída de sinal do resultado simulado na porta lógica NOR (10000101) de 8 bits para 40 GHz de largura de banda do filtro; b) Diagrama de Olho e Máximo Fator de Qualidade da porta NOR com entrada de 8-bits para 40 GHz	101
Figura 6.27 – (a) Primeira sequência de entrada (0101110111011100) e segunda sequência de entrada (1010000000100000), Saída de sinal do resultado simulado na porta lógica NOR (0100001111000011) de 16 bits para 40 GHz de largura de banda do filtro; b) Diagrama de Olho e Máximo Fator de Qualidade da porta NOR com entrada de 16-bits para 40 GHz ...	102
Figura 6.28 – (a) Primeira sequência de entrada (11011001011100100001011010010110) e segunda sequência de entrada (10100110101100110101010100110000), Saída de sinal do resultado simulado na porta lógica NOR (00000000000011001010100001001001) de 32 bits para 40 GHz de largura de banda do filtro; b) Diagrama de Olho e Máximo Fator de Qualidade da porta NOR com entrada de 32-bits para 40 GHz	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Resumo de Efeitos não Lineares em Fibras Ópticas.	34
Tabela 3.1 – Parâmetros utilizados para os SOAs nas simulações.	49
Tabela 5.1 – Tabela Verdade da Porta Lógica AND.	66
Tabela 5.2 – Tabela Verdade da Porta Lógica OR.	66
Tabela 5.3 – Tabela Verdade da Porta Lógica NOR.	67
Tabela 6.1 – Diferentes Números de Bits para a Porta Lógica AND	79
Tabela 6.2 – Analise dos Resultados de 10 GHz para 4, 8, 16 e 32 Bits da Porta AND	80
Tabela 6.3 – Analise dos Resultados de 20 GHz para 4, 8, 16 e 32 Bits da Porta AND	80
Tabela 6.4 – Analise dos Resultados de 40 GHz para 4, 8, 16 e 32 Bits da Porta AND	80
Tabela 6.5 – Diferentes Números de Bits para a Porta Lógica OR	89
Tabela 6.6 – Analise dos Resultados de 20 GHz para 4, 6, 8, 16 e 32 Bits da Porta OR	89
Tabela 6.7 – Analise dos Resultados de 10 GHz para 4, 8, 16 e 32 Bits da Porta NOR	99
Tabela 6.8 – Analise dos Resultados de 20 GHz para 4, 8, 16 e 32 Bits da Porta NOR	99
Tabela 6.9 – Analise dos Resultados de 40 GHz para 4, 8, 16 e 32 Bits da Porta NOR	100
Tabela 6.10 – Diferentes Números de Bits para a Porta Lógica NOR	100

RESUMO

Neste trabalho, propõe-se a estrutura do dispositivo de portas lógicas totalmente ópticas baseada em um interferômetro Michelson (MI) composto de amplificador óptico semiconductor (SOA) formando uma estrutura de dispositivos lógicos SOA-MI com grade de Bragg de Fibra (FBG) simetricamente idêntica na saída de cada um de seus braços, para simulação numérica das portas lógicas AND, OR e NOR de dois sinais de entrada binários com diferentes números de bit usando a técnica de modulação de ganho cruzado (XGM) a 10 Gb/s de taxa de bits limita a largura de banda em 10, 20 e 40 GHz usando o software OptiSystem 15.0 da OptiWave Corporation para demonstrar e extrair regras simples de projeto para processamento óptico de alta velocidade e análise de propriedades não lineares induzidas por SOA. Além disso, este trabalho inclui o estudo do efeito da largura de banda e número de bits na potência recebida, taxa de erro mínimo (BER), fator máximo de qualidade (fator-Q), relação sinal-ruído óptico (OSNR) e espectro óptico, que demonstra portas de alta velocidade e desempenho. Executou-se as portas lógicas baseadas em SOA-MI com alguns parâmetros e os resultados podem demonstrar uma estrutura de dispositivos lógicos ópticos de alto desempenho com alta velocidade.

Palavras-Chave: Totalmente ópticas; Portas lógicas; Interferômetro de Michelson; Amplificador Óptico Semiconductor; Fator de Qualidade, Taxa de Erro de Bits.

ABSTRACT

In this work, proposes all-optical logic gates device structure based on a Michelson interferometer (MI) composed of semiconductor optical amplifier (SOA) forming a structure of SOA-MI logic devices with symmetrically identical Fiber Bragg Grating (FBG) at the output of each of its arms, for numerical simulation of the all-optical AND, OR and NOR logic gates of two binary input signals with different bit numbers using the cross-gain modulation (XGM) technique at 10 Gb/s bit rate and filter bandwidth at 10, 20 and 40 GHz using OptiSystem 15.0 software by OptiWave Corporation, to demonstrate and extract simple design rules for high-speed optical processing and analysis of non-linear SOA-induced properties. In addition, this work includes the study of the effect of bandwidth and number of bits on received power, minimum bit error rate (BER), maximum quality factor (Q-factor), Optical Signal to Noise Ratio (OSNR) and optical spectrum, which demonstrates high-speed gates and performance. Were run the SOA-MI-based logic gates with some parameters and the results can demonstrate a structure of high-performance optical logic devices with high speed.

Keywords: All-Optical; Logic gate; Michelson Interferometer; Semiconductor Optical Amplifier; quality factor, bit error rate.

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

Em um mundo globalizado, é essencial a comunicação ou tráfego de informações através de redes de telecomunicações que são capazes de tratar e/ou processar informação a velocidades ultra-rápidas, e é onde as fibras ópticas são cruciais para ter um sistemas cada vez mais eficientes e robustos, pois apresentam fenômenos físicos como exemplo o ganho Raman, dispersão e a baixa perda ou menor atenuação, permitindo o chaveamento ultra-rápido em guias de onda não lineares baseado em efeitos *Kerr*, maior largura de banda, não linearidade e elevada imunidade às interferências eletromagnéticas, dando um significativo desenvolvimento nos últimos anos no campo das comunicações ópticas, sendo usada em várias áreas, como a medicina, espectroscopia, telecomunicações e sensores.

Também é considerada a eficiência energética em sistemas totalmente ópticos, compostos de fonte de luz, fibras ópticas, fotodiodos e amplificadores, dentre outros dispositivos passivos, pois não há a necessidade de conversão óptico para elétrico e vice-versa, garantindo altas taxas de transmissão.

1.1 MOTIVAÇÃO

A crescente demanda por tráfego de informações exige a necessidade do avanço da capacidade e funcionalidade dos sistemas de comunicações.

As tecnologias requerem maiores inovações, onde entra em questão os dispositivos e sistemas totalmente ópticos, os materiais não lineares como exemplo as fibras ópticas com longo comprimento de interação, para produzir dispositivos mais compactos com redução da latência e aumento da estabilidade térmica. As fibras são ótimas para testes de novas arquiteturas de chaveamento totalmente óptico, onde aplicações que aplicam portas ultra-rápidas para redes metropolitanas e locais precisam ser exploradas.

As portas lógicas são elementos básicos para a implementação de todo e qualquer circuito lógico na ciência da engenharia da computação que inclui as redes de comunicação, pois possibilita uma distribuição inteligente da informação ao longo do sistema, no sentido de que um fluxo de dados pode controlar outro [1], sendo de grande relevância na realização de funcionalidades como multiplexação add/drop, conversores de comprimento de onda,

sincronização de pacotes, recuperação de clock, reconhecimento de endereço, comparadores de bits, processamento de sinal óptico em redes de comunicação de alta velocidade, aumenta a largura de banda [3].

Redes de comunicação óptica baseadas em Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda (WDM) de super velocidade exigiriam funções e portas óticas de alta velocidade para realizar o crescente processamento de dados. Para isso, tem os interferômetros em fibra óptica, com sua versatilidade, inúmeras configurações possíveis e diversas aplicações.

Dessa forma, diversas máquinas, como computadores, calculadoras, sistemas de controle e automação, codificadores, decodificadores, dentre outros, empregam um grupo de circuitos lógicos básicos, conhecidos como portas, dentre as quais destacamos as portas lógicas NOT (NÃO), AND (E), NAND (NÃO-E), OR (OU), NOR (NÃO-OU), XOR (OU EXCLUSIVO) e NXOR (NÃO-OU EXCLUSIVO). Devido a essa necessidade de processamento de informações a altas taxas e pequenas perdas, buscou-se desenvolver um estudo numérico de portas lógicas totalmente óptica com Interferômetro Michelson (MI).

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo geral deste trabalho é investigar por meio de simulações via Optisystem® [2], os dispositivos de portas lógicas totalmente ópticas para avanços científicos e tecnológicos, utilizando amplificador óptico semiconductor e um interferômetro de Michelson, a serem implantadas em sistemas de comunicação ópticos.

1.2.1 Objetivos específicos

- ✓ Realizar um estudo analítico da função de transferência de potência do Interferômetro de Michelson utilizando um Amplificador Óptico Semiconductor (SOA).
- ✓ Estudar numericamente, por meio de simulações, a obtenção de portas lógicas.
- ✓ Estudar a qualidade das portas lógicas obtidas por meio do parâmetro de fator Q, a Relação Sinal Ruído Óptica (OSNR) e a Taxa de Erro de Bit (BER).
- ✓ Comparar os resultados obtidos nas simulações.

1.3 MÉTODOS DE PESQUISA

Inicialmente realizou-se a busca de trabalhos correlatos para o levantamento bibliográfico acerca das portas lógicas com amplificador óptico semiconductor baseado em interferômetro e os efeitos não lineares encontrados na fibra óptica.

O próximo passo foi a construção do projeto das portas lógicas totalmente óptica com Amplificador Óptico Semiconductor baseado em Interferômetro de *Michelson* (SOA-MI) com efeito não linear de Modulação de Ganho Cruzado (XGM), através do *software* de simulação de redes *Optisystem* da *Optiwave Coporation*, onde simulações numéricas foram realizadas obtendo as portas lógicas AND (“E”), OR (“OU”) e NOR (“NÃO OU”).

A última etapa realizou-se a coleta e análises dos resultados e escrita da dissertação.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O primeiro capítulo, mostra um panorama sobre a demanda do uso de redes ópticas em sistemas de telecomunicações e também um apanhado geral sobre a motivação, a justificativa, os objetivos e os resultados pretendidos com o projeto.

O segundo capítulo, aponta o estado da arte sobre as redes ópticas, os tipos de fibras ópticas, a propagação da onda em fibra óptica regido pelas Equações de Maxwell, a Equação não linear de *Schrödinger*, os fatores que degradam um sistema de comunicação, os efeitos não lineares.

O terceiro capítulo, aborda alguns dispositivos ópticos que foram utilizados nos esquemas de portas lógicas aqui implementadas.

O quarto capítulo, apresenta os conceitos de interferometria, onde aborda alguns interferômetros, em especial o de *Michelson*.

O quinto capítulo traz os conceitos e importância das portas lógicas totalmente óptica, apresentando as respectivas portas implementadas aqui neste trabalho, que são: AND, OR e NOR.

O sexto capítulo, apresenta de forma resumida o *software Optisystem*, bem como os componentes do projeto de portas lógicas com amplificador óptico semiconductor baseado em interferômetro de *Michelson*, com efeito não linear XGM. Também os resultados e as discussões das simulações que provam a eficiência do SOA-MI para projetos de portas lógicas.

O sétimo capítulo, apresenta as conclusões gerais e as expectativas para continuação da pesquisa e trabalhos futuros. Também são apresentados as referências e os títulos dos trabalhos publicados.

1.5 TRABALHOS CORRELATOS

As fibras ópticas vem dando grande avanços para os sistemas de telecomunicação, interligando o mundo globalizado. Portanto, torna-se importante desenvolver e promover pesquisas nessa área, afim de trazer novas contribuições para o desenvolvimento da humanidade. Daí entra a questão do uso das portas lógicas totalmente ópticas, onde vários trabalhos têm sido publicados nesse sentido como em [3] que revisa o status atual e os designs de portas totalmente ópticas, discuti e compara vários esquemas com e sem amplificadores ópticos semicondutores (SOA), e classifica as portas lógicas de acordo com suas estruturas. Já em [4], diz que as portas lógicas totalmente ópticas são projetadas para executar a um número maior de bits, para usar uma porta em várias funções, baseado na não-linearidades do amplificador óptico semiconductor (SOA), que fornece uma forte mudança do índice de refração juntamente com um alto ganho, implementado com um interferômetro Mach-Zehnder (MZI) formando uma estrutura SOA-MZI criando as portas lógicas XOR, NOR, OR e XNOR com diferentes números de bits (4, 6, 8, 16 e 32 bits) a 10 Gb/s afim de analisar o efeito do número de bits na potência recebida, taxa mínima de erro de bit e máximo fator-Q.

Também [5], usa a estrutura SOA-MZI para executar as portas lógicas OR e NOT com 10, 20 e 40 Gb/s com o objetivo de extrair regras de design simples com uma corrente de injeção baixa em SOA, e baixo valor no consumo total de energia. Analisa o efeito da taxa de bits na potência recebida, taxa mínima de erro de bit (BER) e fator-Q, observando que a saída lógica da porta possui uma taxa de extinção de mais de 10 dB com boa abertura ocular, uma operação livre de erros a uma taxa de bits diferente.

E por fim, vemos [6] que devido a uma qualidade excepcional e amplamente aceita de não-linearidade em amplificadores ópticos semicondutores, o SOA tornou-se a melhor fonte atrativa para a atualização de todos os diferentes tipos de funções lógicas ópticas em redes ópticas, com o uso por exemplo, da modulação de ganho cruzado (XGM) e modulação de fase cruzada (XPM) para reconfigurar e implementar portas XOR, AND e OR usando o Optisystem.

Além do MZI, também pode-se implementar portas lógicas com o interferômetro de Michelson, onde [7] realiza uma investigação numérica do desempenho de um dispositivo

totalmente óptico, composto por um acoplador direcional duplo, seguido de duas grades de Bragg simetricamente iguais, gravadas nos seus braços de saída, configurando um Interferômetro de Michelson de fibras de cristal fotônico com características de um filtro add/drop, para aplicações em circuitos lógicos nas configurações on-off e ppm, onde utilizou o dispositivo como uma porta lógica de duas entradas para obtenção das funções lógicas XOR, OR e NOT, com o objetivo de comparar o desempenho das portas lógicas obtidas.

1.6 REFERÊNCIAS

- [1] FRAGA, Wilton Bezerra de. Estudo do desempenho de acoplador direcional não linear duplo assimétrico de fibras ópticas operando portas lógicas. 2006. 82 f. Dissertação (Mestrado em Física) - Programa de Pós-Graduação em Física, Departamento de Física, Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.
- [2] Optiwave Systems Inc. Products Optisystem. Disponível em: <<https://optiwave.com/optisystem-overview/>>. Acesso em: 01/06/2018
- [3] Singh P, Tripathi DK, Jaiswal S, Dixit HK (2014), "All-optical logic gates: designs, classification and comparison". Zoran Ikonik Academic Edition, 19 Mar (2014).
- [4] Eman M. El-Saeed, Ahmed Abd El-Aziz, Heba A. Fayed, Moustafa H. Aly, "Optical logic gates based on semiconductor optical amplifier Mach-Zehnder interferometer: design and simulation", *Optical Engineering* 55(2), 025104 (9 February 2016).
- [5] Azhar Hussein Neama and Ismael Shanan Desher. High Data Rate Optical logic OR, and NOT Gates at Optimum Injection Current based on SOA-MZI. *International Journal of Computer Applications* 177(3):24-32, November 2017.
- [6] Anyigor I, Eke J, Nweke F. SOA Photonic Integration on MZI Switching Structures in realizing Optical (XOR, AND, OR) Logic Gates in Optical Networks. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*. 2015 Feb; 2(2):1-12.
- [7] SOUSA. J. R. R. Estudo do desempenho do interferômetro de Michelson de fibras de cristal fotônico para aplicações em circuitos lógicos nas configurações on-off e ppm. 2014. 142 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Teleinformática) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

CAPÍTULO 2

Neste capítulo serão apresentados os aspectos teóricos gerais acerca dos sistemas de telecomunicações por fibra óptica, os tipos de fibras ópticas, seus modos de propagação, tipos e aplicações. Serão apresentados o estado da arte no que diz respeito as equações que regem a óptica não linear, como as Equações de Maxwell e a sua relação com a propagação da luz e também os modelos teóricos fundamentados na Equação não linear de *Schrödinger* (NLSE). Abordará também sobre os principais efeitos não lineares encontrados em fibra óptica.

2 SISTEMA DE TELECOMUNICAÇÕES POR FIBRAS ÓPTICAS

A **Fibra Óptica** é o meio de transmissão de informação mais eficiente, pois proporciona alta qualidade, ultrarrápida e grande capacidade de tráfego de dados, amplamente utilizada em diversos ambientes e em sistema de telecomunicações.

Como qualquer sistema de comunicação, um sistema óptico possui os três elementos chaves: o transmissor, o meio físico e o receptor. O transmissor tem a função de gera a mensagem a ser transportada, converter os sinais elétricos em ópticos para propagação no guia de onda (meio físico) até o receptor, que transforma os sinais ópticos em elétricos por meio de um fotodetector [1].

De acordo com a necessidade, outros componentes ativos ou passivos poderão ser inseridos na rede óptica, tais como: conectores, acopladores, fibra de grade Bragg (FBG), amplificadores, filtros, WDMs, compensadores de dispersão e atenuadores.

Os principais fatores que diferenciam um tipo de sistema do outro são a velocidade, a taxa de transmissão, a capacidade (banda passante) e a qualidade das informações transmitidas e recebidas. Nesse sentido, a transmissão por fibra óptica tem melhor desempenho em relação aos cabos metálicos.

A fibra óptica apresenta várias vantagens em relação ao cabo de metálico, pois não sofre interferências eletromagnéticas, não tem problemas de aquecimento, transmite um volume muito maior de informações, reduz custos de manutenção, peso reduzido, segurança no transporte das informações e matéria prima abundante. Porém as fibras ópticas são passivas de efeitos não lineares, atenuações devido a dobras acentuadas e também aos dispersivos, os quais comprometem o desempenho do sistema, mas que com os procedimentos certos esses problemas podem ser tratados [1].

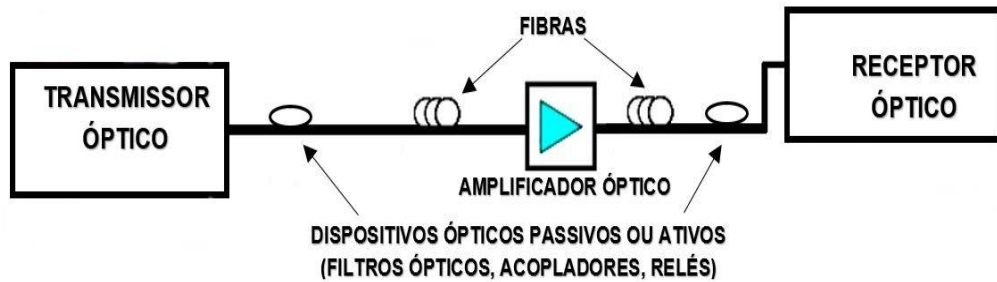


Figura 2.1 - Componentes básicos de um Sistema de Comunicação por Fibra Óptica. Adaptado de [2].

2.1 FIBRAS ÓPTICAS

A fibra óptica convencional é subdividida em três partes: um revestimento primário (a capa), a casca (*cladding*) e o núcleo (a fibra propriamente dita formada por um meio dielétrico cilíndrico) conforme a figura 2.2. O índice de refração do núcleo n_1 , formado por um vidro composto de sílica pura (SiO_2 - *óxido de silício*) é maior do que o índice de refração da casca n_2 , desta forma ($n_1 > n_2$), ocorrendo sucessivas reflexões interna total no guia, propagando a luz ao longo do núcleo da fibra. A equação que relaciona esses índices de refração pode ser obtida pela equação da lei de Snell-Descartes.

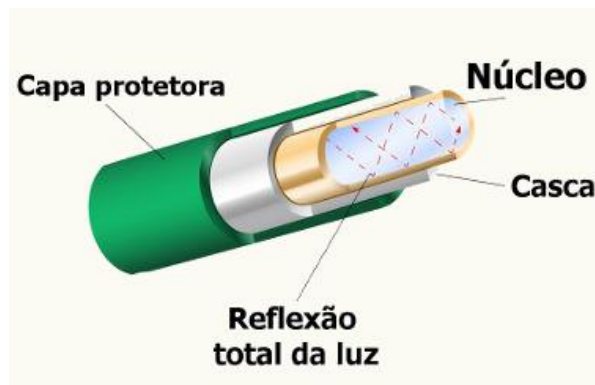


Figura 2.2 - Representação de uma Fibra Óptica Convencional.

Existem dois tipos de perfis de índices de refração para as fibras ópticas mais comumente encontradas, conhecidos como índice degrau e índice gradual. Nas fibras com índice degrau, o índice de refração entre o núcleo e a casca varia abruptamente, enquanto que nas fibras com índice gradual o índice de refração decresce gradualmente do centro à interface núcleo-casca [3].

A casca reduz a dispersão devido a descontinuidade da superfície do núcleo, protegendo-o de contaminações. A capa é composta por material plástico elástico cobrindo a casca e o núcleo, preservando a integridade da fibra [1] [2].

A fibra óptica é dividida em dois tipos: a monomodo e a multimodo. Esta classificação está relacionada diretamente a banda passante que depende do seu comprimento, da forma geométrica e do perfil de índices de refração, e quanto ao modo de propagação.

2.1.1 Fibra Óptica Monomodo

A fibra monomodo (SMF – *Single Mode Fiber*), recebe esse nome por ser uma fibra que propaga apenas um modo. Possui o diâmetro do núcleo da ordem de 8 a 12 μm e da casca da ordem de 125 μm [1] [4], com uma diferença no índice de refração do núcleo (n_1) em relação ao da casca (n_2), onde temos ($n_1 > n_2$), assim temos a reflexão interna total na interface núcleo-casca, ocorrendo o confinamento e propagação da luz no núcleo.

São adequadas para aplicações que envolvam grandes distâncias devido as baixas perdas (atenuação) menores que 0,5 dB/km para o comprimento de onda de 1550 nm (infravermelho), podendo ultrapassar 50 Km de distância entre repetidores. Possibilita a operação de transmissão de luz de forma linear, em comprimentos de onda entre 1310 nm a 1550 nm [1][4].

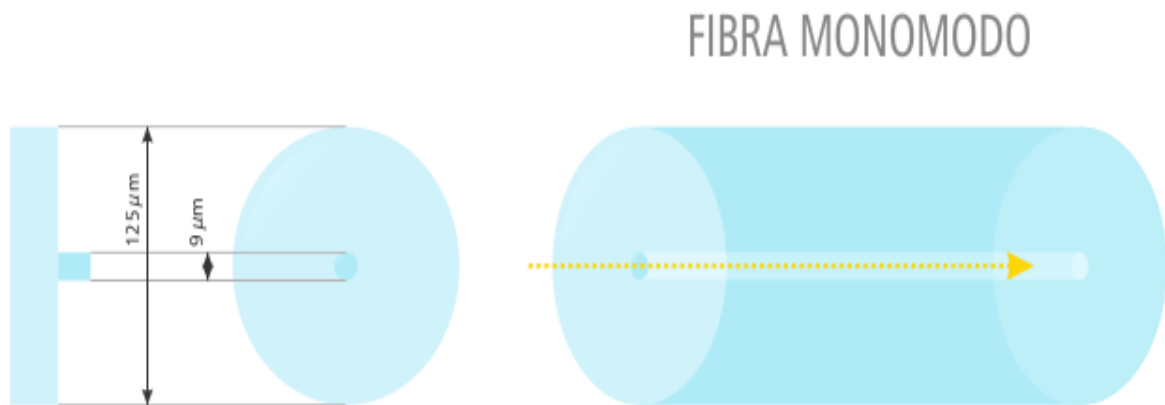


Figura 2.3 – Estrutura da Fibra Óptica Monomodo.

Dentro das fibras monomodo temos três tipos de fibra: **SMF** (*Single Mode Fiber*), **DSF** (*Dispersion Shifted Fiber*) e **NZDSF** (*Non Zero Dispersion Shifted Fiber*).

2.1.2 Fibra Óptica Multimodo

A fibra multimodo (MMF – *MultiMode Fiber*) permite a propagação da luz em diversos modos e é a mais utilizada nas aplicações em redes locais (LAN), como exemplo em indústrias, e possibilita operação em comprimentos de onda de 850 nm ou 1300 nm . O diâmetro do seu núcleo é muito maior ($>50\ \mu\text{m}$) do que a da fibra óptica monomodo ($8\text{ a }12\ \mu\text{m}$).

Pode ter índice em degrau ou gradual, conforme mostra a figura 2.4, com seus respectivos modos de propagação do pulso no núcleo da fibra, e permite a propagação de uma grande quantidade de modos.

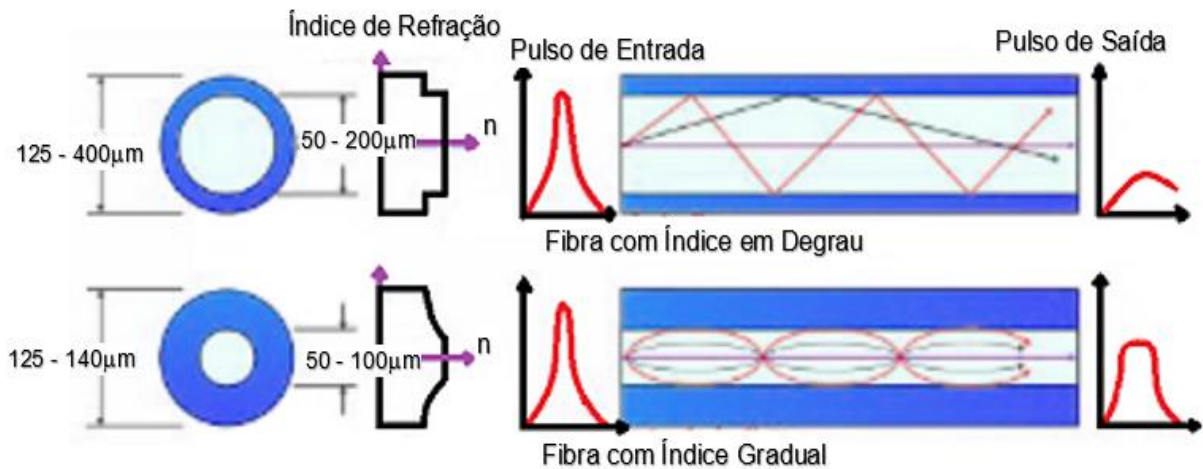


Figura 2.4 - Estrutura da Fibra Óptica Multimodo.

A fibra óptica multimodo de índice em degrau possui o diâmetro do núcleo e da casca variando na ordem de $50 - 200\ \mu\text{m}$ e $125 - 400\ \mu\text{m}$ respectivamente, recomendado para curtas distâncias. A fibra óptica multimodo de índice gradual possui o diâmetro do núcleo e da casca variando na ordem de $50 - 100\ \mu\text{m}$ e $125 - 140\ \mu\text{m}$ respectivamente, sendo que seu núcleo possui índice de refração variável, evitando o alargamento do pulso, com maior banda passante e maior capacidade de transmissão comparado ao índice em degrau [1].

Na figura 2.5, mostra um resumo dos tipos de fibra óptica, onde mostra as distâncias máximas em diferentes comprimentos de onda.

Longitudud de onda	Tipo de Fibra (núcleo/revestimento)	distancia máxima	
850 nm	100/140 μm 85/125 μm 62.5/125 μm 50/125 μm	multimodo	0.1
			0.5
			1
			5
1330 nm	50/125 μm 9/125 μm	multimodo	10
			50
1550 nm	9/125 μm	monomodo	100
			+100

Figura 2.5 - Distâncias máximas de um link para diferentes tipos de fibra óptica em diferentes comprimentos de onda

2.2 PROPAGAÇÃO DA ONDA EM FIBRAS ÓPTICAS

Para a compreensão dos efeitos não lineares em fibras ópticas é necessário considerar a teoria da propagação eletromagnética em meios dispersivos não lineares, e para isso, as Equações de Maxwell podem ser usadas para obter a equação de onda que descreve a propagação da luz em fibras ópticas (um guia de onda de simetria cilíndrica), pois trata-se de um fenômeno eletromagnético, sendo que em meios não condutor, sem cargas livres, com densidade de corrente nula e baixas perdas, são dadas por [5]:

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = 0 \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.4)$$

onde \vec{E} é o vetor do campo elétrico e \vec{H} do magnético, e \vec{D} a densidade de fluxo elétrico e \vec{B} a densidade de fluxo magnético, todos em funções do espaço e tempo. Nas fibras ópticas há

ausência de cargas livres, então o vetor densidade de corrente \mathbf{J} e a densidade de carga ρ_f que representam as fontes para o campo eletromagnético são nulos. Relacionando \vec{D} e \vec{B} aos vetores de campo \vec{E} e \vec{H} da seguinte forma [5] [6]:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (2.5)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (2.6)$$

Sendo ε_0 a permissividade elétrica do vácuo igual a $8,854 \times 10^{-12} \text{ Farad/m}$ e μ_0 a permeabilidade magnética do vácuo igual a $4\pi \times 10^{-7} \text{ Henry/m}$, e por motivo da fibra óptica composta basicamente por sílica ser um meio isotrópico não magnético, a polarização magnética induzida \vec{M} é nula ($\vec{M} = 0$) [5], e \vec{P} é a polarização elétrica induzida no meio, expressando a forma como a fibra responde a presença de um campo óptico, dada por [1]:

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \chi^{(1)} \vec{E} + \vec{P}_{NL} \quad (2.7)$$

em que P_{NL} e $\chi^{(1)}$ são respectivamente, a componente não-linear da polarização e o termo de susceptibilidade linear.

Pode-se eliminar \vec{D} e \vec{B} em favor de \vec{E} e \vec{P} calculando o rotacional da equação (2.1) e usando as equações (2.2), (2.5) e (2.6) e obtém a equação que descreve os fenômenos ondulatórios dos campos eletromagnéticos da fibra óptica [6]:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{P}}{\partial t^2} \quad (2.8)$$

onde $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}$ é a velocidade da luz no vácuo, com a relação $\mu_0 \varepsilon_0 = 1/c^2$.

A partir da equação (2.3), faz-se a relação $\nabla \cdot \vec{D} = \varepsilon \nabla \cdot \vec{E} = 0$, com permissividade do meio sendo $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$, independentemente da posição. Desta forma, ao usar a identidade vetorial, $\nabla \times \nabla \times \vec{E} \equiv \nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} = -\nabla^2 \vec{E}$, a equação 2.8 pode ser escrita como:

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{P}}{\partial t^2} \quad (2.9)$$

O estudo da maioria dos efeitos não lineares em fibras ópticas envolve o uso de pulsos curtos, com a largura variando de ~10ns - ~10fs, e ambos os efeitos dispersivos e não lineares influenciam na sua forma e no seu espectro [7].

Os modos guiados tem uma constante de propagação β , o qual está relacionado com o índice de refração efetivo n_{eff} , de acordo com a seguinte expressão:

$$\beta = \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda} \quad (2.10)$$

onde λ é o comprimento de onda óptico ($k_0 = 2\pi/\lambda$, é o número de onda de luz no vácuo) [6].

Descreve-se a propagação de um feixe de luz ao longo da fibra óptica por meio da Equação Não Linear de Schrödinger (NLSE – *Non-Linear Schrödinger Equation*) em sua forma simplificada, elaborada a partir das equações de Maxwell [5]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \frac{1}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} + \frac{\alpha A}{2} = i\gamma |A|^2 A \quad (2.11)$$

onde A é a amplitude complexa do sinal óptico, β_2 e β_3 são os parâmetros de dispersão de velocidade de grupo (GVD) de segunda e terceira ordem, α é a constante de atenuação da fibra, e o termo do lado direito da equação regula o efeito não linear de auto modulação de fase (SPM).

E γ é o coeficiente de não linearidade da fibra representado pela SPM, que varia entre 1 e 5 (Wkm)⁻¹ para a sílica, conforme o tipo de fibra e o comprimento de onda, e é definido da seguinte forma [2] [5]:

$$\gamma = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{n_2}{A_{ef}} \quad (2.12)$$

onde λ é o comprimento de onda do feixe propagado, n_2 o índice de refração não linear e A_{ef} é a área efetiva da seção transversal do núcleo da fibra óptica, próxima da área real do núcleo [2], definida a partir de integrais de sobreposição dos modos [1]:

$$A_{ef} = \frac{\left[\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |F(x, y)|^2 dx dy \right]^2}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |F(x, y)|^4 dx dy} \quad (2.13)$$

onde $|F(x, y)|$ representa a distribuição transversal do campo elétrico para fibras de modo fundamental, em função de x e y .

Fibras monomodo de índice degrau convencionais tem $A_{ef} \approx 80\mu m^2$, que corresponde a $\gamma \approx 1(Wkm)^{-1}$. Os valores menores da A_{ef} aumentam a não linearidade da fibra (γ) significativamente, pelo forte confinamento de luz na região do núcleo da fibra [8].

A área efetiva depende de parâmetros da fibra, como o raio do núcleo e a diferença entre índices de refração entre o revestimento e o núcleo. A amplitude A é assumida por ser normalizada, tal que $|A|^2$ representa a potência óptica. A quantidade $\gamma|A|^2$ é medida em m^{-1} se o valor numérico do índice de refração não linear é $n_2 = 2,6 \times 10^{-20} m^2/W$, para fibras de sílica[7].

O índice de refração n é dado por [2]:

$$n = n_0 + n_2 \frac{P}{A_{ef}} \quad (2.14)$$

Em que n_0 é o índice de refração ordinário do material, e n_2 o índice de refração não linear, e o P é a potência óptica contida no pulso em *Watts* no interior da fibra [1].

Em todo sistema de telecomunicação por fibra óptica, a propagação do sinal óptico sofre processos básicos de degradação: a atenuação (perda de potência/intensidade do sinal); a dispersão (alargamento do pulso), e efeitos não lineares, principalmente nos sistemas WDM (*Wavelength division Multiplex*), ficando impossível a recuperação da informação no receptor. A atenuação dificulta a detecção do sinal, limitando o comprimento dos enlaces ópticos, e varia com o comprimento de onda da luz propagante, com mínimo de perdas em torno de $1550 nm$. Isso exige amplificação para solucionar este problema, pois o amplificador dar ganho ao sinal óptico e aumenta a sua potência [1] [8]. A potência transmitida (P_t), a partir da potência do sinal na entrada (P_i) da fibra, sofrendo atenuação (α) em uma distância L (comprimento que a luz percorre na fibra), é dada por [6] [8]:

$$(P_t) = (P_i) e^{-\alpha L} \quad (2.15)$$

A equação que defini a atenuação (medida total das perdas na fibra), em decibéis por quilômetro (dB/km), é:

$$\alpha_{dB} = - \frac{10}{L} \log_{10}(P_t/P_i) = 4,343\alpha \quad (2.16)$$

A atenuação em fibras ópticas varia com o comprimento de onda da luz propagante, tendo um mínimo de perdas em torno de $1,55 \mu m$ [3].

Na figura 2.6 [9], temos a atenuação em cada tipo de fibra, monomodo e multimodo, levando em consideração os comprimentos de onda para cada Banda.

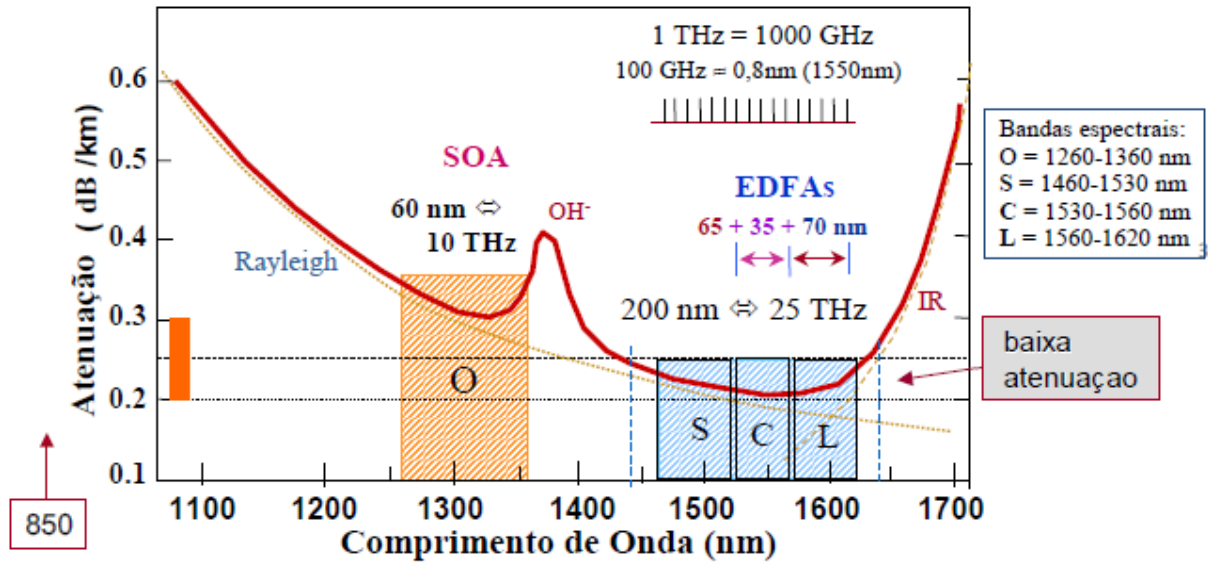


Figura 2.6 - Distâncias máximas de um link para diferentes tipos de fibra óptica em diferentes comprimentos de onda

2.3 EFEITOS NÃO LINEARES EM FIBRAS ÓPTICAS

Os efeitos não lineares prejudicam a transmissão dos sinais nos sistemas de comunicações por fibra óptica e por isso precisam ser tratados. Esses efeitos são classificados quanto ao índice e quanto ao espalhamento, mostrado na tabela 2.1 [1], ou em três grandes classes: *dispersivos*, *absortivos* e *paramétricos*.

Tabela 2.1 - Resumo de Efeitos não Lineares em Fibras Ópticas.

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

Fonte: Adaptado de [2].

Os efeitos *dispersivos* estão ligados ao $\chi^{(3)}$, com espalhamento não-linear (*non-linear scattering*) do campo elétrico causado pelas vibrações moleculares da sílica na fibra. Destacamos dois efeitos [9]:

- ✓ Espalhamento Ramam Estimulado (SRS - *Stimulated Ramam Scatering*): ocorre com fibra e amplificador;
- ✓ Espalhamento *Brillouin* Estimulado (SBS - *Stimulated Brillouin Scattering*): ocorre com fibra e amplificador;

Já os efeitos *absortivos* estão relacionados ao índice refração não linear do meio guiado na fibra. Composto por SOA, laser. São efeitos associados aos efeitos *Kerr*:

- ✓ Automodulação de Fase (*SPM - Self Phase Modulation*): ocorre com fibra, amplificador, e afeta o próprio canal;
- ✓ Modulação de Fase Cruzada (*XPM - Cross Phase Modulation*): ocorre com fibra, amplificador, e cada canal afeta outros canais.
- ✓ Instabilidade Modulacional: inclui laser e SOA.
- ✓ Modulação de Ganho Cruzado (*XGM - Cross-Gain Modulation*): formado por laser e SOA, em que a potência de um canal A pode ser usada para modular o ganho em outro canal B; e um sinal de Onda Contínua (CW)-A pode ser modulado por outro sinal B, em outra frequência ($\lambda_A; \lambda_B$).
- ✓ Transparência Auto Induzida: conseguindo implementar o Sólitons por meio dos efeitos na fibra e no amplificador.

Para os efeitos *paramétricos* encontramos a ligação com o $\chi^{(3)}$ e n_2 , espalhamento não-linear, ocorrem em tudo, e associado aos efeitos *Kerr*. Um efeito que com esse caso é:

- ✓ Mistura de Quatro Ondas (*FWM - Four Wave Mixing*): ocorre com laser, fibra, amplificador, SOA.

2.4.1 Modulação de Ganho Cruzado (XGM – Cross-Gain Modulation)

As mudanças de densidade de portadora no amplificador afetam todos os sinais de entrada, portanto, é possível que um sinal forte em um comprimento de onda afete o ganho de um sinal fraco em outro comprimento de onda. Este mecanismo não linear é chamado modulação de ganho cruzado (XGM) [10] [11].

O XGM causa uma inversão da forma do sinal de entrada e atua como um conversor de comprimento de onda por chaveamento óptico por parte do amplificador [12].

Um conversor de comprimento de onda óptico é um dispositivo que transfere informações de um comprimento de onda para outro, que pode utilizar a técnica da modulação de ganho cruzado (XGM) para esta função com o uso em amplificadores ópticos

semicondutores (SOA). O efeito XGM consiste na variação do ganho de SOA em função da potência de entrada. O aumento da potência do sinal de entrada provoca na SOA um esgotamento da densidade de portadora e, portanto, o ganho de amplificação é reduzido.

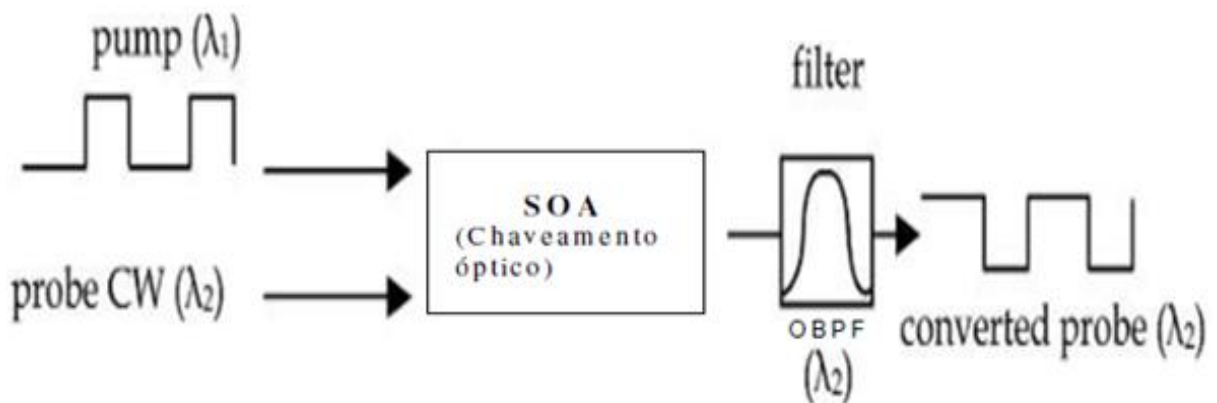
Na técnica de conversão de comprimento de onda que usa a XGM, a velocidade do conversor e a máxima taxa de transmissão, são ditadas pelos processos dinâmicos que ocorrem na densidade de portadora do SOA, que são muito rápidos, com um tempo de vida dos portadores da ordem de picosegundo, sendo possível usar essa variação no ganho com flutuações bit a bit da potência de entrada e ter uma taxa de transmissão em torno de 10 Gb/s. Os fatores que limitam o desempenho do conversor que utiliza a XGM, são: a sensibilidade à polarização; a degradação da relação sinal-ruído (SNR) devido à emissão espontânea amplificada (ASE); pequena razão de extinção (porque o ganho nunca é reduzido a zero); a velocidade de operação é limitada pelos tempos lentos de recuperação da portadora a inversão da sequência de bits; a eficiência de conversão depende dos comprimentos de onda de entrada e saída; a distorção da amplitude e a modulação da fase do sinal de saída devido à mudanças na densidade de portadores que causam uma variação no índice de refração, o que provocará um *chirp* de comprimento de onda induzido na forma de onda alvo no sinal convertido que pode limitar severamente a distância de transmissão [13] [14].

Geralmente, a eficiência de conversão na XGM é menor que o ganho do SOA e, a figura de ruído no processo de conversão é maior que a figura de ruído intrínseca do amplificador. Apesar dessas limitações, a XGM é muito usada devido a sua simplicidade, sua alta eficiência de conversão (razão entre a potência de saída e a de entrada), independência de polarização e sua insensibilidade ao comprimento de onda dos dados de entrada [10] [13] [14] [15].

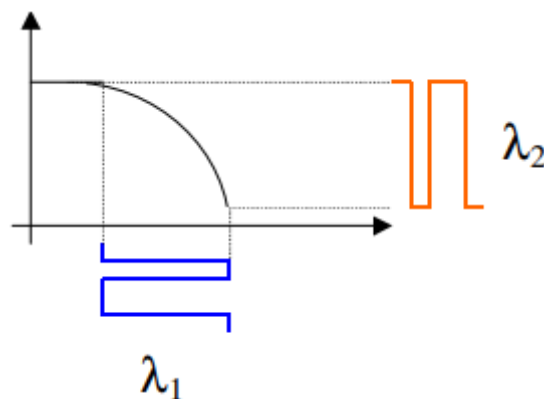
Muitas configurações são propostas na literatura utilizando este efeito não linear. Várias funções lógicas foram realizadas usando o efeito de modulação de ganho cruzado nos amplificadores ópticos semicondutores. Estes incluem implementações AND, OR e NOR.

Esse efeito ocorre quando um sinal modulado em intensidade no comprimento de onda λ_1 é injetado no SOA junto com um sinal CW no comprimento de onda λ_2 [12]. Um sinal de entrada de alta potência ($0 \text{ dBm} = 1 \text{ mW}$), chamado de sinal da *Pump*, é injetado no amplificador óptico semiconductor, para esgota o número máximo de portadoras (diminuir a densidade) presentes na região ativa, para causar a compressão/variação do ganho do SOA devido a depleção causada pela emissão estimulada na presença de uma fonte de potência elevada, quando o sinal é amplificado [15]. E também para saturar o dispositivo, devido ao ganho de saturação na cavidade do SOA, com a distribuição do ganho total disponível entre os dois

comprimentos de onda. Se um sinal de potência mais baixa, por exemplo, o sinal da *Probe*, for injetado simultaneamente com o *Pump*, sendo acoplados ao SOA, a *probe* sofrerá atenuação devido à absorção dos portadores, e o ganho do *pump* aumenta. A modulação do ganho causada pelo sinal de entrada, modula o sinal da onda contínua (CW) fraca no comprimento de onda de saída, aumentando assim a distorção do sinal de saída. Como resultado da mudança da densidade do portador, uma mudança no índice de refração também é induzida [16].



(a) Configuração do SOA com XGM.



(b) Saturação do ganho

Figura 2.7 - Conversor de comprimento de onda baseado na XGM em SOA. Adaptado de [16]

Filtros ópticos de banda passante (OBPF) muito bons são necessários para filtrar o sinal na saída do dispositivo conversor, filtrando o comprimento de onda λ_1 e deixar passar λ_2 , já modulado no processo de conversão. Se o laser do sinal de prova e o filtro forem sintonizáveis, então, tem-se um conversor sintonizável. Caso contrário, o conversor é dito ser fixo [15].

Se um pulso óptico estiver presente no sinal *pump*, o ganho do SOA diminui e, portanto, o sinal contínuo *probe* experimenta baixa amplificação [15]. Caso contrário, se não houver pulso de luz no sinal de entrada *pump*, em λ_1 , o ganho do dispositivo aumenta. Isso resulta no

signal de onda contínua (CW) em λ_2 experimentando alta amplificação. Assim, o sinal *pump* de entrada em λ_1 é invertido na saída [10].

A ocorrência de XGM dentro do amplificador imprime uma cópia invertida da modulação da *Pump* na variação de ganho da SOA, que por sua vez é refletida no sinal da *Probe* CW. Assim, o sinal CW adquire a mesma modulação que a da *Pump* em diferentes comprimentos de onda. Aqui a saída convertida é a entrada invertida.

Um exemplo é quando a *Pump* estiver em um estado de baixa potência, a SOA não será saturada e, portanto, a *Probe* sofrerá um ganho não saturado. Em um estado de alta potência, o ganho é saturado e o sinal da *probe* terá um ganho menor. O grau de diminuição do ganho depende em grande parte da potência da *Pump* e da corrente de injeção aplicada ao amplificador. Desta forma, a modulação da bomba é transferida para a sonda com o sinal sendo invertido [13] [14].

Pode ser realizada em um esquema de co-propagação, quando a *probe* CW e o sinal de informação viajam na mesma direção [10].

A velocidade de dados na qual o XGM pode ser operado é amplamente determinada pela rapidez com que o ganho pode se recuperar e esse tempo de recuperação é reduzido se o SOA for operado sob condições de saturação. A velocidade pode ser aumentada operando o SOA sob alta intensidade ótica, a fim de reduzir o tempo de recuperação do ganho devido à recombinação estimulada da transportadora [17].

2.4.1 Automodulação de Fase (SPM – Self-Phase Modulation)

Este efeito refere-se ao deslocamento de fase auto-induzido, onde diferentes partes do pulso sofrem diferentes mudanças de fase, e limita o desempenho do sistema ao longo do comprimento da fibra ótica monocal, pois ocorre somente neste tipo fibra. Consiste também em um alargamento do espectro do pulso no domínio da frequência, mantendo a forma temporal, conhecido como *chirp* (gorgeio) de frequência dos pulsos induzido por SPM, dependente da intensidade da potência incidente sobre o índice de refração não-linear do amplificador e do coeficiente de não linearidade da fibra, de modo que os efeitos do SPM são encontrados mais em sistemas com altas potências transmitidas, aumentando os efeitos de expansão dos pulsos da dispersão cromática, o que o torna importante para sistemas de alta taxa de bits, como exemplo de 10 Gb/s ou mais, que possuem limitações significativas de dispersão, ao contrário dos sistemas de taxa de bits mais baixa com altas potências de transmissão, que

pode resultar no aumentar significativamente dos efeitos de amplificação de pulso da dispersão cromática [1] [17].

O índice de refração para o meio não linear é [18]:

$$n = n_0 + n_2 I. \quad (2.17)$$

As variações no índice de refração resultam em mudanças de fase dependentes do tempo. Assim o SPM é determinado por [1]:

$$\phi_{SPM}^{NL} = \gamma |E_1|^2 L_{ef} \quad (2.18)$$

onde $|E|$ é o módulo do campo elétrico, L_{ef} o comprimento efetivo da fibra com absorção da energia ao longo do seu comprimento.

Esse efeito também é conhecido como efeito Kerr, pois a fase do feixe de luz depende do índice de refração do meio e é o próprio feixe que muda o índice de refração gerando a mudança da sua própria fase [18].

Com o aumento da potência de entrada, a BER aumenta e o fator de qualidade (fator Q) diminui, e conseqüentemente o efeito da auto-modulação de fase cresce, enfraquecendo o sinal e diminuindo a abertura ocular [1].

2.4.1 Modulação de Fase Cruzada (XPM – Cross-Phase Modulation)

Existe a diferença com respeito ao efeito XGM, pois este estão baseados na modulação do ganho do amplificador óptico semiconductor (SOA) devido ao alto sinal de entrada, enquanto o XPM se baseia na variação do índice de refração do material semiconductor, causada pelo sinal óptico de entrada, provocando variação dos portadores do mesmo, sentida como uma modulação de fase por um sinal de bombeio CW que é injetado no SOA [15].

Com respeito SPM temos semelhança, porém com a diferença que o XPM opera em multicanais, com a propagação simultânea de dois ou mais sinais ópticos na mesma fibra óptica, com diferentes comprimentos de onda, como acontece nos sistemas WDMs. O XPM vem sempre acompanhada da SPM. Temos então que um feixe afetará outro feixe por meio da mudança no índice de refração, quando os feixes de luz em duas frequências diferentes se propagam simultaneamente, pois o desvio de fase não depende apenas da potência do próprio canal, mas também dos outros canais da fibra [1] [2].

A potência do próprio canal e de outros geram o deslocamento de fase para o J-ésimo canal dado pela expressão:

$$\phi_j^{NL} = \gamma L_{eff} \left[P_j + 2 \sum_{m \neq j} P_m \right] \quad (2.19)$$

Os pulsos de sinal são aleatórios e sobreponha-se em pontos instantâneos resultando no efeito XPM, o conseqüentemente gera um ruído aleatório do canal, uma alta BER. Se o pulso tiver frequências diferentes, a velocidade será diferente, desta forma terá um intervalo entre os dois pulsos. Porém se eles começarem a se propagar juntos a tendência é separarem-se ao longo da fibra, gerando em maior dispersão, que para reduzi-la, deve se aproximar a velocidade, o que resulta em forte XPM [1] [18].

Os efeitos de XPM podem reduzir com o aumento do espaçamento entre canais, aumentando o fator Q e diminuindo a BER. Com o espalhamento dos espectros dos canais através do aumento da taxa de bits, a BER e a transferência de potência de XPM aumentam [1].

2.4.1 Mistura de Quatro Ondas (FWM – Four-Wave Mixing)

Este efeito ocorre em fibra multicanal, permitindo que duas, três ou mais sinais sejam transmitidos na mesma direção, realizando o processo semelhante ao paramétrico, que realiza a interferência de diferentes frequências com as frequências originais, produzindo novos sinais em comprimentos de onda espaçados nos mesmos intervalos, ou seja, novos produtos espectrais conhecido como bandas laterais em $(2w_1 - w_2)$ e $(2w_2 - w_1)$, por meio do sinal de mistura [1] [18].

Essas bandas passam junto com ondas originais e reduzem a força do sinal, quando os sinais se misturam. O número de sinais recém-gerados é dado por [1]:

$$FWM = \frac{N^2}{2} (N - 1) \quad (2.20)$$

onde N é o número de componentes de frequência de entrada.

Em um sistema WDM, as bandas são chamadas de ondas parasitas, que oferecem sérios problemas aos sistemas, como por exemplo o *crosstalk* (diafonia grave) [1] [2], fazendo-se necessário a minimização desse efeito FWM através da variação de alguns parâmetros, levando em consideração que a mistura de quatro ondas é independente da taxa de bits [1], e dependente

do índice de refração, da intensidade de potência dos sinais, da baixa dispersão cromática, do aumento da área efetiva e do aumento do espaçamento entre canais [2].

Pode-se observar na figura 2.8 [1] a degradação do sinal em um sistema WDM com dois e com três canais, devido ao efeito FWM.

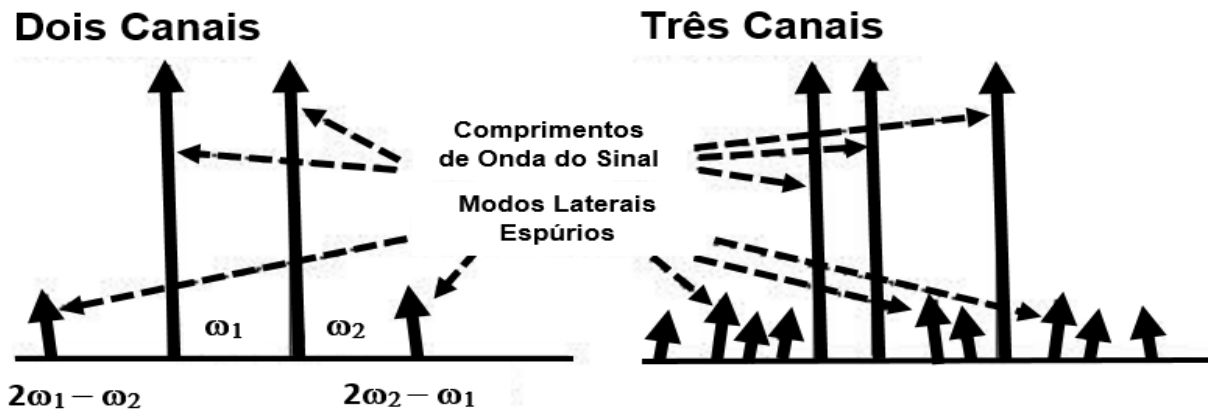


Figura 2.8 - Efeito de FWM no domínio da frequência.

Se aumentar a intensidade da potência de entrada, também aumenta significativamente o efeito de FWM. Porém se aumentar o espaçamento entre os canais ocorre uma redução da potência das bandas laterais, e conseqüentemente a redução do efeito de FWM.

Não ocorre o casamento de fase devido as ondas geradas e as do sinal terem velocidades de grupo diferentes, o que reduz a transferência de potência para as frequências geradas. No FWM a dispersão varia de acordo com o comprimento de onda, ocorrendo interferência quando qualquer onda gerada e a onda do sinal terem o mesmo comprimento de onda. As diferentes velocidades de grupo e o aumento da dispersão da fibra e do espaçamento entre canais, poderão diminuir o efeito de FWM [2].

2.4 REFERÊNCIAS

- [1] SOUSA, Fabio Barros de. Regenerador 3R Totalmente Óptico Baseado em Interferômetro de Mach-Zehnder de Fibra de Cristal Fotônico Altamente não Linear. Dissertação de Mestrado. PPGEE. Universidade Federal do Pará.
- [2] KEISER, Gerd. Optical Fiber Communications. Mcgraw Hill. Fourth Edition, 2008.
- [3] QUEIROZ, A. S. B. Estudo do desempenho de componentes baseados em fibras ópticas especiais: fibras de cristal fotônico e de metamateriais e suas aplicações em comunicações. 177 f. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia de Teleinformática) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

- [4] SAKAMORO, J. M. S. Sensor em Fibra óptica Aplicado à Caracterização de Atuadores Piezoelétricos Flexensionais. Dissertação. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista – UNESP, 2006.
- [5] AGRAWAL, G.P. Fiber-optic communication systems. 3rd. edition Wiley Sons - Interscience, New York, 2002.
- [6] AGRAWAL, G.P. Nonlinear Fiber Optics. Fourth Edition, Academic Press, San Francisco, 2007.
- [7] FURTADO FILHO, A. F. G. Estudo do desempenho do multiplexador/demultiplexador ADD/DROP baseado na configuração do interferômetro de Michelson de fibras ópticas para aplicações em sistemas OTDMA E OCDMA. 2012. 109 f. Tese (Doutorado em Teleinformática) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.
- [8] SOUSA, J. R. R. Estudo do desempenho do interferômetro de Michelson de fibras de cristal fotônico para aplicações em circuitos lógicos nas configurações on-off e ppm. 2014. 142 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Teleinformática) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.
- [9] BARBOSA, Felipe Rudge. Efeitos não-lineares. Disponível em: http://www.dsif.fee.unicamp.br/~rudge/pdf/IE008-b3_Efeit-NLinear=f217_vF.pdf. Acesso em: 01/06/2018.
- [10] SILVEIRA, T. G. d. All-optical processing systems based on semiconductor optical amplifiers. Aveiro: Universidade de Aveiro, 2011.
- [11] C. W. Son, S. H. Kim, Y. M. Jhon, Y. T. Byun, S. Lee, D. H. Woo, S. H. Kim, and T.-H. Yoon, "Realization of All-Optical XOR, NOR, and NAND gates in single format by using semiconductor optical amplifiers," Jpn. J. Appl. Phys. 46(1), 232–234 (2007).
- [12] Eman M. El-Saeed, Ahmed Abd El-Aziz, Heba A. Fayed, Moustafa H. Aly, "Optical logic gates based on semiconductor optical amplifier Mach–Zehnder interferometer: design and simulation", Optical Engineering 55(2), 025104 (9 February 2016).
- [13] Vikas Thakur, Ms.Geetanjli Pandove Tarun Gupta , — Optical Wavelength Converters Based On Cross Gain Modulation And Cross Phase Modulation In SOA, International Journal of Electronics and Computer Science Engineering, VIN3, 2013.
- [14] Anju M.R, Vipin V.R, "Simulation and Performance Analysis of Optical Wavelength Converters based on Cross Gain Modulation (XGM) in SOA". International Journal of Engineering Research and General Science, Volume 3, Issue 2, pp.918-22, March-April, 2015.
- [15] TOMOLA, J. H. A, Técnicas de conversão de comprimento de onda em amplificador óptico semiconductor, Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia 113 f.
- [16] AGGARWAL, Kanika; SINGH, Hardeep (Guide). Implementation Of Optical Logic Unit Based On Nonlinear Properties Of Semiconductor Optical Amplifiers. Department Of Electronics & Communication Engineering – Thapar University, Patiala. 2016. <http://hdl.handle.net/10266/4062>.

[17] Niloy K. Dutta and Qiang Wang, "Semiconductor Optical Amplifiers," Hackensacks, NJ: World Scientific Publishing Company, 2006.

[18] Singh, S. K., Tiwari, N. and Rajchandani, U., "Implementation of optical logic gates (EX-OR AND and NOR) using SOA-MZI structure," *Int. J.Sci. Technol.* 2(7), 158–163 (2014).

CAPÍTULO 3

Aborda alguns dispositivos ópticos que foram utilizados nos esquemas de portas lógicas aqui implementadas.

3 DISPOSITIVOS DE FIBRAS ÓPTICAS

Foram descritos nos capítulos anteriores uma variedade de efeitos ópticos que se originam a partir da propagação dos pulsos ópticos na fibra óptica como meio não-linear. Baseado nesses efeitos, vários dispositivos apresentam ótimos resultados ópticos usados em diversas aplicações, como exemplo, em optoeletrônica, telecomunicações, processamento digital totalmente óptico, portas lógicas totalmente ópticas e chaveamento óptico [1].

Para entender a estrutura das portas lógicas, serão abordados assuntos sobre funcionamento do interferômetro de Michelson (MI), os principais parâmetros do amplificador óptico semicondutor (SOA – *Semiconductor Optical Amplifier*), formando um SOA-MI, os principais conceitos e características dos acopladores de fibras ópticas convencionais e das Fibras de Grade de Bragg (FBG) lineares e onda contínua (Continuous Wave – CW) do Laser.

3.1 AMPLIFICADOR ÓPTICO SEMICONDUTOR

Um amplificador óptico semicondutor (SOA) é um dispositivo não linear optoeletrônico que amplificar um sinal de entrada, como solução prática para todas as funções de dispositivos de processamento de sinal totalmente óptico, pois podem lidar facilmente com sinais complexos e processar taxas de dados de até 40 Gb/s com muito menos consumo de energia (1 W) [2].

3.1.1 Amplificadores Ópticos

Em redes de fibra óptica são utilizados amplificadores como o exemplo da figura 3.1, e os mais utilizados são: amplificador à fibra dopada de Érbio (EDFA - *Erbium-Doped Fiber Amplifier*), amplificador Ramam, amplificador óptico semicondutor (SOA - *Semiconductor Optical Amplifier*) e amplificador paramétrico [3]. Nesta pesquisa será dado ênfase ao

amplificador utilizado nos projetos de portas lógicas aqui implementadas, que no caso será o SOA de ondas propagantes (TW - *Travelling-Wave*).

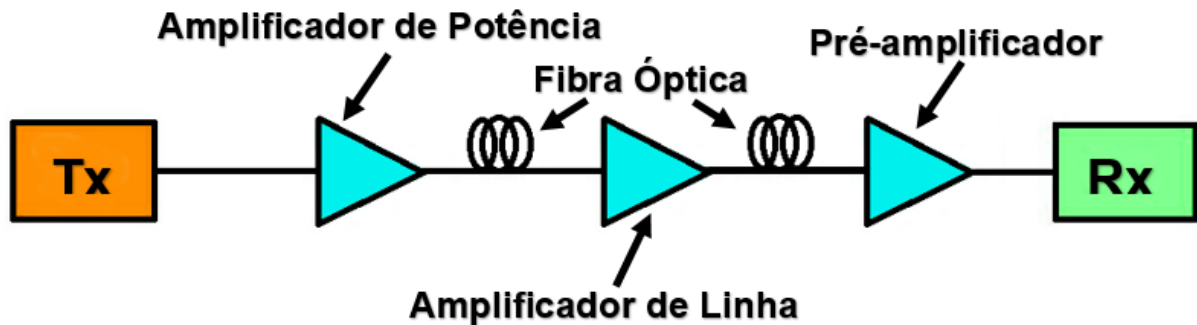


Figura 3.1 – As três configurações possíveis para um amplificador em redes ópticas.

Um amplificador óptico genérico tem seu princípio de funcionamento determinado pela absorção da potência de uma fonte de bombeio [3], e o primeiro parâmetro a ser analisado é o seu ganho em dB (decibel) dado por [4]:

$$G = 10 \log \left(\frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \right) \quad (3.1)$$

onde $P_{saída}$ é a potências de entrada e $P_{entrada}$ a de saída.

Um outro parâmetro é a relação sinal-ruído (SNR – *Signal to Noise Ratio*), que determina o desempenho de um amplificador, pois durante o processo de amplificação são gerados ruídos indesejáveis devido o limite de saturação e a alta potência de entrada, pois o amplificador degrada a SNR causada pela emissão espontânea amplificada (ASE – *Amplified Spontaneous Emission*) [5]. O SNR pode ser expresso por [6]:

$$SNR = \frac{P_{sinal}}{P_{ruído}} = \left(\frac{A_{sinal}}{A_{ruído}} \right)^2 \quad (3.2)$$

em que P é a potência e A é a amplitude.

Dessa forma, a relação sinal-ruído óptico (OSNR – *Optical Signal to Noise Ratio*) é a potência óptica gerada quando o sinal óptico é convertido em corrente elétrica [3], sendo a principal fonte que determina o nível de ruído. Assim a OSNR é a razão entre a potência média do sinal na saída do amplificador (P_{med} ou P_{sinal}) e a potência do ruído óptico de ASE (P_{ASE} ou $P_{ruído}$), determinada em uma certa largura de banda de referência, definida em dB por [4]:

$$OSNR_{dB} = 10 \times \log_{10} \left(\frac{P_{sinal}}{P_{ruído}} \right) \quad (3.3)$$

Para especificar o desempenho de um receptor óptico, necessita-se da OSNR, pois a medida que aumenta a potência do ruído (ASE), o ganho do amplificador diminui e consequentemente a OSNR diminui. Também é utilizado o resultado do fator de qualidade (fator Q), que está relacionado à qualidade do sinal óptico em termos da relação sinal-ruído no domínio do tempo, pela equação [4]:

$$Q = \frac{2\sqrt{2}OSNR}{1 + \sqrt{1 + 4OSNR}} \quad (3.4)$$

Portanto a OSNR é um parâmetro utilizado para analisar o desempenho dos canais ópticos individuais [4], que para uma avaliação mais significativa em relação ao desempenho do receptor, utilizamos a relação existente entre o fator Q e a OSNR, dado por [4]:

$$OSNR = \frac{1}{2} Q(Q + \sqrt{2}) \quad (3.5)$$

O fator Q também pode ser definido como [7]:

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (3.6)$$

onde I_1 e I_0 são os valores médios de correntes de sinal dos pulsos 1 e 0, respectivamente, e σ_1 e σ_0 são os valores do desvio padrão para as variâncias de corrente de ruído.

O desempenho dos sistemas digitais pode ser medido pela Taxa de Erro de Bit (BER - *Bit Error Rate*), definida pela probabilidade da identificação incorreta de um bit por parte do circuito de decisão do receptor. Por exemplo, uma BER de 2×10^{-9} corresponde em média a 2 bits errados a cada 1 bilhão de bits transmitidos [1]. A relação entre a BER e o Q-fator no limiar ótimo é expresso por [4]:

$$BER = \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \right] \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{e^{-Q^2/2}}{Q} \quad (3.7)$$

onde $\operatorname{erfc}(x)$ é a função de erro complementar, dada por [4]:

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-y^2} dy \quad (3.8)$$

A BER varia com o Q-fator, pois diminui quando Q aumenta e ao passo que a BER aumenta, a OSNR diminui [1] [3]. Para um bom desempenho dos sistemas ópticos, esses parâmetros possuem valores ideais, sendo valor igual a 6 para o Q-fator, que corresponde a uma BER de 10^{-9} e uma OSNR de 13,5 dB [3] [5].

Pode-se medir a OSNR por meio do analisador de espectro óptico (OSA – *Optical Signal Analyzer*) [4] e o Q-fator junto com o BER podem ser observados por meio do Diagrama de Olho.

3.1.2 Amplificador Óptico Semicondutor (SOA)

SOAs são atraentes para todos processamento de sinal óptico, como exemplo a comutação totalmente óptica, conversão de comprimento de onda e regeneração de sinal. Além disso, pode ser integrado com semicondutores, lasers, moduladores, etc. e tem vantagens em termos de baixo consumo de energia, integração homogênea, são compactos, funcionam com alta velocidade e oferecem estabilidade [8].

Consiste em uma estrutura de guia de ondas simples e pequeno, semelhante a um laser, exceto por não ter faces refletivas, pois opera abaixo do limite de laser. Oferece vantagens quanto a integração para produzir sistemas subsequentes, essenciais no sistema de comunicação óptica [9] [10].

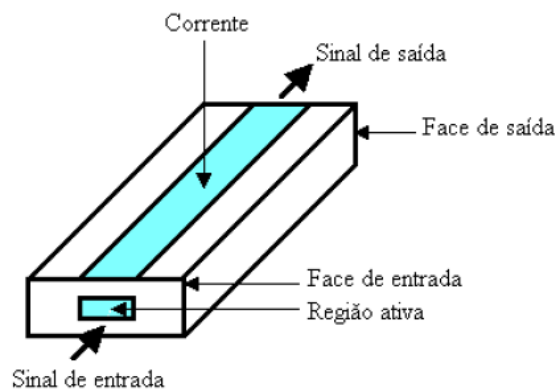


Figura 3.2 – Configuração esquemática de um SOA.

Mudanças em termos de ganho ocorrem dentro da região ativa do SOA, injetando luz e polarização de corrente. Usar uma equação de características de ganho é descrever essas mudanças. Definindo g como o ganho interno, tem-se a Equação 3.9:

$$g(n) = \Gamma v_g g_m(n) = \Gamma v_g \alpha (n - n_0) \quad (3.9)$$

onde α é a variação do ganho em relação a n , o ganho diferencial; n é a densidade de portadores na região ativa, e n_0 é a densidade de portadores na transparência, Γ é o fator de confinamento do campo óptico na região ativa, e v_g é a velocidade de grupo do campo incidente. O ganho interno é a taxa de emissão estimulada [7].

Definindo G como sendo a razão das potências de saída e entrada, é dado pela Equação 3.10:

$$G(n, L) = \frac{P_{in} e^{g_L(n)L}}{P_{in}} = e^{g_L(n)L} \quad (3.10)$$

onde, $P_{out}(n, L) \equiv P(n, z)|_{z=L} = P_{in} e^{g_L(n)L}$, e L é o comprimento do amplificador.

O sinal fraco de entrada é amplificado através da taxa de emissão estimulada que depende da densidade e distribuição do portador na região ativa do amplificador, que serve como um guia de onda para confinar o sinal propagante, por meio de uma corrente elétrica externa injetada para que haja ganho. Caso o confinamento não seja perfeito, ocorre a propagação do sinal através das regiões em torno da região ativa. O sinal de saída da região vem acompanhado de ruído ASE (*Amplified Spontaneous Emission*) produzido durante a amplificação, não podendo ser totalmente evitado. Se as faces do amplificador forem refletivas, causam picos no espectro do ganho [11].

No caso temos até o momento o ganho linear válido apenas para baixos níveis de potência. Quando há um sinal com maior nível de energia sendo injetado no SOA, a concentração de portador é reduzida através de emissão estimulada, causando uma diminuição no ganho de SOA, chamado de saturação de ganho, logo o amplificador ficará saturado e passa a ter um ganho não-linear. Esta saturação afeta todos os comprimentos de onda dentro do espectro de ganho, já que o espectro de ganho de material é ampliado homoganeamente [12].

A partir de um certo ponto o aumento de corrente já não é tão eficiente, devido a dependência do ganho interno com a potência de entrada. Quando a potência incidente no amplificador se aproxima da potência de saturação, a potência pelo o qual o ganho cai pela metade, o amplificador deixa de ser linear com a potência, e o ganho decai com um aumento de potência. Para o ganho total, G é definido pela Equação 3.11.

$$G = \frac{G_0}{1 + \frac{P_{in}}{P_{sat,in}}} \quad (3.11)$$

onde G_0 é o ganho não-saturado, chamado de ganho para “pequenos sinais”, e $P_{sat,in}$ é a potência de saturação de entrada [13] [14].

Os principais tipos de SOA são: Fabry-Perot (FPA), onde o dispositivo possui uma cavidade que reflete parcialmente a luz; e a de ondas propagantes (TW - *Travelling-Wave*), que propaga a luz somente uma vez no meio. Devido a algumas desvantagens dos FPAs, os TWs são os utilizados [13].

Os efeitos não lineares tornam o SOA um dispositivo muito promissor para redes de fibra óptica. O efeito depende do design do sistema, como exemplo o efeito XGM que consiste na variação do ganho do SOA em função da potência do sinal entrada, pois o aumento da potência provoca no amplificador uma perda da densidade de portadora na ordem dos picossegundos (*ps*), reduzindo o ganho [14].

As não linearidades do SOA surgem principalmente das variações de densidade de portadores no amplificador. Os quatro principais efeitos não lineares são: modulação de fase cruzada (XPM), modulação de ganho cruzado (XGM), modulação de fase própria (SPM) e mistura de quatro ondas (FWM), que permiti fazer várias configurações para projetar diversos modelos de portas lógicas totalmente ópticas, devido à emissão estimulada em SOA durante o processo de amplificação. Tais portas podem fornecer uma conversão de comprimento de onda com alta eficiência de energia, ampla faixa de conversão e alta relação sinal-ruído (OSNR) para o sinal convertido [10] 15].

São propostas as portas AND, OR e NOR para avaliar a resposta não linear do amplificador óptico semiconductor (SOA) em termos de efeito de modulação de ganho cruzado (XGM) em que o sinal de entrada de dados combinado junto com o sinal do CW Laser são introduzidos no SOA, atuando como um elemento não linear ativo, possuindo um filtro óptico na saída do amplificador, cuja largura de banda e comprimento de onda do filtro são ajustados de acordo com a operação de porta desejada. Por exemplo, para obter a detecção da lógica óptica OR ou NOR, apenas muda-se o comprimento de onda do filtro óptico.

Na tabela 3.1 [16] a seguir temos os parâmetros utilizados para os SOAs nas simulações.

Tabela 3.1 – Parâmetros utilizados para os SOAs nas simulações.

Parâmetros do SOA	Valores Atribuídos
Corrente de injeção	0,15 A
Comprimento	500 μm
Largura	3 μm
Altura	80 nm
Fator de confinamento	0,3
Ganho diferencial	$2,78 \times 10^{-20} m^2$
Densidade de transportadora na transparência	$1,4 \times 10^{24} m^{-3}$
Fator de aprimoramento da largura da linha	5
Coefficiente de recombinação de superfície e defeito	$1,43 \times 10^8 s^{-1}$
Coefficiente de recombinação de radiativa	$1 \times 10^{-16} m^3 \cdot s^{-1}$
Coefficiente de recombinação Auger	$3 \times 10^{-41} m^6 \cdot s^{-1}$
Densidade inicial da transportadora	$3 \times 10^{24} m^{-3}$

Fonte: Adaptado de [16].

3.2 ACOPLADOR DIRECIONAL NÃO LINEAR (NLDC)

Acopladores direcionais são estruturas passivas e unidirecionais constituída de duas fibras paralelas. Em um dado comprimento L_C , seus núcleos são aproximados um do outro por uma distância d , que possibilita o campo evanescente de uma das fibras excita modos de propagação na outra fibra. O acoplador possui duas entradas e duas saídas, com a função de receber o pulso óptico vindo de uma das entradas e dividi-lo coerentemente para as saídas, conforme a figura 3.3 [17] [18].

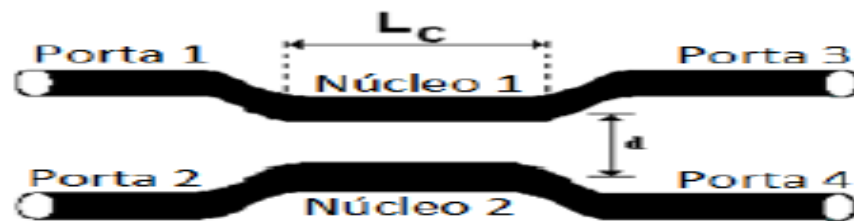


Figura 3.3 – Esquema do Acoplador Direcional Duplo Não-Linear de comprimento L

A Porta 1 é chamada de porta de entrada da potência, onde a Porta 4 é conhecida como porta acoplada e a porta 3 é considerada como porta transmitida, servindo como portas de saída. Para acopladores assimétricos temos a porta 3 como entrada e a porta 2 será chamada de porta isolada, onde receberá uma parte da potência vinda da porta 3. Porém estão disponíveis mais acopladores simétricos, em que a porta 2 é encerrada com uma carga combinada e não estará disponível para uso [10].

A variação das amplitudes A_1 e A_2 (propagação pelo núcleo 1 ou 2) devido à sobreposição entre os dois modos, ao longo do comprimento de acoplamento L_C , origina uma constante k (constante de acoplamento) que mensura esta interação. A transferência de potência entre os núcleos depende da potência crítica P_C , que é o valor necessário para que a potência de entrada seja dividida num percentual de transferência de 50% para cada uma das portas de saída do acoplador, como exemplo o acoplador de 3 dB. A potência crítica pode ser determinada por meio da Equação 3.12 [18].

$$P_C = \frac{A_{eff} \lambda}{n_{NL} L_C} \quad (3.12)$$

em que A_{eff} é a área efetiva do núcleo da fibra, λ é o comprimento de onda no vácuo, n_{NL} é o índice de refração não linear. Ocorre uma quebra de simetria induzida pela aproximação dos

núcleos ao longo do comprimento de acoplamento, para que ocorra a transferência de energia de um guia para outro, dado por:

$$L_c = \frac{\pi}{2C}, \quad (3.13)$$

onde C denota o coeficiente de acoplamento linear entre os núcleos adjacentes. O comprimento de acoplamento é inversamente proporcional a potência crítica, que pode ser alterada através da manipulação desse comprimento [19].

Os pulsos aplicados na porta 1 irá para uma das portas de saída dependendo de suas potências. Considerando que a potência do sinal que entra na porta 1 do acoplador figura 3.3, seja potência de luz, abaixo da potência crítica do acoplador, tem-se um acoplador linear, cujo feixe óptico se propaga periodicamente entre os guias que constituem o dispositivo, que por causa do acoplamento evanescente, sinal de entrada com baixa potência na porta 1 em umas fibras, é totalmente chaveado e transferido para a outra fibra na porta 4, possibilitando a interação com troca de energia entre os campos de propagação nos guias de transmissão, criando assim o acoplamento de pulsos e divisor de sinais, com capacidade de processar informações a velocidade ultrarrápidas e chavear pulsos ultracurtos. Para o sinal que entra na porta 1 com uma potência acima da potência crítica, o pulso simplesmente é transmitido na mesma fibra para a porta 3. Caso ocorra a entrada de pulso na porta de saída (porta 3), o mesmo será transferido para a porta isolada (porta 2) [20] [21] [10].

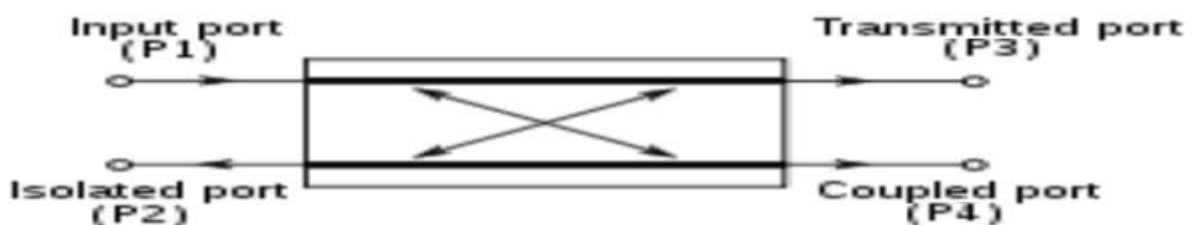


Figura 3.4 – Representação das portas do Acoplador Direcional Duplo. Fonte: Adaptado [10]

Assim, se o sentido do sinal chaveado for igual ao do incidente, tem-se acopladores direcionais ou copropagantes, porém se o sentido for contrário, os acopladores serão contrapropagantes ou contradirecionais. Os acopladores são usados em outros dispositivos ópticos que precisam dividir o feixe óptico em outros dois feixes coerentes, ou uni-los caso estejam fisicamente separados [19].

Dispositivos compostos por guias de ondas diferentes, como acopladores direcionais não lineares assimétricos, possuem importantes aplicações na construção de portas lógicas totalmente ópticas e chaveamento de energia a baixas potências.

As equações que mostram a dinâmica de um acoplador duplo são elaboradas a partir da equação não-linear de Schrödinger (NLSE), que descreve a propagação de pulsos em meios com efeitos de não linearidade do tipo Kerr, de dispersão de velocidade de grupo (GVD) e acoplamentos lineares. Assim para acopladores duplos, como o da figura 3.3, temos:

$$i \frac{\partial A_1}{\partial z} - \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A_1}{\partial T^2} + \gamma |A_1|^2 A_1 + C A_2 = 0 \quad (3.14)$$

$$i \frac{\partial A_2}{\partial z} - \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A_2}{\partial T^2} + \gamma |A_2|^2 A_2 + C A_1 = 0 \quad (3.15)$$

onde A_j é o pulso propagado na fibra j ($j = 1, 2, 3, \dots, n$), γ a auto modulação de fase (SPM). O termo C é o coeficiente de acoplamento linear [6].

Para manter o sinal propagado no interior do acoplador, o índice de refração n_1 e n_2 de ambos os núcleos precisam ser maiores do que o índice de refração do meio. Quando possuem o mesmo raio e os mesmos índices de refração ($n_1 = n_2$), tem-se um acoplador simétrico [17] [20] [21].

3.3 FIBRA DE GRADE DE BRAGG

Em rede óptica ocorre um problema comum que é a dispersão. A Fibra de Grade de Bragg (FBG – do inglês Fiber Bragg Grating) é um dos componentes utilizados para compensar as perdas de dispersão na transmissão de dados em redes de comunicação óptica.

A grade de Bragg consiste na modulação/variação/perturbação periódica no índice de refração do núcleo da fibra, com propriedades do coeficiente de reflexão capaz de refletir (período curto) ou transmitir (período longo) a luz em função do comprimento de onda da grade Bragg (λ_{Bragg}) dependendo do alargamento do pulso, bem como da sua potência, e está relacionado com a periodicidade espacial da modulação do índice de refração (Λ) e com o índice de refração efetivo do núcleo (n_{eff}) conforme a equação (3.16).

$$\lambda_{Bragg} = 2n_{eff}\Lambda \quad (3.16)$$

Opera como acoplador de energia de forma contra direcional, e como um tipo de filtro espectral refletor construído no interior de uma fibra óptica capaz de refletir/selecionar uma faixa de comprimentos de onda, conservando-se relativamente transparente para o restante do espectro.

A figura 2.3 [22] representa uma rede de grade Bragg sendo iluminada por uma fonte de luz de banda espectral larga, em que uma faixa estreita desse espectro de luz, centrada no comprimento de onda da Bragg será refletida, enquanto o restante do espectro é transmitido.

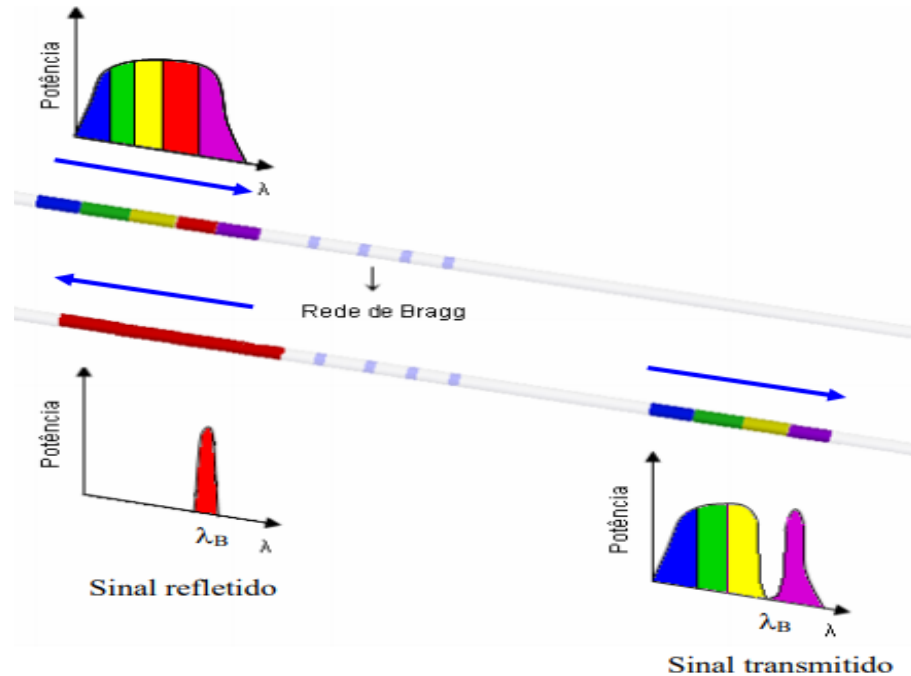


Figura 3.5 – Esquema do funcionamento de uma Rede de Bragg.

A perturbação resultante no índice de refração efetivo do núcleo da fibra (n_{eff}) dos modos guiados de interesse é definido como:

$$\delta n_{eff}(z) = \bar{\delta n}_{eff}(z) \left[1 + \nu \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda}z + \varphi(z)\right) \right] \quad (3.17)$$

onde $\bar{\delta n}_{eff}$ é a variação do índice de refração do núcleo com o incremento do índice de refração médio em um período da grade, $\varphi(z)$ é a fase da grade, Λ é o período de modulação da grade da ordem de algumas centenas de nanômetros e ν é a visibilidade de franjas ou razão de modulação, z representa a posição da grade [6].

A perturbação do índice de refração no interior do núcleo da fibra óptica gera, por reflexão, um outro modo contra-propagante (sentido z^-) a partir do modo principal (sentido z^+), como mostra a figura 3.6 [23], uma origem para o eixo z é adotada seguindo a convenção da esquerda para a direita e que os parâmetros representam o perfil de índices de refração periódico de uma FBG de comprimento L , retratada como uma curva senoidal.

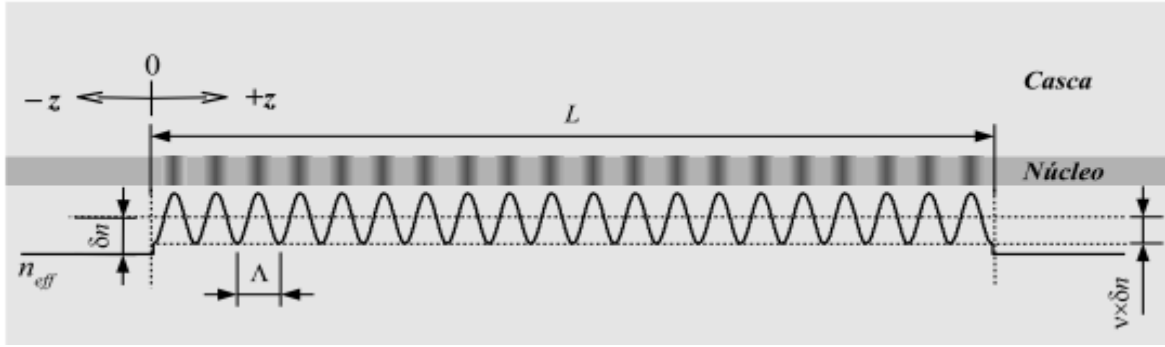


Figura 3.6 – Diagrama da perturbação do índice de uma FBG uniforme

A partir da teoria de acoplamento de modos ópticos, a refletividade de uma rede de Bragg em função do comprimento de onda da luz incidente, pode ser deduzida em função do desfasamento:

$$\delta\beta = \beta - \frac{\pi}{\Lambda} \quad (3.18)$$

entre a constante de propagação

$$\beta = \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda} \quad (3.19)$$

e o vetor k da rede $\frac{2\pi}{\Lambda}$ a partir da expressão [21] [24]:

$$R = \frac{k^2 \sinh(SL)}{\delta\beta^2 \sinh^2(SL) + S^2 \cosh(SL)}, |k| > |\delta\beta| \quad (3.20)$$

$$R = \frac{k^2 \sin^2(QL)}{\delta\beta^2 - k^2 \cos^2(QL)}, |k| < |\delta\beta| \quad (3.21)$$

Onde:

$$(\delta\beta)L = \frac{2\pi n_{eff}L}{\lambda} - \frac{2\pi n_{eff}L}{\lambda_{Bragg}} \quad (3.22)$$

$$SL = (\delta\beta)L \left[\left(\frac{kL}{(\delta\beta)L} \right)^2 - 1 \right]^{1/2} \quad (3.23)$$

$$QL = (\delta\beta)L \left[1 - \left(\frac{kL}{(\delta\beta)L} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.24)$$

onde λ é o comprimento de onda da luz, que caso esteja próximo ao comprimento de onda da Bragg, a refletividade obedece à equação (3.20), caso contrário segue equação (3.21). O valor máximo da refletividade ocorre quando $\delta\beta = 0$ ou, equivalentemente, quando $\lambda = \lambda_{Bragg}$. Conseqüentemente a equação (3.20) resulta na expressão para refletividade máxima dada por [24]:

$$R_{max} = \tanh^2(kL) \quad (3.25)$$

3.4 CW LASER

Considerando o caso mais simples de uma onda contínua (Continouws Wave – CW) incidente em uma das portas do acoplador, os termos dependentes do tempo podem ser anulados.

Uma onda contínua ou operação em CW ocorre a distribuição de frequência da luz do laser no estado estacionário. Pode-se explorar o efeito da saturação de ganho no espectro de frequência, que pode ser estabilizada ou ajustada em algum intervalo. Com o bombeamento em regime contínuo, existe um limiar de *pump* bem definido, acima do qual a intensidade da luz do laser aumenta linearmente com a potência da *pump*. Para algumas aplicações, não é apenas a potência da luz do laser que é importante, mas também seu espectro de frequência [25].

3.5 REFERÊNCIAS

- [1] AGRAWAL, G. P. Lightwave Technology: Telecommunication Systems, Academic Press, New York, 2005.
- [2] Saumya Saxena, Shyamal Saxena, Sadaf Zahra Rizvi, "Realization of all-optical nor gate based on four wave mixing, non-linear effect in soa", https://www.ijltet.org/journal_details.php?id=886&j_id=2108, Volume 5 Issue 1 - January 2015.
- [3] SOUSA, Fabio Barros de. Regenerador 3R Totalmente Óptico Baseado em Interferômetro de Mach-Zehnder de Fibra de Cristal Fotônico Altamente não Linear. Dissertação de Mestrado. PPGEE. Universidade Federal do Pará.
- [4] KEISER, Gerd. Optical Fiber Communications. Mcgraw Hill. Fourth Edition, 2008.

- [5] AGRAWAL, Govind. Sistemas de comunicação por fibra óptica. Tradução José Rodolfo Souza. 4. ed. – Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2014.
- [6] SOUSA, J. R. R. Estudo do desempenho do interferômetro de Michelson de fibras de cristal fotônico para aplicações em circuitos lógicos nas configurações on-off e ppm. 2014. 142 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Teleinformática) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.
- [7] AGRAWAL, G.P. Fiber-optic communication systems. 3rd. edition Wiley Sons - Interscience, New York, 2002.
- [8] Azhar Hussein Neama and Ismael Shanan Desher. High Data Rate Optical logic OR, and NOT Gates at Optimum Injection Current based on SOA-MZI. International Journal of Computer Applications 177(3):24-32, November 2017.
- [9] Senior, J.M.: Optical Fiber Communication, Principles and Practice. 552–553. Pearson, India, 3rd Edition, (2010)
- [10] AGGARWAL, Kanika; SINGH, Hardeep (Guide). Implementation Of Optical Logic Unit Based On Nonlinear Properties Of Semiconductor Optical Amplifiers. Department Of Electronics & Communication Engineering – Thapar University, Patiala. 2016. <http://hdl.handle.net/10266/4062>.
- [11] TOMOLA, J. H. A, Técnicas de conversão de comprimento de onda em amplificador óptico semiconductor, Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia 113 f.
- [12] SILVEIRA, T. G. d. All-optical processing systems based on semiconductor optical amplifiers. Aveiro: Universidade de Aveiro, 2011.
- [13] CAVALCANTE, Daniel do Nascimento e Sá. Obtenção experimental de portas lógicas com interferômetro de Mach-Zehnder e SOA. Fortaleza: IFCE, 2017.
- [14] Ajay Kumar, Santosh Kumar, S. K. Raghuwanshi, “Implementation of All-Optical Logic Gate using SOA-MZI Structures,” STM Journals 2013, ISSN: 2231-0401
- [15] Singh, P., Tripathi, D.K., Dixit, H.K.: Designs of all-optical NOR gates using SOA based MZI. Optik 125, 4437–4440 (2014)
- [16] Eman M. El-Saeed, Ahmed Abd El-Aziz, Heba A. Fayed, and Moustafa H. Aly, “Optical Logic Gates Based on Semiconductor Optical Amplifier Mach–Zehnder Interferometer: Design and Simulation,” Optical Engineering, vol. 55, no. 2, pp. 025104 (1-12), February 2016, JCR: IF = 0.954
- [17] AGRAWAL, Govind P. Lightwave Technology – Components and Devices. New Jersey: Wiley, 2004.
- [18] AGRAWAL, Govind P. Applications of nonlinear fiber optics. San Diego: Academic Press, 3ª Ed., 2001.
- [19] QUEIROZ, A. S. B. Estudo do desempenho de componentes baseados em fibras ópticas especiais: fibras de cristal fotônico e de metamateriais e suas aplicações em comunicações. 177

f. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia de Teleinformática) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

[20] FRAGA, Wilton Bezerra de. Estudo do desempenho de acoplador direcional não linear duplo assimétrico de fibras ópticas operando portas lógicas. 2006. 82 f. Dissertação (Mestrado em Física) - Programa de Pós-Graduação em Física, Departamento de Física, Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

[21] FURTADO FILHO, A. F. G. Estudo do desempenho do multiplexador/demultiplexador ADD/DROP baseado na configuração do interferômetro de Michelson de fibras ópticas para aplicações em sistemas OTDMA E OCDMA. 2012. 109 f. Tese (Doutorado em Teleinformática) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

[22] CONCEITOS Básicos de Redes de Bragg. Disponível em:< http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/9243/9243_3.PDF>. Acesso em 01/06/2018

[23] SOUSA, Marco José de. Síntese de grades de Bragg em fibra: técnicas de aceleração e codificação para algoritmos evolucionários. PhD thesis, UFPA, 2008.

[24] RESENDE, Marcelo Moraes. CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DE REDES DE BRAGG. Disponível em: <http://www.puc-rio.br/pibic/relatorio_resumo2017/relatorios_pdf/ctc/CETUC/CETUC-Marcelo_Resende.pdf>. Acesso em 01/06/2018

[25] QUIMBY, Richard S. Photonics and Lasers an introduction. 1st Edition. Published 2006 ISBN 0471719749 by John Wiley-Interscience in Hoboken, NJ. ISBN 10: 0471719749

CAPÍTULO 4

Apresentação do estudo sobre dispositivo de interferometria utilizado nos esquemas simulados neste trabalho. Realização de uma simulação numérica das características de transmissão de fontes de laser e pulso de dado gaussiano em uma estrutura semelhante ao acoplador duplo não linear seguido de fibras de grade de Bragg lineares, configurando um sistema conhecido como interferômetro de Michelson (MI) junto com amplificador óptico semiconductor (SOA).

A interferometria tem sido usada em múltiplas aplicações, tais como: medição de pequenas distâncias e deslocamentos, medição de comprimentos de onda e frequências ópticas, sensores interferométricos, medição de velocidades, teste de componentes ópticos e deslocamentos pelo efeito Doppler, medições à escala estelar e espectroscopia, etc [1].

4 INTERFEROMETRIA

Um interferômetro óptico é um dispositivo que tem a capacidade de realiza o fenômeno da interferometria, onde divide a luz em dois feixes por meio de um divisor, que poderão percorrer distâncias ou condições diferentes, redirecionando-os e recombinando-os usando outro (ou o mesmo) divisor de feixes, analisando a superposição ocorrida, pois um feixe óptico interferir construtiva ou destrutivamente com o outro feixe óptico, dependendo da coerência e do estado de polarização dos mesmos.

Os interferômetros têm sido utilizados para implementar muitas operações ópticas como, espectrometria, filtragem, multiplexação, conversão de comprimento de onda, etc [2].

Foram inicialmente construídos, empiricamente, no espaço livre, utilizando-se principalmente de espelhos e semi-espelhos, dentre os quais destacamos os interferômetros de Michelson (MI), de Fabry-Perot (FPI), de Sagnac (SI), de Mach-Zehnder (MZI), Interferômetro Não-Linear Ultra-rápido (UNI - *Ultrafast Nonlinear Interferometer*) e o Interferômetro de Atraso (DI - *Delay Interferometer*). Com o surgimento das fibras ópticas, construiu-se os interferômetros em fibras ópticas com o ajuda de acopladores ópticos direcionais [3] [4].

Vários dispositivos não-lineares são também implementados no processamento de sinal óptico, tais como: Anel óptico refletivo não linear (NOLM – *Nonlinear Optical Loop Mirror*), Interferômetro de Mach-Zehnder baseado em amplificadores ópticos de semicondutores (SOA-MZI – *Mach-Zehnder Interferometer based on Optical Semiconductor Amplifier*) ou com o

interferômetro de Michelson (SOA-MI – *Michelson Interferometer based on Optical Semiconductor Amplifier*), entre outros que já foram e que ainda serão criados e implantados [5].

4.1 INTERFERÔMETRO DE MICHELSON (MI)

Um interferômetro de dois feixes que usa espelhos e divisores de feixe, com divisão de amplitude, sendo um tipo mais fundamental formado principalmente em uma estrutura de separação semi-reflexiva e dois espelhos planos M_1 e M_2 . Esses três elementos são orientáveis sendo que M_2 é deslocável para ajustar a distância observada no diagrama.

O princípio do interferômetro de Michelson é que uma radiação de uma fonte extensa incide sobre o divisor de feixe, em que o feixe de luz é dividido em dois caminhos iguais, pois as distâncias entre o divisor de feixe e os dois espelhos (duas FBG) devem ser idênticas. Então são dirigidos aos dois espelhos planos, que por sua vez refletem e tornam a se unir novamente no mesmo divisor de feixe para criar franjas de interferência, podendo causar uma diferença de fase entre eles, se percorrerem caminhos diferentes [6] [7].

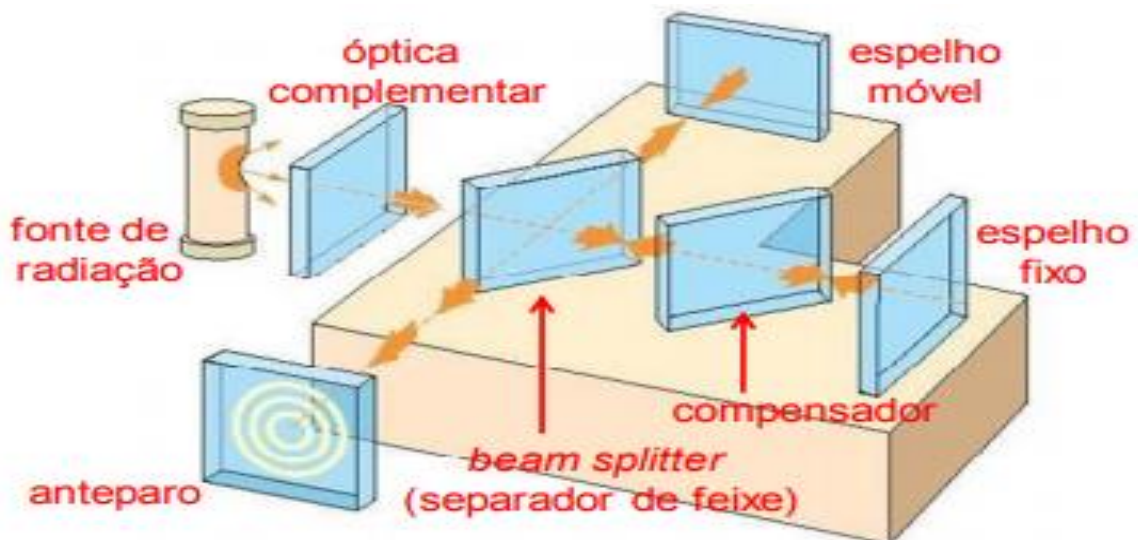


Figura 4.1 – Interferômetro de Michelson e seus principais componentes.

Se os feixes percorrerem caminhos diferentes por um número inteiro e mais meio comprimento de onda, temos então uma interferência destrutiva com um sinal muito fraco no detector. No entanto, se os forem caminhos iguais ou diferirem por um número inteiro de comprimento de onda, temos uma interferência construtiva com um sinal forte no detector [1].

Em fibras ópticas a configuração do interferômetro de Michelson pode ser obtida a partir da associação em cascata de dois componentes ópticos: um acoplador direcional duplo e fibras grades de Bragg lineares 100% refletivas, que atuam como espelhos, figura 4.2 (a) [8]. O interferômetro de Michelson opera como um espelho não linear, pois o sinal propagando nos dois braços do acoplador é forçado a interferir no mesmo acoplador onde foi dividido [6].

No interferômetro de Michelson, o fenômeno de interferência entre dois feixes gera uma intensidade de radiação na qual depende de frequência, polarização, fase e intensidade dos feixes. O resultado deste processo é a formação de um padrão de interferência da radiação, sensível à diferença de caminho óptico entre os dois feixes de radiação [1].

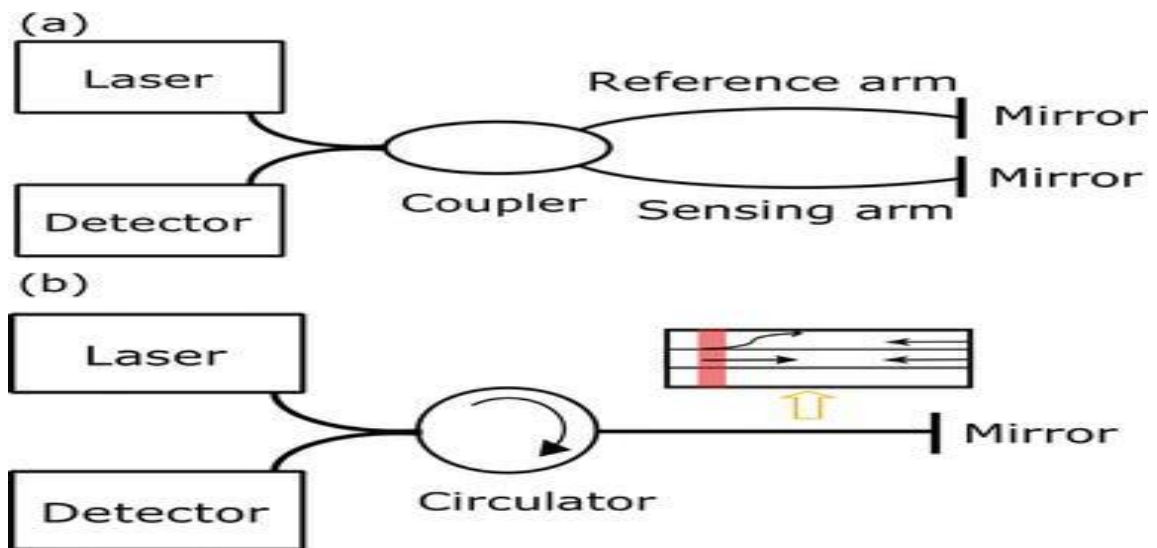


Figura 4.2 – Esquema do Interferômetro de Michelson (a) usando duas fibras e (b) uma fibra.

Neste trabalho de simulação numérica de portas lógicas totalmente óptica baseado em Interferômetro de Michelson foi utilizado a estrutura de um acoplador direcional duplo não linear (NLDC) com SOA, servindo como divisor de feixe e em ambas suas saídas colocou as grades de Bragg lineares simetricamente iguais, servindo como espelhos para selecionar o comprimento de onda. A estrutura SOA-MI é implementada para executar as portas lógicas AND, OR e NOR, com um conjunto de diferentes números de bits em suas entradas à 10 Gb/s [2].

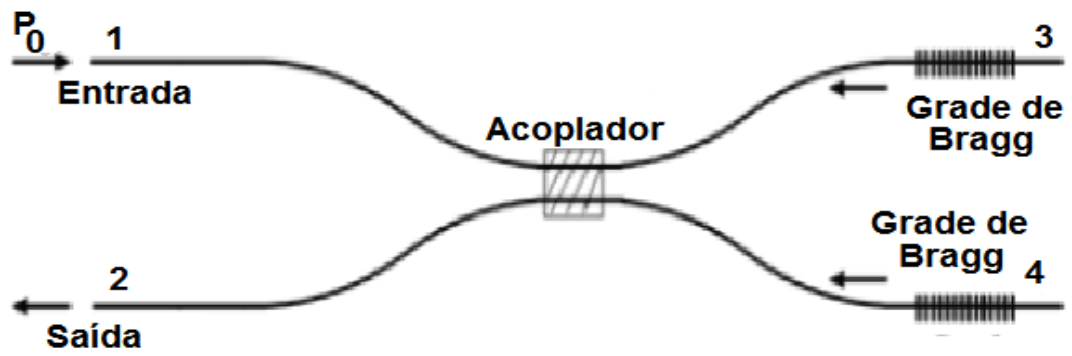


Figura 4.3 –Interferômetro de Michelson em fibras ópticas.

4.2 OUTROS INTERFERÔMETROS

Além do interferômetro Michelson, pode-se utilizar outros interferômetros para a implementação de portas lógicas, como exemplo o de Mach-Zehnder, Sagnac, dentre outros [2].

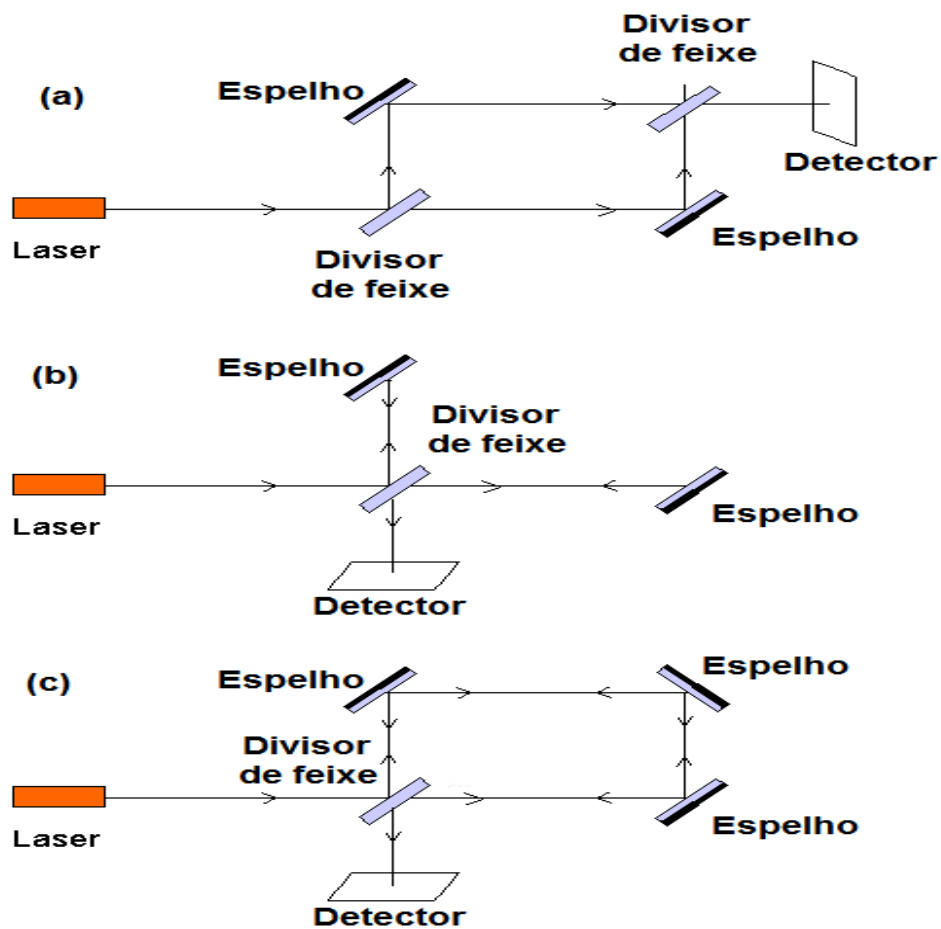


Figura 4.4 –Interferômetro de (a) Mach-Zehnder, (b) Michelson e (c) Sagnac.

4.2.1 Interferômetro de Mach-Zehnder (MZI)

O esquema de um interferômetro de Mach-Zehnder (figura 4.5) é composto de dois acopladores, onde um feixe de luz incide na entrada 1 do primeiro acoplador (servindo como divisor), que é então dividido em duas partes que se propaga nos dois braços dos acopladores. Na presença de assimetria, os dois feixes originados da entrada 1 irão sofrer deslocamentos de fases diferentes à medida que se propagam. Os feixes se unem no segundo acoplador, indo para um dos seus braços de saída (detectores) [2].

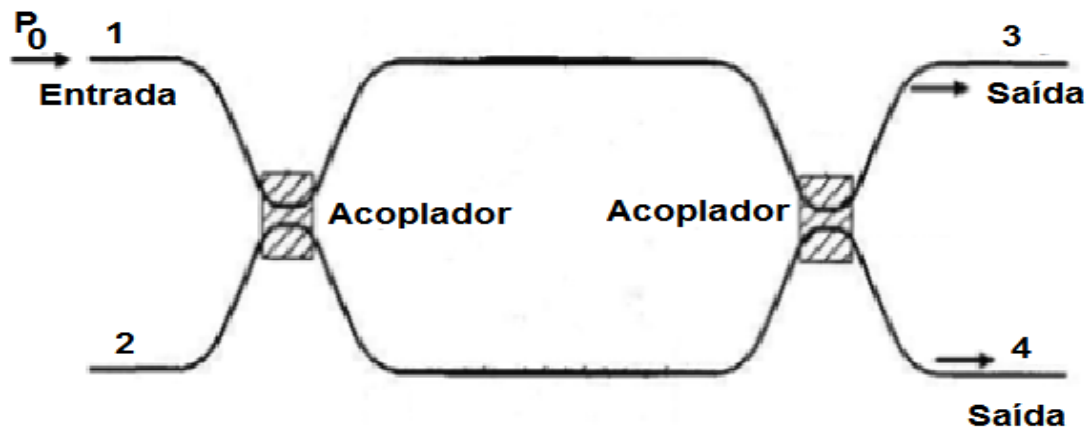


Figura 4.5 –Interferômetro de Mach-Zehnder em fibras ópticas.

4.2.2 Interferômetro de Sagnac (SI)

No esquema de um interferômetro de Sagnac, também conhecido por espelho óptico não-linear em anel (NOLM - *Non-Linear Optical Loop Mirror*), tem um acoplador direcional duplo, sendo que suas duas portas de saída estão conectadas uma a outra formando um anel, ou seja, os dois caminhos ópticos são exatamente os mesmos correspondendo às duas direções de propagação (horária e anti-horária), bastante estável ao redor do anel de fibra óptica [2].

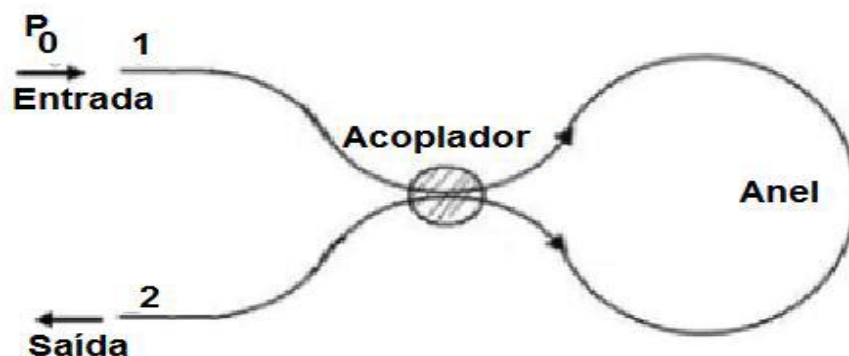


Figura 4.6 –Interferômetro de Sagnac em fibras ópticas.

O interferômetro de Michelson é parecido com o interferômetro de Mach-Zehnder, com exceto que no Michelson o sinal que propaga em seus dois braços é forçado a interferir no mesmo acoplador onde foi dividido, agindo como um espelho não linear, e em virtude disso se assemelha a um interferômetro de Sagnac, porém a diferença é que os campos de interferência óptica não compartilham o mesmo caminho físico, o que acontece no Sagnac [1].

4.3 REFERÊNCIAS

- [1] SOUSA, J. R. R. Estudo do desempenho do interferômetro de Michelson de fibras de cristal fotônico para aplicações em circuitos lógicos nas configurações on-off e ppm. 2014. 142 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Teleinformática) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.
- [2] QUEIROZ, A. S. B. Estudo do desempenho de componentes baseados em fibras ópticas especiais: fibras de cristal fotônico e de metamateriais e suas aplicações em comunicações. 177 f. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia de Teleinformática) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.
- [3] CAVALCANTE, Daniel do Nascimento e Sá. Obtenção experimental de portas lógicas com interferômetro de Mach-Zehnder e SOA. Fortaleza: IFCE, 2017.
- [4] Singh P, Tripathi DK, Jaiswal S, Dixit HK (2014), “All-optical logic gates: designs, classification and comparison”. Zoran Ikonik Academic Edition, 19 Mar (2014).
- [5] SILVEIRA, T. G. d. All-optical processing systems based on semiconductor optical amplifiers. Aveiro: Universidade de Aveiro, 2011.
- [6] Interferômetro de Michelson. IFSC/USP - Instituto de Física de São Carlos - IFSC, da Universidade de São Paulo – USP. Disponível em: <www.ifsc.usp.br/~lavfis/images/BDAPostilas/ApMichelson/Michelson_1.pdf>. Acesso em 01/06/2018.
- [7] Born, M., and Wolf, E., Principles of optics, Sixth Edition, Cambridge University Press
- [8] Dora Juan Juan Hu, Rebecca Yen-Ni Wong and Perry Ping Shum. “Photonic Crystal Fiber-Based Interferometric Sensors, Selected Topics on Optical Fiber Technologies and Applications”, Prof. Fei Xu (Ed.), InTech, DOI: 10.5772/intechopen.70713, (2018).

CAPÍTULO 5

Neste capítulo serão apresentados os conceitos das portas lógicas, bem como a tabela verdade para mostrar a diferença entre cada uma, com ênfase nas portas AND, OR e NOR, pois são as que foram implementadas neste trabalho.

5 PORTAS LÓGICAS

Portas lógicas, relacionadas na figura 5.1, são dispositivos que realizam operação Booleana de acordo com os valores dos sinais de entrada. Com o objetivo de implementar portas lógicas totalmente ópticas, que são AND, OR, NOT, XOR, NAND, NOR e NXOR várias pesquisas foram realizadas.

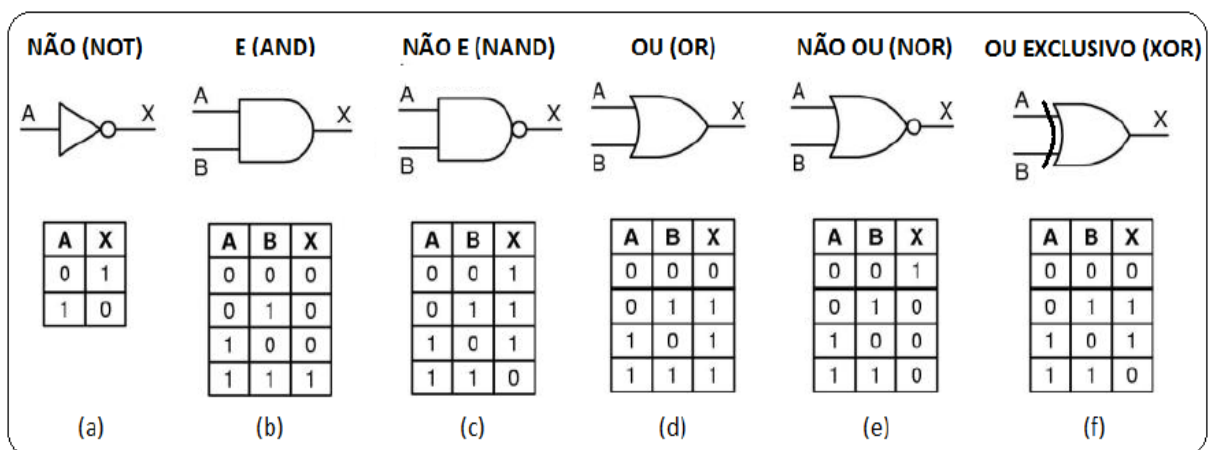


Figura 5.1 – Circuito lógico e tabela verdade das portas lógicas (a) NÃO (NOT); (b) E (AND); (c) NÃO-E (NAND); (d) OU (OR); (e) NÃO-OU (NOR) e; (f) OU EXCLUSIVO (XOR).

As portas são classificadas com base em técnicas de interferômetro, como exemplo o Interferômetro de Michelson (MI - *Michelson Interferometer*), o Mach-Zehnder (MZI), Interferômetro Não-linear ultrarrápido (UNI - *Ultrafast Nonlinear Interferometer*), Interferômetro de Atraso (DI - *Delay Interferometer*), de Fabry-Perot (FP), e o de Sagnac (SI) conhecido como Anel Óptico Não-Linear (NOLM - *Nonlinear Optical Loop Mirror*), podendo ser implementadas com ou sem SOA.

Podem ser implementadas por meios não lineares, como exemplos, o amplificador óptico semiconductor (SOA) e a fibra altamente não linear (HNLF), pois através de pulsos do

controle óptico são eficazes no princípio de alteração das características de transmissão do meio não linear [1].

Portanto, para a implementação das portas lógicas totalmente ópticas, os esquemas serão constituídos de efeitos não-lineares de SOA, pois tem sido um excelente inovador na realização de funções lógicas, sendo de grande relevância na realização de funcionalidades como multiplexação add/drop, conversores de comprimento de onda, sincronização de pacotes, recuperação de clock, reconhecimento de endereço, comparadores de bits, processamento de sinal óptico em redes de comunicação de alta velocidade, aumenta a largura de banda, oferecendo um efeito não linear e uma rapidez no processamento de sinal digital totalmente ópticas, com faces com baixa refletividade e altos ganhos de fibra para fibra, reduzindo também as perdas de acoplamento, uma forte mudança do índice de refração em conjunto com um alto ganho [2] [3].

Desta forma, as portas lógicas totalmente ópticas são elementos chave para realizar tarefas de processamento de sinais ópticos, de modo a explorar plenamente as vantagens inerentes das fibras na implementação de redes de comunicação de banda larga [4] [5].

Neste trabalho será utilizado o esquema com o efeito de Modulação de Ganho Cruzado (XGM) baseado na não-linearidade do SOA com o Interferômetro de Michelson (SOA-MI), para explorar as portas lógicas AND (“E”), OR (“OU”) e NOR (“NÃO OU”), demonstrado com sucesso em 10 Gb/s [6].

5.1 Porta Lógica AND

A porta lógica AND (“E”) é uma das principais operações junto com OR, XOR e NOT, e pode gerar novas portas através de suas combinações, por exemplo, a operação lógica NAND pode ser obtida com o NOT na saída da porta AND, e também através da combinação das saídas do XOR e NOR [7].

A porta AND totalmente óptica é uma das portas lógicas fundamentais para a implementação de circuitos de processamento complexos, pois é capaz de executar as funções de nível de bit, reconhecimento de endereço, modificação de cabeçalho de pacote e verificação de integridade de dados, atua como um meio somador, um somador completo, um decodificador binário e um contador binário. É uma função muito útil no processamento de sinais ópticos [8].

A tabela verdade para a porta lógica AND produz o bit “1” quando todas as suas entradas são bit “1”, caso contrário a saída é bit “0” [9]. É uma multiplicação, por isso, se A e B são suas entradas, na saída teremos o resultado de $A \times B$ (também representado como AB) [10].

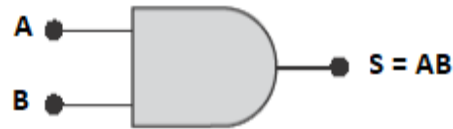


Figura 5.2 – Símbolo da Porta Lógica AND. Adaptado de [10].

Tabela 5.1 – Tabela Verdade da Porta Lógica AND.

Entrada A	Entrada B	Saída = AB
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Fonte: Próprio Autor.

5.2 Porta Lógica OR

A porta lógica OR (“OU”) é uma das operações principais. A tabela de verdade da porta OR produz o bit “0” quando todas as entradas são “0”, caso contrário a saída é bit “1” [9] [11]. É uma adição, por isso, se A e B são suas entradas, na saída teremos o resultado de $A + B$ [10].

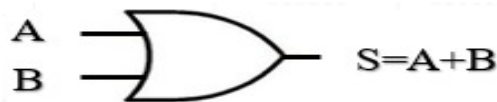


Figura 5.3 – Símbolo da Porta Lógica OR. Adaptado de [10].

Tabela 5.2 – Tabela Verdade da Porta Lógica OR.

Entrada A	Entrada B	Saída = A+B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Fonte: Próprio Autor.

5.3 Porta Lógica NOR

A porta lógica NOR (a negação da saída da porta “OU”), desta forma produz o bit “1” quando todas as entradas são “0”, caso contrário será bit “0”. Pode ser usado no monitoramento de desempenho para detecção de erros. Elemento lógico universal, usado para projetar a funcionalidade do circuito digital [10].

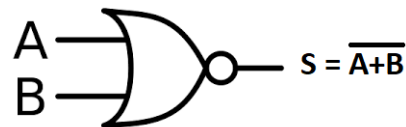


Figura 5.4 – Símbolo da Porta Lógica NOR. Adaptado de [10].

Tabela 5.3 – Tabela Verdade da Porta Lógica NOR.

Entrada A	Entrada B	Saída = $\overline{A+B}$
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

Fonte: Próprio Autor.

5.4 REFERÊNCIAS

- [1] FRAGA, Wilton Bezerra de. Estudo do desempenho de acoplador direcional não linear duplo assimétrico de fibras ópticas operando portas lógicas. 2006. 82 f. Dissertação (Mestrado em Física) - Programa de Pós-Graduação em Física, Departamento de Física, Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.
- [2] Singh P, Tripathi DK, Jaiswal S, Dixit HK (2014), “All-optical logic gates: designs, classification and comparison”. Zoran Ikonik Academic Edition, 19 Mar (2014).
- [3] Kadam Bhambri and Neena Gupta (2012) Implementation of All-Optical AND & OR Gates using SOA. Journal of Information Systems and Communication, ISSN: 0976-8742 & E-ISSN: 0976-8750, Volume 3, Issue 2, pp-371-374.
- [4] Dimitriadou E and Zoiros K E 2012 On the design of reconfigurable ultrafast all-optical NOR and NAND gates using a single quantum-dot semiconductor optical amplifier-based Mach–Zehnder interferometer J. Opt. 14 105401
- [5] Jinglei MAO, Shangjian ZHANG, Tianxiang XU, et al. All-optical signal processing based on semiconductor optical amplifiers[J]. Front Optoelec Chin, 2011, 4(3): 231-242.
- [6] SILVEIRA, T. G. d. All-optical processing systems based on semiconductor optical amplifiers. Aveiro: Universidade de Aveiro, 2011.

- [7] C. W. Son, S. H. Kim, Y. M. Jhon, Y. T. Byun, S. Lee, D. H. Woo, S. H. Kim, and T.-H. Yoon, "Realization of All-Optical XOR, NOR, and NAND gates in single format by using semiconductor optical amplifiers," *Jpn. J. Appl. Phys.* 46(1), 232–234 (2007).
- [8] Ajay Kumar, Santosh Kumar, S. K. Raghuwanshi, "Implementation of All-Optical Logic Gate using SOA-MZI Structures," *STM Journals* 2013, ISSN: 2231-0401
- [9] Mr.Sachin Kumar. Gates, All-Optical Composite Logic. "Semiconductor Optical Amplifiers (SOA) Performance Optimization in Optical Communication System." *International Journal of Computer Science & Engineering Technology (IJCSET)*, Vol. 3 No. 9 Sep (2012).
- [10] ALMEIDA, Léo César Parente de. Obtenção e análise da performance de portas lógicas totalmente ópticas baseadas em guias de onda de cristais fotônicos. 2016. 77 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2016. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
- [11] Sharma, Priti and Tiwari, Nidhish. "Design & Analysis of High Speed Optical Logic Gates Using SOA". *International Journal of Science, Engineering and Technology*, Volume 3 Issue 3: (2015).

CAPÍTULO 6

Neste capítulo serão apresentados os projetos das portas lógicas AND, OR e NOR totalmente ópticas baseado em interferômetro de Michelson com SOA, as simulações, as análises e discussões dos resultados através da utilização do software comercial Optisystem. Existem outras portas lógicas e outros interferômetros de maneira totalmente óptica, mas neste trabalho são investigadas as portas AND, OR e NOR com SOA-MI e o efeito não linear XGM, a qual será descrita no decorrer do capítulo.

6 SIMULAÇÕES E RESULTADOS NUMÉRICOS DAS PORTAS LÓGICAS AND, OR E NOR TOTALMENTE ÓPTICO BASEADO EM INTERFERÔMETRO DE MICHELSON

A seguir tem-se uma breve apresentação do Optisystem que foi o software utilizado no desenvolvimento deste trabalho.

Uma descrição mais detalhada dos sistemas propostos neste trabalho mostrando o processo de transmissão, o interferômetro de Michelson, e o receptor, bem como todos os parâmetros das simulações.

6.1 METODOS E SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Através deste trabalho implementou-se as portas lógicas AND, OR e NOR totalmente ópticas baseado no esquema de interferometria, o qual utilizou o *CW Laser* no transmissor e filtro óptico no receptor. Nosso esquema é uma versão que inclui um SOA-MI com FBG nas saídas de seus braços. Foram exploradas as vantagens dos efeitos não lineares, que neste caso foi aproveitado a Modulação de Ganho Cruzado (XGM) para uma taxa de bit de 10 Gb/s e comprimento de onda de 1556 nm e 1550 nm, faixa em que a fibra óptica tem menor atenuação, ou seja, realizada na Banda C (*C-Band/Conventional Band*) com a região espectral de 1530 nm a 1565 nm.

O design do sistema de portas lógicas baseado em MI de maneira totalmente óptica está dividido em três partes: a primeira é a transmissão, a segunda é o SOA-MI e a terceira é o receptor do sinal tendo o filtro gaussiano. Para que seja melhor visualizada a evolução do processo estão apresentados de forma separada, cada uma delas.

Os projetos de portas lógicas totalmente ópticas foram desenvolvidos através de simulações numéricas no *software Optisystem* da empresa canadense *Optiwave Corporation* que é um simulador com modelagem realista de rede óptica muito utilizado em projetos de sistemas de comunicações, pois permitiu planejar, testar e simular enlaces ópticos na camada de transmissão de redes ópticas modernas [1]. Possui uma ampla biblioteca de componentes ativos e passivos no domínio elétrico e óptico tais como: transmissores, CW Laser, acopladores, divisor, combinador, Fibra de Grade de Bragg, fibras, amplificadores ópticos, multiplexadores, demultiplexadores, receptores, e muitos outros, além de permitir a alteração de seus parâmetros de forma geral ou particular. Tem-se instrumentos que possibilitam a visualização dos resultados tais como: medidores de potência, analisador do espectro óptico e elétrico, osciloscópio, visualizador da taxa de erro de bit e do fator Q, visualizador de diagrama de constelação e do diagrama de olho, dentre outros. Neste simulador pode-se implementar qualquer enlace óptico na camada física de um amplo espectro de redes ópticas [2] [3]. Este software, é considerado uma poderosa ferramenta de design de sistemas ópticos, a qual permite planejar, testar e simular tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência [1].

A versão atual grátis do simulador é a OptiSystem 15.0 [4], e está disponível para *download* no site oficial www.optiwave.com, com limite de uso por 30 dias e também está à venda para uma versão atualizável anualmente, e possui novos componentes como Scripts em Python, Sensor óptico medido, BER Test Multiple, Conjugado complexo elétrico, Conjugado Óptico Complexo, Visualizador de olho elétrico. Também encontramos os tutoriais, e outros simuladores com o OptiPerformer, OptiFDTD, OptiGrating e o OptiFiber.

A interface gráfica pode ser vista na figura 6.1 [3], que é formada por três partes principais. A *Component Library* é onde encontra os componentes ativos e passivos e os visualizadores usados para analisar o desempenho do projeto. O *Layout Project* é onde todo o sistema será implementado, e para isso insere-se os componentes que estão na *component library*. E no *Layout Tools* encontra ferramentas como lupa, editor de texto, conectores para subsistemas.

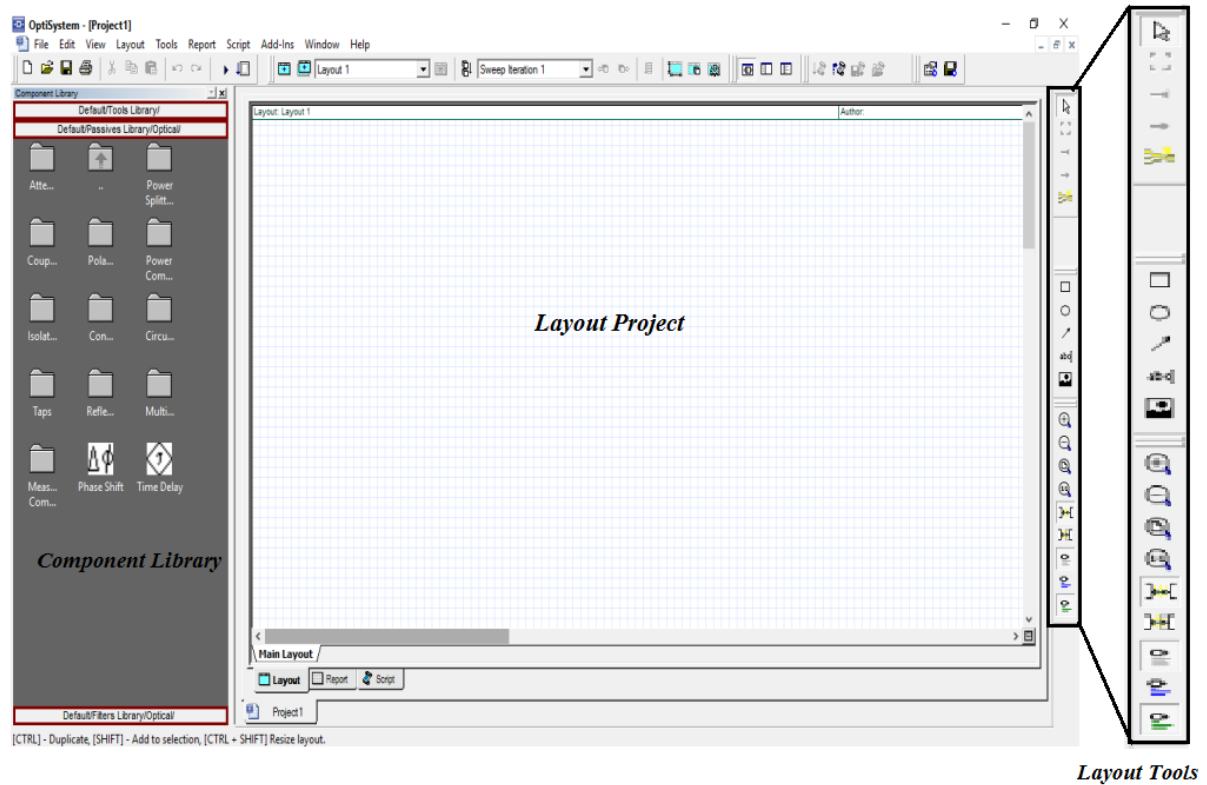


Figura 6.1 – Interface gráfica do *software OptiSystem*. Adaptado de [3].

Concluído o projeto, realiza-se a simulação com a propagação da sequência de bits ópticos pelo enlace, regido pela a Equação Não Linear de Schrödinger apresentada no capítulo 2.

Toda e qualquer rede de comunicação por fibra óptica e outros componentes é passiva de perdas que podem ser leves ou graves, causadas por atenuação, dispersão e efeitos não lineares. Quando o sinal óptico se propaga do transmissor para o receptor, a sua qualidade se degrada devido a obstruções na camada física da rede. Esses problemas são responsáveis pela limitação da taxa de transmissão e pela distância do *link* óptico [5].

A sequência de bits gerada nos esquemas é com período de repetição de bits dado por [6]:

$$T = 2^m - 1 \quad (6.1)$$

Nesse sentido como mostra a equação 6.2, o espaço de frequência Δf torna-se menor, quando aumenta o número de bits m , consequentemente o espectro da sequência de bits gerado torna-se cada vez mais contínuo e isso melhora a aleatoriedade da sequência de bits [6].

$$\Delta f = \frac{f_b}{T}, \quad (6.2)$$

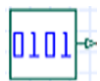
onde f_b é a taxa de bits.

Em qualquer sistema de comunicações por fibra óptica o valor do fator de qualidade deve ser o maior possível para um valor ideal de potência do transmissor, pois para baixos níveis de potência, o fator Q limita-se pelo ruído e para altos níveis de potência pelos efeitos não lineares [5].

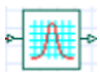
Para garantir a confiabilidade do desempenho dos sistemas propostos, porta lógica AND, OR e NOR totalmente óptica baseada em SOA-MI, a coleta dos resultados foi realizada em função do diagrama de olho, da taxa de erro de bit (BER), do fator de qualidade (Fator Q), da OSNR, do espectro óptico e da amplitude de modulação do pulso óptico, visualizados por meio do *Oscilloscope Visualizer*, *Optical Time Domain Visualizer*, *Optical Spectrum Analyzer* e *Eye Diagram Analyzer* para os números de bits de 4, 8, 16 e 32, os quais são demonstrados e discutidos nas próximas seções.

Abaixo estão os componentes utilizados nas simulações, encontrados na biblioteca do software Optisystem, separador em transmissor, interferômetro de Michelson e Receptor [7]:

Lista de componentes para implementar os transmissores ópticos das portas lógicas AND, OR e NOR:



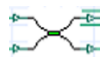
- **Gerador de sequência de bit definido pelo usuário (*User defined bit sequence generator - UDBSG*):** Este módulo gera uma sequência de bits definida pelo usuário, tendo uma saída específica o tempo todo.



- **Gerador de pulso gaussiano óptico (*Optical gaussian pulse generator - OGPG*):** Cria uma sequência de sinal óptico de pulso gaussiano modulados por um sinal digital de entrada.



- **Laser de onda contínua (*CW Laser*):** Gera um sinal óptico de onda contínua (CW). Laser usado com moduladores externos.



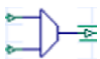
- **Acoplador direcional duplo (*X coupler*):** Este componente é um acoplador cruzado para combinar ou dividir sinais ópticos.



- **Sinal nulo (*Optical null*):** Este modelo gera um sinal óptico de valor zero.



- **Sinal Terra (*Ground*):** Ao usar acopladores ópticos, pode-se não deixar nenhuma porta livre, anexando sinal nulo e terra em portas vazias.



- **Multiplexador de dois canais (*WDM mux 2x1*):** Este componente multiplexa dois canais de sinal WDM.



- **Amplificador óptico semiconductor de ondas propagantes (TW-SOA: *Traveling wave SOA*):** Trabalha como um Amplificador Óptico Semicondutor.

O interferômetro de Michelson é formado pelos componentes abaixo, além do *Traveling wave SOA* já informado acima:



- **Divisor de Potência (*Power Splitter 1x2*):** É um divisor de potência ideal, ele divide um sinal de entrada óptica em dois sinais de saída.



- **Combinador de Potência (*Power Combiner 2x1*):** É um combinador de energia ideal, combina dois sinais de entrada óptica.



- **Acoplador de Bombeio Co-Propagante (*Pump Coupler Co-Propagating*):** Onde dois sinais são acoplados em uma fibra para propagarem-se na mesma direção.



- **Fibra de Grade de Bragg (*Fiber Bragg Grating - FBG*):** Executa as funções de uma FBG.

Para o monitoramento do desempenho do sistema, os receptores ópticos das três portas lógicas totalmente ópticas, consistem dos seguintes instrumentos:



- **Filtro Óptico Gaussiano (*Gaussian Optical Filter - OBP*):** Este modelo é um filtro óptico com uma função de transferência de frequência gaussiana.



- **Visualizador Óptico no Domínio do Tempo (*Optical Time Domain Visualizer - OTDV*):** útil para verificar a amplitude do sinal e o formato do pulso na entrada e na saída do sistema, mostra a variação do sinal óptico com o tempo, sendo um osciloscópio para sinais ópticos.



- **Visualizador do Medidor de Potência Óptica (*Optical Power Meter Visualizer - OPMV*):** usado para verificar os níveis de potência gerados pelo transmissor em diferentes pontos do link óptico, o mesmo apresenta valores da potência de ruído, potência do sinal e também a potência total do sistema.



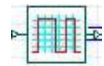
- **Analisador do Espectro Óptico (*Optical Spectrum Analyzer - OSA*):** responsável por monitorar a relação sinal ruído óptica e também serve para visualizar o espectro de frequência do sinal óptico dos canais de um sistema na saída e após a propagação do pulso no enlace, podendo verificar como varia a atenuação, a dispersão e também os efeitos não lineares em uma fibra óptica ou em qualquer outro componente óptico. Mede a magnitude de um sinal óptico de entrada versus frequência;



- **Receptor Óptico (*Optical Receiver*):** É um elemento crítico de um sistema de comunicação ótica, pois geralmente determina o desempenho geral do sistema. A função do receptor óptico é detectar a energia óptica que chega e extrair dela o sinal (analogico ou digital) que está sendo transmitido. Ele deve atingir essa função enquanto atende a determinados requisitos do sistema, como nível desejado de relação sinal-ruído e taxa de erro de bit.



- **Visualizador Osciloscópio (*Oscilloscope Visualizer*):** Mostra a variação do sinal elétrico com o tempo, pois para o óptico usa-se o OTDV.



- **Gerador de Pulso Elétrico NRZ (*NRZ Pulse Generator*):** Cria uma sequência de pulsos de não retorno a zero (NZR) codificados a partir de um sinal digital de entrada (sequência binária).



- **Analisador de Diagramas de Olho (*Eye Diagram Analyzer - EDA*):** serve para visualização da taxa de erro de bit (BER), altura do olho e fator de qualidade (Q). Este instrumento compara o valor enviado pelo transmissor (“0” ou “1”) com o sinal recebido, para detectar erros de bits, pois o receptor pode interpretar os bits incorretamente devido ao sinal fraco (atenuação) ou distorcido (dispersão). Mostra o formato do Diagrama de Olho de um canal elétrico.



- **Analisador de Taxa de Erro de Bit (*BER Analyzer*):** Medidor de BER de um canal elétrico. Este visualizador pode estimar e analisar o BER do sinal recebido.

6.2 PROJETO DA PORTA LÓGICA AND TOTALMENTE ÓPTICA BASEADO EM SOA-MI

A porta lógica AND totalmente óptica apresentada neste trabalho é baseado no esquema de interferometria, no qual utiliza o *CW Laser* no transmissor e filtro óptico no receptor. O esquema é uma versão que inclui um SOA-MI com FBG nas saídas de seus braços. Foram exploradas as vantagens dos efeitos não lineares, que neste caso foi utilizado a Modulação de Ganho Cruzado (XGM).

O Esquema está dividido em três partes: a primeira é a transmissão, a segunda é o interferômetro de *Michelson*, que é o SOA-MI e a terceira é o receptor do sinal. Para que seja melhor visualizada a evolução do processo serão apresentados de forma separada.

6.2.1 Sessão de Transmissão da Porta Lógica AND.

Para este projeto, como mostrado no esquemático completo do sistema na **figura 6.5**, o transmissor é composto de dois geradores de sequência de bits definido pelo usuário (*User Defined Bit Sequence Generator* - UDBSG) com taxa de transmissão de 10 Gb/s ligado a um gerador de pulso gaussiano (*Optical Gaussian Pulse Generator* - OGPG) que nas simulações tem potência de 0.3 mW no comprimento de onda de 1556 nm , para assim analisar a eficiência do funcionamento da porta lógica AND totalmente óptica com SOA-MI com dois sinais de entradas binárias A e B (Power A e B), usando diferentes números de Bits (4, 6, 8, 16 e 32 bits) nas simulações. O sinal de informação Power B com configurações citadas acima, é dividido em dois sinais, onde cada um é combinado com um dos sinais de informação, sendo o sinal de informação Power A e um laser de ondas contínuas (*CW Laser*) na frequência 1550 nm com potência de entrada de 0.25 mW , passando através dos acopladores e depois combinados usando multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM) para entrar no *Traveling Wave SOA* com corrente de injeção de $0,15 \text{ A}$. A figura 6.2 mostra o transmissor utilizado.

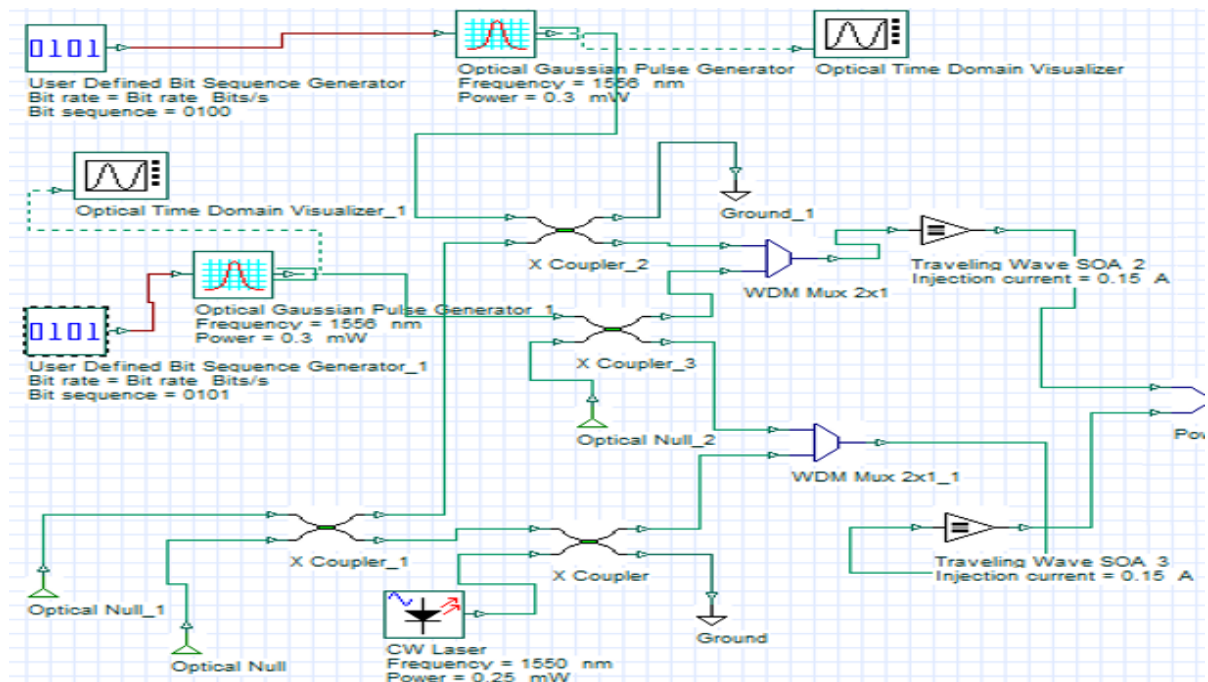


Figura 6.2 – Transmissor da Porta Lógica AND Totalmente Óptica com SOA-MI

O princípio de operação para a porta AND da Figura 6.2, é que as sequências de dados a serem comparadas são direcionadas ao SOA-MI. Os sinais de dados entram no dispositivo, onde um pulso óptico será obtido na saída apenas no caso de ambos os sinais de dados serem

“1”, neste caso ($A=1$ e $B=1$). Quando $B = 0$, a porta não produz nenhum sinal na saída. No caso em que $A=0$ e $B=1$ também não produz nenhum sinal na saída. E quando o sinal na porta 1 e o sinal na porta 2 são zero, nenhuma energia é obtida na saída do dispositivo [8].

6.2.2 Transmissão com SOA-MI para a Porta Lógica AND

A figura 6.3 mostra a sessão do SOA-MI para a porta lógica AND.

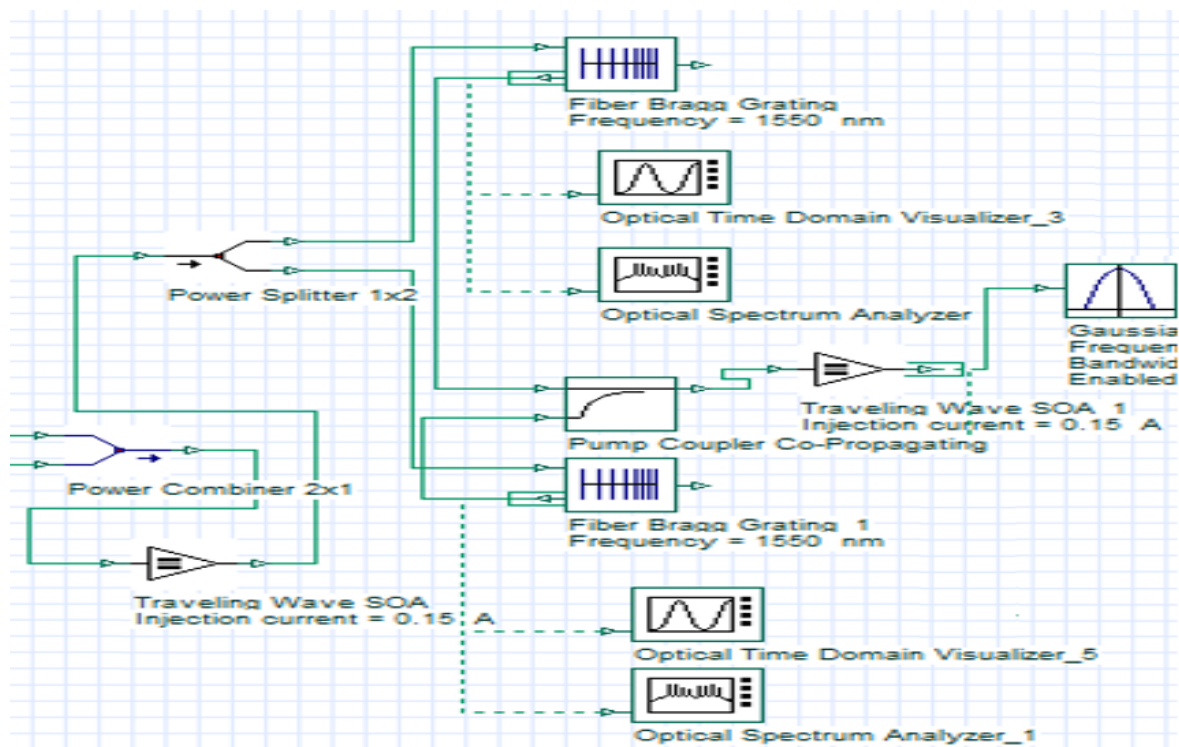


Figura 6.3 – O Amplificador Óptico Semicondutor baseado em Interferômetro de Michelson (SOA-MI) para a Porta Lógica AND.

A parte responsável pela transmissão é composta por um Interferômetro de *Michelson* com Amplificadores Ópticos Semicondutor (SOA), sendo então um SOA-MI com as configurações a seguir.

As saídas de ambos os SOAs do transmissor passam por um *Power Combiner 2x1* para entrada de outro *Traveling Wave SOA* com corrente de injeção de 0,15 A., que por sua vez é conectada a um *Power Splitter 1x2* com FBGs simetricamente idênticos com frequências iguais ao do *CW Laser*. Os sinais de saída das FBGs são novamente acoplados através da *Pump Coupler Co-Propagating* e passa através de outro *Traveling Wave SOA* de mesma configuração que o anterior.

6.2.3 Sessão de Recepção da Porta Lógica AND.

A parte final da porta lógica é mostrada na figura 6.4, que consiste de um *Gaussian Optical Filter* com uma frequência de 1556 nm, e uma largura de banda de 10, 20 e 40 GHz, para filtrar o sinal óptico e assim rejeitar interferências e componentes de ruído e é convertido opticamente em forma elétrica através do *Optical Receiver*, com uma frequência de corte de $0.75 * \text{Bit rate}$ Hz, e entregue a um *NRZ Pulse Generator*. O sinal de saída AND é obtido no visualizador *Optical Time Domain Visualizer*. O desempenho do sistema é analisado de acordo com o *Eye Diagram Analyzed* ou *BER Analyzed*.

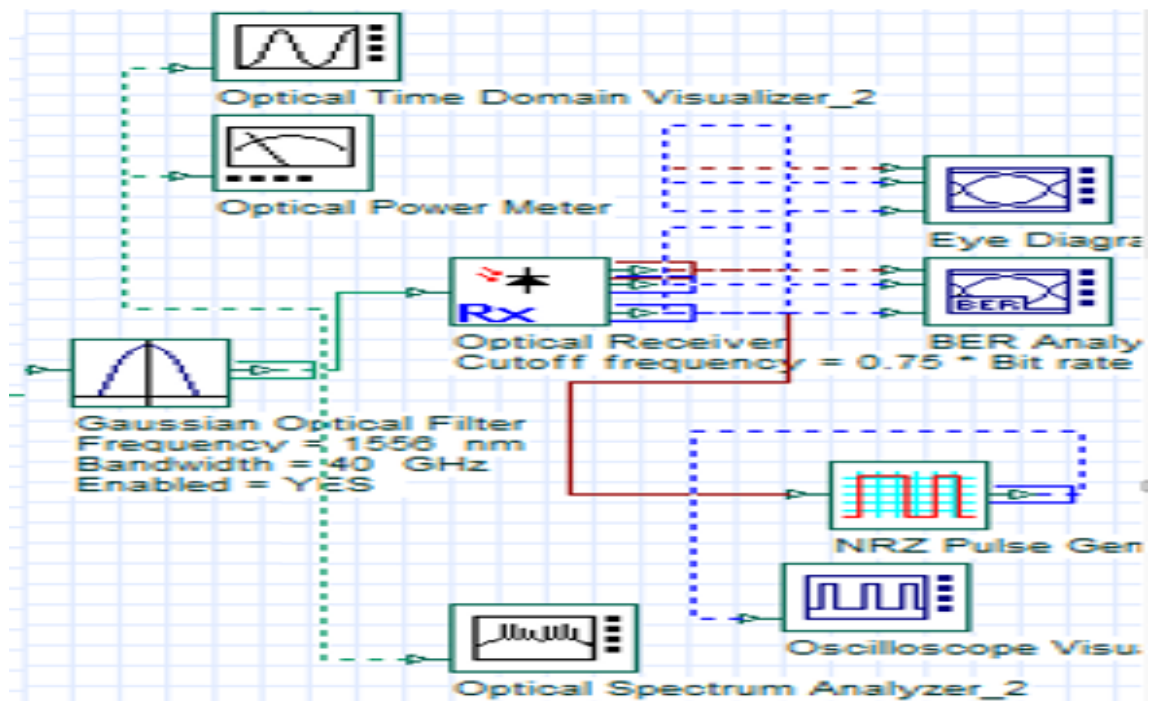


Figura 6.4 – Receptor da Porta Lógica AND Totalmente Óptica com SOA-MI.

6.2.4 Esquemático Completo da Porta Lógica AND com SOA-MI

A figura 6.5 mostra o diagrama esquemático completo do sistema de Porta Lógica AND Totalmente Óptica com SOA-MI proposto, que explora o efeito não linear XGM, através de um interferômetro de Michelson (*Michelson Interferometer* - MI) com Amplificador Óptico Semicondutor (SOA), o qual representa uma estrutura simples, de baixo custo e de desempenho estável. Os capítulos anteriores foram utilizados como base teórica para a criação desta porta lógica com SOA-MI.

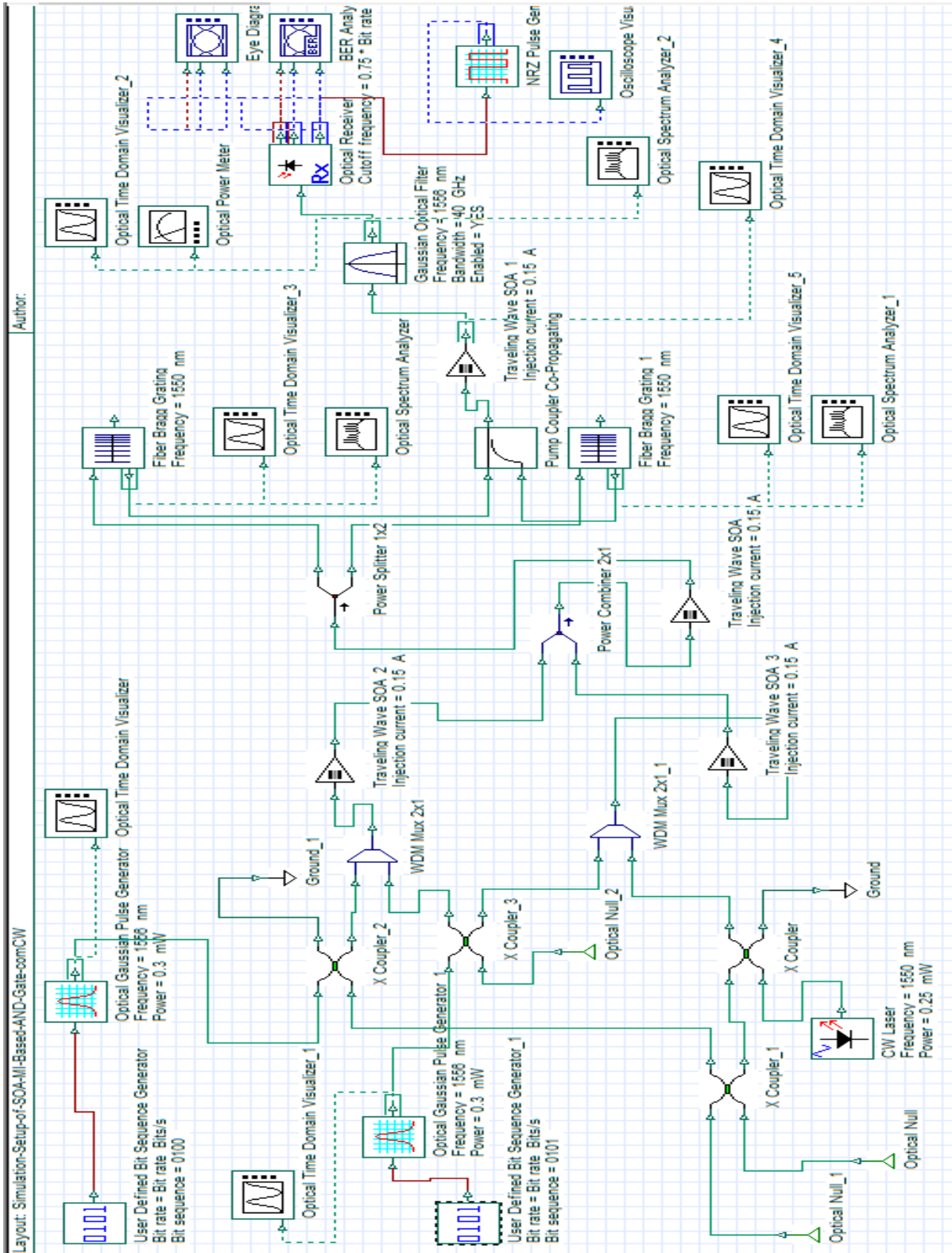


Figura 6.5 – Esquemático completo do sistema de Porta Lógica AND Totalmente Óptica com SOA-MI

6.2.5 Resultados e Discussões para a Porta Lógica AND


Os resultados aparecerão de acordo com a quantidade de Bits, neste caso de 4, 8, 16 e 32 bits nas duas entradas do transmissor com largura de banda do filtro gaussiano variando de 10, 20 e 40 GHz. Assim os gráficos de mesma categoria serão organizados um ao lado do outro para uma melhor visualização e comparação dos resultados, onde as imagens estão organizadas de acordo com a quantidade de sequência de bits para a largura de banda do *Gaussian Optical Filter* de 40 GHz nas portas A, B e S, pois obteve o melhor resultado.

O analisador de taxa de erro de bit (BER), o analisador do espectro óptico, o medidor de potência e o visualizador óptico no domínio do tempo são os componentes que servirão para as medições e as análises serão feitas de acordo com suas respostas baseada em interferômetro de Michelson.

A Tabela 6.1 mostra os diferentes números de bits utilizados para os dois sinais de informação de entrada de 4, 8, 16 e 32 bits e as saídas elétricas e ópticas da porta lógica AND. Com o auxílio do diagrama de olho, o Max. Q-Factor, Min. BER, Eye Height, e OSNR também são analisados e listados nas tabelas 6.2, 6.3 e 6.4, para analisar o desempenho da porta AND para diferentes sinais de entrada binária nas portas A e B, variando a largura de banda do filtro gaussiano.

Observou-se através das tabelas 6.2, 6.3 e 6.4 que a largura de banda do Gaussian Optical Filter de 40 GHz obteve melhores valores do Q-factor, da BER e da OSNR para todos os números de bits simulados. Isto é, com o aumento do parâmetro da largura de banda aumentou-se o fator de qualidade e a OSNR e conseqüentemente a taxa de erro de bits diminuiu para todas as sequências de bits (4, 8, 16 e 32 bits). Dentre os números de bits, a sequência de 4 bits foi a que obteve melhores valores, sendo o max. Q-Factor igual a 3.25801, o min. BER igual a 0.000524223 e OSNR igual 7.61108.

Tabela 6.1 – Diferentes Números de Bits para a Porta Lógica AND.

Sinal	Número de Bits			
	4 bits	8 bits	16 bits	32 bits
Entrada A	0100	01011010	0100001111000011	11011001011100100001011010010110
Entrada B	0101	00110000	0101110111011100	10100110101100110101010100110000
AND "E"	0100	00010000	0100000111000000	10000000001100100001010000010000
Símbolo da Porta Lógica AND				

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 6.2 – Análise dos Resultados de **10 GHz** para 4, 8, 16 e 32 Bits da Porta **AND**.

Parâmetros de 10 GHz	Número de Bits			
	4 bits	8 bits	16 bits	32 bits
Max. Q- Factor	2.65127	2.34561	0	2.00773
Min. BER	0.00373123	0.00601027	1	0.0174483
Eye Height	-1.00712e-006	-2.34527e-006	0	-371998e-006
Threshold	5.73003e-006	6.90871e-006	0	6.44552e-006
Decision Inst.	0.503906	0.53125	0	0.53125
OSNR	5.38935	4.40953	0	3.43517

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 6.3 – Análise dos Resultados de **20 GHz** para 4, 8, 16 e 32 Bits da Porta **AND**.

Parâmetros de 20 GHz	Número de Bits			
	4 bits	8 bits	16 bits	32 bits
Max. Q- Factor	3.11642	2.79762	2.73708	2.52544
Min. BER	0.000854011	0.00173197	0.00286573	0.00479147
Eye Height	4.00132e-007	-7.68809e-007	-9.40997e-007	-1.84355e-006
Threshold	7.73109e-006	8.45504e-006	8.58913e-006	8.04645e-006
Decision Inst.	0.511719	0.546875	0.507813	0.542969
OSNR	7.05968	5.89155	5.68121	4.97468

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 6.4 – Análise dos Resultados de **40 GHz** para 4, 8, 16 e 32 Bits da Porta **AND**.

Parâmetros de 40 GHz	Número de Bits			
	4 bits	8 bits	16 bits	32 bits
Max. Q- Factor	3.25801	2.9544	2.88887	2.68178
Min. BER	0.000524223	0.00108242	0.0018036	0.00308286
Eye Height	9.41386e-007	-1.78004e-007	-4.10314e-007	-1.26977e-006
Threshold	8.53638e-006	9.17101e-006	9.35147e-006	8.75267e-006
Decision Inst.	0.515625	0.546875	0.503906	0.542969
OSNR	7.61108	6.45331	6.21552	5.49228

Fonte: Próprio Autor.

As simulações do SOA–MI mostraram que a variação do parâmetro da largura de banda do *Gaussian Optical Filter*, não variou o resultado da porta lógica na saída do sinal óptico no sistema aqui proposto, ou seja, a porta foi sempre AND, quando se variou a largura de banda de 10 a 40 GHz. Portanto, para este caso verificou-se que o resultado da porta lógica na saída do sistema é independente da largura de banda do *Gaussian Optical Filter*. As figuras 6.6, 6.7, 6.8 e 6.9 mostram os resultados do espectro óptico no domínio do tempo e do diagrama de olho para cada uma das sequencias de bits (4, 8, 16 e 32 bits), ambos com largura de banda de 40 GHz.

6.2.5.1 Os Resultados para 4 Bits da Porta Lógica AND

A Figura 6.6 (a) e (b) mostra as duas saídas do *Bit Sequence Generator* de 4 bits para as portas A e B totalmente óptica respectivamente, as quais, são simuladas a uma velocidade de operação de 10 Gb/s. O resultado apresentado na Figura 6.6 (c) é uma porta AND que foi realizada usando um SOA-MI. Já o diagrama de olho também é plotado na Figura 6.6 (d). Como mostrado na Figura 6.6, quando a sequência 0100 como sinal A e a sequência 0101 como sinal B passa para a porta AND, a sequência 0100 como sinal de saída é obtida.

Enquanto isso, as duas saídas do *Bit Sequence Generator* de 8, 16 e 32 bits para as portas A e B totalmente óptica respectivamente, os resultados da porta AND e os seus diagramas de olhos são mostrados nas Figura 6.7, Figura 6.8 e Figura 6.9. A partir dos quatros diagramas de olho, pode-se ver que o diagrama de olho na Figura 6.6 (d) mostra um olho aberto muito mais claro do que o da Figura 6.9 (d), isso ilustra que houve uma melhora na qualidade do sinal de saída e a estabilidade do esquema com base em SOA-MI.

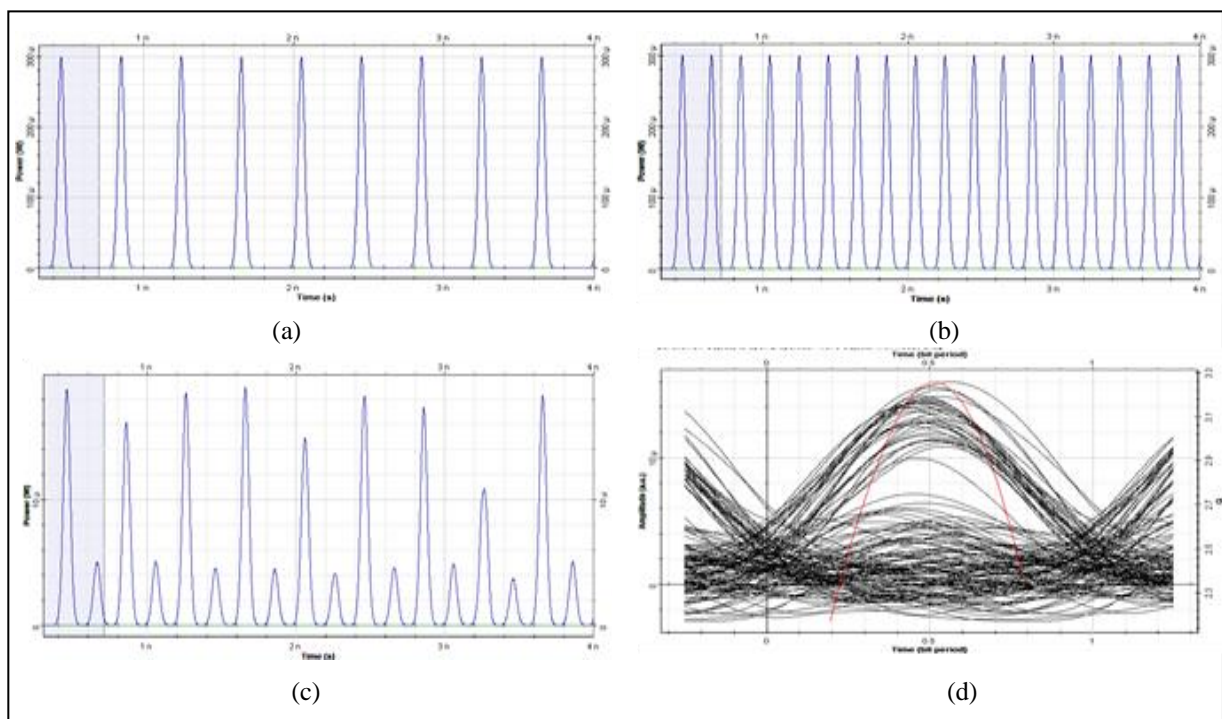


Figura 6.6 – Visualizador Óptico no Domínio do Tempo (a) Sequência de Entrada *Power A* (0100) e (b) Sequência de Entrada *Power B* (0101), (c) Saída do resultado da simulação para a Porta Lógica AND (0100); (d) Diagrama de Olho da porta AND com entrada de **4-bits** e com largura de banda do filtro de **40 GHz**.

6.2.5.2 Os Resultados para 8 Bits da Porta Lógica AND

A Figura 6.7 (a) e (b) mostra as duas saídas do *Bit Sequence Generator* de 8 bits para as portas A e B, simuladas a uma velocidade de operação de 10Gb/s. O resultado apresentado na Figura 6.7 (c) é uma porta AND que foi realizada usando um SOA-MI. Já o diagrama de olho também é plotado na Figura 6.7 (d). Para demonstração, os dados de entrada A como 01011010 e os dados B como 000110000, são considerados saída a sequência 00010000, como mostrado na Figura 6.7.

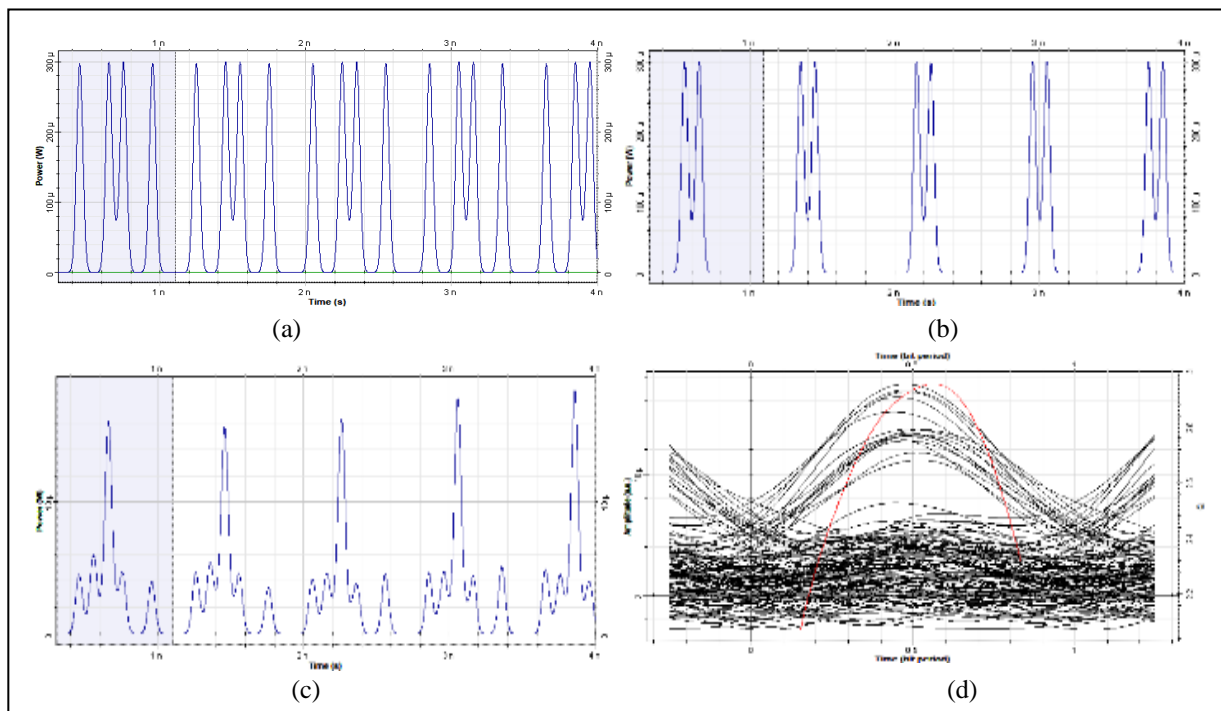


Figura 6.7 – Visualizador Óptico no Domínio do Tempo (a) Sequência de Entrada *Power A* (01011010) e (b) Sequência de Entrada *Power B* (000110000), (c) Saída do resultado da simulação para a Porta Lógica AND (00010000); (d) Diagrama de Olho da porta AND com entrada de **8-bits** e com largura de banda do filtro de **40 GHz**.

6.2.5.3 Os Resultados para 16 Bits da Porta Lógica AND

A Figura 6.8 (a) e (b) mostra as duas saídas do *Bit Sequence Generator* de 16 bits para as portas A (0100001111000011) e B (0101110111011100) com bit rate 10 Gb/s. O resultado (0100001111000000) apresentado na Figura 6.8 (c) é uma porta AND realizada usando um SOA-MI. Já o diagrama de olho também é plotado na Figura 6.8 (d).

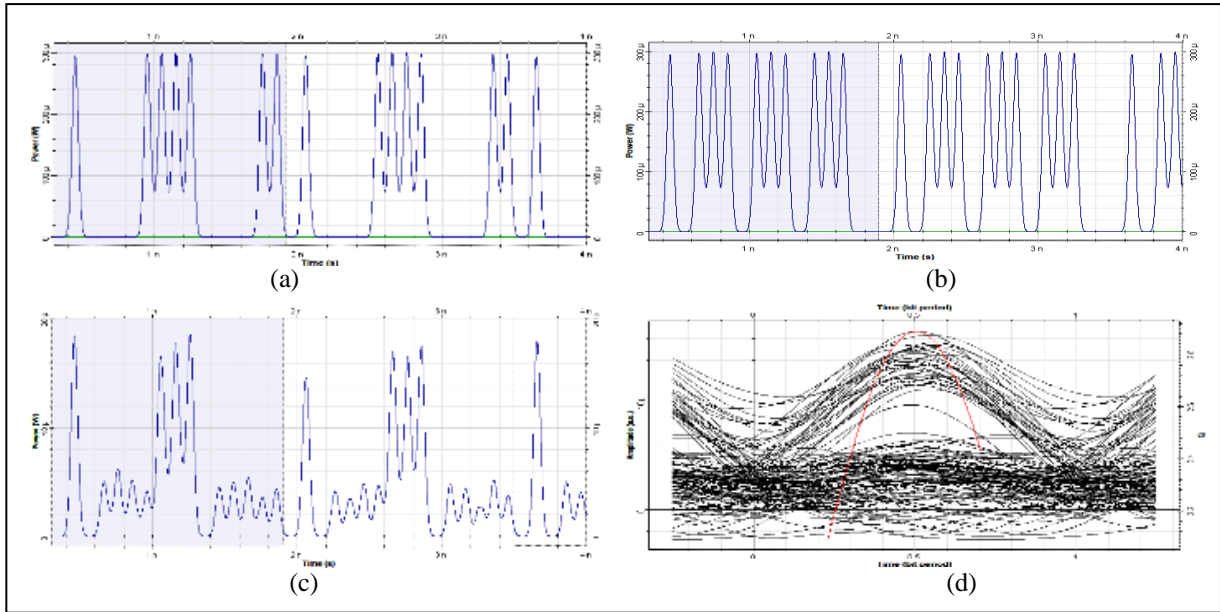


Figura 6.8 – Visualizador Óptico no Domínio do Tempo (a) Sequência de Entrada *Power A* (0100001111000011) e (b) Sequência de Entrada *Power B* (0101110111011100), (c) Saída do resultado da simulação para a Porta Lógica AND (0100000111000000); (d) Diagrama de Olho da porta AND com entrada de **16-bits** e com largura de banda do filtro de **40 GHz**.

6.2.5.4 Os Resultados para 32 Bits da Porta Lógica AND

A Figura 6.9 (a) e (b) mostra as duas saídas do Bit Sequence Generator de 32 bits para as portas A e B totalmente óptica respectivamente, as quais, são simuladas a uma velocidade de operação de 10Gb/s. O resultado apresentado na Figura 6.9 (c) é uma porta AND que foi realizada usando um SOA-MI. Já o diagrama de olho também é plotado na Figura 6.9 (d).

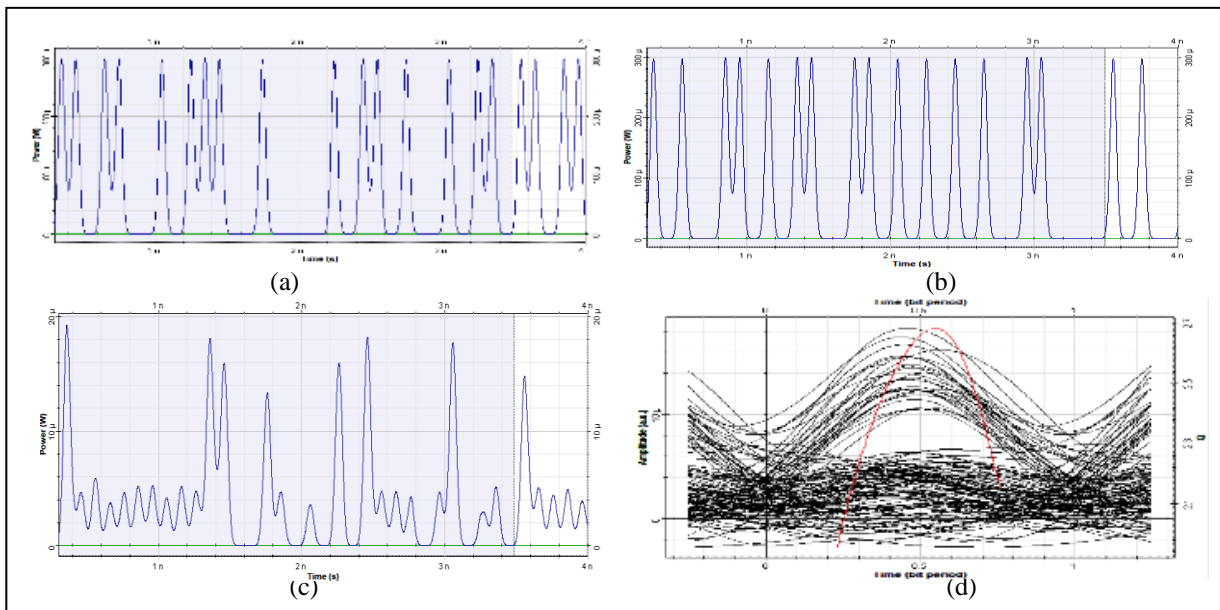


Figura 6.9 – Visualizador Óptico no Domínio do Tempo (a) Sequência de Entrada *Power A* (11011001011100100001011010010110) e (b) Sequência de Entrada *Power B* (10100110101100110101010100110000), (c) Saída do resultado da simulação para a Porta Lógica AND (10000000001100100001010000010000); (d) Diagrama de Olho da porta AND com entrada de **32-bits** e com largura de banda do filtro de **40 GHz**.

6.2.6 Conclusão

Utilizando as características de ganho não-linear da modulação de ganho cruzado (XGM) em amplificadores ópticos semicondutores (SOAs), com base em MI para o desempenho de um sistema totalmente óptico, demonstra com sucesso a simulação numérica da porta lógica AND totalmente óptica a uma taxa de bit de 10 Gb/s para diferentes larguras de banda do filtro gaussiano (10, 20 e 40 GHz) e diferentes números de bits (4, 8, 16 e 32 bits) dos sinais de entrada A e B usando o software de simulação Optisystem. O modelo proposto para a porta lógica AND é simples e compacto e pode ser útil para obter portas lógicas AND com maior número de bits de entrada, da mesma forma que executado neste trabalho. Através dos resultados, conclui-se que o dispositivo SOA-MI pode ser usado para a implementação da porta lógica AND totalmente óptica, bem como para outras portas.

6.3 PROJETO DA PORTA LÓGICA OR TOTALMENTE ÓPTICA BASEADO EM SOA-MI

Nesta seção será apresentado a porta lógica OR totalmente óptica com a mesma ideia de implementação da porta AND. A configuração da simulação no software Optisystem é mostrada da Figura 6.10 a Figura 6.12.

6.3.1 Sessão de Transmissão da Porta Lógica OR.

Nesta simulação da porta lógica OR totalmente óptica baseada no Interferômetro de Michelson [9] com Amplificador Óptico Semicondutor, mostrado no esquemático completo do sistema na Figura 6.13, o transmissor consiste em dois sinais de entrada A e B gerados a partir do gerador de sequência de bits (*User Defined Bit Sequence Generator* - UDBSG) com o gerador de pulso Gaussiano óptico (*Optical Gaussian Pulse Generator* - OGPG) no comprimento de onda 1556 nm com potência de entrada de 0,3 mW a uma taxa de transmissão de bits de 10 Gb/s, onde as duas portas são acopladas e combinadas com um laser de onda contínua (*CW Laser*) na frequência de 1550 nm com potência de entrada de 0,25 mW, através de um *Power Combiner 2x1*. Assim é analisado a eficiência do funcionamento da porta lógica OR totalmente óptica com SOA-MI com dois sinais de entradas binárias A e B (Power A e B), usando diferentes números de Bits (4, 6, 8, 16 e 32 Bits) nas simulações no Optisystem.

A Figura 6.10 mostra o transmissor utilizado para a porta lógica OR.

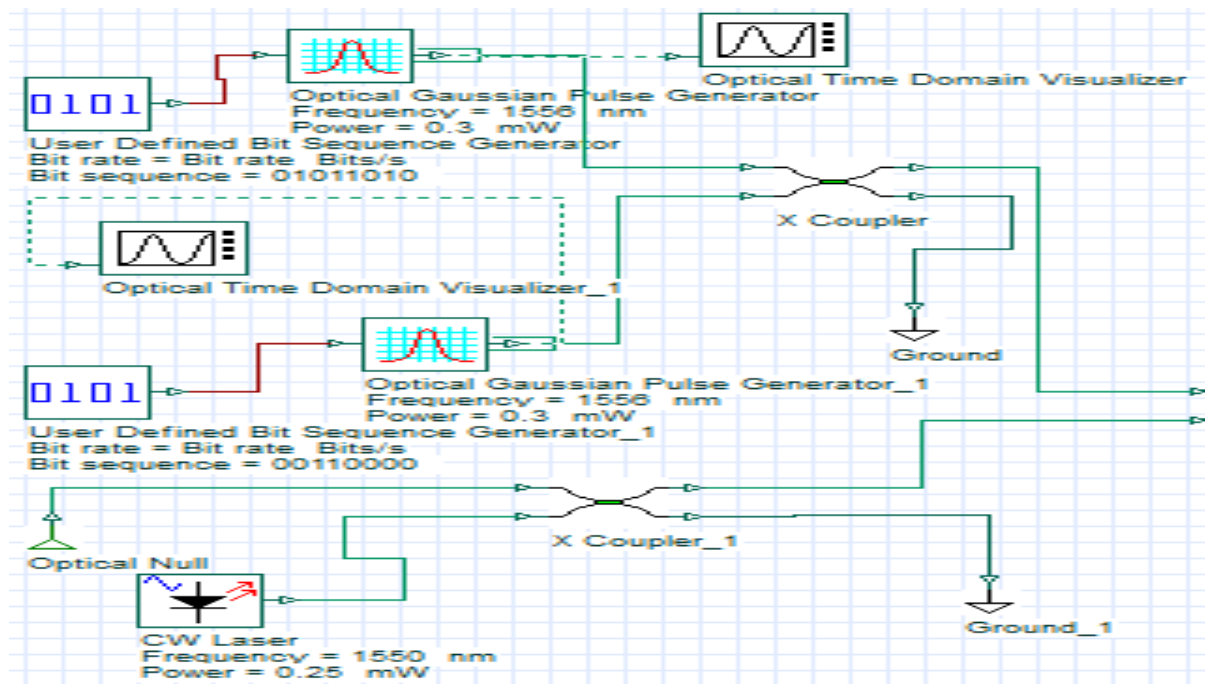


Figura 6.10 – Transmissor da Porta Lógica OR Totalmente Óptica com SOA-MI

6.3.2 Transmissão com SOA-MI para a Porta Lógica OR

A parte responsável pela transmissão é composta por um Interferômetro de Michelson com Amplificadores Ópticos Semicondutor (SOA), sendo então um SOA-MI com as configurações a seguir.

A partir do transmissor, ocorre a combinada das portas com o laser de onda contínua (*CW Laser*), através de um *Power Combiner 2x1* onde sua saída entra no *Travelling Wave SOA* com corrente de injeção de 0,15 A, que por sua vez é conectada a um *Power Splitter 1x2* com FBGs simetricamente idênticos com frequências iguais às do *CW Laser* (Figura 6.11). Para esta simulação, usamos o conceito de modulação de ganho cruzado (XGM) [10] [11], onde os sinais de saída dos FBGs são novamente acoplados através da *Pump Coupler Co-Propagating* e passa através de outro *Traveling Wave SOA* de mesma configuração que o anterior.

A Figura 6.11 mostra a sessão do SOA-MI para a porta lógica OR.

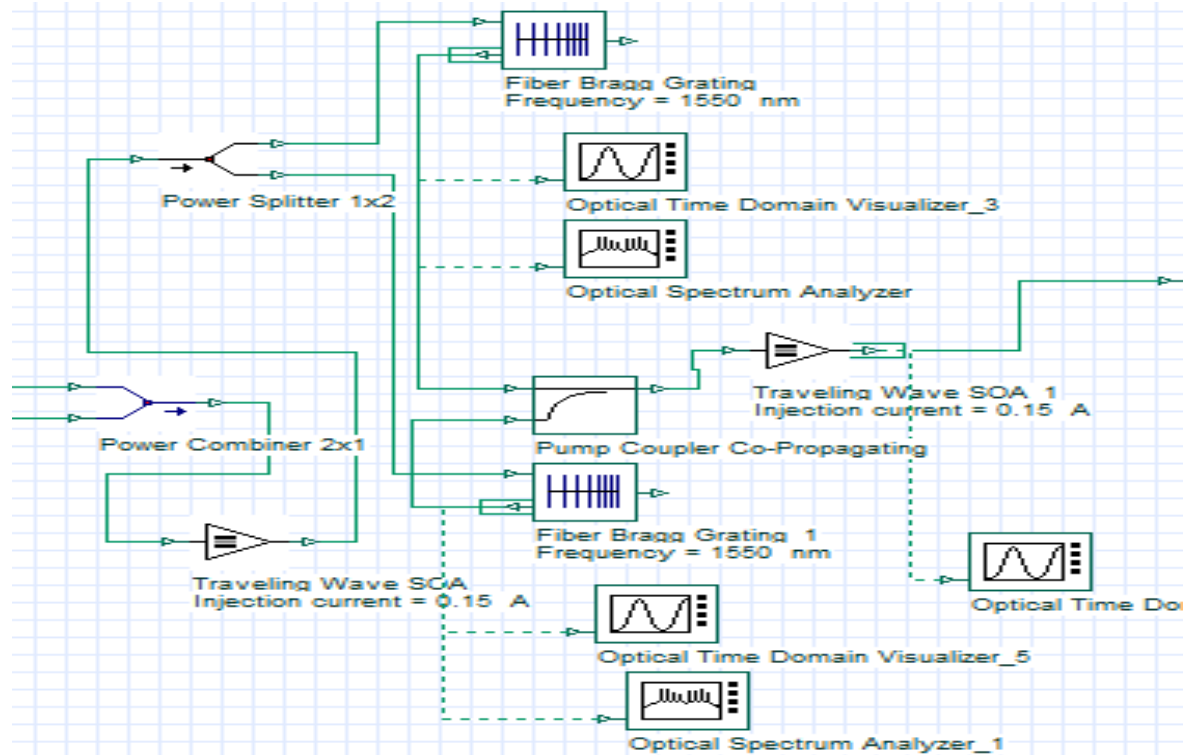


Figura 6.11 – O Amplificador Óptico Semicondutor baseado em Interferômetro de Michelson (SOA-MI) para a Porta Lógica OR.

6.3.3 Sessão de Recepção da Porta Lógica OR.

A parte final da porta lógica é mostra a Figura 6.12.

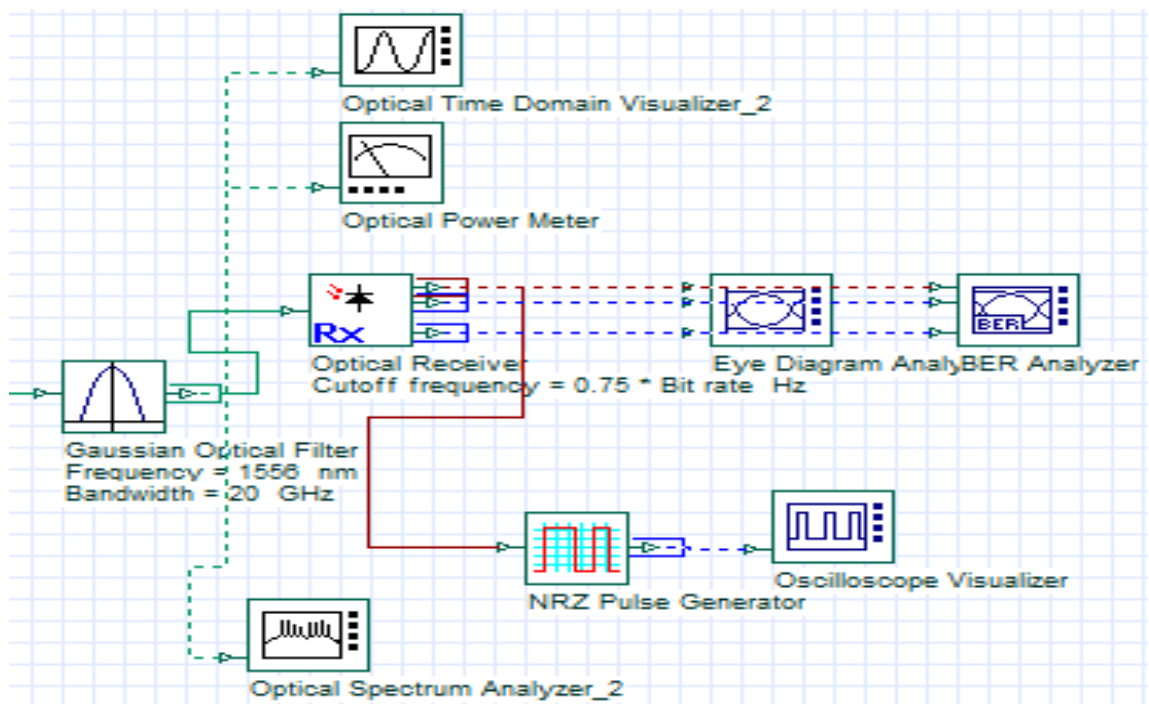


Figura 6.12 – Receptor da Porta Lógica OR Totalmente Óptica com SOA-MI.

O sinal óptico é filtrado através de um Filtro Óptico Gaussiano (*Gaussian Optical Filter*), com uma frequência de 1556 nm e 10, 20 e 40 *GHz* de largura de banda, para rejeitar interferências e componentes de ruído e depois é opticamente convertido para forma elétrica através do Receptor Óptico (*Optical Receiver*), com uma frequência de corte de $0.75 * \text{Bit rate Hz}$, e é entregue a um *NRZ Pulse Generator*. O sinal de saída OR é obtido no visualizador do *Oscilloscope Visualizer* e no visualizador *Optical Time Domain Visualizer*. O desempenho do sistema é analisado de acordo com o *Eye Diagram Analyzed* ou *BER Analyzed*.

6.3.4 Esquemático da Porta Lógica OR com SOA-MI

A Figura 6.13 mostra o diagrama esquemático completo do sistema de Porta Lógica OR Totalmente Óptica com SOA-MI proposto, que explora o efeito não linear XGM, através de um interferômetro de Michelson (*Michelson Interferometer - MI*) com Amplificador Óptico Semicondutor (SOA), o qual representa uma estrutura simples, de baixo custo e de desempenho estável. Os capítulos anteriores foram utilizados como base teórica para a criação desta porta lógica com SOA-MI.

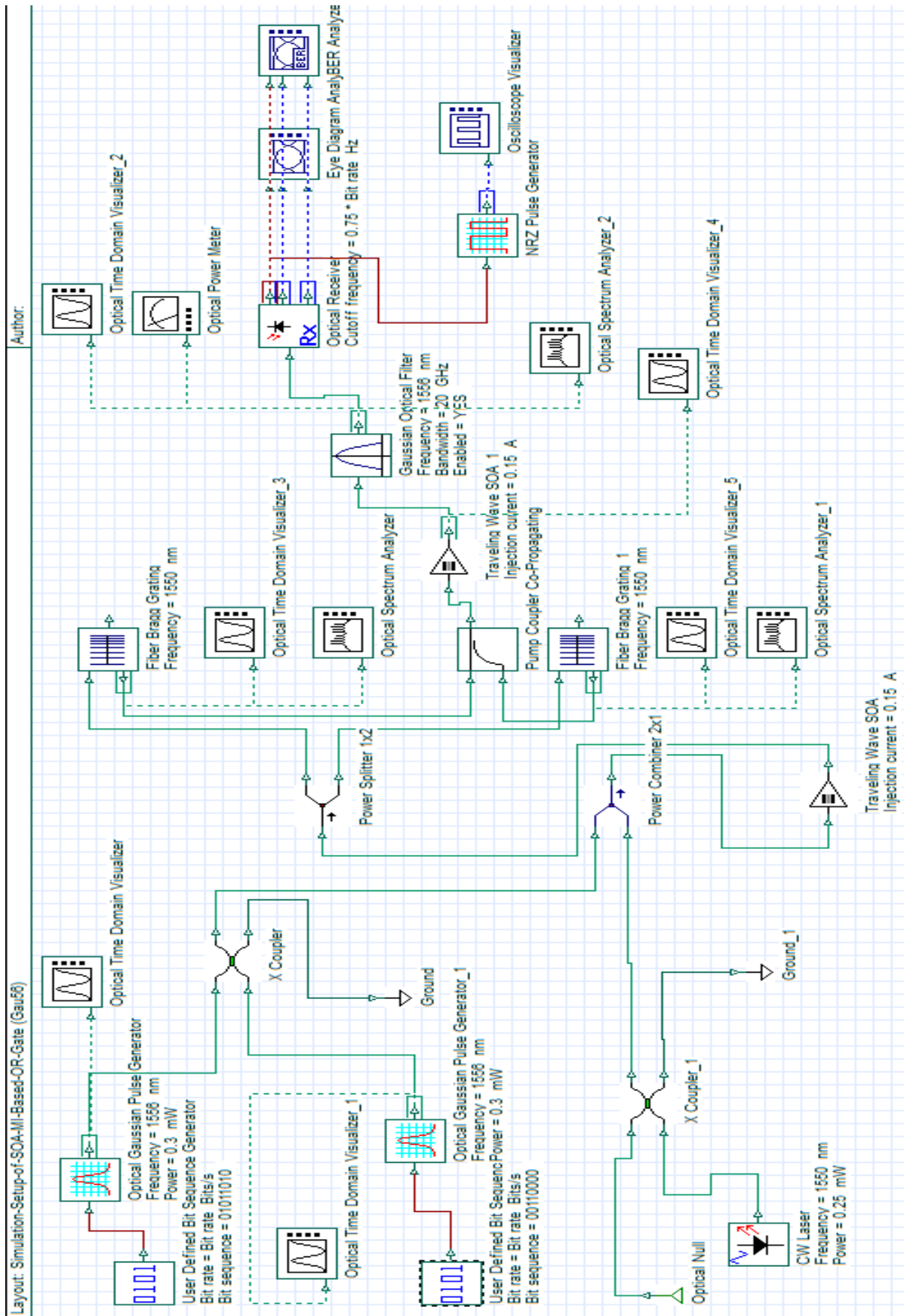


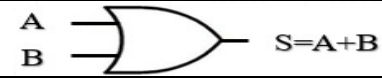
Figura 6.13 – Esquemático completo do sistema de Porta Lógica OR Totalmente Óptica com SOA-MI

6.3.5 Resultados e Discussões para a Porta Lógica OR

Para melhor visualização dos resultados as imagens foram organizadas de acordo com a quantidade de sequência de bits, neste caso de 4, 6, 8, 16 e 32 bits com largura de banda do filtro gaussiano variando de 10, 20 e 40 GHz.. Assim os gráficos de mesma categoria serão organizados um ao lado do outro para uma melhor visualização e comparação dos resultados. O analisador de taxa de erro de bit (BER), o analisador do espectro óptico, o medidor de potência e o visualizador óptico no domínio do tempo são os componentes que servirão para as medições e as análises serão feitas de acordo com suas respostas baseada em interferômetro de Michelson.

A Tabela 6.5 mostra os diferentes números de bits utilizados para os dois sinais de informação de entrada de 4, 6, 8, 16 e 32 bits e as saídas elétricas e ópticas da porta lógica OR.

Tabela 6.5 – Diferentes Números de Bits para a Porta Lógica OR.

Sinal	Número de Bits				
	4 bits	6 bits	8 bits	16 bits	32 bits
Entrada A	0110	010010	01011010	0100001111000011	11011001011100100001011010010110
Entrada B	1100	010011	00110000	0101110111011100	10100110101100110101010100110000
OR "OU"	1110	010011	01111010	0101111111011111	1111111111100110101011110110110
Símbolo da Porta Lógica OR					

Fonte: Próprio Autor.

Com o auxílio do diagrama de olho (*Eye Diagram*), o Max. Q-factor, o Min. BER, o Eye Height, o Threshold e a Decision Inst., são listados na Tabela 6.6, afim de analisar o desempenho da porta lógica OR para diferentes sinais de entrada binária nas portas A e B.

Tabela 6.6 – Análise dos Resultados de 20 GHz para 4, 6, 8, 16 e 32 Bits da Porta OR.

Parâmetros de 20 GHz	Número de Bits				
	4 bits	6 bits	8 bits	16 bits	32 bits
Max. Q- Factor	3.2473	10.7982	3.18358	3.01455	3.42886
Min. BER	0.000518259	1.7176e-027	0.000550243	0.0011977	0.000266248
Eye Height	3.94556e-006	3.25928e-005	2.87809e-006	2.78238e-007	6.93835e-006
Threshold	5.40551e-006	2.86614e-005	4.78546e-006	5.52338e-006	4.81179e-006
Decision Inst.	0.652344	0.21875	0.585938	0.542969	0.523438
OSNR	7.56867	65.93604	7.31872	6.67536	8.30311

Fonte: Próprio Autor.

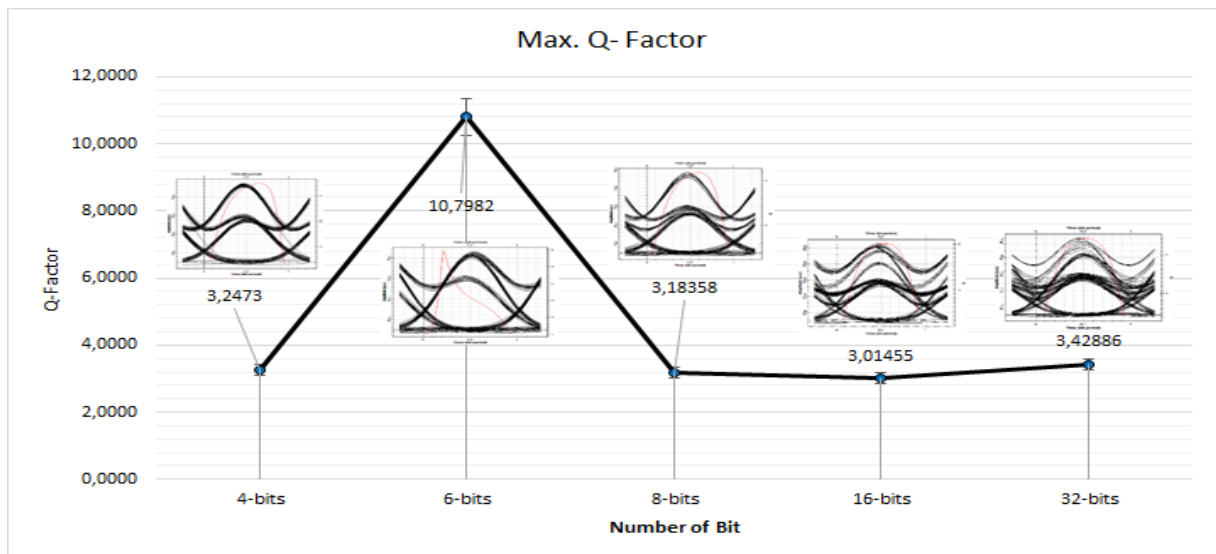


Figura 6.14 – Resultados do Max. Q-Factor da Porta Lógica **OR** Totalmente Óptica com SOA-MI

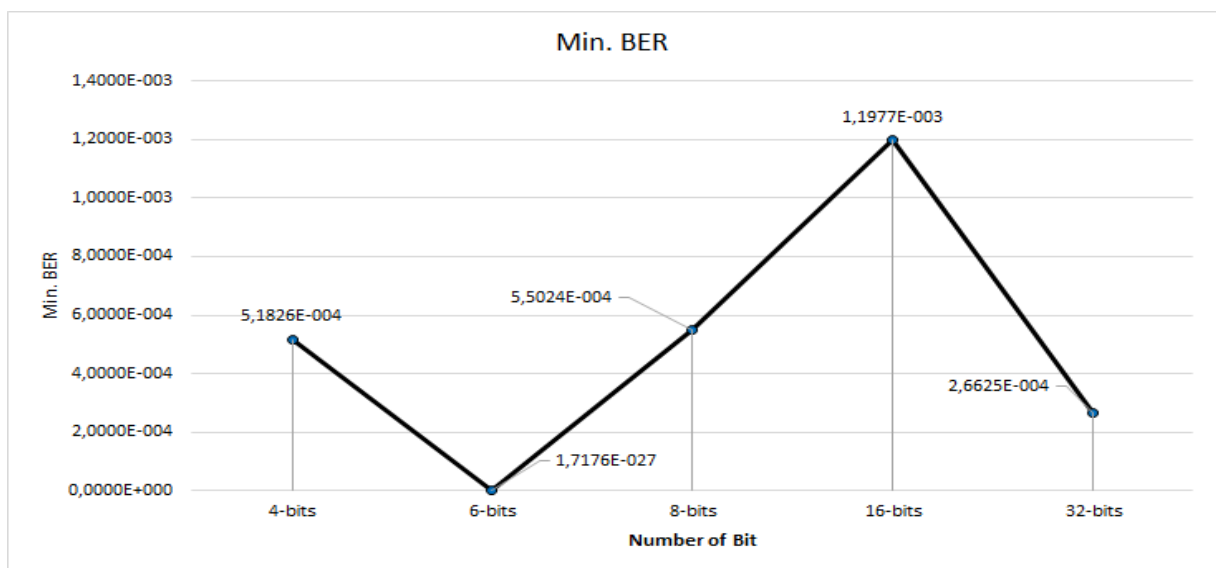


Figura 6.15 – Resultados do Min. BER da Porta Lógica **OR** Totalmente Óptica com SOA-MI

6.3.5.1 Os Resultados para 4 Bits da Porta Lógica **OR**

A saída da porta lógica OR quando se usam sinais de entradas de dados binários de 4 bits é mostrada na Figura 6.16 (a). A sequência de bits (0110) corresponde a porta de entrada A e segunda sequência de bits (1100) corresponde a porta de entrada B, assim o resultado do sinal na porta de saída S corresponde a sequência de bits (1110) para a porta OR. O Diagrama de Olho (*Eye Diagram*) e o Fator de Qualidade (*Q-Factor*) também é apresentado na Figura

6.16 (b). Vale destacar que o *Max. Q-Factor* é igual a 3.2473, o *Min. BER* é igual 0.000518259 e a altura do olho (*Eye height*) de 3.94556e-006.

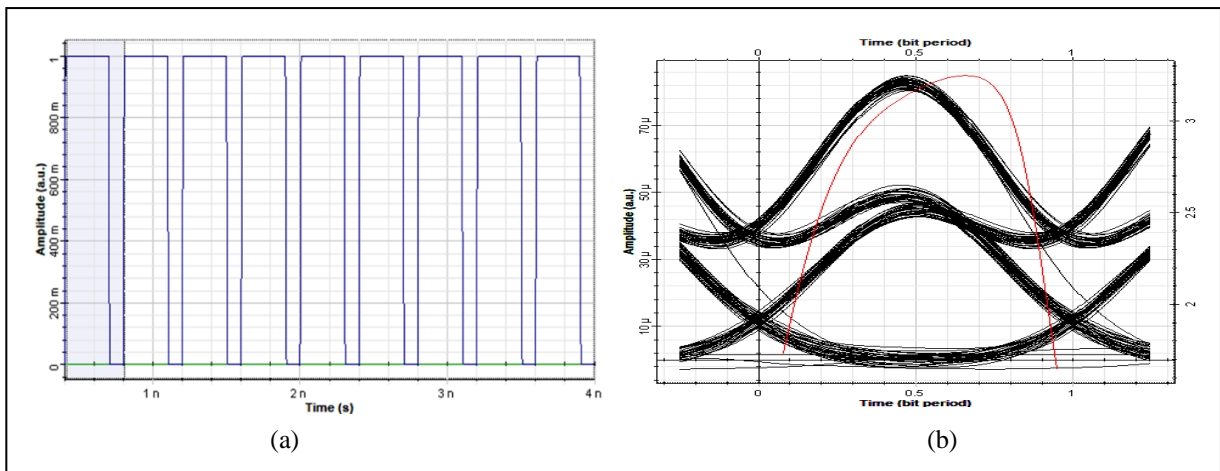


Figura 6.16 – (a) Primeira sequência de entrada (0110) e segunda sequência de entrada (1100), resultado do sinal para porta OR (1110); b) Diagrama de Olho e Máximo Fator de Qualidade da porta **OR** com entrada de **4-bits**

6.3.5.2 Os Resultados para 6 Bits da Porta Lógica OR

A saída da porta OR quando se usam sinais de entradas de dados binários de 6 bits é mostrada na Figura 6.17 (a). A sequência de bits (010010) corresponde a porta de entrada A e segunda sequência de bits (010011) corresponde a porta de entrada B, assim o resultado do sinal na porta de saída S corresponde a sequência de bits (010011) para porta OR. O Diagrama de Olho (*Eye Diagram*) e o Fator de Qualidade (*Q-Factor*) da porta OR também é apresentado na Figura 6.17 (b). Vale destacar que o *Max. Q-Factor* é igual a 10.7982, o *Min. BER* é igual 1.7176e-027 e a altura do olho (*Eye height*) é de 3.25928e-005.

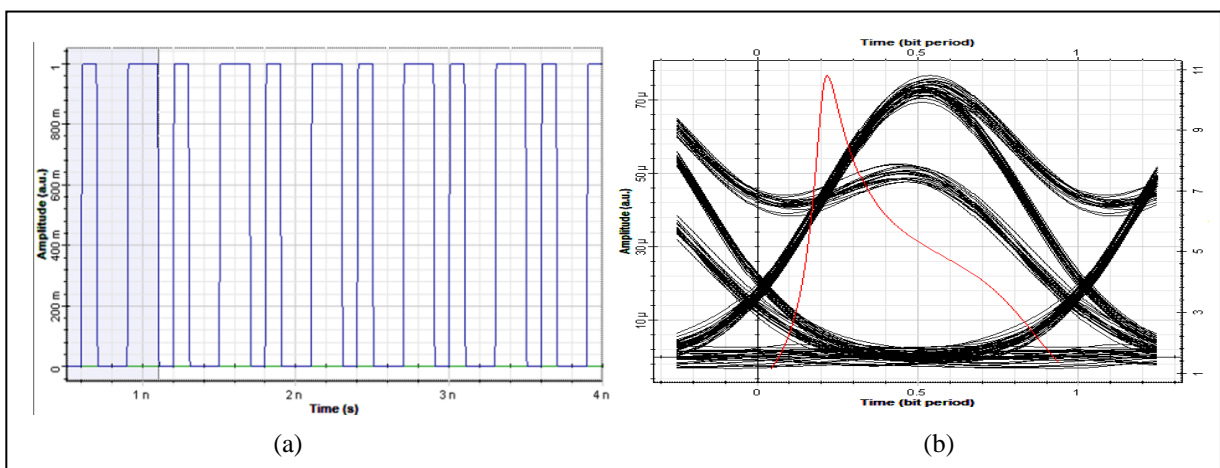


Figura 6.17 – (a) Primeira sequência de entrada (010010) e segunda sequência de entrada (010011), resultado do sinal para porta OR (010011); b) Diagrama de Olho e Máximo Fator de Qualidade da porta **OR** com entrada de **6-bits**

6.3.5.3 Os Resultados para 8 Bits da Porta Lógica OR

A saída da porta OR quando se usam sinais de entradas de dados binários de 8 bits é mostrada na Figura 6.18 (a). A sequência de bits (01011010) corresponde a porta de entrada A e segunda sequência de bits (00110000) corresponde a porta de entrada B, assim o resultado do sinal na porta de saída S corresponde a sequência de bits (01111010) para porta OR. O Diagrama de Olho (*Eye Diagram*) e o Fator de Qualidade (*Q-Factor*) da porta OR também é apresentado na Figura 6.18 (b). Vale destacar que o *Max. Q-Factor* é igual a 3.18358, o *Min. BER* é igual 0.000550243 e a altura do olho (*Eye height*) é de 2.87809e-006.

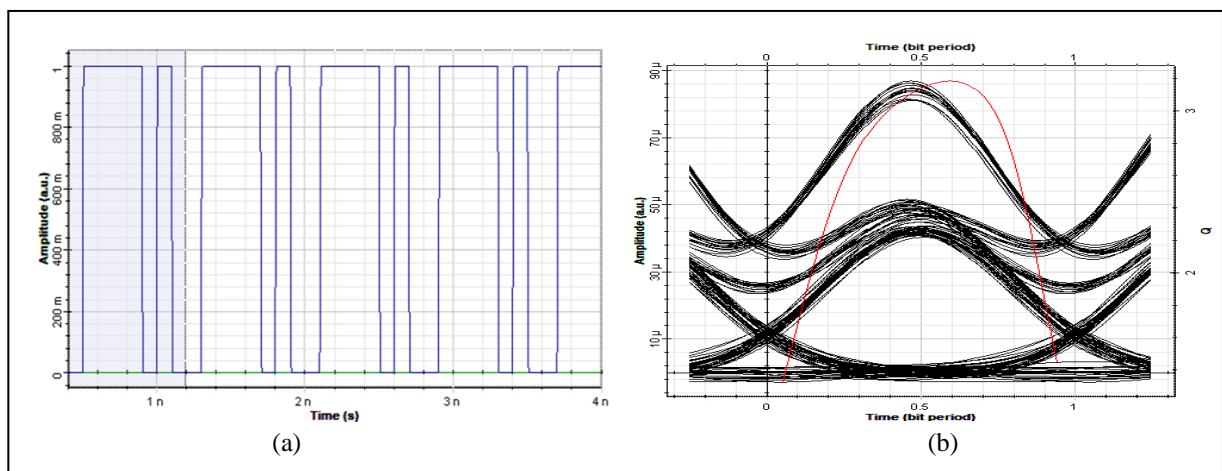


Figura 6.18 – (a) Primeira sequência de entrada (01011010) e segunda sequência de entrada (00110000), resultado do sinal para porta OR (01111010); b) Diagrama de Olho e Máximo Fator de Qualidade da porta **OR** com entrada de **8-bits**

6.3.5.4 Os Resultados para 16 Bits da Porta Lógica OR

A saída da porta OR usando sinais de entrada de 16 bits é mostrada na Figura 6.19 (a) com sequência (0100001111000011) para a entrada A e a sequência (0101110111011100) para a entrada B, e então a saída S corresponde à sequência (0101111111011111) mostrado no Domínio Óptico do Tempo (*Optical Time Domain*). O Diagrama de Olho (*Eye Diagram*) e o *Max. Q-Factor* da porta OR também são mostrados na Figura 6.19 (b).

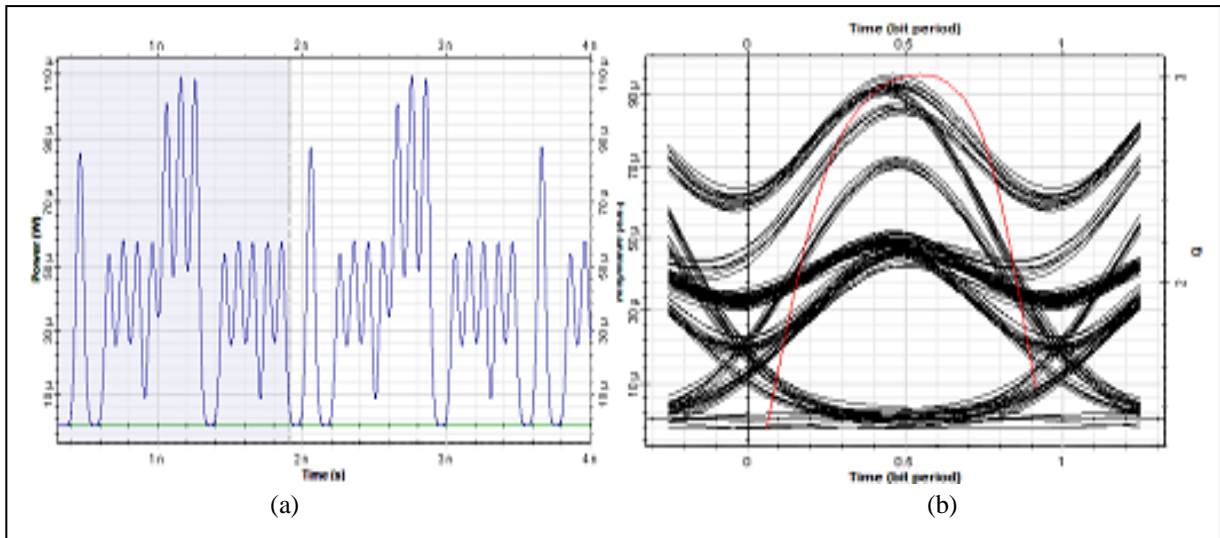


Figura 6.19 – (a) Primeira seqüência de entrada (0100001111000011) e segunda seqüência de entrada (0101110111011100), resultado do sinal para porta OR (010111111011111); b) Diagrama de Olho e Máximo Fator de Qualidade da porta **OR** com entrada de **16-bits**

6.3.5.5 Os Resultados para 32 Bits da Porta Lógica OR

A saída da porta OR usando sinais de entrada de 32 bits é mostrada na Figura 6.20 (a), em (*Optical Time Domain*). O Diagrama de Olho (*Eye Diagram*) e o *Max. Q-Fator* da porta OR também são mostrados na Figura 6.20 (b).

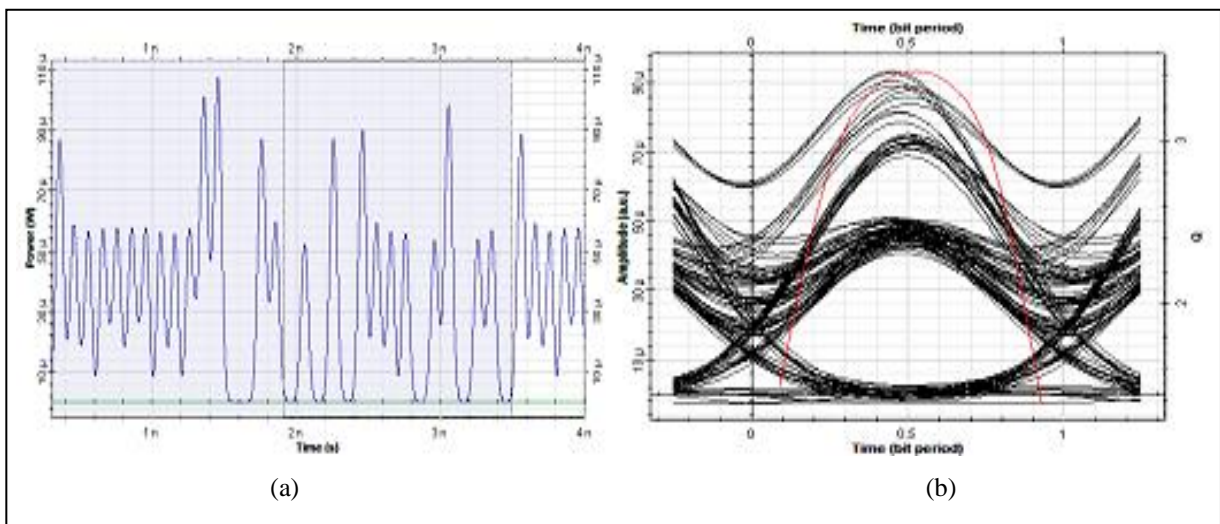


Figura 6.20 – (a) Primeira seqüência de entrada (11011001011100100001011010010110) e segunda seqüência de entrada (10100110101100110101010100110000), resultado do sinal para porta OR (1111111111100110101011110110110); b) Diagrama de Olho e Máximo Fator de Qualidade da porta **OR** com entrada de **32-bits**

6.3.6 Conclusão

A investigação neste trabalho mostrou a eficácia do uso de SOAs com base em MI para o desempenho de um sistema totalmente óptico. O modelo proposto para a porta lógica é simples e compacto, utilizou diferentes números de bits (4, 6, 8, 16 e 32) dos sinais de entrada A e B, em que executou a operação de função booleana OR a uma taxa de bit de 10 Gb/s. Os resultados demonstraram que o dispositivo pode ser configurado para a porta lógica OR totalmente óptica, bem como para outras portas lógicas com implementação do SOA-MI. Podendo ser útil para obter portas lógicas com maior número de bits de entrada, da mesma forma que executado neste trabalho.

6.4 PROJETO DA PORTA LÓGICA NOR TOTALMENTE ÓPTICA BASEADO EM SOA-MI

O esquema da porta lógica NOR totalmente óptica simulada no Optisystem, baseado em características de efeitos não lineares na Modulação de Ganho Cruzado (XGM) com tecnologia SOA-MI é mostrado na Figura 6.24, no qual utilizou *CW Laser* no transmissor e filtro óptico no receptor. O esquema é uma versão que inclui um SOA-MI com FBG nas saídas de seus braços.

O modelo está dividido em três partes: a primeira é a transmissão, a segunda é o canal de transmissão que é o SOA-MI e a terceira é o receptor do sinal com o filtro gaussiano. Para que seja melhor visualizada a evolução do processo, as partes estão separadas em seções. A configuração da simulação no software Optisystem é mostrada da Figura 6.21 a Figura 6.23.

6.4.1 Sessão de Transmissão da Porta Lógica NOR.

Na porta lógica NOR totalmente óptica baseada no Interferômetro de Michelson [9] com Amplificador Óptico Semicondutor, o transmissor consiste em dois sinais de entrada A e B gerador de sequência de bits (*User Defined Bit Sequence Generator* - UDBSG) com o gerador de pulso Gaussiano óptico (*Optical Gaussian Pulse Generator* - OGPG) na frequência de 1556 nm e potência de entrada de 0,3 mW a uma taxa de transmissão de bits de 10 Gb/s, ambos acoplados e então combinados com o *CW Laser* na frequência de 1550 nm e potência de entrada de 0,25 mW através do *Power Combiner 2x1*. Assim é analisado a eficiência do funcionamento

da porta lógica NOR totalmente óptica com SOA-MI com dois sinais de entradas binárias A e B (Power A e B), usando diferentes números de Bits (4, 8, 16 e 32 Bits) nas simulações no Optisystem.

A Figura 6.21 mostra o transmissor utilizado na porta lógica NOR.

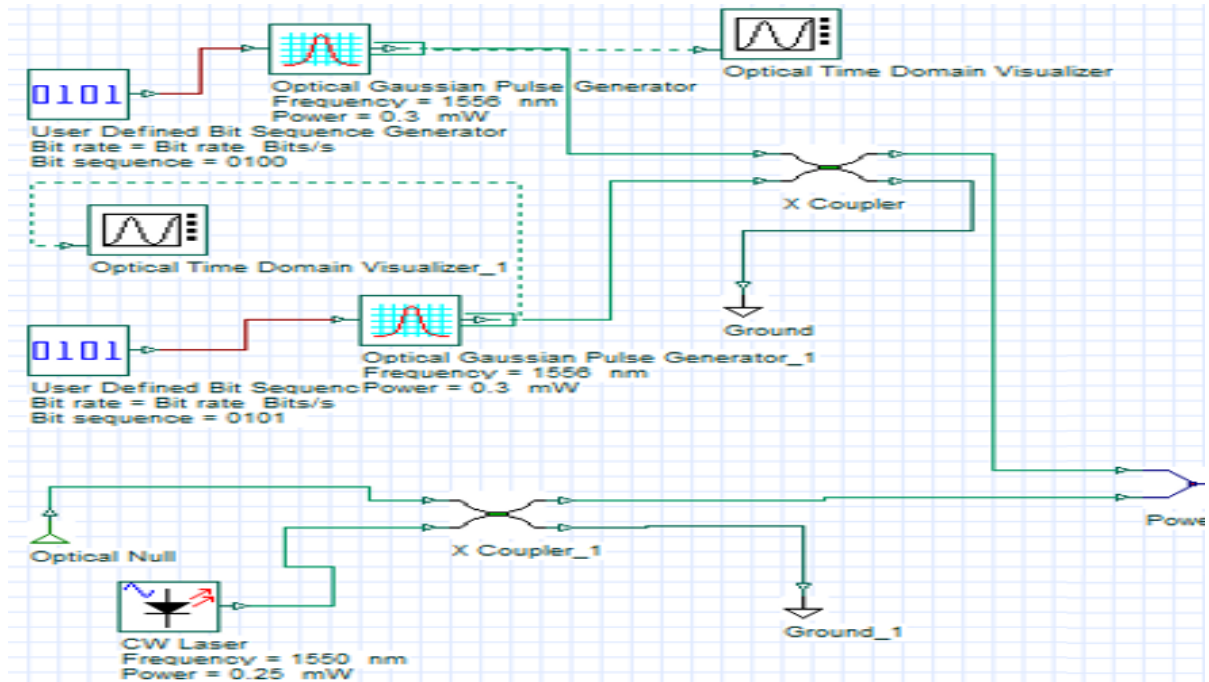


Figura 6.21 – Transmissor da Porta Lógica NOR Totalmente Óptica com SOA-MI

6.4.2 Transmissão com SOA-MI para a Porta Lógica NOR

A parte responsável pela transmissão é composta por um Interferômetro de Michelson com Amplificadores Ópticos Semicondutor (SOA), sendo então um SOA-MI com as configurações a seguir.

A partir do transmissor, ocorre a combinação das portas com o laser de onda contínua (CW Laser), através de um *Power Combiner 2x1* onde sua saída entra no *Travelling Wave SOA* com corrente de injeção de 0,15 A, que por sua vez é conectada a um *Power Splitter 1x2* com FBGs simetricamente idênticos com frequências iguais às do CW Laser (Figura 6.22). Para esta simulação, usamos o conceito de modulação de ganho cruzado (XGM) [10] [11], onde os sinais de saída dos FBGs são novamente acoplados através da *Pump Coupler Co-Propagating* e passa através de outro *Traveling Wave SOA* de mesma configuração que o anterior.

A Figura 6.22 mostra a sessão do SOA-MI para a porta lógica NOR.

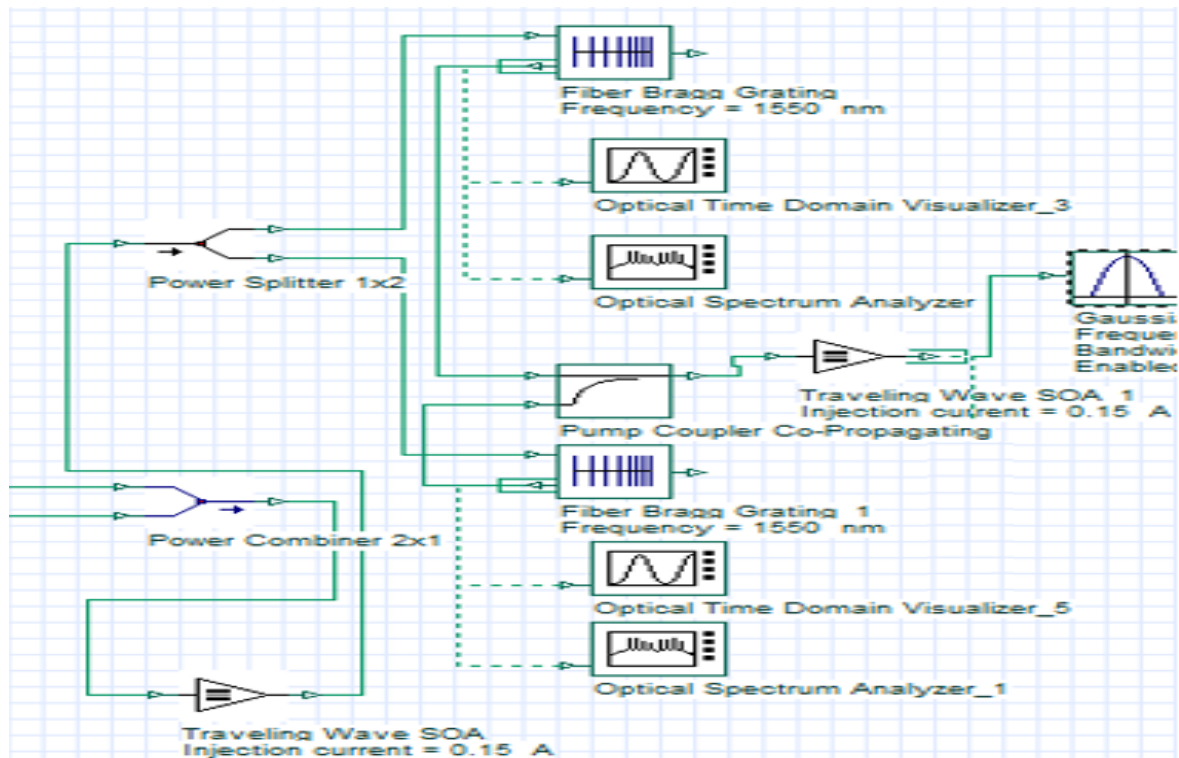


Figura 6.22 – O Amplificador Óptico Semicondutor baseado em Interferômetro de Michelson (SOA-MI) para a Porta Lógica NOR.

6.4.3 Sessão de Recepção da Porta Lógica NOR.

O sinal óptico é filtrado através de um Filtro Óptico Gaussiano (*Gaussian Optical Filter*), com uma frequência de 1550 nm e 10, 20 e 40 GHz de largura de banda, para rejeitar interferências e componentes de ruído e depois é opticamente convertido para forma elétrica através do Receptor Óptico (*Optical Receiver*), com uma frequência de corte de $0.75 * \text{Bit rate Hz}$, e é entregue a um *NRZ Pulse Generator*. O sinal de saída OR é obtido no visualizador do *Oscilloscope Visualizer*. O desempenho do sistema é analisado de acordo com o *Eye Diagram Analyzed* ou *BER Analyzed*. A parte final da porta lógica é mostra a Figura 6.23.

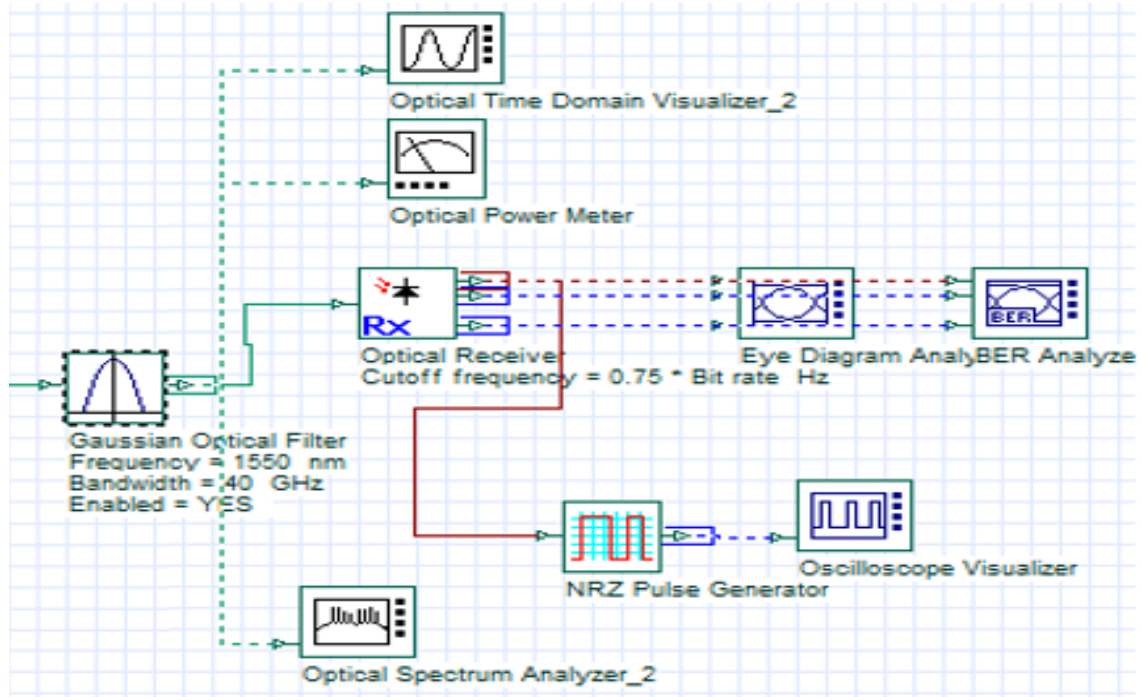


Figura 6.23 – Receptor da Porta Lógica NOR Totalmente Óptica com SOA-MI.

6.4.4 Esquemático da Porta Lógica NOR com SOA-MI

A Figura 6.24 mostra o diagrama esquemático completo do sistema de Porta Lógica NOR Totalmente Óptica com SOA-MI proposto, que explora o efeito não linear XGM, através de um interferômetro de Michelson (*Michelson Interferometer* - MI) com Amplificador Óptico Semicondutor (SOA), o qual representa uma estrutura simples, de baixo custo e de desempenho estável. Os capítulos anteriores foram utilizados como base teórica para a criação desta porta lógica com SOA-MI.

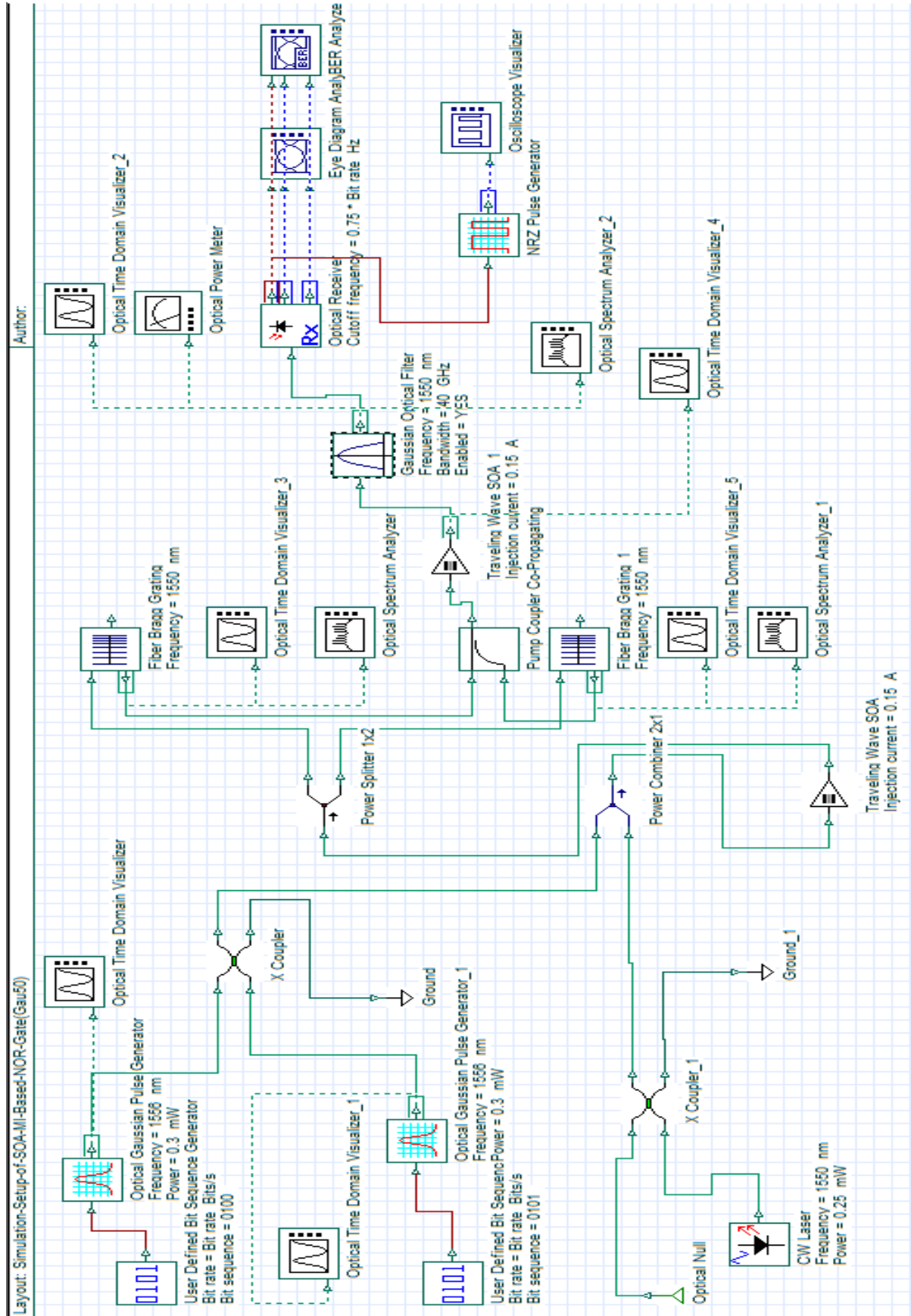


Figura 6.24 – Esquemático completo do sistema de Porta Lógica NOR Totalmente Óptica com SOA-MI

6.4.5 Resultados e Disciões para a Porta Lógica NOR

Para melhor visualização dos resultados as imagens foram organizadas de acordo com a quantidade de sequência de bits, neste caso de 4, 8, 16 e 32 bits com largura de banda do filtro gaussiano variando de 10, 20 e 40 GHz. Assim os gráficos de mesma categoria serão organizados um do lado do outro para uma melhor visualização e comparação dos resultados. O analisador de taxa de erro de bit (BER), o analisador do espectro óptico, o medidor de potência e o visualizador óptico no domínio do tempo são os componentes que servirão para as medições e as análises serão feitas de acordo com suas respostas baseada em interferômetro de Michelson.

As Tabelas 6.7 a 6.9 mostram o Max. Q-factor, Mín. BER e OSNR da porta NOR para diferentes entradas de bit e largura de banda de filtro de 10 a 40 GHz, com taxa de bits de 10 Gb/s. A Tabela 6.10 mostra os diferentes números de bits utilizados para os dois sinais de informação de entrada de 4, 8, 16 e 32 bits e suas respectivas saídas da porta lógica NOR.

Tabela 6.7 – Análise dos Resultados de **10 GHz** para 4, 8, 16 e 32 Bits da Porta **NOR**.

Parâmetros de 10 GHz	Número de Bits			
	4 bits	8 bits	16 bits	32 bits
Max. Q- Factor	3.02524	2.77484	2.33527	1.89117
Min. BER	0.000797311	0.00273571	0.00969167	0.0286033
Eye Height	0.000303109	-0.00179972	-0.00758431	-0.0150702
Threshold	0.131874	0.128013	0.131926	0.131954
Decision Inst.	0.402344	0.335938	0.464844	0.460938
OSNR	6.71521	5.81198	4.37803	3.12552

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 6.8 – Análise dos Resultados de **20 GHz** para 4, 8, 16 e 32 Bits da Porta **NOR**.

Parâmetros de 20 GHz	Número de Bits			
	4 bits	8 bits	16 bits	32 bits
Max. Q- Factor	3.399	2.51273	2.68967	2.07073
Min. BER	0.000285785	0.00598932	0.00337533	0.0191882
Eye Height	0.00495958	-0.0034628	-0.00371228	-0.0117468
Threshold	0.131037	0.129488	0.132705	0.133277
Decision Inst.	0.488281	0.210938	0.542969	0.527344
OSNR	8.18006	4.93367	5.51905	3.60819


Fonte: Próprio Autor.

Tabela 6.9 – Análise dos Resultados de **40 GHz** para 4, 8, 16 e 32 Bits da Porta **NOR**.

Parâmetros de 40 GHz	Número de Bits			
	4 bits	8 bits	16 bits	32 bits
Max. Q- Factor	3.55147	0	2.80582	2.13576
Min. BER	0.000169655	1	0.00231458	0.0162745
Eye Height	0.00646774	0	-0.00220129	-0.0123193
Threshold	0.130336	0	0.132301	0.132798
Decision Inst.	0.554688	0	0.59375	0.597656
OSNR	8.81774	0	5.92033	3.79095

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 6.10 – Diferentes Números de Bits para a Porta Lógica **NOR**.

Sinal	Número de Bits			
	4 bits	8 bits	16 bits	32 bits
Entrada A	0100	01011010	0100001111000011	11011001011100100001011010010110
Entrada B	0101	00110000	0101110111011100	10100110101100110101010100110000
NOR “NÃO OU”	1010	10000101	1010000000100000	00000000000011001010100001001001
Símbolo da Porta Lógica NOR				

Fonte: Próprio Autor.

6.4.5.1 Os Resultados para 4 Bits da Porta Lógica NOR

A Figura 6.25 mostra os resultados do Osciloscópio (*Oscilloscope Visualizer*) para a sequência de 4 bits de 40 GHz de largura de banda do filtro, uma vez que apresentou os melhores resultados para o fator-Q e mínimo BER entre as simulações. Observou-se que a variação da largura de banda do filtro não alterou o resultado da porta lógica na saída do sinal óptico.

O resultado (1010) mostrado na Figura 6.25 é uma porta NOR realizada usando um SOA-MI, de 4 bits para as portas A (0100) e B (0101) com taxa de bits de 10 Gb/s.

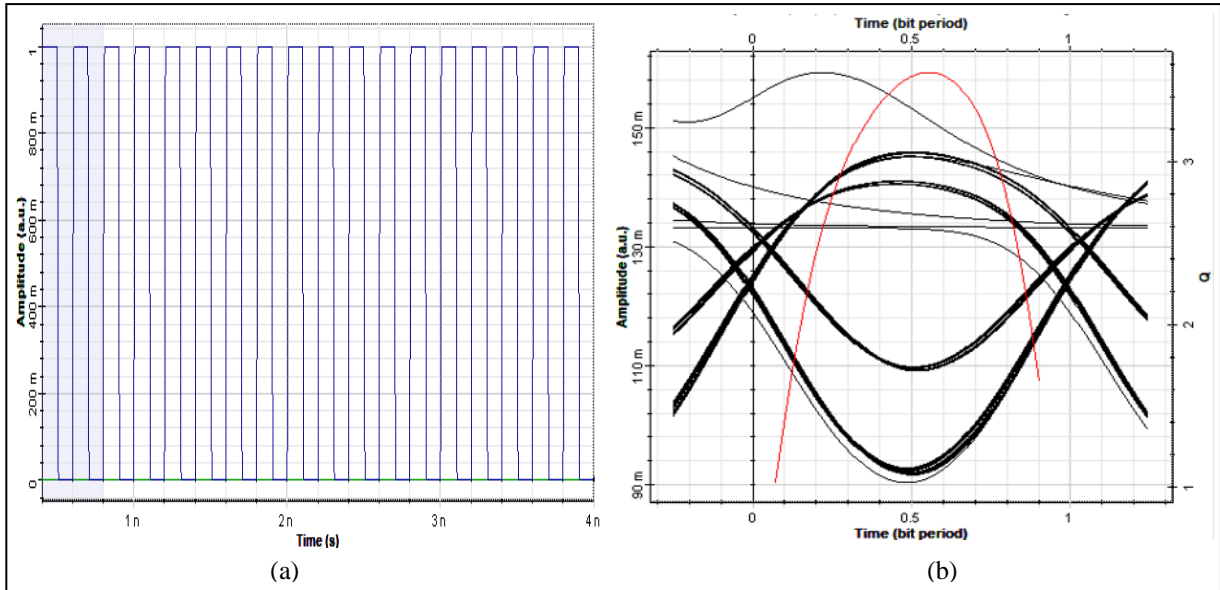


Figura 6.25 – (a) Primeira sequência de entrada (0100) e segunda sequência de entrada (0101), Saída de sinal do resultado simulado na porta lógica NOR (1010) de 4 bits para 40 GHz de largura de banda do filtro; b) Diagrama de Olho e Máximo Fator de Qualidade da porta NOR com entrada de 4-bits para 40 GHz

6.4.5.2 Os Resultados para 8 Bits da Porta Lógica NOR

Para a sequência de 8 bits, não obtive resultado no *Oscilloscope Visualizer*, e somente no *Optical Time Domain Visualizer* como mostrado na Figura 6.26 que apresenta o resultado da sequência de 8 bits (10000101), tendo como entradas A (01011010) e B (00110000), com taxa de bits de 10 Gb/s e de 40 GHz de largura de banda do filtro.

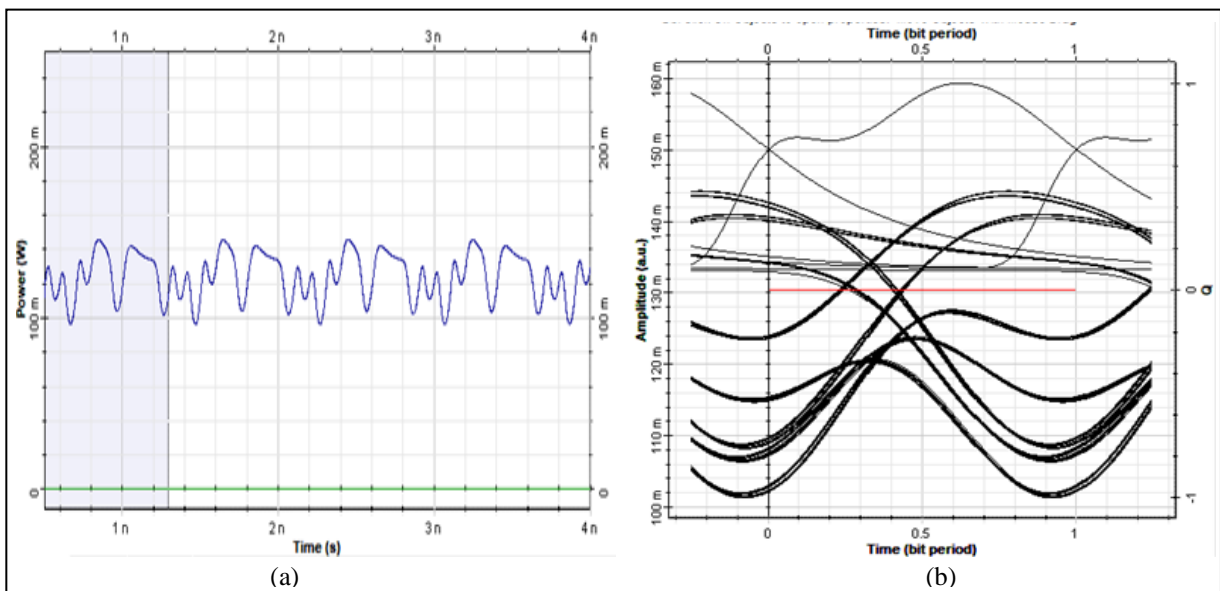


Figura 6.26 – (a) Primeira sequência de entrada (01011010) e segunda sequência de entrada (00110000), Saída de sinal do resultado simulado na porta lógica NOR (10000101) de 8 bits para 40 GHz de largura de banda do filtro; b) Diagrama de Olho e Máximo Fator de Qualidade da porta NOR com entrada de 8-bits para 40 GHz

6.4.5.3 Os Resultados para 16 Bits da Porta Lógica NOR

A Figura 6.27 apresenta o resultado da sequência de 16 bits (0100001111000011), tendo como entradas A (0101110111011100) e B (1010000000100000), com taxa de bits de 10 Gb/s e de 40 GHz de largura de banda do filtro.

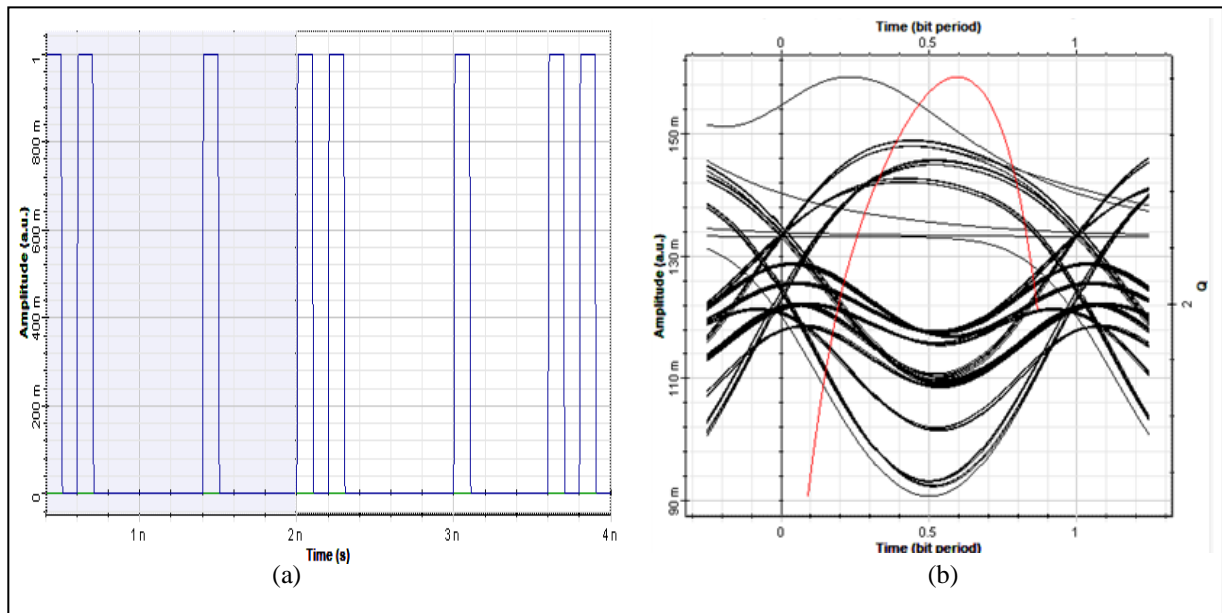


Figura 6.27 – (a) Primeira sequência de entrada (0101110111011100) e segunda sequência de entrada (1010000000100000), Saída de sinal do resultado simulado na porta lógica NOR (0100001111000011) de 16 bits para 40 GHz de largura de banda do filtro; b) Diagrama de Olho e Máximo Fator de Qualidade da porta NOR com entrada de 16-bits para 40 GHz

6.4.5.4 Os Resultados para 32 Bits da Porta Lógica NOR

A Figura 6.28 apresenta o resultado da sequência de 32 bits (00000000000011001010100001001001), tendo como entradas A (11011001011100100001011010010110) e B (10100110101100110101010100110000), com taxa de bits de 10 Gb/s e de 40 GHz de largura de banda do filtro.

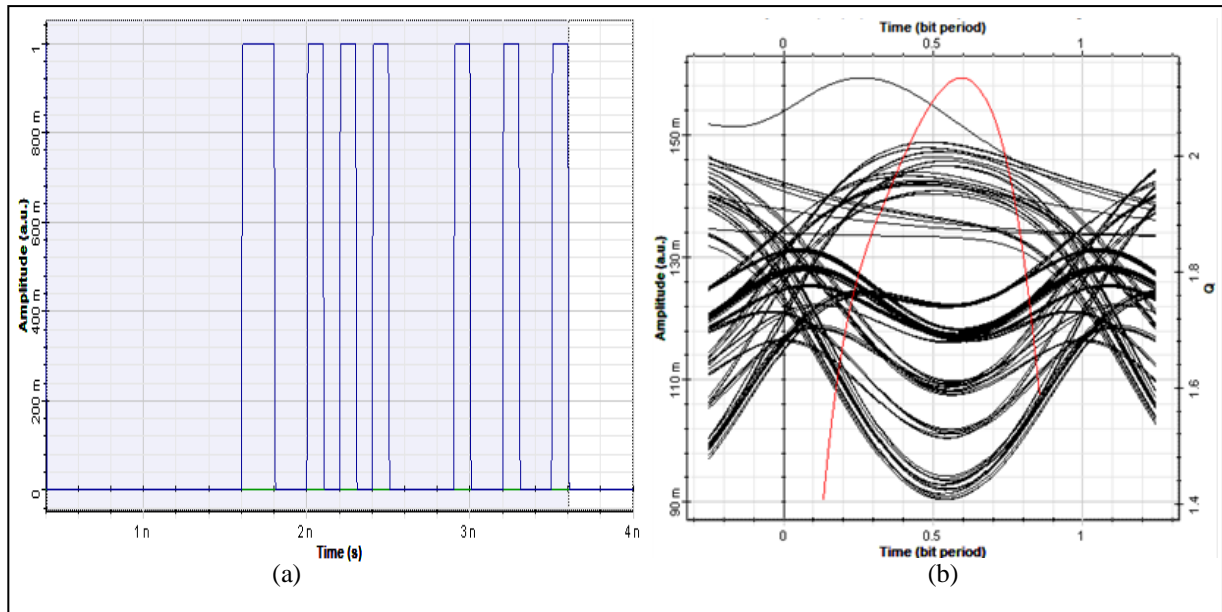


Figura 6.28 – (a) Primeira sequência de entrada (11011001011100100001011010010110) e segunda sequência de entrada (10100110101100110101010100110000), Saída de sinal do resultado simulado na porta lógica NOR (00000000000011001010100001001001) de 32 bits para 40 GHz de largura de banda do filtro; b) Diagrama de Olho e Máximo Fator de Qualidade da porta **NOR** com entrada de **32-bits** para **40 GHz**

6.4.6 Conclusão

Os resultados mostraram a eficiência do uso do SOAs baseadas em MI para a implementação da porta lógica NOR totalmente óptica de forma simples e compacta, utilizando diferentes números de bits (4, 8, 16 e 32) dos sinais de entrada A e B e largura de banda do filtro de 10 a 40 GHz a uma taxa de bits de 10 Gb/s.

6.5 REFERÊNCIAS

- [1] Optiwave Systems Inc. Products Optisystem. Disponível em: <<https://optiwave.com/optisystem-overview/>>. Acesso em: 01/06/2018
- [2] TELECO. Redes Ópticas Passivas II: O Software Optisystem. Disponível em: <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialropassiva2/pagina_2.asp>. Acesso em: 01/01/2017.
- [3] Tutorial Optisystem. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/111352113/Tutorial-OptiSystem>>. Acesso em: 01/06/2018
- [4] Optiwave Systems Inc. Optisystem 15.0. Disponível em: <<https://optiwave.com/resources/latest-news/optisystem-15-0-new-version/>>. Acesso em: 01/06/2018

- [5] AGRAWAL, G.P. Fiber-optic communication systems. 3rd. edition Wiley Sons - Interscience, New York, 2002.
- [6] Li, Wenbo. "High speed all optical switching and encryption using ultrafast devices." (2015).
- [7] OptiSystem Manuals. Disponível em:<<https://optiwave.com/category/optisystem-manuals/>>. Acesso em: 01/06/2018.
- [8] Ajay Kumar, Santosh Kumar, S. K. Raghuwanshi, "Implementation of All-Optical Logic Gate using SOA-MZI Structures," STM Journals 2013, ISSN: 2231-0401
- [9] Dora Juan Juan Hu, Rebecca Yen-Ni Wong and Perry Ping Shum. "Photonic Crystal Fiber-Based Interferometric Sensors, Selected Topics on Optical Fiber Technologies and Applications", Prof. Fei Xu (Ed.), InTech, DOI: 10.5772/intechopen.70713, (2018).
- [10] Mr.Sachin Kumar. Gates, All-Optical Composite Logic. "Semiconductor Optical Amplifiers (SOA) Performance Optimization in Optical Communication System." International Journal of Computer Science & Engineering Technology (IJCSSET), Vol. 3 No. 9 Sep (2012).
- [11] Eman M. El-Saeed, Ahmed Abd El-Aziz, Heba A. Fayed, Moustafa H. Aly, "Optical logic gates based on semiconductor optical amplifier Mach-Zehnder interferometer: design and simulation", Optical Engineering 55(2), 025104 (9 February 2016).

Capítulo 7

7 CONCLUSÃO GERAL

Foi possível obter as portas lógicas AND, OR e NOR, utilizando as características de ganho não-linear da modulação de ganho cruzado (XGM) em amplificadores ópticos semicondutores (SOAs), com base no Interferômetro de Michelson (MI), tendo assim um SOA-MI para a investigação do desempenho de um sistema totalmente óptico, demonstrado com sucesso a eficácia do uso de SOAs com base em MI nas simulação numérica das portas lógicas a uma taxa de bit de 10 Gb/s para diferentes larguras de banda do filtro gaussiano (10, 20 e 40 GHz) e diferentes números de bits (4, 6, 8, 16 e 32 bits) dos sinais de entrada A e B usando o software comercial de simulação Optisystem.

Os modelos propostos para as portas lógicas são simples e compactos e de acordo com os resultados, o dispositivo SOA-MI pode ser configurado para implementação das portas lógicas AND, OR e NOR totalmente óptica, podendo ser útil para obter portas lógicas com maior número de bits de entrada, da mesma forma que executado neste trabalho, bem como para outras portas.

Todos os resultados obtidos foram em função do espectro óptico, potência de entrada, OSNR e diagrama de olho. Neste trabalho foi possível conseguir ótimos valores de OSNR, de fator de qualidade (fator Q) e baixo valor da taxa de erro de bit (BER).

7.1 TRABALHOS FUTUROS

Futuramente, para continuidade e aprimoramento desta pesquisa, pretende-se investigar através de simulações tanto no Optisystem, outras portas lógicas com SOA-MI. Espera-se também investigar outros efeitos não lineares como modulação de fase cruzada (XPM) e mistura de quatro ondas (FWM). Buscar explorar outras taxas de transmissão (Bit rate) como 20, 40, 80 Gb/s, aumentando assim a capacidade de transmissão.

7.2 PUBLICAÇÕES

Durante o período de estudos no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da Universidade Federal do Pará, campus Guamá, Belém e Mestrado Interinstitucional (MINTER) da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (Unifesspa),

campus Marabá, ambas no estado do Pará, desenvolveu-se alguns trabalhos relacionados a linha de pesquisa de eletromagnetismo aplicado com ênfase em telecomunicações, os quais estão listados a seguir.

7.2.1 Congressos – Trabalhos publicados

- 1) **OLIVEIRA, J. M.** ; SOUSA, F. B. ; OLIVEIRA, J. E. ; COSTA, M. C. ; LUZ, F. P. ; SOUZA, F. M.; COSTA, M. B. C. Michelson Interferometer based All-optical NOR Logic Gates. In: XIII Workshop on Semiconductors and Micro & Nano Technology, 2018, São Bernardo do Campo - SP. Proceedings of XIII Workshop on Semiconductors and Micro & Nano Technology, 2018. V. 01.
- 2) COSTA, M. C. ; SOUSA, F. B. ; **OLIVEIRA, J. M.**; OLIVEIRA, J. E. ; SOUZA, F. M.; LUZ, F. P.; PASCHOAL JR. W. G. ; COSTA, M. B. C. Soliton Formation in Long Distance Optical Fiber Communication System. In: XIII Workshop on Semiconductors and Micro & Nano Technology, 2018, São Bernado do Campo - SP. Proceedings of XIII Workshop on Semiconductors and Micro & Nano Technology, 2018. V.01.
- 3) **OLIVEIRA, J. M.** ; SOUSA, Fabio Barros; OLIVEIRA, Jorge Everaldo de; SOUZA, Fiterlinge Martins de; COSTA, Márcio Benedito Caldas; LUZ, Fabrício Pinho da; COSTA, Marcos Benedito Caldas . All-optica OR logic gate using a Semiconductor Optical Amplifier based Michelson Interferometer. In: MOMAG 2018, Instituto Nacional de Telecomunicações – Campus em Santa Rita do Sapucaí - MG.
- 4) **OLIVEIRA, J. M.**; SOUSA, Fabio Barros ; SOUZA, Fiterlinge Martins de ; OLIVEIRA, Jorge Everaldo de ; COSTA, Márcio Benedito Caldas ; COSTA, Marcos Benedito Caldas . A New System for All-optical AND Logic gate on Semiconductor Optical Amplifier based Michelson Interferometer. In: 3rd International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers, 2018, Bento Gonçalves - RS. INSCIT 2018. Bento Gonçalves - RS, 2018.
- 5) COSTA, Márcio Benedito Caldas ; **OLIVEIRA, J. M.** ; SOUSA, Fabio Barros ; SILVA, Hudson A. B. ; OLIVEIRA, Jorge Everaldo de ; COSTA, Marcos Benedito Caldas . All-Optical NOT Logic Gate with SOA-MI. In: VIII CONFERÊNCIA

NACIONAL EM COMUNICAÇÕES, REDES E SEGURANÇA DA INFORMAÇÃO, 2018, Salvador - BA. ENCOM & IECOM 2018. Salvador - Bahia, 2018.

7.2.2 Engenharia IV - Qualis B1

- 6) SOUSA, Fabio Barros; SOUZA, Fiterlinge Martins de ; OLIVEIRA, Jorge Everaldo de; **OLIVEIRA, J. M.**; PASCHOAL JUNIOR, W. G. ; COSTA, Marcos Benedito Caldas . All-Optical 3R Regeneration Based on an Acousto Optical Filter with Q-factor Improvement. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience **JCR**, 2018.