

ESTUDO NUMÉRICO DE ACOPLADORES  
ASSIMÉTRICOS APLICADOS NA IMPLEMENTAÇÃO DE  
PORTAS LÓGICAS TOTALMENTE ÓPTICAS

de

José Silva de Almeida

SUBMETIDO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE  
MESTRE EM ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA  
NA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
FORTALEZA, CEARÁ  
DEZEMBRO 2006

© Copyright by José Silva de Almeida, 2006

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
DEPARTAMENTO DE  
POS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA

Tese submetida ao Departamento de Pós-Graduação em Eng. de Teleinformática na Universidade Federal do Ceará com o título: **“Estudo numérico de acopladores assimétricos aplicados na implementação de portas lógicas totalmente ópticas”** de **José Silva de Almeida** como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de **Mestre em Engenharia de Teleinformática**.

Data: Dezembro 2006

Comissão Julgadora:

---

Dr. Antônio Sérgio Bezerra Sombra - UFC  
Orientador

---

Dr. Elvio Cesar Giraldo - UFC

---

Dr. Adrião Duarte Dória Neto - UFRN

# UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

Data: **Dezembro 2006**

Autor: **José Silva de Almeida**

Título: **Estudo numérico de acopladores assimétricos  
aplicados na implementação de portas lógicas  
totalmente ópticas**

Departamento: **Pos-Graduação em Engenharia de Teleinformática**

Grau: **M.Eng.**      Convocação: **Dezembro**      Ano: **2006**

Permissão concedida, com isto, a Universidade Federal do Ceará para que tenha e faça circular uma cópia com propósitos não-comerciais, à sua discrição, a título de pedido de indivíduos ou instituições.

---

Assinatura do Autor

O AUTOR RESERVA O DIREITO DE PUBLICAÇÃO, E ESTA TESE, NEM EXTRATOS EXTENSOS DELA, PODEM SER IMPRIMIDO OU CASO CONTRÁRIO REPRODUZIDO SEM A PERMISSÃO ESCRITA DO AUTOR.

*Aos meus Pais.*

# Índice

Índice	v
Agradecimentos	vii
Resumo	viii
Abstract	ix
Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Abreviaturas e Siglas	xv
Introdução	1
<b>1 Propagação de Pulsos em Fibras Ópticas</b>	<b>6</b>
1.1 Introdução . . . . .	6
1.2 Equação de Onda . . . . .	7
<b>2 Acopladores Duplos Direcionais Não-lineares de Fibras Ópticas com Perfis de Dispersão</b>	<b>10</b>
2.1 Introdução . . . . .	10
2.2 Acoplador Direcional Não-Linear de Fibras Ópticas . . . . .	10
<b>3 Portas Lógicas Ópticas com Acoplador Duplo Direcional Não-linear de Fibras Ópticas Operando com Sinal Picosegundo (2 ps)</b>	<b>17</b>
3.1 Introdução . . . . .	17

3.2	Procedimentos Numéricos . . . . .	18
3.3	Resultados Numéricos e Discussões . . . . .	20
3.4	Tabelas Verdades Para as Portas Implementadas . . . . .	45
3.5	Figura de Mérito: FOMELG (dB) . . . . .	50
	<b>Conclusões Gerais e Perspectivas Futuras</b>	<b>52</b>
	<b>Referências</b>	<b>54</b>
<b>4</b>	<b>Apêndice</b>	<b>59</b>
	<b>Apêndice A</b>	<b>60</b>
4.1	Abordagem Numérica Range Kutta . . . . .	60
	<b>Apêndice B</b>	<b>62</b>
4.2	Portas Lógicas . . . . .	62
4.3	Os Circuitos NOT . . . . .	62
4.4	Os Circuitos AND . . . . .	63
4.5	Os Circuitos NAND . . . . .	63
4.6	Os Circuitos OR . . . . .	64
4.7	Os Circuitos NOR . . . . .	64
4.8	Os Circuitos XOR . . . . .	65
4.9	Os Circuitos XNOR . . . . .	66
	<b>Apêndice C</b>	<b>67</b>
4.10	Trabalhos Decorrentes . . . . .	67
4.10.1	Conferências Nacionais . . . . .	67
4.10.2	Premiações . . . . .	68
4.10.3	Artigos Submetidos . . . . .	68

# Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao Dr. Antônio S. Bezerra Sombra, meu Orientador, pelas muitas sugestões e constante suporte durante esta pesquisa, e de sua paciência em nos conduzir neste trabalho. Também, sou grato ao Dr. Márcio Gomes da Silva, pelas orientações e preciosas sugestões dele sobre nossa pesquisa, cujas idéias foram de fundamental importância. Sou grato, de forma muito especial, ao Professor Dr. Paulo de Tarso Cavalcante Freire pelo incentivo e apoio. Agradeço a todos os colegas do grupo de pesquisa LOCEM do qual faço parte que de alguma forma contribuíram para a finalização deste trabalho. Agradeço de forma especial ao departamento de informática da UFC e à CAPES pelo financiamento de nossa pesquisa.

Fortaleza, Ceará  
18 de Dezembro de 2006

José Silva

# Resumo

Nesta pesquisa, apresentamos uma investigação numérica da transmissão e do chaveamento de sólitons fundamentais em acopladores duplos não-lineares, constituídos por fibras ópticas com índice de dispersão decrescente (DDF). São propostas portas lógicas ópticas baseadas na utilização de um acoplador direcional não linear (NLDC) duplo assimétrico de fibra óptica e com um dos guias operando com um perfil de dispersão decrescente. Obtivemos as características de transmissão e, logo após, fizemos uma análise do coeficiente de extinção e do fator de compressão. Investigamos o desempenho do acoplador proposto operando no regime solitônico, utilizando pulsos ultra-curtos com 2 ps de largura. Com o modelo proposto para o dispositivo, conseguimos implementar portas lógicas AND, OR, XOR e NOT para diversas fases.

Palavras-chave: Acoplador duplo, Portas lógicas ópticas.



# Abstract

In this work, we presented an investigation numerical of the transmission and switching fundamental solitons in nonlinear double couplers, constituted for fibers optics with index decreasing dispersion (DDF). Logic Gates Optical are proposed, based in the use of a asymmetric nonlinear directional double coupler (NLDC) of fiber optic and with one of the guides operating with profile of decreasing dispersion. For such end, we obtained the transmission characteristics and, therefore after, made an analyze of the Extinction Ratio and compression factor. We investigated the acting of the coupler proposed operating in the regime solitonic, using ultra-short pulses with 2 ps of width. With the model proposed for the device, got to implement logic gates AND, OR, XOR and NOT for several phases.

Index Terms: Double Coupler, Logic Gates optical.

# Lista de Figuras

Figura 0.0.1 - Esquema do acoplador direcional não-linear de comprimento  $L_C$

Figura 2.2.1 - Acoplador não linear de fibra óptica, onde  $I_1$  e  $I_2$  são as portas de entrada dos canais 1 e 2 respectivamente e  $O_1$  e  $O_2$  as portas de saída

Figura 2.2.2 - Esquema do acoplador direcional triplo planar.

Figura 3.3.1 - Curva de transmissão para o acoplador com perfil constante em função da potência com  $\beta = 2,5$ ;  $k = 0,3312$ ;  $L_C = \pi/2k$ ;  $P(\xi)$ ,  $R(\xi) = 1$ .

Figura 3.3.2 - Curva de transmissão para os seis acopladores, mostrados na figura, em função da potência com  $\beta = 2,5$ ;  $k = 0,3312$ ;  $L_C = \pi/2k$ ;  $P(\xi)$ ,  $R(\xi) = 1$ .

Figura 3.3.3 - XRatio (coeficiente de extinção) em dB para os seis acopladores indicados, na figura, excitados com pulso de 2 ps, em função da dispersão  $\beta$ , com  $I_1 = 0,95W$ ,  $k = 0,3312 m^{-1}$ ,  $L_C = \pi/2k$ ,  $P(\xi)$ ,  $R(\xi) = 1$

Figura 3.3.4 - Fator de compressão para os seis acopladores indicados, na figura, excitados com pulso de 2 ps, em função da dispersão  $\beta$ , com  $I_1 = 0,95W$ ,  $k = 0,3312 m^{-1}$ ,  $L_C = \pi/2k$ ,  $P(\xi)$ ,  $R(\xi) = 1$

Figura 3.3.5 - Pulso solitônico (2 ps) usado para excitar os acopladores, onde  $\beta$  é a dispersão,  $\tau$  o tempo, com intensidade em Watt.

Figura 3.3.6 - Resultado da simulação numérica quando o canal 1 do acoplador com perfil constante é excitado com um pulso solitônico (2 ps), onde  $\beta$  é a dispersão,  $\tau$  o tempo, com intensidade em Watt.

Figura 3.3.7 - Resultado da simulação numérica quando o canal 1 do acoplador com perfil exponencial é excitado com um pulso solitônico (2 ps), onde  $\beta$  é a dispersão,  $\tau$  o tempo, com intensidade em Watt.

Figura 3.3.8 - Resultado da simulação numérica quando o canal 1 do acoplador com perfil gaussiano é excitado com um pulso solitônico (2 ps), onde  $\beta$  é a dispersão,  $\tau$  o tempo, com intensidade em Watt.

Figura 3.3.9 - Resultado da simulação numérica quando o canal 1 do acoplador com perfil hiperbólico é excitado com um pulso solitônico (2 ps), onde  $\beta$  é a dispersão,  $\tau$  o tempo, com intensidade em Watt.

Figura 3.3.10 - Resultado da simulação numérica quando o canal 1 do acoplador com perfil linear é excitado com um pulso solitônico (2 ps), onde  $\beta$  é a dispersão,  $\tau$  o tempo, com intensidade em Watt.

Figura 3.3.11 - Resultado da simulação numérica quando o canal 1 do acoplador com perfil logarítmico é excitado com um pulso solitônico (2 ps), onde  $\beta$  é a dispersão,  $\tau$  o tempo, com intensidade em Watt.

Figura 3.3.12 -  $X R_2$ (coeficiente de extinção) para os seis acopladores indicados, na figura, excitados com pulso de 2 ps, em função da dispersão  $\beta$ , com  $I_2 = 0,95W, k = 0,3312 m^{-1}, L_C = \pi/2k, P(\xi), R(\xi) = 1$

Figura 3.3.13 (Fator de compressão) para os seis acopladores indicados, na figura, excitados com pulso de 2 ps, em função da dispersão  $\beta$ , com  $I_2 = 0,95W, k = 0,3312 m^{-1}, L_C = \pi/2k, P(\xi), R(\xi) = 1$

Figura 3.3.14 - Pulso solitônico (2 ps) usado para excitar os acopladores, onde  $\beta$  é a dispersão,  $\tau$  o tempo, com intensidade em Watt.

Figura 3.3.15 - Resultado da simulação numérica quando o canal 2 do acoplador com perfil constante é excitado com um pulso solitônico (2 ps), onde  $\beta$  é a dispersão,  $\tau$  o tempo, com intensidade em Watt.

Figura 3.3.16 - Resultado da simulação numérica quando o canal 2 do acoplador com perfil exponencial é excitado com um pulso solitônico (2 ps), onde  $\beta$  é a dispersão,  $\tau$  o tempo, com intensidade em Watt.

Figura 3.3.17 - Resultado da simulação numérica quando o canal 2 do acoplador com perfil gaussiano é excitado com um pulso solitônico (2 ps), onde  $\beta$  é a dispersão,  $\tau$  o tempo, com intensidade em Watt.

Figura 3.3.18 - Resultado da simulação numérica quando o canal 2 do acoplador com perfil hiperbólico é excitado com um pulso solitônico (2 ps), onde  $\beta$  é a dispersão,  $\tau$  o tempo, com intensidade em Watt.

Figura 3.3.19 - Resultado da simulação numérica quando o canal 2 do acoplador com perfil linear é excitado com um pulso solitônico (2 ps), onde  $\beta$  é a dispersão,  $\tau$  o tempo, com intensidade em Watt.

Figura 3.3.20 - Resultado da simulação numérica quando o canal 2 do acoplador com perfil logarítmico é excitado com um pulso solitônico (2 ps), onde  $\beta$  é a dispersão,  $\tau$  o tempo, com intensidade em Watt.

Figura 3.3.21 - XRatio(dB) (taxa de extinção) para os seis acopladores mostrados na figura. São excitados com um pulso solitônico (2ps) em função da fase  $\Delta\theta\pi$  com  $I_1 = 0,95W$ ;  $I_2 = 0,95W$ ;  $\beta = 2,5$ ;  $k = 0,3312$ ;  $L_C = \pi/2k$ ;  $P(\xi)$ ,  $R(\xi) = 1$ .

Figura 4.3.1 - Símbolo da porta NOT

Figura 4.4.1 - Símbolo da porta AND

Figura 4.5.1 - Símbolo da porta NAND

Figura 4.6.1 - Símbolo da porta OR

Figura 4.7.1 - Símbolo da porta NOR

Figura 4.8.1 - Símbolo da porta XOR

Figura 4.9.1 - Símbolo da porta NXOR

# Lista de Tabelas

Tabela 3.4.1 - Operações em acopladores não linear assimétrico com perfil constante,  $\Delta\phi = 0,53\pi$ ,  $\beta = 2,5$  e comprimento de acoplamento  $L_C = 4,73m$ .

Tabela 3.4.2 - Operações em acopladores não linear assimétrico com perfil constante,  $\Delta\phi = 1,90\pi$ ,  $\beta = 2,5$  e comprimento de acoplamento  $L_C = 4,73m$ .

Tabela 3.4.3 - Operações em acopladores não linear assimétrico com perfil exponencial,  $\Delta\phi = 0,428\pi$ ,  $\beta = 2,5$  e comprimento de acoplamento  $L_C = 4,73m$ .

Tabela 3.4.4 - Operações em acopladores não linear assimétrico com perfil gaussiano,  $\Delta\phi = 0,32\pi$ ,  $\beta = 2,5$  e comprimento de acoplamento  $L_C = 4,73m$ .

Tabela 3.4.5 - Operações em acopladores não linear assimétrico com perfil hiperbólico,  $\Delta\phi = 1,948\pi$ ,  $\beta = 2,5$  e comprimento de acoplamento  $L_C = 4,73m$ .

Tabela 3.4.6 - Operações em acopladores não linear assimétrico com perfil hiperbólico,  $\Delta\phi = 0,464\pi$ ,  $\beta = 2,5$  e comprimento de acoplamento  $L_C = 4,73m$ .

Tabela 3.4.7 - Operações em acopladores não linear assimétrico com perfil linear.  $\Delta\phi = 0,38\pi$ ,  $\beta = 2,5$  e comprimento de acoplamento  $L_C = 4,73m$ .

Tabela 3.4.8 - Operações em acopladores não linear assimétrico com perfil logarítmico,  $\Delta\phi = 0,34\pi$ ,  $\beta = 2,5$  e comprimento de acoplamento  $L_C = 4,73m$ .

Tabela 3.4.9 - FOMELG (dB)

Tabela 4.3.1 - Tabela verdade da porta NOT

Tabela 4.4.1 - Tabela verdade da porta AND

Tabela 4.5.1 - Tabela verdade da porta NAND

Tabela 4.6.1 - Tabela verdade da porta OR

Tabela 4.7.1 - Tabela verdade da porta NOR

Tabela 4.8.1 - Tabela verdade da porta XOR

Tabela 4.9.1 - Tabela verdade da porta XNOR

# Lista de Abreviaturas e Siglas

UFC	Universidade Federal do Ceará.
NLDC	Acoplador Direcional Não-Linear.
NLSE	Equação Não-Linear de Schrödinger.
XPM	Modulação de Fase Cruzada.
GVD	Dispersão da Velocidade de Grupo
DDF	Fibras com Dispersão Decrescente

# Introdução

Com a crescente demanda de um sistema de comunicação e processamento cada vez mais rápido, seguro e confiável faz evidenciar a necessidade de computadores que processem eficientemente um alto fluxo de dados cada vez mais crescente. Um sistema óptico oferece diversas características atrativas para futuros sistemas de comunicação e processamento, como alternativa de um sistema eletrônico digital convencional. Os sistemas de processamento e comunicação modernos já apresentam problemas inevitáveis, o mais evidente e preocupante é que logo estarão atingindo sua velocidade limite de transmissão e processamento. Embora uma drástica solução para o problema seja necessária, a menos que ajustemos nossa mentalidade na direção totalmente diferentes da eletrônica convencional, não será possível quebrar essa barreira imposta pela natureza, não teremos como melhorar a performance dos nossos computadores e nem nos preparar para desafios da exploração espacial. Interconexão e circuitos integrados ópticos são propostas aceitas como a mais provável tecnologia que provirá um caminho além das limitações atuais impostas aos computadores e sistemas de telecomunicação. Os dispositivos ópticos têm sido incorporados em muitos sistemas, onde se mostraram seguros e vantajosos. Os dispositivos ópticos oferecem uma largura de banda maior que os eletrônicos, o que permite um fluxo de transmissão e processamento mais rápido que dos sistemas convencionais. Associando o que um



sistema totalmente óptico poderia ser vantajoso: imagine que temos um problema, e que esse problema levaria mais de 11.000 anos para ser solucionado num microprocessador Pentium III que possuem aproximadamente 140 milhões de portas lógicas, o mesmo problema poderia ser resolvido em menos de uma hora se já tivéssemos um processador similar totalmente óptico. A grande gama de aplicações do acoplador direcional não linear (NLDC) em sistemas de processamento de sinais ópticos para comunicação óptica e processamento óptico estimulou muito a pesquisa científica [1-10] desde que foi analisado teoricamente por Jansen [11]. Foram propostas muitas aplicações interessantes para estes dispositivos [1,4,7,9,12-14]. Os modernos sistemas de comunicação e processamento totalmente ópticos necessitarão de dispositivos capazes de executar operações mais complexas, como operações lógicas e biestáveis [16-17]. O fenômeno de acoplamento direcional não linear foi investigado amplamente para aplicações em todos os chaveamentos ópticos ultra-rápidos [1,4,13-22], e recentemente, todas as funções de lógica óptica ultra-rápidas que usam um acoplador direcional não linear assimétrico (NLDC) foram numericamente obtidos [1,4,23], destacando-se o nosso trabalho na análise de portas lógicas totalmente ópticas com perfil de dispersão decrescente, onde foram investigados seis diferentes perfis (ver detalhes no capítulo 3). Além disso, a resposta chaveada de acopladores assimétrico não linear foi investigada experimentalmente [51,52,59]. Dependendo das características físicas dos guias que constituem o acoplador duplo assimétrico, a potência de saída tende a ser maior em um dos guias de onda quando somente um guia de onda está excitado. Quando ambos os guias de onda são excitados, a distribuição de potência na saída depende da troca de fase relativa dos sinais de entrada. O acoplador direcional assimétrico não linear torna possível implementar várias portas lógicas como AND, OR, e portas XOR [23].

Um acoplador óptico consiste, na sua versão mais simples, de duas fibras ópticas paralelas, separadas por uma distância da ordem do decaimento da radiação evanescente. Quando os núcleos de duas fibras são aproximados de modo a formar o acoplador, torna-se difícil obter expressões analíticas simples para os modos de propagação do sistema composto. Esta dificuldade provém da quebra de simetria introduzida pela presença do segundo guia de onda. A análise concisa do fenômeno de acoplamento entre duas fibras ópticas próximas requer também a discussão de algumas das propriedades de guiamento óptico. Para uma determinada potência de luz induzida em um dos guias, observamos um chaveamento em que metade da energia incidente sai em cada guia, ou seja, 50 % da energia do campo incidente emergirá no guia direto e a outra 50 % no guia cruzado. Potência com tal característica é chamada de potência crítica. Para potência de luz abaixo da potência crítica, o dispositivo se comporta como um acoplador linear, ou seja, o feixe óptico se propaga periodicamente entre os guias que constituem o acoplador. As potências acima induzem uma mudança no índice de refração e deterioram as características de transmissão. O acoplamento é inibido para potências de entrada acima da potência crítica:  $P_c$

$$P_c = \frac{A\lambda}{n_2 L_c} \quad (0.0.1)$$

onde  $A$  é a área efetiva,  $\lambda$  é o comprimento de onda da luz e  $n_2$  é o índice de refração não linear [15],  $L_C$  é o comprimento do acoplador  $L_C = \pi/2k$  e  $k$  é o coeficiente de

acoplamento linear entre os guias adjacentes ( $k = 0.3312 \text{ m}^{-1}$  para nossas simulações numéricas).

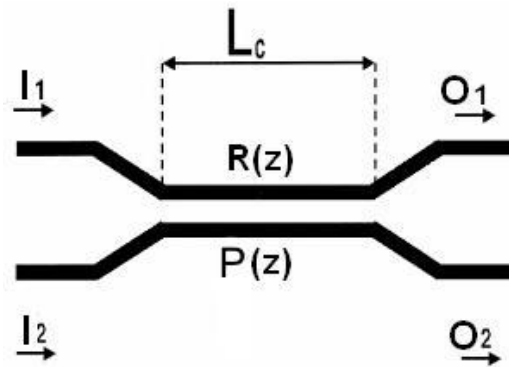


Figura 0.0.1: Esquema do acoplador direcional não-linear de comprimento  $L_C$

Sob essas condições, consideramos o comprimento de acoplamento ( $L_C$ ) cerca de 4,74 m para o nosso acoplador. Para potência incidente igual a potência crítica  $P_c$ , 50% da luz emerge de cada guia de onda. Acima de  $P_c$  a maioria da luz emerge do canal (1). Em outras palavras, uma fase de condição emparelhada é alcançada por acoplamento linear. Devido aos efeitos não lineares, o índice de refração do guia de onda de entrada muda a proporção que a intensidade do sinal aumenta. A mudança no índice de refração destrói a condição de fase emparelhada, e a potência acoplada é relativamente reduzida. Conseqüentemente, a potência óptica é chaveada entre os dois guias de onda pelo nível de intensidade do sinal de entrada. Ao longo do tempo, a perda óptica tem sido uma barreira limitadora de todos os sistemas ópticos propostos. Dispositivo sem perda é uma situação idealizada. Na prática, perda

material grande ou pequena é inevitável, especialmente quando não-linearidades estão baseadas sobre processos absorcivo em semicondutores. A absorção uniformemente distribuída através do dispositivo fixará um limite à operação dele [16]. A presença de perda é também responsável pelo aumento da potência crítica em acopladores além de provocar uma forte deformação da transmissão não-linear do dispositivo [17].

Os primeiros estudos de acopladores foram realizados sob a incidência de pulsos longos. O que não foi uma boa idéia, pois, esses pulsos apresentavam sérios problemas de quebra após o chaveamento. O pulso chaveado perdia sua forma original e por muito tempo essas quebras limitaram a eficiência dos acopladores ópticos. Peng observou que os chaveamentos de Sólitons se mostraram altamente eficientes, evitando as quebras dos pulsos[24].

O Sóliton é um tipo de onda que se propaga ao longo de grandes distâncias sem gerar distorções e sem sofrer danos após colidir com outros Sólitons. A partir deste momento, o estudo do comportamento de sólitons em acopladores de fibras apresenta um grande interesse científico. Os Sólitons ópticos são de fundamental interesse, devido ao grande número de aplicações em telecomunicações. Realizamos um estudo das características de chaveamento de pulsos ultracurtos, operando no regime solitônico, em acopladores direcionais não-lineares duplos de fibras ópticas. Encontramos a energia crítica do acoplador duplo  $E_c = 5.21$ , para pulsos ultra-curtos, em torno de 2 ps.

# Capítulo 1

## Propagação de Pulsos em Fibras Ópticas

### 1.1 Introdução

Como todo fenômeno eletromagnético, a propagação de uma onda eletromagnética em uma fibra óptica é governada pelas equações de Maxwell. Estas equações fazem uma relação dos campos elétricos e magnéticos com as propriedades físicas do meio, formando bases para soluções de problemas eletrodinâmicos em meios materiais. No sistema de unidades MKS, as equações de Maxwell são:

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.1.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = J_f + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1.1.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_f \quad (1.1.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (1.1.4)$$

onde  $\vec{E}$  e  $\vec{H}$  são vetores de campo elétrico e magnético respectivamente.  $\vec{D}$  e  $\vec{B}$  densidade de fluxo elétrico e magnético.  $J_f$  e  $\rho_f$  densidade de corrente e de carga. A densidade de fluxo elétrico  $\vec{D}$  está relacionada com campo elétrico  $\vec{E}$  e a polarização  $\vec{P}$ , enquanto a densidade de fluxo magnético  $\vec{B}$  se relaciona com o campo magnético  $\vec{H}$  e a magnetização  $\vec{M}$ , desta forma:

$$\vec{D}(\vec{r}, t) = \varepsilon_0 \vec{E}(\vec{r}, t) + \vec{P}(\vec{r}, t) \quad (1.1.5)$$

$$\vec{B}(\vec{r}, t) = \mu_0 \vec{H}(\vec{r}, t) + \vec{M}(\vec{r}, t) \quad (1.1.6)$$

onde  $\varepsilon_0$  é a permissividade no vácuo e  $\mu_0$  a permeabilidade.  $\vec{P}$  e  $\vec{M}$  são as polarizações elétrica e magnética respectivamente. Através das constantes  $\varepsilon_0$  e  $\mu_0$  obtemos a velocidade da luz no vácuo.

$$C^2 = \frac{1}{\varepsilon_0 \mu_0} \quad (1.1.7)$$

## 1.2 Equação de Onda

A partir das equações de Maxwell é possível obter uma equação de onda para os campos que se propagam em um meio qualquer. Aplicando o operador rotacional em ambos os membros da equação (1.1.1) e como a indução magnética é uma função contínua e diferenciável, tem-se que:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial}{\partial t} \nabla \times \vec{B}(\vec{r}, t) \quad (1.2.1)$$

A partir das equações (1.1.2), (1.1.5) e (1.1.6) temos:

$$\nabla \times \vec{B}(\vec{r}, t) = \mu_0 \left( J_e(\vec{r}, t) + \frac{\partial \vec{D}(\vec{r}, t)}{\partial t} \right) + \nabla \times \vec{M}(\vec{r}, t) \quad (1.2.2)$$

substituindo a equação (1.2.2) na equação (1.2.1) e utilizando as relações (1.1.5), (1.1.6), (1.1.7) e a identidade vetorial abaixo:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = \nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} \quad (1.2.3)$$

obtemos:

$$\nabla^2 \vec{E} - \nabla(\nabla \cdot \vec{E}) + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{J}_f}{\partial t} - \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{P}}{\partial t^2} - \frac{\partial(\nabla \times \vec{M})}{\partial t} \quad (1.2.4)$$

A equação (1.2.4) também é válida para o campo magnético  $\vec{H}$ . Ela é tão geral, tanto quanto forem a polarização, a magnetização e a densidade de corrente. A polarização elétrica de um meio traz implicitamente todas as propriedades elétricas do mesmo. Da mesma forma a magnetização. Essas duas grandezas constituem a resposta do meio aos campos. A polarização  $\vec{P}$  pode ser separada em duas partes: uma linear e outra não-linear, de tal forma que:

$$\vec{P}(\vec{r}, t) = \vec{P}_L(\vec{r}, t) + \vec{P}_{NL}(\vec{r}, t) \quad (1.2.5)$$

Em geral, a obtenção da polarização  $\vec{P}$  requer atenção para os efeitos de retardamento da resposta do meio material ao campo aplicado. A parte linear  $\vec{P}_L$  e a parte não-linear  $\vec{P}_{NL}$  estão relacionadas ao campo elétrico pelas relações gerais: [63,64,65]

$$\vec{P}_L(\vec{r}, t) = \varepsilon_0 \int_{-\infty}^{+\infty} \chi^{(1)}(t - t') \vec{E}(\vec{r}, t') dt' \quad (1.2.6)$$

$$\vec{P}_{NL}^{(2)}(\vec{r}, t) = \varepsilon_0 \int \int_{-\infty}^{+\infty} \chi^{(2)}(t - t_1, t - t_2) \otimes \vec{E}_j(\vec{r}, t_1) \vec{E}_k(\vec{r}, t_2) dt_1 dt_2 \quad (1.2.7)$$

$$\vec{P}_{NL}^{(n)}(\vec{r}, t) = \varepsilon_0 \int \dots \int_{-\infty}^{+\infty} \chi^{(n)}(t - t_1, \dots, t - t_n) \otimes \vec{E}_j(\vec{r}, t_1) \vec{E}_z(\vec{r}, t_n) dt_1 \dots dt_n \quad (1.2.8)$$

onde o símbolo  $\otimes$  representa o produto tensorial, e  $\chi^{(j)}$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) é a susceptibilidade de  $j$ -ésima ordem. A polarização na posição  $\vec{r}$  e no instante  $t$ , dependeria do campo elétrico tanto em instantes anteriores como posteriores a  $t$ . Com isso, temos um problema de natureza causal, pois, a polarização depende de um campo que ainda não existe. Para contornar esta situação, admitimos que o tensor de susceptibilidade elétrica é nulo para  $t' > t$ .



## Capítulo 2

# Acopladores Duplos Direcionais Não-lineares de Fibras Ópticas com Perfis de Dispersão

### 2.1 Introdução

Há algum tempo Acopladores Duplos Direcionais Não-lineares (NLDC) vêm despertando um grande interesse por parte dos pesquisadores devido sua capacidade de processamento e chaveamento de informações a velocidades ultra-rápidas. Os NLDC têm uma dinâmica representada por equações não lineares, cuja solução analítica é de um processo bastante complexo. Desse modo, muitos pesquisadores buscam outros métodos para obter soluções, sendo o método numérico uma alternativa.

### 2.2 Acoplador Direcional Não-Linear de Fibras Ópticas

Um acoplador de fibra óptica consiste, na sua configuração mais simples, de duas fibras paralelas separadas por uma distância  $d$ , ao longo de um comprimento  $L_C$ , (figura

2.2.1), de tal forma que possibilite a interação entre os campos que se propagam nos guias. Essas interações são responsáveis pela transmissão e acoplamento de pulsos ao se propagarem num acoplador.

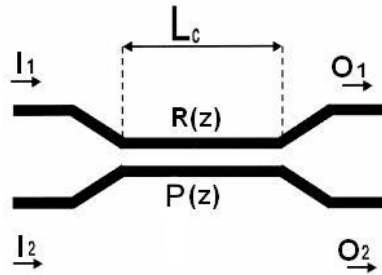


Figura 2.2.1. Acoplador não linear de fibra óptica, onde  $I_1$  e  $I_2$  são as portas de entrada dos canais 1 e 2 respectivamente e  $O_1$  e  $O_2$  as portas de saída.

Para que isso aconteça é necessário que essa distância entre as fibras seja da ordem do decaimento da radiação evanescente. A potência de entrada também é fundamental no processo de acoplamento entre os guias, ou seja, quando excitamos um canal do acoplador com uma potência acima da potência crítica, a luz não será transmitida para o outro canal, saindo assim no mesmo guia, porém, quando ativamos um canal com uma potência baixa, toda a energia é transmitida para o outro canal.

A aproximação dos núcleos gera uma quebra de simetria induzida pela presença do segundo guia. Sendo essa quebra de simetria o que dificulta a obtenção de uma expressão analítica simples para descrever o comportamento dos pulsos propagados nos acopladores. No intuito de manter o campo propagado nos núcleos do acoplador, fazemos com que o índice de refração dos núcleos  $n_1$  e  $n_2$  seja maior que o índice de refração do meio que os envolvem.

A modelagem de um NLDC é feita com base na equação não-linear de Schrödinger. Esta equação descreve a propagação de pulsos em meios com não linearidade do tipo Kerr e de dispersão de velocidade de grupo.

A modelagem do acoplador direcional com  $n$  fibras então é feita por um sistema de equações diferenciais acopladas baseadas na equação não-linear de Schrödinger que é dado por:

$$i \frac{\partial A_j}{\partial z} - \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A_j}{\partial T^2} + \gamma |A_j|^2 A_j + S_j(A_l, A_j, A_l^*, A_j^*) = 0 \quad (2.2.1)$$

onde

$$j = 1, 2, 3, \dots, n \quad e \quad l \neq j$$

sendo  $\beta_2$  a dispersão de velocidade de grupo,  $A_j$  o pulso propagado na fibra  $j$  e  $\gamma$  a auto modulação de fase. Este sistema de equações para um acoplador com  $n$  fibras tem  $n$  equações diferenciais. O índice  $j$  refere-se ao pulso que se propaga na fibra  $j$ ,  $l$  as demais fibras, onde (\*) representa o complexo conjugado dos termos anteriores. O termo de acoplamento  $S_j$  depende do tipo de processo de acoplamento.

As equações que descrevem a dinâmica de um acoplador duplo em que os efeitos de não linearidade do tipo Kerr, dispersão de velocidade de grupo e acoplamentos lineares considerados, sendo  $A = A(z, T)$ , são descritas por:

$$i\frac{\partial A_1}{\partial z} - \frac{1}{2}\beta_2\frac{\partial^2 A_1}{\partial T^2} + \gamma|A_1|^2A_1 + kA_2 = 0 \quad (2.2.2)$$

$$i\frac{\partial A_2}{\partial z} - \frac{1}{2}\beta_2\frac{\partial^2 A_2}{\partial T^2} + \gamma|A_2|^2A_2 + kA_1 = 0 \quad (2.2.3)$$

No sistema de equações consideramos  $\beta_2$  negativo, que corresponde a um regime de dispersão anômala ( $\beta_2 < 0$ ). Ao normalizarmos este sistema de equações obtemos as seguintes expressões:

$$i\frac{\partial u_1}{\partial \xi} - \frac{1}{2}\frac{\partial^2 u_1}{\partial \tau^2} + |u_1|^2u_1 + Ku_2 = 0 \quad (2.2.4)$$

$$i\frac{\partial u_2}{\partial \xi} - \frac{1}{2}\frac{\partial^2 u_2}{\partial \tau^2} + |u_2|^2u_2 + Ku_1 = 0 \quad (2.2.5)$$

$u_1$  e  $u_2$  são as amplitudes modais dos campos nos núcleos 1 e 2, onde  $u_j = \frac{A_j}{\sqrt{P_0}}$ .  $P_0$  é a potência de pico do pulso.  $\xi$  e  $\tau$  são comprimento e o tempo normalizados, onde :

$$\tau = \frac{T}{T_0} \quad (2.2.6)$$

e

$$\xi = \frac{z}{L_D} \quad (2.2.7)$$

$T_0$  é a meia largura do pulso na altura de 1/e da intensidade de pico.  $L_D$  é o comprimento de dispersão dado por:

$$L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|} \quad (2.2.8)$$

$k$  é a constante de acoplamento, e  $K$  é a constante de acoplamento normalizada

$$K = L_D k \quad (2.2.9)$$

O comprimento de acoplamento  $L_C$  é aquele em que um pulso de baixa potência que se propaga em um dos guias é chaveado totalmente de um núcleo para outro, em que  $L_C = \frac{\pi}{2k}$ . O dispositivo estudado consiste de um acoplador direcional não-linear assimétrico, no qual foram analisados sinais solitônicos para seis perfis de dispersão: constante, linear, logarítmico, exponencial, gaussiano e hiperbólico.

Considere um pulso de largura temporal 2 ps propagando-se no regime de dispersão anômala num acoplador não linear duplo de fibras ópticas, onde a dispersão de segunda ordem é descrita por  $\beta_2(\xi)$ . A propagação deste pulso através de fibras com dispersão decrescente (DDF) é descrita pela equação não-linear de Schrödinger com um perfil de dispersão  $p(\xi)$

$$i \frac{\partial u_1}{\partial \xi} + \frac{1}{2} p(\xi) \frac{\partial^2 u_1}{\partial \tau^2} + |u_1|^2 u_1 + K u_2 + i \alpha u_1 = 0 \quad (2.2.10)$$

$$i \frac{\partial u_2}{\partial \xi} + \frac{1}{2} p(\xi) \frac{\partial^2 u_2}{\partial \tau^2} + |u_2|^2 u_2 + K u_1 + i \alpha u_2 = 0 \quad (2.2.11)$$

Onde

$$p(\xi) = \left| \frac{\beta_2(\xi)}{\beta_2(0)} \right| \quad (2.2.12)$$

Sendo  $p(\xi)$  a dispersão da velocidade de grupo (GVD) normalizada.  $\alpha$  é a perda das fibras.  $\xi$  e  $\tau$  são comprimento e tempo normalizados, onde  $\xi = z/L_D$  e  $\tau = T/T_0$ .

$L_D = T_0^2/|\beta_2|$  é o comprimento de dispersão, sendo a largura do pulso  $T_0 = 1.1344$  ps, e a largura temporal total na meia altura da intensidade do pulso  $T_{FWHM} = 2$  ps. Numa fibra com perfil de dispersão decrescente DDF, a dispersão cai de 1 até o valor final  $1/\beta$ , de tal forma que a compressão do sóliton é um processo adiabático, onde um sóliton fundamental pode ser comprimido com a propagação, sem perder suas características. Os perfis de dispersão estudados são descritos pelas seguintes equações

$$p(\xi) = \frac{(1 - \beta)}{\beta L} \xi + 1 \quad \text{Linear} \quad (2.2.13)$$

$$p(\xi) = \exp\left(\frac{-\xi}{L} \ln \beta\right) \quad \text{Exponencial} \quad (2.2.14)$$

$$p(\xi) = \exp\left(\frac{-\xi^2}{L^2} \ln \beta\right) \quad \text{Gaussiano} \quad (2.2.15)$$

$$p(\xi) = \ln\left(e + \frac{\xi}{L} (e^{\frac{1}{\beta}} - e)\right) \quad \text{Logarítmico} \quad (2.2.16)$$

$$p(\xi) = \frac{L}{(\beta - 1)\xi + L} \quad \text{Hiperbólico} \quad (2.2.17)$$

$$p(\xi) = \frac{1}{\beta} \quad \text{Constante} \quad (2.2.18)$$

O parâmetro  $\beta$  varia de 1 a 3, no guia 2, caracterizando cada perfil. O NLDC assimétrico é fundamental na implementação de portas lógicas, em se tratando do acoplador duplo, pois sem a assimetria não seria possível obter uma configuração para

montagem de portas totalmente ópticas. Entretanto, se usássemos um acoplador triplo, o NLDC poderia ser simétrico, pois sua estrutura com três portas de entrada e três de saída nos permitiria implementar funções lógicas mesmo que tivéssemos guias idênticos. Contudo, teríamos uma estrutura mais complexa (fig.2.2.2).

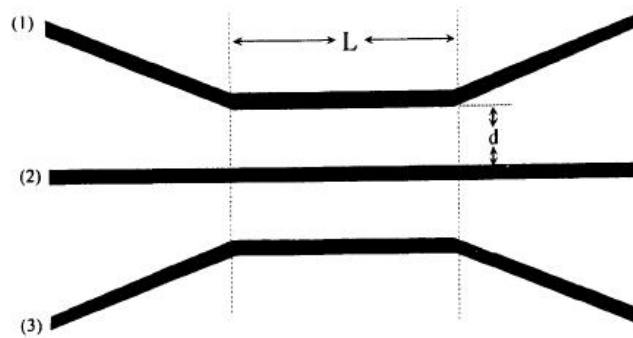


Fig. 2.2.2 - Esquema do acoplador direcional triplo planar.

## Capítulo 3

# Portas Lógicas Ópticas com Acoplador Duplo Direcional Não-linear de Fibras Ópticas Operando com Sinal Picosegundo (2 ps)

### 3.1 Introdução

Na perspectiva de sinais pulsados, os primeiros estudos com acopladores foram realizados sobre a incidência de pulsos longos, porém, como já foi dito, esses pulsos apresentavam problemas de quebra após o chaveamento. O pulso chaveado degradava-se perdendo sua forma original limitando, assim, a eficiência dos acopladores e, conseqüentemente, suas aplicações. Para evitar a quebra do pulso, em 1988, a aplicação de sólitons em acopladores direcionais foi proposta teoricamente e observou-se que chaveamentos de sólitons se mostraram altamente eficientes [60,61,62]. Desde então, a aplicação de sólitons tem melhorado o desempenho de chaveamento dos acopladores e, por isso, eles vêm sendo amplamente estudados [20,21,24,31,35].



## 3.2 Procedimentos Numéricos

Partindo das equações 2.2.2 e 2.2.3, montamos um sistema de equações diferenciais adequada ao nosso dispositivo:

$$i\frac{\partial u_1}{\partial \xi} - \frac{1}{2}R(\xi)\frac{\partial^2 u_1}{\partial \tau^2} + \gamma|u_1|^2 u_1 + Ku_2 = 0 \quad (3.2.1)$$

$$i\frac{\partial u_2}{\partial \xi} - \frac{1}{2}P(\xi)\frac{\partial^2 u_2}{\partial \tau^2} + \gamma|u_2|^2 u_2 + Ku_1 = 0 \quad (3.2.2)$$

onde  $\gamma$  representa o perfil de não linearidade.  $R(\xi) = 1$  e  $P(\xi)$  representa os perfis de dispersão. Os sinais-utilizados, pulsos solitônicos, são soluções exatas para o sistema de equações 2.2.10 e 2.2.11 quando consideramos ( $\beta_2 < 0$ ) anômalo, e o coeficiente de acoplamento entre as fibras igual a zero ( $k = 0$ ). O comportamento de um sóliton durante a propagação em um acoplador pode ser analisado numericamente pelo método de Fourier com passo dividido [69]. Consideraremos o sóliton como solução para acopladores, onde o coeficiente de acoplamento é diferente de zero ( $k \neq 0$ ). Diversas configurações foram utilizadas para excitar o acoplador, primeiro ativamos apenas o canal 1, ou seja, o guia sem perfil, depois apenas o canal 2, o guia com perfil, e por fim, ambos os canais foram excitados simultaneamente. O pulso inicial é dado por:

$$u_1(0, \tau) = A_j \operatorname{sech}(A_j \tau) \quad (3.2.3)$$

$$u_2(0, \tau) = A_j \operatorname{sech}(A_j \tau) \exp(i\Delta\phi) \quad (3.2.4)$$

onde  $\Delta\phi$  é o defasamento entre os dois sinais de entrada. Definimos a transmissão na fibra  $j$ ,  $Trans_j$  como a razão entre energia no final do acoplador na fibra  $j$  pela

energia incidente na fibra 1:

$$Trans_j = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} |u_j(L_C)|^2 dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} |u_1(0)|^2 dt} \quad (3.2.5)$$

com  $j = 1, 2$  em nosso NLDC assimétrico com comprimento  $L_C$ . Uma outra definição importante é o coeficiente de extinção em um chaveamento do tipo on-off, podendo ser visto como o quociente entre a energia de saída no estado “on” pela energia de saída no estado “off”, que para o nosso NLDC assimétrico é expresso por:

$$XRatio = X(R) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} |u_1(L_C)|^2 dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} |u_2(L_C)|^2 dt} \quad (3.2.6)$$

onde a taxa de extinção em dB é:

$$XRatio[dB] = XR = 10 \log_{10} X(R) \quad (3.2.7)$$

Definimos o fator de compressão  $C$ , obtido depois de propagar num NLDC assimétrico, como a razão da largura do pulso incidente pela largura do pulso que sai do dispositivo:

$$C_i = \frac{T_1(0)}{T_i(L_C)} = \frac{\tau_0}{\tau_i} \quad (3.2.8)$$

onde  $i = 1, 2$  para pulsos chaveados nos canais 1 e 2.

### 3.3 Resultados Numéricos e Discussões

Inicialmente, analisaremos as características de transmissão do acoplador com perfil constante (ver figura 3.3.1) onde observamos uma potência crítica de aproximadamente 4,8W quando excitamos apenas o guia com dispersão em que 50 % da energia está na fibra 1 e 50 % na fibra 2. Estamos excitando apenas a fibra 2 onde, para a potência igual a 1W, toda a energia é transmitida para a fibra 1 e acima da potência crítica ela retorna ao guia 2 em todos os acopladores. Na figura 3.3.2, podemos analisar todos os perfis, onde para o perfil de referência ( $\beta = 1$ ), em todos os acopladores temos  $P(\xi) = 1$ . Vemos que a potência crítica em todos os outros perfis é maior que a potência crítica para o perfil constante. Uma observação importante que fizemos, foi notar que o perfil constante chaveia com uma menor energia em relação aos outros perfis, pois apresenta a menor potência crítica, um menor efeito dispersivo e um maior alargamento.

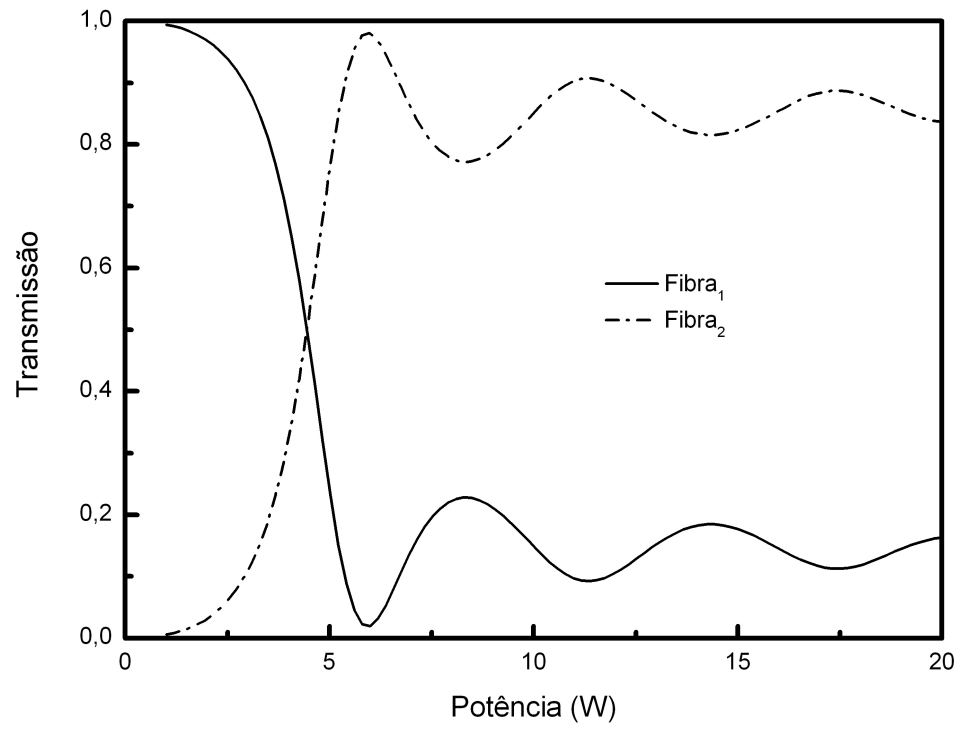


Figura 3.3.1 - Curva de transmissão para o acoplador com perfil constante, em função da potência, excitando canal 2 com  $\beta = 2,5$ ;  $k = 0,3312$ ;  $L_C = \pi/2k$ ;  $P(\xi)$ ,  $R(\xi) = 1$ .

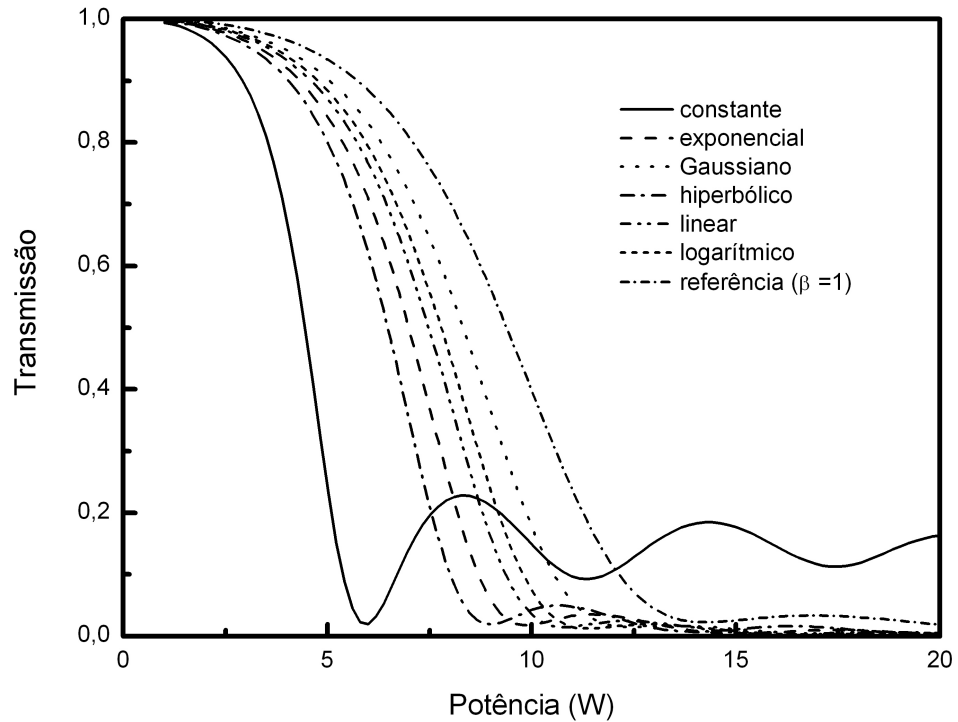


Figura 3.3.2 - Curva de transmissão para os seis acopladores, mostrados na figura, em função da potência com  $\beta = 2, 5$ ;  $k = 0,3312$ ;  $L_C = \pi/2k$ ;  $P(\xi)$ ,  $R(\xi) = 1$ .

Na Figura 3.3.3, primeiro medimos o coeficiente de extinção com a potência incidindo apenas no canal 1, ou seja, ( $u_2 = 0$ ) (veja Figura 2.2.1). Nessa configuração, estamos procurando a dependência do XRatio em função do valor final do perfil de dispersão  $\beta$ . Em nossa pesquisa, examinamos seis diferentes perfis. Primeiramente, o acoplador assimétrico está composto de dois guias; guia 1 ( $R(\xi) = 1$ ) e guia 2 ( $P(\xi)$ ) com dispersão decrescente. O perfil constante é definido como  $P(\xi) = 1/\beta$ , assim,

temos um perfil onde a dispersão decresce de 1 até o valor final  $1/\beta$ . Uma baixa potência foi utilizada para excitar o canal 1 da Figura 3.3.3 ( $I_1 = 0,95W$ ). Notamos que, quando  $\beta = 1$ , todos os acopladores apresentam o mesmo valor de coeficiente de extinção, cerca de  $-16,5 \text{ dB}$ , o que significa que toda a luz incidente na porta 1 é transmitida para a porta 2 do acoplador(0<sub>2</sub>). Com o decrescimento da dispersão observamos um aumento do coeficiente de extinção para todos os acopladores, onde o maior valor obtido foi de aproximadamente  $-12,2 \text{ dB}$  para o perfil constante quando  $\beta = 3$ .

Para a mesma configuração, ou seja, excitando apenas o guia 1 (1,0), analisamos também o fator de compressão ( $C$ ) (Figura 3.3.4) para os mesmos acopladores. Quando  $\beta = 1$ , o pulso comprime ( $C > 1$ ) em todos os dispositivos. Vemos que, em todos os dispositivos, com o aumento de  $\beta$ , o pulso comprime, onde a menor compressão foi observado para o perfil gaussiano. Em  $\beta = 3$  o perfil constante está comprimido de 46% ( $C = 1,85$ ). O perfil hiperbólico está comprimido de 31% ( $C = 1,44$ ) em  $\beta = 2,5$  e em  $\beta = 1,75$ , o perfil gaussiano está comprimido em 16,67% ( $C = 1,2$ ).

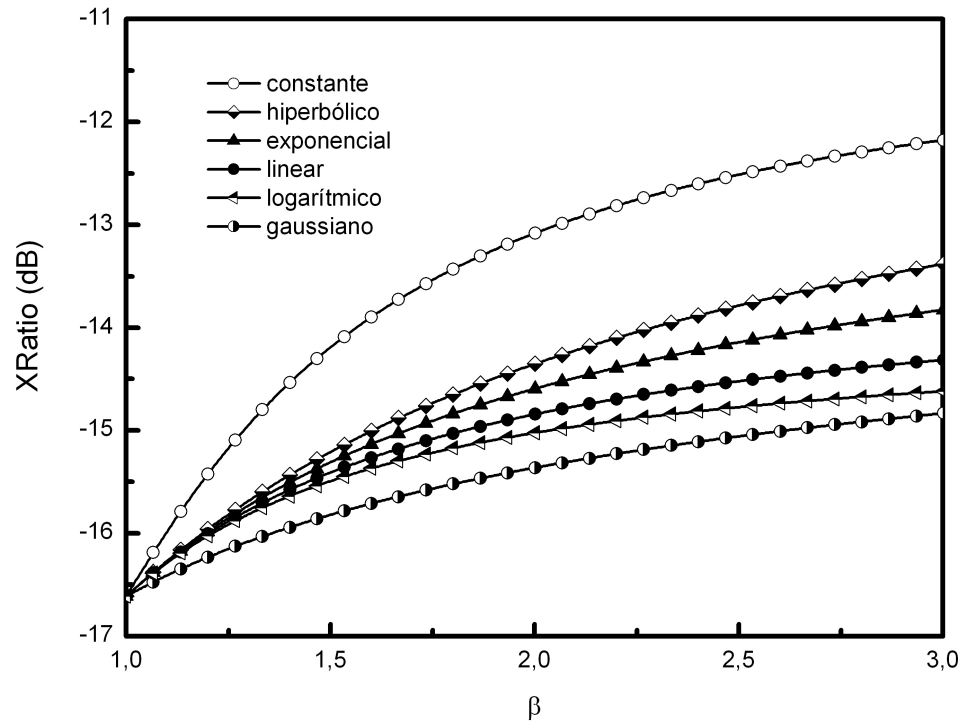


Figura 3.3.3 -  $XR_1$  (coeficiente de extinção) em dB para os seis acopladores indicados, na figura, excitados com pulso de 2 ps, em função da dispersão  $\beta$ , com  $I_1 = 0,95W$ ,  $k = 0,3312 m^{-1}$ ,  $L_C = \pi/2k$ ,  $P(\xi)$ ,  $R(\xi) = 1$ .

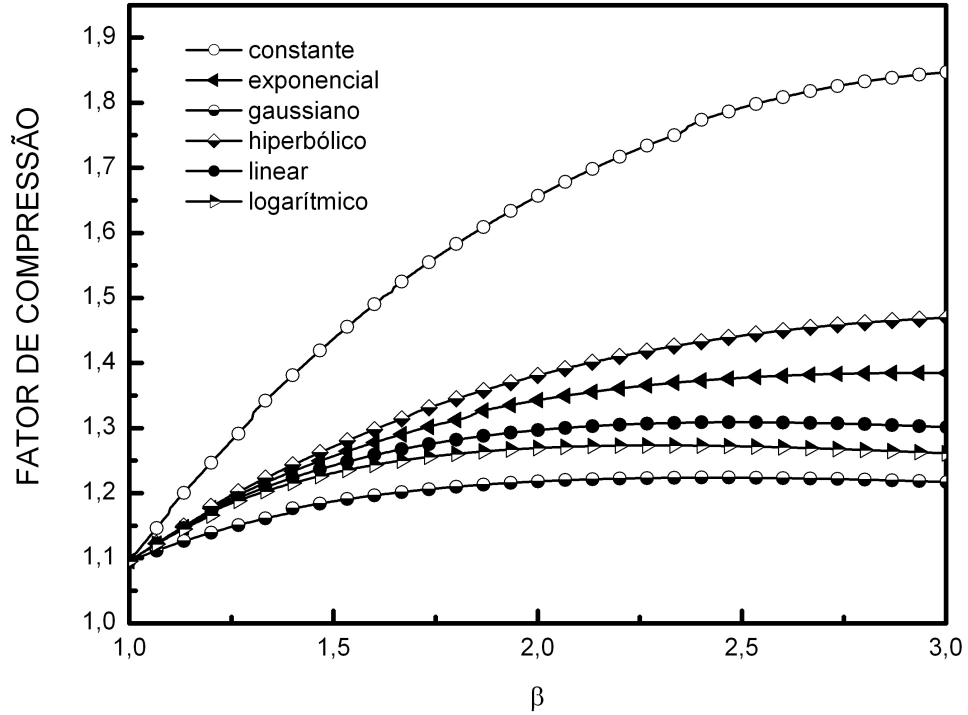


Figura 3.3.4 - Fator de compressão para os seis acopladores indicados, na figura, excitados com pulso de 2 ps, em função da dispersão  $\beta$ , com  $I_1 = 0,95W$ ,  $k = 0,3312 m^{-1}$ ,  $L_C = \pi/2k$ ,  $P(\xi)$ ,  $R(\xi) = 1$ .

A seguir, analisaremos as formas dos pulsos propagados, em três dimensões, para cada um dos dispositivos, e então poderemos verificar as informações contidas no gráfico da Figura 3.3.4. O sinal de entrada para todos os dispositivos está sendo mostrado na Figura 3.3.5. A Figura 3.3.6 nos mostra a forma do pulso na saída do acoplador com perfil constante, com a mesma variação de dispersão  $\beta$ , na qual percebemos a compressão do pulso com a variação de  $\beta$ . O pulso propagado no



acoplador com perfil exponencial, Figura 3.3.7, também comprime, fazendo com que o mesmo atinja intensidades elevadas. Já o sinal propagado no acoplador com perfil gaussiano, Figura 3.3.8, praticamente não perde sua forma. Observamos que o pulso propagado no acoplador com perfil hiperbólico, fig. 3.3.9, está bastante comprimido. Da mesma forma que o acoplador com perfil gaussiano, o acoplador com perfil linear, fig. 3.3.10, assim como, o com perfil logarítmico, fig. 3.3.11, estão apenas um pouco comprimidos e praticamente conservaram a forma do pulso de entrada.

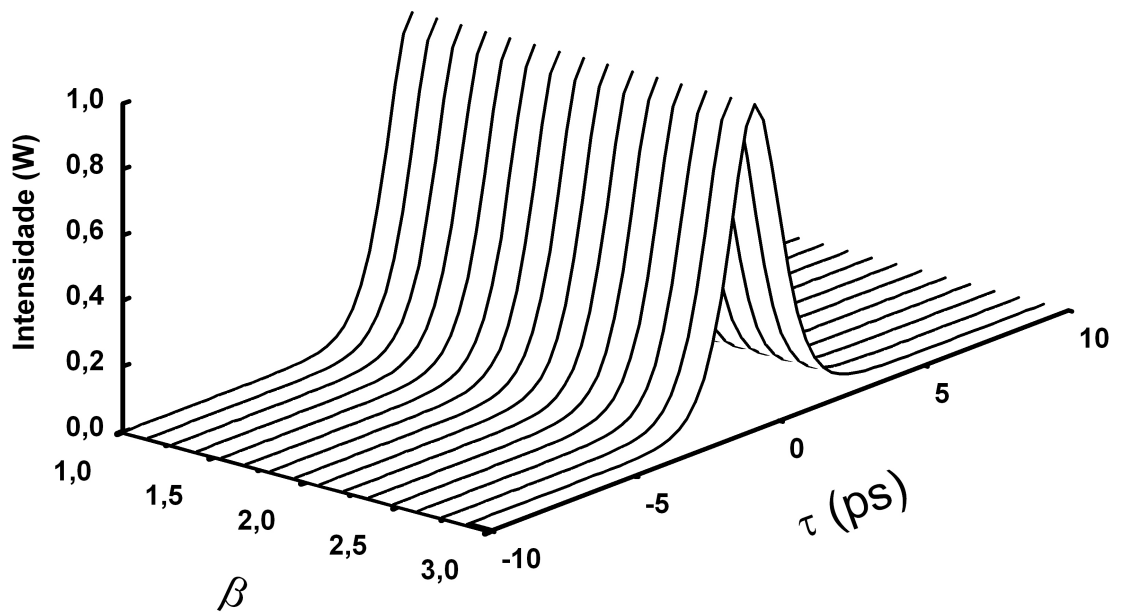


Figura 3.3.5 - Pulso solitônico (2 ps) usado para excitar os acopladores, onde  $\beta$  é a dispersão,  $\tau$  o tempo, com intensidade em Watt.

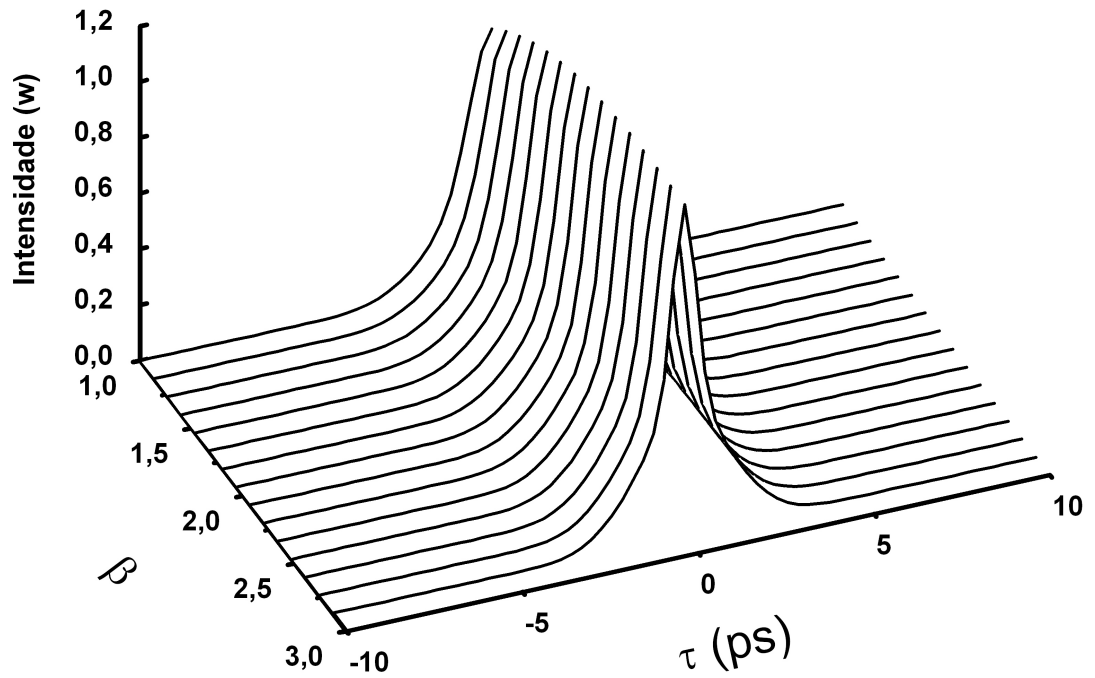


Figura 3.3.6 - Resultado da simulação numérica quando o canal 1 do acoplador com perfil constante é excitado com um pulso solitônico (2 ps), onde  $\beta$  é a dispersão,  $\tau$  o tempo, com intensidade em Watt.

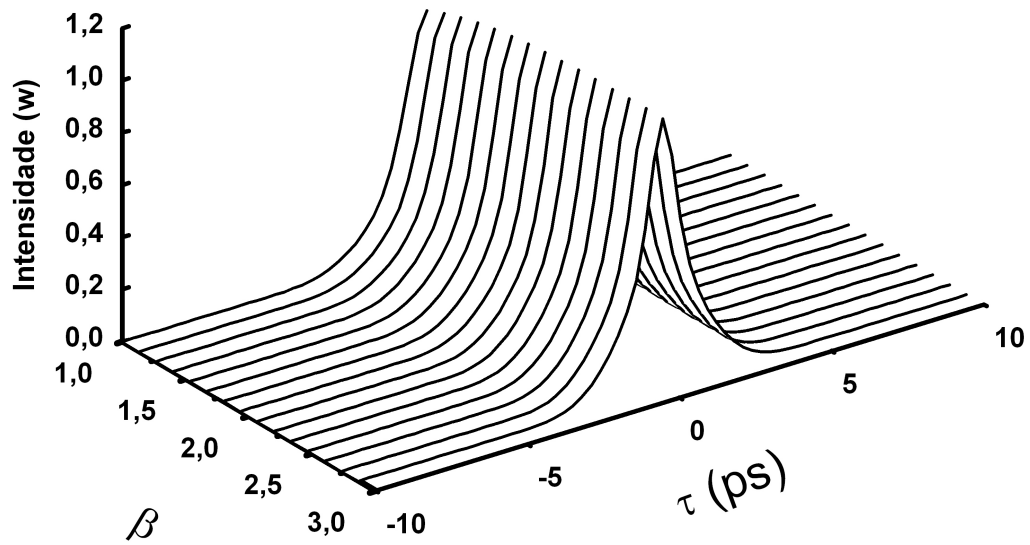


Figura 3.3.7 - Resultado da simulação numérica quando o canal 1 do acoplador com perfil exponencial é excitado com um pulso solitônico (2 ps), onde  $\beta$  é a dispersão,  $\tau$  o tempo, com intensidade em Watt.

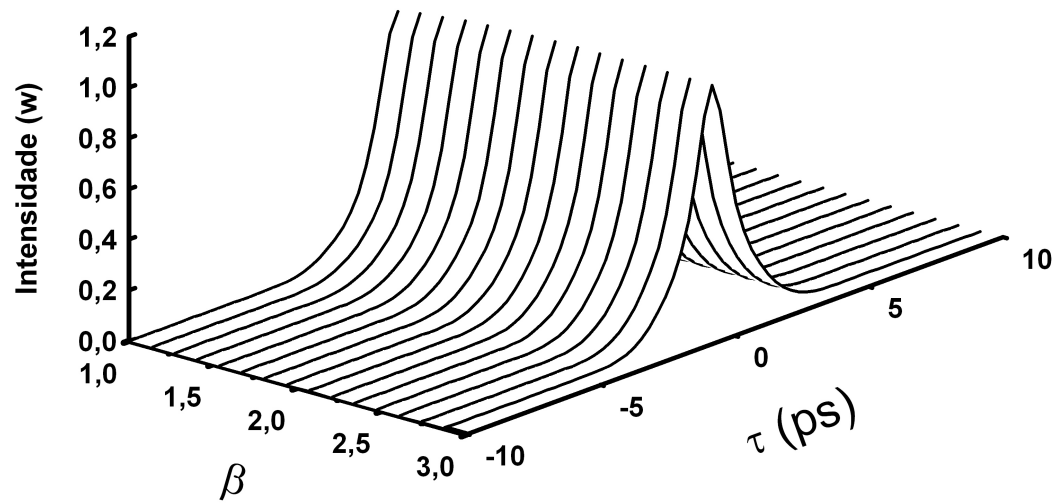


Figura 3.3.8 - Resultado da simulação numérica quando o canal 1 do acoplador com perfil gaussiano é excitado com um pulso solitônico (2 ps), onde  $\beta$  é a dispersão,  $\tau$  o tempo, com intensidade em Watt.

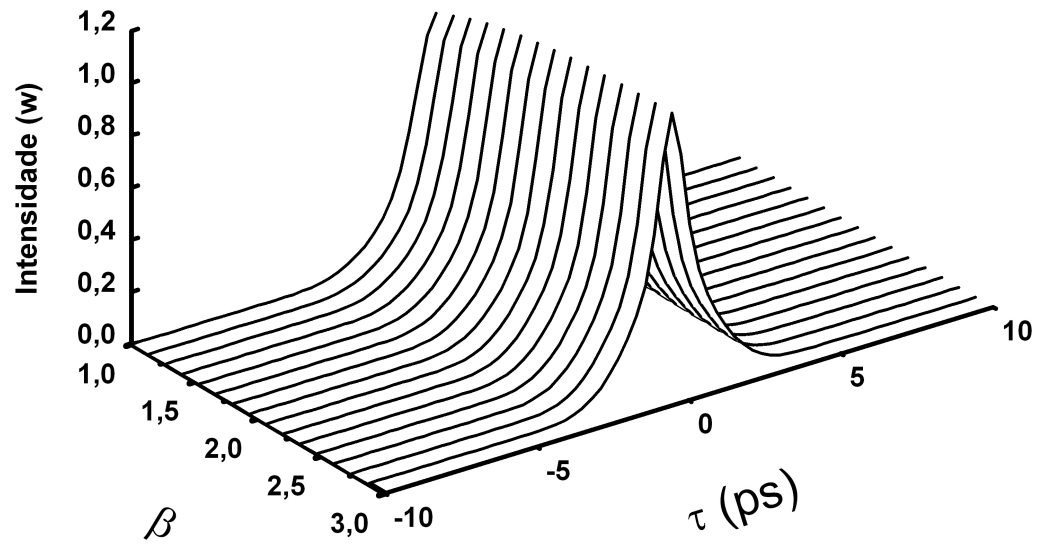


Figura 3.3.9 - Resultado da simulação numérica quando o canal 1 do acoplador com perfil hiperbólico é excitado com um pulso solitônico (2 ps), onde  $\beta$  é a dispersão,  $\tau$  o tempo, com intensidade em Watt.

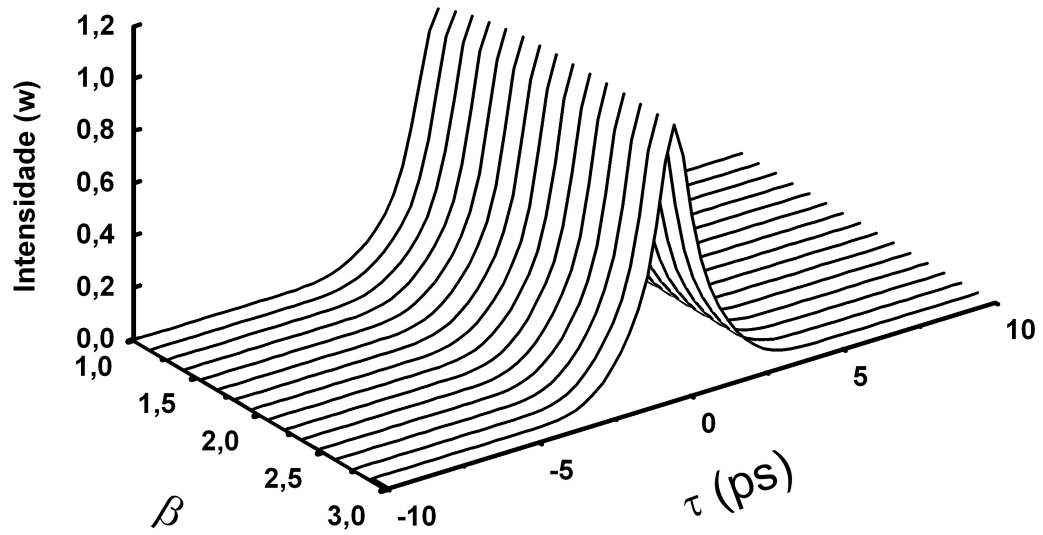


Figura 3.3.10 - Resultado da simulação numérica quando o canal 1 do acoplador com perfil linear é excitado com um pulso solitônico (2 ps), onde  $\beta$  é a dispersão,  $\tau$  o tempo, com intensidade em Watt.

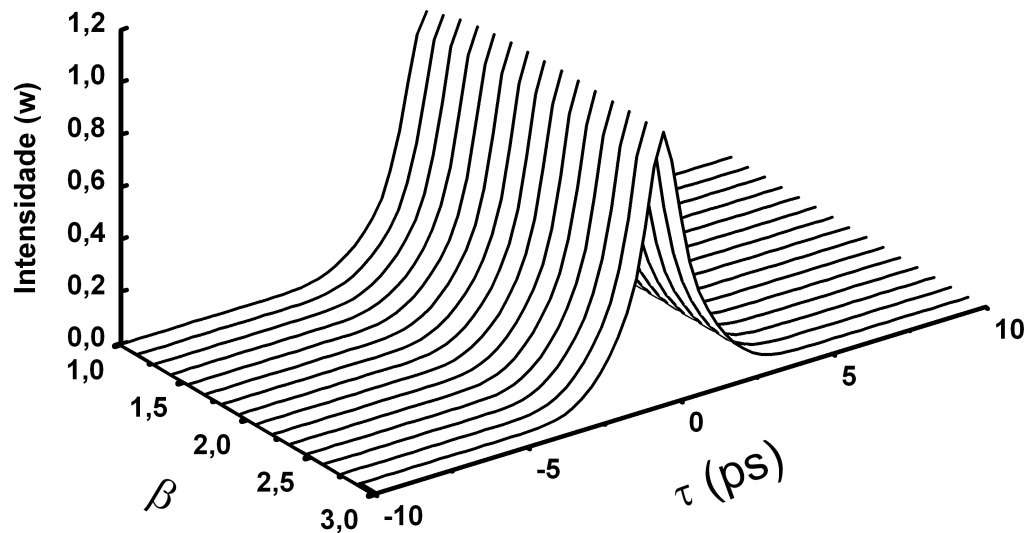


Figura 3.3.11 - Resultado da simulação numérica quando o canal 1 do acoplador com perfil logarítmico é excitado com um pulso solitônico (2 ps), onde  $\beta$  é a dispersão,  $\tau$  o tempo, com intensidade em Watt.

Na figura 3.3.12, analisamos o coeficiente de extinção para o mesmo pulso incidente, entretanto, excitamos apenas o canal 2 ( $I_2 = 0,95W$ ), ou seja, o guia com dispersão decrescente, onde todas as características foram mantidas e os mesmos perfis analisados. Quando  $\beta = 1$ , todos os acopladores estão com um Xratio de aproximadamente  $-4,3 \text{ dB}$ , o que significa que a luz incidente foi transmitida para o guia 1, porém, com o decréscimo da dispersão, a energia retorna ao guia 2 em todos os

acopladores.

Para esta configuração, o maior valor de XRatio, cerca de 5,8 dB (0,80W), foi obtido com o perfil constante quando  $\beta = 2,75$ . O acoplador com perfil gaussiano é o que demora mais para retornar sua energia ao canal 2 e tem o seu valor máximo de XRatio igual a  $-2,02273 \text{ dB}$  (0,3856W) com  $\beta = 3$ .

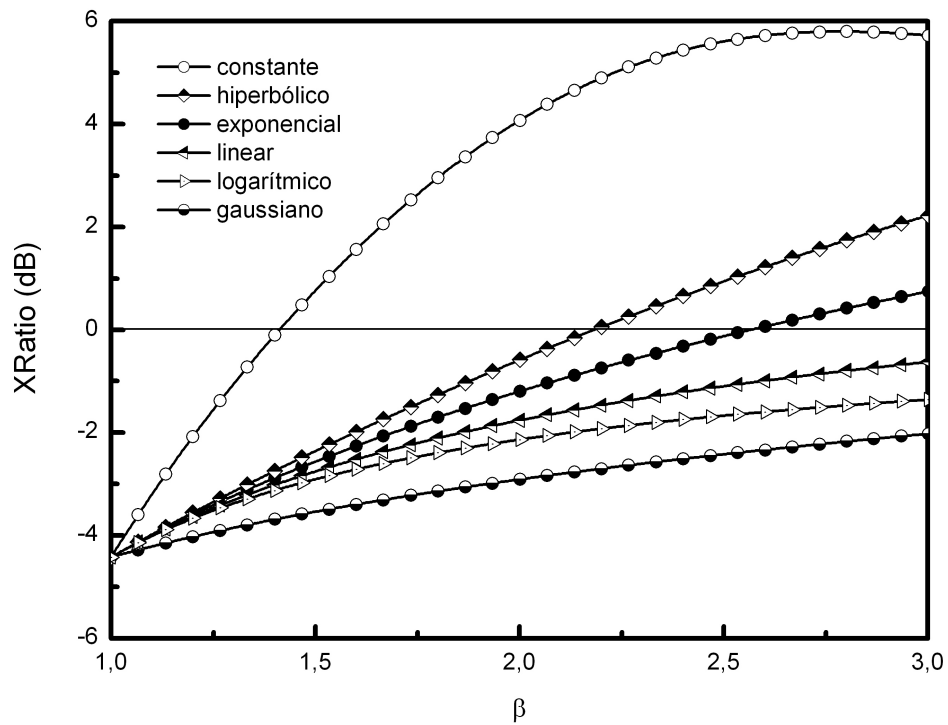


Figura 3.3.12 -  $XR_2$ (coeficiente de extinção) para os seis acopladores indicados, na figura, excitados com pulso de  $2 \text{ ps}$ , em função da dispersão  $\beta$ , com  $I_2 = 0,95W$ ,  $k = 0,3312 \text{ m}^{-1}$ ,  $L_C = \pi/2k$ ,  $P(\xi)$ ,  $R(\xi) = 1$ .



Analizando o fator de compressão ( $C$ ) para a mesma configuração (0,1), percebemos que o sinal propagado em todos os acopladores alargam ( $C < 1$ ) em  $\beta = 1$ , depois comprimem ( $C > 1$ ) com o aumento de  $\beta$  ( ver figura 3.3.13 ).

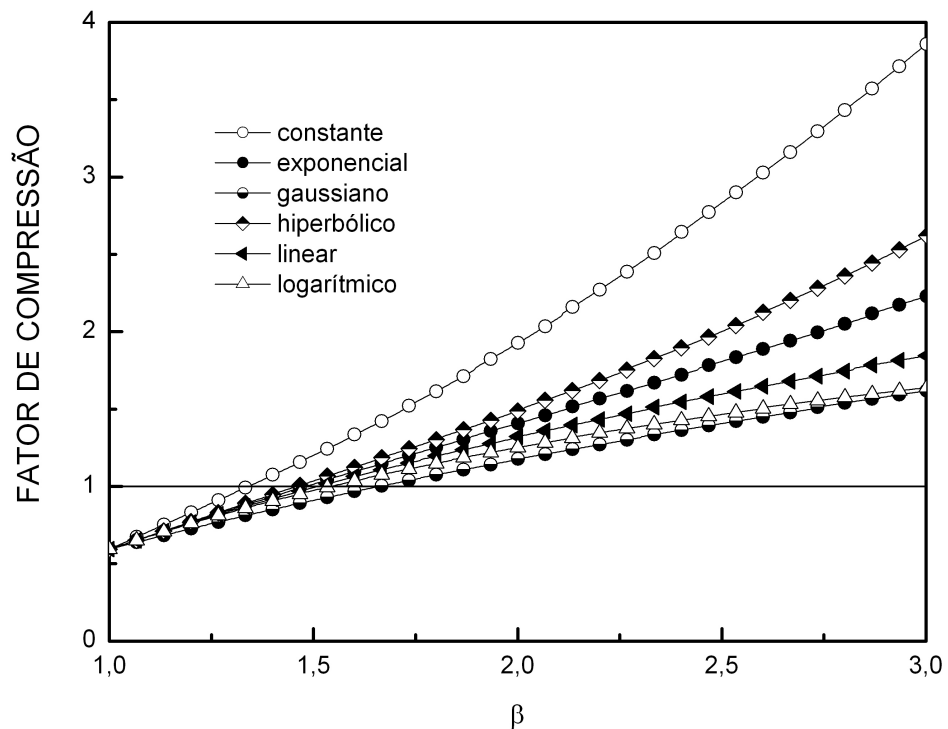


Figura 3.3.13 (Fator de compressão) para os seis acopladores indicados, na figura, excitados com pulso de  $2 ps$ , em função da dispersão  $\beta$ , com  $I_2 = 0,95W$ ,  $k = 0,3312 m^{-1}$ ,  $L_C = \pi/2k$ ,  $P(\xi)$ ,  $R(\xi) = 1$ .

Agora, podemos confirmar as informações da figura 3.3.13 observando a forma dos pulsos de saída nos seis acopladores, com perfis: constante, exponencial, gaussiano,

hiperbólico, linear e logarítmico. Na figura 3.3.15, Observamos a forma do pulso para o acoplador com perfil constante onde, para  $\beta = 1$ , temos um alargamento do pulso, logo em seguida, com o aumento de  $\beta$ , observamos um compressão do pulso, bastante expressivo quando  $\beta$  atinge o valor 3,0. Para o perfil exponencial (veja fig. 3.3.16) quando  $\beta = 1$ , também temos um alargamento do pulso, logo em seguida, à medida que  $\beta$  cresce, temos uma compressão do pulso. Para o perfil gaussiano (veja fig. 3.3.17), quando  $\beta = 1$ , temos um alargamento do pulso, logo em seguida, com o aumento de  $\beta$ , observamos uma compressão do pulso. Para o perfil hiperbólico (veja fig. 3.3.18), quando  $\beta = 1$ , temos um alargamento do pulso, e logo após, com o aumento de  $\beta$ , temos um compressão do pulso.

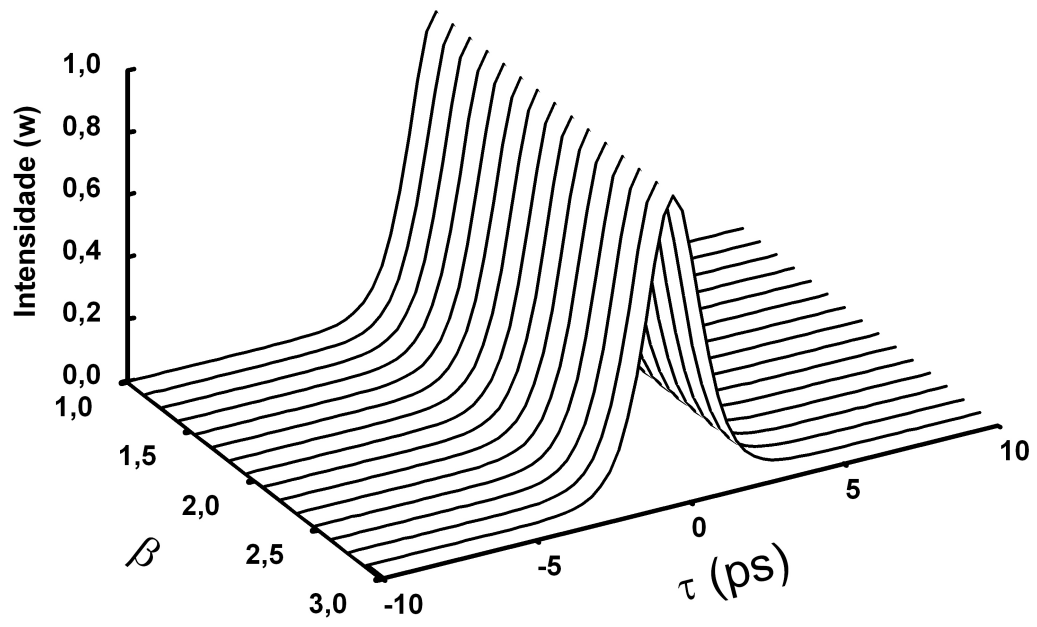


Figura 3.3.14 - Pulso solitônico (2 ps) usado para excitar os acopladores, onde  $\beta$  é a dispersão,  $\tau$  o tempo, com intensidade em Watt.

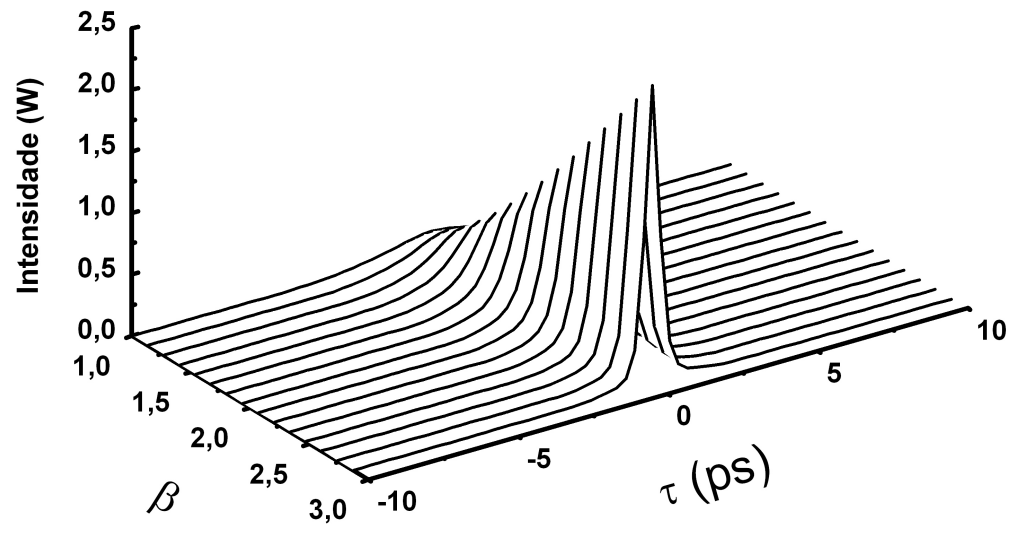


Figura 3.3.15 - Resultado da simulação numérica quando o canal 2 do acoplador com perfil constante é excitado com um pulso solitônico (2 ps), onde  $\beta$  é a dispersão,  $\tau$  o tempo, com intensidade em Watt.

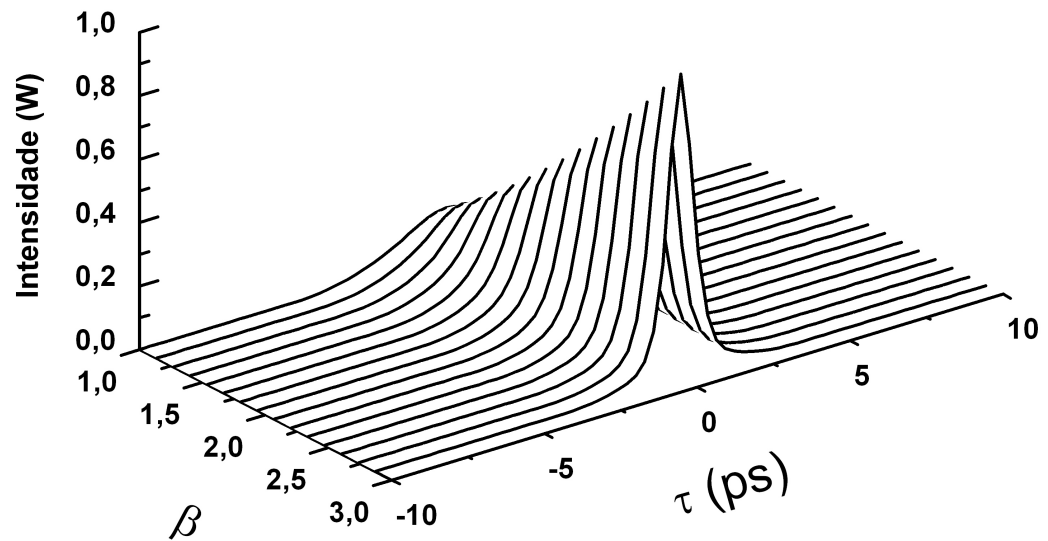


Figura 3.3.16 - Resultado da simulação numérica quando o canal 2 do coplador com perfil exponencial é excitado com um pulso solitônico (2 ps), onde  $\beta$  é a dispersão,  $\tau$  o tempo, com intensidade em Watt.

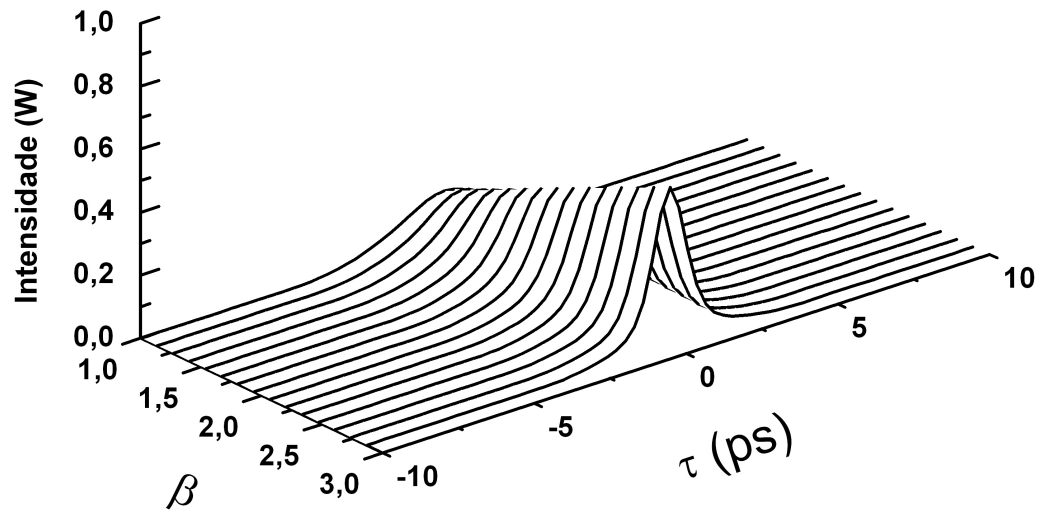


Figura 3.3.17 - Resultado da simulação numérica quando o canal 2 do acoplador com perfil gaussiano é excitado com um pulso solitônico (2 ps), onde  $\beta$  é a dispersão,  $\tau$  o tempo, com intensidade em Watt.

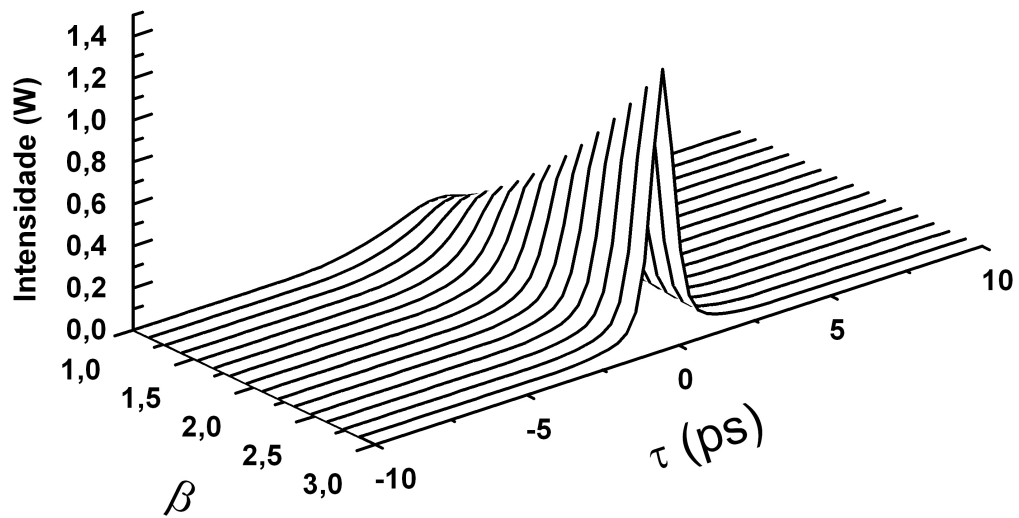


Figura 3.3.18 - Resultado da simulação numérica quando o canal 2 do acoplador com perfil hiperbólico é excitado com um pulso solitônico (2 ps), onde  $\beta$  é a dispersão,  $\tau$  o tempo, com intensidade em Watt.

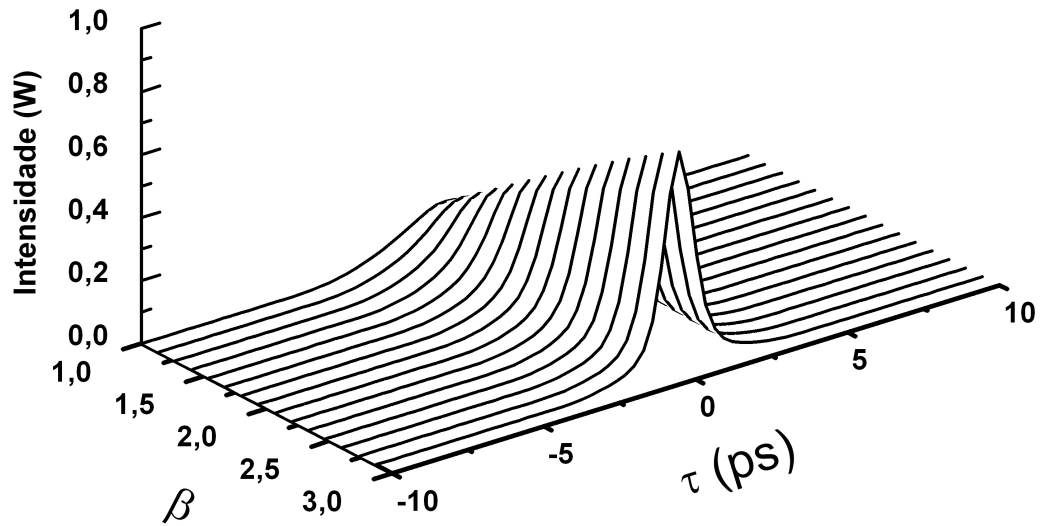


Figura 3.3.19 - Resultado da simulação numérica quando o canal 2 do acoplador com perfil linear é excitado com um pulso solitônico (2 ps), onde  $\beta$  é a dispersão,  $\tau$  o tempo, com intensidade em Watt.



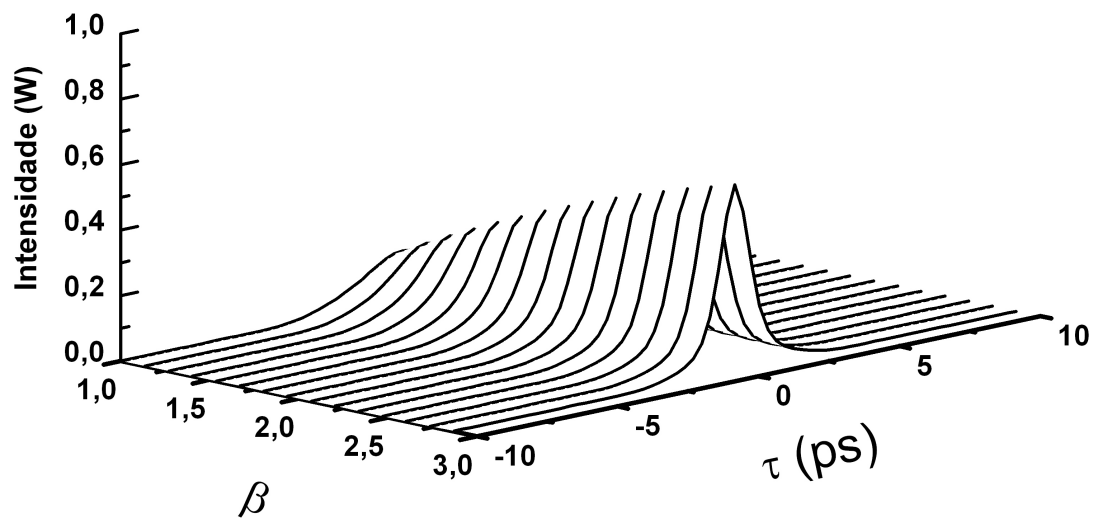


Figura 3.3.20 - Resultado da simulação numérica quando o canal 2 do acoplador com perfil logarítmico é excitado com um pulso solitônico (2 ps), onde  $\beta$  é a dispersão,  $\tau$  o tempo, com intensidade em Watt.

Após analisadas as configurações (1,0) e (0,1), temos que escolher alguns valores para dispersão  $\beta$  a fim de excitarmos o dispositivo com uma terceira configuração (1,1). O critério utilizado para selecionar esses valores foi muito simples, e poderia ser diferente, dependendo do foco e do objetivo. Em nosso trabalho, tentamos escolher um valor de  $\beta$  que fosse razoável a todos os perfis em dois aspectos: os valores de coeficiente de extinção e do fator de compressão. Na Figura 3.3.21, ativamos

simultaneamente os dois guias de onda, sempre com intensidades iguais a  $0,95W$ , ou seja,  $I_1 = I_2 = 0,95$  e medimos o Xratio, onde  $\beta$  terá sempre um valor fixo e previamente escolhido, com uma diferença de fase dada por  $\Delta\phi = \Delta\theta\pi$ . Seleccionamos um valor para a dispersão,  $\beta = 2,5$ . Após esse procedimento, poderemos estruturar a lógica necessária para implementação das portas lógicas.

Na Figura 3.3.21, para  $\beta = 2,5$ , na fase  $\Delta\theta = 0$  todos os perfis estão com um valor de Xratio negativo entre  $0\text{ dB}$  e  $-10\text{ dB}$ . Com a variação da fase, o valor de Xratio diminui para todos os perfis, chegando a um valor mínimo de aproximadamente  $-20\text{ dB}$ , para o acoplador com perfil exponencial e hiperbólico, quando  $\Delta\theta = 0,43$  e  $\Delta\theta = 0,48$ , respectivamente. Na medida que a fase continua aumentando, as energias vão retornando ao guia 1, atingindo valores positivos em  $\Delta\theta \approx 0,70$ . Um outro ponto importante é quando a energia fica praticamente distribuída entre os dois canais, e isso ocorre quando  $\Delta\theta = 0,85$ . No ponto  $\beta = 2,00$ , vemos a presença da luz variando entre os guias de forma que podemos verificar os pontos de máximo e mínimo em fases praticamente iguais. Um outro elemento relevante nessa análise é o fator de compressão, que para essa configuração com os dois guias excitados simultaneamente, exhibe uma variação bem elevada na forma do pulso, isso porque a energia varia bastante entre os dois guias, ficando, assim, muito difícil encontrar a forma do pulso de saída mais adequada. Entretanto, conseguimos calcular o fator de compressão para os pontos que serão explorados. Para o perfil constante e  $\beta = 2,5$ , temos um alargamento do pulso de  $162,5\%$  ( $C = 0,38095$ ) na fase  $\Delta\theta\pi \approx 0,53\pi$ , uma compressão de  $10,0169\%$  ( $C = 1,11132$ ) na fase  $\Delta\theta\pi \approx 0,75\pi$ , um alargamento de  $249,44\%$  ( $C = 0,28617$ ) em  $\Delta\theta\pi \approx 1,50\pi$ , e uma compressão do pulso de  $52,29\%$  ( $C = 2,09625$ ) na fase  $\Delta\theta\pi \approx 1,90\pi$ .

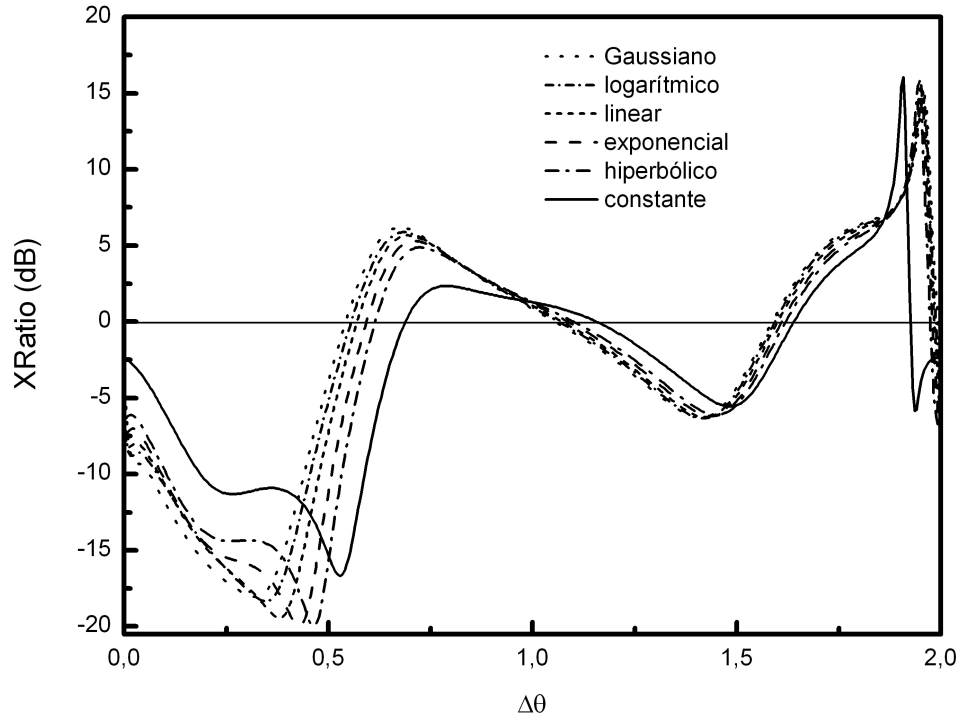


Figura 3.3.21 -  $XR_1(dB)$  para os seis acopladores mostrados na figura. São excitados com um pulso solitônico (2ps) em função de  $\Delta\theta$ , com  $I_1 = 0,95W$ ;  $I_2 = 0,95W$ ;  $\beta = 2,5$ ;  $k = 0,3312$ ;  $L_C = \pi/2k$ ;  $P(\xi)$ ,  $R(\xi) = 1$ .

Após analisarmos as três configurações: (1,0), (0,1) e (1,1), selecionamos os pontos relevantes para implementarmos as funções lógicas. Resolvemos explorar apenas um valor de dispersão,  $\beta = 2,5$ . Entretanto, para esse valor de  $\beta$  e configuração (1,1), procuramos escolher a melhor fase, de forma que pudessemos obter portas lógicas eficientes. Assim, as opções de defasamento foram,  $\Delta\phi = 0,53\pi$ ,  $\Delta\phi = 1,90\pi$ ,  $\Delta\phi = 0,4288\pi$ ,  $\Delta\phi = 0,32\pi$ ,  $\Delta\phi = 1,948\pi$ ,  $\Delta\phi = 0,464\pi$ ,  $\Delta\phi = 0,38\pi$  e  $\Delta\phi = 0,34\pi$ .

Nesses pontos, procuramos encontrar as seguintes situações: um pico negativo, onde a maior parte da energia fica localizada no guia 2 e um pico positivo, o que significa luz no guia 1.

### 3.4 Tabelas Verdades Para as Portas Implementadas

Na tabela 3.4.1,  $I_1$  e  $I_2$  representam as intensidades de entrada nos canais 1 e 2, respectivamente, sendo essas intensidade iguais a 0,95W. Entretanto, foram normalizadas e igualadas a 1, apenas, para facilitar a representação do canal que está ativo, ou seja, o canal ativo será representado por 1. Nas outras duas colunas da direita, encontramos duas informações importantes nas saídas  $O_1$  e  $O_2$ , para cada dispositivo: o valor do coeficiente de extinção em dB com as energias equivalentes entre parêntesis e qual porta de saída estar sendo considerada ativa ou inativa.

Assim, com  $\beta = 2,5$  e  $\Delta\phi = 0,53\pi$ , conseguimos obter uma porta OR na saída  $O_2$  para o acoplador com perfil constante. Para a configuração (1,0), (0,1) e (1,1), temos um valor de XRatio, repectivamente igual a +12,51 dB, +5,6 dB e +16,61 dB que nos dar uma excelente porta OR. No entanto, também conseguimos implementar com o perfil hiperbólico e fase igual a  $\Delta\phi = 0,464\pi$ , uma excelente porta OR (ver tabela 3.4.5).

Para a porta AND, o melhor resultado que conseguimos está na tabela 3.4.2 com o perfil constante e fase igual a  $\Delta\phi = 1,90\pi$ , onde o valor de XRatio encontrado foi: -12,51 dB, -5,6 dB e +16,05 dB na saída  $O_1$ , uma excelente porta.

E para a porta XOR, conseguimos um bom resultado também na tabela 3.4.2 com

o perfil constante e fase igual a  $\Delta\phi = 1,90\pi$ , onde o valor de XRatio encontrado foi: +12,51 dB, +5,6 dB e -16,05 dB na saída  $O_2$ , uma excelente porta.

E, finalmente, para a porta NOT, temos um bom resultado na tabela 3.4.4 com o perfil gaussiano e fase igual a  $\Delta\phi = 0,32\pi$ , onde o valor de XRatio encontrado foi: -2,42 dB +15,05 dB e +18 dB na saída  $O_2$ , uma excelente porta. Sendo, nesse caso, a fase irrelevante, pois, essa porta tem apenas uma entrada e uma saída, ou seja, só depende da configuração (1,0) ou (0,1).

Concluindo, observamos, de maneira geral, que o dispositivo com perfil constante proporcionou a construção das melhores portas lógicas, tendo exibido um bom desempenho.

		Constante			
		$XR_1(dB)$		$XR_2(dB)$	
$I_1$	$I_2$	$O_1$		$O_2$	
0	0	0		0	
0	1	(0,215)	-5,60 dB	0	(0,785) 5,60 dB 1
1	0	(0,053)	-12,51 dB	0	(0,947) 12,51 dB 1
1	1	(0,042)	-16,61 dB	0	(1,958) 16,61 dB 1
$\Delta\phi = 0,53\pi$		— — —		PORTA OR	

Tabela 3.4.1 - Operações em acopladores não linear assimétrico com  $\Delta\phi = 0,53\pi$ ,  $\beta = 2,5$  e comprimento de acoplamento  $L_C = 4,73m$ .

		Constante			
		$XR_1(dB)$		$XR_2(dB)$	
$I_1$	$I_2$	$O_1$		$O_2$	
0	0	0		0	
0	1	(0,215)	-5,60 dB	0	(0,785) 5,60 dB 1
1	0	(0,053)	-12,51 dB	0	(0,947) 12,51 dB 1
1	1	(1,952)	16,05 dB	1	(0,048) -16,05 dB 0
$\Delta\phi = 1,90\pi$		PORTA AND		PORTA XOR	

Tabela 3.4.2 - Operações em acopladores não linear assimétrico com  $\Delta\phi = 1,90\pi$ ,  $\beta = 2,5$  e comprimento de acoplamento  $L_C = 4,73m$ .

		Exponencial			
		$XR_1(dB)$		$XR_2(dB)$	
$I_1$	$I_2$	$O_1$		$O_2$	
0	0	0		0	
0	1	(0,507)	0,12 dB	1	(0,493) -0,12 dB 0
1	0	(0,037)	-14,14 dB	0	(0,963) 14,14 dB 1
1	1	(0,022)	-19,979 dB	0	(1,978) 19,979 dB 1
$\Delta\phi = 0,428\pi$		PORTA NOT		PORTA NOT	

Tabela 3.4.3 - Operações em acopladores não linear assimétrico com  $\Delta\phi = 0,428\pi$ ,  $\beta = 2,5$  e comprimento de acoplamento  $L_C = 4,73m$ .

		Gaussiano				
		$XR_1(dB)$		$XR_2(dB)$		
$I_1$	$I_2$	$O_1$		$O_2$		
0	0	0		0		
0	1	(0,636)	2,42 dB	1	(0,364) -2,42 dB	0
1	0	(0,030)	-15,05 dB	0	(0,970) 15,05 dB	1
1	1	(0,032)	-18,00 dB	0	(1,968) 18,00 dB	1
$\Delta\phi = 0,32\pi$		PORTA NOT		PORTA NOT		

Tabela 3.4.4 - Operações em acopladores não linear assimétrico com  $\Delta\phi = 0,32\pi$ ,  $\beta = 2,5$  e comprimento de acoplamento  $L_C = 4,73m$ .

		Hiperbólico				
		$XR_1(dB)$		$XR_2(dB)$		
$I_1$	$I_2$	$O_1$		$O_2$		
0	0	0		0		
0	1	(0,450)	-0,94 dB	0	(0,550) 0,94 dB	1
1	0	(0,040)	-13,78 dB	0	(0,960) 13,78 dB	1
1	1	(1,949)	15,80 dB	1	(0,051) -15,80 dB	0
$\Delta\phi = 1,948\pi$		PORTA AND		PORTA XOR		

Tabela 3.4.5 - Operações em acopladores não linear assimétrico com  $\Delta\phi = 1,948\pi$ ,  $\beta = 2,5$  e comprimento de acoplamento  $L_C = 4,73m$ .

		Hiperbólico		
		$XR_1(dB)$		$XR_2(dB)$
$I_1$	$I_2$	$O_1$		$O_2$
0	0	0		0
0	1	(0,450)	-0,94 dB 0	(0,550) 0,94 dB 1
1	0	(0,040)	-13,78 dB 0	(0,960) 13,78 dB 1
1	1	(0,022)	-19,98 dB 0	(1,978) 19,98 dB 1
$\Delta\phi = 0,464\pi$		— — —		PORTA OR

Tabela 3.4.6 - Operações em acopladores não linear assimétrico com  $\Delta\phi = 0,464\pi, \beta = 2,5$  e comprimento de acoplamento  $L_C = 4,73m$ .

		Linear		
		$XR_1(dB)$		$XR_2(dB)$
$I_1$	$I_2$	$O_1$		$O_2$
0	0	0		0
0	1	(0,560)	1,098 dB 1	(0,440) -1,098 dB 0
1	0	(0,034)	-14,52 dB 0	(0,966) 14,52 dB 1
1	1	(0,024)	-19,44 dB 0	(1,976) 19,44 dB 1
$\Delta\phi = 0,38\pi$		PORTA NOT		PORTA NOT

Tabela 3.4.7 - Operações em acopladores não linear assimétrico com  $\Delta\phi = 0,38\pi, \beta = 2,5$  e comprimento de acoplamento  $L_C = 4,73m$ .



		Logarítmico					
		$XR_1(dB)$			$XR_2(dB)$		
$I_1$	$I_2$	$O_1$			$O_2$		
0	0	0			0		
0	1	(0,590)	1,67 dB	1	(0,410)	-1,67 dB	0
1	0	(0,032)	-14,77 dB	0	(0,968)	14,77 dB	1
1	1	(0,028)	-18,34 dB	0	(1,972)	18,34 dB	1
$\Delta\phi = 0,34\pi$		PORTA NOT			PORTA NOT		

Tabela 3.4.8 - Operações em acopladores não linear assimétrico com  $\Delta\phi = 0,34\pi$ ,  $\beta = 2,5$  e comprimento de acoplamento  $L_C = 4,73m$ .

### 3.5 Figura de Mérito: FOMELG (dB)

Com o objetivo de compararmos o desempenho das portas lógicas, criamos uma figura de mérito definida em função dos módulos dos coeficientes de extinção para cada saída das portas lógicas. Desta forma, a figura de mérito para portas lógicas (FOMELG (dB): Figure-of-merit of Logic Gates)[58], para as combinações  $(I_1, I_2) = [(0, 0), (0, 1), (1, 0), (1, 1)]$  é dada por:

$$FOMELG(dB) = |XR(0,0)| + |XR(0,1)| + |XR(1,0)| + |XR(1,1)| \quad (3.5.1)$$

A tabela 3.4.9, a seguir, mostra a aplicação da equação (3.5.1), nas tabelas implementadas acima.

PORTA LÓGICA	PERFIL	FASE	FOMELG (dB)
		$\Delta\phi = \Delta\theta\pi$	Sóliton (ps)
AND	Constante	$1,90\pi$	34,16 dB
	Hiperbólico	$1,948\pi$	30,52 dB
OR	Constante	$0,53\pi$	34,72 dB
	Hiperbólico	$0,464\pi$	34,70 dB
XOR	Constante	$1,90\pi$	34,16 dB
	Hiperbólico	$1,948\pi$	30,52 dB
NOT	Gaussiano	$0,32\pi$	35,47 dB

Tabela 3.4.9 - FOMELG (dB)

# Conclusões Gerais e Perspectivas Futuras

Neste trabalho, nosso objetivo foi implementar portas lógicas ópticas a partir da utilização de um acoplador direcional não linear (NLDC) assimétrico de fibras ópticas. Investigamos esse acoplador para seis diferentes perfis com dispersão decrescente: constante, exponencial, gaussiano, hiperbólico, linear e logarítmico, operando no regime pulsado, tipo sóliton, com 2 ps de largura. Sendo que os perfis de dispersão decrescente estão presentes apenas no guia 2. Excitamos inicialmente o canal 1 (1,0), depois, apenas o canal 2 (0,1), e para essas duas configurações medimos o coeficiente de extinção com a variação da dispersão  $\beta$ , e finalmente, ativamos ambos os canais, analisando o coeficiente de extinção com relação à diferença de fase  $\Delta\phi$  entre os canais.

Após a análise dos resultados encontrados nas configurações propostas, selecionamos alguns valores de  $\beta$  convenientes a implementação das funções lógicas e escolhemos fases em pontos favoráveis e, então, montamos as tabelas-verdades obtendo as seguintes portas lógicas: AND, OR, XOR e NOT. Sendo a OR GATE, a melhor porta gerada. E, de forma geral, o perfil constante foi o que apresentou melhor

desempenho.

Pretendemos dar continuidade a este trabalho analisando:

- \* O acoplador duplo assimétrico com outras configurações e análise de perda.
- \* O acoplador duplo e triplo planar simétrico, ou assimétrico, para construção de matrizes de acoplamento.
- \* O acoplador duplo assimétrico com um estudo da constante de acoplamento na tentativa de minimizar o tamanho do dispositivo.
- \* O acoplador triplo na configuração triangular simétrica e assimétrica, para geração de portas lógicas.
- \* Estudo do acoplador com aplicação de portas lógicas em redes neurais artificiais (RNAs) como uma função matemática simulando o comportamento de ativar ou não o neurônio [70-73].

Objetivos futuros:

- \* Submeter este trabalho em encontros científicos
- \* Publicar artigos em revistas de relevância científica nacional e internacional.

# Referências

- [1] Kazuya SHIGA, Kyouhei NISHIKAWA, Kazutoshi ANDOH, Masaaki IMAI and Yoh IMAI, "All-optical switching and coupling characteristics of femtosecond pulses in a nonlinear fiber directional coupler" Mem. Muroran Inst. Tech, vol 54, pp. 101-107, 2004
- [2] G.P. Agrawal, Nonlinear Fiber Optics, Academic Press, Boston, 3rd Ed. 2001
- [3] G.P. Agrawal, Applications of Nonlinear Fiber Optics, Academic Press, Boston, 1st Ed. 2001
- [4] Trivunac-Vukovic, N. Milovanovic, B., Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Service, 2001. "Realization of full set of logic gates for all-optical ultrafast switching" TELSIS 2001. 5th International Conference on Volume 2, 19-21 Sept. 2001 Page(s):500 - 503 vol.2
- [5] K.Z. Nóbrega, M.G. da Silva and A.S.B.Sombra, "Multistable all-optical switching behavior of the asymmetric nonlinear directional coupler" Opt. Comm., vol 173, pp. 413-421, 1999.
- [6] P.A. Buah, B.M.A. Rahman and K.T.V. Grattan, "Numerical study of soliton switching in active three-core nonlinear fiber couplers" IEEE J. Quantum Electron., vol 33, pp. 874-878, 1997.
- [7] Hamid Hatami-Hanza and P. L. Chu, "Logic operations in dispersion-mismatched nonlinear fibre couplers", Opt. Comm., vol. 124, pp. 90-94, 1995.
- [8] S.M. Jensen, "The nonlinear coherent coupler" IEEE J. Quantum Electron., vol QE-18, pp. 1580-1583, 1982
- [9] P. Li Kam Wa, J.E. Stieh, N.J. Mason, J.S. Roberts and P.N. Robson, "All optical multiple quantum well waveguide switch" Electron. Lett. vol 21, pp. 26-28, 1985
- [10] S.R. Friberg, Y. Silberberg, M.K. Olivier, M.J. Andrejco, M.A. Saifi and P.W. Smith, "Ultrafast all optical switching in a dual core fiber nonlinear coupler" Appl.

Phys. Lett. Vol. 51, pp. 1135-1137,1987.

[11] W.E. Wood, RW.Ridgeway, J.R. Busch and S.J. Krak, "Investigation of Third order optical nonlinearities in semiconductor/glass composites using integrated-optical directional couplers", Proc. Integrated Photon. Res., Hilton Head, SC,1990, pp 157-158

[12] J.Wilson, G.I. Stegeman and E.M. Wright, "Soliton switching in an erbium doped nonlinear fiber coupler" Opt. Lett.,vol 16,pp. 1653-1655,1991

[13] R.A.Betts,T.Tjugiarto,Y.L.Xue and P.L.Chu, "Nonlinear refractive index in erbium doped optical fiber,"IEEE J. Quantum Electron., vol 27,pp. 908-913,1991

[14] D.Y.Zang and S.R. Forest, "Crystalline organic semiconductor optical directional couplers and switches using an index matching layer"IEEE Photon. Technol. Lett.,vol 4,pp. 365-368,1992

[15] A.S.B. Sombra, "Bistable pulse collisions of the cubic-quintic nonlinear Schrödinger equation", Opt. Comm., vol. 94,pp. 92-98,1992

[16] Y. Chen, A.W. Snyder, D.N. Payne, "Twin core nonlinear couplers with gain and loss"IEEE J. Quantum Electron. Vol 28,pp. 239-245,1992

[17] K.Z. Nobrega, A.S.B.Sombra, "Optimum self phase modulation profile for nonlinear transmission recovery in twin core optical couplers K.Z. Nobrega, A.S.B.Sombra, "Optimum self phase modulation profile for nonlinear transmission recovery in twin core optical couplers with loss" Opt. Comm., vol 151, pp. 31-34,1998

[18]-C.C. Yang, "All-optical ultrafast logic gates that use asymmetric nonlinear directional couplers" Opt. Letters, v.16 pp1641-1643,1991

[19]-C.C. Yang, A .J.S Wang, "Asymmetric Nonlinear coupling and its applications to logic functions, IEEE JQE 28,28, 1992

[20]-D.K. Kaup, T.I. Lakoba, B.A Malomed, "Asymmetric solitons in mismatched dual-core optical fibers" J. Opt. Soc. Am B vol14, pp 1199-1206 W.C.K Mak, B.A Malomed, P.L. Chu, "Solitary waves in asymmetric coupled waveguides with quadratic nonlinearity" Opt. Comm. Vol 154,pp 145-151, 1998

[21]-B.A Malomed, I.M. Skinner, P.L. Chu, G.D. Peng,"Symmetric and asymmetric solitons in twin core nonlinear optical fibers", Phys. Rev. E , vol53 pp 4084-4091, 1996

[22]-F.A Lopez, J.M. Cabrera, F A Rueda, Electrooptics, Academic Press,1994

[23]- N.I Boling,A J Glass, A Owyong, "Empirical relationship for predicting nonlinear refractive index changes in optical solids"IEEE J. Quant. Elect., QE-14 pp 601-610 (1978)M.E. Lines, Oxide Glasses for fast photonic switching: a comparative

study., J. Appl. Phys., vol69, pp 6876-6884 (1991)

[24] G. D. Peng, A. Ankiewicz, Fundamental and second order soliton transmission in nonlinear directional fiber couplers, Int. J. Non Opt. Phy. 1,135 (1992).

[25] ISLAM, M. N., and et al. J. Appl. Phys. 71, 1927, 1992.

[26] ISLAM, M. N., and et al, Nonlinearity Near Half-Gap in Bulk and Quantum Well GaAs/AlGaAs Waveguides, to be published in Proc. Of the Vllth International Symposium on Ultrafast Processes in Specíroscopy, ed. A. Laubereau (Bristol, England: Adam Hilger).

[27] Ho, S. T. and et al, Appl. Phys. Lett. 59, 2558, 1991.

[28] VTLÉNEUVE, A. and et al. Nonlinear absorption processes at half the band gap in GaAs based semiconductors, in Technical Digest on Nonlinear Guided wave Phenmena, 1991, Optical Society of America, Washington, D.C., 1991), vol. 15, pp 222-5.

[29] TSANG, H. K., and et al., Field dependent all-optical switching in GaAs quantum well waveguides operating beyond the to photon absorption limti, in Technical Digest on Nonlinear Guidedwave Phenmena, 1991, Optical Society of America, Washington, D.C., 1991), vol. 15, pp Pd4-1-Pd4-4.

[30] AITCFFISON, J. S., Electron. Lett., 27, 1709, 1991.

[31] WILSON, J., 'Soliton switching in an erbium-doped nonlinear fiber coupler, Opt. Lett., 16, 1653, 1991.

[32] SHIGA, K. and et al., All-optical switching and coupling characteristics of femtosecond pulses in a nonlinear fiber directional coupler, Mem. Muroran Inst. Tech, vol 54, pp. 101-107,2004

[33] TRIVUNAC-Vukovic, N.; Milovanovic, B.; Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Service, 2001. Realization of full set of logic gates for all-optical ultra fast switching TELSIS 2001. Sth International Conference on Volume 2, 19-21 Sept. 2001 Page(s):500 - 503 vol.2

[34] NOBREÇA, K. Z. and et al. Multistable all-optical switching behavior of the asymmetric nonlinear directional coupler, Opt. Comm., vol 173, pp. 413-421,1999.

[35] BUAH, P.A. and et al. Numerical study of soliton switching in active three-core nonlinear fiber couplers, IEEE J. Quantum Electron., vol 33, pp. 874-878,1997.

[36] CHU, P. L., Logic operations in dispersion-mismatched nonlinear fibre couplers, Opt. Comm., vol. 124,pp. 90-94,1995.

[37] KAM, P. L. W., and et al, All optical multiple quantum well waveguide switch, Electron. Lett. vol 21,pp. 26-28,1985

- [38] FRIBERG, S. R., and et al, APPL. Phys. Lett. 51, 1135,1987.
- [39] WOOD, W.E., and et al, Invesigation of Third order optical nonlinearities in semiconductor/glass composites using integrated-optical directional couplers , Proc. Integrated Photon. Res., Hilton Head, SC,1990, pp 157-158
- [40] BETTS, R.A., and et al, Nonlinear refractive index in erbium doped optical fiber, IEEE J. Quantum Electron., vol 27,pp. 908-913,1991
- [41] AGRAWAL, G. P., Applications of Nonlinear Fiber Optics, Academic Press, New York, 2001.
- [42] TEKIPPE, V. J., Fiber Integ. Opt. 9, 97 (1990).
- [43] GREEN, P. E., Jr., Fiber-Optic Networks, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ.1993, Chap. 3.
- [44] HECHT, J., Understanding Fiber Optics, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ. 1999, Chap. 15.
- [45] GHATAK, A. K. and THYAGARAJAN, K., Introduction to Fiber Optics, Cambridge University Press, New York, 1999, Chap. 17.
- [46] CHIANG, K. S., Opt. Lett. 20(9) (1995), 997.
- [47] DROULIAS, S. and et al., Switching dynamics in nonlinear directional fiber couplers with intermodal dispersion, Opt Comm., vol 240, pp. 209-219, 2004.
- [48] PENG, G. D. and ANKIEWICZ, A., Fundamental and second order soliton transmission in nonlinear directional fiber coupler, Int. J. Non. Opt. Phy. 1, 135, 1992.
- [49] MALOMED, B. A., Phys. Rev. E. 51, R.864, 1995.
- [50] MALOMED, B. A., and et al, Phys. Rev. E. 53, 4084, 1996.
- [51] KAUP, D. J., and et al., Asymmetric solitons in mismatched dual-core optical fiber s, J. Opt. Soc. Am B vol 14, pp 1199, 1997.
- [52] KAUP, D. J. and MALOMED, B. A., J. Opt. Soc. Am. B.15, 2838,1998.
- [53] JENSEN, S. M., The nonlinear coherent coupler, IEEE J. Quantum Electron., Vol QE-18, pp. 1580-1583, 1982.
- [54] NOBREGA, K. Z. and SOMBRA, A. S. B., Optimum self phase modulation profile for nonlinear transmission recovery in twin core optical couplers with loss, Opt. Comm., vol 151, pp. 31-34,1998.
- [55] CHEN, Y., and et al., Twin core nonlinear couplers with gain and loss, IEEE J. Quantum Electron. Vol 28, pp. 239-245, 1992.
- [56] PHAM, A. T. and BINH, L. N., All-optical directional coupler two-input operation, Int. Optoelectron., Vol.5, no 4, pp367-380, 1990.



- [57] Wilton B. de Fraga, Estudo do Desempenho do Acoplador Direcional Não Linear Duplo Assimétrico de Fibras Ópticas Operando Portas Lógicas, Dissertação de Mestrado ( 2006 ) - Departamento de Física, UFC.
- [58] José W. M. Menezes, Implementação de Portas Lógicas Ópticas com Acoplador Direcional Não Linear Triplo Planar Simétrico de Fibras Ópticas, Dissertação de Mestrado ( 2006 ) - Departamento de Física, UFC.
- [59] P.B. Hansen, A. Kloch, T. Aaker, and T. Rasmussen, *Opt. Commun.* 119, 178 (1995).
- [60] A. Hasegawa and F. Tappert, *Appl. Phys. Lett.* 23, 142 (1973)
- [61] L. F. Mollenauer, R. H. Stolen, and J. P. Gordon, *Phys. Rev. Lett.* 45, 1095 (1980)
- [62] L. F. Mollenauer, and K. Smith, *Opt. Lett.* 13, 675(1988).
- [63] Y. R. Shen, *Principles of Nonlinear Optics* (Wiley, New York, 1984), Chap. 1.
- [64] M. Schubert and B. Wilhelmi, , *Nonlinear Optics and Quantum Electronics* (Wiley, New York, 1986), Chap. 1.
- [65] P. N. Butcher and D. N. Cotter, *The Elements of Nonlinear Optics*(Cambridge university Press, cambridge, UK, 1990), Chap.h 2.
- [66] H. Sabert, L. Dong, and P. S. J. Russel, *Int. J. Optoelectron.* 7, 189 (1992).
- [67] J. Capmany, P. Muñoz, and D. Pastor, *IEEE J. Sel. Topcs Quantum Electron.* 5, 1392 (1999).
- [68] Y. Chen, A.W. Snyder, and D. J. Mitchell, *Electron. Lett.* 26, 77 (1990).
- [69] J. A. Fleck, J. R. Morris, and M. D. Feit, *appl. Phys.* 10, 129 (1976).
- [70] H. F. dos Santos, P. Z. Coura, Sócrates de O. Dantas, Paulo M. V. B. Barone, *Escola Brasileira de Estrutura Eletrônica* - 2003 1ª. edição, página 103.
- [71] W. Pitts, *Bul. Math. Biophys.*, 4 (1942) 121.
- [72] W. S. McCulloch e W. Pitts, *Bul. Math. Biophys.*, 3 (1943) 115.
- [73] L. B. Booker, D. E. Golberg e J. H. rolland, *Artif. Intell.*, 40 (1989) 235.

# Capítulo 4

## Apêndice

# Apêndice A

## 4.1 Abordagem Numérica Range Kutta

Os métodos de Runge e Kutta são dos mais antigos já utilizados para solucionar equações diferenciais. Todas as fórmulas do método são destinadas à resolução de

$$y' = f(x, y) \tag{4.1.1}$$

ou seja, procuram exprimir  $y_{i+1}$  em termos de  $y_i$  . Os métodos de Runge-Kutta admitem como forma genérica a seguinte expressão:

$$y_{i+1} = y_i + \sum_{j=1}^n a_j k_j \tag{4.1.2}$$

sendo  $m$  a ordem do método, os termos  $a_j$  constantes e os  $k_j$  produtos da amplitude do passo,  $h$ , pela função  $f(x, y)$ . O método de Runge - Kutta pode ser utilizado para obter soluções completas e precisas. O método de quarta ordem apresenta precisão de  $(h)^5$ . Este método pode ser usado para produzir soluções precisas de um conjunto de equações diferenciais de primeira ordem. A forma da equação de Runge-Kutta de quarta ordem é dada pela expressão:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_1 = hf(x_i, y_i) \\ K_2 = hf\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{K_1}{2}\right) \\ K_3 = hf\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{K_2}{2}\right) \\ K_4 = hf(x_i + h, y_i + K_3) \end{array} \right.$$

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4) \quad (4.1.3)$$

Um ponto importante que devemos resaltar quanto a este método de quarta ordem é que ele conduz à soluções bastante precisas, para um passo de amplitude relativamente grande, apesar de se tratar de um método de passo único.

Para conseguir as soluções de transmissão e as características de transmissão e chaveamento, utilizamos Runge-Kutta de quarta ordem.

## REFERÊNCIAS

- [1] PACITTI, T. and ATKINSON, C. P., Programação e métodos computacionais, editora Livros Técnicos e Científicos S.A., volume 2, 2<sup>a</sup> edição.
- [2] PREE, W. H. and TEUKOLSKKY, S.A., Computers in Phys. Vol. 6, n<sup>o</sup> 2, 1992.

# Apêndice B

## 4.2 Portas Lógicas

Os Blocos ou PORTAS LÓGICAS ( do inglês LOGIC GATES ) são circuitos que realizam operações lógicas. Passaremos agora a conhecer cinco blocos lógicos básicos e fundamentais, a partir dos quais, mediante associações, poderemos obter circuitos que realizem funções mais complexas. Estes blocos são os seguintes: OR, NOR, AND, NAND e NOT. Citamos os termos em inglês porque eles são muito usados quando se trata de circuitos digitais.

## 4.3 Os Circuitos NOT

Também conhecidos como INVERSORES, estes circuito invertem a condição existente à sua entrada. São portas de uma só entrada, portanto, o número de combinações possíveis ( número de linhas da tabela-verdade ) é  $2^1 = 2$ . O símbolo e a tabela-verdade da porta NOT são:

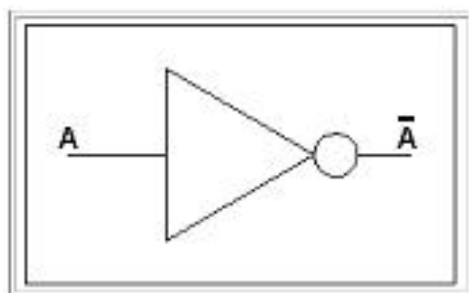


fig. 4.3.1: Símbolo gráfico NOT

A	$\bar{A}$
0	1
1	0

tabela 4.3.1 - Tabela verdade NOT

## 4.4 Os Circuitos AND

A porta lógica AND realiza uma operação lógica “AND” (“E”), que é uma multiplicação. Por isso, se A e B são suas entradas, na saída teremos o resultado de  $A \times B$  (também representado por  $A \cdot B$ ). A saída só terá nível lógico “1” se todos os sinais de entrada forem iguais a “1”. A figura 4.4.1 e a tabela 4.4.1 mostra o Símbolo gráfico e a tabela-verdade, respectivamente, da porta AND para duas entradas e uma saída.

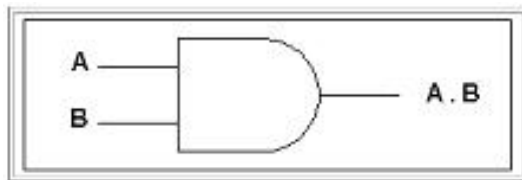


fig. 4.4.1: Símbolo gráfico AND

A	B	A . B
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

tabela 4.4.1 - tabela verdade AND

## 4.5 Os Circuitos NAND

Um circuito NAND é um AND com um NOT ligado à saída. Neste caso, a saída terá nível lógico “0” quando todos os sinais de entrada forem nível lógico “1”. A figura 4.5.1 e a tabela 4.5.1 mostra o Símbolo gráfico e a tabela-verdade, respectivamente, da porta NAND para duas entradas e uma saída.

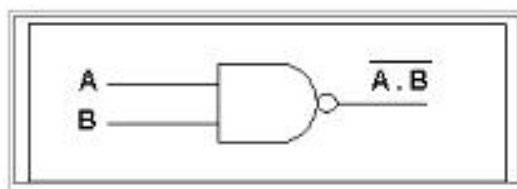


fig. 4.5.1: Símbolo gráfico NAND

A	B	A . B
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

tabela 4.5.1 - tabela verdade NAND

## 4.6 Os Circuitos OR

a porta lógica OR realiza uma operação lógica “ OR ” ( “ OU ” ), que é uma adição. Por isso, basta que uma das entradas seja nível lógico “ 1 ” para que a saída seja nível lógico 1. A figura 4.6.1 e a tabela 4.6.1 mostra o Símbolo gráfico e a tabela-verdade, respectivamente, da porta OR para duas entradas e uma saída.

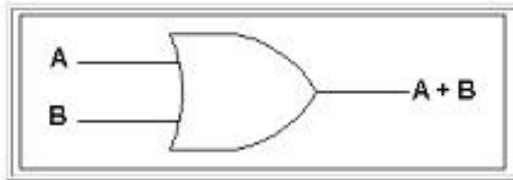


fig. 4.6.1: Símbolo gráfico OR

A	B	A+B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

tabela 4.6.1 - tabela verdade OR

## 4.7 Os Circuitos NOR

Para os circuitos NOR basta que uma das entradas seja nível lógico 1 para que a saída seja nível lógico 0. A figura 4.7.1 e a tabela 4.7.1 mostra o Símbolo gráfico e a tabela-verdade, respectivamente, da porta NOR para duas entradas e uma saída.

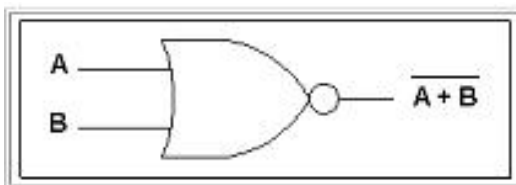


fig. 4.7.1: Símbolo gráfico NOR

A	B	$\overline{A+B}$
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

tabela 4.7.1 - tabela verdade NOR

## 4.8 Os Circuitos XOR

Muito embora este bloco possa ser considerado, como os cinco anteriores, de fundamental importância, preferiu-se deixá-lo separado, pois temos aqui o primeiro exemplo de associação de blocos de uma maneira um pouco mais completa, para formar um circuito lógico. Consideraremos a seguinte função lógica, ou em outras palavras, consideraremos a seguinte relação entre as variáveis A e B:

$$C = A.\bar{B} + \bar{A}.B$$

A saída “ C ” é uma soma de dois produtos: o da variável A pelo complemento de B, e o de B pelo complemento A. Esta função recebe o nome de EXCLUSIVE OR. É fácil notar que a característica desta porta é dar “ 1 ” na saída, quando as entradas estiverem com níveis lógicos diferentes. A figura 4.8.1 e a tabela 4.8.1 mostra o Símbolo gráfico e a tabela-verdade, respectivamente, da porta XOR para duas entradas e uma saída.

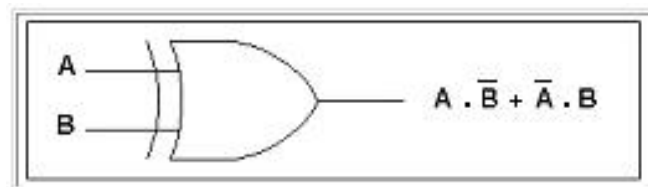


fig. 4.8.1: Símbolo gráfico XOR

A	B	XOR
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

tabela 4.8.1 - tabela verdade XOR



## 4.9 Os Circuitos XNOR

A porta XNOR produz uma saída que é o inverso da saída na porta XOR, neste caso, sua saída será nível lógico “ 1 ” quando as entradas forem iguais. Para esta porta, consideraremos a seguinte função lógica, ou em outras palavras, consideraremos a seguinte relação entre as variáveis A e B:

$$C = \overline{A \cdot B} + \overline{\overline{A} \cdot \overline{B}}$$

A saída “ C ” é o inverso da XOR. É fácil notar que a função desta porta é produzir saída “ 1 ” quando suas entradas forem iguais. Esta função recebe o nome de EXCLUSIVE NOR. A figura 4.9.1 e a tabela 4.9.1 mostra o Símbolo gráfico e a tabela-verdade, respectivamente, da porta XNOR para duas entradas e uma saída.

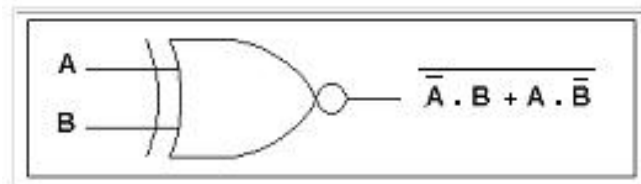


fig. 4.9.1: Símbolo gráfico XNOR

A	B	XNOR
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

tabela 4.9.1 - tabela verdade XOR

# Apêndice C

## 4.10 Trabalhos Decorrentes

### 4.10.1 Conferências Nacionais

a) Estudo Numérico de Acopladores Direcionais Não Lineares Assimétricos com Perfil de Dispersão Aplicados na Implementação de Portas Lógicas Totalmente Ópticas.

José Silva de Almeida, José W. M. Menezes, Alisson da C. Ferreira, W. B. de Fraga e Antônio S. B. Sombra(orientador)

VI Encontro de Pesquisa e Pós-Graduação do CEFETCE.

Fortaleza, 23 a 25 de Agosto de 2006.

b) Estudo Numérico de Acopladores Direcionais Não Lineares Assimétricos com Perfil Dispersivo Operando Portas Lógicas Totalmente Ópticas.

José Silva de Almeida, José W. M. Menezes, Alisson da C. Ferreira, Márcio Gomes da Silva e Antônio S. B. Sombra(orientador)

VI Encontro de Pós-Graduação e Pesquisa - UNIFOR.

Fortaleza, 16 a 21 de Outubro de 2006.

c) Simulação de Portas Lógicas em Análise Numérica de Acopladores Duplos Assimétricos com Perfis de Dispersão.

José Silva de Almeida, José W. M. Menezes, Alisson da C. Ferreira, A. F. de Moraes Neto, W. B. de Fraga, Márcio Gomes da Silva e Antônio S. B. Sombra(orientador)

XXIV Encontro de Físicos do Norte e Nordeste - João Pessoa-PB.

Fortaleza, 25 a 27 de Outubro de 2006

d) Analysis Switching and Crosstalk of Soliton in Inhomogeneous Dispersion Decreasing Fiber Couplers.

A. W. Lima Jr., J. S. de Almeida, W. B. de Fraga, J. W. Menezes, A. S. B. Sombra and M. G. da Silva

XXII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES - SBRT 05, 04-08 DE SETEMBRO DE 2005 - CAMPINAS, SP.

#### 4.10.2 Premiações

a) Menção Honrosa Pela Apresentação de Trabalho “ Estudo Numérico de Acopladores Direcionais Não Lineares Assimétricos com Perfil de Dispersão Aplicados na Implementação de Portas Lógicas Totalmente Ópticas ”.

José Silva de Almeida, José W. M. Menezes, Alisson da C. Ferreira, W. B. de Fraga e Antônio S. B. Sombra(orientador)

VI Encontro de Pesquisa e Pós-Graduação do CEFETCE.

Fortaleza, 25 de Agosto de 2006.

#### 4.10.3 Artigos Submetidos

*All-Optical Logic Gates Based in Asymmetric Couplers: Numerical Analysis*

J. S. de Almeida, J. W. M. Menezes, W. B. Fraga, J. C. Sales(1), A. da C. Ferreira, S. P. Marciano, A. F. G. F. Filho, A. F. de Moraes Neto, M. G. da Silva, A. S. B. Sombra  
**Submetido ao FIBER AND INTEGRATED OPTICS** (dezembro 2006)