



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

JOSÉ ALEXANDRE DE CASTRO BEZERRA FILHO

**GERAÇÃO DE PORTAS LÓGICAS E MEIO-SOMADOR
TOTALMENTE ÓPTICOS COM ESQUEMÁTICOS ESTRUTURAIS
SIMPLES E CASCATEADO DO INTERFERÔMETRO
MACH-ZEHNDER**

FORTALEZA

2016

JOSÉ ALEXANDRE DE CASTRO BEZERRA FILHO

GERAÇÃO DE PORTAS LÓGICAS E MEIO-SOMADOR
TOTALMENTE ÓPTICAS COM ESQUEMÁTICOS ESTRUTURAIS
SIMPLES E CASCATEADO DO INTERFERÔMETRO
MACH-ZEHNDER

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

Área de concentração: Sistemas de
comunicação

Orientador: José Wally Mendonça
Menezes

Fortaleza
2016

Catálogo na fonte: Biblioteca Waldyr Diogo de Siqueira

B574g Bezerra Filho, José Alexandre de Castro .

Geração de portas lógicas e meio-somador totalmente ópticos com esquemáticos estruturais simples e cascadeado do interferômetro Mach-Zehnder . / José Alexandre de Castro Bezerra Filho. - Fortaleza: IFCE, 2016.

122p.

Dissertação (Engenharia de Telecomunicação).

Orientador: José Wally Mendonça Menezes

1. SIMULAÇÃO- MATLAB- OPTISYSTEM 2.FIBRA ÓPTICA .3.
EQUAÇÃO NÃO LINEAR GENERALIZADA- SCHRODINGER 4.
INTERFERÔMETRO MACH-ZEHNDER I. TÍTULO.

CDD 535.2



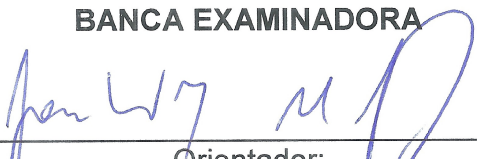
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
CEARÁ
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
TELECOMUNICAÇÕES

José Alexandre de Castro Bezerra Filho

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia de Telecomunicações, sendo aprovada pelo Programa
de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal
de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará e pela banca examinadora.

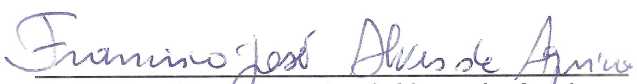
Aprovado em: 17 / 06 / 2016

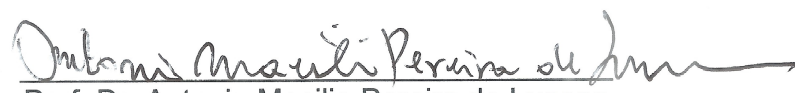
BANCA EXAMINADORA


Orientador:
Prof. Dr. José Wally Mendonça Menezes
Instituto Federal do Ceará – IFCE


Prof. Dr. Cícero Saraiva Sobrinho
Universidade da Integração Internacional
da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB


Prof. Dr. Daniel Xavier Gouveia
• Instituto Federal do Ceará – IFCE


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


Prof. Dr. Antonio Macilio Pereira de Lucena
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Agradecimentos

Agradeço inicialmente aos meu pais, José Alexandre de Castro Bezerra e Neuda Maria Holanda Castro, por toda ajuda, motivação, companheirismo nos momentos os quais mais necessitei.

Ao meu orientador, professor Doutor José Wally Mendonça Menezes. Por me aceitar como orientado nesse trabalho, por seus ensinamentos, por toda paciência e calma em me ajudar.

A minha namorada, Tássia Maria da Silva Costa, por toda atenção, compreensão, carinho e ajuda durante o mestrado. E especialmente no desenvolvimento desse trabalho, pois ela me forneceu o melhor incentivo e foco possíveis para a conclusão do mestrado.

A todos meus companheiros e companheiras do GDESTE pelas palavras de motivação e força durante essa etapa final.

Ao apoio financeiro fornecido pela Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico - FUNCAP.

Resumo

Nesta dissertação, portas lógicas AND, OR e XOR são obtidas através do interferômetro Mach-Zehnder (MZI) com não linearidade presente em uma das fibras. São utilizados pulso secante hiperbólica e retangular como sinais na entrada. Inicialmente há uma simulação que visa garantir a eficiência do software OptiSystem para todas as simulações deste trabalho. Assim uma mesma estrutura óptica é criada e implementada tanto para o Matlab, quanto para o OptiSystem 13. Essa estrutura é um MZI em que uma de suas fibras possui não linearidade. Na simulação dois pulsos secante hiperbólico são parâmetros de entrada. Assim, como resultado, as potências nas saídas são analisadas. Em seguida, somente com o OptiSystem 13, são realizadas as simulação e essas são divididas em dois grupos. O primeiro com a entrada sendo representada por pulso no formato secante hiperbólico e a segunda para pulso retangular. São simuladas três tipos de estruturas com MZI: primeiro esquemático tem-se um MZI e os dois acopladores que são 50:50, no segundo há um MZI com o primeiro acoplador sendo 20:80 e o segundo é 50:50. E para no terceiro tem-se três MZI de forma cascadeada no qual cada acoplador é 20:80/50:50 sequencialmente. Esses três tipos de esquemáticos são utilizadas em cada um dos grupos (tipos de pulsos), ou seja, há seis simulações presentes neste trabalho. São analisadas os resultados através de gráficos para taxa de extinção, potência e saída dos pulsos, todos esses para as entradas $[(0,0),(0,1),(1,0),(1,1)]$. Para cinco simulações são encontradas portas lógicas e em todas tem-se a porta AND, mas somente para quatro temos as portas AND, OR e XOR. E, para essas mesmas quatro, obtemos um circuito meio somador. Ao final é realizado a discussão dos resultados, além de apresentar uma conclusão e propor alguns trabalhos futuros.

Abstract

In this dissertation, logic gates AND, OR and XOR are obtained by Mach- Zehnder (MZI) interferometer with the presence of nonlinearity in one of the fibers. Hyperbolic secant and rectangular pulse are used as input signals. Initially there is a simulation that aims to ensure the efficiency of the software OptiSystem for all simulations of this work. Thus the same optical structure is created and implemented for both Matlab and OptiSystem 13. This structure is a MZI which has nonlinearity in one of its fibers. In the simulation two hyperbolic secant pulses are input parameters. So, as a result, the power outputs are analyzed. In the next step is used only OptiSystem 13 and the simulation is performed being divided into two groups. The first group has the input represented by hyperbolic secant and the second group by rectangular pulse. Three types of MZI structures are simulated: The first schematic has one MZI and the two couplers are 50:50, in the second schematic has one MZI with the first coupler being 20:80 and the second 50:50. The third schematic has three cascaded MZI in which each coupler is 20:80/50:50 sequentially. These three types of structure are used in each group (types of pulses), in other words, this work contains six simulations. The results are analyzed through graphs for extinction rate , power and output of pulses , all of these to the inputs $[(0,0),(0,1),(1,0),(1,1)]$. For five simulations are found logic gates and in all of this are found AND gates, but only for four are found AND, OR and XOR gates. For these same four simulations we obtain a half adder circuit. At the end of this work the results are discussed, the conclusion and proposal of some future work are presented.

Lista de Figuras

1	Quantidade de transistores presentes em processadores até 2015. . . .	19
2	Encaminhamento da mensagem através de uma rede	20
3	Estrutura e camadas de proteção da fibra. As dimensões estão em micrometro.	24
4	Características da fibra.	25
5	Reflexão interna total em fibra multimodo índice degrau	25
6	Deslocamento de fase (esquerda) e chirp (direita) em pulso gaussiano .	29
7	Estrutura do acoplador	30
8	Acopladores estrela cascadeado (a) e bicônica (b)	30
9	Sistema WDM (a) e multiplexador de comprimento de onda (b)	31
10	Estrutura com dois MZI ligados de forma contínua.	32
11	Esquempatico do MZI com SOA para cada braço do interferômetro. . .	33
12	MZI com SOA em cada braço e as entradas conectadas em cada SOA	33
13	Acoplador assimétrico não linear	34
14	Estrutura MZI com WDM e SOA em cada braço	34
15	Interferômetro Mach-Zehnder	36
16	MZI proposto	41
17	Variação do coeficiente de índice não linear - MZI	42
18	Pulso secante hiperbólico - Potência de pico 1, 5, 10, 15, 20 e 25 W . . .	43
19	Comparativo Matlab X OptiSystem	44
20	Fit linear - Comparativo Matlab X OptiSystem	44
21	MZI com braço não linear no OptiSystem 13	45

22	Sinais das entradas A e B	46
23	$XRatio_{BAR/CROSS}$, coeficiente de acoplamento = 50:50, variações de potência de pico e $\bar{n}_2$	49
24	$XRatio_{CROSS/BAR}$, coeficiente de acoplamento = 50:50, variações de potência de pico e $\bar{n}_2$	50
25	Tabela verdade para porta AND (a) e FOMELG (b)	50
26	$Potncia_{BAR}$, coeficiente de acoplamento = 50:50, variações de potência de pico e $\bar{n}_2$	51
27	$Potncia_{CROSS}$, coeficiente de acoplamento = 50:50, variações de potência de pico e $\bar{n}_2$	51
28	Saída MZI para pulsos com potência de pico 5 W	52
29	$XRatio_{BAR/CROSS}$, coeficiente de acoplamento = 50:50, variações de potência de pico e $\bar{n}_2$	53
30	Saída MZI para pulsos com potência de pico 2, 3, 4, 5 e 6 W	54
31	Variação do coeficiente de acoplamento para pulso de 2 W	56
32	$XRatio_{BAR/CROSS}$, coeficiente de acoplamento 0,2, variação da potência de pico e $\bar{n}_2$	57
33	$XRatio_{CROSS/BAR}$, coeficiente de acoplamento 0,2, variação da potência de pico e $\bar{n}_2$	57
34	$XRatio_{BAR/CROSS}$, coeficiente de acoplamento 20:80, variação da potência de pico e $\bar{n}_2$	58
35	Potência bar, coeficiente de acoplamento = 20:80, variações de potência de pico e $\bar{n}_2$	59
36	Potência cross, coeficiente de acoplamento = 0,2, variações de potência de pico e $\bar{n}_2$	60
37	Saídas bar (a) e cross (b) do MZI para pulsos 5 W - Portas XOR (a), AND (b) e OR (c)	61
38	Valores de potência de pico e coeficiente de índice de não-linear (a) e estrutura do circuito meio somador com sua tabela verdade (b)	62

39	Estrutura cascadeamento com 2 controles	63
40	Esquemático cascadeamento no OptiSystem (a) e MZI proposto (b) . .	64
41	$XRatio_{BAR1/BAR2}$ cascadeamento, variação da potência de pico e $\bar{n}_2$. . .	65
42	$XRatio_{BAR2/BAR1}$ cascadeamento, variação da potência de pico e $\bar{n}_2$. . .	66
43	Potência bar1 cascadeamento, variação da potência de pico e $\bar{n}_2$	67
44	Potência bar2 cascadeamento, variação da potência de pico e $\bar{n}_2$	67
45	Saídas bar1 (a) e bar2 (b) do MZI para pulsos 5 W - Portas XOR (a) , AND (b) e OR (c)	68
46	Variação do pulso secante hiperbólico para retangular	70
47	Pulsos de entrada com potência de pico 5 W	71
48	$XRatio_{BAR}$, coeficiente de acoplamento 50:50, variação da potência de pico, $\bar{n}_2$ e pulso retangular	72
49	$XRatio_{BAR/CROSS}$, coeficiente de acoplamento 20:80, $\bar{n}_2$ e pulso retangular	72
50	$XRatio_{CROSS/BAR}$, coeficiente de acoplamento 20:80, $\bar{n}_2$ e pulso retangular	73
51	Saídas bar (a) e cross (b) do MZI para pulsos 1, 2, 3, 4, 5 e 6 watt - Portas XOR (a) e AND (b) - Pulso retangular	74
52	Potência bar, coeficiente de acoplamento 20:80, variação da potência de pico, $\bar{n}_2$ e pulso retangular	75
53	Potência cross, coeficiente de acoplamento 20:80, variação da potência de pico, $\bar{n}_2$ e pulso retangular	75
54	Saídas bar (a) e cross (b) do MZI para pulsos 5 W - Portas XOR (a) e AND (b) - Pulso retangular	76
55	saída bar do MZI para pulsos 5 W - Porta OR - Pulso retangular	77
56	$XRatio_{BAR1/BAR2}$, coeficiente de acoplamento 20:80, variação da potência de pico, $\bar{n}_2$ e pulso retangular	78
57	$XRatio_{BAR1/BAR2}$, coeficiente de acoplamento 20:80, variação da potência de pico, $\bar{n}_2$ e pulso retangular	79
58	Potência bar1, coeficiente de acoplamento 0,2, variação da potência de pico, $\bar{n}_2$ e pulso retangular	80

59	Potência bar2, coeficiente de acoplamento 0,2, variação da potência de pico, $\bar{n}_2$ e pulso retangular	80
60	Saídas bar1 (a) e bar2 (b) do MZI para pulsos 5 W - Portas XOR (a), AND (b) e OR (c) - Pulso retangular	81
61	Quadro comparativo de todas as portas e suas FOMELG - S: pulso secante hiperbólico, CS: cascadeamento e pulso secante hiperbólica, R: pulso retangular e CR: cascadeamento e pulso retangular	83
62	$XRatio_{BAR/CROSS}$, coeficiente de acoplamento = 50:50, variações de potência de pico e $\bar{n}_2$	92
63	$XRatio_{CROSS/BAR}$, coeficiente de acoplamento = 50:50, variações de potência de pico e $\bar{n}_2$	93
64	$Potncia_{BAR}$, coeficiente de acoplamento = 50:50, variações de potência de pico e $\bar{n}_2$	94
65	$Potncia_{CROSS}$, coeficiente de acoplamento = 50:50, variações de potência de pico e $\bar{n}_2$	95
66	Saída MZI para pulsos com potência de pico 2, 3, 4, 5 e 6 W	96
67	$XRatio_{BAR/CROSS}$, coeficiente de acoplamento 20:80, variação da potência de pico e $\bar{n}_2$	98
68	$XRatio_{CROSS/BAR}$, coeficiente de acoplamento 20:80, variação da potência de pico e $\bar{n}_2$	99
69	Potência bar, coeficiente de acoplamento = 20:80, variações de potência de pico e $\bar{n}_2$	100
70	Potência cross, coeficiente de acoplamento = 20:80, variações de potência de pico e $\bar{n}_2$	101
71	Saídas bar (a) e cross (b) do MZI para pulsos 2, 3, 4, 5 e 6 W - Portas XOR (a) e AND (b)	102
72	$XRatio_{BAR1/BAR2}$ cascadeamento, variação da potência de pico e $\bar{n}_2$. . .	104
73	$XRatio_{BAR2/BAR1}$ cascadeamento, variação da potência de pico e $\bar{n}_2$. . .	105
74	Potência bar1 cascadeamento, variação da potência de pico e $\bar{n}_2$	106
75	Potência bar2 cascadeamento, variação da potência de pico e $\bar{n}_2$	107

76	Saídas bar1 (a) e bar2 (b) do MZI para pulsos 1, 2, 3, 4, 5 e 6 watt - Portas XOR (a) , AND (b) e OR (c)	108
77	$XRatio_{BAR}$, coeficiente de acoplamento 50:50, variação da potência de pico, $\bar{n}_2$ e pulso retangular	109
78	$XRatio_{BAR/CROSS}$, coeficiente de acoplamento 20:80, variação da potência de pico, $\bar{n}_2$ e pulso retangular	111
79	$XRatio_{CROSS/BAR}$, coeficiente de acoplamento 20:80, variação da potência de pico, $\bar{n}_2$ e pulso retangular	112
80	Potência bar, coeficiente de acoplamento 20:80, variação da potência de pico, $\bar{n}_2$ e pulso retangular	113
81	Potência cross, coeficiente de acoplamento 20:80, variação da potência de pico, $\bar{n}_2$ e pulso retangular	114
82	Saídas bar (a) e cross (b) do MZI para pulsos 1, 2, 3, 4, 5 e 6 watt - Portas XOR (a) e AND (b) - Pulso retangular	115
83	$XRatio_{BAR1/BAR2}$, coeficiente de acoplamento 20:80, variação da potência de pico, $\bar{n}_2$ e pulso retangular	117
84	$XRatio_{BAR2/BAR1}$, coeficiente de acoplamento 20:80, variação da potência de pico, $\bar{n}_2$ e pulso retangular	118
85	Potência bar1, coeficiente de acoplamento 20:80, variação da potência de pico, $\bar{n}_2$ e pulso retangular	119
86	Potência bar2, coeficiente de acoplamento 20:80, variação da potência de pico, $\bar{n}_2$ e pulso retangular	120
87	Saídas bar1 (a) e bar2 (b) do MZI para pulsos 1, 2, 3, 4, 5 e 6 W - Portas XOR (a), AND (b) e OR (c) - Pulso retangular	121

Lista de Tabelas

1	Operação AND - endereço de rede	21
2	Dados de simulação no Matlab e OptiSystem com MZI	43
3	Dados de simulação no OptiSystem com MZI e acoplador 50:50	49
4	Valores para simulação acoplador 50:50	52
5	Valores de $\bar{n}_2$ para suas potências de pico, potência média por $\bar{n}_2$ e FOLMEGL para porta AND	54
6	Porcentagem de energia na fibra não-linear	55
7	Variação do coeficiente de acoplamento para um pulso de 2 W	56
8	Valores para simulação acoplador 20:80	59
9	Dados de simulação cascadeamento no OptiSystem	65
10	Valores para simulação acoplador 20:80 - Controle 00	66
11	Valores de potência de pico/coeficiente de índice de não-linear	69
12	Valores para o pulso retangular 5 W na simulação acoplador 20:80 - Pulso retangular	73
13	Valores de potência de pico/coeficiente de índice de não-linear	77
14	Quadro geral para simulação acoplador 0,2 - Cascadeamento - Pulso retangular	79
15	Tabela com valores de potência de pico/coeficiente de índice de não-linear	82
16	Quadro geral para simulação acoplador 50:50	91
17	Quadro geral para simulação acoplador 20:80	97
18	Quadro geral para simulação acoplador 20:80 - Controle 00	103
19	Quadro geral para simulação acoplador 20:80 - Pulso retangular	110

20	Quadro geral para simulação acoplador 0,2 - Cascadeamento - Pulso retangular	116
----	---	-----

Lista de Símbolos

n_1	índice de refração núcleo
n_2	índice de refração casca
v_g	velocidade de grupo
ω	frequência da onda
λ	comprimento de onda
γ	parâmetro não linear
β_n	coeficiente de dispersão ordem n
σ	parâmetro XPM
α	atenuação
K	coeficiente de acoplamento
ρ	fração de divisão de potência
$\bar{n}_2$	coeficiente de índice não linear
A_{eff}	área efetiva

Lista de Abreviações

IP	Internet Protocol
ISO	International Organization for Standardization
GVD	Group Velocity Dispersion
WDM	Wavelength-division Multiplex
SPM	Self-Phase Modulation
XPM	Cross-Phase Modulation
FWM	Four Wave Mixing
MZI	Mach-Zehnder Interferometer
ENLGS	Equação Não-linear Generalizada de Schrödinger
MOS	Metal Oxide Semiconductor
FWHM	Full Width at Half Maximum
ASK	Amplitude Shift Keying
OOK	On-Off Keying
FOMELG	Figura de mérito

Conteúdo

1	Apresentação	18
1.1	Introdução	18
1.2	Objetivos	21
1.3	Organização da Dissertação	22
2	Componentes Ópticos	23
2.1	Fibra óptica	23
2.1.1	Dispersões	24
2.1.2	Não linearidade na fibra óptica	27
2.2	Acoplador	29
3	Revisão Bibliográfica	32
4	Interferômetro Mach-Zehnder	36
4.1	Introdução	36
4.2	Equação não-linear generalizada de Schrödinger	37
4.2.1	Fibra óptica	37
4.2.2	Acoplador	38
4.3	Matriz de transferência do Interferômetro Mach-Zehnder	39
5	Interferômetro Mach-Zehnder para geração de funções lógicas	40
5.1	Introdução	40
5.2	Simulação comparativa Matlab e OptiSystem	41

5.3	Simulação porta lógica e meio somador (MS)	45
5.3.1	Taxa de extinção - XRatio (dB) e figura de mérito (dB)	46
5.3.2	Simulação - Acoplador 50:50 e variação da potência de pico	48
5.3.3	Simulação - Acoplador 0,2 e variação da potência de pico	55
5.3.4	Simulação Cascadeamento - Acoplador 20:80 e variação de potência	62
5.3.5	Simulação - Variação do pulso secante hiperbólico para retangular	69
5.3.6	Simulação - Acoplador 50:50, variação de potência e pulso retangular	70
5.3.7	Simulação - Acoplador 20:80, variação de potência e pulso retangular	71
5.3.8	Simulação Cascadeamento - Acoplador 20:80, variação de potência e pulso retangular	78
5.4	Discussão dos resultados	82
6	Conclusão	84
6.1	Conclusão	84
6.2	Trabalhos futuros	84
	Bibliografia	86
	Apêndice A	89
A.1	Acoplador 50:50 - estrutura simples e pulso secante hiperbólico	91
A.2	Acoplador 20:80 - estrutura simples e pulso secante hiperbólico	97
A.3	Acoplador 20:80 - estrutura cascadeada e pulso secante hiperbólico	103
A.4	Acoplador 50:50 - estrutura simples e pulso retangular	109
A.5	Acoplador 20:80 - estrutura simples e pulso retangular	110
A.6	Acoplador 20:80 - estrutura cascadeada e pulso retangular	116

APRESENTAÇÃO

1.1 Introdução

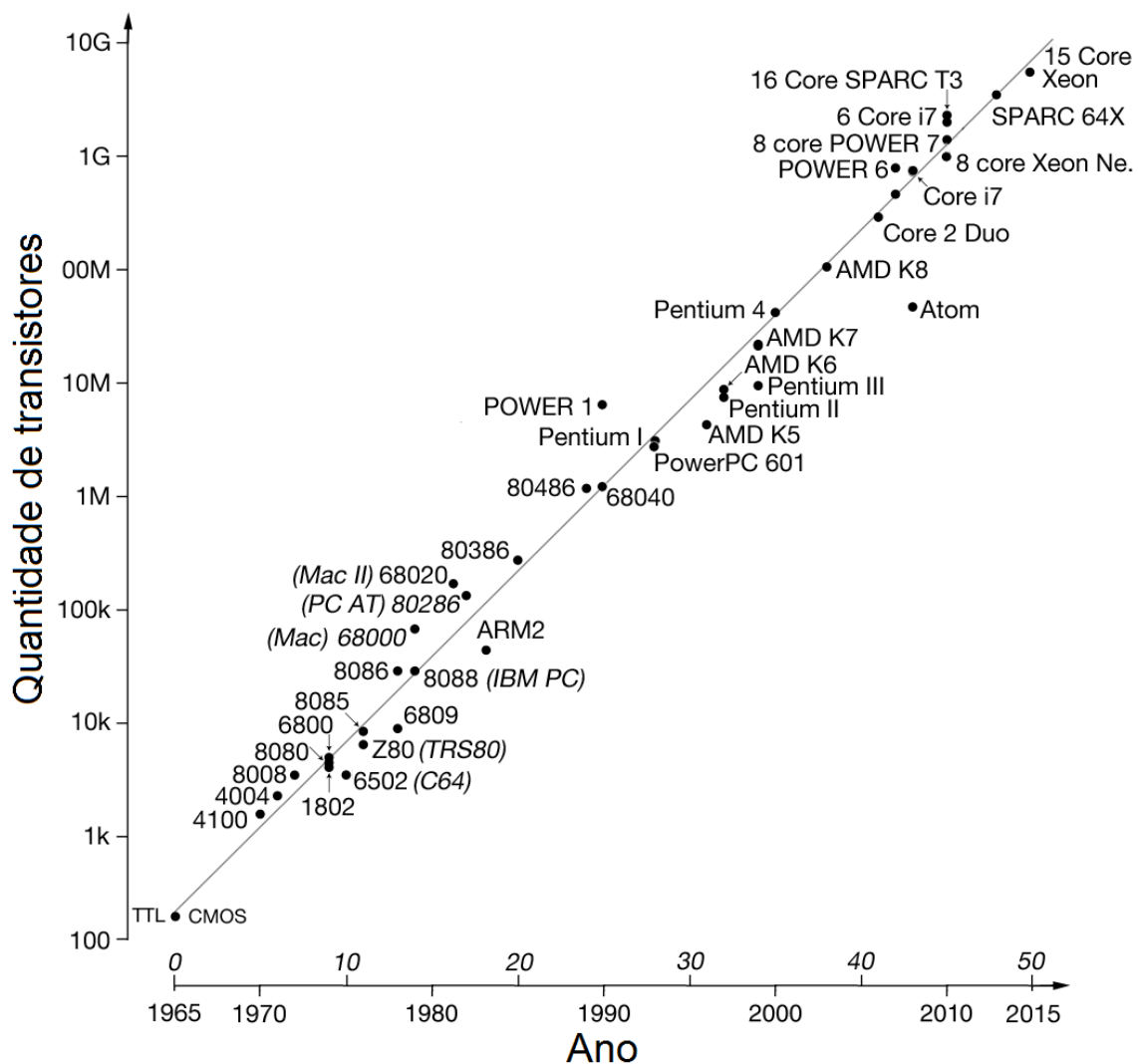
As telecomunicações constituem um ramo da engenharia eléctrica que contempla o projeto, a implantação e a manutenção dos sistemas de comunicações. A principal finalidade das telecomunicações é suprir a necessidade humana de se comunicar à distância (MEDEIROS, 2005). Para esses sistemas de comunicações, tem-se que sua estrutura contém, basicamente, um transmissor, canal e receptor. No qual, cada um possui características e estruturas, variando para os tipos de sistemas. Como exemplos de sistemas temos a Internet, telefonia fixa e móvel, satélite, rádio, entre outros. Do ponto de vista funcional, fatores como distância, velocidade e quantidade de informação são preocupações para os sistemas de telecomunicações. Assim, novas tecnologias surgiram para suprir essas demandas, como exemplo os sistemas ópticos. Os quais se integraram aos meios cabeados e *wireless*. Sobre o sistema óptico, tem-se que ele apresenta diversas vantagens quanto aos eléctricos. Sendo sua maior característica, possibilitar para grandes distâncias e quantidade de dados maior velocidade de transmissão com menos perdas.

Explicando a equivalência dos dispositivos ópticos com relação a estrutura do sistemas de comunicações. Temos o transmissor equivalente a um emissor de luz, o canal representado por uma fibra e o receptor é identificado como o fotodetector. Além desses componentes há outros que trabalham com a gerência dos sistemas, criando e controlando as informações. Dentre esses dispositivos de gerência, há os que trabalham com o processamento de informações, seja para criar, direccionar, restringir, bloquear, unir, entre outras funções. Esses são dispositivos constituídos de processadores, os quais realizam todas as ações sobre os dados. O processador é organizado por unidades formadas estruturalmente de componentes digitais, dentre eles se encontram as portas lógicas. Essas são responsáveis por funções ou operações de lógica booleana. Assim, com relação as telecomunicações, a porta

lógica continua apresentando papel fundamental independente do sistema.

Existem vários tipos de portas lógicas e cada uma é caracterizada pela sua função, ou seja, o tipo de operação que a porta realiza é o que a define. E a respeito de sua estrutura, ela pode ser constituída de transistores. Assim, quanto mais transistores o processador possuir na sua unidade de lógica e aritmética, mais portas lógicas ele terá. A Figura 1 apresenta um gráfico relacionando a quantidade de transistores presentes nos processadores entre os anos 1965 e 2015. Evidenciando a massiva necessidade do uso de transistores no processador, devido ao aumento na demanda por velocidade e quantidade de informações, presente nos sistemas de comunicações e tecnologias em geral.

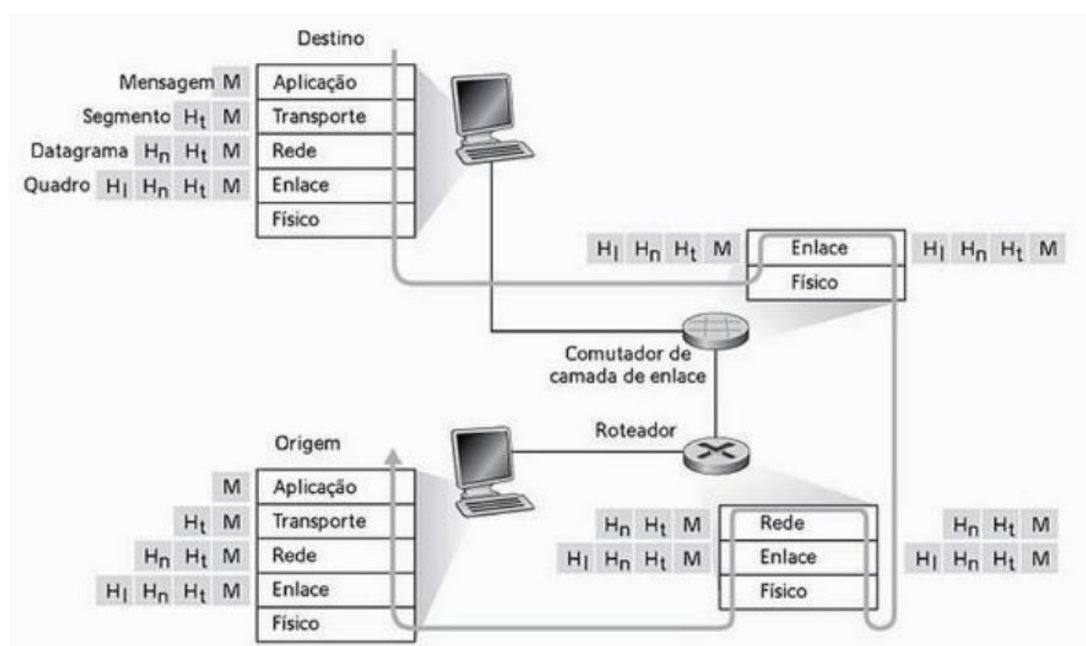
Figura 1: Quantidade de transistores presentes em processadores até 2015.



Fonte: Elektor Magazine - Repositório digital ¹.

Há centenas de exemplos da utilização de funções das portas lógicas nos sistemas de comunicações. Em um cenário de telecomunicações, um desses exemplos é a descoberta do endereço de rede para um determinado IP e máscara de rede. Falando um pouco sobre redes de computadores. Esse tipo de rede possui protocolos que definem todo seu funcionamento, esses trabalham em conjunto com outros protocolos e um tipo de estrutura organizacional desses protocolos é a modelo OSI. No final dos anos 1970, a Organização Internacional para Padronização (ISO) propôs que as redes de computadores fossem organizadas em sete camadas, denominadas modelos de Interconexão de Sistemas Abertos (KUROSE *et al.*, 2010). Logo, quando uma certa informação precisa ser transmitida ela sofrerá ajustes feitos por cada camada e enviada ao destino, a Figura 2 mostra esse fato.

Figura 2: Encaminhamento da mensagem através de uma rede



Fonte: Kurose *et al.* (2010).

Um desses ajustes é a definição do endereço da origem e de destino (números binários), assim é possível realizar o envio da informação. Mas entre o caminho da origem até o destino, alguns dispositivos trabalham com esses endereços para melhor direcionar ou encaminhar os dados. E um processo que informa o endereço da outro rede é uma operação lógica AND entre os endereços de destino e a máscara da rede, como visto na Tabela 1.

¹Disponível em https://www.elektormagazine.com/assets/upload/images/pic1_moore's_law_full.png. Acesso em maio de 2016.

Tabela 1: Operação AND - endereço de rede

	Endereço decimal	Endereço binário
Endereço de destino	192.168.5.10	11000000.10101000.00000101.00001010
Máscara da rede	255.255.255.0	11111111.11111111.11111111.00000000
Endereço de rede	192.168.5.0	11000000.10101000.00000101.00000000

Sobre o fato de gerar portas lógicas, há uma característica fundamental quanto a construção do dispositivo gerador de portas. Esse dispositivo deve apresentar estrutura totalmente óptica, ou seja, não deve conter equipamentos ou partes elétricas. Essa preocupação vem do fato de se obter um dispositivo capaz de trabalhar com altas taxas de velocidade de informação. De acordo com Benjamin & Smith (1996), as comunicações com o tempo irão exigir recursos cada vez mais rápidos, para realizar operações com maior velocidade e largura de banda. Para Wada (2000), previa-se que por volta de 2010 taxas de 10 TB/s irão se fazer necessárias pra suprir a demanda pela tráfego de informações. E para obter tal desempenho nos sistemas não basta simplesmente modificá-los, melhorias substanciais são cruciais. Ou seja, criar novos sistemas que trabalhem com as novas demandas.

1.2 Objetivos

Este trabalho apresenta como objetivo principal a geração de portas lógicas totalmente ópticas utilizando a estrutura do interferômetro Mach-Zehnder (MZI) com um dos seus braços não linear. Segue uma lista dos objetivos específicos presentes neste trabalho:

1. Gerar portas lógicas
 - (a) AND
 - (b) OR
 - (c) XOR
2. Obter circuito meio somador através de uma única estrutura
3. Encontrar o maior valor da figura de mérito para todas as simulações
4. Gerar portas lógicas e circuito meio somador para uma certa variedade de potência
5. Apresentar a melhor eficiência para valores que representam os bits "0" e "1"

1.3 Organização da Dissertação

O primeiro capítulo apresenta uma breve introdução a respeito das telecomunicações, sistema de comunicação e algumas definições sobre portas lógicas e aplicações. Além dos objetivos e a organização to trabalho.

No segundo capítulo defino e exemplifico características dos componentes ópticos utilizados na estrutura das simulações. Componentes como fibra e acoplador são abordados nessa capítulo, explicando definições de dispersão, não linearidade, matriz de transferência, entre outras.

No terceiro capítulo apresento algumas referências bibliográficas sobre porta lógicas totalmente ópticas e a utilização de interferômetros Mach-Zehnder na geração de portas.

No quarto capítulo é abordado o interferômetro Mach-Zehnder, dispositivo que é utilizado para realizar todas as simulações. A equação não-linear generalizada de Schrödinger é apresentada, assim como as equações de modo acoplado e de que modo ambas são aplicadas nas simulações.

O quinto capítulo apresenta primeiro uma simulação comparativa entre o Matlab e OptiSystem da interferometria de dois pulsos na entrada de um interferômetro Mach-Zehnder com objetivo de comprovar a eficácia do OptiSystem para todas as simulações seguintes. Depois as simulações de porta lógica são divididas em dois grupos, um trabalhando com pulso secante hiperbólico e outro com pulso retangular. Essas simulações são divididas em três etapas, as duas primeiras são realizadas com estrutura de um interferômetro Mach-Zehnder simples, já a última é através do cascadeamento do mesmo. São simuladas as três variações para cada tipo de pulso (grupo) e para todas as simulações são demonstrados os resultados através de taxa de extinção, figura de mérito e potência média. No final é apresentado a discussão dos resultados.

No sexto capítulo é apresentada uma conclusão sobre todas as portas lógicas geradas através dos dois tipos de estruturas e entradas. E alguns trabalhos futuros são propostos.

COMPONENTES ÓPTICOS

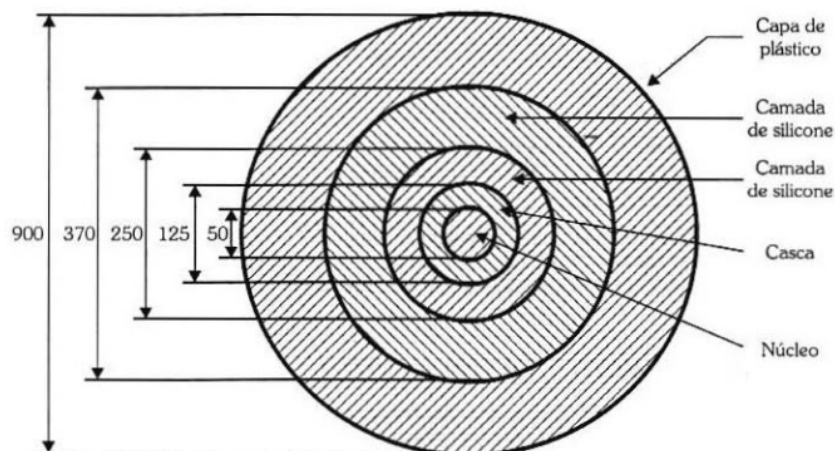
Para realizar as simulações, que obtém como resultado portas lógicas, é necessário construir uma estrutura formada por componentes ópticos. Esses possuem características específicas para determinadas situações, algumas apresentadas neste trabalho, os quais são explicadas neste capítulo.

2.1 Fibra óptica

Uma fibra óptica é composta, basicamente, de material dielétrico (sílica ou plástico) segundo uma estrutura cilíndrica transparente, flexível e de dimensões microscópicas. Essa estrutura possui um revestimento definido como casca e o material dielétrico é apresentado como núcleo. A casca e o núcleo são as duas regiões que definem a estrutura de uma fibra óptica. Essas regiões possuem índices de refração diferentes, sendo o índice do núcleo maior que o da casca (AMAZONAS, 2005). Devido a fragilidade proporcionada pelo ambiente em que a fibra se encontrava, surgiu a necessidade de torná-la mais segura e confiável quanto a sua estrutura. Outro fator é o aumento das aplicações da fibra óptica, necessitando incluir proteções a fim de garantir a sua durabilidade. Experiências comprovam ser ela capaz de suportar um esforço de tração de 5.000 mN/m^2 contra 3.000 mN/m^2 do fio de aço. Mesmo apresentando uma certa resistência, na prática, é possível ocorrerem fraturas microscópicas na superfície, que se propagam rapidamente em direção ao núcleo, reduzindo dramaticamente sua capacidade de suportar quaisquer esforços mecânicos (RIBEIRO, 2003). A Figura 3 mostra a estrutura básica e suas camadas de proteção.

A respeito das características que definem uma fibra óptica, tem-se o índice de refração do núcleo. Esse índice pode apresentar valor fixo ou variável, em relação ao aumento do diâmetro da fibra. Essa variação classifica a fibra quanto ao tipo de perfil. Assim, para esse parâmetro fixo, tem-se que o perfil do índice de refração é do tipo degrau, já para o valor variável se classifica como tipo gradual. Outra característica na

Figura 3: Estrutura e camadas de proteção da fibra. As dimensões estão em micrometro.



Fonte: Ribeiro (2003).

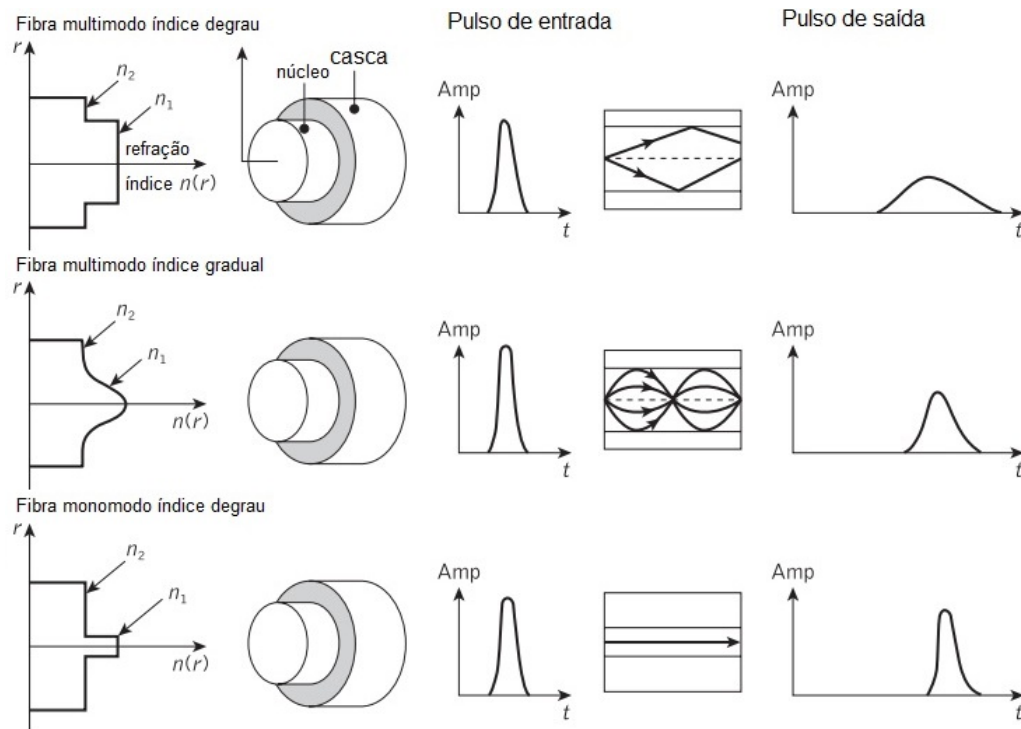
fibra é a sua abertura numérica. Ela determina um ângulo de aceitação para os raios que atingem sua face. Esse ângulo pode ser medido em todos os planos, definido uma região cônica. Somente os raios incidentes com angulação igual ou menor do que a da abertura numérica será propagado, já se o ângulo for maior o raio é absorvido pela casca e não se propaga. Outra classificação da fibra pode ser quanto à quantidade de feixes de luz em que ela consegue transportar para diferentes possibilidades de propagação. Essas várias possibilidades são diferentes caminho e chamadas, cada um, de modo. Assim, tem-se a fibra monomodo, capaz de transportar o feixe de luz por um único determinado caminho. E a fibra multimodo é capaz de transmitir o feixe através de vários modos. Na Figura 4 há exemplos das características citadas anteriormente.

2.1.1 Dispersões

Sinais ópticos aplicados na fibra podem sofrer efeitos devido a sua propagação, um desses efeitos é a dispersão. O qual causa o alargamento temporal no sinal óptico.

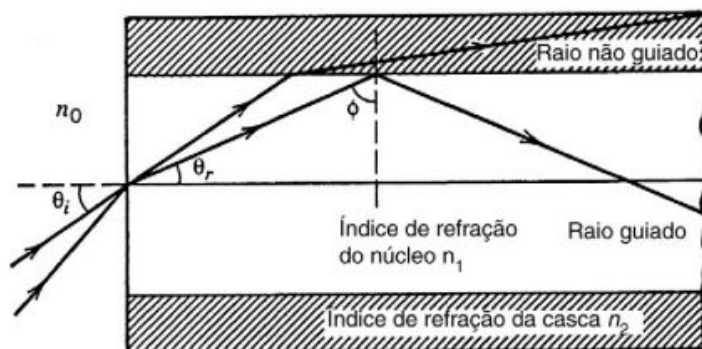
Dispersão modal

A dispersão modal só ocorre em fibras multimodo devido ao fato dessa fibra possuir vários percursos. Entende-se como percurso, o caminho que o sinal óptico utiliza ao longo da fibra, esse caminho é chamado do modo. Na Figura 4 tem-se, o primeiro e segundo exemplos, a fibra multimodo. Note que, na mesma estrutura, um

Figura 4: Características da fibra.

Fonte: Amazonas (2005).

laser pode percorrer a fibra por caminhos diferentes (imagens da 4ª coluna da Figura 4). E para o terceiro caso, o laser possui somente um caminho a seguir, caracterizando a fibra monomodo. A quantidade de modos é diretamente proporcional ao diâmetro do núcleo e abertura numérica ($AN = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$). Logo, resulta na possibilidade da inserção de vários raios na fibra. Em que cada raio, que trafegam por modos diferentes (Figura 5), chegam no final do percurso em tempos distintos, proporcionando um alargamento do pulso no tempo. Esse atraso é definido pela equação 2.1:

Figura 5: Reflexão interna total em fibra multimodo índice degrau

Fonte: Agrawal (2014).

$$\Delta T = \frac{L n_1^2}{c n_2} \Delta, \quad (2.1)$$

onde $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$, L é o comprimento da fibra, c velocidade da luz no vácuo, n_1 e n_2 índices de refração núcleo e casca, respectivamente. Analisando a equação 2.1 em relação a abertura numérica, nota-se que quanto maior o valor de Δ maior será o AN e mais raios podem ser acoplados à fibra. Neste trabalho somente fibra do tipo monomodo são utilizadas em todas as simulação.

Dispersão de velocidade de grupo

No caso da situação de fibra monomodo, em que dispersão modal não ocorre, outras dispersões acontecem ao longo dela. A dispersão de velocidade de grupo (GVD - *Group-Velocity Dispersion*) ocorre quando cada comprimento de onda do pulso óptico viaja com velocidade diferente. Assim, o pulso alarga nos domínios do tempo e comprimento de onda ao final de um intervalo ΔT (equação 2.2). Para $T = L/v_g$, onde $v_g = (d\beta/d\omega)^{-1}$ é velocidade de grupo ($\beta = \bar{n}\omega/c$, onde $\bar{n}$ é o índice modal, ω é a frequência e c é a velocidade da luz no vácuo) e L o comprimento da fibra. O parâmetro GVD que define o alargamento temporal é mostrado pela Equação 2.3.

$$\Delta T = \frac{dT}{d\omega} \Delta\omega = L\beta_2 \Delta\omega \quad (2.2)$$

Onde,

$$\beta_2 = \frac{d^2\beta}{d\omega^2} \quad (2.3)$$

Para a representação do GVD no domínio da frequência ($\Delta\omega$) se faz a substituição do $\omega = 2\pi c/\lambda$ na Equação 2.3, assim:

$$\Delta T = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{L}{v_g} \right) \Delta\lambda = DL\Delta\lambda \quad (2.4)$$

D é definido como parâmetro de dispersão [ns/km nm], esse pode ser representado pela soma de outras duas dispersões (material e guia de onda). Dispersão material ocorre porque o índice de refração da sílica muda com a frequência óptica. Em um nível fundamental, a origem da dispersão está relacionada às frequências de

ressonância características de absorção de energia eletromagnética pelo material (AGRAWAL, 2014). A dispersão de guia de onda é uma dispersão no atraso de tempo causado pelo confinamento da luz na estrutura do guia de onda (OKAMOTO, 2010).

Existe uma faixa de valores de comprimento de onda para o qual o índice de refração varia suavemente e por conseguinte tem-se um pequeno valor para sua derivada. A consequência é o índice de refração de grupo passar por um valor mínimo sensivelmente constante em um comprimento de onda específico. No caso dos núcleos de sílica pura, mostrou-se que isto ocorre ao redor de $1.27\ \mu\text{m}$. Portanto, os comprimentos de onda em torno deste valor propagam-se todos com a mesma velocidade e a dispersão intramodal (dispersões do tipo material e guia de onda) tende para um resultado praticamente nulo. Em comprimentos de onda próximos de $850\ \text{nm}$, uma fonte de luz com uma largura espectral $\Delta\lambda = 40\ \text{nm}$, valor comum para os diodos emissores de luz, pode dar origem a dispersões da ordem de $4\ \text{ns/km}$. Isso pode contribuir para uma forte redução na taxa de transmissão e na largura de banda útil do sistema (RIBEIRO, 2003).

Neste trabalho, o sinal apresenta comprimento de onda em $1.55\ \mu\text{m}$ e não sofre nenhuma influência dos efeitos causados pelas dispersões.

2.1.2 Não linearidade na fibra óptica

No decorrer da transmissão de um sinal óptico através da fibra, existem possibilidades de interações entre luz e meio através da absorção do sinal e/ou dispersões. Há outros fenômenos que ocorrem com o sinal ao longo da fibra, um deles é chamado de efeito não linear. Basicamente, a resposta de qualquer dielétrico à luz se torna não linear para campos eletromagnéticos intensos, o mesmo ocorre no caso das fibras ópticas. Embora a sílica não seja um material intrinsecamente não linear, a geometria de guia de onda - que confina a luz em uma pequena seção reta por longos comprimentos de fibra - torna efeitos não lineares muito importantes no projeto sistema de ondas luminosas (AGRAWAL, 2014). Outro fator é a grande distância do meio de transmissão, onde pode ocorrer um acúmulo desses efeitos não lineares, agravando sua interação com o sinal. Além disso, há o aumento dos níveis de energia, para a fibra que trabalha com múltiplos canais (WDM - *wavelength division multiplexing* - divisão por comprimento de onda). Nesta seção é mostrado apenas um desses efeitos: auto modulação de fase.

Auto modulação de fase

Na automodulação de fase (SPM - *Self Phase Modulation*) o pulso de luz altera a sua própria fase em decorrência da variação da intensidade de luz no percurso da fibra, criando uma variação temporal do índice de refração. Esse, por sua vez, altera temporalmente a fase da onda criada. Outro fator que afeta o sistema, quanto ao SPM, é a amplitude do pulso óptico na fibra, podendo alterar o índice de refração para determinado valor. Já que para uma fibra submetida a alta intensidade de energia, tem-se como resultado um comportamento não linear e o aumento dessa intensidade é diretamente proporcional ao índice de refração. Ou seja, quanto maior a amplitude do sinal maior a alteração no índice de refração. A equação 2.5 representa o índice de refração do núcleo da fibra:

$$n_1' = n_1 + \bar{n}_2(P/A_{eff}) \quad (2.5)$$

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

Sabendo que a forma do modo não se altera e que o parâmetro relacionado a propagação (β - para a propagação dos campos elétricos e magnéticos), não se mantém mais constante, pois será afetado pelos efeitos não lineares. Assim, esse parâmetro torna-se dependente da potência e pode ser definido como:

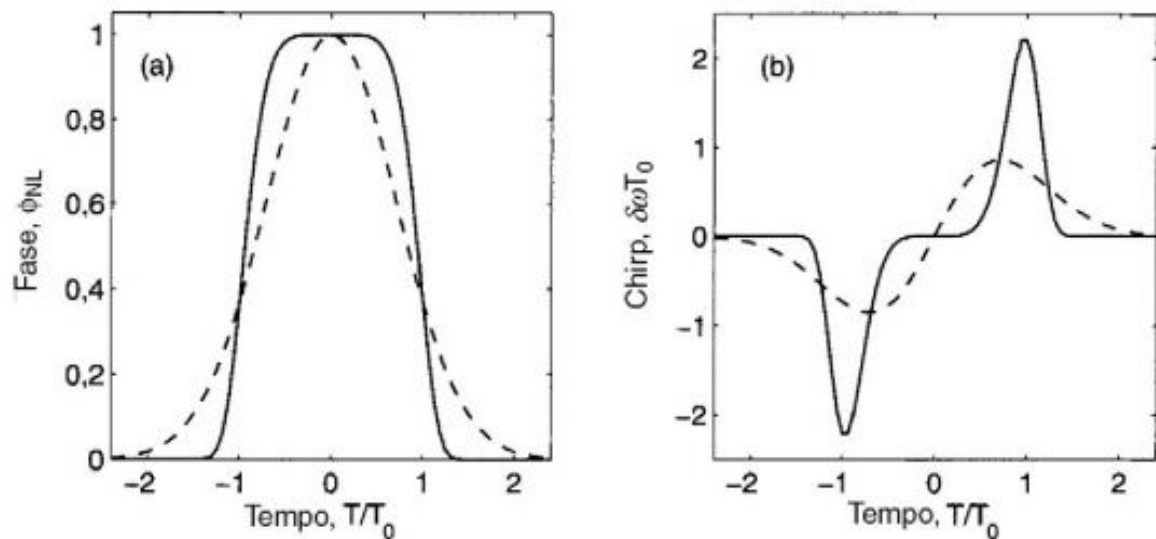
$$\beta' = \beta + \kappa_0 \bar{n}_2(P/A_{eff}) \equiv \beta + \gamma P, \quad (2.6)$$

$k_0 = 2\pi/\lambda$, $\gamma = 2\pi\bar{n}_2/A_{eff}\lambda$. O γ é definido como parâmetro de não-linearidade. Logo, para um aumento linear, no sentido do eixo de propagação da fibra, o termo γ produz uma variação de fase não linear, que pode ser expressa por:

$$\phi_{NL} = \int_0^L (\beta' - \beta) dz = \int_0^L P(z) dz = \gamma P_{in} \left[\frac{1 - \exp^{-\alpha L}}{\alpha} \right] = \gamma P_{in} L_{eff} \quad (2.7)$$

Onde $P(z) = P_{in} \exp^{-\alpha z}$, P_{in} é a potência de entrada e L_{eff} representa o comprimento efetivo de interação. Essa alteração da fase definem as alterações que o pulso sofrerá devido ao SPM.

No caso da propagação de um pulso não retangular (exemplo: secante hiperbólica) o valor da sua amplitude varia em cada instante de tempo, resultando na modificação

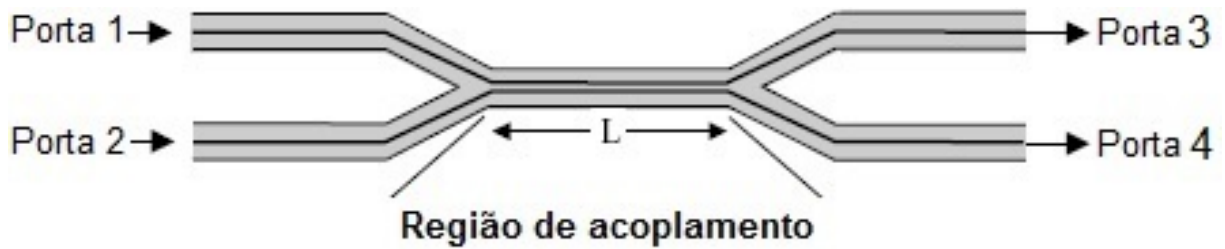
Figura 6: Deslocamento de fase (esquerda) e chirp (direita) em pulso gaussiano

Fonte: Agrawal (2014).

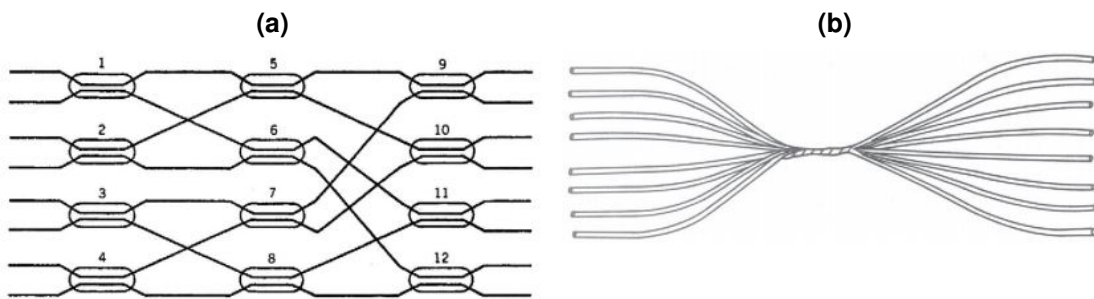
do índice de refração, além de cada valor se propagar com diferentes velocidades. Assim, as mudanças instantâneas desses valores são convertidas em alterações de fase. Além do deslocamento de fase, o SPM também induz *chirp* (variação de potência no sinal) no pulso. A Figura 6 mostra uma variação de fase e chirp em pulso gaussiano.

2.2 Acoplador

Acoplador é um dispositivo óptico capaz de manipular energia entre duas ou mais fibras, ou seja, realizar a transferência de energia de uma fibra para a outra. Uma maneira de se construir um acoplador é selecionar duas fibras e fundi-las por uma parte do seu comprimento, de forma que seus núcleos fiquem bem próximos comparados a escala de seus diâmetros, Figura 7. Pela definição da transferência de energia, tem-se que a saída "Porta 3" é definida como saída bar e a "Porta 4" é chamada de saída cross, esses termos são aplicados com mais frequência no capítulo 5. Além da fusão entre duas fibra é possível realizar a fusão com três fibras, para essa estrutura são chamadas de acoplador triplo. No caso de mais fibras fundidas, tem-se o tipo acoplador estrela de gradação bicônica, Figura 8b. Outro tipo de acoplador estrela é o cascadeado, Figura 8a. No qual vários acopladores duplos são estruturados e conectados de forma cascadeada, no exemplo tem-se um acoplador estrela 8 X 8 (entradas e saídas).

Figura 7: Estrutura do acoplador

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 8: Acopladores estrela cascadeado (a) e bicônica (b)

Fonte: Agrawal (2014).

A transferência de energia que ocorre no acoplador é caracterizada por algumas equações. Essas equações são aplicadas para um acoplador simétrico, formando a matriz de transferência do acoplador, definida por

$$\begin{pmatrix} A_3(L) \\ A_4(L) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(KL) & i\sin(KL) \\ i\sin(KL) & \cos(KL) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1(0) \\ A_2(0) \end{pmatrix}, \quad (2.8)$$

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

$\pi/2$ entre as duas portas de saída, como indicado pelo fator i presente nos termos da diagonal secundária da matriz de transferência na equação 2.8 (AGRAWAL, 2001).

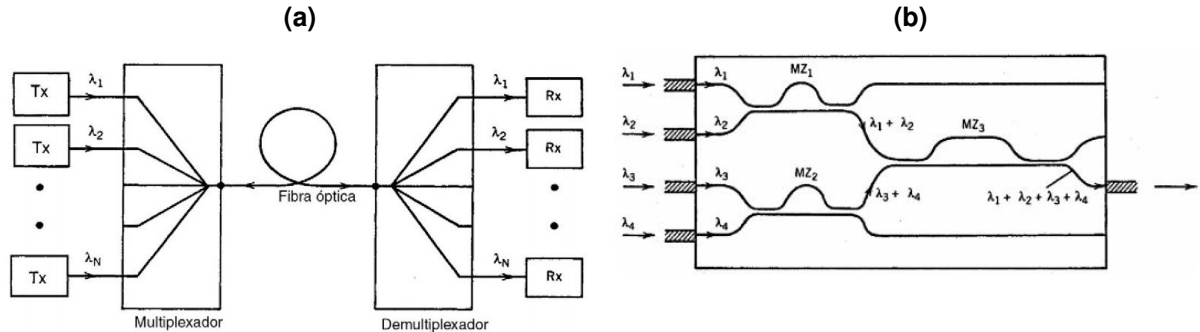
No caso da matriz 2.8, substituindo $\cos^2(KL) = P_1(L)/P_0 = \rho$ onde $P_1(L) = P_0 \cos^2(KL)$, tem-se a matriz 2.9:

$$T_c = \begin{pmatrix} \sqrt{\rho} & i\sqrt{1-\rho} \\ i\sqrt{1-\rho} & \sqrt{\rho} \end{pmatrix}, \quad (2.9)$$

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

Um acoplador também possui outra utilidade quando se fala de sistemas de comunicação. Acopladores duplos conectados sequencialmente, estrutura presente na Figura 9b, pode se obter um multiplexador ou demultiplexador. Esses são dispositivos capazes de somar ou subtrair canais para diferentes comprimentos de onda. A Figura 9a representa o esquemático de uma sistema WDM.

Figura 9: Sistema WDM (a) e multiplexador de comprimento de onda (b)



Fonte: Agrawal (2014).

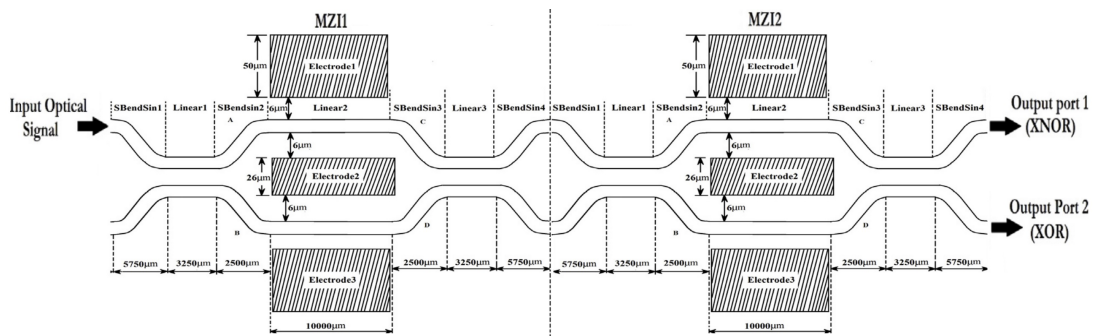
Acopladores e fibra são utilizados neste trabalho para construir a estrutura do interferômetro Mach-Zehnder proposto nas simulações. Os acopladores do MZI são totalmente lineares e simétricos. No capítulo 4 apresento as características do interferômetro.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Artigos que trabalham com interferômetro Mach-Zehnder (MZI) e efeitos não lineares no desenvolvimento de dispositivo na geração de portas lógicas, são abordados nesse capítulo.

Em Kumar, Kumar & Raghuwanshi (2014) é possível encontrar portas XOR, NXOR e AND com dois interferômetros Mach-Zehnder conectados de forma contínua. Para cada MZI tem-se a variação dos índices de refração, para cada fibra da estrutura MZI, através da alteração de tensão dos eletrodos presentes nos mesmos, Figura 10.

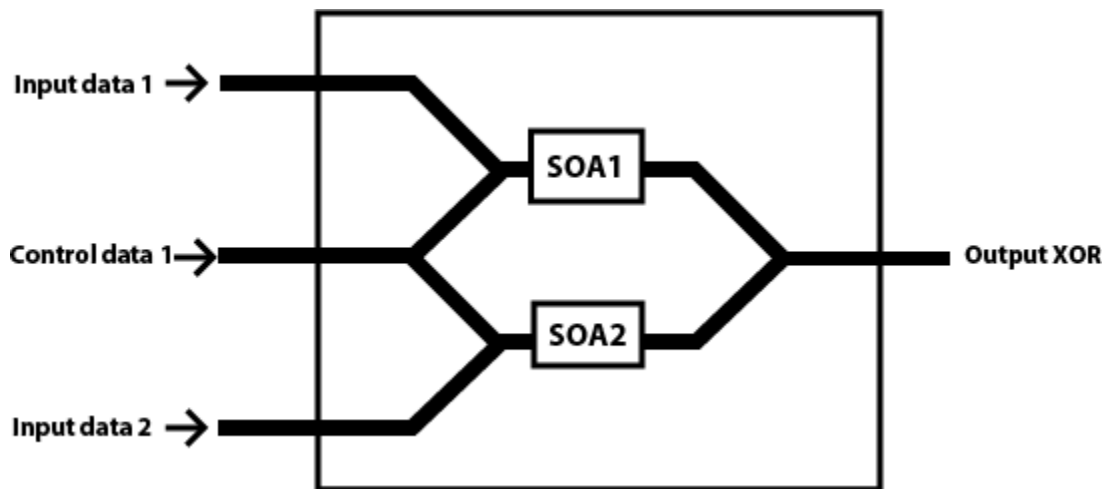
Figura 10: Estrutura com dois MZI ligados de forma contínua.



Fonte: Kumar, Kumar & Raghuwanshi (2014).

Para Kumar, Kumar & Raghuwanshi (2013) ocorre a implementação de portas lógicas através da estrutura de um interferômetro Mach-Zehnder com amplificador óptico de semiconductor (SOA) em cada braço (fibra do MZI) e além das entradas (*input data 1* e *input data 2*) há um sinal de controle na entrada (*control data 1*), Figura 11. Nesse sistema efeitos XPM (*Cross Phase Modulation*) e XGM (*Cross Gain Modulation*) são possíveis. Esses efeitos atuam sobre as entradas para gerar as portas XOR e AND. No caso da OR somente a estrutura de um acoplador com um SOA é necessária para gerar tal porta.

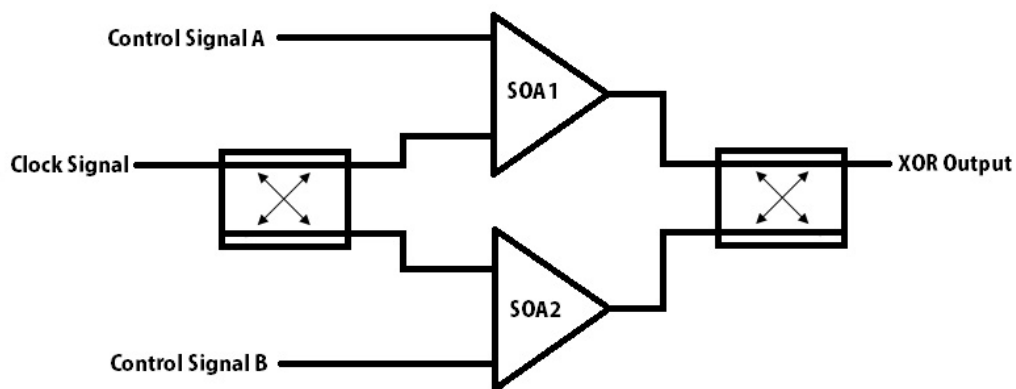
Figura 11: Esquemático do MZI com SOA para cada braço do interferômetro.



Fonte: Kumar, Kumar & Raghuwanshi (2013).

No trabalho Mehra, Jaiwal & Dixit (2013) é utilizado o software OptiSystem 7.0 para implementar uma estrutura correspondente ao da simulação Kumar, Kumar & Raghuwanshi (2013), mas os sinais das entradas são conectados aos amplificadores (SOA1 e SOA2) de cada braço, diferente da estrutura do artigo anterior. E o sinal de controle (Clock Signal) é inserido no primeiro acoplador do interferômetro, Figura 12. Somente a porta lógica XOR é encontrada.

Figura 12: MZI com SOA em cada braço e as entradas conectadas em cada SOA

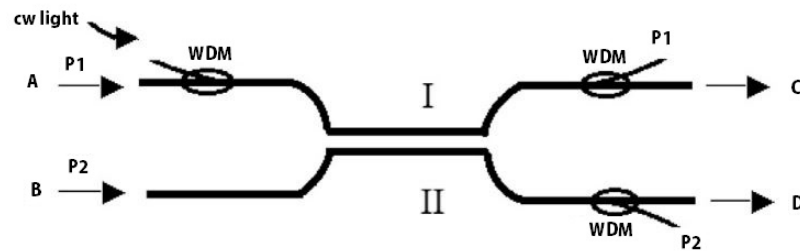


Fonte: Mehra, Jaiwal & Dixit (2013).

Em Li *et al.* (2015) portas lógicas são geradas através do uso de um acoplador assimétrico não linear. A entrada, sinal P1 (sinal de bombeamento), é integrada ao um sinal de onda contínua (CW) através de um WDM (*Wavelength-division Multiplex* - multiplexação por divisão de comprimento de onda). O sinal resultante é interagido

com o sinal da entrada P2 no acoplador e através de XPM tem-se a geração de porta lógica. A Figura 13 demonstra a estrutura utilizada no artigo. O efeito XPM atua como limitador, dependendo da potência do bombeamento. Diferente dos outros artigos apresentados, o trabalho Li *et al.* (2015) não utiliza o interferômetro Mach-Zehnder para geração de portas, somente um acoplador se faz necessário.

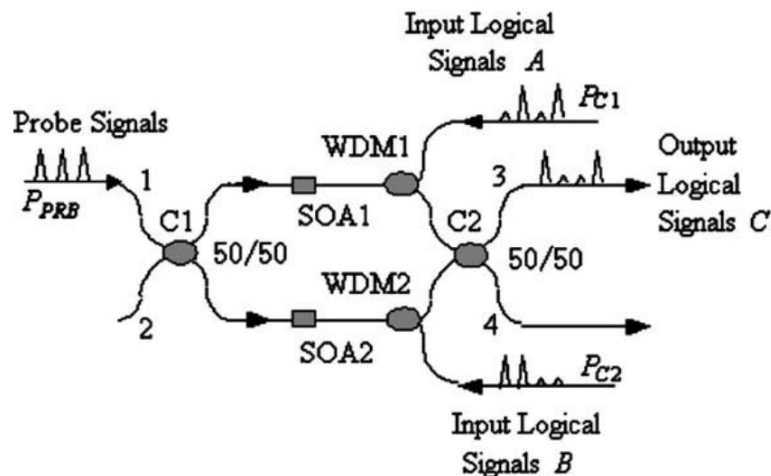
Figura 13: Acoplador assimétrico não linear



Fonte: Li *et al.* (2015).

Em Zhang *et al.* (2003), há geração da porta XOR através de sinais das entradas (Pc1 e Pc2) contra-propagantes no interferômetro Mach-Zehnder com dois SOA em cada braço do MZI. Um sinal de clock (Pprb) é entrada do MZI e depois do primeiro acoplador (50:50), os sinais passam por um SOA e WDM. No WDM os sinais de cada braço interagem com as entradas (A e B) e ambos os resultados passam pelo segundo acoplador (50:50). As entradas da porta lógica (A e B) são integrados de forma contra-propagante ao MZI através de um WDM. Na saída do MZI (C) encontra-se a porta lógica XOR.

Figura 14: Estrutura MZI com WDM e SOA em cada braço



Fonte: Zhang *et al.* (2003).

É possível obter portas lógicas com a utilização do interferômetro Mach-Zehnder e a aplicação de efeitos não lineares (KUMAR; KUMAR; RAGHUWANSHI, 2013) e (LI *et al.*, 2015). No caso do trabalho de Kumar, Kumar & Raghuwanshi (2014), tem-se que com a alteração do índice de refração obtêm-se portas XOR, NXOR e AND.

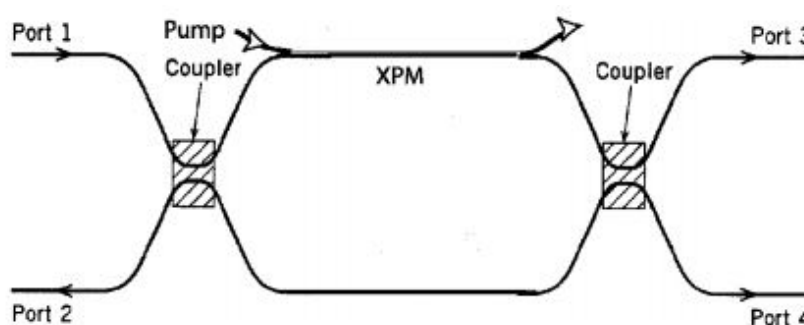
Nesta dissertação, o interferômetro Mach-Zehnder e efeitos não lineares são utilizados, através da alteração do índice de refração não linear da fibra do MZI, para gerar portas lógicas. O parâmetro $\bar{n}_2$ é alterado a fim de se obter a porta desejada.

INTERFERÔMETRO MACH-ZEHNDER

4.1 Introdução

O interferômetro Mach-Zehnder (IMZI - *Mach-Zehnder Interferometer*) é uma estrutura capaz de causar interferência entre sinais de luz, originando um padrão chamado de interferometria. É possível criar uma estrutura de MZI através de dois acopladores conectados de forma sequencial, ou seja, cada saída do primeiro acoplador é conectada a entrada do segundo acoplador através de duas fibras. Cada fibra que conecta os acopladores são chamadas de braço. Para se gerar a interferometria se faz necessário alterar a estrutura do MZI, um exemplo de alteração é modificar um dos braços e causar efeito modulação de fase cruzada (XPM), visto na Figura 15 (AGRAWAL, 2004). Também pode-se utilizar as duas fibra com tamanhos diferentes (causando deslocamento de fase) (AGRAWAL, 2001), utilizar grades em ambas as fibras, entre outras alterações. Na Figura 15 tem-se as saídas do MZI representadas como: Port 3 = saída bar e port 4 = saída cross, essa nomenclatura é utilizada na demonstração dos resultados.

Figura 15: Interferômetro Mach-Zehnder



Fonte:(AGRAWAL, 2004).

Interferômetros Mach-Zehnder são tipicamente construídos em óptica integrada e consistem em dois acopladores direcionais 3 dB interligados através de duas fibras de comprimentos diferentes. Do ponto de vista estrutural, a construção do substrato é geralmente de silício, e as regiões do guia de ondas e revestimento são a sílica (SiO_2). Interferômetros Mach-Zehnder são úteis como filtros e multiplexadores/demultiplexadores. Por exemplo, MZIs podem ser usados para separar os comprimentos de onda na banda de 1,3 e 1,55 nm. Para banda estreita os filtros de MZI são fabricados com cascadeamento em uma série de etapas e isso leva a perdas maiores (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2009).

4.2 Equação não-linear generalizada de Schrödinger

Para descrever a propagação de pulso eletromagnético na fibra óptica, utiliza-se a equação não-linear generalizada de Schrödinger (ENLGS). Nessa seção é apresentada a ENLGS trabalhando na fibra e em seguida no acoplador.

4.2.1 Fibra óptica

No caso da fibra óptica a equação é representada por:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \frac{1}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} + \frac{\alpha}{2} A = i\gamma A \left[|A|^2 + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial(|A|^2 A)}{\partial t} - T_R A \frac{\partial |A|^2}{\partial t} \right] \quad (4.1)$$

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

$$\gamma = \frac{2\pi\bar{n}_2}{A_{eff}\lambda}, \quad (4.2)$$

$\bar{n}_2$ é coeficiente de índice não linear [m^2W^{-1}], A_{eff} área efetiva do núcleo [μm^2] e λ comprimento de onda [μm]. Para pulso de largura temporal maior que 5 ps, os parâmetros $(\omega_0 T_0)^{-1}$ e T_R/T_0 são tão pequenos ($< 0,001$) que os dois últimos termos na Eq. 4.1 podem ser negligenciados (AGRAWAL, 2007). Neste trabalho, os pulsos

apresentados possuem largura temporal de 10 ps. Assim, a 4.1 se reduz a:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \frac{1}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} + \frac{\alpha}{2} A = i\gamma A |A|^2 \quad (4.3)$$

Neste trabalho, os parâmetros β_1 , β_2 , β_3 , α da equação 4.3 apresentam valor nulo. Pois, para todas as simulações realizadas os fatores dispersões e atenuação não afetam, somente a não linearidade atua na fibra do MZI.

4.2.2 Acoplador

Sabe-se que a equação 4.3 se aplica para a fibra, logo é possível utilizá-la para cada fibra do acoplador. Mas é necessário inserir um termo que represente a interação realizada na região de acoplamento e o efeito XPM (caso apresentado pela Figura 15). Assim, há uma ENLGS para cada saída de um acoplador, chamada de equação do modo acoplado. Para as saídas 1 e 2 da Figura 7 tem-se as equações:

$$\frac{\partial A_1}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A_1}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A_1}{\partial t^2} = iKA_2 + i\gamma(|A_1|^2 + \sigma|A_2|^2)A_1, \quad (4.4)$$

$$\frac{\partial A_2}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A_2}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A_2}{\partial t^2} = iKA_1 + i\gamma(|A_2|^2 + \sigma|A_1|^2)A_2, \quad (4.5)$$

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

No caso dos acopladores, eles são totalmente lineares e não dispersivos, logo os termos β_1 , β_2 e σ são levados a zero para as equações 4.4 e 4.5.

4.3 Matriz de transferência do Interferômetro Mach-Zehnder

Para a situação do MZI da Figura 15, são utilizadas as equações 4.6 e 4.7 como sinais de entrada para o segundo acoplador. Note que o sinal propagado pelo braço bar sofre efeito XPM, logo esse mesmo sinal irá entrar no segundo acoplador como:

$$A_1 = \sqrt{\rho_1} A_0 \exp(i\beta_1 L_1 + i\rho_1 \gamma |A_0|^2 L_1). \quad (4.6)$$

No caso do sinal entrando pela porta inferior do segundo acoplador, tem-se:

$$A_2 = i\sqrt{1-\rho_1} A_0 \exp[i\beta_2 L_2 + i(1-\rho_1)\gamma |A_0|^2 L_1]. \quad (4.7)$$

Para ambas as equações, L_1 e L_2 são os comprimentos dos braços, β_1 e β_2 são as constantes de propagação (valores diferentes dos β expressos nas equações 4.1, 4.3, 4.4 e 4.5) e ρ_1 e ρ_2 são as frações de divisão de potência nos acopladores. Assim, semelhante ao procedimento no acoplador, é possível definir uma matriz de transferência (4.8) para o MZI, expressa por:

$$\begin{pmatrix} A_3 \\ A_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{\rho_2} & i\sqrt{1-\rho_2} \\ i\sqrt{1-\rho_2} & \sqrt{\rho_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix}, \quad (4.8)$$

Para a simulação presente neste trabalho, somente a entrada do acoplador conectada ao braço superior apresenta não linearidade e para ambos não há variação de fase e amplitude. Logo, para equações 4.6 e 4.7 os termos β_1 e β_2 , respectivamente, são desconsiderados

INTERFERÔMETRO MACH-ZEHNDER PARA GERAÇÃO DE FUNÇÕES LÓGICAS

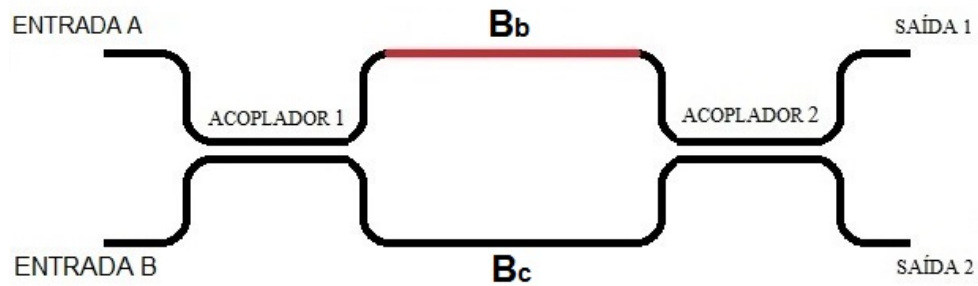
5.1 Introdução

Como visto no Capítulo 3, é possível gerar portas lógicas totalmente ópticas através do interferômetro Mach-Zehnder. E esse objetivo pode ser alcançado se for utilizado determinados efeitos não lineares nas fibras do MZI. Nesse capítulo um MZI com a alteração de um parâmetro, o qual gera os efeitos não lineares, é proposto. Depois, uma simulação será implementada para ambos os software Matlab e OptiSystem e seus resultados são comparados. Em seguida, as simulações para gerações de portas lógicas são implementadas.

Com objetivo de construir funções lógicas (portas lógicas e circuitos somadores) é proposto a utilização de um Interferômetro Mach-Zehnder (MZI). O modelo proposto é apresentado na Figura 16 onde se tem as entradas (A e B), os acopladores (1 e 2), um braço BAR (Bb) com o seu índice de refração não linear alterado e um braço CROSS (Bc) com as características inalteradas. Além das saída 1 (BAR) e saída 2 (CROSS). No MZI são aplicados dois sinais nas entradas (A e B), passando pelo acoplador (Acoplador 1), separando-se para cada braço. Depois cada fibra se encontra em outro acoplador (Acoplador 2) e em seguida novamente se dividindo em direção as saídas 1 e 2. Todas as etapas citadas são mostradas na estrutura que define um MZI, a Figura 16.

Para realizar as simulações é utilizado o software OptiSystem versão 13. De acordo com a Optiwave, desenvolvedora do programa, "OptiSystem é um software abrangente de design que permite aos usuários planejar, testar e simular links ópticos na camada de transmissão das modernas redes ópticas". Com objetivo de verificar a fidelidade do software, realizou-se uma comparação entre os resultados obtidos pelo OptiSystem e Matlab. Nos quais foram considerados, para ambas as condições, os

Figura 16: MZI proposto



Fonte: Elaborado pelo autor.

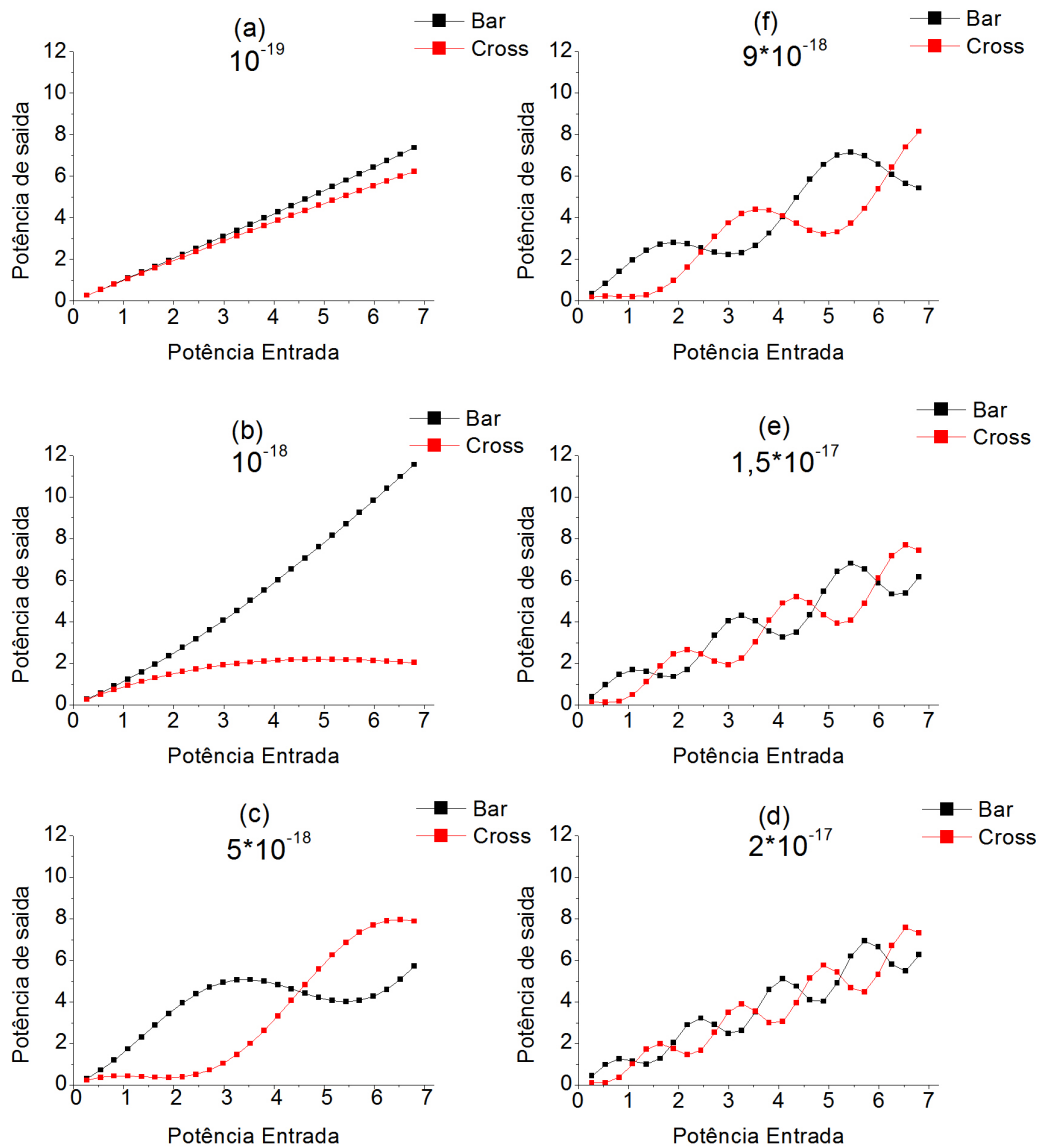
mesmos parâmetros de simulação. Posteriormente, adotou-se o OptiSystem para as demais simulações geradoras das funções lógicas totalmente ópticas, pois apresentou melhor facilidade de uso quanto a criação da estrutura MZI e seus cascadeamentos.

Com objetivo de verificar quando ocorre o processo de chaveamento no MZI, realizou-se seis simulações, variando o coeficiente de índice não linear no braço bar do MZI. Para cada simulação foram inseridas nas entradas dois pulsos secante hiperbólico variando sua potência de pico de 1 a 25 W. Na Figura 17 são apresentadas as potências de saída (bar e cross) pela entrada para estes diferentes coeficientes de índices não lineares.

Observa-se que nas Figuras 17a e 17b não há o processo de chaveamento de potências, tendo em vista que as linhas não se cruzam. Porém nas Figuras 17c a 17f o processo de chaveamento é perceptível, e o primeiro processo de chaveamento ocorre a partir do valor de $\bar{n}_2 = 5 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ (Figura 17c). Para nossa simulação comparativa selecionamos o valor para o coeficiente de índice de não linear igual $9 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$.

5.2 Simulação comparativa Matlab e OptiSystem

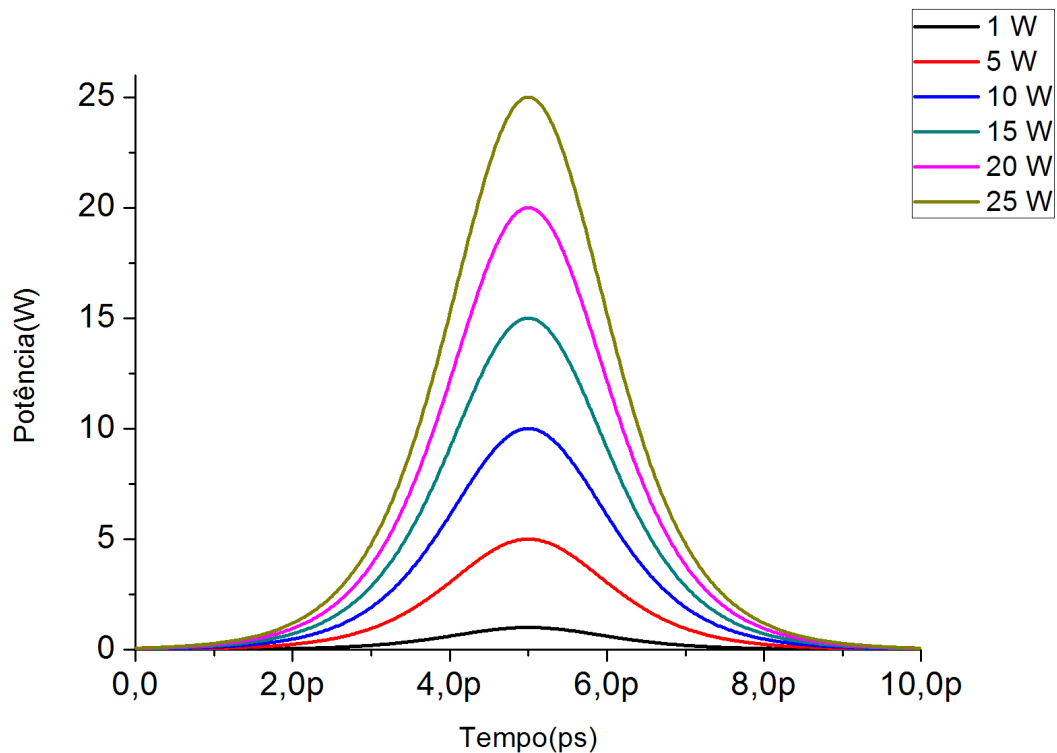
Na simulação comparativa são desenvolvidas a estruturas de um MZI no Matlab e OptiSystem, para ambos foram inseridas as mesmas variáveis e valores dos parâmetros. Em ambos os casos utiliza-se pulso secante hiperbólico variando sua potência de pico de 1W a 25 W, apresentada na Figura 18, com largura temporal de 10 ps e largura a meia altura (FWHM - *Full Width at Half Maximum*) de 2,4 ps. É importante ressaltar que houve a variação da potência de pico e não da potência

Figura 17: Variação do coeficiente de índice não linear - MZI

média, pois o OptiSystem utiliza a potência de pico como único parâmetro para gerar o sinal.

A respeito da Figura 18 e o pulso de 25 W, tem-se que este apresenta uma potência de pico, ou seja, a maior potência transmitida pelo pulso, de 25 W. Diferente do valor de potência média, que para esse mesmo sinal, apresenta o valor de 6,79 W.

Neste trabalho as simulações são categorizadas através dos valores de potência de pico do pulso de entrada. Pois nesta dissertação irá se trabalhar com dois formatos de pulsos diferentes, mas ambos os pulsos possuem os mesmos valores de potência de pico.

Figura 18: Pulso secante hiperbólico - Potência de pico 1, 5, 10, 15, 20 e 25 W

Na Tabela 2 encontram-se todas as características presentes em ambas as simulações e na Figura 19 apresenta-se o gráfico das potências de entrada pela saída da resposta dos pulsos de entrada no MZI de ambos os programas.

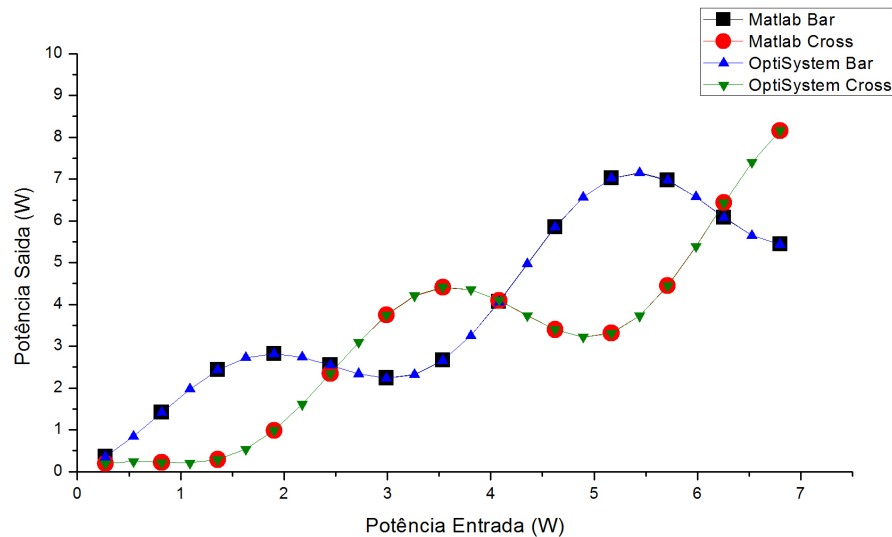
Tabela 2: Dados de simulação no Matlab e OptiSystem com MZI

Característica	Valor
Coef. acoplamento (ambos)	50 : 50 ou 3 dB
Comprimento dos braços	1 m
Efeitos não lineares	SPM
Dispersão de 2 ^a e 3 ^a ordens	Não há
Coefficiente de não linearidade ($\bar{n}_2$)	$9 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$
Comprimento de onda	1550 nm
Área efetiva da fibra	$80 \mu\text{m}^2$
Largura temporal pulso	10 ps
<i>FWHM</i>	2,4 ps

No gráfico comparativo (Figura 19) encontram-se quatro curvas, duas para cada saída (Bar e Cross) de ambos os programas. Observa-se que os valores das potência de entrada não variam de 1 W até 25 W, somente até 6.79 W. Pois os valores de potência desse gráfico são os fornecidos pelo medidor de potência, ou seja, apresenta

a potência média, diferente da potência de pico.

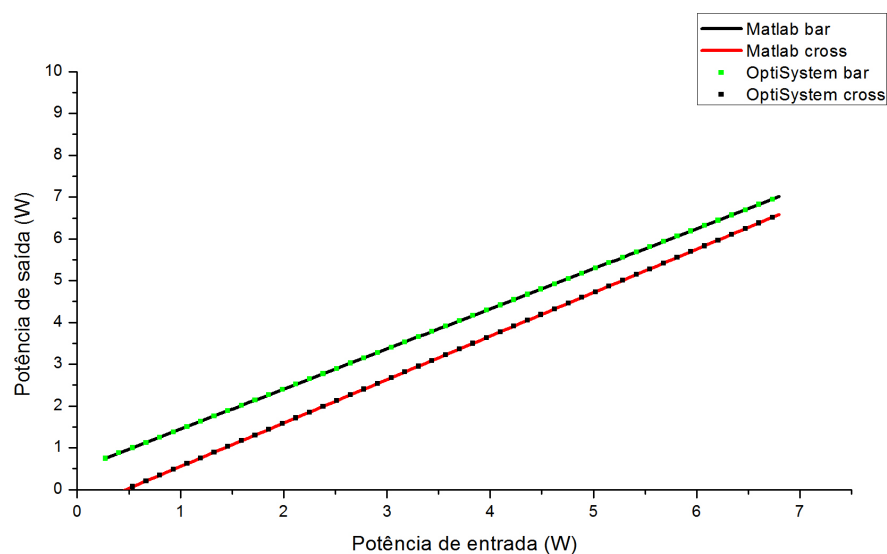
Figura 19: Comprativo Matlab X OptiSystem



Na Figura 20 são representadas as retas da regressão linear das saídas bar e cross de ambos os programas da simulação comparativa. Nota-se que ambos os fit das saídas (bar e cross) dos programas são iguais, assim como o gráfico das potências de saída.

Nota-se que as curvas são similares, ou seja, ambas os resultados das saídas apresentaram os mesmos valores. Comprovando a eficácia e confiabilidade do software OptiSystem 13 para as simulações deste trabalho.

Figura 20: Fit linear - Comparativo Matlab X OptiSystem

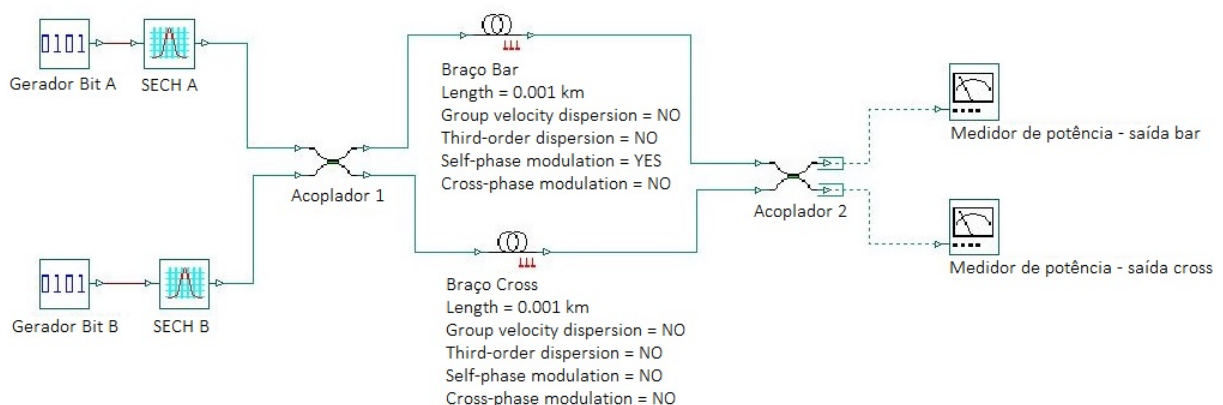


5.3 Simulação porta lógica e meio somador (MS)

Nesta seção somente o OptiSystem 13 foi utilizado nas simulações. E resumindo algumas funções presentes no software, tem-se que ele possibilita o planejamento, teste e simulação de links ópticos. Sobre o planejamento, tem-se que o usuário define quais dispositivos (elemento da simulação) irá utilizar. No qual cada dispositivo possui seu bloco já criado no software. Esse bloco é posicionado em uma área de trabalho e após todos os elementos serem dispostos é necessário interconectá-los. A respeito dos testes, tem-se a possibilidade de criar ou recriar sistemas ópticos e testá-los. Já a respeito da simulação é possível alterar até dezenas de parâmetros para cada dispositivo presente em uma estrutura. Assim, para essa mesma estrutura criada através do posicionamento dos blocos e suas devidas conexões, pode-se variar algum parâmetro e gerar novas simulações.

Sobre os componentes da estrutura simples (um MZI), são eles: dois geradores de bits e pulso secante hiperbólico, dois acopladores e duas fibras. Um gerador de bits é conectado a um criador de pulso secante hiperbólico e esses são interligadas a cada fibra do primeiro acoplador. As saídas do primeiro acoplador são conectadas às duas fibras e essas são conectadas no segundo acoplador. Na Figura 21 tem-se o esquemático estrutural dos blocos já montados (representação no OptiSystem 13).

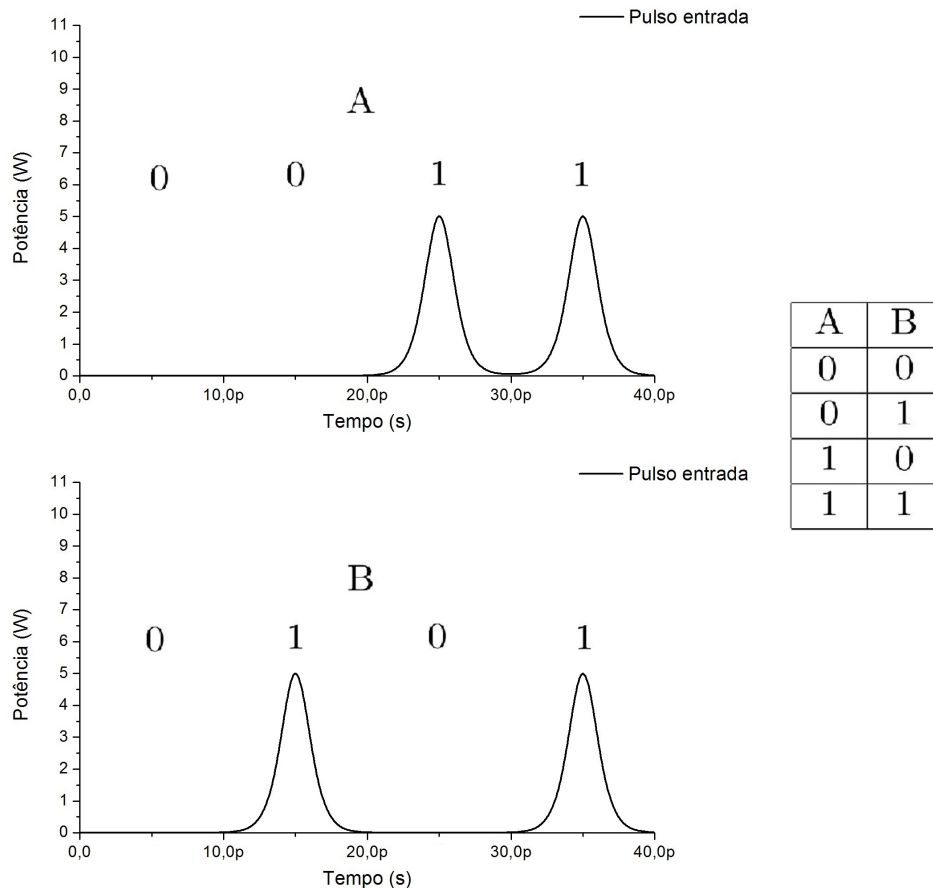
Figura 21: MZI com braço não linear no OptiSystem 13



Nesta simulação, o pulso secante hiperbólico é representado pelo bit 1, logo a ausência de pulso significa o valor 0, ou seja, está se trabalhando com uma modulação ASK (*Amplitude Shift Keying*) tipo OOK (*On-Off Keying*). Na Figura 22 tem-se dois tipos de sinais representado conjunto de bits 0 e 1, nos quais são as quatro variações das entradas na simulação.

Na Figura 22 são representados as entradas $A = [(0),(0),(1) \text{ e } (1)]$ e $B = [(0),(1),(0) \text{ e } (1)]$, ambos sendo equivalentes, de forma temporal, as entradas $[(0,0),(0,1),(1,0) \text{ e } (1,1)]$.

Figura 22: Sinais das entradas A e B



Para se conseguir a estrutura de MZI, no qual somente um parâmetro variasse, foi desenvolvido um primeiro esquemático igual o da simulação comparativa. São analisados as duas saídas quanto à taxa de extinção e potência. Na próxima seção aborda-se todos esses conceitos citados.

5.3.1 Taxa de extinção - XRatio (dB) e figura de mérito (dB)

Nesta seção os parâmetros taxa de extinção e figura de mérito (FOMELG - *figure-of-merit of the logic gates*) são apresentados para melhor compreensão das implementações realizadas com MZI na obtenção de portas lógicas. No caso, a taxa ou coeficiente de extinção é representado como a razão entre as energias de saídas dos dois estados na modulação OOK (*On-Off Keying*). Essa razão entre energias é expressa em dB (decibel) e nas expressões 5.1 e 5.2 tem-se sua forma calculada

numericamente, denominada de XRatio (dB), a partir das saídas bar e cross, sendo que para a saída bar ela é expressada por:

$$XRatio_{Bar/Cross}(dB) = 10\log_{10} \left[\frac{\int_{-\infty}^{\infty} |bar(t)|^2 dt}{\int_{-\infty}^{\infty} |cross(t)|^2 dt} \right] \quad (5.1)$$

e para a saída cross tem-se a equação 5.2:

$$XRatio_{Cross/Bar}(dB) = 10\log_{10} \left[\frac{\int_{-\infty}^{\infty} |cross(t)|^2 dt}{\int_{-\infty}^{\infty} |bar(t)|^2 dt} \right] \quad (5.2)$$

Para a análise dos resultados desta dissertação é utilizado o conceito de taxa de extinção de forma análoga. Em vez de se trabalhar com energia, é utilizado o valor da potência média do sinal. Outra alteração realizado é a forma de se trabalhar com a análise entre as duas saídas (bar e cross), diferente de se utilizar os dois estados da modulação OOK. Ou seja, ao invés de se utilizar os estados lógicos zero e um da modulação OOK, são utilizadas as saídas bar e cross. Dessa maneira é mais fácil identificar onde se encontra a maior concentração de potência média do meu sinal, ou seja, quanto maior meu valor de XRatio mais potência eu tenho naquela saída. Assim, as equações 5.1 e 5.2 são escritas, respectivamente, como:

$$XRatio_{Bar/Cross}(dB) = 10\log_{10} \left[\frac{Pm_{bar}}{Pm_{cross}} \right], \quad (5.3)$$

$$XRatio_{Cross/Bar}(dB) = 10\log_{10} \left[\frac{Pm_{cross}}{Pm_{bar}} \right], \quad (5.4)$$

onde Pm_{bar} e Pm_{cross} são as potências média bar e cross, respectivamente.

Note que o fato de ser uma relação entre dois sinais no qual a diferença presente nas expressões mostradas é a inversão das potências que constituem a fração. Ou seja, o resultado de ambas as XRatio são simétricos. Lembrando que para cada entrada [(0,0), (0,1), (1,0) e (1,1)] são geradas duas saídas onde cada uma tem sua taxa de extinção.

No caso de se realizar uma comparação de desempenho entre as portas lógicas o parâmetro figura de mérito (FOMELG) é utilizado. Esse sendo definido como

somatório dos módulos para cada coeficiente extinção das saídas [(0,0), (0,1), (1,0) e (1,1)]. Quanto maior o valor mais satisfatória a porta lógica, logo a porta de melhor desempenho é a de maior FOMELG. A representação numérica é dada pela expressão:

$$FOMELG(dB) = |XRatio_{(0,0)}| + |XRatio_{(0,1)}| + |XRatio_{(1,0)}| + |XRatio_{(1,1)}|. \quad (5.5)$$

E para todos os casos encontrados neste trabalho o valor de $XRatio_{(0,0)}$ pode ser desconsiderado para o cálculo de FOMELG, pois não apresenta energia. Assim pode-se reduzir a equação 5.5 para:

$$FOMELG(dB) = |XRatio_{(0,1)}| + |XRatio_{(1,0)}| + |XRatio_{(1,1)}|. \quad (5.6)$$

Devido as taxas de extinções serem simétricas, o calculo de FOMELG para ambas as saídas serão iguais em módulo, bastando ser calculado somente uma vez.

5.3.2 Simulação - Acoplador 50:50 e variação da potência de pico

Para a primeira estrutura de simulação é utilizado um MZI com dois acopladores de 3 dB e lineares. Na entrada do sistema encontram-se pulsos secante hiperbólico, [(0,0), (0,1), (1,0) e (1,1)] modulado em OOK tendo sua potência de pico variando de 1 W até 6 W. Para cada potência de pico tem-se a propagação desse pulso pelo MZI proposto, o qual tem o coeficiente de índice não linear do braço bar variando de $5 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ até $5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$, fornecendo gráficos de potência e taxa de extinção. As características dessa simulação e do MZI proposta encontram-se na Tabela 3.

Após gerar resultados para pulsos com potências de pico de 1 W a 6 W, somente irá se analisar a resposta para o valor 5 W. Assim, todos os gráficos de potência, taxa de extinção e saída do pulsos são representados somente para a categoria de 5 W. Nos gráficos das Figuras 23 e 24 são apresentadas as $XRatio_{Bar/Cross}$ e $XRatio_{Cross/Bar}$, respectivamente.

Tabela 3: Dados de simulação no OptiSystem com MZI e acoplador 50:50

Característica	Valor
Coef. acoplamento (ambos)	50 : 50 ou 3 dB
Comprimento dos braços	1 m
Efeitos não lineares	<i>SPM</i>
Dispersão de 2 ^a e 3 ^a ordens	Não há
Potência de pico	1 W a 6 W
Coeficiente de não linearidade ($\bar{n}_2$)	$5 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ até $5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$
Comprimento de onda	1550 nm
Área efetiva da fibra	$80 \mu\text{m}^2$
Largura temporal pulso	10 ps
<i>FWHM</i>	2,4 ps
Modulação do pulso	OOK

Os gráficos de resultado apresentam quatro curvas possíveis para entradas de [(0,0), (0,1), (1,0) e (1,1)] variando o $\bar{n}_2$ de $5 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ até $5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$. A leitura desse gráfico se faz análogo aos níveis lógicos 0 ou 1, no qual o valor positivo representa o nível 1 (bit 1) e os valores menores ou iguais a 0 o nível 0 (bit 0). Como exemplo tem-se a Figura 23 para o valor $\bar{n}_2 = 1,8 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ as saídas [(0,0), (0,1) e (1,0)] apresentando valor 0 e a saída (1,1) o valor 1, estados relativos a porta lógica AND.

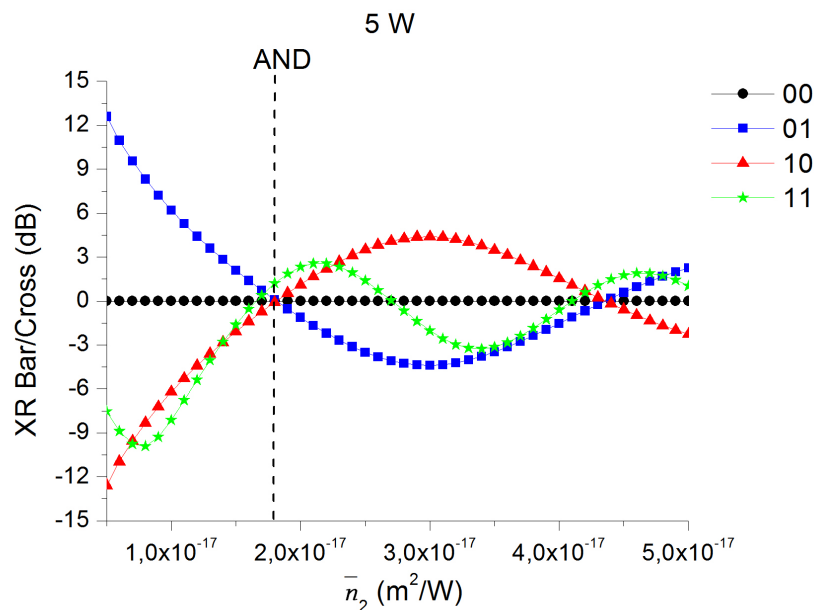
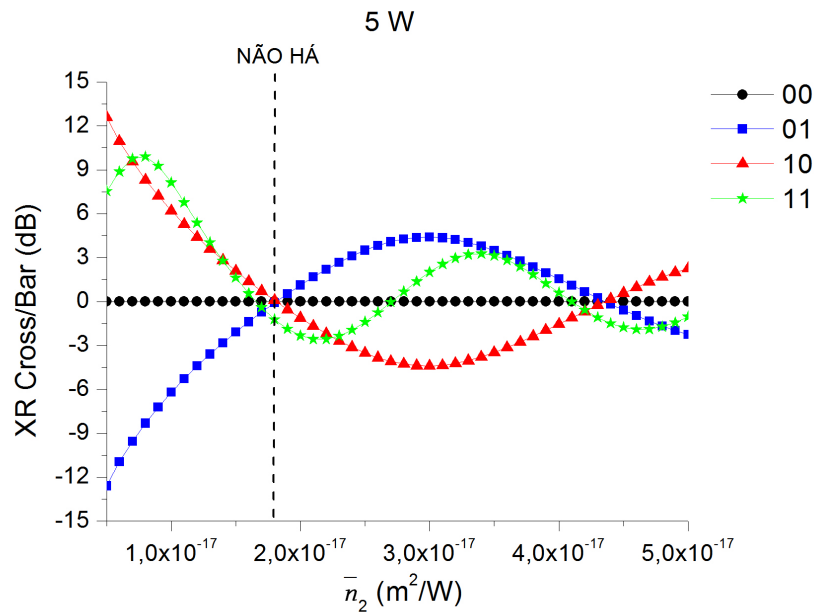
Figura 23: $XR_{\text{Bar/Cross}}$, coeficiente de acoplamento = 50:50, variações de potência de pico e $\bar{n}_2$ 

Figura 24: $XRatio_{CROSS/BAR}$, coeficiente de acoplamento = 50:50, variações de potência de pico e $\bar{n}_2$



Note que há uma simetria entre as duas curvas (0,1) e (1,0), ou seja, quando uma dessas curvas é positiva a outra é negativa e o contrário também ocorre. Esse fato indica uma porta lógica em que as saídas para [(0,1), (1,0)] seriam opostas. Ou seja, indicando saídas que nenhuma porta lógica possui. Mas ao observar as curvas, nota-se que somente nos pontos de interseção dessas curvas tem-se ambos os valores em 0. Logo, se em algum desses pontos (dependendo da potência) o valor de (1,1) for nível lógico 1 tem-se uma porta lógica AND para aquele $\bar{n}_2$ específico. Por exemplo, no gráfico da Figura 23 para a potência de pico 5 W e $\bar{n}_2 = 1,8 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ tem-se a representação de uma porta lógica AND referente a tabela da Figura 25 e seu valor de $FOMELG$.

Figura 25: Tabela verdade para porta AND (a) e $FOMELG$ (b)

(a)			(b)	
A	B	S		
0	0	0	$FOMELG = XRatio_{(0,1)} + XRatio_{(1,0)} + XRatio_{(1,1)} $ $FOMELG = 0 + 0 + 1,21$ $FOMELG = 1,21\text{dB}$	
0	1	0		
1	0	0		
1	1	1		

Além da $XRatio$, os gráficos com as potências dos sinais das saídas bar e cross são mostradas nas Figuras 26 e 27, respectivamente. Note que também há uma

simetria entre as duas saídas [(0,1),(1,0)] e que os pontos de interseção das curvas apresentam os mesmos valores de $\bar{n}_2$ dos gráficos de XRatio. Há também a tabela 4 com os valores de FOMELG e potência para cada saída do sistema MZI.

Figura 26: $Potncia_{BAR}$, coeficiente de acoplamento = 50:50, variações de potência de pico e $\bar{n}_2$

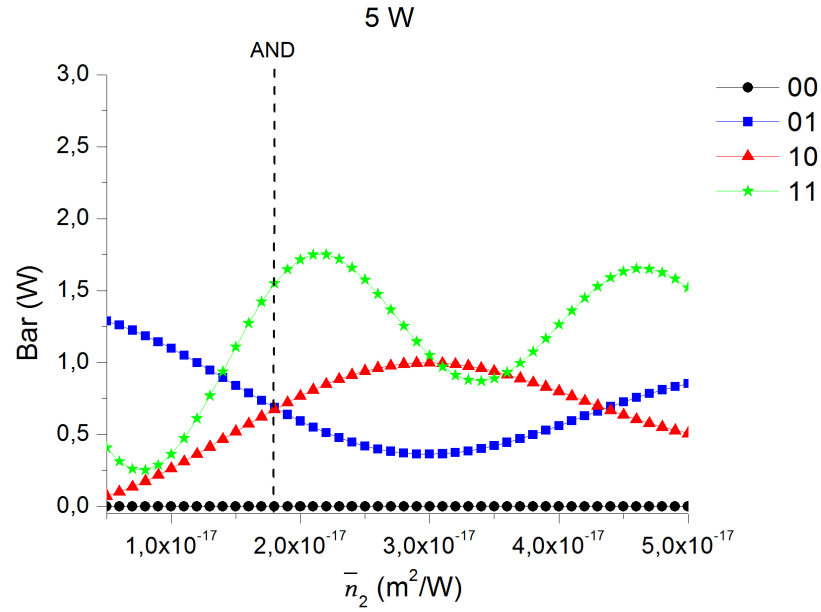
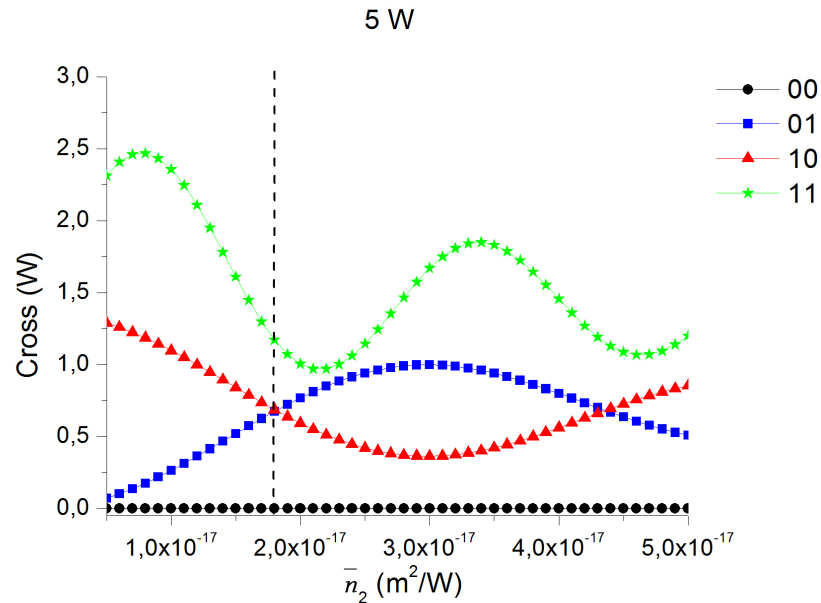


Figura 27: $Potncia_{CROSS}$, coeficiente de acoplamento = 50:50, variações de potência de pico e $\bar{n}_2$



O fato de se poder definir que há uma porta lógica nos devidos valores de $\bar{n}_2$ é a determinação de uma potência referencial. No qual valores abaixo dessa potência são

definidos como bits 0 e os que se encontram acima são os bits 1. Como exemplo, para a saída do pulso com potência de pico 5 W pode determinada a potência média de 1 W como valor referencial, notado pela Tabela 4. Mas esse mesmo valor não satisfaz para o caso do limiar (nível) de potência de pico. Observe o pulso de saída para todas as entradas [(0,0), (0,1), (1,0) e (1,1)] (Figura 28), um valor de potência que poderia ser definido como limiar de potência de pico seria 6 W.

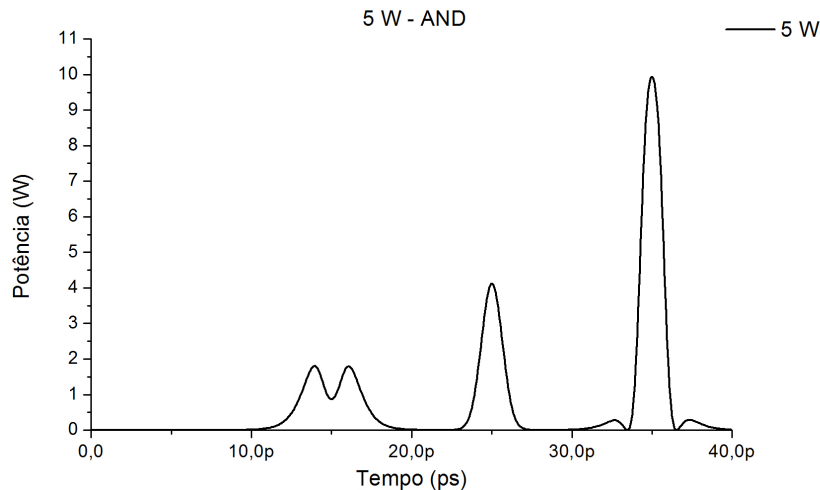
A Tabela 4 representa todos os valores de potência, coeficiente de índice não linear, tabela verdade para porta AND, potências dos sinais de saída bar, taxa de extinção bar/cross, nível lógico representativo dos valores de XRatio e FOMELG.

Tabela 4: Valores para simulação acoplador 50:50

Potência 5 W e $\bar{n}_2 = 1,8 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$					
TB			Pot Bar	XRatio(Bar/Cross)	NL
0	0	0	0	0	0
0	1	0	0,68	0	0
1	0	0	0,68	0	0
1	1	1	1,54	1,21	1
FOMELG				1,21 dB	

TB = Tabela Verdade, NL = Nível Lógico

Figura 28: Saída MZI para pulsos com potência de pico 5 W



Uma característica importante é observada na Figura 29, nota-se que a partir de 2 W tem-se porta lógica AND para determinados $\bar{n}_2$. E apresentam os mesmos valores de FOMELG para todas as potências de pico 2, 3, 4, 5 e 6 W (Tabela 5). Isso ocorre pelo fato do comportamento dos pulsos de saída serem todos iguais, variando somente sua magnitude (Figura 30). Assim, ao calcular os valores da figura de mérito para todas as potências em determinado $\bar{n}_2$ seu valor será constante.

Figura 29: $XRatio_{BAR/CROSS}$, coeficiente de acoplamento = 50:50, variações de potência de pico e $\bar{n}_2$

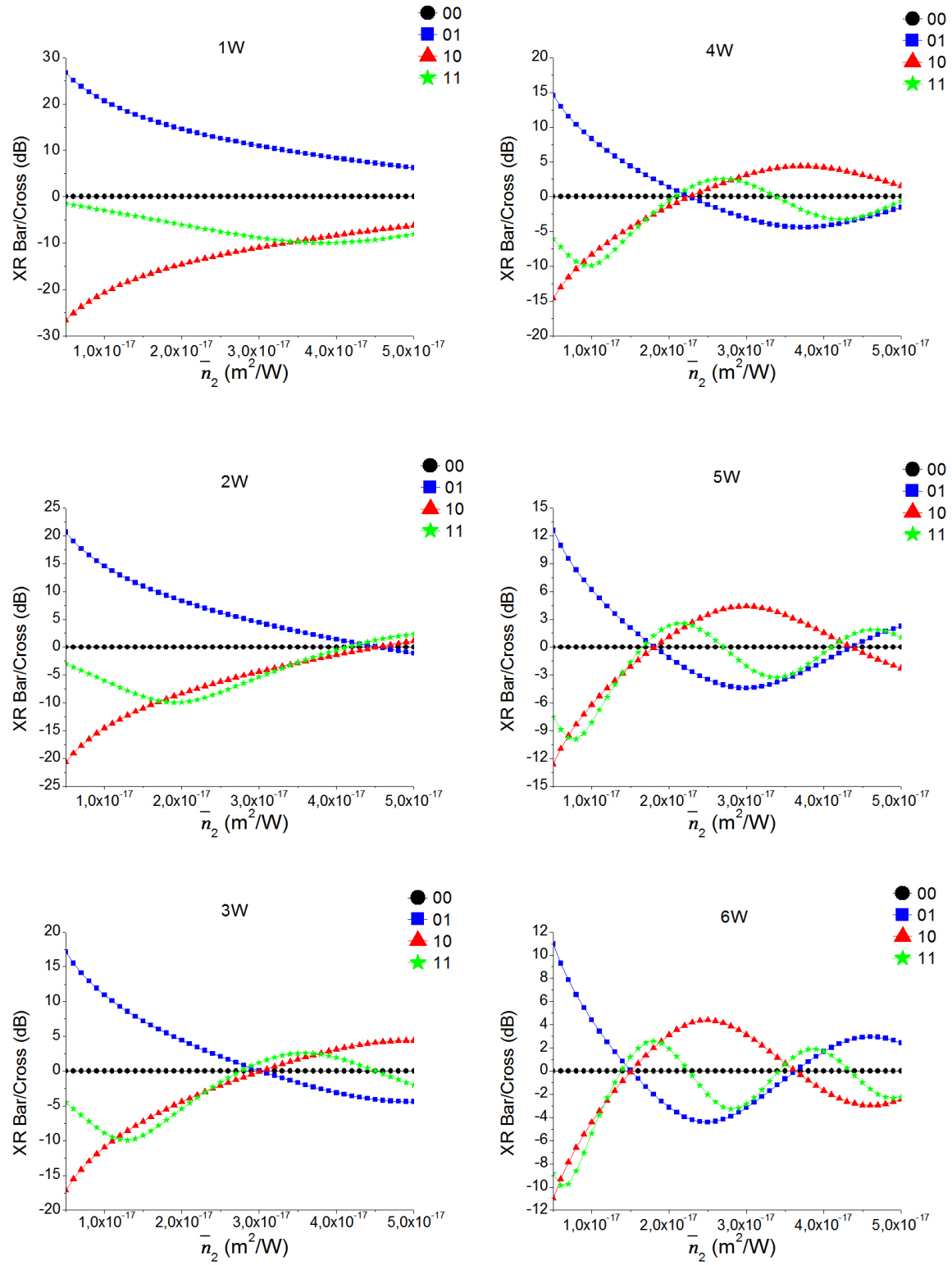
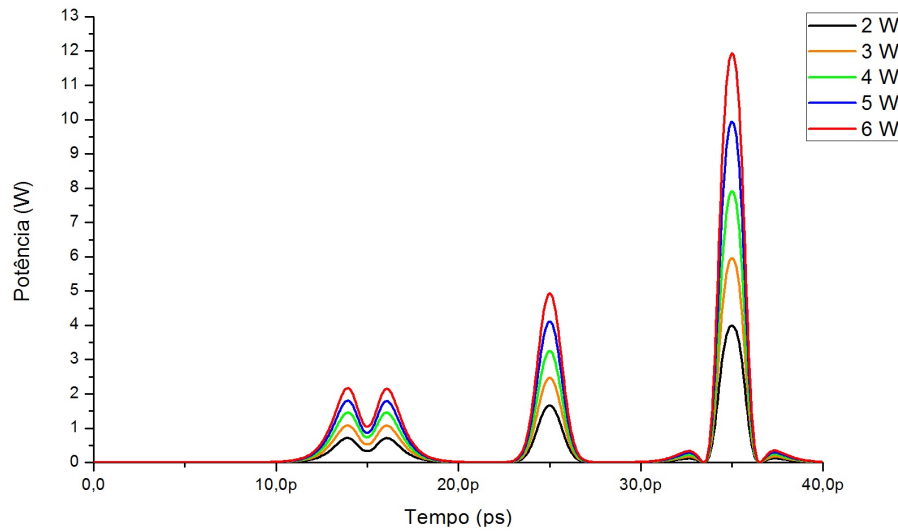


Figura 30: Saída MZI para pulsos com potência de pico 2, 3, 4, 5 e 6 W**Tabela 5:** Valores de $\bar{n}_2$ para suas potências de pico, potência média por $\bar{n}_2$ e FOLMEGL para porta AND

Potência de pico (W)	Potência média (W)	$\bar{n}_2$ (m^2W^{-1})	FOLMEGL (dB)
2	0,54	$4,5 \cdot 10^{-17}$	1,21
3	0,81	$3 \cdot 10^{-17}$	
4	1,08	$2,22 \cdot 10^{-17}$	
5	1,36	$1,8 \cdot 10^{-17}$	
6	1,63	$1,5 \cdot 10^{-17}$	

Para o esquemático da estrutura do MZI apresentado tem-se somente a porta lógica AND possível e com um FOLMEGL baixo, não significando uma porta muito eficiente. Outro fator que afeta a geração de outras portas é a relação entre as entradas [(0,1),(1,0)] serem opostas para a XRatio. Assim, se faz necessário a elaboração de outra estrutura em que essas curvas tenham taxa de extinção com mesmo sinal.

Através da Figura 29 observa-se o fato da potência do sinal de entrada ser diretamente proporcional ao número de chaveamentos da taxa de extinção, ou seja, quanto maior a potência mais chaveamentos ocorrem entre as curvas das taxas de extinções. Assim, tem-se que se somente uma dessas entradas [(0,1),(1,0)] fosse com potência menor, do que a outra, para a fibra bar, teria-se em algum $\bar{n}_2$ as XRatio [(0,1),(1,0)] com mesmo sinal (positivo ou negativo).

5.3.3 Simulação - Acoplador 0,2 e variação da potência de pico

Com objetivo de obter taxa de extinção ambas positivas ou negativas, para as saídas [(0,1) e (1,0)], é alterado o valor do coeficiente de acoplamento do primeiro acoplador da estrutura MZI. Logo, a divisão de energia não será igual para as saídas do primeiro acoplador, somente uma parte da energia de entrada irá para o braço bar. Como exemplo, tem-se o coeficiente de acoplamento de 0,4 (40:60) e o sinal de entrada do tipo (0,1). Para essa situação somente 40 % da energia do valor 1 irá para a fibra bar, pois o pulso 1 será a entrada B do sistema. Então o braço bar terá 40 % da energia do bit 1 e 60 % do bit 0. Na Tabela 6 há exemplos da relação do coeficiente de acoplamento com o braço bar do MZI proposto.

Tabela 6: Porcentagem de energia na fibra não-linear

Entrada	Coeficiente de acoplamento	Percentual energia (%) no braço bar
(0,1)	20:80	20 % de 1
	80:20	80 % de 1
(1,0)	20:80	80 % de 1
	80:20	20 % de 1

Lembrando que aumento da potência é diretamente proporcional ao número de chaveamentos (Figura 29). E o coeficiente de acoplamento afeta diretamente as potências no braço bar. Alterando seu valor, ocorre os chaveamentos de formas diferentes para as entrada [(0,1),(1,0)]. Proporcionando valores positivos ou negativos para taxa de extinção, o qual é fundamental para geração de todas as portas.

Nesta seção a simulação apresenta as mesmas características da Tabela 3, presente na simulação 50:50 (5.3.2 - pág. 48), mas o coeficiente de acoplamento do primeiro acoplador é diferente. O valor escolhido foi 20:80, pois apresentou melhor FOMELG dentre os parâmetros 10:90, 20:80, 30:70 e 40:60 gerados pela simulação. Essa simulação analisa as taxas de extinções para cada valor de coeficiente de acoplamento com um pulso de potência de pico 2 W nas entradas do MZI Figura 31 (XRatio bar/cross). São escolhidos determinados $\bar{n}_2$ para cada coeficiente de acoplamento e calculado seu valor de FOMELG. Na Tabela 7 há os valores de FOMELG e $\bar{n}_2$.

Após formular uma estrutura fixa do MZI é possível realizar as simulações para gerar portas lógicas e fornecer todas as variações de potência de pico e $\bar{n}_2$. Assim, gerando as figuras XRatio das portas bar/cross (Figura 32) e cross/bar (Figura 33) para o coeficiente de acoplamento do primeiro acoplador com valor 20:80. Nelas são

Tabela 7: Variação do coeficiente de acoplamento para um pulso de 2 W

Coef. de acop	$\bar{n}_2$ (m^2W^{-1})	FOMELG (dB)
10 : 90	$3,2 \cdot 10^{-17}$	11,67
20 : 80	$3,3 \cdot 10^{-17}$	12,81
30 : 70	$3,7 \cdot 10^{-17}$	9,88
40 : 60	$4 \cdot 10^{-17}$	4,85

mostradas para quais valores de $\bar{n}_2$ são encontradas as portas XOR, AND e OR para o pulso secante hiperbólico de potência de pico 5 W.

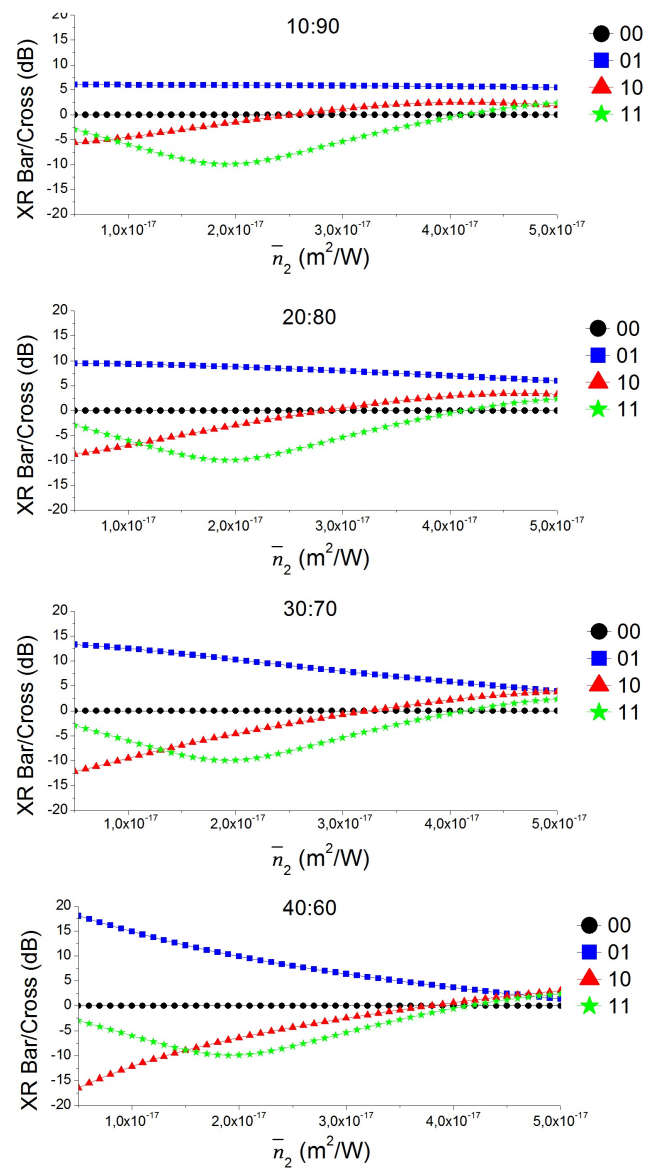
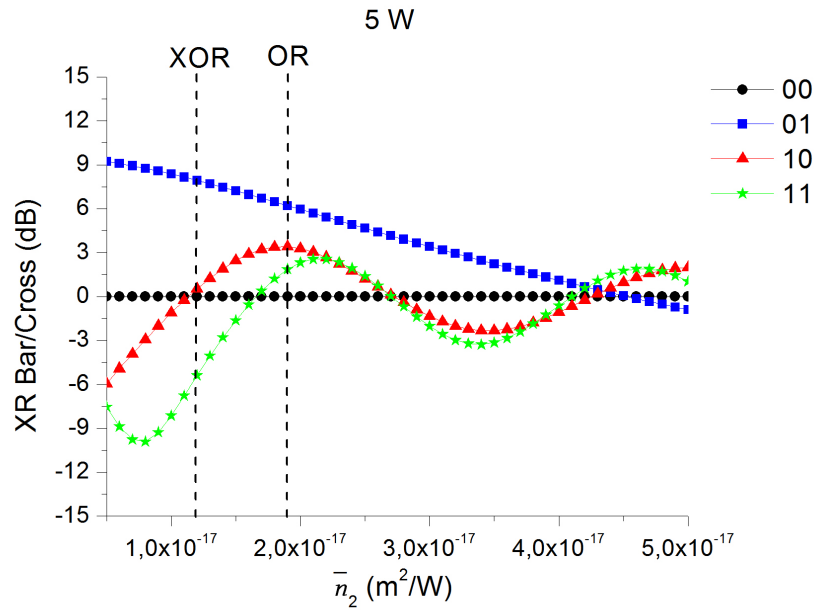
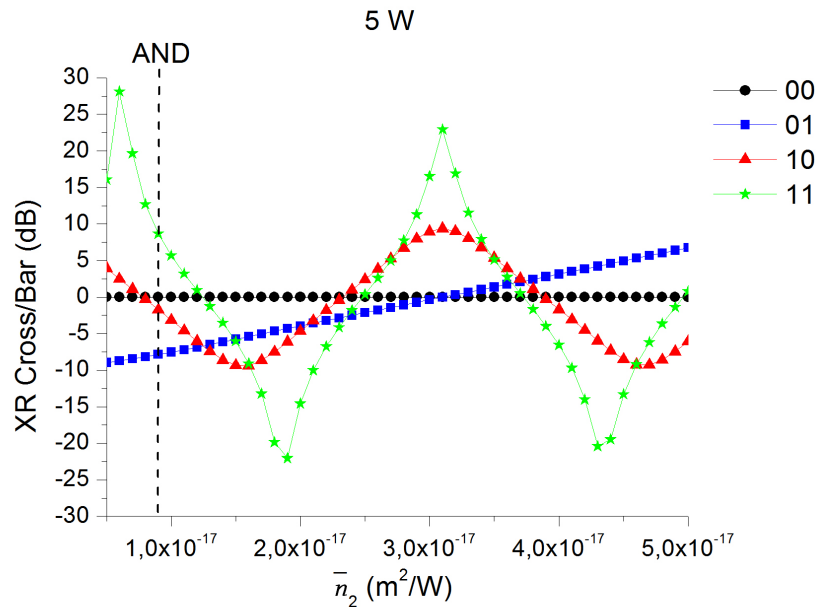
Figura 31: Variação do coeficiente de acoplamento para pulso de 2 W

Figura 32: $XRatio_{BAR/CROSS}$, coeficiente de acoplamento 0,2, variação da potência de pico e $\bar{n}_2$ **Figura 33:** $XRatio_{CROSS/BAR}$, coeficiente de acoplamento 0,2, variação da potência de pico e $\bar{n}_2$ 

Somente para as potências de pico 2 a 6 W tem-se portas lógicas em ambas as saídas, fato observado na Figura 34. Para um mesmo valor de $\bar{n}_2$ e potência média encontram-se porta XOR para saída bar e AND na cross. A porta lógica OR também é encontrada na saída bar com mesmo limiar de potência de pico, mas para valor diferente de $\bar{n}_2$. Na Tabela 8 encontram-se os valores de potência, $XRatio$ para saídas

[(0,0), (0,1), (1,0), (1,1)] e FOMELG para todas as portas encontradas. Nas Figuras 35 e 36 tem-se os gráficos das potências nas saídas bar e cross, respectivamente.

Figura 34: $XR_{Ratio_{BAR/CROSS}}$, coeficiente de acoplamento 20:80, variação da potência de pico e $\bar{n}_2$

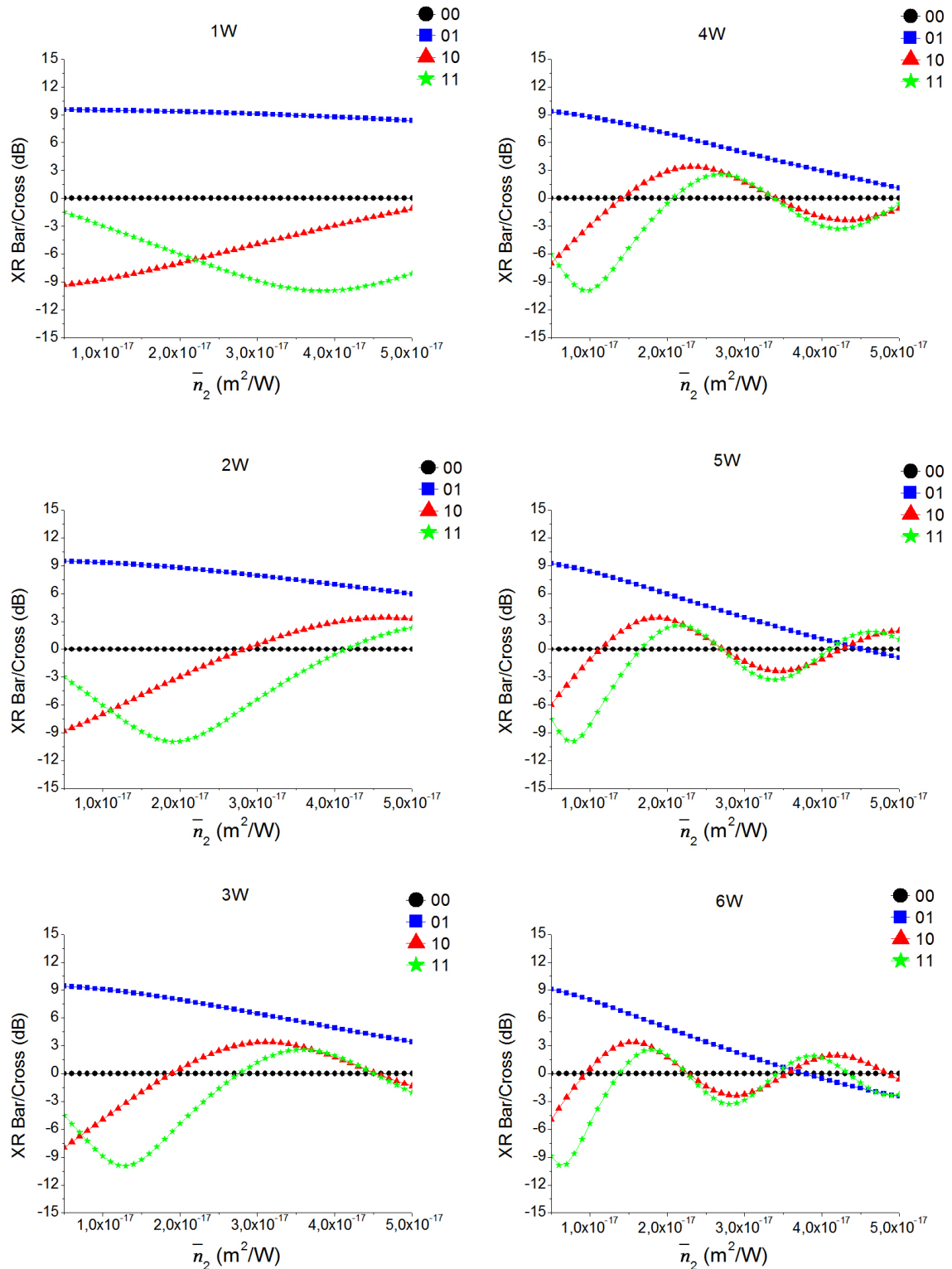


Tabela 8: Valores para simulação acoplador 20:80

Potência 5 W				$\bar{n}_2 = 1,2 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2 \text{ W}^{-1}$						$\bar{n}_2 = 1,9 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2 \text{ W}^{-1}$		
TB				Pot Bar	XR(B/C)	NL	Pot Cross	XR(C/B)	NL	Pot Bar	XR(B/C)	NL
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	1,17	7,93	1	0,18	-7,93	0	1,09	6,2	1
1	0	1	0	0,72	0,52	1	0,63	-0,52	0	0,93	3,4	1
1	1	0	1	0,61	-5,37	0	2,1	5,37	1	1,64	1,86	1
FOMELG				13,82 dB						11,38 dB		

TB = Tabela Verdade, NL = Nível Lógico, XR(B/C) = XRatio(Bar/Cross), XR(C/B) = XRatio(Cross/Bar)

Note que na primeira simulação com estrutura de acopladores 50:50 a porta AND, para todas as potências, manteve sua figura de mérito. Ou seja, não importando o aumento de potência a FOMELG continuava com mesmo valor. Esse mesmo fato ocorre para a geração das portas XOR e AND no esquemático do primeiro acoplador 20:80. As Figuras 37a e 37b representam as saídas bar e cross, respectivamente. Outro fato semelhante ao da primeira simulação é que o comportamento do pulso secante hiperbólico na saída não altera quando sua potência muda, ou seja, o formato do pulso se mantém para variações de potência de pico. Esse fato é confirmado pelo valor de FOMELG constante para todas as potências de pico.

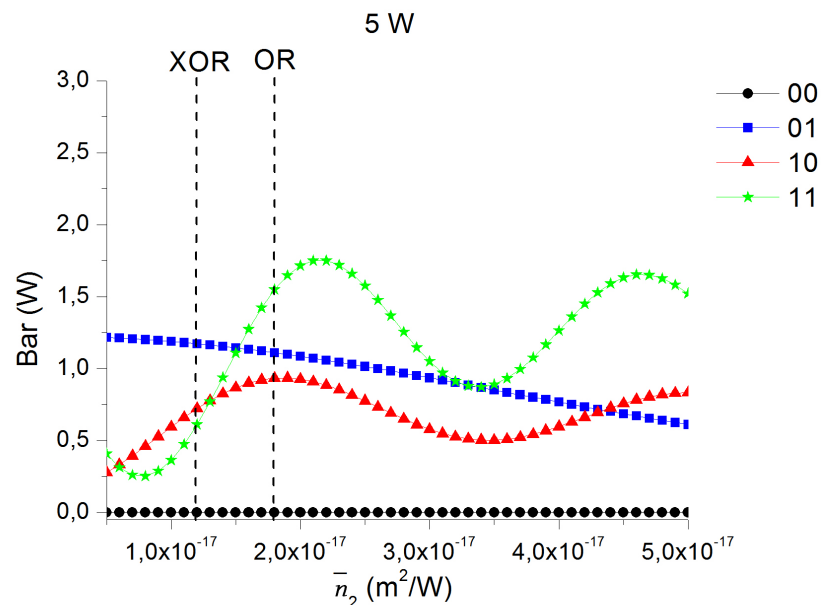
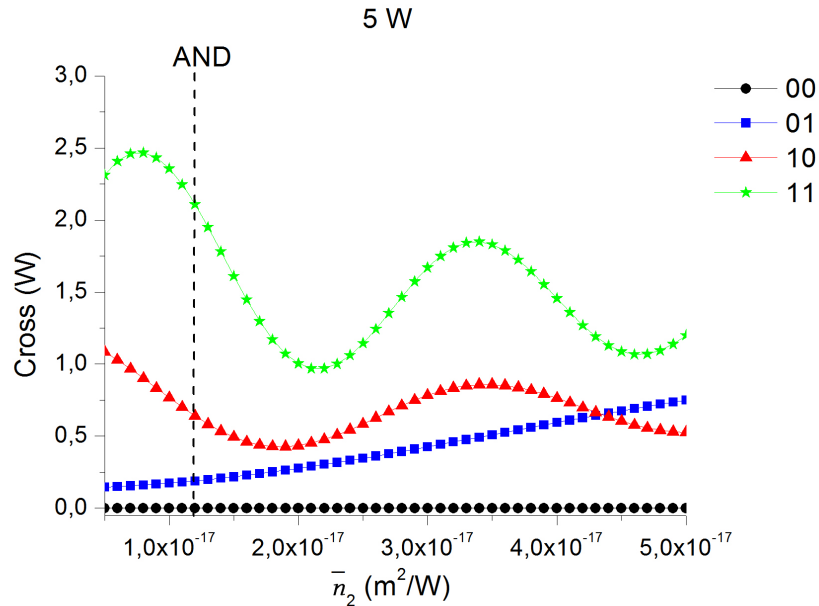
Figura 35: Potência bar, coeficiente de acoplamento = 20:80, variações de potência de pico e $\bar{n}_2$ 

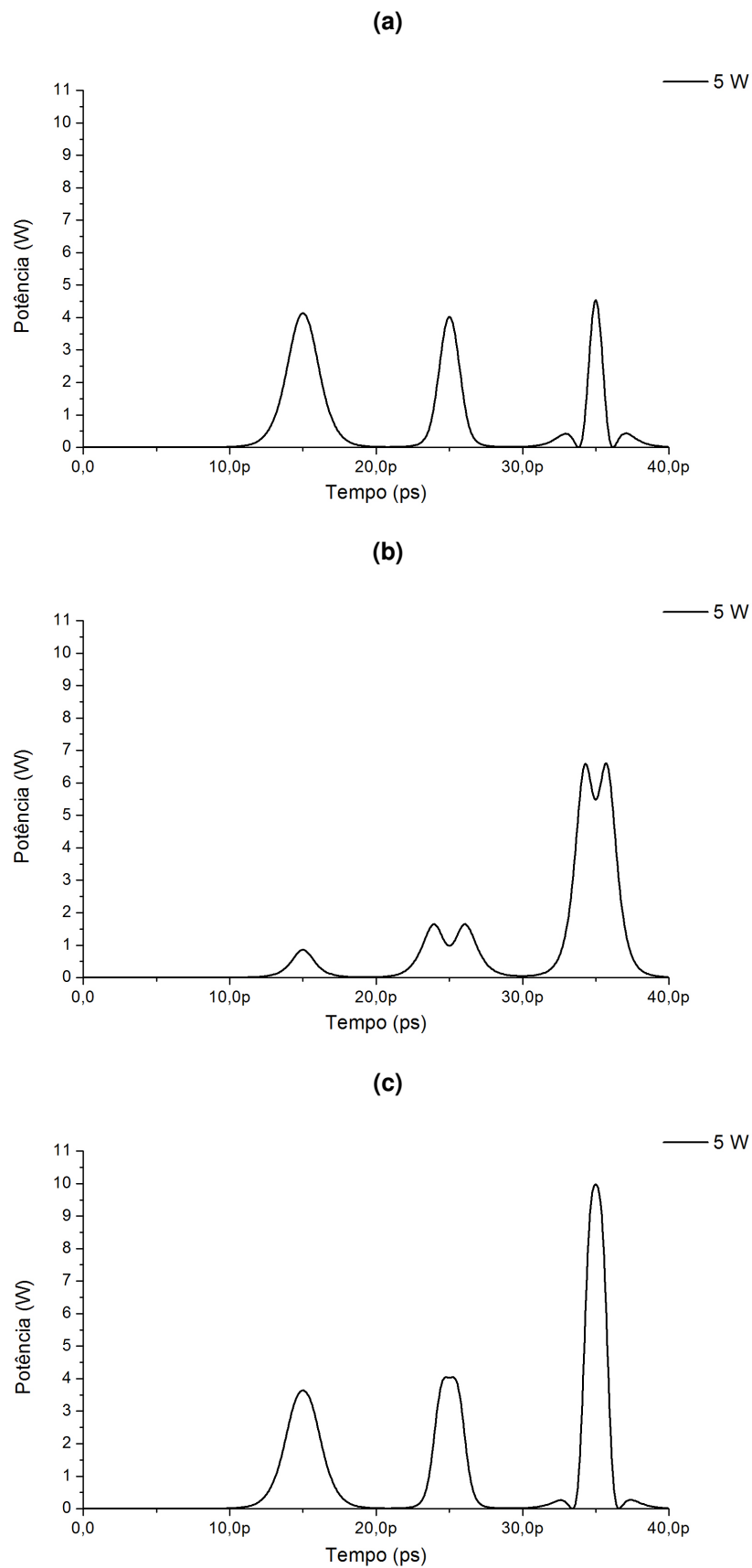
Figura 36: Potência cross, coeficiente de acoplamento = 0,2, variações de potência de pico e $\bar{n}_2$



Para o caso da porta XOR (saída [0, 1, 1, 0]), observa-se o último pulso da saída não apresenta um valor de potência de pico que condiz com o nível lógico 0. Mas sua potência média apresenta um valor menor do que as outras saídas que representam os bits 1. Assim, o último pulso representará o bit 0 para um determinado limiar de potência média. A falta de um limiar de potência de pico é explicada pelo fato do pulso possuir a largura temporal do pico central menor do que a dos outros dois pulsos que representam os bits 1. Essa deformação ocorre devido a não-linearidade da fibra, criando outros picos no pulso secante hiperbólico. Assim, sua potência é distribuída entres essas pequenas formações.

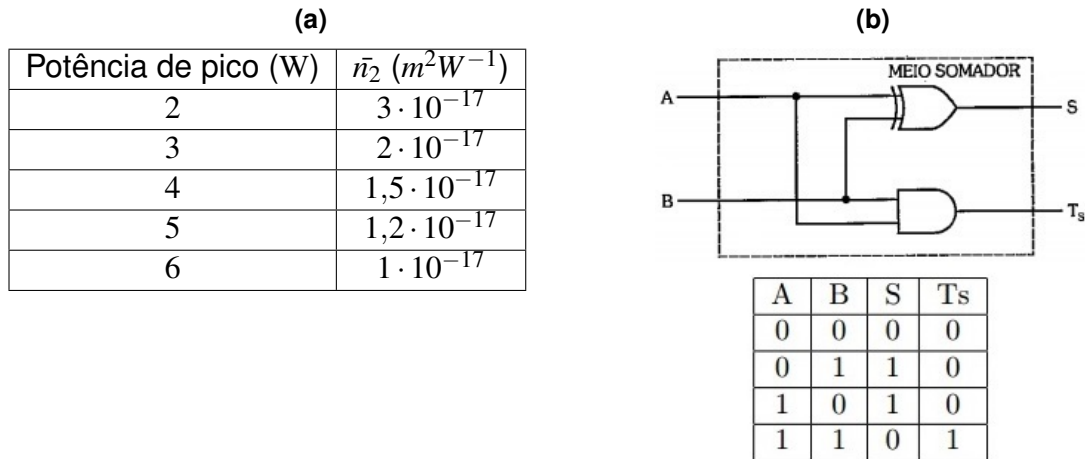
Note que para a saída bar, tem-se uma porta XOR e na saída cross a porta AND, ambas para o mesmo valor de $\bar{n}_2$. O qual representa a estrutura de circuito meio somador, mostrada na Figura 38b (circuito meio somador e tabela verdade). Ambas as portas apresentam o mesmo referencial de potência média, ou seja, há um valor de potência média que define um pulso de saída como bit 1 ou 0, mas não há um referencial de potência de pico. Assim, para essa estrutura de MZI proposto somente é possível definir um circuito meio somador para valores de potência média.

Figura 37: Saídas bar (a) e cross (b) do MZI para pulsos 5 W - Portas XOR (a), AND (b) e OR (c)



Para as simulações com o tipo de estrutura proposta se obtém circuito lógico meio-somador (MS). A Figura 38a apresenta os valores de potência de pico (pulso de entrada) com seus respectivos coeficientes de índice não linear ($\bar{n}_2$) para as condições os quais se obtém o circuito MS (Estrutura e tabela verdade do MS - Figura 38b.)

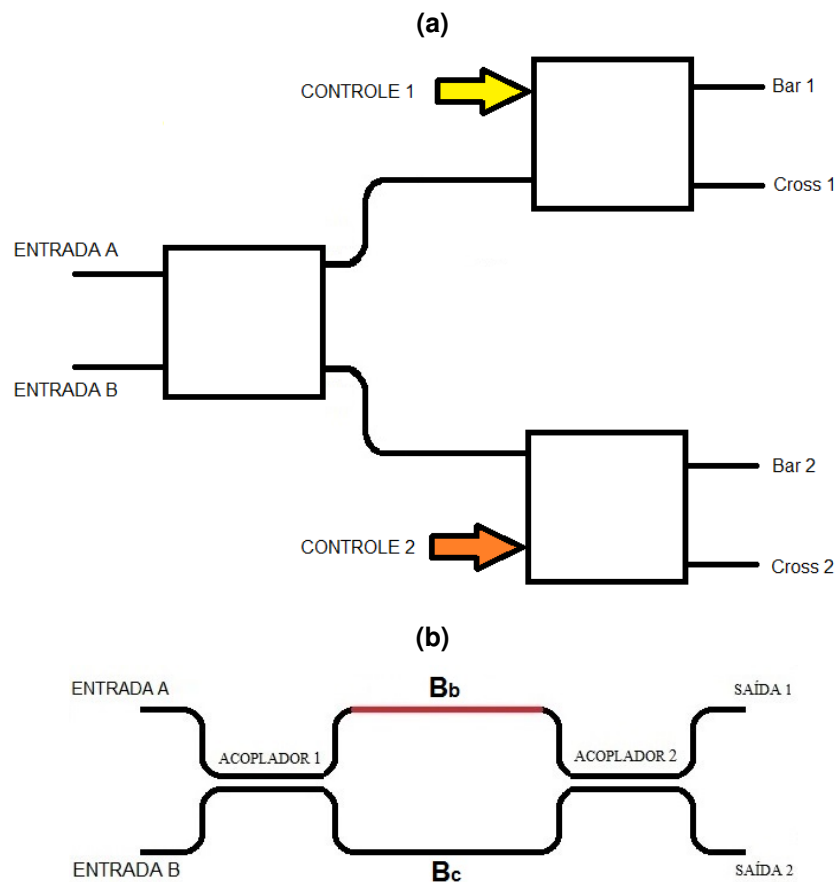
Figura 38: Valores de potência de pico e coeficiente de índice de não-linear (a) e estrutura do circuito meio somador com sua tabela verdade (b)



Com objetivo de gerar uma porta XOR com valor do último pulso podendo ser definido como 0, ou seja, com menor potência de pico e potência média do que os outros pulsos de valor 1. É proposto uma estrutura formada por três MZI, iguais o da simulação anterior (simulação 20:80), de forma cascadeada e são adicionados dois pulsos de controle na entradas dos dois MZI da segunda camada do cascadeamento. Onde para cada grupo de quatro pulsos na entrada há uma variação do pulso de controle. Na próxima seção essa estrutura é melhor definida e explicada.

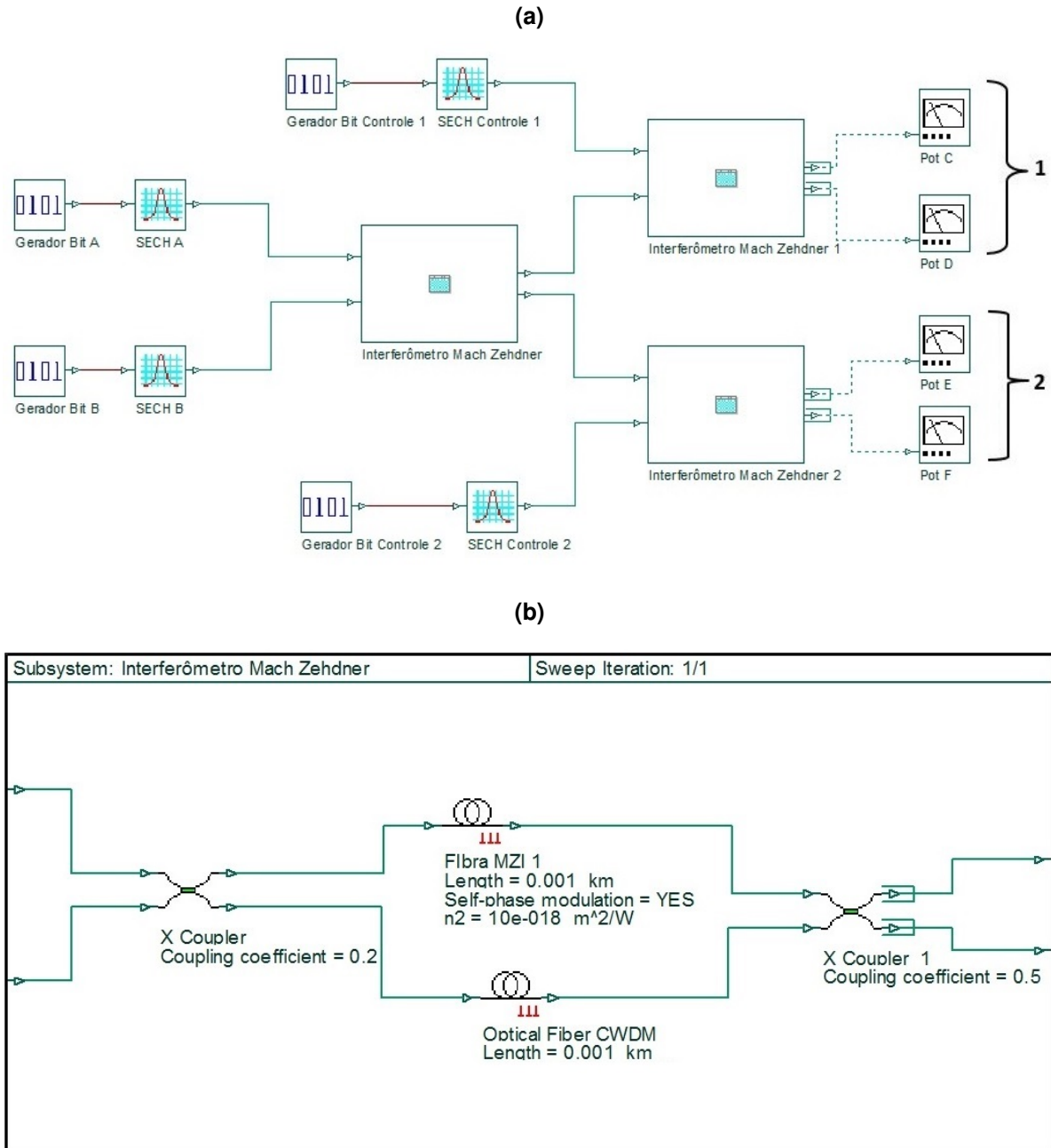
5.3.4 Simulação Cascadeamento - Acoplador 20:80 e variação de potência

Nesta seção, uma estrutura diferente das anteriores é definida para realizar as simulações. Nela há três MZI ligados de formar cascadeada, ou seja, a saída de um MZI é conectada na entrada de outro. Além das duas entradas (A e B) convencionais há mais duas entrada de controle, como visto na Figura 39a. Nessa figura cada bloco é um MZI (39b) e nas entradas da segunda etapa de MZIs tem-se os controles 1 e 2. Esses controles são também pulsos secante hiperbólico e sempre com a mesma potência de pico dos sinais das entradas A e B.

Figura 39: Estrutura cascadeamento com 2 controles

Fonte: Elaborado pelo autor.

A simulação é dividida em quatro etapas os quais são determinadas pelos pulsos de controle (controle 1 e 2), onde é possível estabelecer quatro variações possíveis. Então para cada quatro conjunto de bits [(0,0), (0,1), (1,0) e (1,1)] na entrada são simuladas para único valor de controle variando em [(0,0),(0,1),(1,0) e (1,1)]. Ou seja, tem-se as entradas [(0,0), (0,1), (1,0) e (1,1)] para controle (0,0), depois as mesmas entradas para o controle (0,1) e assim sucessivamente. Como é possível visualizar nessa estrutura, há quatro saídas, que são divididas em Bar 1/2 e Cross 1/2. Basicamente essas são as diferenças entre as estruturas das simulações anteriores. A Figura 40a representa o esquemático de cascadeamento no software OptiSystem, no qual em cada bloco representa um MZI. Os parâmetros da simulação (coeficiente de acoplamento dos acopladores, comprimento das fibras, valores de $\bar{n}_2$, entre outros) são mostradas na Tabela 9.

Figura 40: Esquemático cascadeamento no OptiSystem (a) e MZI proposto (b)

Note que devido a essa estrutura ter quatro saídas, torna-se possível encontrar várias taxas de extinções, não somente XRatio (bar/cross) ou (cross/bar). Mas pode-se ter XRatio (bar1/bar2), (bar1/cross1), (bar1/cross2), entre outras taxas. Nas simulações realizadas são encontradas portas lógicas XOR e OR para as XRatio (bar1/bar2) e AND para XRatio (bar2/bar1), para controle 1 = 0 e controle 2 = 0. As portas XOR e AND são estimadas para o mesmo valor de $\bar{n}_2$ e potência média, mas a porta OR possui $\bar{n}_2$ diferentes. A Figura 41 mostra a taxa de extinção bar1/bar2 e

a Figura 42 o XRatio (bar2/bar1). E os devidos valores de $\bar{n}_2$ que se encontram as portas lógicas XOR, AND e OR para o pulso de entrada 5 W.

Tabela 9: Dados de simulação cascadeamento no OptiSystem

Característica	Valor
Quantidade de MZI	3 (três)
Sinais de entrada	4 (quatro) - A,B e controles 1 e 2
Coef. acoplamento 1º acoplador	20:80
Coef. acoplamento 2º acoplador	50:50
Comprimento dos braços (MZI)	1 m
Efeitos não lineares	SPM
Dispersão de 2ª e 3ª ordens	Não há
Potência de pico	1 W a 6 W
Coeficiente de não linearidade ($\bar{n}_2$)	$5 \cdot 10^{-18}$ até $5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$
Comprimento de onda	1550 nm
Área efetiva da fibra	$80 \mu\text{m}^2$
Largura temporal pulso	10 ps
<i>FWHM</i>	2.4 ps
Modulação do pulso	OOK

Assim como nos controles 1 e 2 iguais a 0 (controle 00), para as outras variações 01, 10 e 11 são encontras portas lógicas com diferentes valores de $\bar{n}_2$. Mas neste trabalho somente os resultados para o controle 00 são apresentados.

Figura 41: $XRatio_{BAR1/BAR2}$ cascadeamento, variação da potência de pico e $\bar{n}_2$

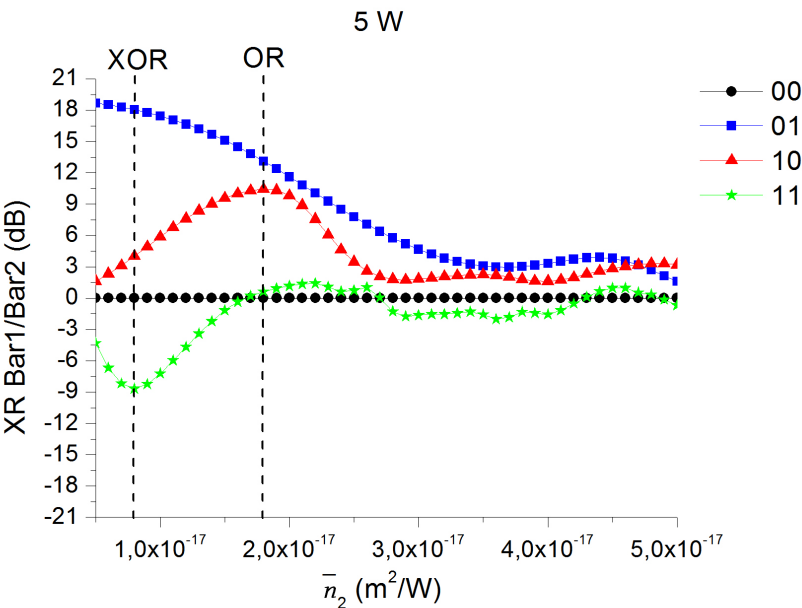
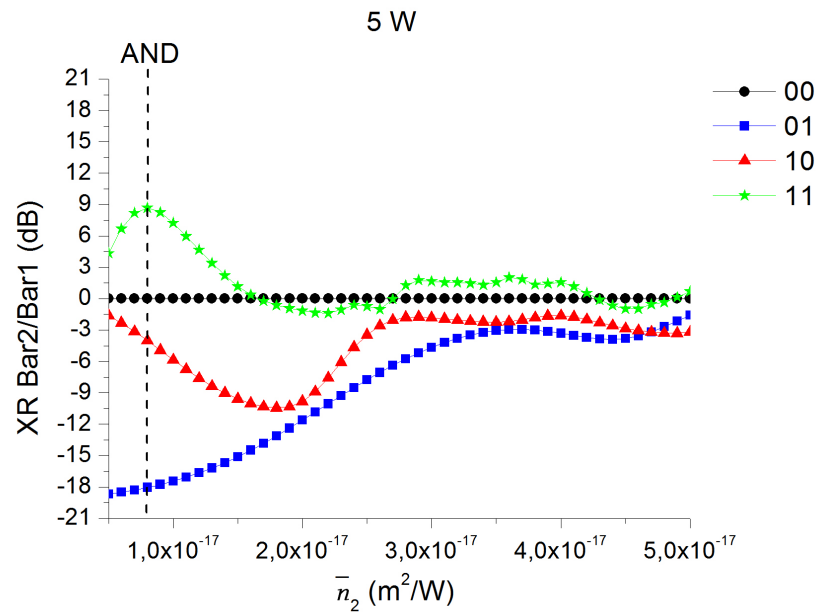


Figura 42: $XR_{Ratio_{BAR2/BAR1}}$ cascadeamento, variação da potência de pico e $\bar{n}_2$ 

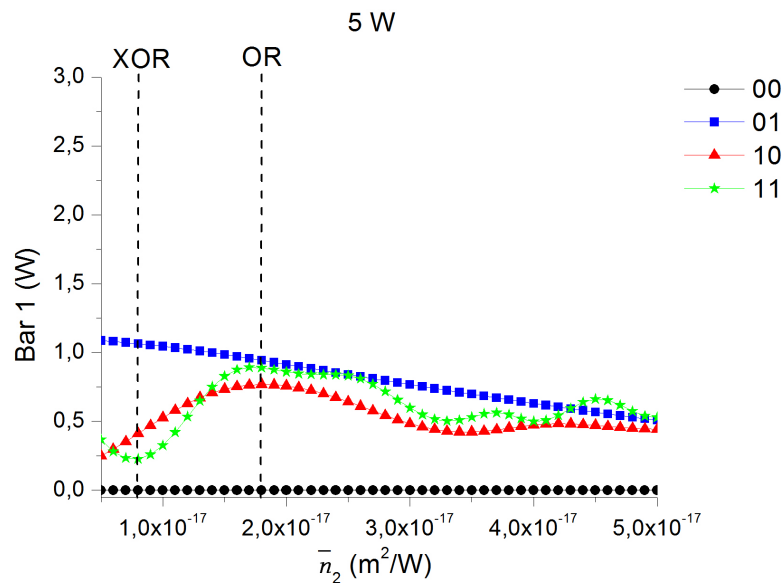
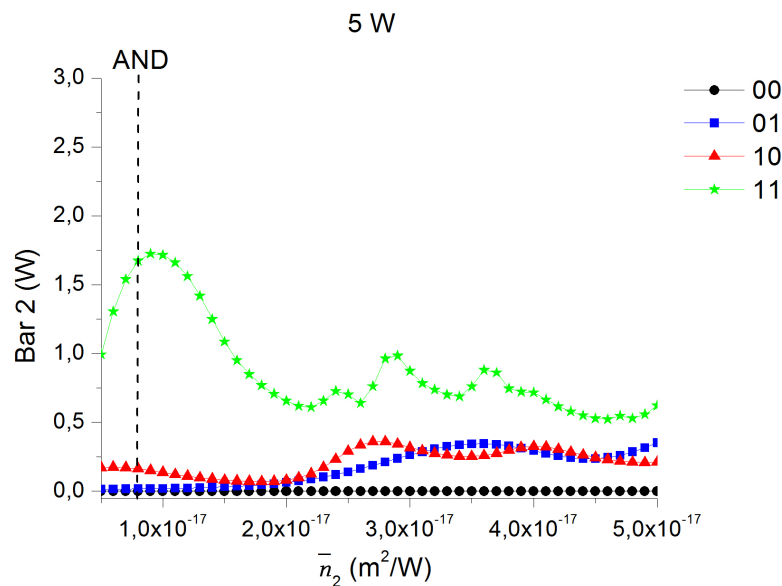
Na Tabela 10 são apresentadas as tabelas verdade das porta XOR, AND e OR, valores de potência, taxa de extinção e FOMELG para todas as portas presentes no sistema. Note que o valor de FOMELG para as portas XOR e AND apresentaram melhoras em comparativo a simulação com estrutura simples 20:80, no qual obteve FOMELG de 13,82 dB. Assim como na porta OR, que se conseguiu um ganho no seu valor da figura de mérito. Na simulação simples 20:80 essa porta apresentou FOMELG de 11,38 dB.

As figuras 43 e 44 mostram as potências média de bar1 e bar2, respectivamente. Nos quais tem-se as marcações para os valores de $\bar{n}_2$ das portas obtidas.

Tabela 10: Valores para simulação acoplador 20:80 - Controle 00

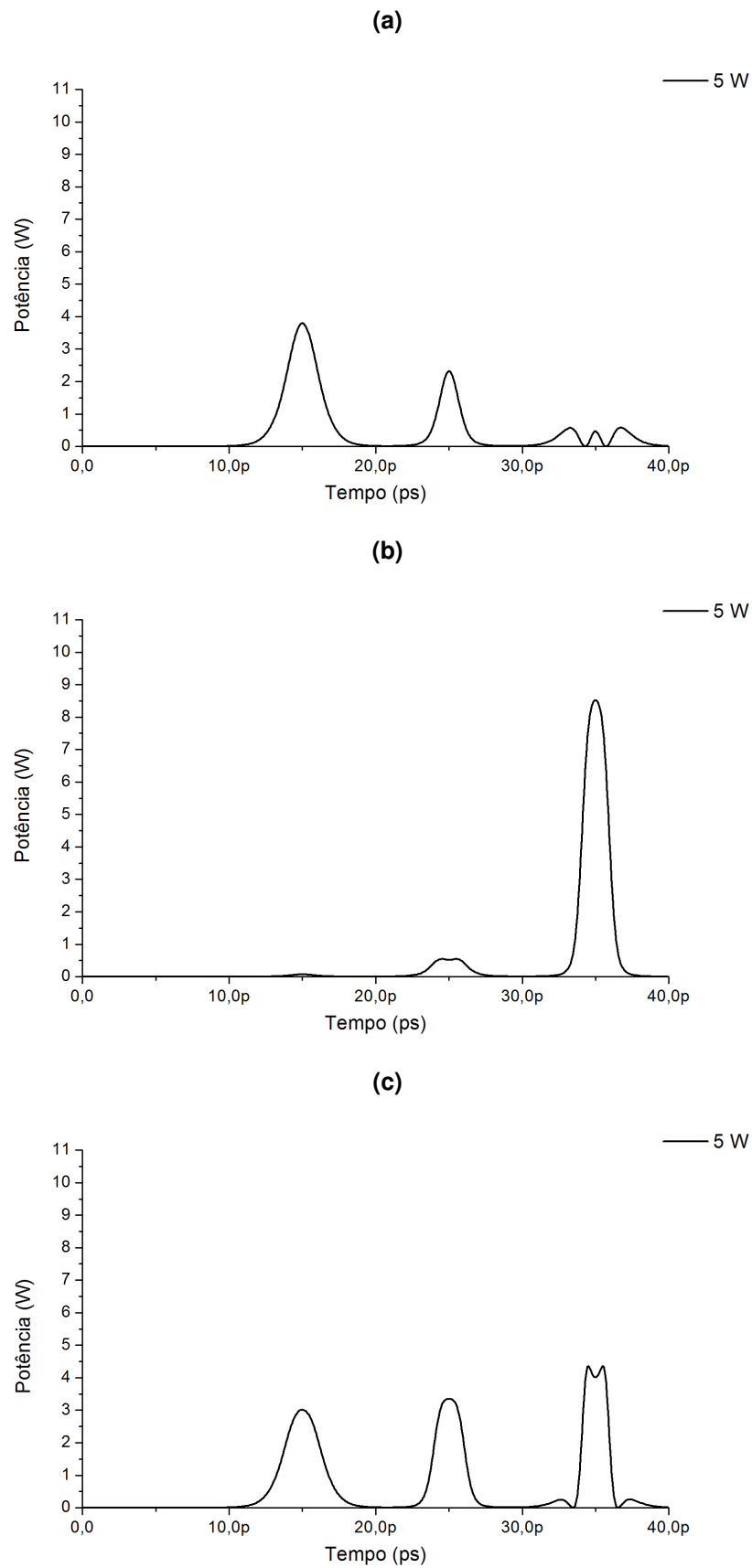
Potência 5 W					$\bar{n}_2 = 8 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2 \text{ W}^{-1}$						$\bar{n}_2 = 1,8 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2 \text{ W}^{-1}$		
TB					Pot Bar	XR(B1/B2)	NL	Pot Cross	XR(B2/B1)	NL	Pot Bar	XR(B1/B2)	NL
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	1	1,06	18,04	1	0,02	-18,04	0	0,94	13,11	1
1	0	1	0	1	0,41	4,1	1	0,16	-4,1	0	0,76	10,44	1
1	1	0	1	1	0,22	-8,68	0	1,67	8,68	1	0,88	0,62	1
FOMELG					30,73 dB						24,17 dB		

TB = Tabela Verdade, NL = Nível Lógico, XR(B1/B2) = XRatio(Bar1/Bar2), XR(B2/B1) = XRatio(Bar2/Bar1)

Figura 43: Potência bar1 cascadeamento, variação da potência de pico e $\bar{n}_2$ **Figura 44:** Potência bar2 cascadeamento, variação da potência de pico e $\bar{n}_2$ 

Note que na curva da Figura 45a, porta XOR, a saída (1,1) apresenta valores de potência média e pico menores do que as saídas (0,1) e (1,0). Assim, pode-se traçar limiares de potência média e potência de pico. Os quais, também, definem limiar para a porta AND (Figura 45b). Esse fator apresenta um ganho de performance na geração de porta lógicas, pois ambos os limiares foram encontradas para ambas as saídas. Outra melhora foi na porta AND, no qual as saídas que definem o bit 0 apresentaram potência média e de pico menores do que as das simulações anteriores.

Figura 45: Saídas bar1 (a) e bar2 (b) do MZI para pulsos 5 W - Portas XOR (a) , AND (b) e OR (c)



Assim como na simulação 20:80, a estrutura cascadeada também apresenta um resultado do circuito meio somador, onde a porta lógica XOR encontra-se na saída bar1 e a AND na bar2. Ambos os pulsos de saída apresentam valor de referência de potência média e potência de pico. Na Tabela 11 há valores de potência de pico e coeficiente de índice não linear para o circuito meio somador.

Tabela 11: Valores de potência de pico/coeficiente de índice de não-linear

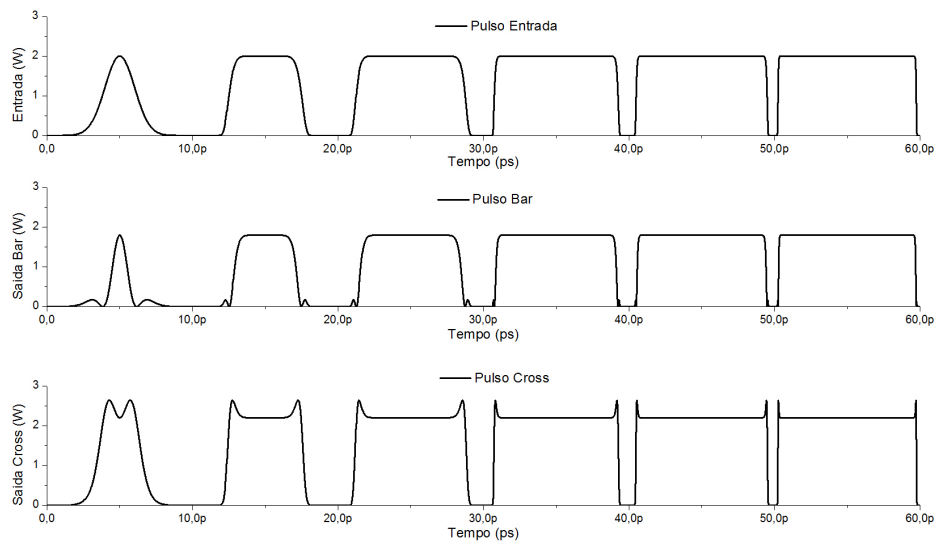
Potência de pico (W)	$\bar{n}_2 \text{ (m}^2\text{W}^{-1}\text{)}$
1	$3,8 \cdot 10^{-17}$
2	$1,9 \cdot 10^{-17}$
3	$1,2 \cdot 10^{-17}$
4	$1 \cdot 10^{-17}$
5	$8 \cdot 10^{-18}$
6	$6 \cdot 10^{-18}$

No caso da porta OR tem-se um melhor comportamento de todos os bits 1, apresentando os bits com valores de potência média e de pico mais próximos, entre si, do que os da simulação da seção 5.3.3. Além do aumento da FOMELG, variando de 11,38 dB para 24,17 dB.

5.3.5 Simulação - Variação do pulso secante hiperbólico para retangular

Além de aplicar ao MZI um pulso secante hiperbólico, o pulso de formato retangular também é inserido como entrada no sistema. A aplicação desse tipo de pulso tem como objetivo buscar uma forma de minimizar as deformações (picos adjacentes de potência) geradas pela não linearidade. Essas deformações são encontradas nos pulsos das saídas (1,1) nos casos das portas XOR e OR e nas simulações simples ou cascadeada.

É simulado o comportamento do pulso variando de secante hiperbólico para formato retangular, com objetivo de analisar o comportamento do pulso retangular com efeito da não linearidade. A Figura 46 exemplifica um pulso secante hiperbólico, inicialmente igual ao das simulações anteriores, variando seu formato para um retangular. Esse pulso apresenta potência de pico 2 W e como entrada do MZI 20:80, para uma $\bar{n}_2 = 3 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2\text{W}^{-1}$. Obtém-se na primeira resposta o mesmo pulso de saída da simulação 5.3.3, depois ocorre a variação do pulso.

Figura 46: Variação do pulso secante hiperbólico para retangular

Note que a saída bar inicialmente possui um pulso com três picos, um central de maior amplitude e dois lateralmente adjacentes de menor amplitude. Ao submeter os pulsos com formato mais retangular no MZI, os dois picos laterais perdem energia chegando a quase "desaparecer". Mostrando que a variação gradual de amplitude (mudança do 0 para o 1), presente no pulso de formato secante hiperbólico, é muito afetada pela não-linearidade, diferente da variação mais rápida estabelecida no pulso retangular. Logo, todas as simulações anteriores são realizadas novamente, mas para o pulso retangular.

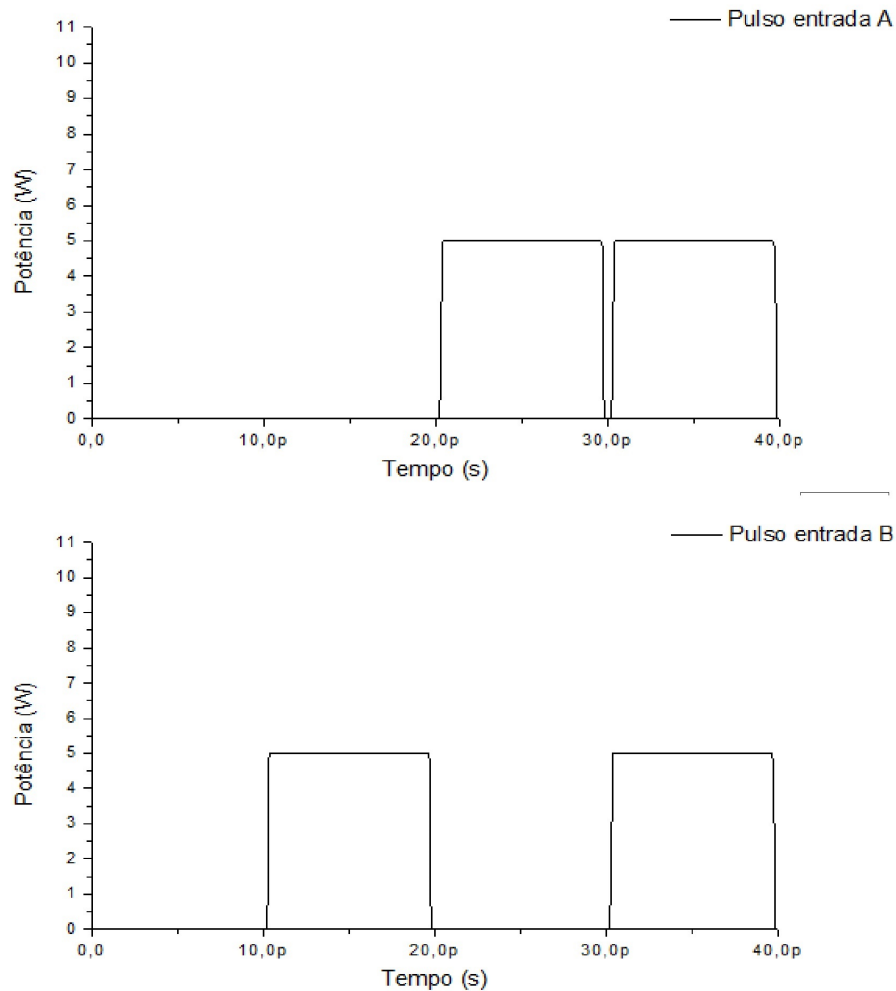
5.3.6 Simulação - Acoplador 50:50, variação de potência e pulso retangular

Nesta seção são realizadas simulações com estruturas simples e cascadeadas do MZI proposto para o pulso retangular. Para os pulso das entradas tem-se a Figura 47 representando as duas entradas (A e B) do MZI para um pulso retangular com potência de pico de 5 W. Os quais são equivalentes às entradas $[(A,B)] = [(0,0),(0,1),(1,0),(1,1)]$.

A Figura 48 representa a taxa de extinção bar/cross para a simulação com coeficiente de acoplamento 50:50 e potência de pico no valor de 5 W. Semelhante ao caso do pulso secante hiperbólico as curvas, (0,1) e (1,0) da taxa de extinção, são apostas e simétricas. Esse fato mostra que somente há portas para o caso dessas curvas se cruzarem no valor 0 e a taxa de extinção para (1,1) for positiva, gerando porta lógica AND. Mas nesses pontos de interseção a curva (1,1) também apresenta

valor 0.

Figura 47: Pulsos de entrada com potência de pico 5 W



Ou seja, para $[(0,0), (0,1), (1,0), (1,1)]$ tem-se saída com taxa de extinção zero para todas as curvas nos mesmos pontos (valores de $\bar{n}_2$). Assim, não é encontrada porta lógica para essa simulação.

5.3.7 Simulação - Acoplador 20:80, variação de potência e pulso retangular

Para o pulso retangular, assim como na simulação com o pulso secante hiperbólico, é alterado o coeficiente do acoplamento no primeiro acoplador de 50:50 para 20:80. As Figuras 49 e 50 representam as taxas de extinções bar/cross e cross/bar, respectivamente. Também são simulados os pulsos com potências de pico de 1 a 6 W para os valores de $\bar{n}_2$.

Figura 48: $XR_{Ratio_{BAR}}$, coeficiente de acoplamento 50:50, variação da potência de pico, $\bar{n}_2$ e pulso retangular

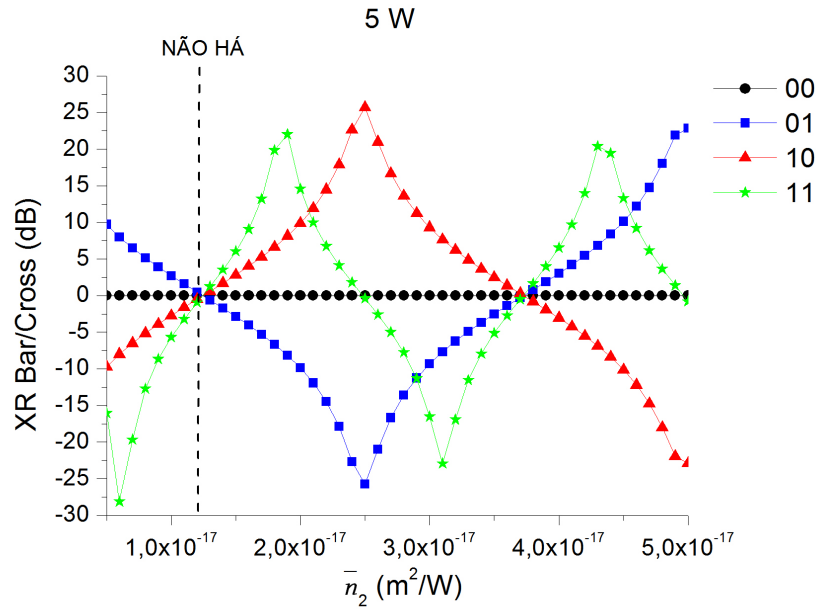
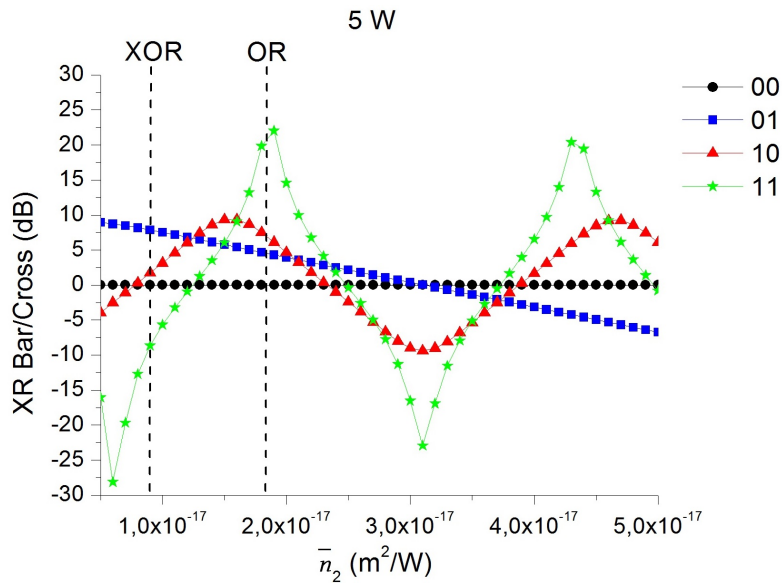
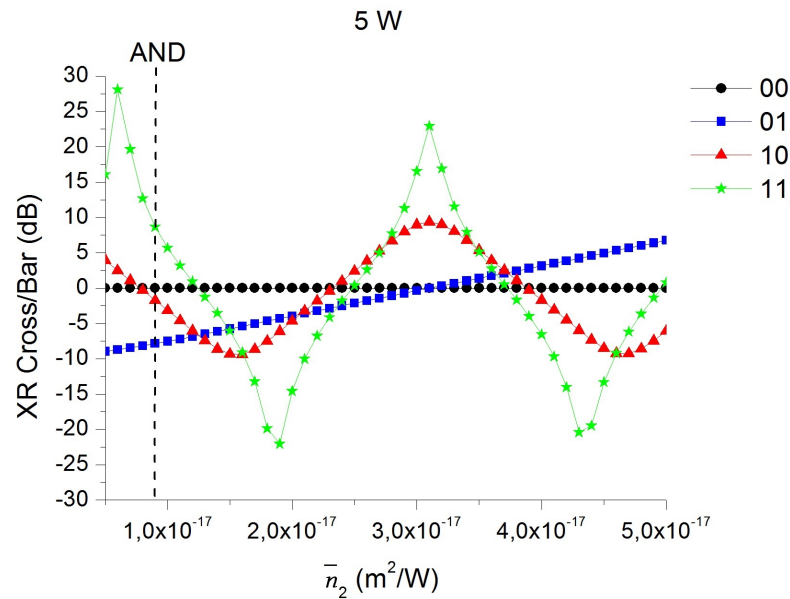


Figura 49: $XR_{Ratio_{BAR/CROSS}}$, coeficiente de acoplamento 20:80, $\bar{n}_2$ e pulso retangular



Como na simulação pulso secante hiperbólico 20:80, também são encontradas 3 tipos de portas: AND, XOR e OR. No qual tem-se para o mesmo valor de $\bar{n}_2$ a porta XOR e AND nas saídas bar e cross, respectivamente. No caso da porta OR, ela é encontrada para outro valor de $\bar{n}_2$ e na saída bar. Mesmo obtendo portas, os valores de não-linearidade são diferentes da simulação com pulso secante hiperbólico 20:80. Outra diferença é a presença de portas AND e XOR para a potência de pico 1 W.

Figura 50: $XR_{ratio_{CROSS/BAR}}$, coeficiente de acoplamento 20:80, $\bar{n}_2$ e pulso retangular

Um fator que se assemelha aos das simulações anteriores é o mesmo valor de FOMELG para todas as saídas que geram portas lógicas. Ou seja, caracterizando um formato de pulso constante para o aumento de potência (Figuras 51a, 51b e 51c - anexo A.5). Além de obter um circuito meio somador no caso das saídas bar com porta XOR e cross com porta AND.

Na Tabela 12 tem-se todos os valores de potência média, taxa de extinção, nível lógico e FOMELG para todas as portas encontradas no sistema no caso do pulso com potência de pico no valor de 5 W. Em comparativo a simulação 20:80 simples (5.3.3), os valores de figura de mérito são maiores na simulação com o pulso retangular, ou seja, apresenta uma melhor eficiência. As figuras 52 e 53 representam os gráficos das potências por $\bar{n}_2$, no caso das saídas bar e cross, respectivamente, para o pulso retangular com potência de pico de 5 W.

Tabela 12: Valores para o pulso retangular 5 W na simulação acoplador 20:80 - Pulso retangular

Potência 5 W					$\bar{n}_2 = 9 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2 \text{ W}^{-1}$						$\bar{n}_2 = 1,85 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2 \text{ W}^{-1}$		
TB					Pot Bar	XR(B1/B2)	NL	Pot Cross	XR(B2/B1)	NL	Pot Bar	XR(B1/B2)	NL
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	1	4,07	7,86	1	0,66	-7,86	0	3,45	4,45	1
1	0	1	0	1	2,83	1,72	1	1,91	-1,72	0	3,88	6,68	1
1	1	0	1	1	1,13	-8,66	0	8,35	8,66	1	9,45	23,95	1
FOMELG					17.8 dB						35.08 dB		

TB = Tabela Verdade, NL = Nível Lógico, XR(B1/B2) = XRatio(Bar1/Bar2), XR(B2/B1) = XRatio(Bar2/Bar1)

Figura 51: Saídas bar (a) e cross (b) do MZI para pulsos 1, 2, 3, 4, 5 e 6 watt - Portas XOR (a) e AND (b) - Pulso retangular

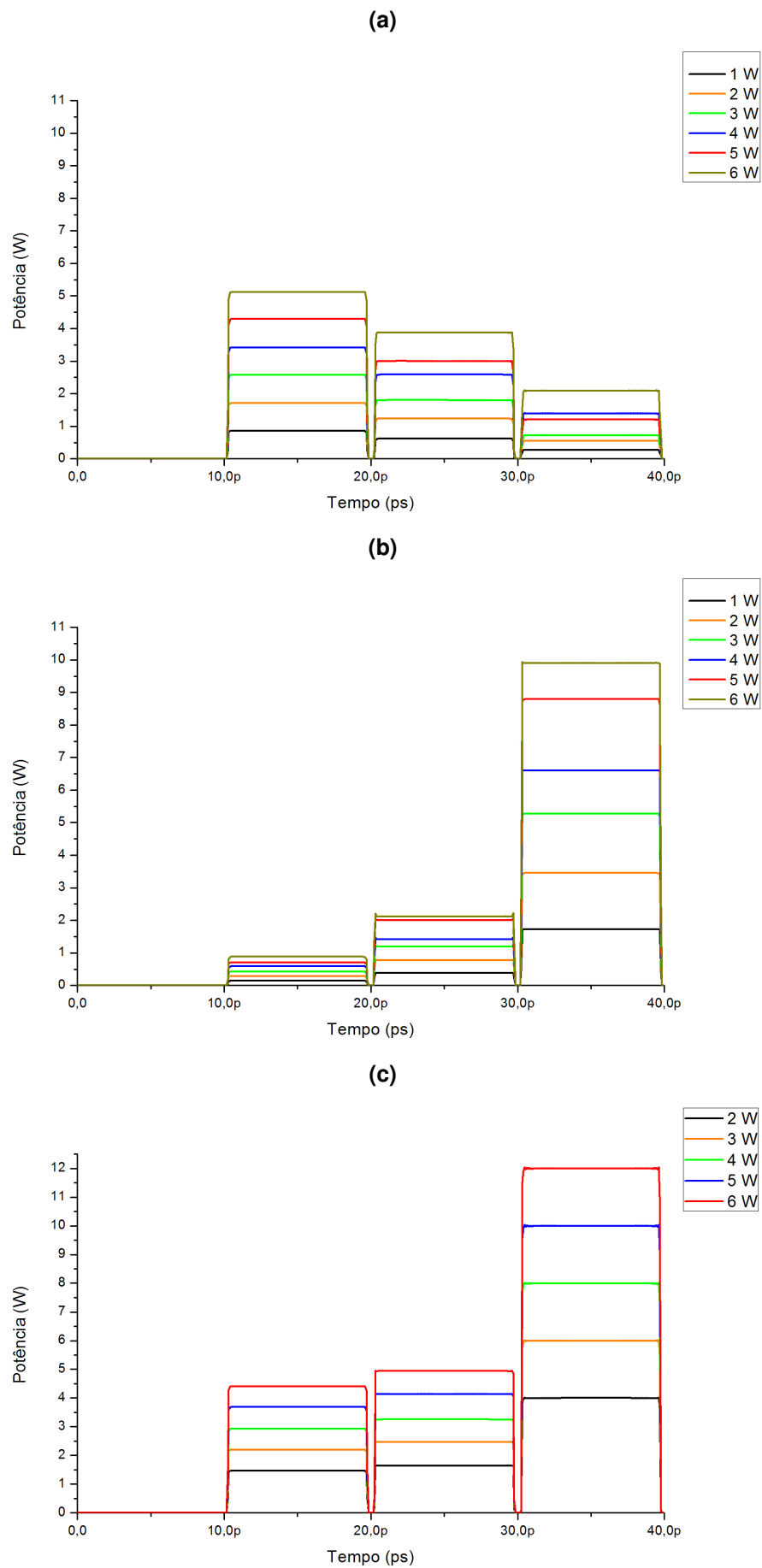


Figura 52: Potência bar, coeficiente de acoplamento 20:80, variação da potência de pico, $\bar{n}_2$ e pulso retangular

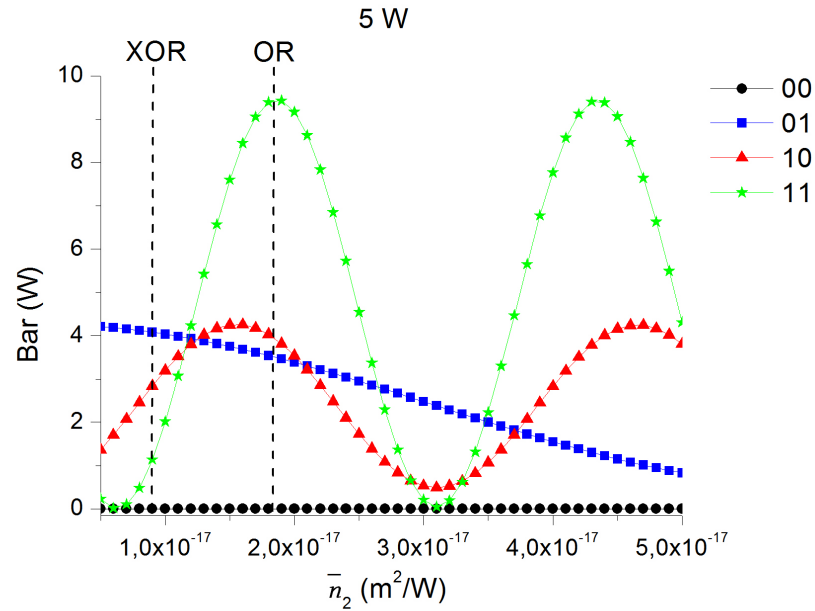
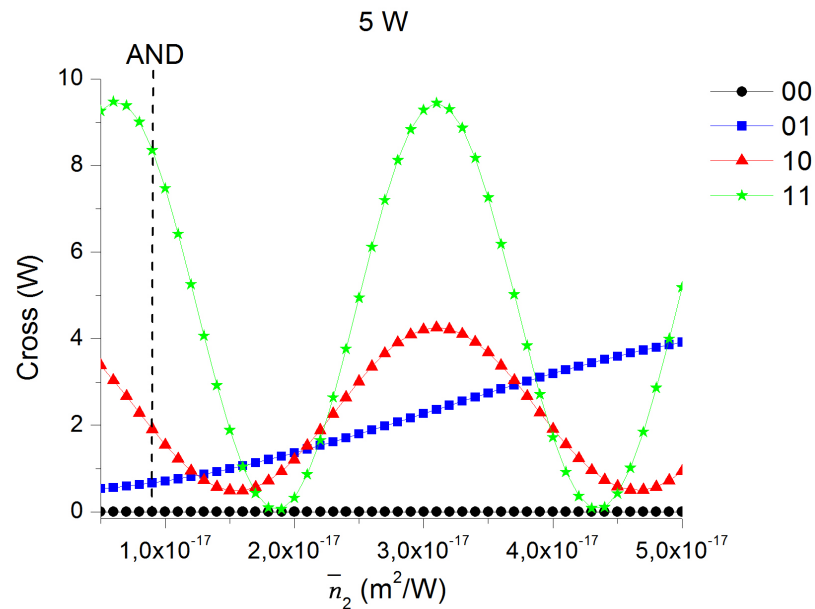
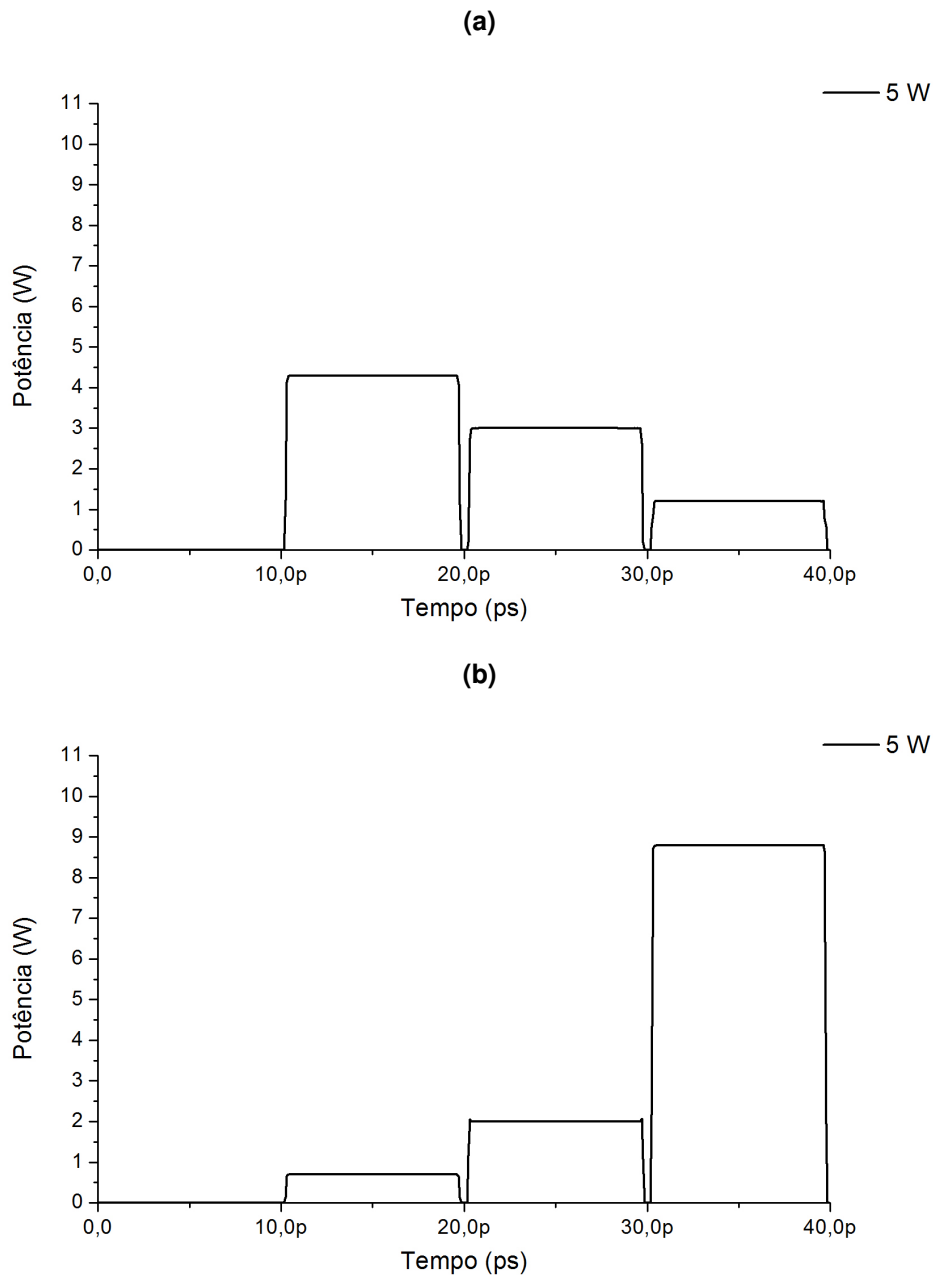


Figura 53: Potência cross, coeficiente de acoplamento 20:80, variação da potência de pico, $\bar{n}_2$ e pulso retangular



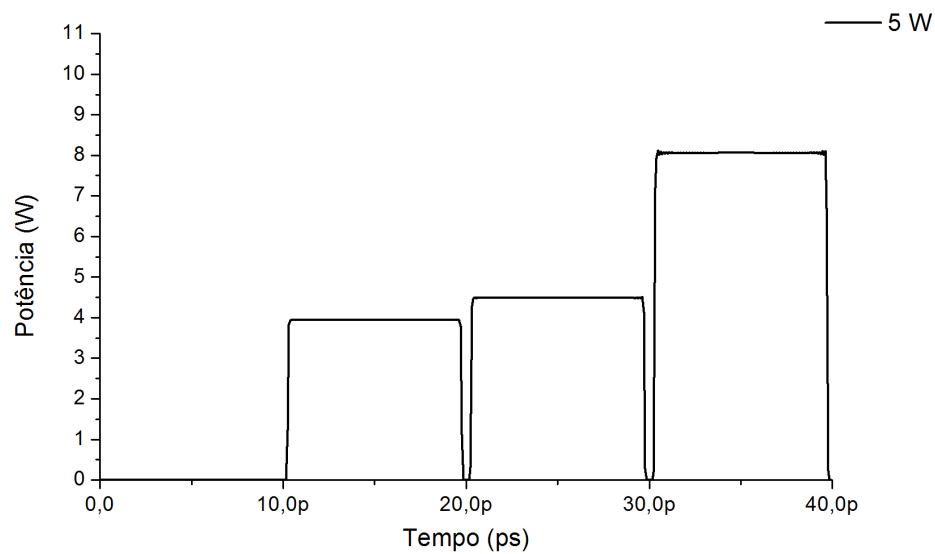
As saídas dos pulsos [(0,0), (0,1), (1,0), (1,1)] para as portas XOR e AND são apresentadas nas figuras 54a e 54b, respectivamente. Note que é possível traçar um nível de referência para uma potência pico, determinando os valores que representam os bits 0 e 1.

Figura 54: Saídas bar (a) e cross (b) do MZI para pulsos 5 W - Portas XOR (a) e AND (b) - Pulso retangular



Outra porta encontrada na simulação é a porta OR na saída bar do sistema. Mas essa porta apresenta valores de $\bar{n}_2$ diferentes das portas lógicas AND e XOR. A figura 55 representa a saída dos pulsos para a porta OR.

Analisando ambas as saídas, tem-se que as portas XOR e AND são encontradas para o mesmo valor de $\bar{n}_2$, gerando assim um circuito meio somador. Os níveis de potência média e potência de pico que determinam quais pulsos serão zero ou um, são iguais para ambas as portas XOR e AND.

Figura 55: saída bar do MZI para pulsos 5 W - Porta OR - Pulso retangular

A Tabela 13 representa os valores de $\bar{n}_2$ para cada potência de pico do sinal de entrada onde encontram-se esse circuito.

Tabela 13: Valores de potência de pico/coeficiente de índice de não-linear

Potência de pico (W)	$\bar{n}_2$ (m^2W^{-1})
1	$3,8 \cdot 10^{-17}$
2	$1,9 \cdot 10^{-17}$
3	$1,2 \cdot 10^{-17}$
4	$1 \cdot 10^{-17}$
5	$8 \cdot 10^{-18}$
6	$6 \cdot 10^{-18}$

O diferencial notado nessa simulação é o resultado causado pela alteração do pulso. A mudança do pulso secante hiperbólico para retangular diminuiu quase para 0 (zero) as "deformações" presentes nos pulsos do tipo secante hiperbólico.

5.3.8 Simulação Cascadeamento - Acoplador 20:80, variação de potência e pulso retangular

Lembrando que o objetivo da simulação cascadeamento com secante hiperbólico (5.3.4) focava em obter uma melhor resposta da porta XOR (limiar para potência de pico). No caso do pulso retangular, obteve-se uma XOR com boa resposta e somente foi utilizando a estrutura simples do MZI. Assim, essa simulação, cascadeada com o pulso retangular, é realizada com objetivo de encontrar uma saída de melhor comportamento para todas as portas já encontradas.

É simulado o esquemático do cascadeamento, mas com pulsos retangulares para as quatro entradas (A, B, controle 1 e controle 2) e mesmas características estruturais.

Semelhante à simulação 5.3.4 (pulso secante hiperbólico 20:80 cascadeada) as portas XOR e AND são encontradas para os controles ambos em 0, os quais seus resultados são mostradas neste trabalho. Também em semelhança a simulação 5.3.4, os resultados encontrados para o pulso retangular são para as saídas bar1 e bar2 com valores 0. A Figura 56 representa a $XRatio_{BAR1/BAR2}$ e a Figura 57 $XRatio_{BAR2/BAR1}$.

Figura 56: $XRatio_{BAR1/BAR2}$, coeficiente de acoplamento 20:80, variação da potência de pico, $\bar{n}_2$ e pulso retangular

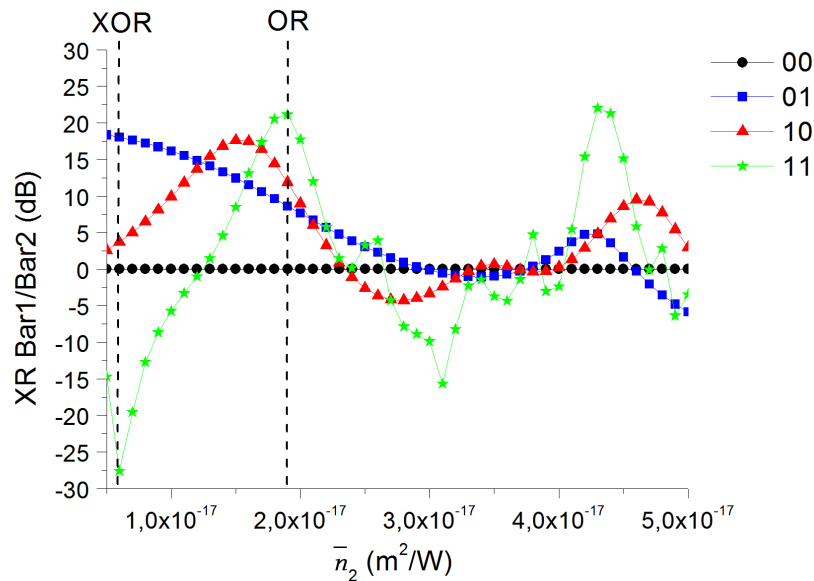
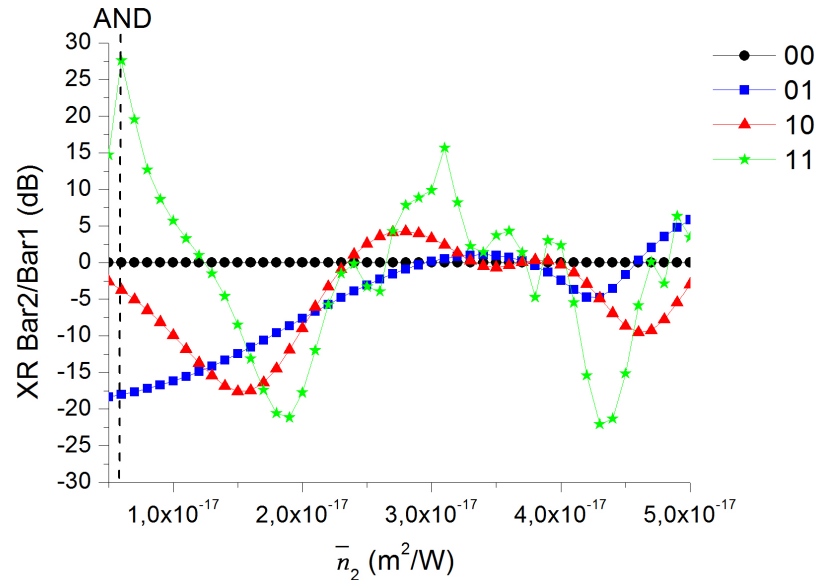


Figura 57: $XRatio_{BAR1/BAR2}$, coeficiente de acoplamento 20:80, variação da potência de pico, $\bar{n}_2$ e pulso retangular



Também são encontradas portas lógicas para os outros três controles (01, 10 e 11) para diferentes valores de $\bar{n}_2$. Além das diferentes variações da taxa de extinção, pois é possível trabalhar com as $XRatio$ (bar1/cross), $XRatio$ (bar2/cross2), $XRatio$ (bar1/cross2) ou $XRatio$ (bar2/cross1). Esse fato também é semelhante ao da simulação 5.3.4.

Na Tabela 14 tem-se todos os valores de potência, taxa de extinção, nível lógico e FOMELG para todas as portas lógicas XOR, AND e OR da simulação com pulso retangular 20:80 cascadeamento. As Figuras 58 e 58 representam os gráficos das potências por $\bar{n}_2$ para saídas bar e cross, respectivamente.

Tabela 14: Quadro geral para simulação acoplador 0,2 - Cascadeamento - Pulso retangular

Potência 5 W						$\bar{n}_2 = 6 \cdot 10^{-18} \text{m}^2 \text{W}^{-1}$						$\bar{n}_2 = 1,9 \cdot 10^{-17} \text{m}^2 \text{W}^{-1}$		
TB						Pot Bar	XR(B1/B2)	NL	Pot Cross	XR(B2/B1)	NL	Pot Bar	XR(B1/B2)	NL
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	1		3,7	18,02	1	0,05	-18,02	0	2,27	8,82	1
1	0	1	0	1		1,53	3,71	1	0,65	-3,71	0	2,99	12,44	1
1	1	0	1	1		0,013	-27,62	0	7,58	27,62	1	3,44	21,44	1
FOMELG						49.35 dB						42.66 dB		

TB = Tabela Verdade, NL = Nível Lógico, $XR(B1/B2) = XRatio(Bar1/Bar2)$, $XR(B2/B1) = XRatio(Bar2/Bar1)$

Figura 58: Potência bar1, coeficiente de acoplamento 0,2, variação da potência de pico, $\bar{n}_2$ e pulso retangular

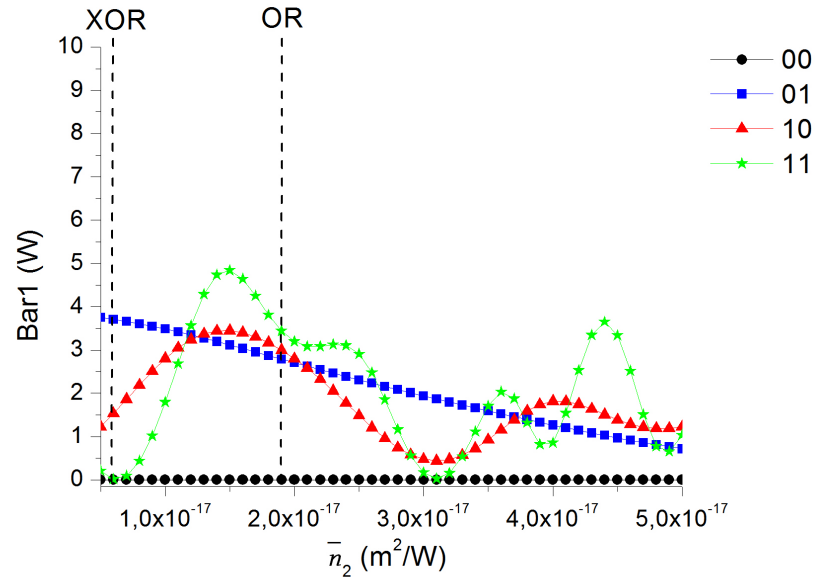
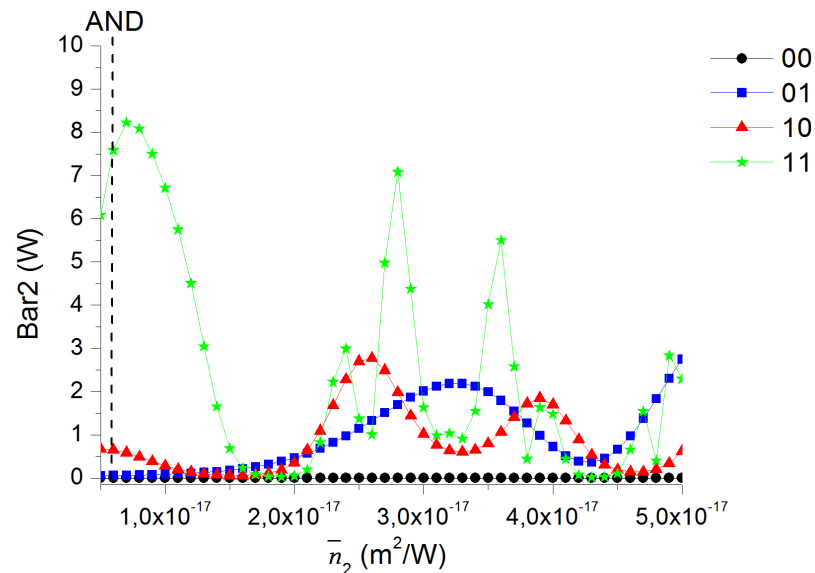


Figura 59: Potência bar2, coeficiente de acoplamento 0,2, variação da potência de pico, $\bar{n}_2$ e pulso retangular



Como resultado para os dados da Tabela 14, as Figuras 60a e 60b representam os pulsos das saídas bar1 e bar2, respectivamente, para o controle 00 e potência de pico de 5 W. São encontradas portas XOR e AND para o mesmo valor de $\bar{n}_2$. Para a porta OR tem-se a Figura 60c representando a saída bar1 com potência de 5 W.

Figura 60: Saídas bar1 (a) e bar2 (b) do MZI para pulsos 5 W - Portas XOR (a), AND (b) e OR (c) - Pulso retangular

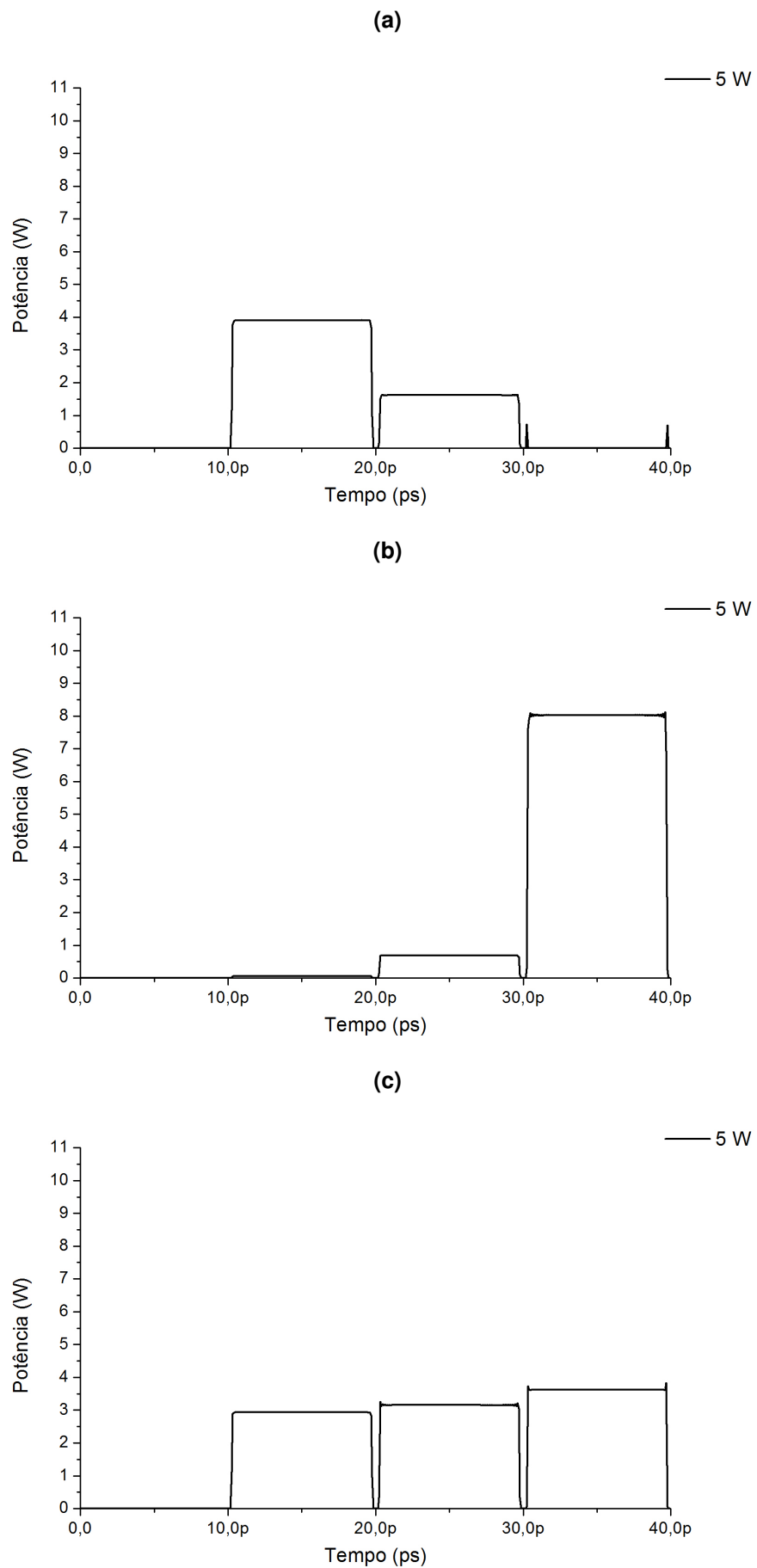


Tabela 15: Tabela com valores de potência de pico/coeficiente de índice de não-linear

Potência de pico (W)	$\bar{n}_2$ (m^2W^{-1})
1	$3 \cdot 10^{-17}$
2	$1,5 \cdot 10^{-17}$
3	$1 \cdot 10^{-17}$
4	$8 \cdot 10^{-18}$
5	$6 \cdot 10^{-18}$
6	$5 \cdot 10^{-18}$

O circuito meio somador também é encontrado para esse tipo de estrutura. E os pulsos de saída apresentam limiares de potência e intensidade para as portas XOR e AND. Na tabela 15 são encontrados valores de $\bar{n}_2$ e suas respectivas potências.

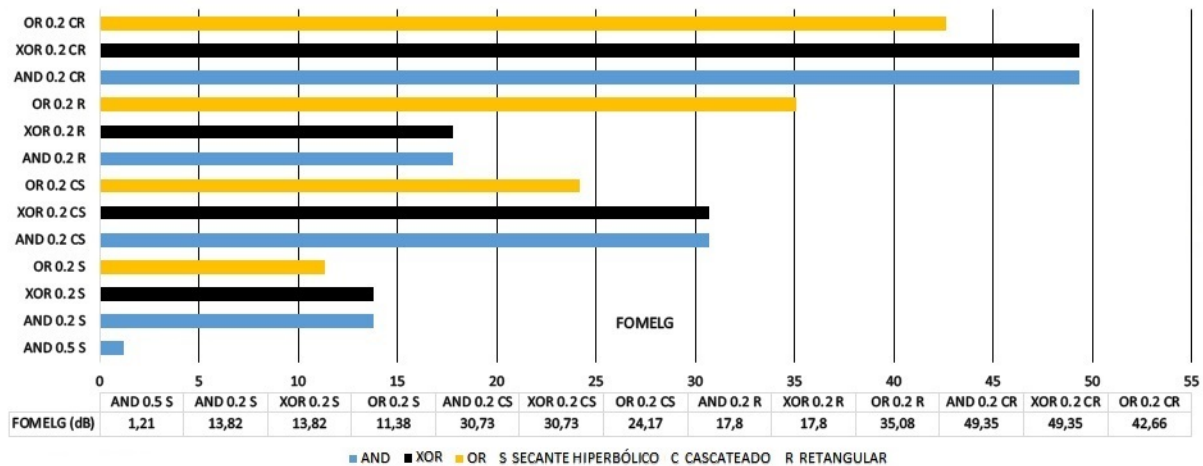
Sobre a porta XOR, em comparação a simulação anterior, nota-se que para a saída (1,1) o pulso apresenta uma potência média na ordem de $10^{-2}W$ e dois picos adjacente com largura de 0.1 ps. As portas AND e OR apresentaram comportamentos melhores quanto a simulação simples para pulso retangular. No caso da AND, os pulsos que representam os bits 0 apresentaram melhor comportamento (potência média e potência de pico) quanto ao da simulação simples. Tais como todos os bits 1 na porta OR apresentaram a potência de pico dos bits mais uniformes. Ou seja, os bits 1 apresentam menor variação de potência de pico. Semelhantes ao da simulação equivalente com pulso secante hiperbólico. Mas apresentaram melhoras quanto a simulação simples para pulso retangular.

5.4 Discussão dos resultados

Neste trabalho são realizados a simulações com interferômetro Mach-Zehnder para geração de portas lógicas, variando o coeficiente de índice não linear em um dos braços da fibra. Os tipos de variações são: estrutura, pulso de entrada e potência de pico do sinal de entrada. No caso das estruturas são aplicadas duas formas, uma com somente um MZI e outro com 3 (três) MZI conectados sequencialmente. Para os pulsos são utilizados duas variações de entrada, um pulso no formato secante hiperbólico e outro retangular. Os valores de potência, taxa de extinção e figura de mérito são encontradas, assim como as saídas para [(0,0), (0,1), (1,0) (1,1)].

Para um comparação geral, tem-se a Figura 61 representando as taxas de FOMELG para todas as portas de todas as simulações.

Figura 61: Quadro comparativo de todas as portas e suas FOMELG - S: pulso secante hiperbólico, CS: cascadeamento e pulso secante hiperbólico, R: pulso retangular e CR: cascadeamento e pulso retangular



Inicialmente, somente com pulsos secante hiperbólico, com um MZI e o ambos os coeficientes de acoplamento 50:50 é encontrada uma porta lógica AND para potências de 2, 3, 4, 5 e 6 W e valores de FOMELG 1.21 dB. Sequencialmente para a simulação com um MZI e o primeiro acoplador com o coeficiente de acoplamento 20:80 são encontradas portas XOR, AND e OR para potências de 2, 3, 4, 5 e 6 W e valores de FOMELG 13,82 dB, 13,82 dB e 11,38 dB, respectivamente. Fornecendo um ganho de 12,62% dB para a figura de mérito da porta AND. Na simulação de cascadeamento tem-se a estrutura de três MZI e valores de potência. Obtém-se portas XOR, AND e OR com valores de FOMELG 30,73dB, 30,73dB e 24,17dB, respectivamente. Em comparativo a simulação com um MZI 20:80 as portas XOR e AND obteve-se ganho de 16,91dB e a para a porta OR 12,79dB.

Após as simulações com pulso secante hiperbólico são realizados, para as mesmas estruturas, simulações com pulso retangular. Para a primeira simulação não se obtém porta lógica. Para a segunda (simples 20:80) tem-se portas XOR, AND e OR com as suas respectivas FOMELG: 17.8 dB, 17.8 dB e 35.08 dB. A terceira simulação (cascadeado 20:80) tem como resultado XOR, AND e OR com FOMELG 49.35 dB, 49.35 dB e 42.66 dB, respectivamente. Em comparativo as estruturas simples e cascadeada, a simulação cascadeada obteve ganhos em relação ao valor de FOMELG. Para as portas XOR, AND e OR os ganhos foram de 31,55dB, 31,55dB e 7,58dB, respectivamente.

CONCLUSÃO

6.1 Conclusão

Foi estudado a geração de portas lógicas através de dois tipos de estruturas, uma com um interferômetro Mach-Zehnder e outra cascadeando três desses interferômetros, para ambas as estruturas foram utilizados dois tipos de pulsos na entrada, secante hiperbólico e retangular.

Foi visto que é possível gerar porta lógica dos tipos AND, OR e XOR, com ambas as estruturas. Através da variação do esquemático e tipo de pulso obtém-se melhores figuras de mérito, ou seja, as melhores portas. E para a variação de potência se manteve os resultados de FOMELG. Para a estrutura simples com pulso secante hiperbólico pode-se utilizar somente o valor de potência média para gerar a porta lógica, diferente das outras estruturas e tipo de pulso. Nos casos das estruturas cascadeada (ambos os pulsos) e simples (pulso retangular) é possível gerar portas através dos valores de potência média e potência de pico.

Circuito meio somador é encontrada para determinadas estruturas (simples e cascadeamento - 20:80). E todos os objetivos alcançados são para os dois tipos de pulsos.

As portas lógicas geradas através do esquemáticos cascadeado com pulso retangular apresentaram os maiores valores de FOMELG. Os pulsos de saída demonstraram melhor comportamento quanto para a representação de bits 0 e 1.

6.2 Trabalhos futuros

Pretende-se dar continuidade desse trabalho através da análise do esquemático cascadeado para controle 01, 10 e 11 com ambos os pulsos. Além disso, tem-se a perspectiva dos seguintes trabalhos futuros:

- obter portar lógicas NAND, NOR, NXOR e NOT com o interferômetro Mach-Zehnder;
- gerar circuito somador completos, meio subtrator e subtrator completo;
- trabalhar em cima da largura temporal do pulso com objetivo performático;
- aplicar não linearidades diferentes para ambos os braços (bar e cross) baseado no MZI proposto;
- Utilização do amplificador de fibra dopada com érbio (Erbium Doped Fiber Amplifier - EDFA) no braço bar (fibra não linear) da estrutura MZI proposta;
- Esquemático para 3 (três) MZI proposto com EDFA no braço bar para uma estrutura cascadeada;
- Variação do tipo de pulso presente nos controles das estruturas cascadeada.

Bibliografia

- AGRAWAL, Govind. **Applications of nonlinear fiber optics**. [S.l.]: Academic press, 2001.
- AGRAWAL, Govind P. **Lightwave technology: components and devices**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2004.
- AGRAWAL, Govind P. **Nonlinear fiber optics**. [S.l.]: Academic press, 2007.
- AGRAWAL, Govind P. **Sistemas de Comunicação por Fibra Óptica**. [S.l.]: Campus, 2014.
- AMAZONAS, José Roberto de Almeida. **Projeto de sistemas de comunicações ópticas**. [S.l.]: Manole, 2005.
- BENJAMIN, SD; SMITH, PWE. Tailoring of low-temperature-grown gallium arsenide for all-optical device applications. In: IEEE. **Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting, 1996. LEOS 96., IEEE**. [S.l.], 1996. v. 1, p. 129–130.
- BOUMAZA, N; BENOUAZ, T; CHIKHAOUI, A; CHEKNANE, A. Numerical simulation of nonlinear pulses propagation in a nonlinear optical directional coupler. **Int. J. Phys. Sci**, Citeseer, v. 4, n. 9, p. 505–513, 2009.
- FERREIRA, AC; COÊLHO, AG; SOUSA, JRR; SOBRINHO, CS; MAGALHÃES, FTGB; GUIMARÃES, GF; SALES, JC; MENEZES, JWM; SOMBRA, ASB *et al*. Pam–ask optical logic gates in an optical fiber sagnac interferometer. **Optics & Laser Technology**, Elsevier, v. 77, p. 116–125, 2016.
- FRAGA, WB; MENEZES, JWM; SILVA, MG Da; SOBRINHO, CS; SOMBRA, ASB. All optical logic gates based on an asymmetric nonlinear directional coupler. **Optics communications**, Elsevier, v. 262, n. 1, p. 32–37, 2006.
- KAZOVSKY, Leonid G; BENEDETTO, Sergio; WILLNER, Alan E. **Optical fiber communication systems**. [S.l.]: Artech House, 1996.
- KUMAR, Ajay; KUMAR, Santosh; RAGHUWANSHI, SK. Implementation of all-optical logic gate using soa-mzi structures. **STM Journals**, p. 2231–0401, 2013.
- KUMAR, Ajay; KUMAR, Santosh; RAGHUWANSHI, Sanjeev Kumar. Implementation of xor/xnor and and logic gates by using mach–zehnder interferometers. **Optik-International Journal for Light and Electron Optics**, Elsevier, v. 125, n. 19, p. 5764–5767, 2014.

KUROSE, James F; ROSS, Keith W; MARQUES, Arlete Simille; ZUCCHI, Wagner Luiz. **Redes de Computadores ea Internet: uma abordagem top-down**. [S.l.]: Pearson, 2010.

LACHS, Gerald. Fiber-optic communications-systems, analysis, and enhancements. McGraw-Hill Professional, 1998.

LI, Qiliang; YUAN, Hongliang. All-optical logic gates based on cross-phase modulation in an asymmetric coupler. **Optics Communications**, Elsevier, v. 319, p. 90–94, 2014.

LI, Qiliang; ZHANG, Zhen; LI, Shuqin; HU, Miao; WEI, Yizhen; LU, Yang. All-optical logic gates based on wavelength conversion in a nonlinear directional coupler. **Optics Communications**, Elsevier, v. 354, p. 246–249, 2015.

LIU, Peter Q; WANG, Xiaojun; GMACHL, Claire F. Single-mode quantum cascade lasers employing asymmetric mach-zehnder interferometer type cavities. **Applied Physics Letters**, AIP Publishing, v. 101, n. 16, p. 161115, 2012.

MARTINEZ, JM; HERRERA, J; RAMOS, F; MARTI, J. All-optical correlation using cascaded logic xor gates based on active mach-zehnder interferometers. In: IET. **Optical Communication, 2005. ECOC 2005. 31st European Conference on**. [S.l.], 2005. p. 103–104.

MEDEIROS, Julio Cesar de O. **Princípios de Telecomunicações**. [S.l.]: Érica, 2005.

MEHRA, Rekha; JAIWAL, Shikha; DIXIT, HK. All-optical xor gate using soa based mach-zehnder interferometer. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. **International Conference on Communication and Electronics System Design**. [S.l.], 2013. p. 87600A–87600A.

MENEZES, JWM; FRAGA, WB; FERREIRA, AC; GUIMARAES, GF; Furtado Filho, AFGF; SOBRINHO, CS; SOMBRA, ASB. All-optical half-adder using all-optical xor and and gates for optical generation of sum and carry. **Fiber and Integrated Optics**, Taylor & Francis, v. 29, n. 4, p. 254–271, 2010.

MENEZES, José Wally Mendonça. **Análise de performance de sólitons ópticos espaço-temporais em guia planar com não-linearidade cúbico quintica periodicamente modulada e circuitos lógicos operando nos regimes Kerr instantâneo e relaxado**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, 2010.

OKAMOTO, Katsunari. **Fundamentals of optical waveguides**. [S.l.]: Academic press, 2010.

RAMASWAMI, Rajiv; SIVARAJAN, Kumar; SASAKI, Galen. **Optical networks: a practical perspective**. [S.l.]: Morgan Kaufmann, 2009.

REIS, Cláudia; CHATTOPADHYAY, Tanay; ANDRÉ, Paulo; TEIXEIRA, António. Single mach-zehnder interferometer based optical boolean logic gates. **Applied optics**, Optical Society of America, v. 51, n. 36, p. 8693–8701, 2012.

RIBEIRO, José Antônio Justino. **Comunicações ópticas**. [S.l.]: Érica, 2003.

RICCI, Trieste Freire; OSTERMANN, Fernanda; PRADO, Sandra Denise. O tratamento clássico do interferômetro de mach-zehnder: uma leitura mais moderna do experimento da fenda dupla na introdução da física quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, 2007.

SRIVASTAVA, Arpita; MEDHEKAR, S. Switching behavior of a nonlinear mach-zehnder interferometer: Saturating nonlinearity. **Optics & Laser Technology**, Elsevier, v. 43, n. 7, p. 1208–1211, 2011.

T, Theresal; K, Sathish; R, Aswinkumar. A new design of optical reversible adder and subtractor using mzi. **International Journal of Scientific and Research Publications**, v. 5, 2015.

TAUB, Herbert; SCHILLING, Donald L. **Eletronica digital**. [S.l.]: Sao Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1982.

WADA, O. Femtosecond all-optical devices for tera-bit/sec optical networks. In: IEEE. **Electron Devices Meeting, 2000. IEDM'00. Technical Digest. International**. [S.l.], 2000. p. 589–592.

YE, Xiaohua; YE, Peida; ZHANG, Min. All-optical nand gate using integrated soa-based mach-zehnder interferometer. **Optical Fiber Technology**, Elsevier, v. 12, n. 4, p. 312–316, 2006.

ZHANG, Min; ZHAO, Yongpeng; WANG, Ling; WANG, Jian; YE, Peida. Design and analysis of all-optical xor gate using soa-based mach-zehnder interferometer. **Optics Communications**, Elsevier, v. 223, n. 4, p. 301–308, 2003.

APÊNDICE A

Neste apêndice encontram-se as tabelas com: tabela verdade das portas lógicas, potência, taxa de extinção, coeficientes de índice não linear e figura de mérito. Além dos gráficos de taxa de extinção e potência para saídas bar e cross (estrutura simples), bar1 e bar2 (estrutura cascadeada). Todos esses parâmetros são encontrados para as potências de 1 a 6 W e pulsos do tipo: secante hiperbólico e retangular

Este apêndice está estruturado da seguinte forma:

1. Apêndice A.1 - Acoplador 50:50 - estrutura simples e pulso secante hiperbólico

- Quadro geral - Tabela verdade, potência, xratio e FOMELG
- Gráfico xratio (bar/cross)
- Gráfico xratio (cross/bar)
- Gráfico potência bar
- Gráfico potência cross
- Pulso de saída

2. Apêndice A.2 - Acoplador 20:80 - estrutura simples e pulso secante hiperbólico

- Quadro geral - Tabela verdade, potência, xratio e FOMELG
- Gráfico xratio (bar/cross)
- Gráfico xratio (cross/bar)
- Gráfico potência bar
- Gráfico potência cross
- Pulso de saída

3. Apêndice A.2 - Acoplador 20:80 - estrutura cascadeada e pulso secante hiperbólico

- Quadro geral - Tabela verdade, potência, xratio e FOMELG
- Gráfico xratio (bar1/bar2)
- Gráfico xratio (bar2/bar1)
- Gráfico potência bar1
- Gráfico potência bar2
- Pulso de saída

4. Apêndice A.1 - Acoplador 50:50 - estrutura simples e pulso retangular

- Gráfico xratio (bar/cross)

5. Apêndice A.2 - Acoplador 20:80 - estrutura simples e pulso retangular

- Quadro geral - Tabela verdade, potência, xratio e FOMELG
- Gráfico xratio (bar/cross)
- Gráfico xratio (cross/bar)
- Gráfico potência bar
- Gráfico potência cross
- Pulso de saída

6. Apêndice A.2 - Acoplador 20:80 - estrutura cascadeada e pulso retangular

- Quadro geral - Tabela verdade, potência, xratio e FOMELG
- Gráfico xratio (bar1/bar2)
- Gráfico xratio (bar2/bar1)
- Gráfico potência bar1
- 5Gráfico potência bar2
- Pulso de saída

A.1 Acoplador 50:50 - estrutura simples e pulso secante hiperbólico

Tabela 16: Quadro geral para simulação acoplador 50:50

Potência 2 W e $\bar{n}_2 = 4,5 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$					
TB			Pot Bar	XRatio(Bar/Cross)	NL
0	0	0	0	0	0
0	1	0	0,27	0	0
1	0	0	0,27	0	0
1	1	1	0,61	1,21	1
FOMELG				1.21 dB	
Potência 3 W e $\bar{n}_2 = 3 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$					
TB			Pot Bar	XRatio(Bar/Cross)	NL
0	0	0	0	0	0
0	1	0	0,4	0	0
1	0	0	0,4	0	0
1	1	1	0,92	1,21	1
FOMELG				1.21 dB	
Potência 4 W e $\bar{n}_2 = 2,22 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$					
TB			Pot Bar	XRatio(Bar/Cross)	NL
0	0	0	0	0	0
0	1	0	0,51	0	0
1	0	0	0,51	0	0
1	1	1	1,19	1,21	1
FOMELG				1.21 dB	
Potência 5 W e $\bar{n}_2 = 1,8 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$					
TB			Pot Bar	XRatio(Bar/Cross)	NL
0	0	0	0	0	0
0	1	0	0,68	0	0
1	0	0	0,68	0	0
1	1	1	1,55	1,21	1
FOMELG				1.21 dB	
Potência 6 W e $\bar{n}_2 = 1,5 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$					
TB			Pot Bar	XRatio(Bar/Cross)	NL
0	0	0	0	0	0
0	1	0	0,81	0	0
1	0	0	0,81	0	0
1	1	1	1,86	1,21	1
FOMELG				1.21 dB	

TB = Tabela Verdade, NL = Nível Lógico

Figura 62: $XR_{Ratio}_{BAR/CROSS}$, coeficiente de acoplamento = 50:50, variações de potência de pico e $\bar{n}_2$

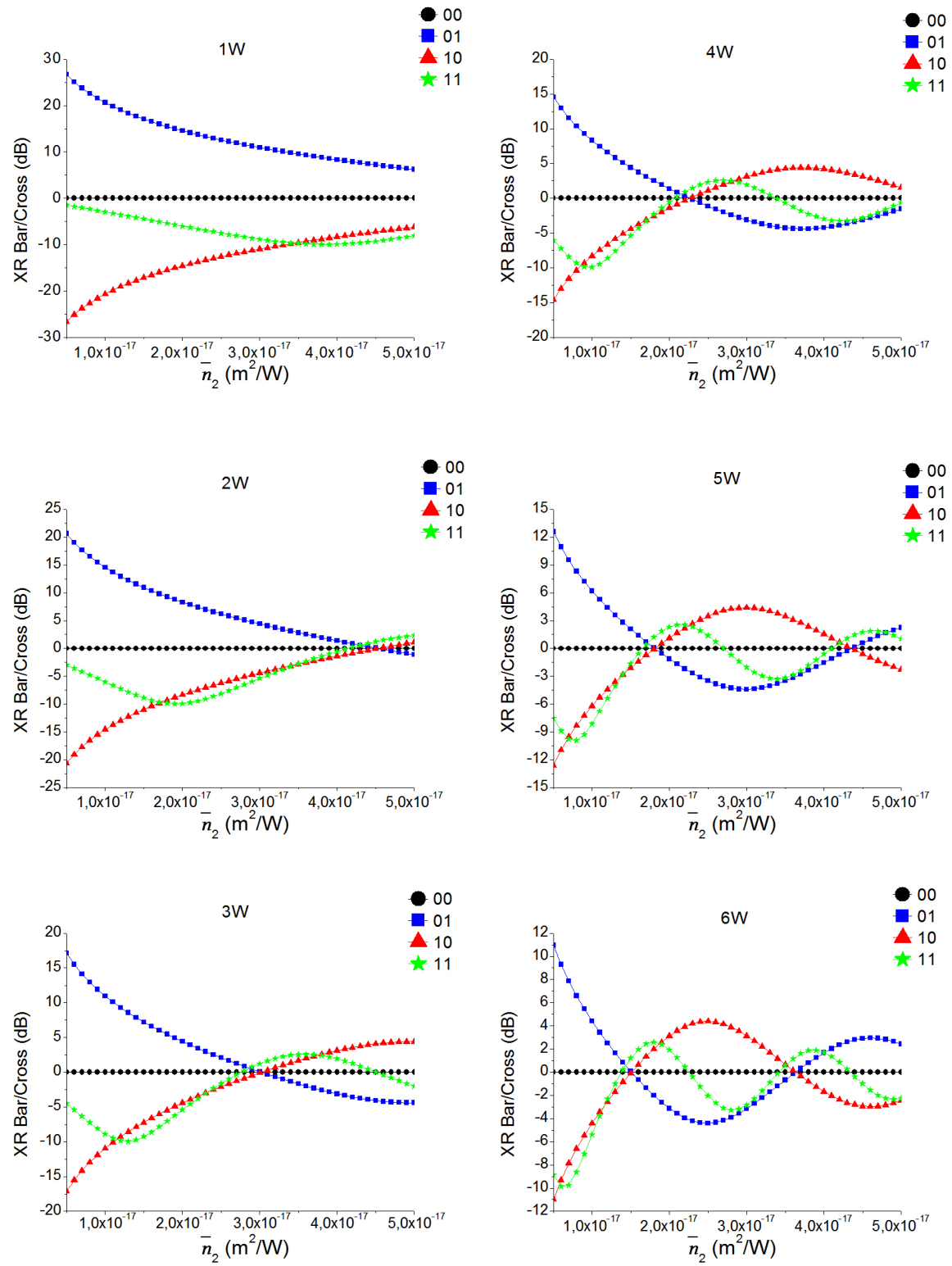


Figura 63: $XR_{Ratio_{CROSS}/BAR}$, coeficiente de acoplamento = 50:50, variações de potência de pico e $\bar{n}_2$

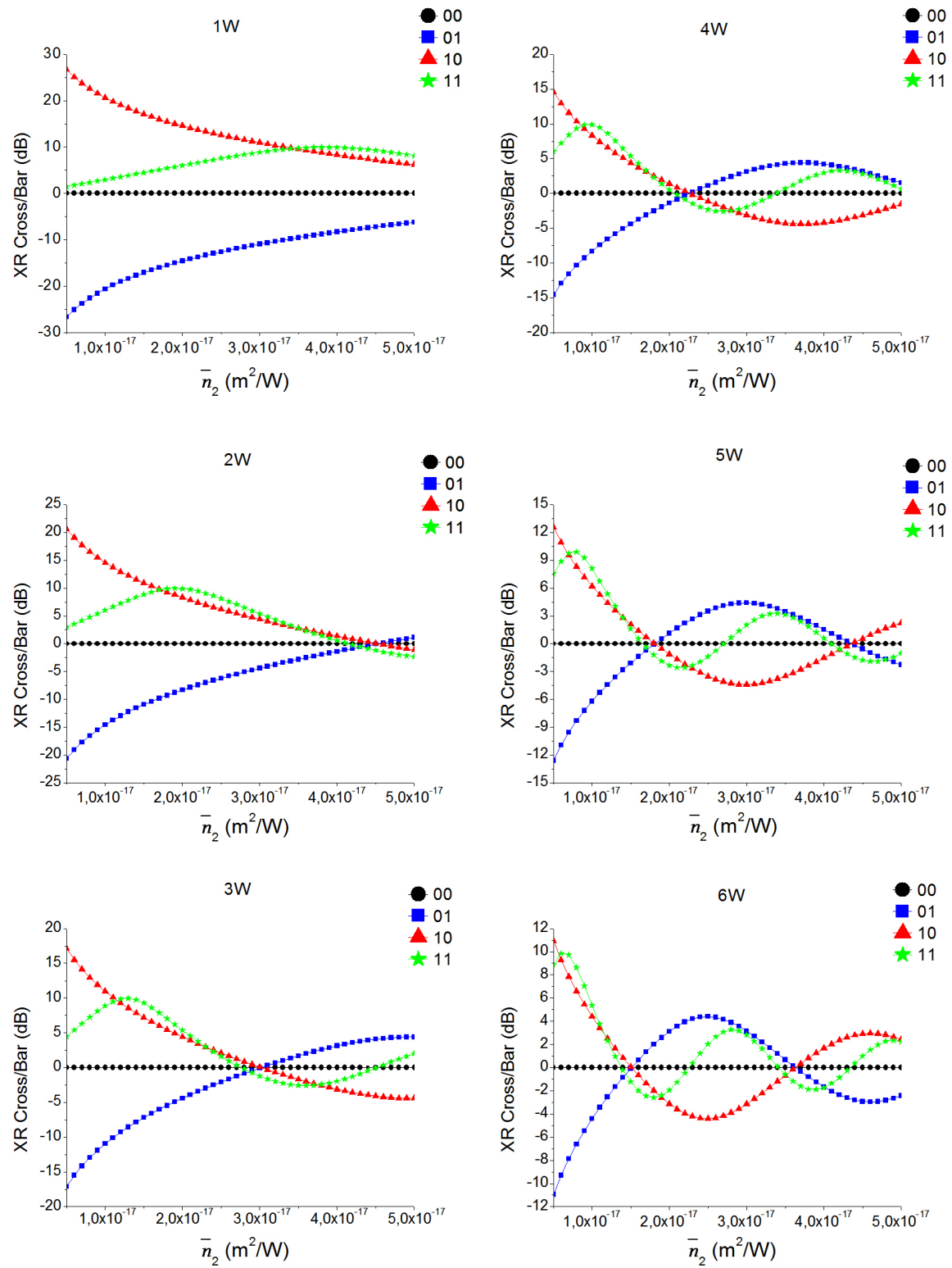


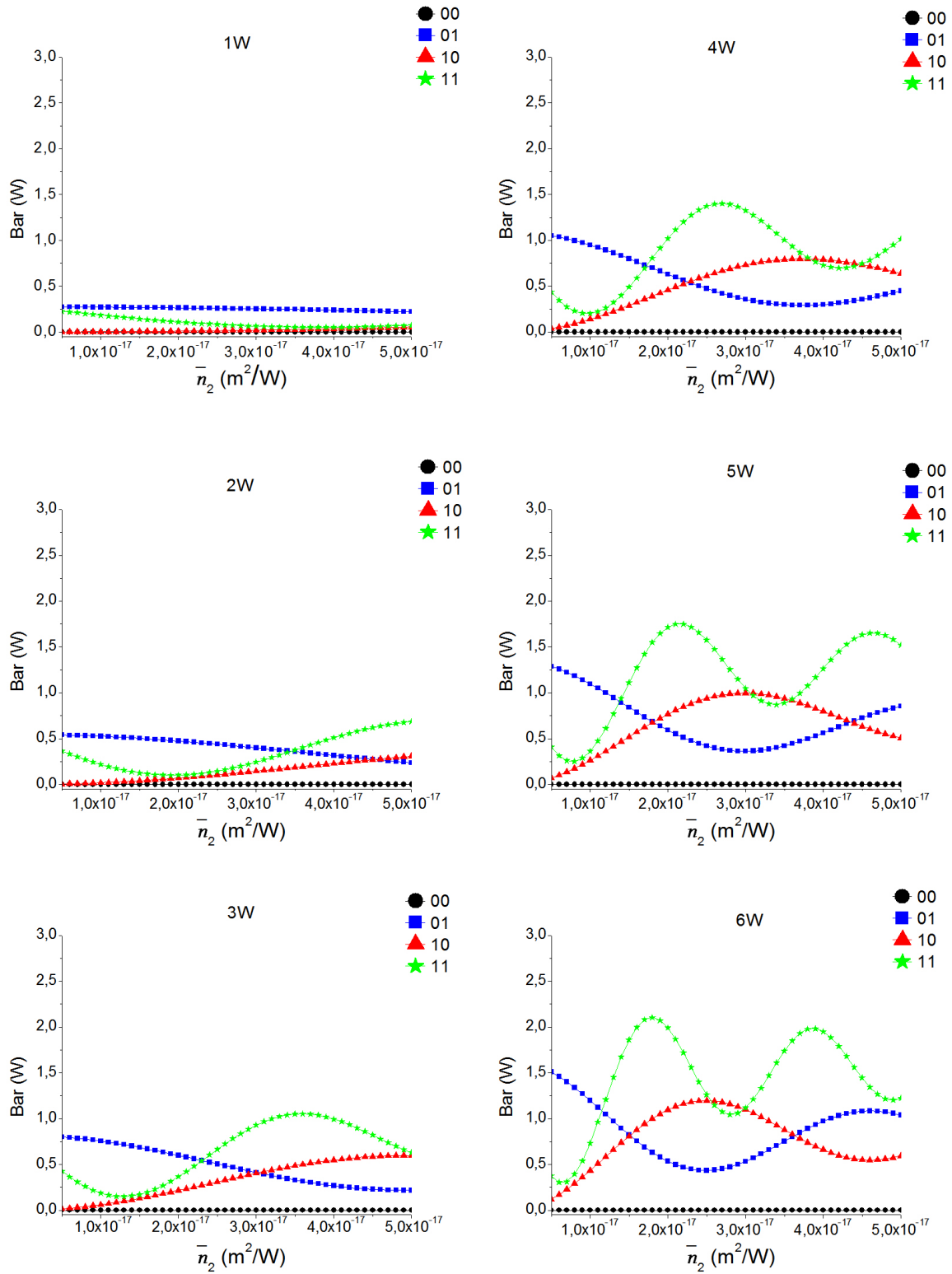
Figura 64: $Potncia_{BAR}$, coeficiente de acoplamento = 50:50, variações de potência de pico e $\bar{n}_2$ 

Figura 65: $Potncia_{CROSS}$, coeficiente de acoplamento = 50:50, variações de potência de pico e $\bar{n}_2$

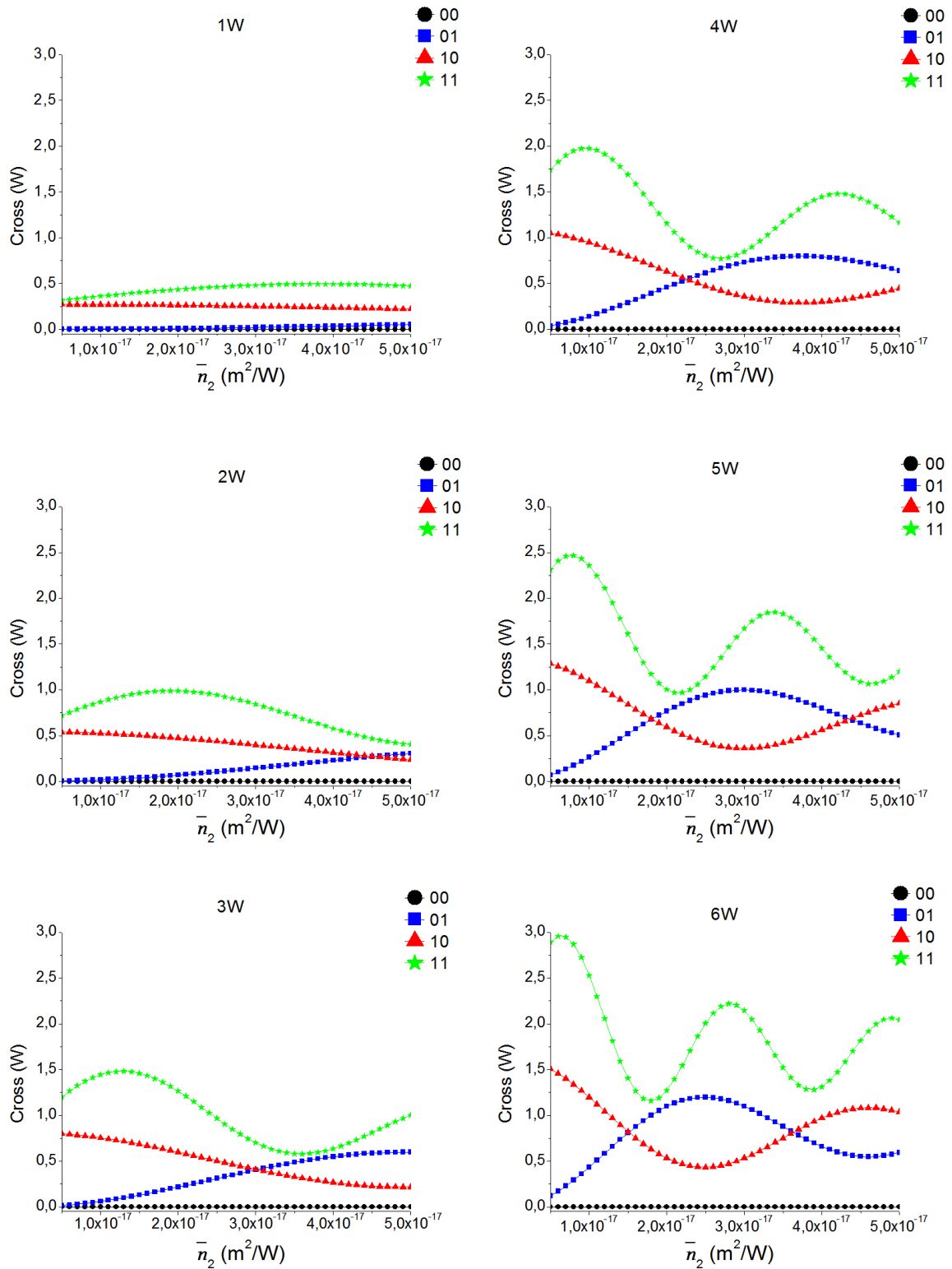
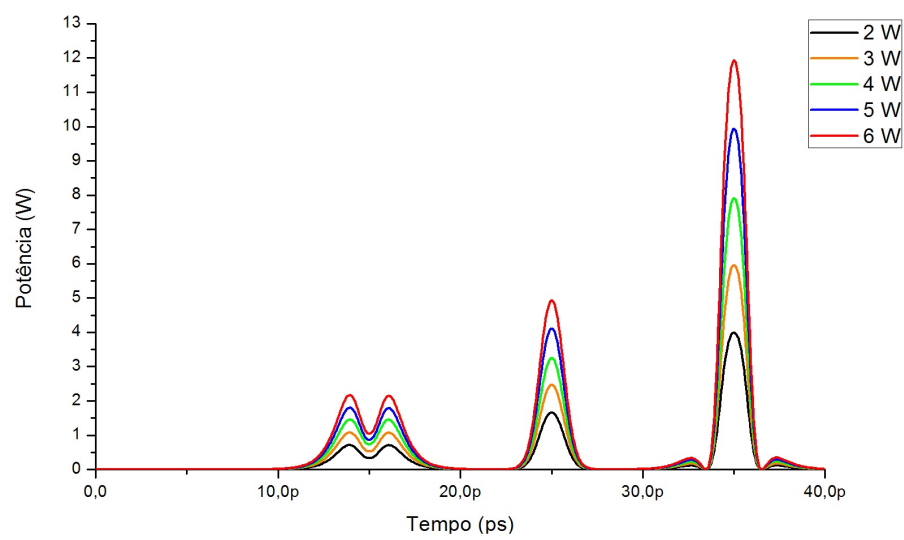


Figura 66: Saída *MZI* para pulsos com potência de pico 2, 3, 4, 5 e 6 W

A.2 Acoplador 20:80 - estrutura simples e pulso secante hiperbólico

Tabela 17: Quadro geral para simulação acoplador 20:80

Potência 2 W				$\bar{n}_2 = 3 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$						$\bar{n}_2 = 4,7 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$		
TB				Pot Bar	XR(B/C)	NL	Pot Cross	XR(C/B)	NL	Pot Bar	XR(B/C)	NL
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	0,46	7,93	1	0,07	-7,93	0	0,44	6,2	1
1	0	1	0	0,28	0,53	1	0,25	-0,53	0	0,37	3,41	1
1	1	0	1	0,24	-5,37	0	0,84	5,37	1	0,65	1,75	1
FOMELG				13.82 dB						11.36 dB		
Potência 3 W				$\bar{n}_2 = 2 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$						$\bar{n}_2 = 3,1 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$		
TB				Pot Bar	XR(B/C)	NL	Pot Cross	XR(C/B)	NL	Pot Bar	XR(B/C)	NL
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	0,7	7,93	1	0,11	-7,93	0	0,66	6,2	1
1	0	1	0	0,43	0,52	1	0,38	-0,52	0	0,56	3,41	1
1	1	0	1	0,36	-5,37	0	1,26	5,37	1	0,96	1,75	1
FOMELG				13.82 dB						11.36 dB		
Potência 4 W				$\bar{n}_2 = 1,5 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$						$\bar{n}_2 = 2,3 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$		
TB				Pot Bar	XR(B/C)	NL	Pot Cross	XR(C/B)	NL	Pot Bar	XR(B/C)	NL
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	0,94	7,93	1	0,15	-7,93	0	0,88	6,2	1
1	0	1	0	0,57	0,52	1	0,51	-0,52	0	0,74	3,41	1
1	1	0	1	0,48	-5,37	0	1,68	5,37	1	1,27	1,75	1
FOMELG				13.82 dB						11.36 dB		
Potência 5 W				$\bar{n}_2 = 1,2 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$						$\bar{n}_2 = 1,9 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$		
TB				Pot Bar	XR(B/C)	NL	Pot Cross	XR(C/B)	NL	Pot Bar	XR(B/C)	NL
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	1,17	7,93	1	0,18	-7,93	0	1,09	6,2	1
1	0	1	0	0,72	0,52	1	0,64	-0,52	0	0,93	3,41	1
1	1	0	1	0,61	-5,37	0	2,1	5,37	1	1,64	1,75	1
FOMELG				13.82 dB						11.36 dB		
Potência 6 W				$\bar{n}_2 = 1 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$						$\bar{n}_2 = 1,6 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$		
TB				Pot Bar	XR(B/C)	NL	Pot Cross	XR(C/B)	NL	Pot Bar	XR(B/C)	NL
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	1,4	7,93	1	0,22	-7,93	0	1,31	6,2	1
1	0	1	0	0,86	0,52	1	0,76	-0,52	0	1,12	3,41	1
1	1	0	1	0,73	-5,37	0	2,53	5,37	1	1,99	1,75	1
FOMELG				13.82 dB						11.36 dB		

TB = Tabela Verdade, NL = Nível Lógico, XR(B/C) = XRatio(Bar/Cross), XR(C/B) = XRatio(Cross/Bar)

Figura 67: $XR_{Ratio_{BAR/CROSS}}$, coeficiente de acoplamento 20:80, variação da potência de pico e $\bar{n}_2$

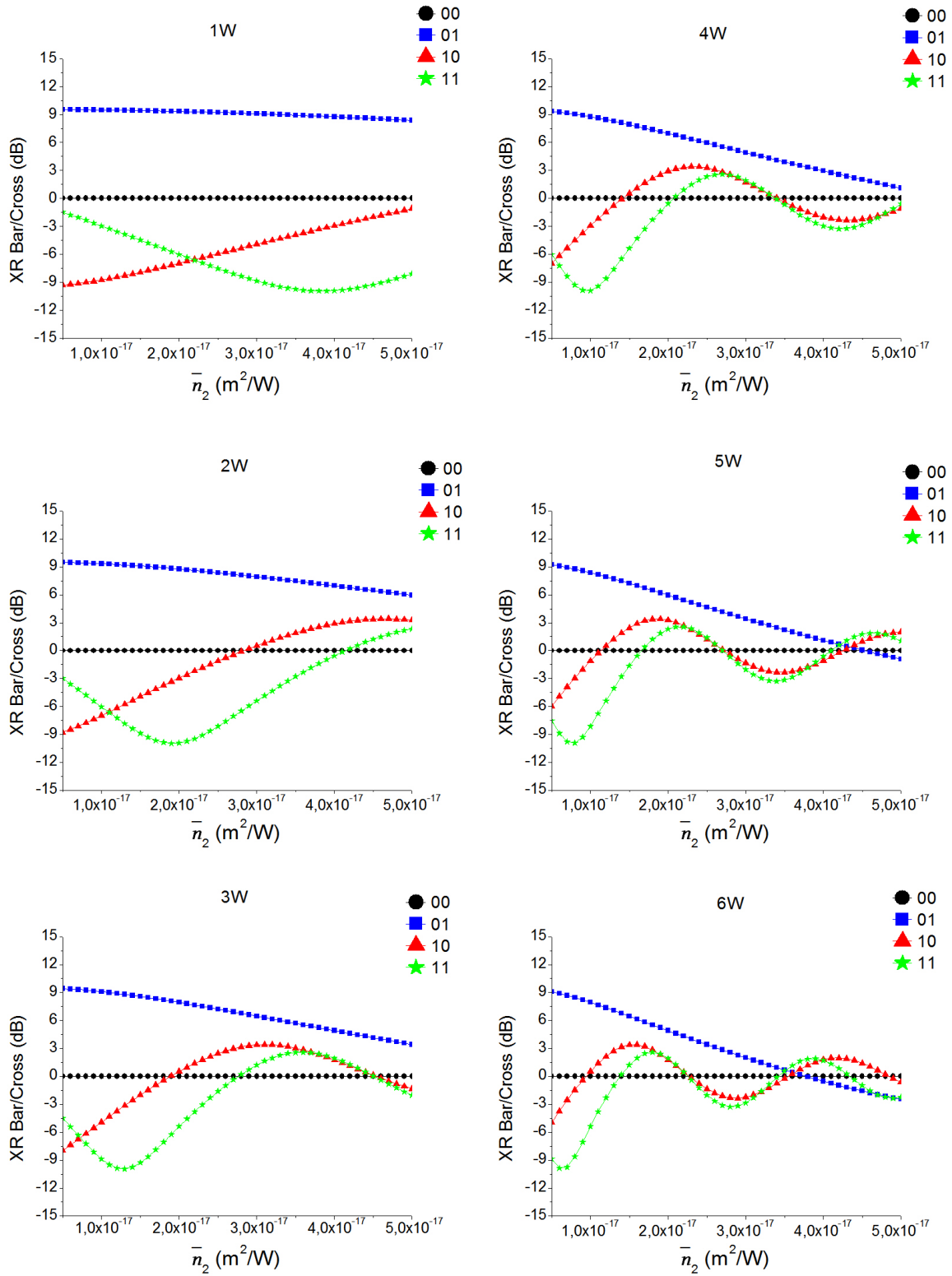


Figura 68: $XRatio_{CROSS/BAR}$, coeficiente de acoplamento 20:80, variação da potência de pico e $\bar{n}_2$

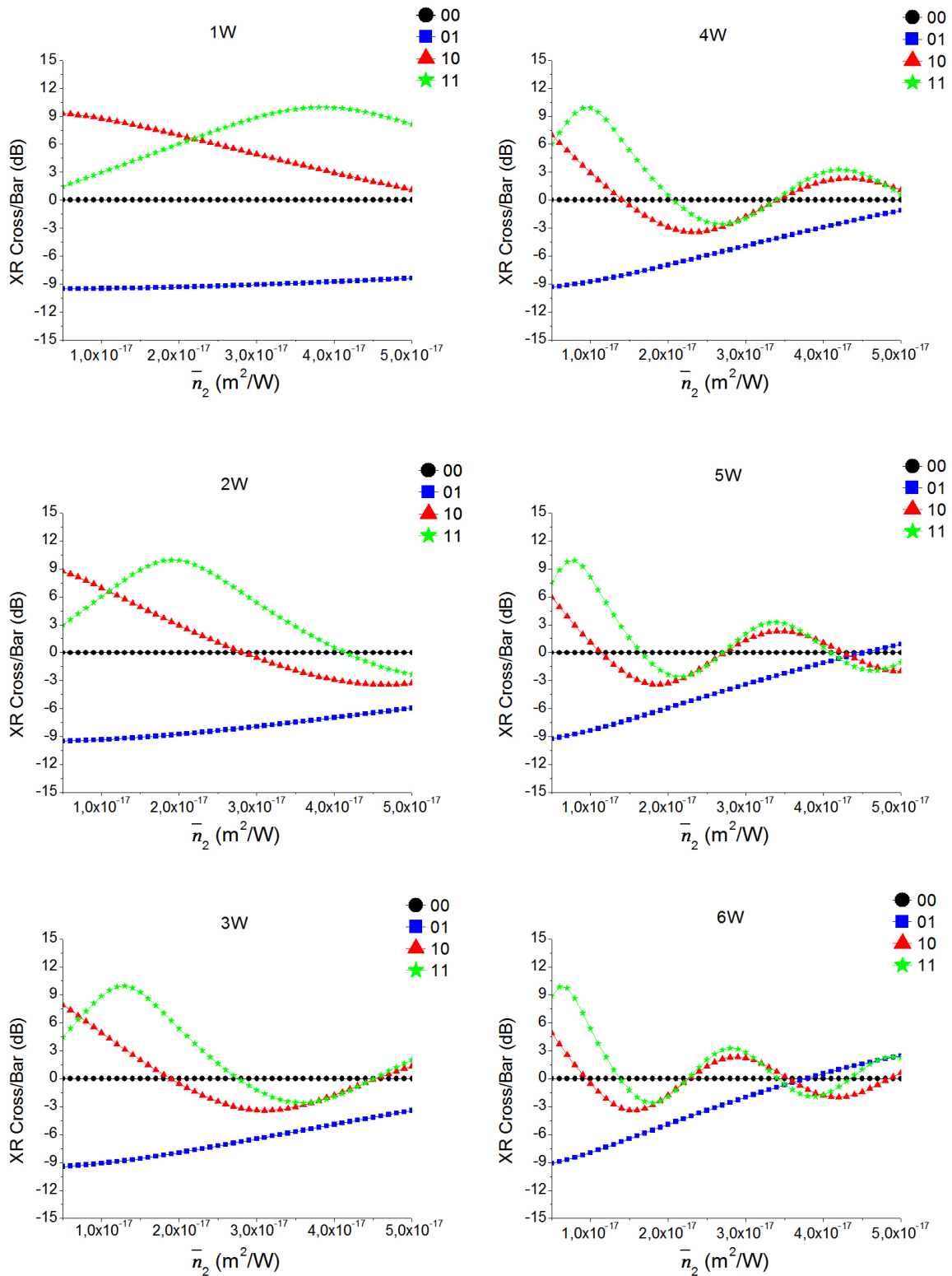


Figura 69: Potência bar, coeficiente de acoplamento = 20:80, variações de potência de pico e $\bar{n}_2$

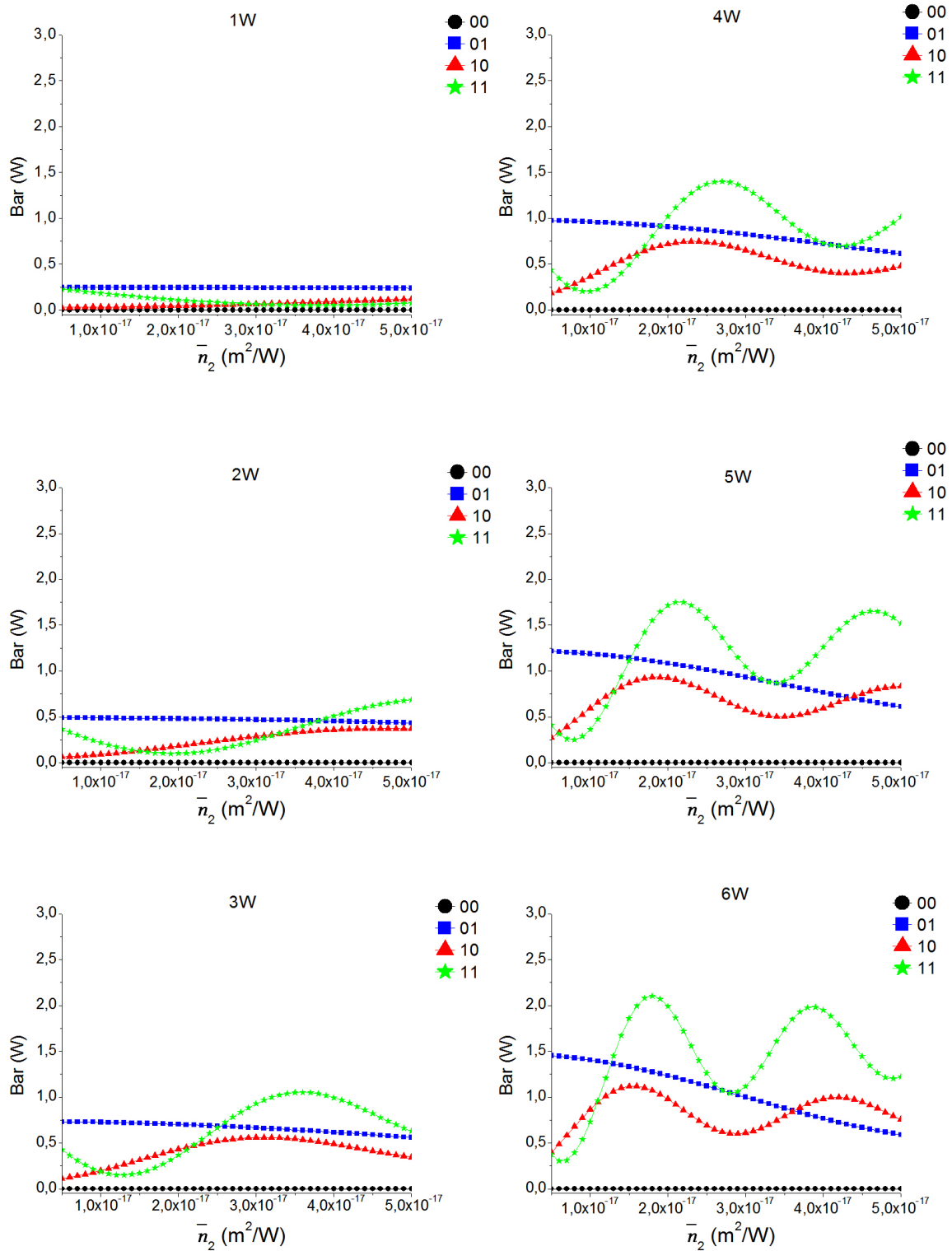


Figura 70: Potência cross, coeficiente de acoplamento = 20:80, variações de potência de pico e $\bar{n}_2$

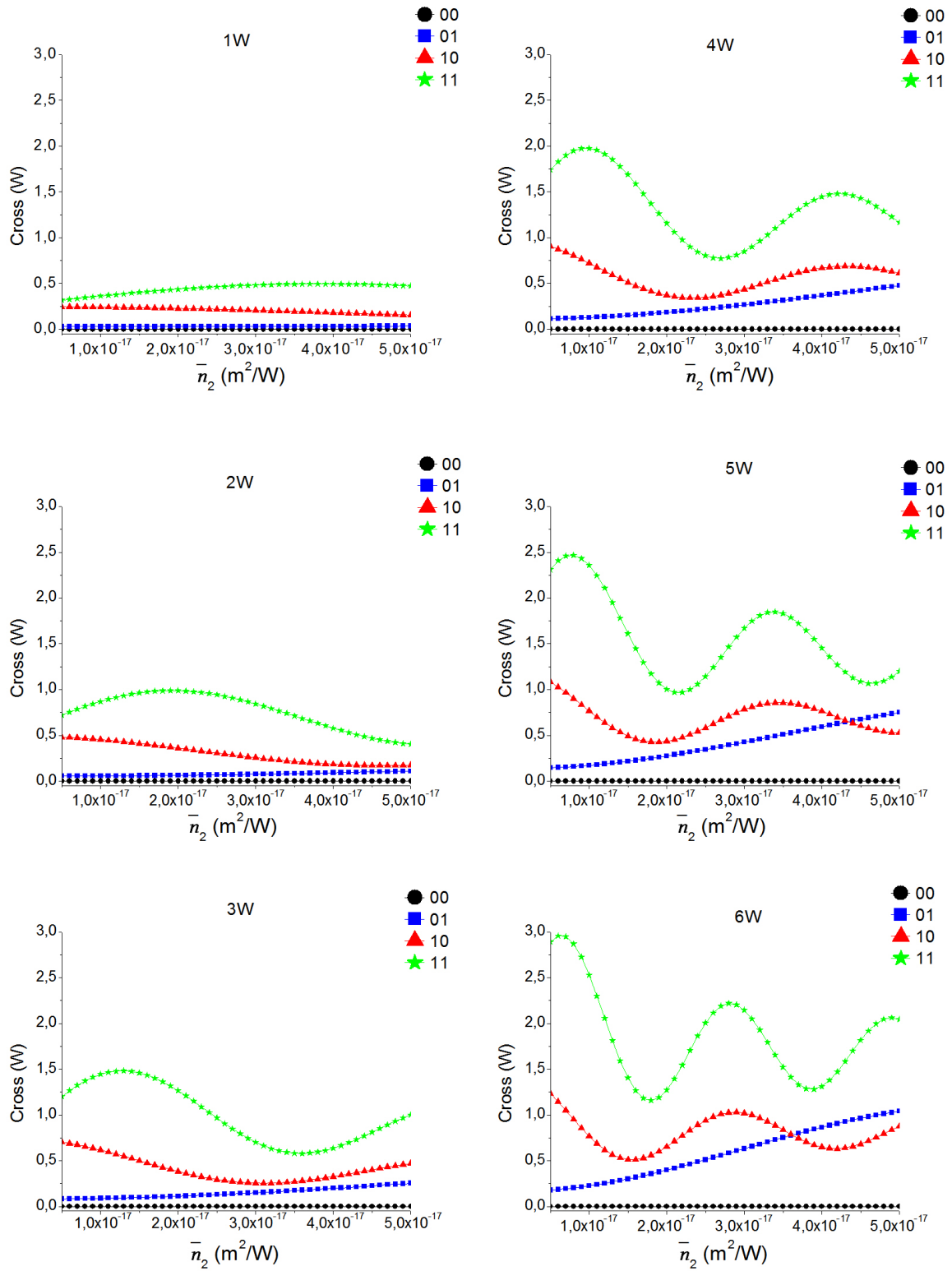
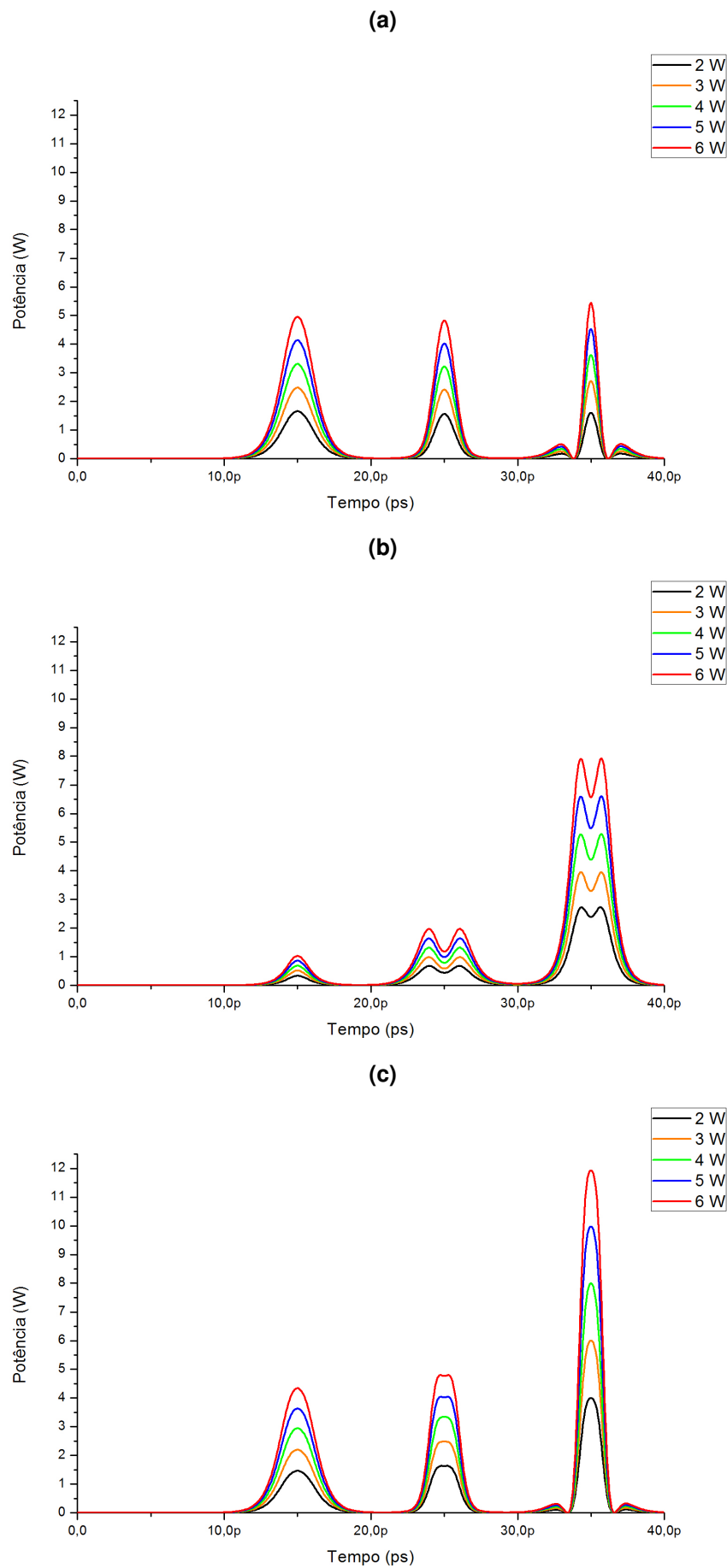


Figura 71: Saídas bar (a) e cross (b) do MZI para pulsos 2, 3, 4, 5 e 6 W - Portas XOR (a) e AND (b)

A.3 Acoplador 20:80 - estrutura cascadeada e pulso secante hiperbólico

Tabela 18: Quadro geral para simulação acoplador 20:80 - Controle 00

Potência 1 W						$\bar{n}_2 = 3,8 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$						$\bar{n}_2 = \text{—}$		
TB						Pot Bar	XR(B1/B2)	NL	Pot Cross	XR(B2/B1)	NL	Pot Bar	XR(B1/B2)	NL
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	—	—	—
0	1	1	0	1	1	0,21	18,14	1	0,003	-18,14	0	—	—	—
1	0	1	0	1	1	0,07	3,65	1	0,03	-3,65	0	—	—	—
1	1	0	1	1	1	0,04	-8,61	0	0,32	8,61	1	—	—	—
FOMELG						30.4 dB						dB		
Potência 2 W						$\bar{n}_2 = 1,9 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$						$\bar{n}_2 = 4,5 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$		
TB						Pot Bar	XR(B1/B2)	NL	Pot Cross	XR(B2/B1)	NL	Pot Bar	XR(B1/B2)	NL
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	1	1	0,42	18,14	1	0,006	-18,04	0	0,37	13,11	1
1	0	1	0	1	1	0,15	3,65	1	0,06	-3,65	0	0,3	10,44	1
1	1	0	1	1	1	0,08	-8,61	0	0,65	8,61	1	0,35	0,62	1
FOMELG						30.4 dB						24.17 dB		
Potência 3 W						$\bar{n}_2 = 1,2 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$						$\bar{n}_2 = 3 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$		
TB						Pot Bar	XR(B1/B2)	NL	Pot Cross	XR(B2/B1)	NL	Pot Bar	XR(B1/B2)	NL
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	1	1	0,64	18,14	1	0,009	-18,14	0	0,56	13,11	1
1	0	1	0	1	1	0,21	3,65	1	0,09	-3,65	0	0,46	10,44	1
1	1	0	1	1	1	0,13	-8,61	0	0,94	8,61	1	0,53	0,62	1
FOMELG						30.4 dB						24.17 dB		
Potência 4 W						$\bar{n}_2 = 1 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$						$\bar{n}_2 = 2,3 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$		
TB						Pot Bar	XR(B1/B2)	NL	Pot Cross	XR(B2/B1)	NL	Pot Bar	XR(B1/B2)	NL
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	1	1	0,85	18,14	1	0,01	-18,14	0	0,74	13,11	1
1	0	1	0	1	1	0,32	3,65	1	0,13	-3,65	0	0,61	10,44	1
1	1	0	1	1	1	0,18	-8,61	0	1,33	8,61	1	0,7	0,62	1
FOMELG						30.4 dB						24.17 dB		
Potência 5 W						$\bar{n}_2 = 8 \cdot 10^{-18} m^2 W^{-1}$						$\bar{n}_2 = 1,8 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$		
TB						Pot Bar	XR(B1/B2)	NL	Pot Cross	XR(B2/B1)	NL	Pot Bar	XR(B1/B2)	NL
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	1	1	1,06	18,14	1	0,01	-18,14	0	0,94	13,11	1
1	0	1	0	1	1	0,41	3,65	1	0,16	-3,65	0	0,76	10,44	1
1	1	0	1	1	1	0,22	-8,61	0	1,67	8,61	1	0,88	0,62	1
FOMELG						30.4 dB						24.17 dB		
Potência 6 W						$\bar{n}_2 = 6 \cdot 10^{-18} m^2 W^{-1}$						$\bar{n}_2 = 1,5 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$		
TB						Pot Bar	XR(B1/B2)	NL	Pot Cross	XR(B2/B1)	NL	Pot Bar	XR(B1/B2)	NL
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	1	1	1,28	18,14	1	0,02	-18,14	0	1,13	13,11	1
1	0	1	0	1	1	0,43	3,65	1	0,2	-3,65	0	0,92	10,44	1
1	1	0	1	1	1	0,27	-8,61	0	1,88	8,61	1	1,06	0,62	1
FOMELG						30.4 dB						24.17 dB		

TB = Tabela Verdade, NL = Nível Lógico, XR(B1/B2) = XRatio(Bar1/Bar2), XR(B2/B1) = XRatio(Bar2/Bar1)

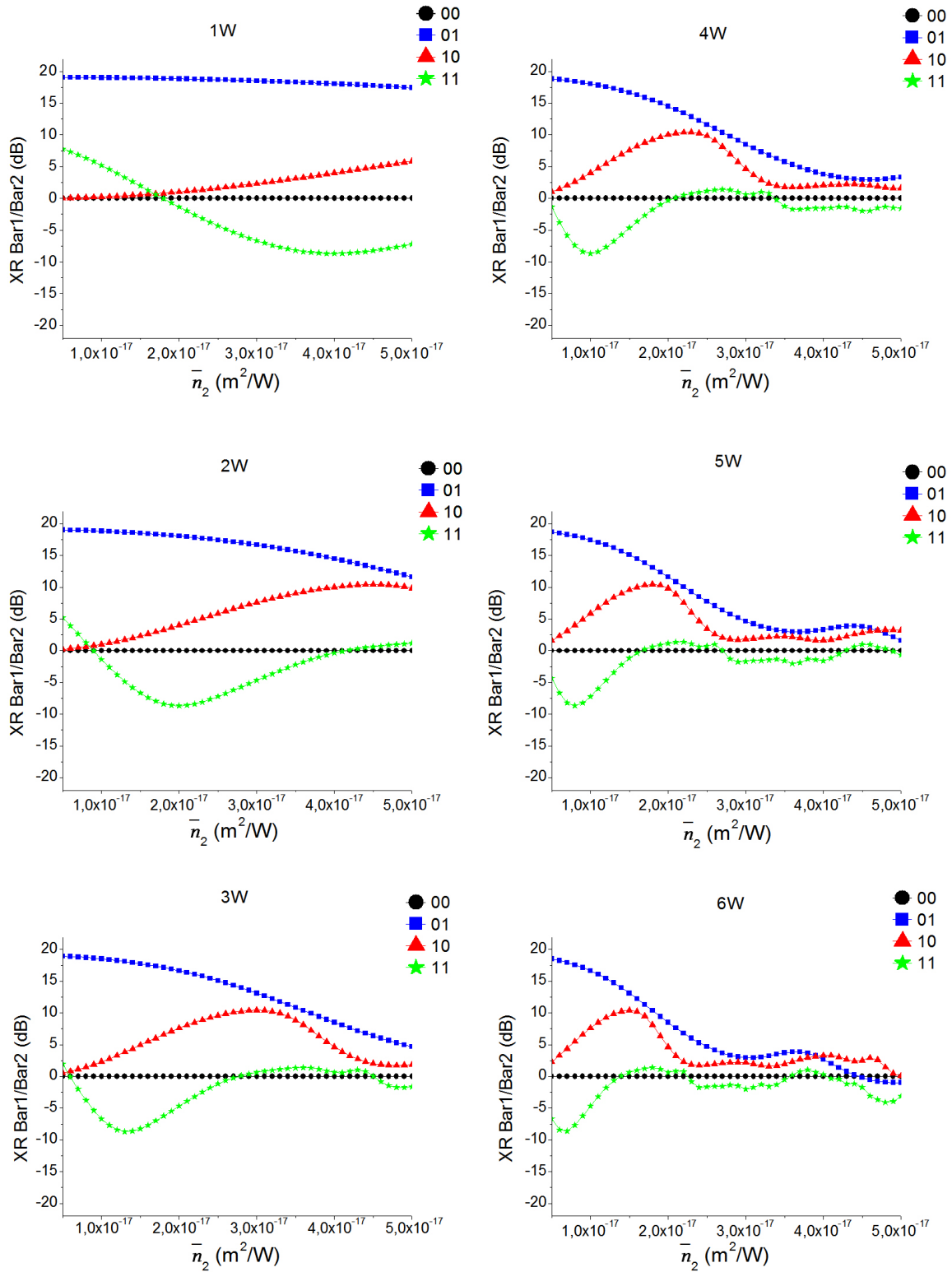
Figura 72: $XRatio_{BAR1/BAR2}$ cascadeamento, variação da potência de pico e $\bar{n}_2$ 

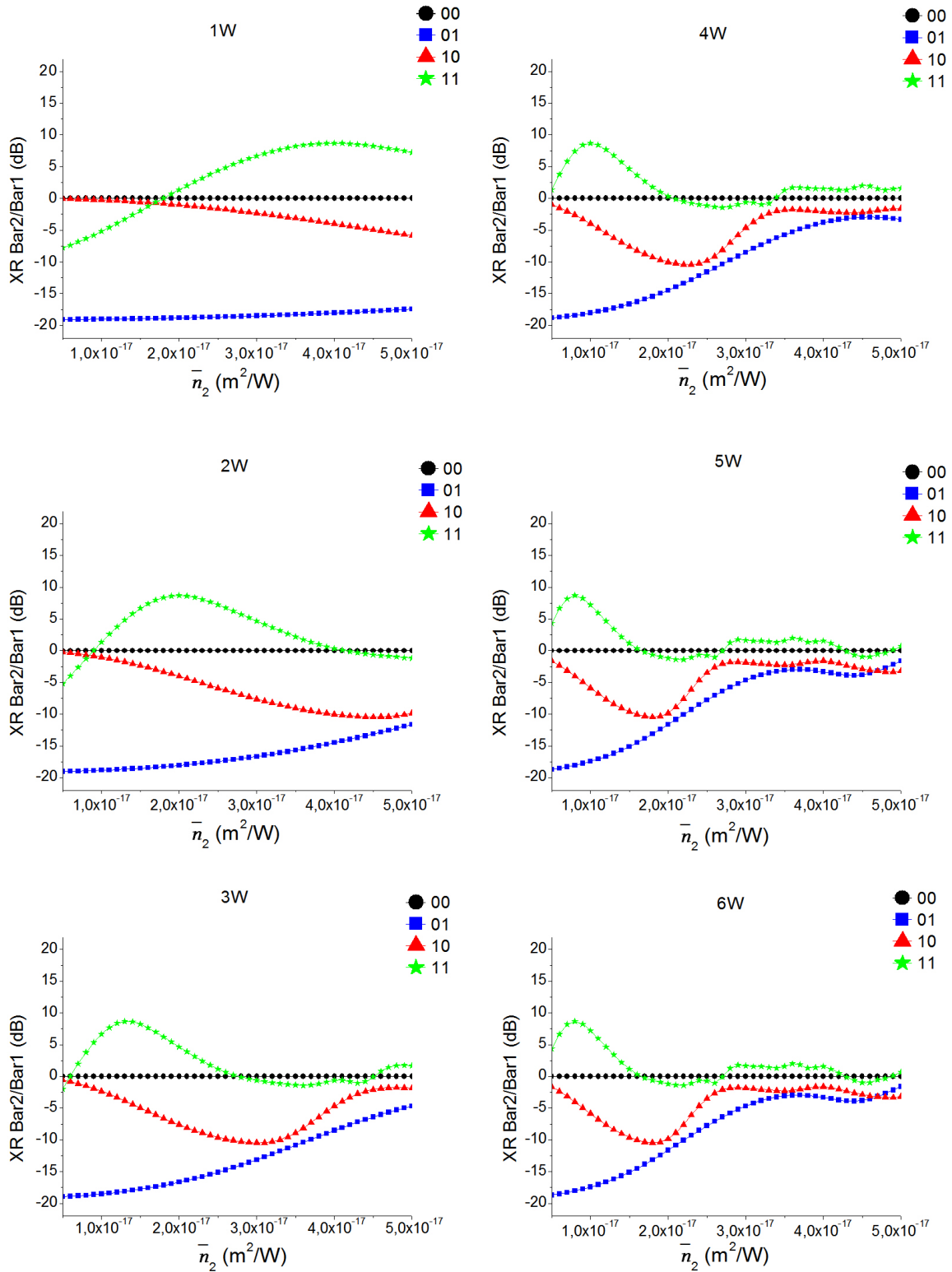
Figura 73: $XRatio_{BAR2/BAR1}$ cascadeamento, variação da potência de pico e $\bar{n}_2$ 

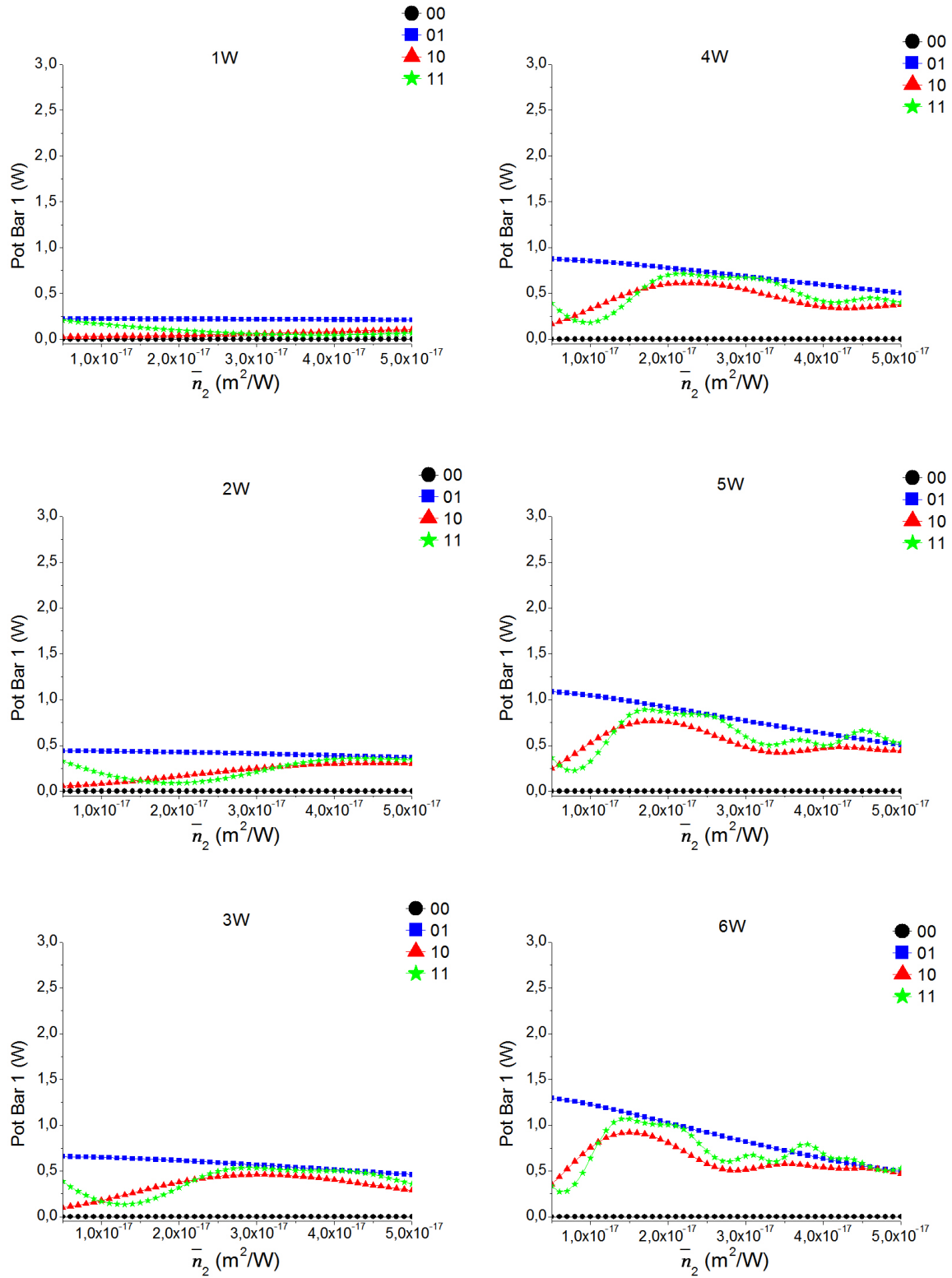
Figura 74: Potência bar1 cascadeamento, variação da potência de pico e $\bar{n}_2$ 

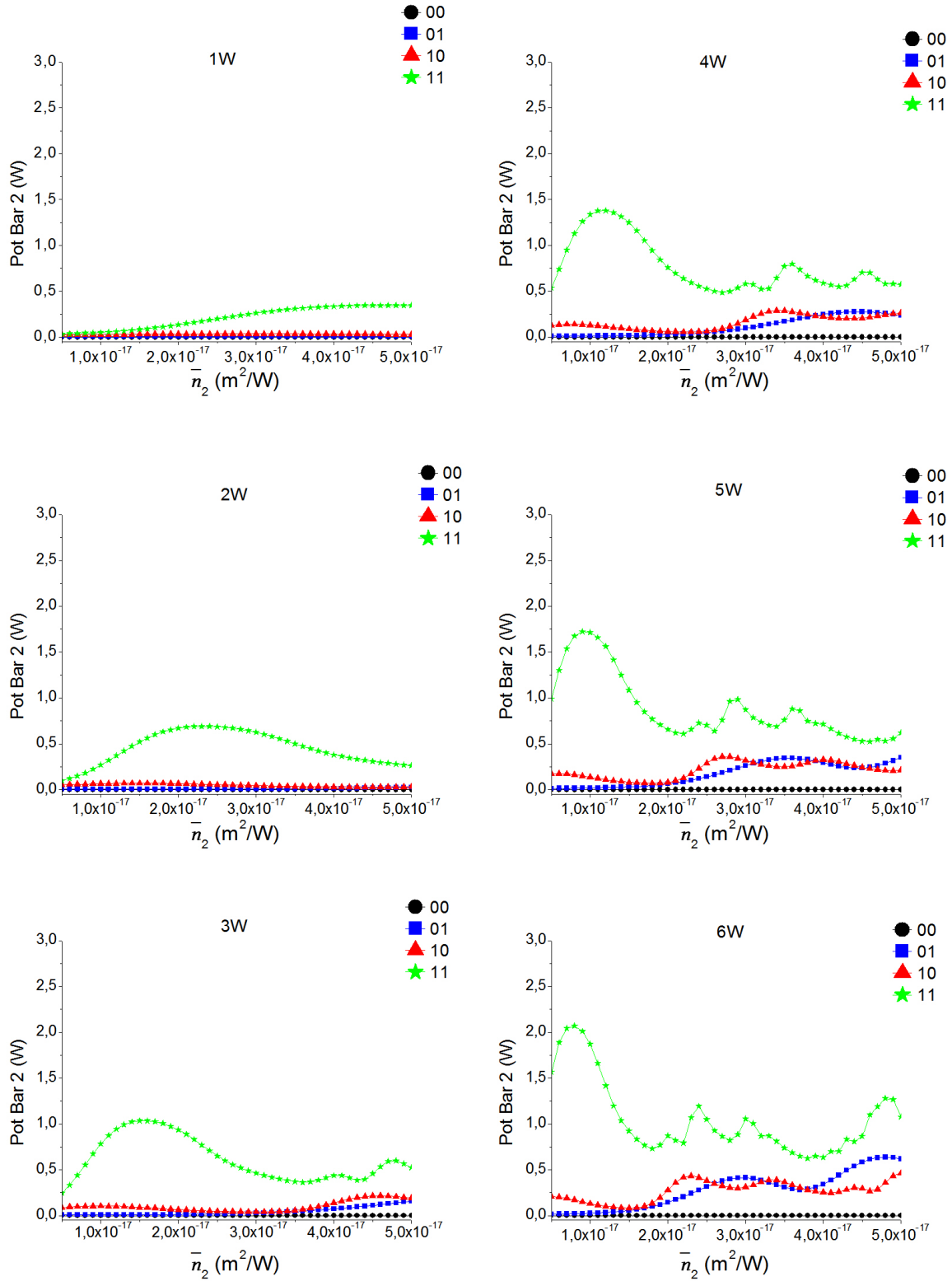
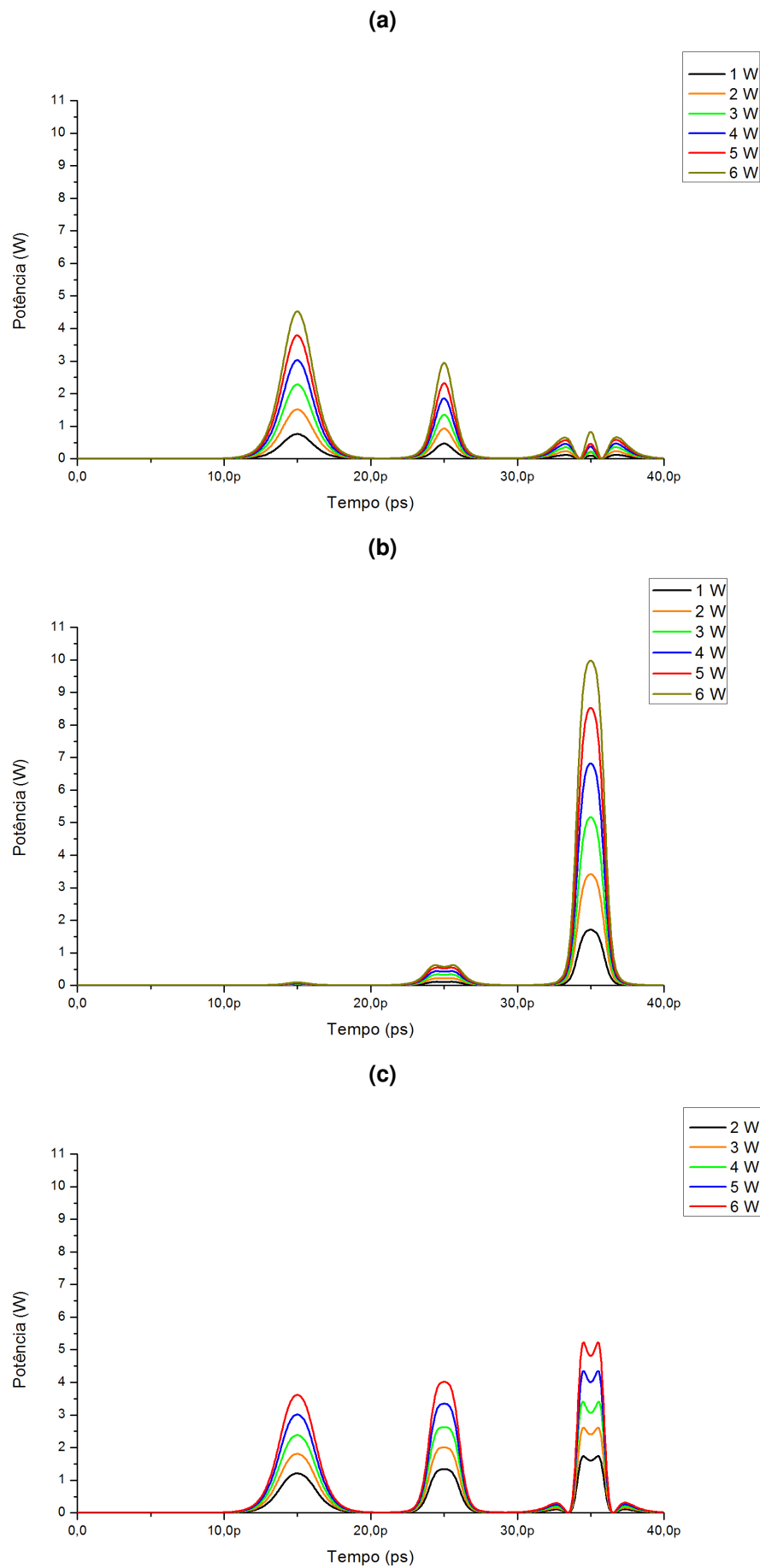
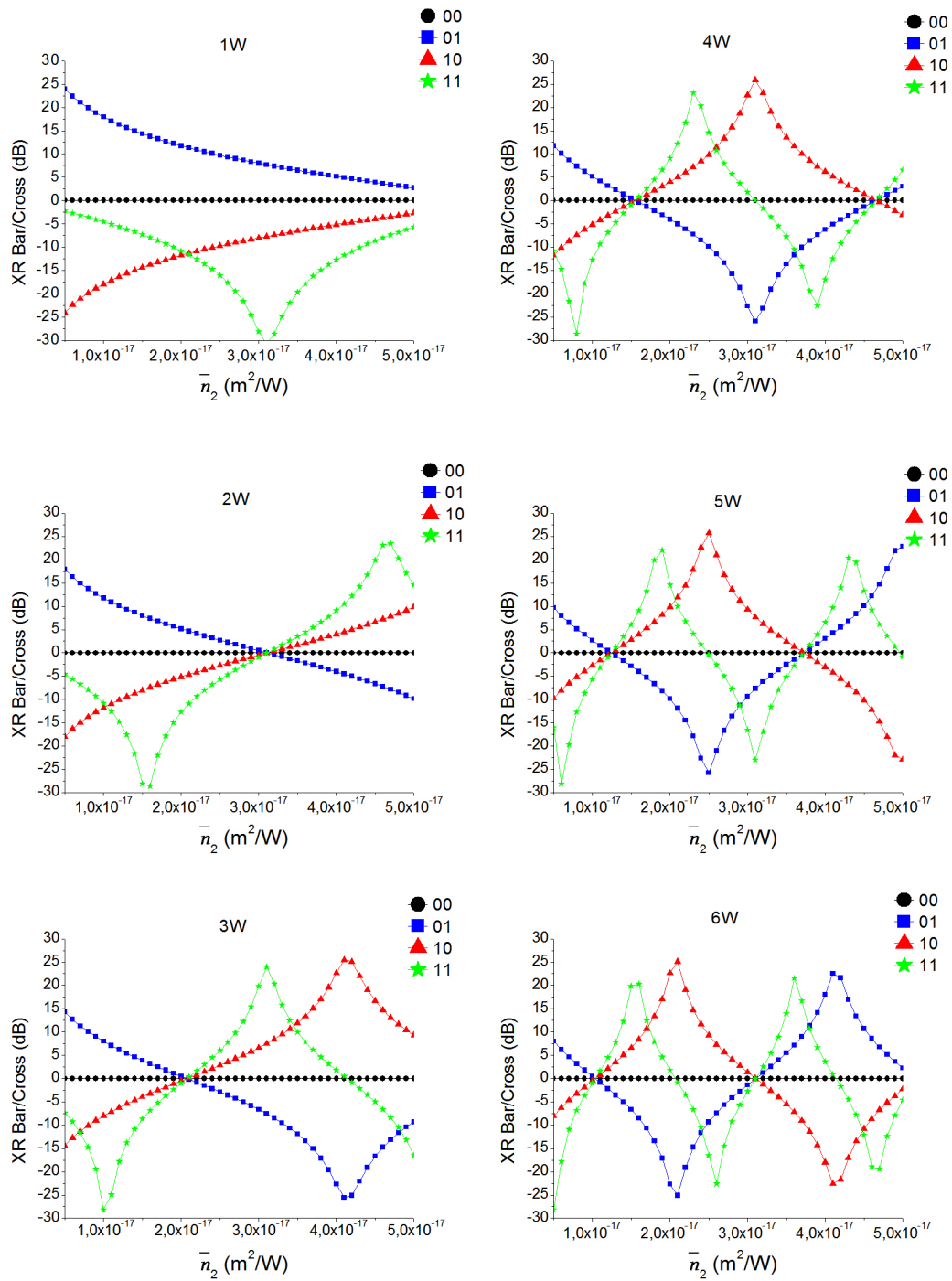
Figura 75: Potência bar2 cascadeamento, variação da potência de pico e $\bar{n}_2$ 

Figura 76: Saídas bar1 (a) e bar2 (b) do MZI para pulsos 1, 2, 3, 4, 5 e 6 watt - Portas XOR (a), AND (b) e OR (c)



A.4 Acoplador 50:50 - estrutura simples e pulso retangular

Figura 77: $XR_{RatioBAR}$, coeficiente de acoplamento 50:50, variação da potência de pico, $\bar{n}_2$ e pulso retangular



A.5 Acoplador 20:80 - estrutura simples e pulso retangular

Tabela 19: Quadro geral para simulação acoplador 20:80 - Pulso retangular

Potência 1 W						$\bar{n}_2 = 4,6 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$						$\bar{n}_2 = \text{—}$		
TB						Pot Bar	XR(B1/B2)	NL	Pot Cross	XR(B2/B1)	NL	Pot Bar	XR(B1/B2)	NL
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	—	—	—
0	1	1	0	1	1	0,81	7,7	1	0,13	-7,7	0	—	—	—
1	0	1	0	1	1	0,58	2	1	0,36	-2	0	—	—	—
1	1	0	1	1	1	0,25	-8,01	0	1,65	8,01	1	—	—	—
FOMELG						17.71 dB						dB		
Potência 2 W						$\bar{n}_2 = 2,3 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$						$\bar{n}_2 = 4,6 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$		
TB						Pot Bar	XR(B1/B2)	NL	Pot Cross	XR(B2/B1)	NL	Pot Bar	XR(B1/B2)	NL
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	1	1	1,63	7,7	1	0,27	-7,7	0	1,4	4,52	1
1	0	1	0	1	1	1,17	2	1	0,73	-2	0	1,55	6,96	1
1	1	0	1	1	1	0,52	-8,01	0	3,28	8,01	1	3,78	23,15	1
FOMELG						17.71 dB						34.63 dB		
Potência 3 W						$\bar{n}_2 = 1,5 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$						$\bar{n}_2 = 3,1 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$		
TB						Pot Bar	XR(B1/B2)	NL	Pot Cross	XR(B2/B1)	NL	Pot Bar	XR(B1/B2)	NL
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	1	1	2,45	7,7	1	0,4	-7,7	0	2,1	4,45	1
1	0	1	0	1	1	1,7	1,72	1	1,14	-1,72	0	2,34	6,68	1
1	1	0	1	1	1	0,68	-8,66	0	5,02	8,66	1	5,67	23,95	1
FOMELG						18.08 dB						35.08 dB		
Potência 4 W						$\bar{n}_2 = 1,2 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$						$\bar{n}_2 = 2,3 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$		
TB						Pot Bar	XR(B1/B2)	NL	Pot Cross	XR(B2/B1)	NL	Pot Bar	XR(B1/B2)	NL
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	1	1	3,2	7,7	1	0,55	-7,7	0	2,8	4,52	1
1	0	1	0	1	1	2,44	2,5	1	1,35	-2,5	0	3,16	6,96	1
1	1	0	1	1	1	1,31	-6,8	0	6,27	6,8	1	7,55	23,15	1
FOMELG						17 dB						34.63 dB		
Potência 5 W						$\bar{n}_2 = 9 \cdot 10^{-18} m^2 W^{-1}$						$\bar{n}_2 = 1,85 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$		
TB						Pot Bar	XR(B1/B2)	NL	Pot Cross	XR(B2/B1)	NL	Pot Bar	XR(B1/B2)	NL
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	1	1	4	7,8	1	0,66	-7,8	0	3,45	4,45	1
1	0	1	0	1	1	2,83	1,72	1	1,9	-1,72	0	3,88	6,68	1
1	1	0	1	1	1	1,13	-8,66	0	8,35	8,66	1	9,45	23,95	1
FOMELG						18.18 dB						35.08 dB		
Potência 6 W						$\bar{n}_2 = 8 \cdot 10^{-18} m^2 W^{-1}$						$\bar{n}_2 = 1,9 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$		
TB						Pot Bar	XR(B1/B2)	NL	Pot Cross	XR(B2/B1)	NL	Pot Bar	XR(B1/B2)	NL
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	1	1	4,85	7,7	1	0,85	-7,7	0	3,5	4,3	1
1	0	1	0	1	1	3,6	2,5	1	2,1	-2,5	0	3,81	6,11	1
1	1	0	1	1	1	1,97	-6,8	0	9,42	6,8	1	9,43	22,03	1
FOMELG						17 dB						32.44 dB		

TB = Tabela Verdade, NL = Nível Lógico, XR(B1/B2) = XRatio(Bar1/Bar2), XR(B2/B1) = XRatio(Bar2/Bar1)

Figura 78: $XR_{Ratio_{BAR/CROSS}}$, coeficiente de acoplamento 20:80, variação da potência de pico, $\bar{n}_2$ e pulso retangular

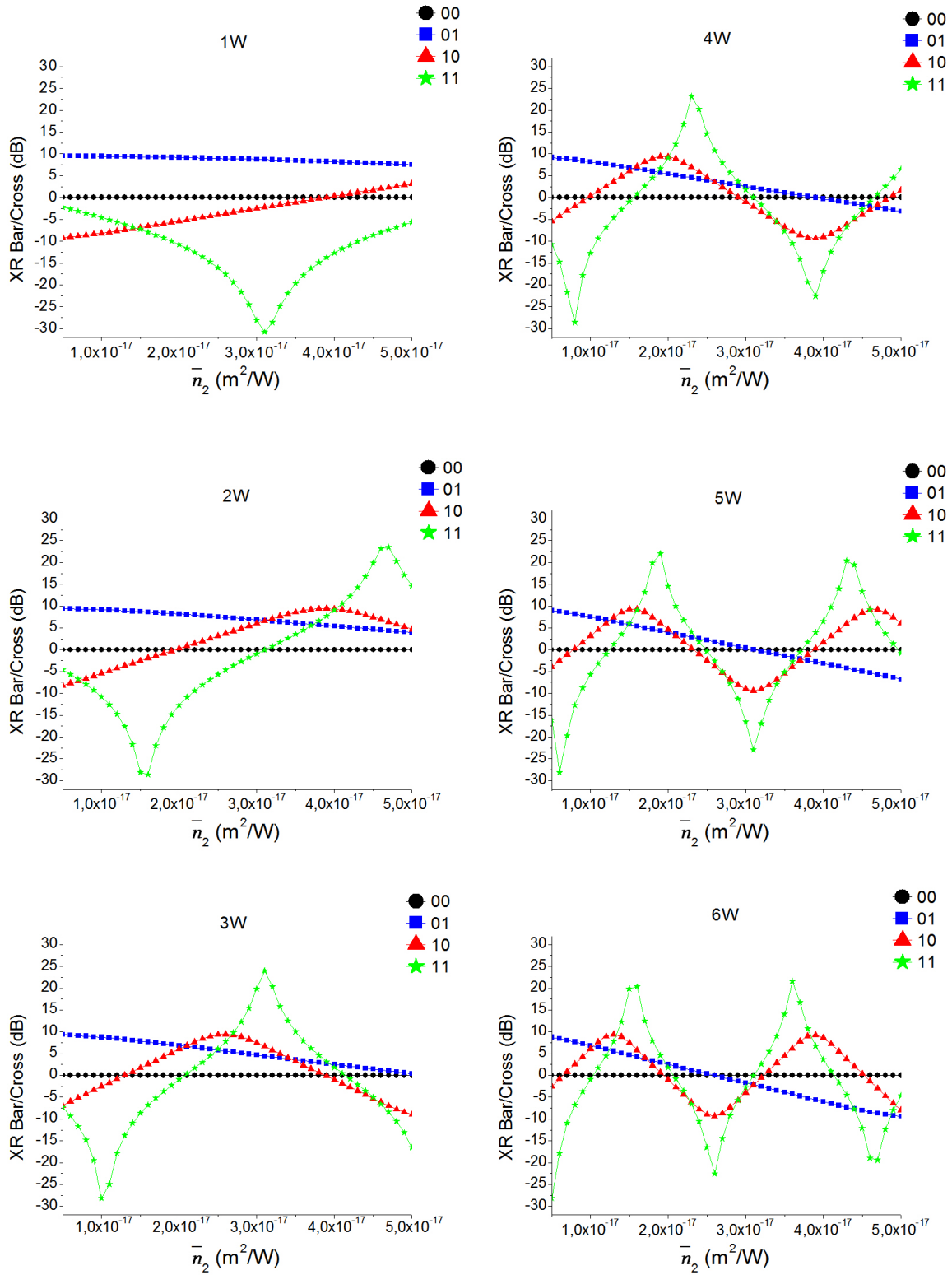


Figura 79: $XR_{Ratio_{CROSS/Bar}}$, coeficiente de acoplamento 20:80, variação da potência de pico, $\bar{n}_2$ e pulso retangular

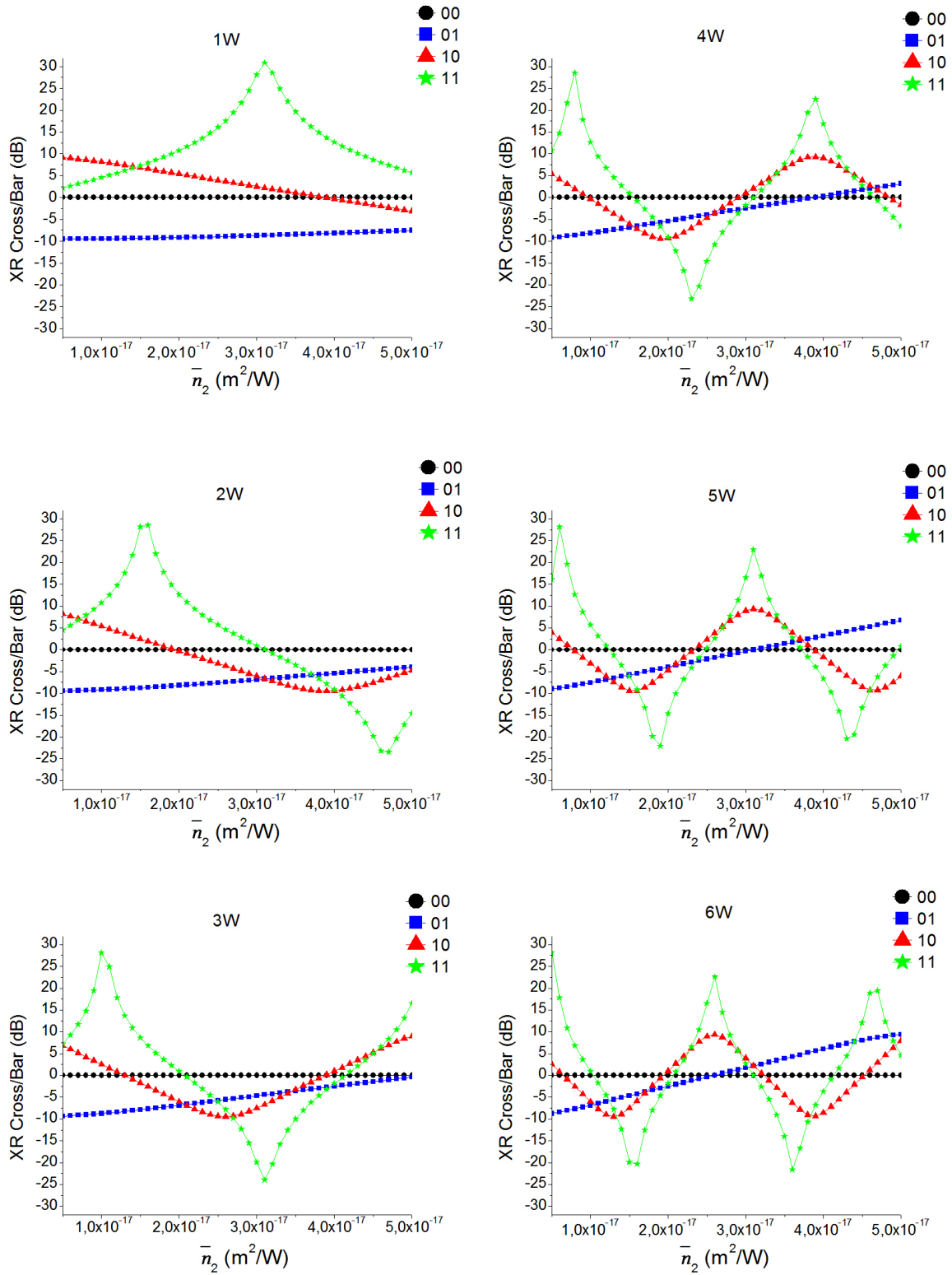


Figura 80: Potência bar, coeficiente de acoplamento 20:80, variação da potência de pico, $\bar{n}_2$ e pulso retangular

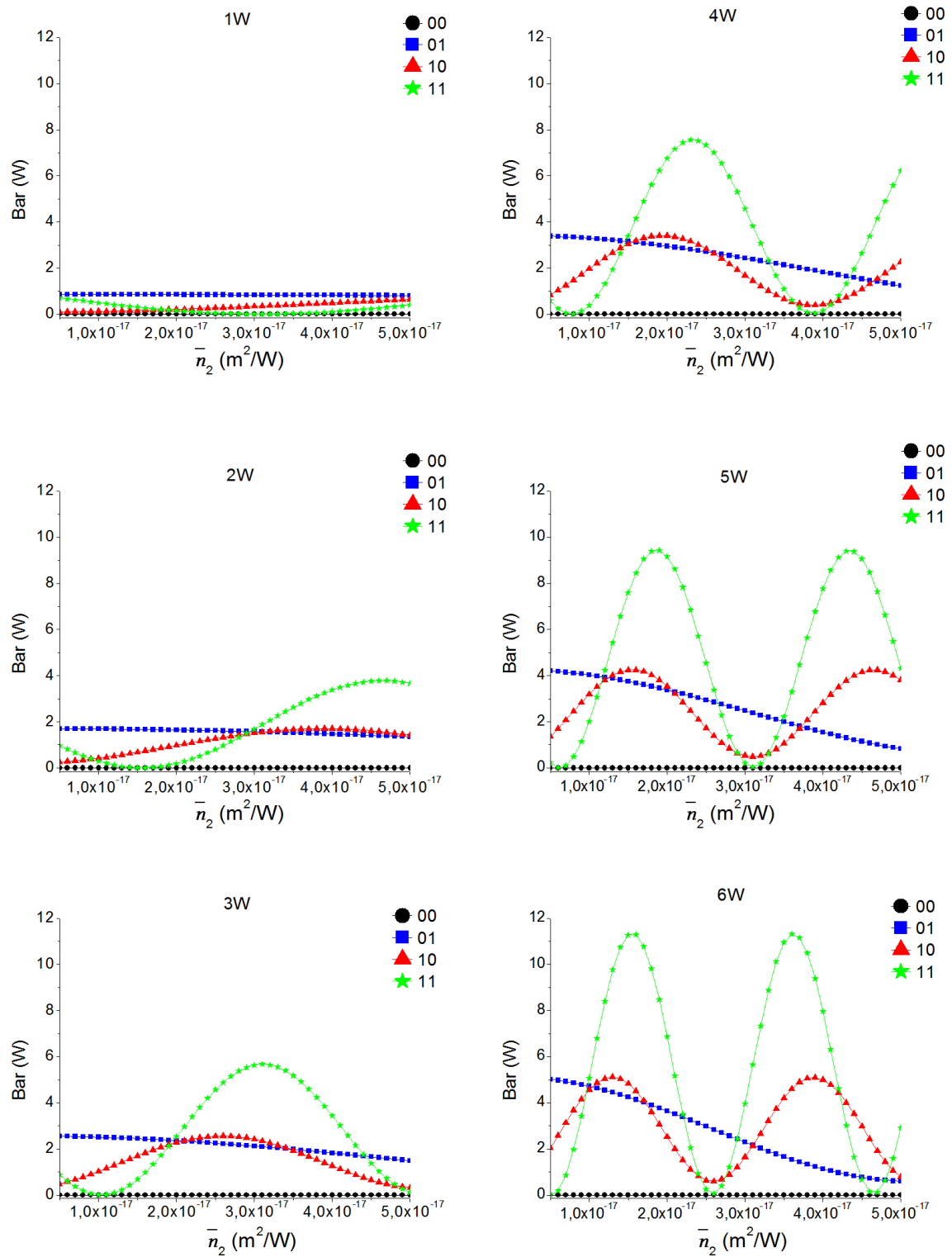


Figura 81: Potência cross, coeficiente de acoplamento 20:80, variação da potência de pico, $\bar{n}_2$ e pulso retangular

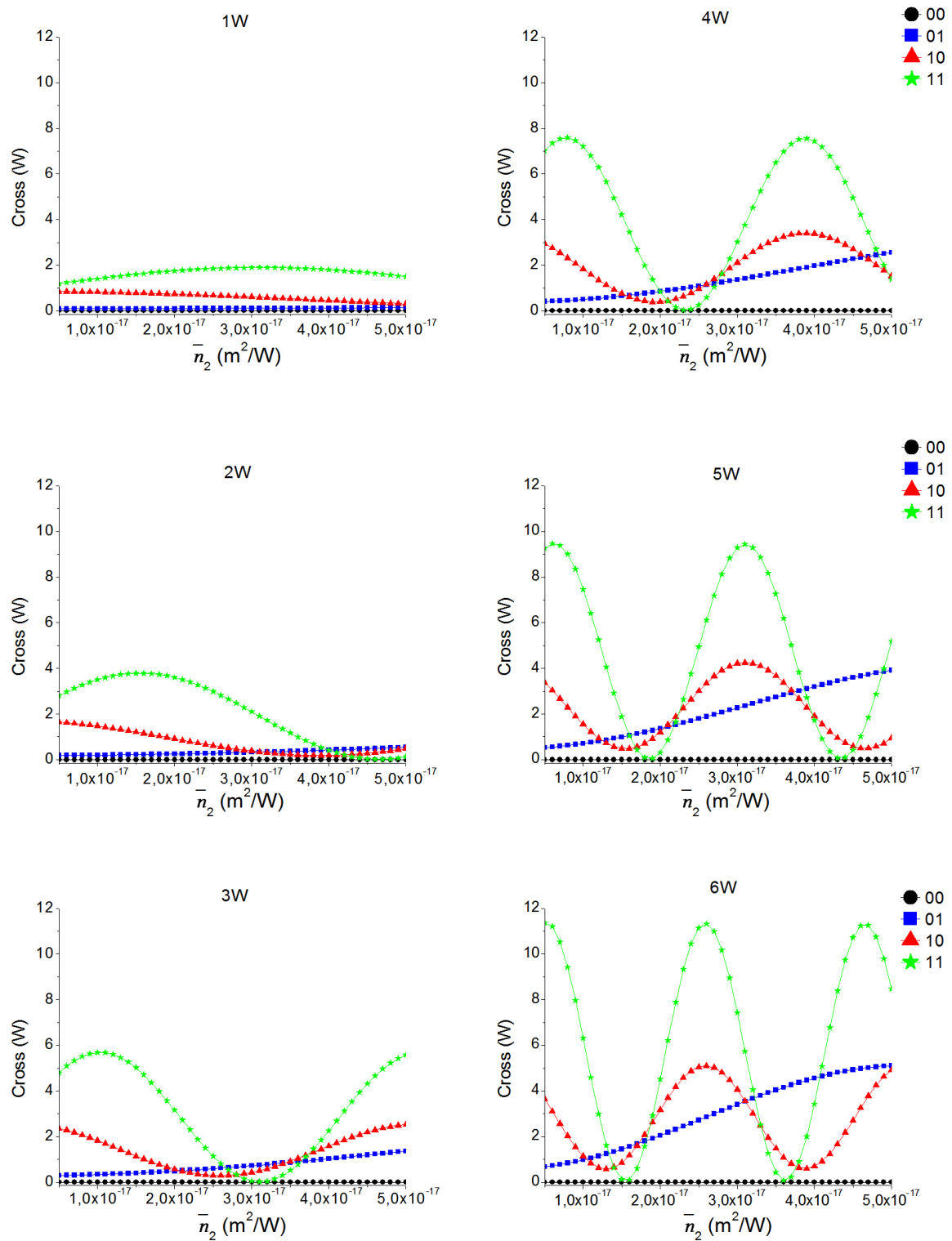
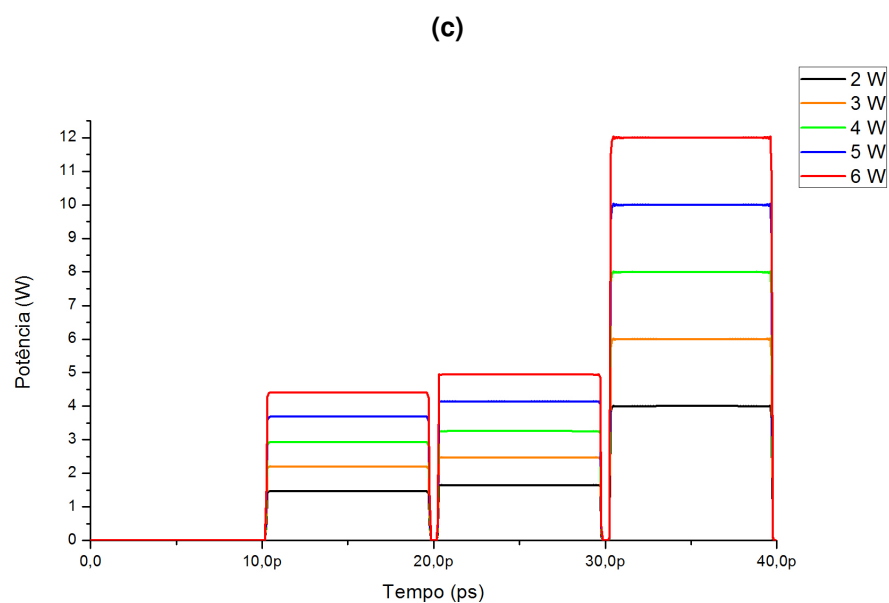
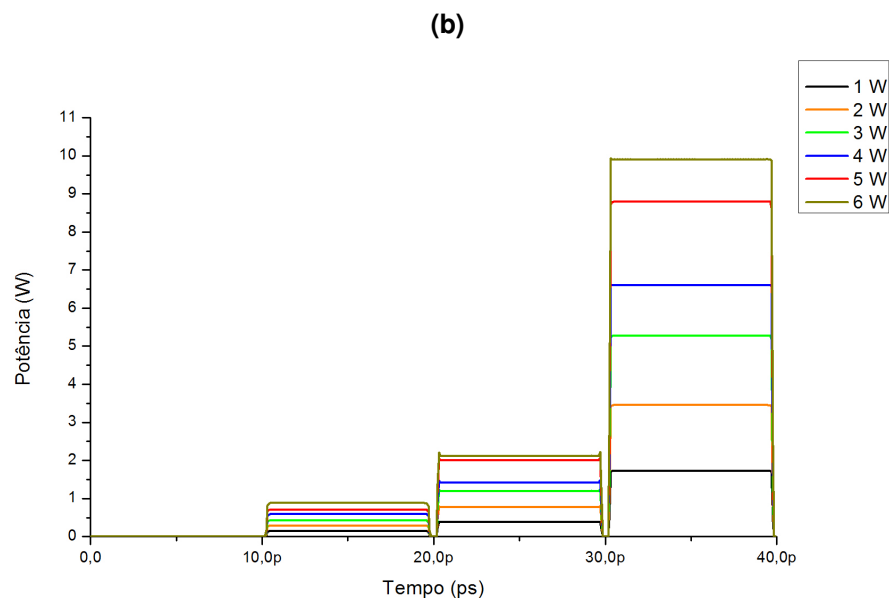
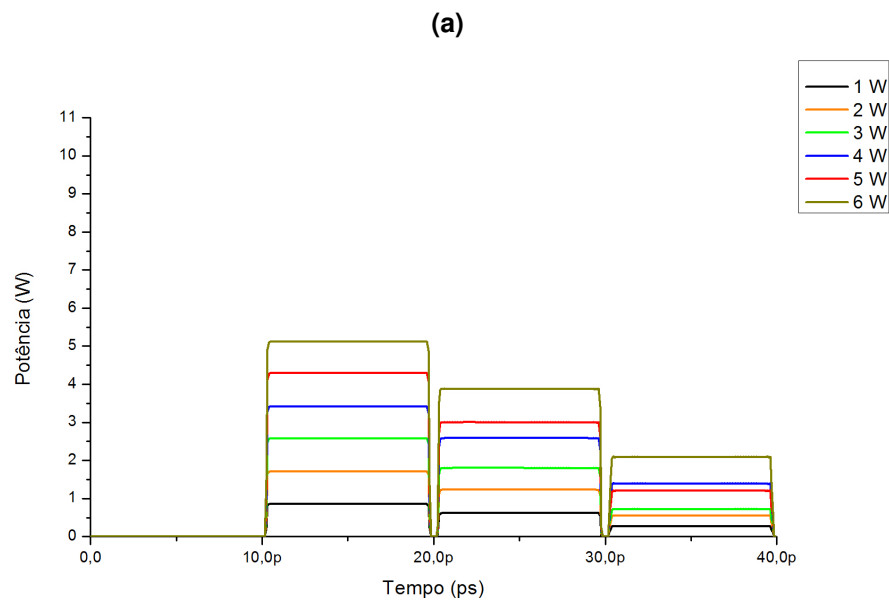


Figura 82: Saídas bar (a) e cross (b) do MZI para pulsos 1, 2, 3, 4, 5 e 6 watt - Portas XOR (a) e AND (b) - Pulso retangular



A.6 Acoplador 20:80 - estrutura cascadeada e pulso retangular

Tabela 20: Quadro geral para simulação acoplador 0,2 - Cascadeamento - Pulso retangular

Potência 1 W	$\bar{n}_2 = 3 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$						$\bar{n}_2 = —$		
TB	Pot Bar	XR(B1/B2)	NL	Pot Cross	XR(B2/B1)	NL	Pot Bar	XR(B1/B2)	NL
0 0 0 0 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0 1 1 0 1	0,74	18,02	1	0,01	-18,02	0	—	—	—
1 0 1 0 1	0,3	3,71	1	0,13	-3,71	0	—	—	—
1 1 0 1 1	0,002	-27,62	0	1,51	27,62	1	—	—	—
FOMELG	49.35 dB						dB		
Potência 2 W	$\bar{n}_2 = 1,5 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$						$\bar{n}_2 = 4,7 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$		
TB	Pot Bar	XR(B1/B2)	NL	Pot Cross	XR(B2/B1)	NL	Pot Bar	XR(B1/B2)	NL
0 0 0 0 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0 1 1 0 1	1,48	18,02	1	0,02	-18,02	0	1,12	8,82	1
1 0 1 0 1	0,61	3,71	1	0,26	-3,71	0	1,2	12,44	1
1 1 0 1 1	0,005	-27,62	0	3,03	27,62	1	1,4	21,4	1
FOMELG	49.35 dB						42.66 dB		
Potência 3 W	$\bar{n}_2 = 1 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$						$\bar{n}_2 = 3,1 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$		
TB	Pot Bar	XR(B1/B2)	NL	Pot Cross	XR(B2/B1)	NL	Pot Bar	XR(B1/B2)	NL
0 0 0 0 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0 1 1 0 1	2,22	18,02	1	0,03	-18,02	0	1,69	9,02	1
1 0 1 0 1	0,91	3,71	1	0,4	-3,71	0	1,84	12,97	1
1 1 0 1 1	0,007	-27,62	0	4,55	27,62	1	2,14	21,46	1
FOMELG	49.35 dB						43.45 dB		
Potência 4 W	$\bar{n}_2 = 8 \cdot 10^{-18} m^2 W^{-1}$						$\bar{n}_2 = 2,3 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$		
TB	Pot Bar	XR(B1/B2)	NL	Pot Cross	XR(B2/B1)	NL	Pot Bar	XR(B1/B2)	NL
0 0 0 0 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0 1 1 0 1	2,95	17,88	1	0,04	-17,88	0	2,27	9,2	1
1 0 1 0 1	1,32	4,2	1	0,5	-4,2	0	2,48	13,4	1
1 1 0 1 1	0,009	-28,29	0	6,36	28,29	1	2,92	21,31	1
FOMELG	50.37 dB						43.91 dB		
Potência 5 W	$\bar{n}_2 = 6e^{-18} m^2 W^{-1}$						$\bar{n}_2 = 1,9e^{-17} m^2 W^{-1}$		
TB	Pot Bar	XR(B1/B2)	NL	Pot Cross	XR(B2/B1)	NL	Pot Bar	XR(B1/B2)	NL
0 0 0 0 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0 1 1 0 1	3,7	18,02	1	0,05	-18,02	0	2,78	8,62	1
1 0 1 0 1	1,53	3,71	1	0,65	-3,71	0	2,99	11,8	1
1 1 0 1 1	0,013	-27,62	0	7,58	27,62	1	3,43	21,13	1
FOMELG	49.35 dB						41.55 dB		
Potência 6 W	$\bar{n}_2 = 5 \cdot 10^{-18} m^2 W^{-1}$						$\bar{n}_2 = 1,6 \cdot 10^{-17} m^2 W^{-1}$		
TB	Pot Bar	XR(B1/B2)	NL	Pot Cross	XR(B2/B1)	NL	Pot Bar	XR(B1/B2)	NL
0 0 0 0 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0 1 1 0 1	4,44	18,02	1	0,07	-18,02	0	3,33	8,42	1
1 0 1 0 1	1,84	3,71	1	0,78	-3,71	0	3,55	11,32	1
1 1 0 1 1	0,01	-27,62	0	9,1	27,62	1	4,05	20,69	1
FOMELG	49.35 dB						40.43 dB		

TB = Tabela Verdade, NL = Nível Lógico, XR(B1/B2) = XRatio(Bar1/Bar2), XR(B2/B1) = XRatio(Bar2/Bar1)

Figura 83: $XRatio_{BAR1/BAR2}$, coeficiente de acoplamento 20:80, variação da potência de pico, $\bar{n}_2$ e pulso retangular

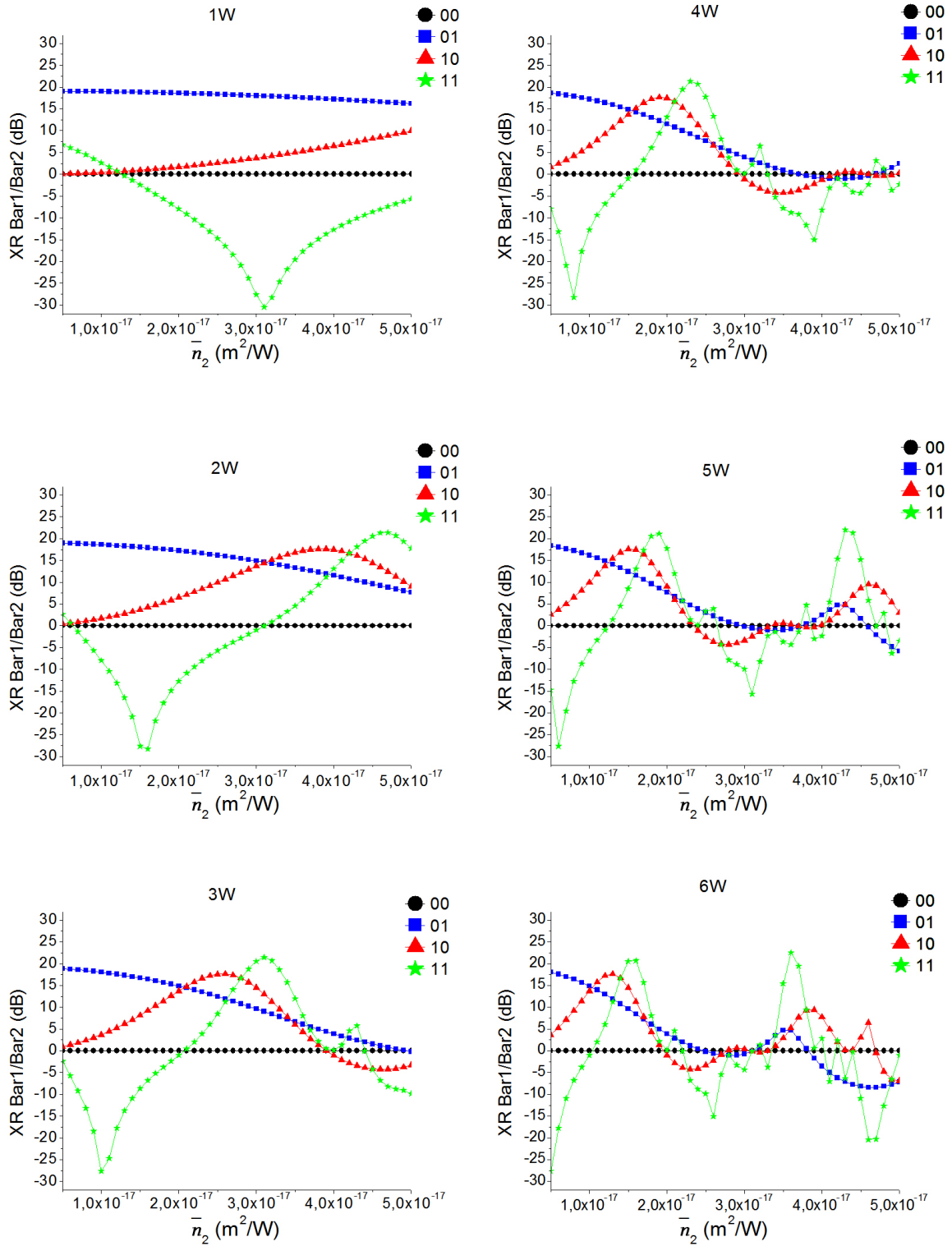


Figura 84: $XR_{Ratio_{BAR2/BAR1}}$, coeficiente de acoplamento 20:80, variação da potência de pico, $\bar{n}_2$ e pulso retangular

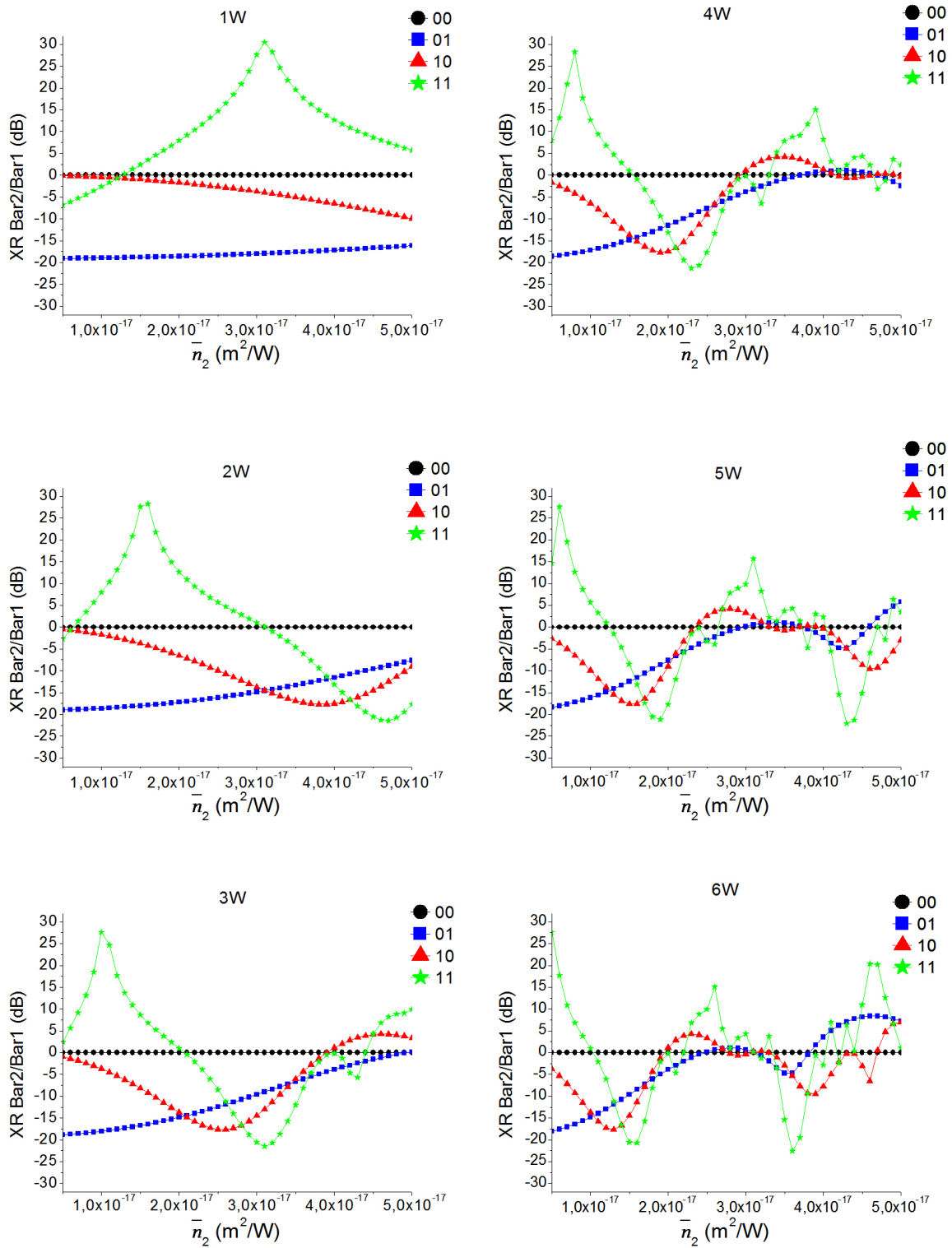


Figura 85: Potência bar1, coeficiente de acoplamento 20:80, variação da potência de pico, $\bar{n}_2$ e pulso retangular

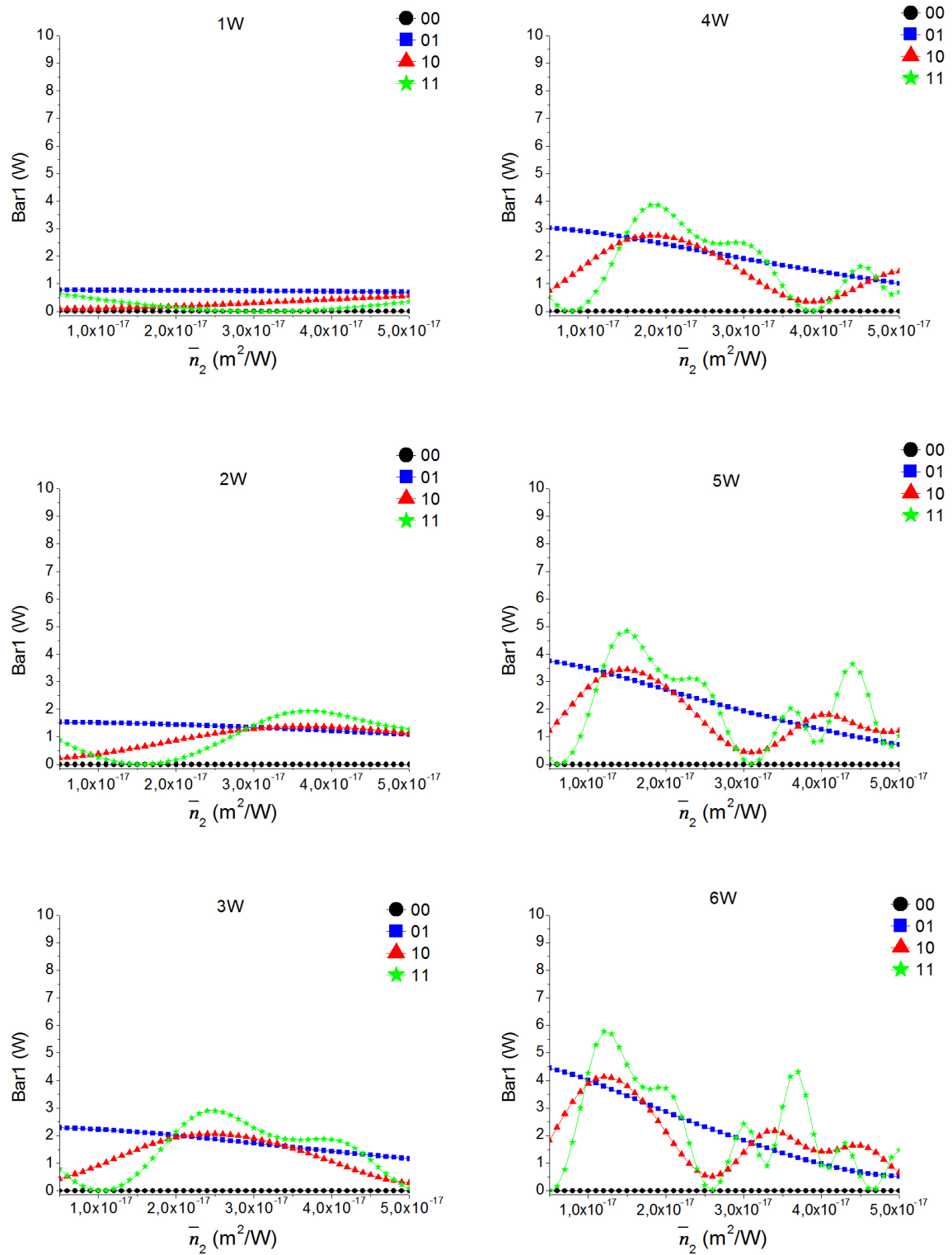


Figura 86: Potência bar2, coeficiente de acoplamento 20:80, variação da potência de pico, $\bar{n}_2$ e pulso retangular

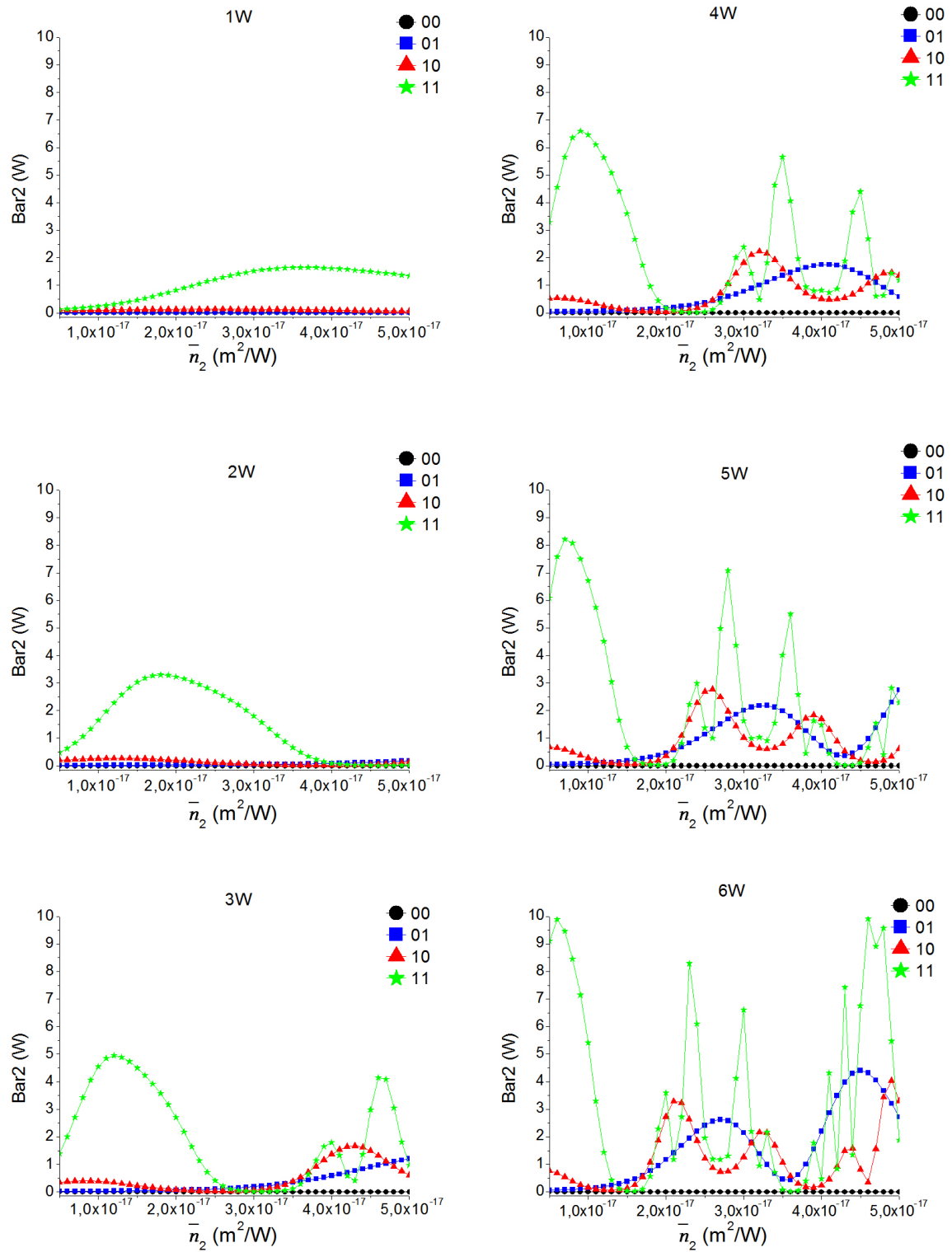


Figura 87: Saídas bar1 (a) e bar2 (b) do MZI para pulsos 1, 2, 3, 4, 5 e 6 W - Portas XOR (a), AND (b) e OR (c) - Pulso retangular

