

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**DEMULTIPLEXADOR ÓPTICO TEMPORAL
BASEADO EM ANEL ÓPTICO NÃO-LINEAR**

MÁRCIO FERREIRA BARROS

José Ewerton Pombo de Farias
Orientador

Maria Izabel Cavalcanti Cabral
Orientadora

Campina Grande, Maio de 2003.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA

DEMULPLEXADOR ÓPTICO TEMPORAL BASEADO EM ANEL ÓPTICO NÃO-LINEAR

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Informática da Universidade Federal de Campina Grande – Campus I, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Informática.

Área de Concentração: Ciência da Computação
Linha de Pesquisa: Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos

MÁRCIO FERREIRA BARROS

José Ewerton Pombo de Farias
Orientador

Maria Izabel Cavalcanti Cabral
Orientadora

Campina Grande, Maio de 2003.

BARROS, Márcio Ferreira

B277D

Demultiplexador Óptico Temporal Baseado em Anel Óptico Não-Linear

Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Coordenação de Pós Graduação em Informática,

Campina Grande, Maio de 2003.

116 p. Il.

Orientador: José Ewerton Pombo de Farias

Maria Izabel Cavalcanti Cabral

Palavras-chaves:

1. Redes Ópticas
2. Simulação Digital
3. Redes OTDM
4. Demultiplexador Óptico OTDM

CDU – 621.391

*Este trabalho é dedicado
a meus pais: Manoel e Rosinete e
irmãs: Márcia e Mônica.*

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por ter permitido a realização deste trabalho.

A meus familiares e, em especial, aos meus pais, Manoel e Rosinete e irmãs, Márcia e Mônica, pelo apoio e incentivo que a mim dedicaram. Mesmo à distância, o apoio de vocês foi muito importante.

De forma muito especial a meus orientadores, o Professor José Ewerton Pombo de Farias e a Professora Maria Izabel Cavalcanti Cabral, pela paciência, confiança, compreensão, dedicação e seriedade com os quais conduziram este trabalho.

Aos meus amigos de mestrado pelos momentos agradáveis e pelas trocas de conhecimentos, em especial a Pedro, com quem dividi apartamento durante o primeiro ano, a Flávio pela cumplicidade e experiência que me fora transferida e a todos os demais colegas de mestrado.

Aos amigos e amigas que fiz nestes dois anos, em especial a Alex, Ana Maria, Eduardo, Fabinho, George, Jadsonlee e Mattson, pela descontração, apoio, amizade e incentivo a mim dispensados.

Aos que fazem o Laboratório de Comunicações (LABCOM), Edmar, Waslo, Alyntho, Portela, Felipe, Gonzaga e Ronaldo pelo companheirismo e pela força que recebi durante todo o tempo em que dividimos este espaço.

Aos funcionários do DSC e da COPIN, em especial a Aninha, Vera e Zeneide pela sua colaboração e por atenderem de imediato todas às vezes em que precisei de seus serviços.

Enfim, obrigado a todos que de alguma forma me ajudaram e me inspiraram para a conclusão deste trabalho, sem vocês, tenho certeza que o caminho teria sido muito mais longo e doloroso.

Resumo

Redes Ópticas são redes de alta-velocidade, baseadas em componentes fotônicos capazes de realizar roteamento, multiplexação e restauração ao nível de comprimentos de onda ou de serviços baseados em comprimentos de onda. Os atuais avanços nas pesquisas de redes ópticas conduzem ao desenvolvimento de redes totalmente ópticas, pelo desenvolvimento de novos componentes, dentre os quais destacam-se os demultiplexadores ópticos que, quando mal projetados, são responsáveis pela degeneração do sistema. Esses novos componentes são essenciais em projetos de redes totalmente ópticas, imunes ao conhecido gargalo eletrônico. O conhecimento mais detalhado de modelos de redes ópticas e a elaboração de novos projetos exigem estudos e análise de desempenho destas redes. A técnica da Simulação Digital é geralmente utilizada para viabilizar estes estudos e análises. Este trabalho teve como objetivos projetar e implementar em software uma secção demultiplexadora totalmente óptica usando Multiplexação por Divisão do Tempo (TDM - *Time Division Multiplexing*). Para alcançar esses objetivos, um modelo de um demultiplexador OTDM baseado em um Anel Óptico Não-Linear (NOLM – *Nonlinear Optical Loop Mirror*) que tem o Amplificador Óptico a Semicondutor (SOA – *Semiconductor Optical Amplifier*) como gerador de não-linearidade foi simulado no ambiente *VPITransmissionMaker*. O modelo simulado pode ser naturalmente adaptável aos modelos de redes totalmente ópticas por não utilizar dispositivos eletro-eletrônicos. Nos estudos de simulação realizados, o comportamento do demultiplexador OTDM é analisado considerando a recuperação de pulsos nos formatos gaussianos e solitônicos e as variações (i) da diferença da frequência central entre os sinais multiplexados e de controle; (ii) da duração dos pulsos ópticos utilizados, (iii) do fator de acoplamento entre o sinal multiplexado e o NOLM, e (iv) da potência do sinal multiplexado. Foram feitas análises de taxa de erro de bit (BER - *Bit Error Rate*), dos canais recuperados, em todas as situações, com a apresentação numérica dos resultados de BER.

Abstract

Optical networks are high-speed networks, comprised of photonics devices, capable of performing traffic routing, multiplexing and restoration, both at wavelength and service level. An optical network provides a common infrastructure over which a variety of services can be delivered. Its importance is due, primarily, to the removal of the well-known “electronic bottleneck”. The enormous capacities made possible by the use of optical networks are crucial for the continuous development of applications requiring ever increasing bandwidths. The research efforts now being carried out in the field of optical networks aim at “transparent networks” (all optical networks), for which several photonics components are important. Among them are the “all optical demultiplexers”, the main subject of this Dissertation.

Digital simulation is commonly used as a tool for designing and performance analysis of optical networks. The main objective of the work reported herein was to design and implement an optical demultiplexing section to extract channel(s) of an optical time division multiplexing (OTDM) signal. A model of an optical time division demultiplexer based on a nonlinear optical loop mirror (NOLM) has been implemented using the VPItransmissionMaker environment. To introduce the necessary nonlinearity in the optical loop, a semiconductor optical amplifier (SOA) has been used. The simulated model is totally optical, therefore suitable as an element of an all-optical network. The model obtained has been tested under several operational conditions, among them: (i) varying optical frequency difference between the multiplexed signal and the control signal; (ii) different optical pulses duration; (iii) different coupling ratios for the optical coupler at the input of the loop, and (iv) different peak powers for the pulses comprising the input multiplexed signal. For each case the bit error rate (BER) of a chosen recovered channel has been evaluated. Numerical results of the BER are presented.

Sumário

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
SUMÁRIO	iii
LISTA DE FÍGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	x
SIGLAS	xi
INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	3
1.1.1 <i>Objetivos Gerais</i>	3
1.1.2 <i>Objetivos Específicos</i>	3
1.2 RELEVÂNCIA	4
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	4
SIMULAÇÃO DIGITAL	6
2.1 INTRODUÇÃO	6
2.2 SIMULAÇÃO	6
2.3 PROCESSO DE SIMULAÇÃO	7
2.4 SIMULAÇÃO DE MODELOS	9
2.5 AUTOMATIZAÇÃO DE PROJETOS FOTÔNICOS	9
2.5.1 <i>Gerações de Ferramentas de Automação de Projetos Fotônicos</i>	10
2.6 FERRAMENTAS DE AUTOMATIZAÇÃO DE PROJETOS FOTÔNICOS	10
2.6.1 <i>CPqD Simulação Óptica</i>	10
2.6.2 <i>VPItransmissionMaker</i>	11
2.6.3 <i>OPNET – Optimum Network Performance</i>	12
TRANSMISSÃO ÓPTICA	13
3.1 INTRODUÇÃO	13
3.2 PERSPECTIVA HISTÓRICA	14
3.3 TRANSMISSÃO EM MEIO ÓPTICO	17
3.3.1 <i>Fibras Ópticas</i>	17
3.3.2 <i>Transmissão</i>	18
3.4 FATORES LIMITANTES ÀS TRANSMISSÕES ÓPTICAS	20
3.4.1 <i>Efeitos Lineares</i>	20
3.4.2 <i>Efeitos Não-Lineares</i>	21
3.5 COMPONENTES ÓPTICOS	21
3.5.1 <i>Laser</i>	21
3.5.2 <i>Acopladores</i>	22
3.5.3 <i>Filtros Ópticos</i>	23
3.5.4 <i>Amplificadores Ópticos</i>	23
TÉCNICAS DE MULTIPLEXAÇÃO	25
4.1 MULTIPLEXAÇÃO POR DIVISÃO EM COMPRIMENTOS DE ONDA (WDM)	26
4.1.1 <i>Introdução</i>	26

4.1.2 Componentes WDM.....	29
4.1.3 Tendências nas Pesquisas em WDM	39
4.1.4 Integração a outras Arquiteturas de Redes	44
4.2 MULTIPLEXAÇÃO ÓPTICA TEMPORIZADA (OTDM)	48
4.2.1 Princípio.....	48
DEMULTIPLEXADO ÓPTICO TEMPORAL BASEADO EM ANEL NÃO-LINEAR	50
5.1 INTERFERÔMETRO DE SAGNAC	50
5.2 ANEL REFLETIVO NÃO-LINEAR (NOLM)	55
5.3 DEMULTIPLEXADOR BASEADO NO NOLM	56
MONTAGEM E CONFIGURAÇÃO DO DEMULTIPLEXADOR OTDM	59
6.1 MODELO DO DEMULTIPLEXADOR OTDM	59
6.2 MONTAGEM	61
6.2.1 Geração	63
6.2.2 Multiplexação	63
6.2.3 Demultiplexação	64
6.2.4 Componentes de Recepção	65
6.3 CONFIGURAÇÃO	65
ANÁLISE DOS RESULTADOS	67
7.1 GERAÇÃO E EVOLUÇÃO DOS PULSOS ATRAVÉS DO SISTEMA	67
7.2 FORMATOS DE PULSO GAUSSIANO E SOLITÔNICO	69
7.2.1 Pulsos Gaussianos.....	70
7.2.2 Pulsos Solitônicos.....	70
7.3 ANÁLISE DA DIFERENÇA DA FREQUÊNCIA CENTRAL ENTRE OS SINAIS MULTIPLEXADOS E DE CONTROLE	71
7.3.1 Mesma Frequência	72
7.3.2 Diferença de 500 GHz entre o sinal multiplexado e o de controle	72
7.4 LARGURA FWHM	73
7.5 RELAÇÃO DE ACOPLAMENTO NO NOLM	75
7.5.1 Relação de Acoplamento Nula.....	77
7.5.3 Relação de Acoplamento de 50%	77
7.5.5 Relação de Acoplamento de 100%	78
7.6 ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA POTÊNCIA DO SINAL MULTIPLEXADO	78
7.6.1 Potência de 0,43 mW	79
7.6.2 Potência de 1,36 mW	80
7.6.3 Potência de 4,30 mW	80
7.6.4 Potência de 13,70 mW	80
CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	81
APÊNDICE A - TAXA DE ERRO DE BIT	84
A.1 - ANALISADOR DE TAXA DE ERRO DE BIT	85
APÊNDICE B - AMPLIFICADOR ÓPTICO A SEMICONDUTOR	87
APÊNDICE C - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES	89
C.1 - FORMATOS DE PULSO GAUSSIANO E SOLITÔNICO	89
C.1.1 - Pulsos Gaussianos.....	89
C.1.2- Pulsos Solitônicos.....	90
C.2 - DIFERÊNCIA DA FREQUÊNCIA CENTRAL ENTRE OS SINAIS MULTIPLEXADOS E DE CONTROLE	92
C.2.1 - Mesma Frequência	92

C.2.2 - Diferença de 500 GHz entre o Sinal Multiplexado e o de Controle	93
C.3 - LARGURA FWHM	95
C.3.1 - Largura FWHM Ocupando 10% da Janela de Tempo.....	95
C.3.2 - Largura FWHM Ocupando 20% da Janela de Tempo.....	96
C.3.3 - Largura FWHM Ocupando 30% da Janela de Tempo.....	97
C.3.4 - Largura FWHM Ocupando 40% da Janela de Tempo.....	98
C.3.5 - Largura FWHM Ocupando 50% da Janela de Tempo.....	99
C.4 - RELAÇÃO DE ACOPLAMENTO NO NOLM	101
C.4.1 - Relação de Acoplamento Nula	101
C.4.2 - Relação de Acoplamento de 25%	102
C.4.3 - Relação de Acoplamento de 50%	103
C.4.4 - Relação de Acoplamento de 75%	104
C.4.5 - Relação de Acoplamento de 100%	105
C.5 - ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA POTÊNCIA DO SINAL MULTIPLEXADO	107
C.5.1 - Potência de 0,43 mW.....	107
C.5.2 - Potência de 1,36 mW.....	108
C.5.3 - Potência de 4,30 mW.....	109
C.5.4 - Potência de 13,70 mW.....	110
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112

Lista de Figuras

<i>Figura 3.1 – Telegrafo óptico de Claude Chappe.</i>	15
<i>Figura 3.2 – Configuração do experimento de John Tyndall.</i>	16
<i>Figura 3.3 – Leis da reflexão e refração.</i>	18
<i>Figura 3.4 – Cone de aceitação de uma fibra.</i>	20
<i>Figura 3.5 – Estrutura genérica de um laser.</i>	22
<i>Figura 3.6 – (a) Separador, (b) combinador e (c) acoplador.</i>	23
<i>Figura 3.7 – Esquema ilustrativo de um EDFA em dois estágios.</i>	24
<i>Figura 4.1 – Técnicas de multiplexação (a) multiplexação eletrônica ou óptica por divisão do tempo (b) multiplexação por divisão em comprimentos de onda.</i>	25
<i>Figura 4.2 – Região de atenuação da fibra óptica.</i>	27
<i>Figura 4.3 – Expansão de capacidade a longas distâncias.</i>	27
<i>Figura 4.4 – Elementos de comutação.</i>	30
<i>Figura 4.5 – Comutador amplificado 2 x 2.</i>	31
<i>Figura 4.6 – Estrela passiva 4 x 4.</i>	31
<i>Figura 4.7 – Roteador passivo 4 x 4 (4 comprimentos de onda)</i>	32
<i>Figura 4.8 – Comutador ativo 4 x 4 (quatro comprimentos de onda).</i>	33
<i>Figura 4.9 – Rede com 2 comutadores e 5 estações de acesso.</i>	34
<i>Figura 4.10 – Evolução da transmissão em fibras ópticas. De um enlace ponto-a-ponto a uma rede óptica.</i>	35
<i>Figura 4.11 – Multiplexador insere/deriva de comprimentos de onda (WADM).</i>	36
<i>Figura 4.12 – Camadas gerenciando a largura de banda.</i>	37
<i>Figura 4.13 – Pilha de protocolos desenvolvidos para a integração de IP sobre WDM.</i>	45
<i>Figura 4.14 – Camadas ATM/IP sobre SDH sobre WDM.</i>	46
<i>Figura 4.15 – Exemplo de rede SDH.</i>	47
<i>Figura 4.16 – Multiplexação OTDM.</i>	48
<i>Figura 4.17 – Demultiplexação OTDM.</i>	49
<i>Figura 5.1 – Interferômetro de Sagnac.</i>	51
<i>Figura 5.2 – Comportamento linear de um Interferômetro de Sagnac.</i>	52
<i>Figura 5.3 – Comportamento linear de um Interferômetro de Sagnac.</i>	58
<i>Figura 6.1 – Modelo do sistema.</i>	61
<i>Figura 6.2 – Montagem do demultiplexador OTDM baseado em Anel Óptico Não-Linear.</i>	62
<i>Figura 6.3 – Estrela representando combinador constituído de 7 acopladores 3dB. ...</i>	64
<i>Figura 6.4 – (a) 8 canais OTDM; (b) sinal de controle e (c) canal recuperado.</i>	66
<i>Figura 7.1 – Informação binária no formato gaussiano.</i>	68
<i>Figura 7.2 – Envelope do sinal de saída do laser contínuo.</i>	68
<i>Figura 7.3 – Sinal modulado em amplitude.</i>	68
<i>Figura 7.4 – Sinal modulado e com atraso.</i>	68
<i>Figura 7.5 – Diagrama de olho do canal transmitido.</i>	70
<i>Figura 7.6 – Diagrama de olho dos canais refletidos.</i>	70

Figura 7.7 – Diagrama de olho do canal transmitido.	70
Figura 7.8 – Diagrama de olho dos canais refletidos.....	70
Figura 7.9 – Diagrama de olho do canal transmitido.	72
Figura 7.10 – Diagrama de olho dos canais refletidos.....	72
Figura 7.11 – Diagrama de olho do canal transmitido.	72
Figura 7.12 – Diagrama de olho dos canais refletidos.....	72
Figura 7.13 – Sinal multiplexado, com largura FWHM ocupando 10% da janela de tempo.	74
Figura 7.14 – Sinal multiplexado, com largura FWHM ocupando 20% da janela de tempo.	74
Figura 7.15 – Sinal multiplexado, com largura FWHM ocupando 30% da janela de tempo.	75
Figura 7.16 – Sinal multiplexado, com largura FWHM ocupando 40% da janela de tempo Canal multiplexado.....	75
Figura 7.17 – Sinal multiplexado, com largura FWHM ocupando 50% da janela de tempo.	75
Figura 7.18 – Diagrama de olho do canal transmitido.	77
Figura 7.19 – Diagrama de olho dos canais refletidos.....	77
Figura 7.20 – Diagrama de olho do canal transmitido.	77
Figura 7.21 – Diagrama de olho dos canais refletidos.....	77
Figura 7.22 – Diagrama de olho do canal transmitido.	78
Figura 7.23 – Diagrama de olho dos canais refletidos.....	78
Figura 7.24 – Diagrama de olho do canal transmitido.	79
Figura 7.25 – Diagrama de olho do canal transmitido.	80
Figura 7.26 – Diagrama de olho dos canais refletidos.....	80
Figura 7.27 – Diagrama de olho do canal transmitido.	80
Figura 7.28 – Diagrama de olho dos canais refletidos.....	80
Figura 7.29 – Diagrama de olho do canal transmitido.	80
Figura 7.30 – Diagrama de olho dos canais refletidos.....	80
Figura B.1 – Aplicações típicas do SOA.	88
Figura C.1 – Sinal multiplexado.	89
Figura C.2 – Canal de controle.	89
Figura C.3 – Canal transmitido.	90
Figura C.4 – Diagrama de olho do canal transmitido.....	90
Figura C.5 – Canais refletidos.....	90
Figura C.6 – Diagrama de olho dos canais refletidos.....	90
Figura C.7 – Sinal multiplexado.	90
Figura C.8 – Canal de controle.	90
Figura C.9 – Canal transmitido.	91
Figura C.10 – Diagrama de olho do canal transmitido.....	91
Figura C.11 – Canais refletidos.....	91
Figura C.12 – Diagrama de olho dos canais refletidos.....	91
Figura C.13 – Sinal multiplexado.	92
Figura C.14 – Canal de controle.....	92
Figura C.15 – Canal transmitido.	92
Figura C.16 – Diagrama de olho do canal transmitido.....	92
Figura C.17 – Canais refletidos.....	93
Figura C.18 – Diagrama de olho dos canais refletidos.....	93
Figura C.19 – Sinal multiplexado.	93
Figura C.20 – Canal de controle.....	93

<i>Figura C.21 – Canal transmitido.</i>	93
<i>Figura C.22 – Diagrama de olho do canal transmitido.</i>	93
<i>Figura C.23 – Canais refletidos.</i>	94
<i>Figura C.24 – Diagrama de olho dos canais refletidos.</i>	94
<i>Figura C.25 – Sinal multiplexado.</i>	95
<i>Figura C.26 – Canal de controle.</i>	95
<i>Figura C.27 – Canais refletidos.</i>	95
<i>Figura C.28 – Diagrama de olho dos canais refletidos.</i>	95
<i>Figura C.29 – Canal transmitido.</i>	96
<i>Figura C.30 – Diagrama de olho do canal transmitido.</i>	96
<i>Figura C.31 – Sinal multiplexado.</i>	96
<i>Figura C.32 – Canal de controle.</i>	96
<i>Figura C.33 – Canais refletidos.</i>	96
<i>Figura C.34 – Diagrama de olho dos canais refletidos.</i>	96
<i>Figura C.35 – Canal transmitido.</i>	97
<i>Figura C.36 – Diagrama de olho do canal transmitido.</i>	97
<i>Figura C.37 – Sinal multiplexado.</i>	97
<i>Figura C.38 – Canal de controle.</i>	97
<i>Figura C.39 – Canais refletidos.</i>	97
<i>Figura C.40 – Diagrama de olho dos canais refletidos.</i>	97
<i>Figura C.41 – Canal transmitido.</i>	98
<i>Figura C.42 – Diagrama de olho do canal transmitido.</i>	98
<i>Figura C.43 – Sinal multiplexado.</i>	98
<i>Figura C.44 – Canal de controle.</i>	98
<i>Figura C.45 – Canais refletidos.</i>	98
<i>Figura C.46 – Diagrama de olho dos canais refletidos.</i>	98
<i>Figura C.47 – Canal transmitido.</i>	99
<i>Figura C.48 – Diagrama de olho do canal transmitido.</i>	99
<i>Figura C.49 – Sinal multiplexado.</i>	99
<i>Figura C.50 – Canal de controle.</i>	99
<i>Figura C.51 – Canais refletidos.</i>	99
<i>Figura C.52 – Diagrama de olho dos canais refletidos.</i>	99
<i>Figura C.53 – Canal transmitido.</i>	100
<i>Figura C.54 – Diagrama de olho do canal transmitido.</i>	100
<i>Figura C.55 – Sinal multiplexado.</i>	101
<i>Figura C.56 – Canal de controle.</i>	101
<i>Figura C.57 – Canal transmitido.</i>	101
<i>Figura C.58 – Diagrama de olho do canal transmitido.</i>	101
<i>Figura C.59 – Canais refletidos.</i>	102
<i>Figura C.60 – Diagrama de olho dos canais refletidos.</i>	102
<i>Figura C.61 – Sinal multiplexado.</i>	102
<i>Figura C.62 – Canal de controle.</i>	102
<i>Figura C.63 – Canal transmitido.</i>	102
<i>Figura C.64 – Diagrama de olho do canal transmitido.</i>	102
<i>Figura C.65 – Canais refletidos.</i>	103
<i>Figura C.66 – Diagrama de olho dos canais refletidos.</i>	103
<i>Figura C.67 – Sinal multiplexado.</i>	103
<i>Figura C.68 – Canal de controle.</i>	103
<i>Figura C.69 – Canal transmitido.</i>	103
<i>Figura C.70 – Diagrama de olho do canal transmitido.</i>	103

<i>Figura C.71 – Canais refletidos.</i>	104
<i>Figura C.72 – Diagrama de olho dos canais refletidos.</i>	104
<i>Figura C.73 – Sinal multiplexado.</i>	104
<i>Figura C.74 – Canal de controle.</i>	104
<i>Figura C.75 – Canal transmitido.</i>	104
<i>Figura C.76 – Diagrama de olho do canal transmitido.</i>	104
<i>Figura C.77 – Canais refletidos.</i>	105
<i>Figura C.78 – Diagrama de olho dos canais refletidos.</i>	105
<i>Figura C.79 – Sinal multiplexado.</i>	105
<i>Figura C.80 – Canal de controle.</i>	105
<i>Figura C.81 – Canal transmitido.</i>	105
<i>Figura C.82 – Diagrama de olho do canal transmitido.</i>	105
<i>Figura C.83 – Canais refletidos.</i>	106
<i>Figura C.84 – Diagrama de olho dos canais refletidos.</i>	106
<i>Figura C.85 – Sinal multiplexado.</i>	107
<i>Figura C.86 – Canal de controle.</i>	107
<i>Figura C.87 – Canais refletidos.</i>	107
<i>Figura C.88 – Canal transmitido.</i>	107
<i>Figura C.89 – Diagrama de olho do canal transmitido.</i>	108
<i>Figura C.90 – Sinal multiplexado.</i>	108
<i>Figura C.91 – Canal de controle.</i>	108
<i>Figura C.92 – Canal transmitido.</i>	108
<i>Figura C.93 – Diagrama de olho do canal transmitido.</i>	108
<i>Figura C.94 – Canais refletidos.</i>	109
<i>Figura C.95 – Diagrama de olho dos canais refletidos.</i>	109
<i>Figura C.96 – Sinal multiplexado.</i>	109
<i>Figura C.97 – Canal de controle.</i>	109
<i>Figura C.98 – Canais refletidos.</i>	109
<i>Figura C.99 – Diagrama de olho dos canais refletidos.</i>	109
<i>Figura C.100 – Canal transmitido.</i>	110
<i>Figura C.101 – Diagrama de olho do canal transmitido.</i>	110
<i>Figura C.102 – Sinal multiplexado.</i>	110
<i>Figura C.103 – Canal de controle.</i>	110
<i>Figura C.104 – Canais refletidos.</i>	110
<i>Figura C.105 – Diagrama de olho dos canais refletidos.</i>	110
<i>Figura C.106 – Canal transmitido.</i>	111
<i>Figura C.107 – Diagrama de olho do canal transmitido.</i>	111

Lista de Tabelas

<i>Tabela 4.1: Distribuição por comprimentos de onda.</i>	29
<i>Tabela 4.2: Distribuição de comprimentos de onda para espaçamentos de 12.5, 25.0, 50.0 e 100,0 GHz.</i>	44
<i>Tabela 4.3: Distribuição do tamanho dos pacotes em backbones Internet.</i>	48
<i>Tabela 4.4: Percentagem o overhead inserido pelas camadas SDH e ATM.</i>	48
<i>Tabela 7.1: Parâmetros para a geração de pulsos ópticos.</i>	68
<i>Tabela 7.2: Parâmetros de configuração para a obtenção de pulsos nos formatos gaussiano e solitônicos.</i>	69
<i>Tabela 7.3: Taxas de erro obtidas para pulsos nos formatos gaussiano e solitônicos.</i>	69
<i>Tabela 7.4: Parâmetros de configuração para a análise da diferença da frequência central entre os sinais multiplexados e de controle.</i>	71
<i>Tabela 7.5: Taxas de erro obtidas para diferentes valores da frequência central entre os sinais multiplexados e de controle.</i>	72
<i>Tabela 7.6: Parâmetros de configuração para a análise da largura FWHM.</i>	73
<i>Tabela 7.7: Taxas de erro obtidas em diferentes larguras FWHM.</i>	74
<i>Tabela 7.8: Parâmetros de configuração para a análise da relação de acoplamento no NOLM.</i>	76
<i>Tabela 7.9: Taxas de erro obtidas em diferentes relações de acoplamento no NOLM</i>	76
<i>Tabela 7.10: Parâmetros de configuração para a análise da variação da potência do sinal multiplexado.</i>	78
<i>Tabela 7.11 Taxas de erro obtidas em diferentes potências do sinal multiplexado.</i>	79
<i>Tabela 8.1: Estudo comparativo entre o TOAD e outras quatro implementações de demultiplexadores OTDM.</i>	81
<i>Tabela B.1 Comparação das principais características entre OFA e SOA.</i>	88

Siglas

- **OFA** – Amplificadores em Fibra Óptica (*Optical Fiber Amplifier*)
- **AM** - Modulador em Amplitude (*Amplitude Modulation*)
- **ATM** - Modo de Transferência Assíncrono (*Asynchronous Transfer Mode*)
- **BER** - Taxa de Erro de Bit (*Bit Error Rate*)
- **DWDM** - Multiplexação Densa por Comprimento de Onda (*Dense Wavelength Division Multiplexing*)
- **EDFA** - Amplificadores Fibra Dopada com Érbio (*Erbium-Doped Fiber Amplifiers*)
- **FDM** - Multiplexação por Divisão em Frequência (*Frequency Division Multiplexing*)
- **FWHM** - Largura dos Pulsos (*Full Width at Half Maximum*)
- **IP** - Protocolo Internet (*Internet Protocol*)
- **ITU-TS** – Setor de Padronização da União Internacional das Telecomunicações (*Standardization Sector of International Telecommunication Union*)
- **LASER** - Amplificador de Luz por Emissão Estimulada de Radiação (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*)
- **NLWG** - Guia de ondas não-lineares (*Nonlinear Waveguide*)
- **NOLM** - Anel Óptico Não-Linear (*Nonlinear Optical Loop Mirror*)
- **OADM** - Multiplexadores Ópticos Insere/Deriva (*Optical Add/Drop Multiplexer*)
- **OTDM** - Multiplexação Óptica por Divisão do Tempo (*Optical Time Division Multiplexing*).
- **OXC** - Conectores Ópticos Cruzados (*Optical Cross Connect*)
- **PDA** - Ferramentas de Automação de Projetos Fotônicos (*Photonic Design Automation*)
- **SDH** - Hierarquia Digital Síncrona (*Synchronous Digital Hierarchy*)
- **SOA** - Amplificador Óptico a Semicondutor (*Semiconductor Optical Amplifier*)
- **SONET** - Rede Óptica Síncrona (*Synchronous Optical Network*)
- **SPM** - Automodulação de Fase (*Self-Phase Modulation*)
- **TDM** - Multiplexação por Divisão do Tempo (*Time Division Multiplexing*)
- **TOAD** - Demultiplexador Terahertz Assimétrico (*Terahertz Optical Asymmetric Demultiplexer*)
- **UNI** - Interferômetro Não-linear ultra-rápido (*Ultrafast Nonlinear Interferometer*)
- **WADM** - Multiplexadores Insere/Deriva por Comprimento de Onda (*Wavelength Add/Drop Multiplexer*)
- **WDM** - Multiplexação por Divisão em Comprimentos de Onda (*Wavelength Division Multiplexing*)
- **XPM** - Modulação de Fase Cruzada (*Cross-Phase Modulation*)

Capítulo 1

Introdução

Redes Ópticas são redes de alta-velocidade, baseadas em componentes fotônicos capazes de realizar roteamento, multiplexação e restauração ao nível de comprimento de onda ou de serviços baseados em comprimento de onda [Alcatel02]. Esta arquitetura deve sua importância, principalmente, ao conhecido “gargalo eletrônico” e a seu potencial teórico de tráfego estimado em 100 Tbps por fibra óptica [Mitra02]. Tal capacidade de transmissão é imprescindível para o contínuo desenvolvimento de aplicações que necessitam de grandes larguras de faixa e que só serão alcançadas pelo uso dessas tecnologias.

Estima-se que o fluxo de informações que trafegam pelas redes de telecomunicações, principalmente dados, dobre a cada ano. Estimativas indicaram um fluxo de 35 Tbps em 2001 e se espera para 2005 que estas taxas sejam da ordem de 280 Tbps [Anderson99]. Este crescimento acentuado de tráfego é responsável pela correlação entre redução de custos e pelos avanços tecnológicos que se sucedem continuamente [Ramaswami01] e pela implantação de novas fibras devido à crescente demanda por largura de banda.

Os desenvolvimentos mais recentes de componentes e padrões de transmissão foram os principais responsáveis pela viabilização da tecnologia por permitirem o compartilhamento de um único canal físico (fibra óptica) por até algumas centenas de usuários distintos transmitindo, cada um deles, de 10 a 40 Gbps, segundo padrões ou velocidades específicas [Chraplyvy99,Alferness00]. Esta expansão de utilização da

largura de faixa intrínseca à fibra é possível graças às tecnologias de multiplexação tais como a Multiplexação por Divisão em Comprimentos de Onda (WDM - *Wavelength Division Multiplexing*) [Mujherjee00] e a Multiplexação Óptica por Divisão do Tempo (OTDM – *Optical Time Division Multiplexing*).

Um ponto importante desta tecnologia é a sua capacidade de integração com as arquiteturas Rede Óptica Síncrona (*SONET – Synchronous Optical Network*)/Hierarquia Digital Síncrona (*SDH – Synchronous Digital Hierarchy*), Modo de Transferência Assíncrono (*ATM – Asynchronous Transfer Mode*) e Protocolo Internet (*IP – Internet Protocol*) [Kartalopoulos99,Ghani00], por meio de interfaces, que permitem o gerenciamento de qualidade de serviço, planejamento de tráfego, flexibilidade de roteamento e alinhamento de tráfego, gerenciamento da largura de banda, canais ativos, detecção e restauração de falhas. Permitindo, ainda, o aproveitamento de equipamentos desenvolvidos para estas arquiteturas.

Os atuais avanços nas pesquisas conduzem ao desenvolvimento de redes totalmente ópticas, pelo desenvolvimento de novos componentes, dentre os quais destacam-se os demultiplexadores ópticos que, quando mal projetados, são responsáveis pela degeneração do sistema. Esses novos componentes são essenciais em projetos de redes totalmente ópticas, imunes ao conhecido “gargalo eletrônico”.

O conhecimento mais detalhado de modelos de redes ópticas e a elaboração de novos projetos exigem estudos e análise de desempenho destas redes. A técnica da Simulação Digital [Kelton98] é geralmente utilizada para viabilizar estes estudos e análises.

Modelos de simulação que representam sistemas de redes de computadores podem ser construídos usando linguagens de programação de propósito geral (exemplos, *C*, *C++*, *Java*, etc.), linguagens de propósito específico (exemplos, *SIMSCRIPT* [CACI03], *SLAM* [Pegden81], *SIMAN* [Pegden83]) ou usando ambientes de simulação de alto nível (exemplos: *VPItransmissionMaker* [VPI01], *CPqD Simulação Óptica* [CPqD02], *OPNET* [OPNET02]). Os ambientes de simulação de alto nível geralmente são intuitivos e exigem menos carga de trabalho para a construção dos modelos a serem simulados, além de possuírem, na maioria das vezes, interfaces mais amigáveis para o usuário.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos Gerais

Este trabalho teve como objetivos projetar e implementar em software uma secção demultiplexadora totalmente óptica usando Multiplexação por Divisão do Tempo (TDM - *Time Division Multiplexing*), buscando-se suprir a carência de implementações de demultiplexadores OTDM em ambientes de simulação de alto nível.

Para alcançar esses objetivos, um modelo de demultiplexador OTDM baseado em um Anel Óptico Não-Linear (NOLM – *Nonlinear Optical Loop Mirror*) [Uchiyama97], que tem o Amplificador Óptico a Semicondutor (SOA – *Semiconductor Optical Amplifier*) [Connelly02] como gerador de não-linearidade, foi simulado no ambiente *VPItransmissionMaker*.

O modelo simulado é amplamente estudado por publicações especializadas e é adaptável aos modelos de redes totalmente ópticas por não utilizar dispositivos eletro-eletrônicos. Nos estudos de simulação realizados, analisou-se o comportamento do demultiplexador OTDM mediante variação da diferença de frequência central entre os sinais multiplexados e de controle, variação da Largura dos Pulsos (FWHM - *Full Width at Half Maximum*), variação da relação de acoplamento entre o sinal multiplexado e o NOLM, e variação da potência do sinal multiplexado. Em todas as situações, foi analisada a BER, dos canais recuperados, com a apresentação numérica dos resultados.

1.1.2 Objetivos Específicos

- ✓ Estudar as tecnologias fotônicas (fibras, dispositivos e protocolos), com ênfase em sistemas OTDM;
- ✓ Estudar a técnica da Simulação Digital e avaliar as ferramentas disponíveis para a simulação de redes ópticas;
- ✓ Projetar e implementar um demultiplexador OTDM baseado em um Anel Óptico Não-Linear, que tem o Amplificador Óptico a Semicondutor como gerador de não-linearidade, e
- ✓ Analisar a recepção de pulsos ópticos com/sem a inclusão do demultiplexador na rede óptica simulada.

1.2 Relevância

O conhecimento mais detalhado de modelos de redes ópticas e a elaboração de novos projetos exigem estudos e análise de desempenho. A técnica da Simulação Digital é geralmente utilizada para viabilizar estes estudos e análises.

Poucos são os ambientes de simulação que se voltam para a modelagem de redes ópticas, entre eles, pode-se destacar o *VPItransmissionMaker*, *CPqD Simulação Óptica* e o *OPNET*. Muitas questões referentes à tecnologia fotônica necessitam de estudos aprofundados, dentre elas, destacamos o desenvolvimento de elementos adaptáveis a redes totalmente ópticas, como o demultiplexador OTDM estudado neste trabalho. Assim, novas ferramentas específicas de simulação para essa tecnologia tornam-se necessárias, a depender do detalhamento pretendido.

A construção do modelo de simulação, ora focado, traz à tona o conhecimento das tecnologias fotônicas e alternativas de montagem e configuração para a simulação deste tipo de rede no ambiente *VPItransmissionMaker*. No processo de montagem do modelo simulado foram utilizados alguns dos componentes ópticos básicos (transmissores, amplificadores, receptores, acopladores, combinadores, visualizadores, etc) que, com certeza, farão parte de qualquer outra montagem que venha a ser feita para o desenvolvimento de novos componentes ópticos.

1.3 Organização da Dissertação

O restante desta Dissertação é organizado da seguinte forma: no capítulo 2 é feita uma revisão dos principais conceitos inerentes a técnica da Simulação Digital e uma introdução às ferramentas para a automatização de projetos fotônicos. Apresentam-se as características dos automatizadores de projetos e exemplos de ferramentas de automação de projetos fotônicos. No capítulo 3 é contextualizada a evolução das tecnologias ópticas. São abordados os conceitos que envolvem a transmissão por meio óptico, os elementos básicos que compõem as redes ópticas (Amplificador de Luz por Emissão Estimulada de Radiação (LASER – *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), acopladores, filtros, amplificadores e fotodiodos), os fatores que limitam as transmissões ópticas e suas topologias.

No capítulo 4 é apresentada uma introdução aos sistemas de demultiplexação. No capítulo 5 é apresentado o modelo de um demultiplexador OTDM baseado em um

NOLM e que tem um SOA como gerador de não-linearidade. É mostrado, no capítulo 6, a implementação e a configuração do modelo do demultiplexador simulado. No capítulo 7 são apresentados os resultados dos estudos das simulações realizadas. No capítulo 8 são apresentadas as conclusões e sugestões de continuidade desta Dissertação. Os Apêndices A e B apresentam, respectivamente, estudos sobre BER e SOA. Finalmente, o Apêndice C apresenta os resultados obtidos das simulações realizadas.

Capítulo 2

Simulação Digital

Neste capítulo é feita uma revisão dos principais conceitos inerentes à técnica da Simulação Digital e uma introdução a ferramentas para automatização de projetos fotônicos. Apresentam-se as características dos automatizadores de projetos e exemplos de ferramentas de automação de projetos fotônicos.

2.1 Introdução

Investimentos globais em infra-estrutura, a convergência de voz e dados e o fenomenal crescimento da Internet vêm inserindo novas pressões no mundo das telecomunicações, que têm por objetivo a obtenção do máximo retorno dos investimentos pela melhoria do desempenho da infra-estrutura instalada, redução dos custos e elevação das taxas de transmissão. Muitos destes problemas podem ser resolvidos com a ajuda de ferramentas de suporte a decisão, baseadas nos conceitos de Simulação Digital.

2.2 Simulação

Simulação é o processo de construir um modelo de um sistema real ou imaginário e realizar experimentos com o propósito de entender o comportamento do sistema e avaliar as estratégias para sua operação [Smith00].

Os modelos podem ser solucionados analiticamente ou utilizando técnicas aproximadas. As técnicas analíticas se baseiam geralmente na Teoria das Filas [Kleinrock75]. Porém, apesar da solução analítica ser mais econômica e eficiente, ela pode se tornar inviável para sistemas mais complexos.

Uma alternativa para a solução de modelos, dentre as técnicas aproximadas, é a Simulação Digital. O uso da Simulação Digital baseia-se na idéia de que uma abordagem experimental pode ser útil no suporte à tomada de decisões. Do ponto de vista prático, a Simulação Digital constitui-se no projeto e construção de modelos computadorizados de sistemas reais ou propostos, com o propósito de realizar, sobre estes, experimentos numéricos que visam uma melhor compreensão do seu comportamento em um dado conjunto de condições específicas [Kelton98].

O modelo deve descrever o sistema em detalhes suficientes para que a observação de seu comportamento possibilite prever ou estimar o comportamento do sistema [Giozza86]. Ele é usado para a obtenção das relações entre as medidas de desempenho de interesse, pela experimentação automatizada de sistemas que não foram concebidos ou de difícil manuseio ou permitindo a experimentação repetida de um sistema, sob condições controladas, para otimizar o seu desempenho [Dias92].

Em simulação, a construção da lógica do modelo despende entre 30 e 40% do tempo total do projeto de simulação [Wagner00]. No entanto, tal percentual está intimamente relacionado à experiência das pessoas envolvidas. Portanto, quanto maior for à experiência da equipe envolvida no projeto, menor será o tempo de desenvolvimento e maior será a probabilidade de criação de um bom modelo [Rocha02].

2.3 Processo de Simulação

Em um estudo de simulação deve-se definir adequadamente a metodologia a ser utilizada na sua realização. Uma metodologia para um processo de simulação pode ser encontrada em [Soares90]. Apesar desse processo ser apresentado em diversos estágios, ele é iterativo (tem várias iterações no tempo) e não seqüencial. Esses estágios são mostrados a seguir [Lula01,Vasconcelos02]:

- ✓ **Formulação do problema:** consiste na definição clara do problema a resolver e dos objetivos da análise, importante para a futura análise de desempenho;
- ✓ **Construção do modelo:** consiste na descrição estática e dinâmica do modelo. A descrição estática consiste em definir os elementos do sistema e suas características. A descrição dinâmica consiste em definir o modo como esses elementos interagem causando mudanças no estado do sistema no decorrer do tempo. Na construção de modelos, uma das tarefas mais difíceis é a decisão sobre quais elementos do sistema devem ser incluídos no modelo e qual o relacionamento entre eles. Para a construção de qualquer modelo, é necessário que se escolha uma ferramenta de simulação adequada;
- ✓ **Determinação dos dados de entrada e saída:** a fase de formulação do problema gera requisitos dos dados de entrada. Esses dados podem ser hipotéticos ou baseados em alguma análise preliminar. A sensibilidade dos resultados da simulação pode ser avaliada pela realização de uma série de repetições da simulação, variando os dados de entrada;
- ✓ **Verificação:** consiste em definir se o modelo executa conforme esperado. O processo de verificação consiste em isolar e corrigir erros não intencionais no modelo e sua complexidade depende do tamanho do modelo. A verificação geralmente é realizada por uma análise através de cálculos manuais;
- ✓ **Validação:** consiste em definir se o modelo é uma representação razoável do sistema real, quanto ao comportamento e quanto aos resultados obtidos. A validação pode ser realizada usando o teste de razoabilidade [Soares90] ou através da comparação com outros modelos do sistema já validados, por exemplo, modelos analíticos, e
- ✓ **Execução do modelo:** consiste na simulação do modelo usando a ferramenta de simulação escolhida.

2.4 Simulação de Modelos

Na simulação de modelos podem-se utilizar linguagens de programação de propósito geral ou específico, ou ambientes de simulação de alto nível.

No início, para se fazer uso da Técnica de Simulação Digital era necessário implementar algoritmos em linguagens de programação de propósito geral, como FORTRAN, Pascal ou C. Elas permitem uma grande flexibilidade na construção dos modelos, porém o trabalho na simulação do modelo se torna mais complexo e mais dispendioso, pois os desenvolvedores terão que lidar com aspectos básicos de simulação (relógio, gerador de números aleatórios, etc.), dando margem a um variado número de erros [Lula01].

Posteriormente, com o surgimento de linguagens orientadas à simulação, a modelagem de sistemas tornou-se mais fácil (*GPSS*, *SIMScript*, *SLAM* e *SIMAN* [Kelton98]), entretanto, a "maturidade" na área da Simulação Digital só foi atingida com a criação dos simuladores ou ambientes de simulação de alto nível [Rocha02], concebidos segundo os conceitos de orientação a objetos. Pode-se destacar como exemplo destes ambientes: *Ptolemy* [Ptolemy02], *Arena* [Kelton98], *NS* [NS98], *OPNET Modeler* [OPNET02], *CPqD Simulação Óptica* [CPqD03] e o *VPItransmissionMaker* [VPI01], que oferecem facilidades na construção dos modelos por propiciarem a representação gráfica dos mesmos e fazerem uso de interfaces gráficas amigáveis, tais como menus, caixas de diálogos, etc.

2.5 Automatização de Projetos Fotônicos

Pode-se destacar, entre os objetivos inerentes às ferramentas de simulação fotônicas [VPI01]:

- ✓ Redução da necessidade de experimentação física com protótipos experimentais;
- ✓ Suporte à decisão;
- ✓ Familiarização dos desenvolvedores com as novas tecnologias fotônicas, antes mesmo delas serem comercializadas;

- ✓ Estímulo à inovação pela expansão dos recursos e possibilidades de projetos;
- ✓ Obtenção e distribuição de conhecimentos, e
- ✓ Aumento da comunicação entre as camadas de projeto, tais como componentes e sistemas, sistemas e redes, redes e comércio.

2.5.1 Gerações de Ferramentas de Automação de Projetos Fotônicos

- ✓ **Primeira Geração** - Componentes eram projetados individualmente, permitindo a construção de projetos altamente especializados, tais como *lasers* a semicondutores;
- ✓ **Segunda Geração** - Permitiu a interconexão de componentes para formar circuitos e modelos de sistemas mais complexos, no entanto, ficou limitado a um único formato de sinal, permitindo a modelagem de problemas particulares;
- ✓ **Terceira Geração** - Incluiu múltiplos modos e representações de sinais, permitindo a representação eficiente de muitos tipos de projetos de simulação, pelo mapeamento do problema sobre um variado conjunto de tipos de sinais, e
- ✓ **Quarta Geração** - Além das características presentes nos ambientes da terceira geração, ela permite que projetistas trabalhem individualmente ou que façam parte de um time de projetistas trabalhando em conjunto de maneira colaborativa.

2.6 Ferramentas de Automatização de Projetos Fotônicos

2.6.1 CPqD Simulação Óptica

O CPqD Simulação Óptica possibilita a avaliação precisa de projetos de rede óptica suportada por ferramenta especializada, prospecção de alternativas tecnológicas visando a seleção da tecnologia mais adequada, possibilitando a redução de custos e prazos de implantação de sistemas ópticos [CPqD03].

Esta ferramenta ainda permite a mensuração do desempenho de sistemas fundamentados em tecnologias de desenvolvimento recente, tais como sistemas WDM/Multiplexação Densa por Comprimento de Onda (*DWDM – Dense Wavelength Divison Multiplexing*) (com qualquer número de canais) em regime linear e não-linear, sistemas ópticos amplificados, sistemas de CATV digitais/analógicos e sistemas solitônicos [CPqD03].

2.6.2 VPItransmissionMaker

Faz parte da quarta geração de ferramentas de automação de projetos fotônicos, oferecendo aos desenvolvedores [VPI01]:

- ✓ Processo de projeto integrado verticalmente com tecnologias de simulação em camadas que permitem a análise concorrente através dos níveis de rede;
- ✓ Co-simulação, permitindo a integração a outras ferramentas de simulação, tais como Matlab e Pithon;
- ✓ Interface amigável e modular;
- ✓ Biblioteca extensível, cobrindo as últimas tecnologias fotônicas segundo diferentes níveis de abstração, e
- ✓ Comercializado para as plataformas Windows e Unix.

O *VPItransmissionMaker* permite executar abstrações entre a simulação de componentes em camadas, enlaces de transmissão e redes de transporte. Por exemplo, um engenheiro de projeto pode modelar um *laser* com sofisticadas equações e então passar as características do *laser* como um modelo simplificado do sistema proposto. Desta forma, engenheiros de rede podem otimizar eficientemente as camadas de mais alto nível, sem perder as contribuições básicas que o projeto do componente insere na rede. Projetistas podem transferir seus resultados aos colegas que trabalham em camadas adjacentes, com detalhes suficientes para serem compreendidos.

O *VPItransmissionMaker* é uma estrutura aberta, permitindo que projetistas façam uso das Ferramentas de Automação de Projetos Fotônicos (PDA – *Photonic Design Automation*) de terceira geração tais como *Python* [Python03] para, facilmente, construir seus próprios modelos em C/C++ dentro do ambiente de projeto. Ele ainda

oferece uma ampla biblioteca de componentes fotônicos e modelos de sistemas. Cada modelo é suficientemente testado e avaliado para fornecer resultados comparáveis àqueles obtidos quando realizados em aplicações comerciais.

Análises interativas permitem que projetistas testem os parâmetros dos produtos planejados: estimativas de BER [Zhang00] podem ser obtidas rapidamente e a incorporação de medidores de entrada de dados oferece acesso às características de componentes reais.

Dentre as ferramentas ópticas de simulação, o *VPITransmissionMaker* foi a escolhida para o desenvolvimento deste projeto em função de sua possibilidade de integração a outras linguagens, tais como Python, Matlab e Ptolemy. Outro fator decisivo para sua adoção foi à existência, neste departamento de pessoas que já o utilizavam como ferramenta de simulação o que contribuiu para a qualidade deste trabalho.

2.6.3 OPNET – *Optimum Network Performance*

É mais uma ferramenta de automação de projetos fotônicos de quarta geração. Foi desenvolvido inicialmente no MIT e introduzido, em 1987, como o primeiro simulador de rede disponível comercialmente [OPNET02]. Oferece as seguintes características aos desenvolvedores:

- ✓ Modelos hierárquicos de rede;
- ✓ Modelagem orientada a objetos;
- ✓ Ligações em rádio-enlaces, ponto-a-ponto, e multi-ponto;
- ✓ Programável;
- ✓ Ferramentas de simulação integráveis, tais como visualizadores, histogramas, funções de probabilidade, e
- ✓ Disponível comercialmente para as plataformas Windows e Unix;

Capítulo 3

Transmissão Óptica

Este capítulo contextualiza a evolução das tecnologias ópticas frente as atuais necessidades que apresentam uma forte tendência de crescimento do tráfego de voz e principalmente de dados. São abordados neste capítulo os conceitos que envolvem a transmissão por meio óptico, os elementos básicos que compõem as redes ópticas (*lasers*, acopladores, filtros, amplificadores e fotodiodos), os fatores que limitam as transmissões ópticas e as atuais topologias inerentes às redes ópticas.

3.1 Introdução

Redes ópticas são redes de alta-velocidade, baseadas em componentes fotônicos capazes de realizar roteamento, multiplexação e restauração ao nível de comprimentos de onda ou de serviços baseados em comprimentos de onda [Alcatel02]. Essas redes cada dia mais se impõem pelas necessidades decorrentes da socialização da informação, que faz com que grande parte das pessoas e organizações necessitem, cada vez mais, de acesso transparente e independente de tempo e de localização geográfica.

Essas necessidades, associadas ao crescente número de aplicações que demandam maiores larguras de faixa, (vídeo sob demanda, teleconferência, realidade virtual, telemedicina, distribuição de documentos multimídia, vídeo, imagem, texto entre outras), elevam, cada vez mais, o tráfego de dados.

Esforços [OSA/IEEE00] buscando o aperfeiçoamento de sistemas e componentes ópticos estão sendo feitos em laboratórios de pesquisas em diversos países. Os melhoramentos obtidos têm como principal objetivo, a viabilização de redes totalmente ópticas, que eliminem a necessidade de conversões óptico-eletrônicas. Perseguindo esta meta, foram conseguidos alguns objetivos, como o aperfeiçoamento das arquiteturas de rede (IP sobre camada fotônica), desenvolvimento de conectores cruzados totalmente ópticos, introdução de um número maior de canais a taxas individuais cada vez maiores, novos tipos de fibras e amplificadores.

A integração das atuais arquiteturas de redes à camada fotônica é um fator relevante ao sucesso das tecnologias fotônicas. Esta integração apresenta benefícios como: possibilidade de roteamento de pacotes IP, qualidade de serviço oferecida pela camada ATM, recuperação de falhas pelas camadas SONET/SDH. Permitindo também o reaproveitamento de elementos SDH já instalados, tendo em vista que uma parcela significativa dos atuais *backbones* tem seu funcionamento baseado nesta tecnologia.

3.2 Perspectiva Histórica

Para se chegar ao atual estágio, as tecnologias ópticas tiveram que passar por um longo processo evolutivo. É certo que a história do uso de sinais ópticos como suporte à transmissão de informação teve início por volta de 3.000 anos a.C., quando os egípcios descobriram o vidro. Este vidro não era muito claro e, a menos que uma lâmina fosse muito fina, todos os raios de luz eram absorvidos e o vidro parecia ser opaco. Hoje, a transparência de um vidro é medida pela perda da potência óptica por unidade de comprimento perpassado pelo feixe luminoso através do meio. O vidro egípcio apresentava uma perda de aproximadamente 10^7 dB/Km [Farias97].

No início, a transmissão de informações era feita através de mensageiros que viajavam a pé ou a cavalo. A comunicação feita através de mensageiros oferecia a vantagem de permitir o transporte de grandes quantidades de informação sob a forma de texto. Embora este método implicasse em elevados atrasos na transmissão e incertezas quanto ao recebimento da mensagem, uma vez que era usada, para o transporte de informações essenciais ao destino de uma guerra, por exemplo, e que o mensageiro poderia ser eliminado antes de chegar com a mensagem ao seu destino.

Situações que exigiam menores latências e incertezas levaram ao uso das comunicações ópticas, por volta de 800 a.C, em forma de fumaça segundo alguma codificação pré-definida. Mais tarde, por volta de 400 a.C., se passou a usar estações repetidoras com a finalidade de aumentar o alcance desses sistemas de comunicação.

O próximo grande passo evolutivo no desenvolvimento das comunicações ópticas aconteceu no final do século XVIII, durante os anos de 1790-94, quando Claude Chappe inventou o telegrafo óptico [TeleÓpticos94] baseado em uma cadeia de semáforos, conforme mostra a Figura 3.1. Este sistema tinha seu funcionamento baseado na codificação indicada pelo ângulo formado entre seus três braços móveis. As estações estavam separadas por distâncias que variavam entre 10 e 20 Km, de maneira a permitir sua visualização pelo operador da estação vizinha, o qual repetia o ângulo entre os braços móveis, dando prosseguimento à transmissão da mensagem pela cadeia.

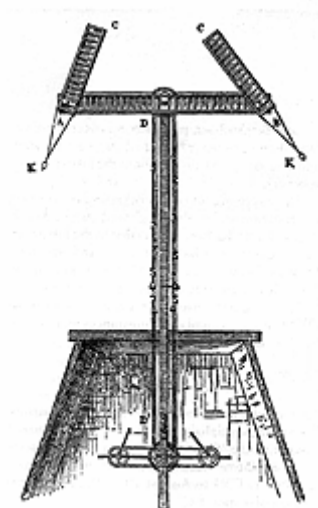


Figura 3.1 – Telegrafo óptico de Claude Chappe.

Os telégrafos ópticos não podiam ser usados à noite ou durante situações adversas como tempestades, tendo sido este um dos motivos de sua gradual substituição, durante o século XIX, por telégrafos elétricos.

O passo seguinte foi à invenção do telefone por Alexander Graham Bell em 1876 e, em seguida, as comunicações à rádio realizadas pelas contribuições de James Clark Maxwell em 1873, Heinrich Hertz em 1887 e Guglielmo Marconi em 1895.

Em 1854, John Tyndall mostrou na *Royal Institution of Great Britain* que a luz seguia um estreito feixe de água, mesmo que seu trajeto fosse curvo, conforme a

Figura 3.2. As tentativas para explicar este fenômeno conduziram a idéia de guiar a luz através de um meio cilíndrico.

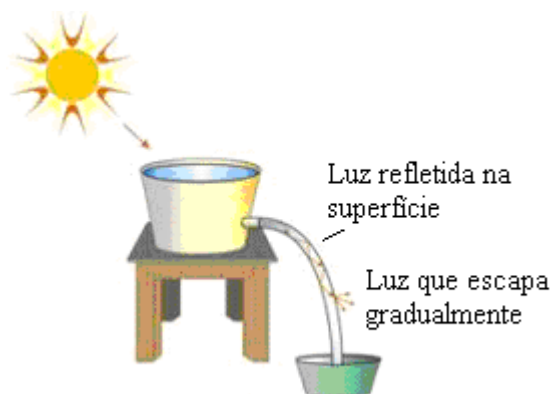


Figura 3.2 – Configuração do experimento de John Tyndall.

Composta por um núcleo e uma casca feitos de materiais vítreos diferentes, a fibra óptica representou a materialização da idéia proposta por John Tyndall e foi proposta pela primeira vez em 1958 [Hecht03]. Neste mesmo ano aconteceu um marco importante para as comunicações ópticas com a invenção das fontes *laser*.

Em 1966, K. C. Kao e G. A. Hockham afirmaram que a comunicação óptica poderia ser viável caso a atenuação do vidro fosse reduzida para valores abaixo de 20 dB/Km, que era a taxa de perda dos cabos de cobre [Kao66]. Os anos 70 foram decisivos para a evolução das tecnologias ópticas, de uma área de estudos avançados para a aplicação prática com o desenvolvimento de fontes ópticas a semicondutores (diodos emissores de luz e *lasers*) e de fibras de vidro com perdas muito baixas. Os primeiros sistemas práticos foram desenvolvidos em 1977 com taxas de transmissão que alcançavam 140 Mbps [Midwinter00].

Durante a segunda metade dos anos 80, o surgimento dos amplificadores ópticos a fibra teve reflexos no sistema adotado para a detecção de pulsos. Ganhou impulso a implantação de sistemas com detecção direta que são menos onerosos e oferecem amplificação direta e quase ideal da luz na faixa em torno de 1,55 μ m.

3.3 Transmissão em Meio Óptico

3.3.1 Fibras Ópticas

Quando o *laser* foi inventado, no ano de 1958, reconheceu-se que a comunicação através de ondas ópticas oferecia imenso potencial, mas foram necessários cerca de 20 anos para o desenvolvimento de um meio que permitisse o transporte de pulsos luminosos por longas distâncias [Farias97]. Este meio foi a fibra óptica e representou um marco nas telecomunicações globais e uma revolução na tecnologia da informação. A viabilização da comunicação em escala mundial não teria sido possível sem seu desenvolvimento como meio de transporte do tráfego de voz, vídeo e dados.

Sua fabricação teve início nos anos 70, tendo seu ritmo de produção acelerado, desde então. Atualmente, em virtude de recentes avanços tecnológicos, já se consegue taxas de 400 Gbps por fibra em sistemas comerciais [Farias97], no entanto, estimativas indicam que a taxa limite de transmissão por fibra é de aproximadamente 50 Tbps, a qual deve ser alcançada nos próximos 10 anos, caso as atuais taxas de transmissão continuem a ser dobradas anualmente. Bastando, para isso, o contínuo desenvolvimento das funcionalidades dos dispositivos fotônicos.

Devido ao fenômeno físico da reflexão interna total, a luz tem propagação ao longo da fibra sofrendo reduzidas perdas de potência. Destaca-se, dentre as suas principais características:

- ✓ Baixa atenuação;
- ✓ Baixa distorção do sinal;
- ✓ Baixos custos;
- ✓ Dimensões reduzidas;
- ✓ Flexibilidade mecânica;
- ✓ Imunidade à interferências, e
- ✓ Matéria prima abundante.

3.3.2 Transmissão

No vácuo a velocidade de propagação da luz (c) é da ordem de 3×10^8 m/s, no entanto a luz apresenta velocidades menores ao atravessar materiais transparentes ou translúcidos. Sendo c_{meio} , a velocidade da propagação da luz para um dado meio, a relação entre a velocidade da luz no vácuo e neste meio é chamada de índice de refração no meio (n), dado por $n_{\text{meio}} = c / c_{\text{meio}}$.

Quando a luz viaja de um meio de determinado índice de refração para um outro com índice de refração diferente, o ângulo no qual a luz é transmitida no segundo meio depende do índice de refração entre os dois, assim como do ângulo pelo qual a luz atinge a interface entre estes dois meios.

A Figura 3.3 ilustra o que acontece quando um feixe de luz propaga-se por um meio no sentido de uma interface com outro meio.

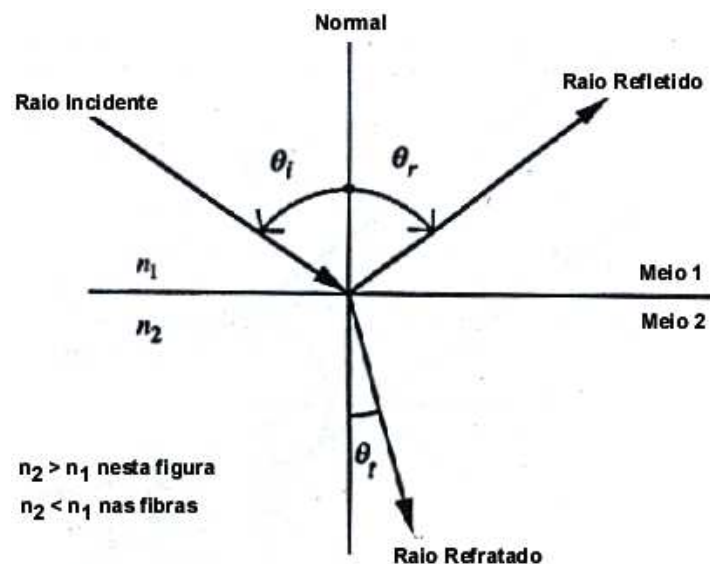


Figura 3.3 – Leis da reflexão e refração.

Quando o raio atinge a interface, em geral (mas nem sempre) dois novos raios emergem da mesma: um raio refletido que se propaga de volta para o *meio 1* e um refratado que se propaga pelo *meio 2*. O ângulo entre o raio incidente e a normal a interface é denotado por θ_i ; o ângulo entre a normal e o raio refletido é denotado por θ_r ; e o ângulo entre a normal e o raio refratado é denotado por θ_t (onde o t substitui transmissão). Estes três ângulos estão relacionados pelas expressões a seguir:

$$\theta_r = \theta_i \quad (3.1)$$

$$\frac{\sin \theta_t}{\sin \theta_i} = \frac{n_1}{n_2} \quad (3.2)$$

quando n_1 e n_2 são os índices de refração dos meios 1 e 2, respectivamente, a Equação 3.2 é conhecida como *Lei de Snell*. Trata-se de um fato experimental, mas que pode também ser derivado diretamente a partir das equações fundamentais de Maxwell.

Em fibras e em guia de ondas retangulares, $n_2 < n_1$ (o índice de refração da capa é menor que o do núcleo). Por isso, o feixe refratado propaga-se mais afastado da normal e mais próximo a interface. Para determinado valor do ângulo de incidência, o raio refratado θ_t é igual a 90° . Nesta situação, a luz apresenta propagação ao longo da interface. O ângulo de incidência correspondente é conhecido por ângulo crítico, θ_{crit} . Quando o ângulo de incidência é maior do que θ_{crit} , não existe feixe refratado para o meio 2. Este fenômeno é conhecido por reflexão interna total.

O ângulo crítico é calculado como:

$$\theta_{crit} = \sin^{-1} \left(\frac{n_{casca}}{n_{nucleo}} \right) \quad (3.3)$$

Para a reflexão interna, é necessário que o ângulo de incidência seja maior que o ângulo crítico. Em situações nas quais a fibra apresenta índice gradual, com a interface entre o núcleo e a casca submetendo-se a uma mudança gradual no índice de refração com $n_i > n_i + 1$, o valor do ângulo crítico necessário à reflexão interna total é reduzido, ajudando também a reduzir a dispersão intermodal na fibra [Abelém02].

A reflexão interna total na interface núcleo-casca só acontece se o ângulo de incidência na interface exterior do guia de ondas (θ_0), for suficientemente pequeno:

$$n_{ar} \sin \theta_{ar} \leq n_{nucleo} \cos \theta_{crit} \quad (3.4)$$

onde n_{ar} é o índice de refração no meio exterior, que geralmente é a atmosfera.

O valor máximo de $n_{ar} \sin \theta_{ar}$ é conhecido como Abertura Numérica (NA – *Numeric Aperture*):

$$NA = n_{ar} \max [\sin \theta_{ar}] \quad (3.5)$$

Na maioria das vezes o meio exterior é o ar, ou seja, $n_0 = 1$. Então, das duas equações anteriores:

$$NA = n_{nucleo} \cos \theta_{crit} = \sqrt{n_{nucleo}^2 - n_{casca}^2} \quad (3.6)$$

A maior ou menor facilidade de acoplamento e interconexão da fibra é afetada pela sua abertura numérica. Ela é uma medida da capacidade coletora de luz pela fibra, conforme ilustra o cone de aceitação visto na Figura 3.4 [Farias97].

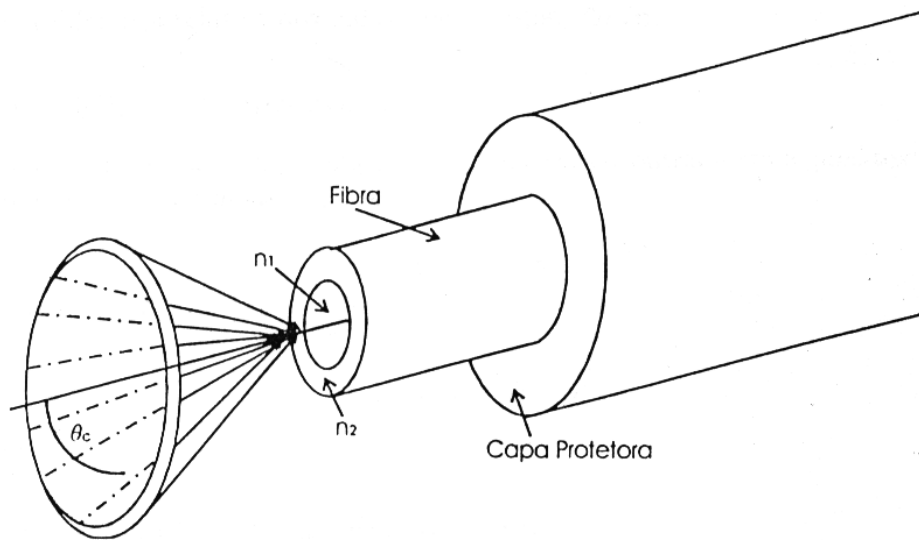


Figura 3.4 – Cone de aceitação de uma fibra.

3.4 Fatores Limitantes às Transmissões Ópticas

3.4.1 Efeitos Lineares

A transmissão por Fibras Ópticas é sujeito aos fenômenos lineares de atenuação e dispersão. A atenuação limita o alcance de um enlace de transmissão. A dispersão [Abelém02] gera o espalhamento dos pulsos, podendo inviabilizar a detecção no lado receptor, pela sobreposição de diferentes pulsos. Atenuação e dispersão, portanto, são fatores que limitam o desempenho de sistemas ópticos de comunicação.

3.4.2 Efeitos Não-Lineares

Surgem como resultado do uso da fibra por pulsos muito potentes ou quando se transmite múltiplos canais (diferentes comprimentos de onda) simultaneamente. Estas propriedades não lineares da fibra impõem um limite ao nível de potência injetada, acima do qual estes efeitos podem gerar interferência, distorção e atenuação, resultando em degradação do desempenho do sistema [Chraplyvy90]. Há duas classes de efeitos não-lineares, os efeitos de espalhamento, que são praticamente independentes da dispersão, e os efeitos de Kerr que são influenciados pela dispersão da fibra [Kurtzke93].

Os efeitos de espalhamento são o Espalhamento Estimulado de Raman e o Espalhamento estimulado de Brillouin. Os Efeitos de Kerr surgem quando o índice de refração da fibra passa a depender da potência do sinal. Como efeitos de Kerr, têm-se:

- ✓ **Automodulação de fase:** a transmissão em um comprimento de onda pode transferir energia para outros comprimentos de onda vizinhos [Agrawal01];
- ✓ **Modulação de fase cruzada:** transmissões em dois diferentes comprimentos de onda podem interagir e levar ambos a transferir energia para comprimentos de onda vizinhos [Agrawal01], e
- ✓ **Mistura de quatro ondas:** sinais em dois ou mais comprimentos de onda podem interagir e gerar um sinal em um novo comprimento de onda [Agrawal01].

3.5 Componentes Ópticos

3.5.1 Laser

O *Laser* a Semicondutor é a fonte óptica mais utilizada nos sistemas de comunicações ópticas atuais.

A Figura 3.5 apresenta uma representação genérica da estrutura de um *laser*, que consiste de dois espelhos, formando uma cavidade (espaço entre os espelhos). Durante a geração de um feixe de luz, os elétrons da cavidade são excitados, liberando fótons que são refletidos múltiplas vezes entre os espelhos. Esta reflexão vai se repetir

até que seja formado um feixe luminoso com intensidade suficiente para atravessar o espelho translúcido.

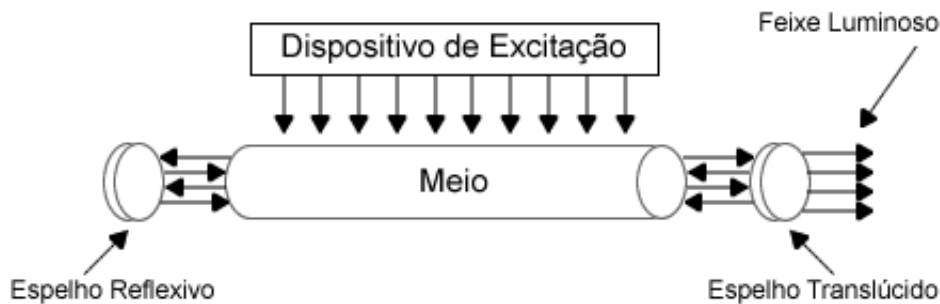


Figura 3.5 – Estrutura genérica de um *laser*.

O ajuste do *laser* pode ser feito de forma mecânica, acústica ou eletrônica. Os *lasers* mecânicos são ajustados pela aproximação ou afastamento dos espelhos internos, o ajuste acústico é feito através de ondas sonoras e o ajuste eletrônico através de corrente elétrica. Independente do tipo de *laser*, o ajuste a determinada frequência ocorre segundo as necessidades ópticas para o sistema contextualizado.

Para a geração de conjuntos de frequências diferentes, são utilizadas matrizes de *lasers*, que são integradas a um único componente e cada *laser* opera segundo um comprimento de onda diferente. Matrizes de *lasers* tem como vantagem, caso cada comprimento de onda seja modulado independentemente, a possibilidade de se fazer múltiplas transmissões simultâneas.

3.5.2 Acopladores

Acoplador é um termo genérico que cobre todos os dispositivos que combinam ou dividem o sinal luminoso, na entrada ou saída da fibra respectivamente [Anderson99]. Os acopladores podem ser subdivididos em divisores, combinadores e acopladores.

- ✓ **Separador:** É um acoplador que divide o sinal óptico de uma fibra para duas ou mais fibras. O mais comum dos separadores é o 1x2, mostrado na Figura 3.6(a). Para um separador de duas portas, a relação de divisão do sinal mais comum é 50:50, entretanto podem ser fabricados separadores com qualquer relação;

- ✓ **Combinador:** É o oposto de separador, conforme a Figura 3.6(b). Quando invertido, pode ser usado como um separador. Um sinal injetado em um combinador sofre uma perda de potência de 3 dB, e
- ✓ **Acoplador:** Acoplador 2x2, conforme mostra a Figura 3.6(c), em geral, é um combinador 2x1 seguido por um separador 1x2 que têm o efeito de fazer a difusão dos sinais das fibras de entrada para as fibras de saída. No acoplador o sinal tem sua potência dividida segundo a relação 50:50 e sofre uma perda de potência de 3 dB.

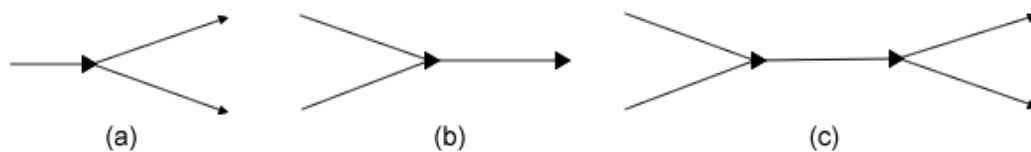


Figura 3.6 – (a) Separador, (b) combinador e (c) acoplador.

3.5.3 Filtros Ópticos

Filtros ópticos ajustáveis são componentes importantes para as redes WDM. As características das redes WDM dependem, sobretudo, de sua velocidade e faixa de ajuste. A faixa de ajuste especifica a gama de comprimentos de onda que podem ser recebidos por estes filtros e a velocidade de ajuste especifica o tempo necessário para ir do ajuste para um comprimento de onda a outro. A maioria dos filtros permite a passagem de todas as frequências, exceto aquelas para as quais ele foi ajustado.

Em [Borella97,Mujherjee00], encontra-se uma descrição detalhada das características ópticas citadas para estes dispositivos, de seus mecanismos de funcionamento e de outros componentes similares.

3.5.4 Amplificadores Ópticos

Antes do desenvolvimento de Amplificadores Fibra Dopada com Érbio (EDFA - *Erbium-Doped Fiber Amplifiers*), os efeitos das perdas ópticas eram compensados através do uso de repetidores, dispostos em distâncias relativamente pequenas, que detectavam o sinal, filtravam eletronicamente e o retransmitiam através de um novo *laser*. Estes dispositivos inviabilizavam transmissões em longas distâncias, pois eram caros, não confiáveis e, mais importante, eram projetados para apenas um comprimento de onda.

A introdução dos amplificadores ópticos por volta de 1989 representou uma revolução para as comunicações ópticas. Estes amplificadores permitiram, pela primeira vez, a amplificação direta do sinal luminoso sem necessidade de conversão para um domínio eletrônico, permitindo que a luz viajasse por quilômetros usando amplificação óptica (40 a 80 Km) para compensar as perdas na fibra. Outra característica importante foi o fato de que estes amplificadores operavam de maneira independente da taxa de dados, formato e comprimento de onda, o que viabilizou as tecnologias WDM e DWDM.

Nos amplificadores EDFA, o erbium absorve luz na faixa de 980 ou 1480 nm e armazena esta energia para amplificar sinais em comprimentos de onda próximos a 1550 nm [Glass00].

A ilustração esquemática de um simples EDFA é mostrada na Figura 3.7. Acopladores são usados para combinar o sinal e a luz de bombeio, os isoladores atuam como válvulas, evitando que reflexões transpassem o amplificador.

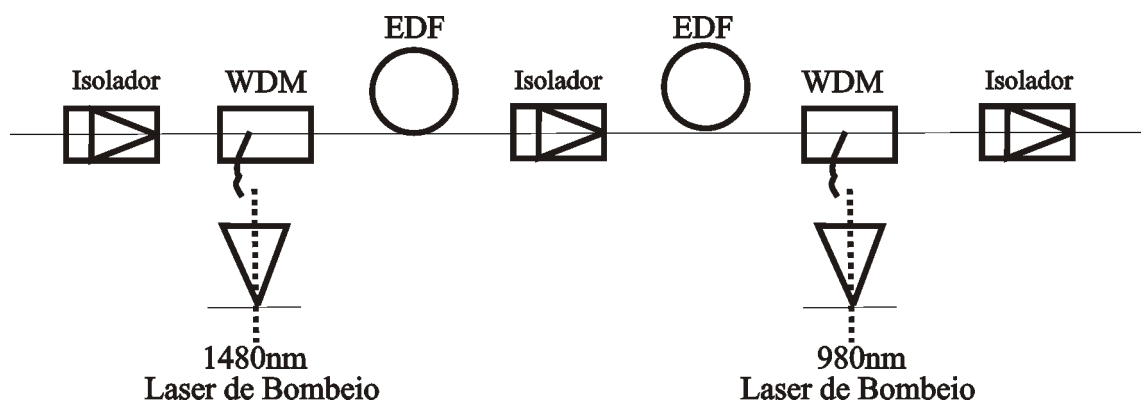


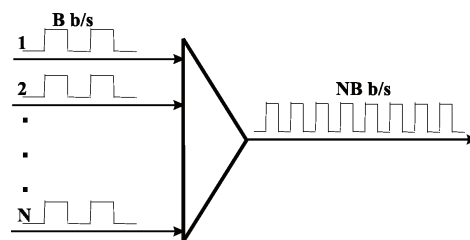
Figura 3.7 – Esquema ilustrativo de um EDFA em dois estágios.

Amplificadores de Raman [Glass00] permitem a amplificação em faixas que vão de 1270 a 1670 nm, o que equivale a todo o espectro útil das fibras ópticas. Por esta razão, os últimos desenvolvimentos ópticos incorporam estes amplificadores em localizações intermediárias de redes ópticas.

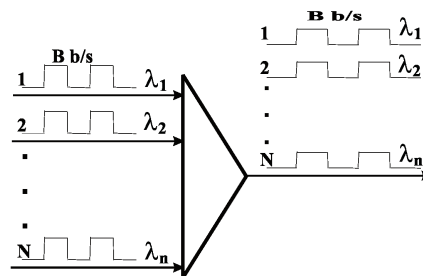
Capítulo 4

Técnicas de Multiplexação

Fundamentalmente, há dois modos de aumentar a capacidade de transmissão em uma fibra, conforme mostrado na Figura 4.1. O primeiro é elevando a taxa de bit, o que requer elevadas velocidades eletrônicas, o segundo é quando múltiplos fluxos de dados em taxas individuais mais baixas são multiplexados em um único fluxo de taxa mais elevada por meio de TDM. O multiplexador intercala os fluxos mais lentos para obter o de taxa mais elevada. Por exemplo, pode-se escolher 1 byte do primeiro fluxo, o próximo byte do segundo, e assim por diante.



(a) Mux TDM ou OTDM



(b) Mux WDM

Figura 4.1 – Técnicas de multiplexação (a) multiplexação eletrônica ou óptica por divisão do tempo (b) multiplexação por divisão em comprimentos de onda.

Buscando atingir taxas cada vez maiores, pesquisadores investem em métodos que viabilizam a multiplexação e a demultiplexação opticamente procurando explorar todo o potencial de transporte das fibras ópticas. Um destes métodos de multiplexação é a Multiplexação Óptica por Divisão do Tempo (OTDM – *Optical Time Division Multiplexing*).

Outro modo de aumentar a capacidade de transmissão é a conhecida Multiplexação por Divisão em Comprimentos de Onda (WDM – *Wavelength Division Multiplexing*). A essência da WDM é equivalente a da Multiplexação por Divisão em Frequência (FDM - *Frequency Division Multiplexing*) que foi usada em sistemas de rádio por mais de um século. Por alguma razão, o termo FDM é amplamente usado em rádio-comunicação, mas WDM é usada no contexto de comunicação óptica, talvez porque FDM foi primeiro estudado pelos engenheiros de comunicações enquanto que WDM foi primeiro estudado por físicos. A idéia é transmitir dados simultaneamente em múltiplos comprimentos de onda da portadora (ou, equivalentemente, em frequências ou cores) por uma mesma fibra. Sistemas WDM são largamente usados, hoje, em redes transoceânicas e já são empregados comercialmente em redes metropolitanas.

WDM e TDM são técnicas que permitem elevar a capacidade de transmissão, sendo complementares uma à outra. Usando combinações de WDM e TDM, já se consegue sistemas comerciais com capacidade de transmissão da ordem de Tbps.

4.1 Multiplexação por Divisão em Comprimentos de Onda (WDM)

4.1.1 Introdução

A multiplexação WDM é a tecnologia de multiplexação mais usada em redes ópticas de comunicação a longas distâncias, por procurar explorar o imenso potencial das fibras ópticas, desde que cada estação ou porta de comunicação opere, necessariamente, na taxa de determinado comprimento de onda, o qual pode ser escolhido arbitrariamente [Mukherjee00].

Na Figura 4.2 é mostrada a região de menor atenuação da fibra óptica, a qual é utilizada para transmissão em sistemas WDM, com cada comprimento de onda suportando um canal de comunicação operando na taxa que se deseje. Desta forma, múltiplos canais WDM coexistem em uma única fibra [Mukherjee00].

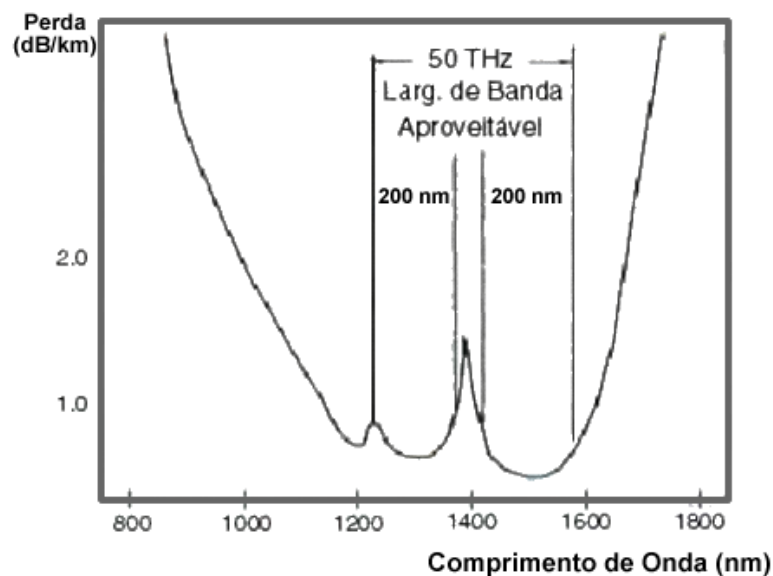


Figura 4.2 – Região de atenuação da fibra óptica.

O uso da tecnologia WDM ponto-a-ponto representou a primeira fase na evolução da transmissão óptica. Sistemas WDM cresceram rapidamente, pois se tornou mais rentável expandir a capacidade dos atuais sistemas do que outras alternativas, como adição de fibras ou a substituição da capacidade atual por outra de taxas mais elevadas (troca de enlaces OC-45 (2.5 Gbps) por enlaces OC-192 (10 Gbps), por exemplo) [Mukherjee00].

A tecnologia WDM permite que uma mesma fibra comporte 16 ou mais comprimentos de ondas, tal como mostrado na Figura 4.3, que faz a comparação entre uma rede TDM, que necessita de 128 repetidores eletro-ópticos para o transporte de 16 comprimentos de onda, um por fibra, com tráfego total equivalente a 40 Gbps por uma distância de 360 km. Utilizando-se um sistema WDM com a mesma capacidade de transporte, necessita-se de uma única fibra, 32 terminais, 4 amplificadores ópticos, 1 multiplexador e 1 demultiplexador óptico.

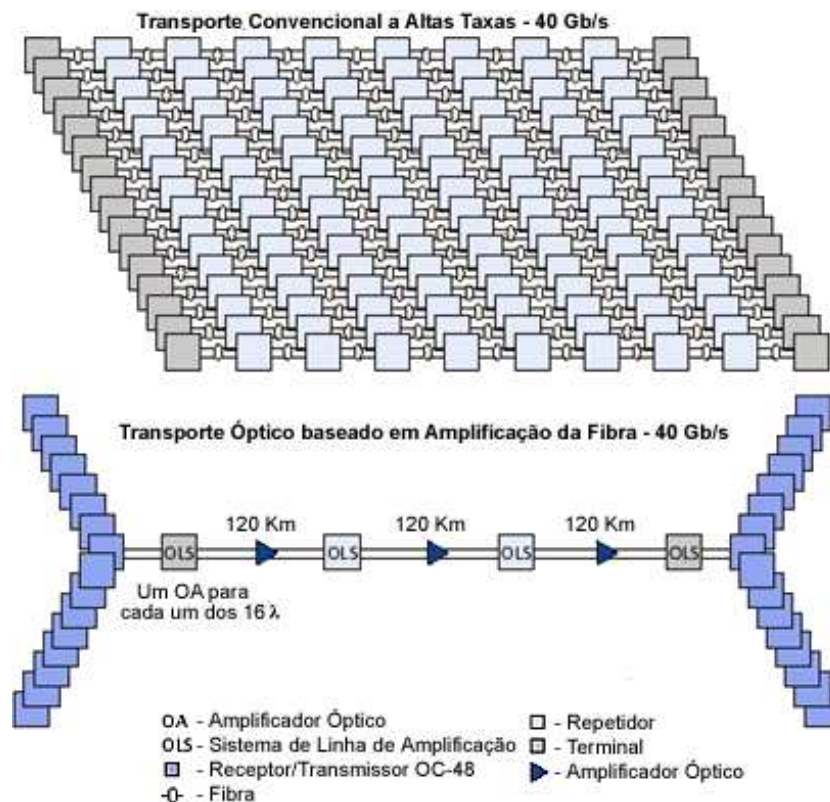


Figura 4.3 – Expansão de capacidade a longas distâncias.

A recomendação G.694.1 do Setor de Padronização da União Internacional das Telecomunicações (ITU-TS – *Standardization Sector of International Telecommunication Union*) [ITUWDM02] apresenta, na Tabela 4.1, a distribuição de canais WDM com comprimentos de onda entre 1270 e 1610 nm e espaçamento de 20nm entre eles.

Comprimentos de onda (nm) com espaçamento de 20 nm
1270
1290
1310
1330
1350
1370
1390
1410
1430
1450
1470
1490
1510
1530
1550
1570
1590
1610

Tabela 4.1: Distribuição por comprimentos de onda.

4.1.2 Componentes WDM

4.1.2.1 Comutadores de Comprimentos de Onda

Muitas redes empregam processamento eletrônico e utilizam a fibra óptica apenas como meio de transmissão sem tirar proveito das vantagens oferecidas pelas tecnologias fotônicas. Comutação e processamento de dados são executados, nestas redes, pela conversão do sinal de volta a sua forma eletrônica “nativa”. Elas apresentam “elementos de comutação eletrônica confiável” e seus comutadores fornecem alto grau de flexibilidade em termos de funções de roteamento e comutação, embora a velocidade eletrônica seja incapaz de competir com as altas taxas ópticas. Além disso, a conversão eletro-óptica introduz atrasos extras. Estes fatores motivam o desenvolvimento de redes totalmente ópticas, nas quais os comutadores ópticos fazem a comutação de fluxos de dados ópticos sem conversão eletro-óptica [Borella97,Mukherjee97].

Esta classe de comutadores pode ser dividida em duas subclasses: a primeira destas classes, chamada de dispositivos relacionais, estabelece uma relação entre as entradas e saídas. A relação é uma função de controle do sinal aplicada ao dispositivo,

independente do conteúdo do sinal ou dos dados fornecidos. Esta característica é também conhecida como transparência de dados. A segunda classe de dispositivos é chamada de dispositivos lógicos.

Os dispositivos relacionais são utilizados na comutação de circuitos e os dispositivos lógicos na comutação de pacotes.

4.1.2.2 Elementos de Comutação

Estes elementos de comutação chaveiam o sinal óptico de uma entrada para uma saída. Eles são geralmente insensíveis ao comprimento de onda, isto é, incapazes de demultiplexar sinais com comprimentos de onda diferentes de uma mesma entrada [Mukherjee97].

O mais simples destes elementos é o cruzamento 2 X 2. Este elemento roteia o sinal das portas de entrada para as portas de saída e tem dois estados: barra e cruzado (Figura 4.4). No estado cruzado, o sinal que entra na porta superior é roteado para a porta de saída inferior e o da porta de entrada inferior para a porta de saída superior. No estado barra, o sinal que entra na porta superior é roteado para a porta de saída superior e o da porta de entrada inferior para a porta de saída inferior.

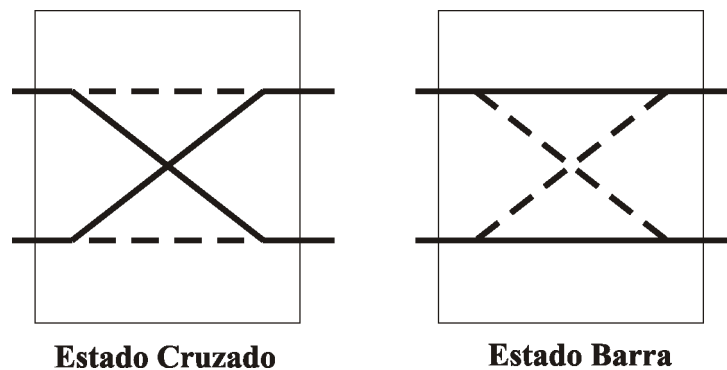


Figura 4.4 – Elementos de comutação.

Elementos cruzados estão sendo demonstrados a partir de duas tecnologias: (1) um comutador genérico, no qual a luz é fisicamente direcionada para uma das duas portas de saída e (2) um comutador (Figura 4.5), no qual portas são usadas para dividir e amplificar os sinais de entrada para portas específicas de saída.

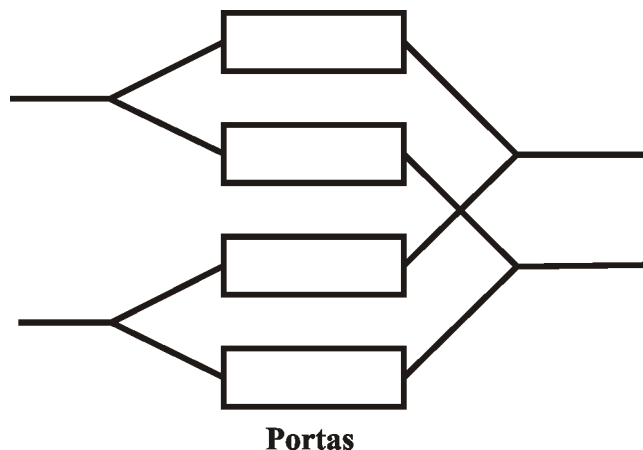


Figura 4.5 – Comutador amplificado 2 x 2.

4.1.2.3 Estrela Passiva

Estes dispositivos fazem difusão do sinal de entrada, isto é, o sinal que entra por determinada porta tem a potência de seu sinal dividida entre todas as portas de saída. A Figura 4.6 mostra a difusão dos comprimentos de onda λ_1 e λ_2 que entram, respectivamente, pelas fibras 1 e 2. Nestes dispositivos, uma colisão ocorre quando dois ou mais sinais de mesmo comprimento de onda são lançados simultaneamente na estrela [Mukherjee00].

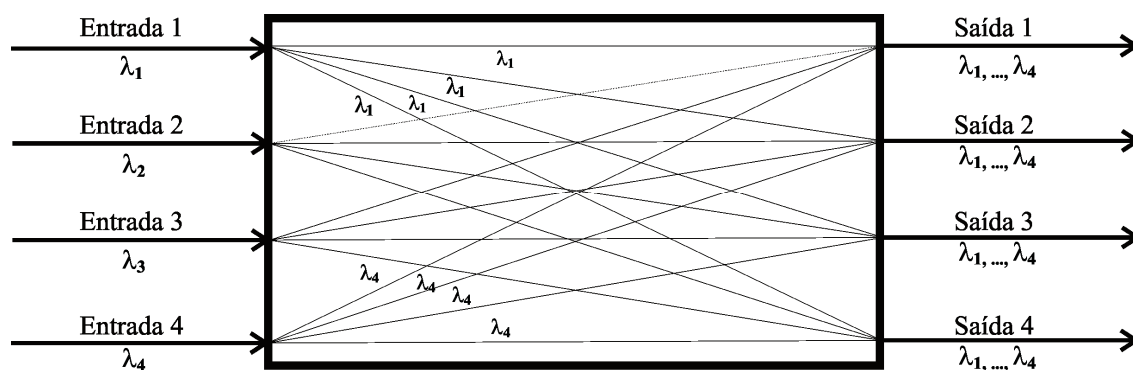


Figura 4.6 – Estrela passiva 4 x 4.

4.1.2.4 Roteadores Passivos

Roteadores passivos podem rotear o sinal de diferentes entradas para diferentes saídas, baseados nos comprimentos de onda dos sinais. Eles possuem um demultiplexador acoplado às entradas que, opcionalmente, roteia cada comprimento de onda separadamente e, então, multiplexa o sinal nas portas de saída [Mukherjee00].

Estes roteadores não são configuráveis, pois o caminho de um dado comprimento de onda, após este entrar no roteador por determinada fibra, é fixo. Eles

apresentam a característica de possuir o número de fibras de entrada igual ao número de fibras de saída. A Figura 4.7 ilustra um roteador não-configurável 4 X 4.

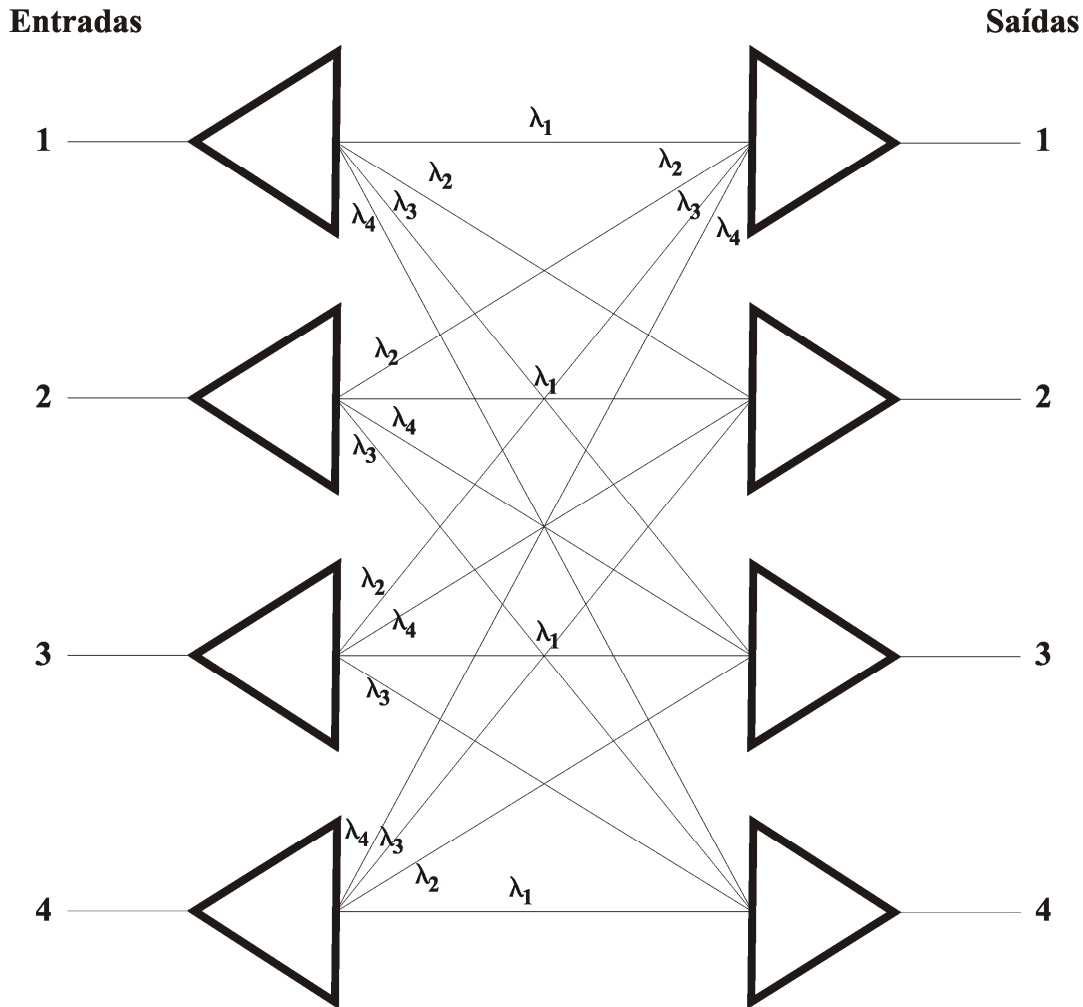


Figura 4.7 – Roteador passivo 4 x 4 (4 comprimentos de onda)

Estes dispositivos permitem o reuso de comprimentos de onda, isto é, um mesmo comprimento de onda pode ser reusado espacialmente para carregar múltiplas conexões através do comutador. O roteamento de um comprimento de onda da porta de entrada para a porta de saída depende da matriz de roteamento que não pode ser alterada dinamicamente.

4.1.2.5 Comutadores Ativos

Assim como os roteadores passivos, os comutadores ativos permitem o reuso de comprimentos de onda e podem suportar até N^2 conexões simultâneas. Mas eles apresentam a vantagem de possuírem matriz de roteamento configurada dinamicamente em função da demanda, sob controle eletrônico. De qualquer forma, comutadores ativos

precisam ser ligados e não são tolerantes a falhas como a estrela passiva e os roteadores passivos [Mukherjee00].

Melhoramentos nestes dispositivos são conseguidos através da incorporação de capacidades extras, como a conversão de um comprimento de onda para outro comprimento de onda antes dele entrar no estágio de multiplexação anterior às fibras de saída (Figura 4.8).

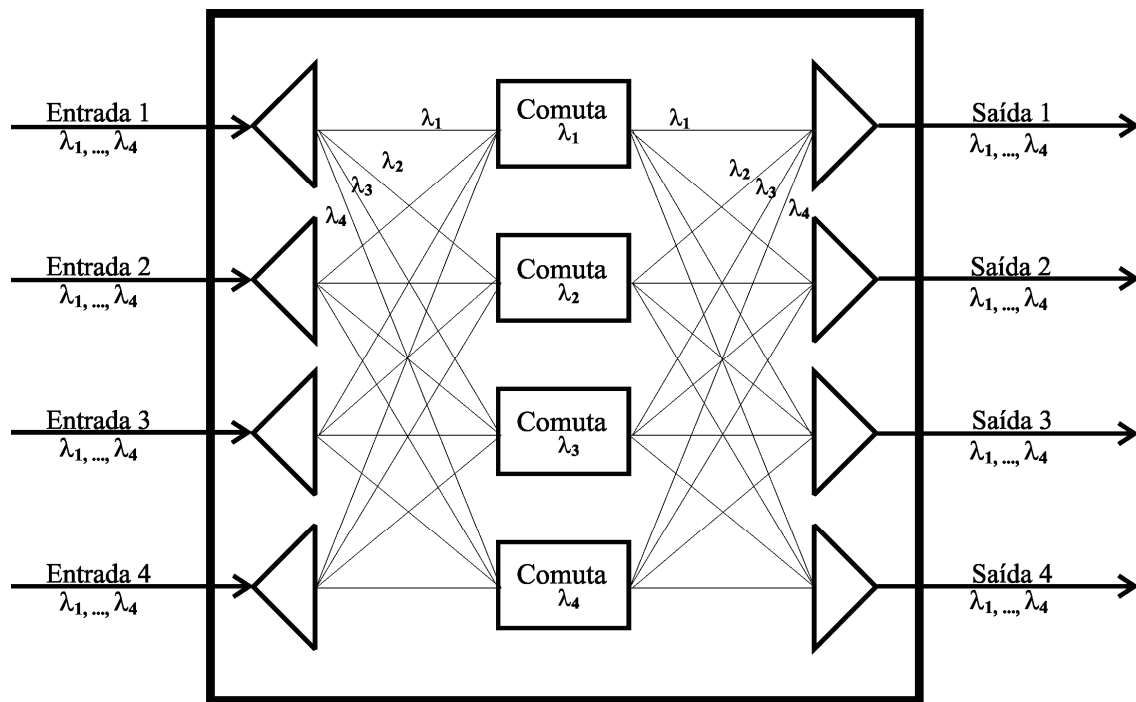


Figura 4.8 – Comutador ativo 4 x 4 (quatro comprimentos de onda).

4.1.2.6 Conversores de Comprimento de Onda

Considere a rede da Figura 4.9. Ela mostra uma rede de roteamento de comprimentos de onda contendo dois comutadores (S_1 e S_2) e cinco estações de acesso (de A até E). Três caminhos devem ser criados (de C até A usando o comprimento de onda λ_1 , de C até B usando o comprimento de onda λ_2 , e de D até E pelo comprimento de onda λ_1). Para estabelecer o caminho, é necessário que um mesmo comprimento de onda seja alocado em todo o caminho. Esta necessidade é conhecida como o “obstáculo à continuidade do comprimento de onda” [Borella97,Mukherjee97].

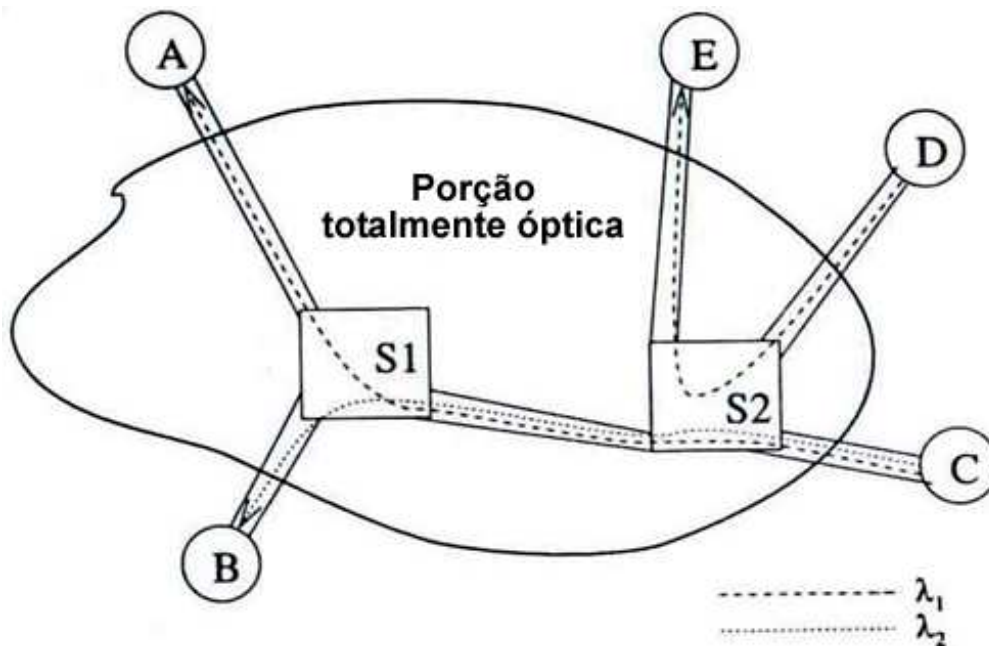


Figura 4.9 – Rede com 2 comutadores e 5 estações de acesso.

O obstáculo da continuidade do comprimento de onda é facilmente eliminado, caso se permita a conversão dos dados que viajam em determinado comprimento de onda ao longo do enlace para outro comprimento de onda, em qualquer nó intermediário, e encaminhá-lo pelo próximo enlace. Tal técnica é possível e conhecida como conversão de comprimento de onda.

Uma conversão de comprimento de onda ideal apresenta as seguintes características [Borella97,Mukherjee97]:

- ✓ Transparência às taxas e formato do sinal;
- ✓ Alta velocidade de conversão;
- ✓ Conversão de baixos e altos comprimentos de onda;
- ✓ Níveis moderados de potência de entrada;
- ✓ Insensibilidade à polarização do sinal de entrada; e
- ✓ Fácil implementação.

Técnicas de conversão de comprimentos de onda podem ser, de maneira geral, classificadas em dois tipos: conversão de comprimento de onda óptico-eletrônica, na qual o sinal é primeiro convertido para um sinal eletrônico; e conversão de comprimento de onda totalmente óptica, pela qual o sinal permanece no domínio óptico.

4.1.2.7 Multiplexador Insere/Deriva por Comprimento de Onda (WADM)

A Figura 4.10 contextualiza a importância destes componentes para a evolução das redes ópticas WDM. Esta figura descreve a evolução dos sistemas ópticos, iniciando com um único canal ligado ponto-a-ponto e caminhando até as redes ópticas. Há aproximadamente doze anos, uma transmissão óptica de longa distância consistia de uma série de transmissores ópticos e receptores ligados entre poucas fibras. O enlace raramente excedia 40 km, porque os *lasers* tinham a potência limitada em 1mW e os amplificadores e repetidores ópticos ainda não estavam disponíveis comercialmente. Conseqüentemente, nesta época, o principal benefício em se incorporar múltiplos canais WDM em uma única fibra era aumentar a capacidade de transmissão.

Com o aperfeiçoamento dos componentes ópticos que permitiram transmissões por distâncias cada vez maiores e a inserção cada vez maior de comprimentos de onda em uma mesma fibra, os Multiplexadores Insere/Deriva por Comprimento de Onda (WADM - *Wavelength Add/Drop Multiplexer*) permitiram o gerenciamento, de maneira mais eficiente, da capacidade óptica através da inserção e derivação de canais no meio físico, tornando possível a interconexão de centros, distribuídos geograficamente, ao longo do enlace de transmissão.

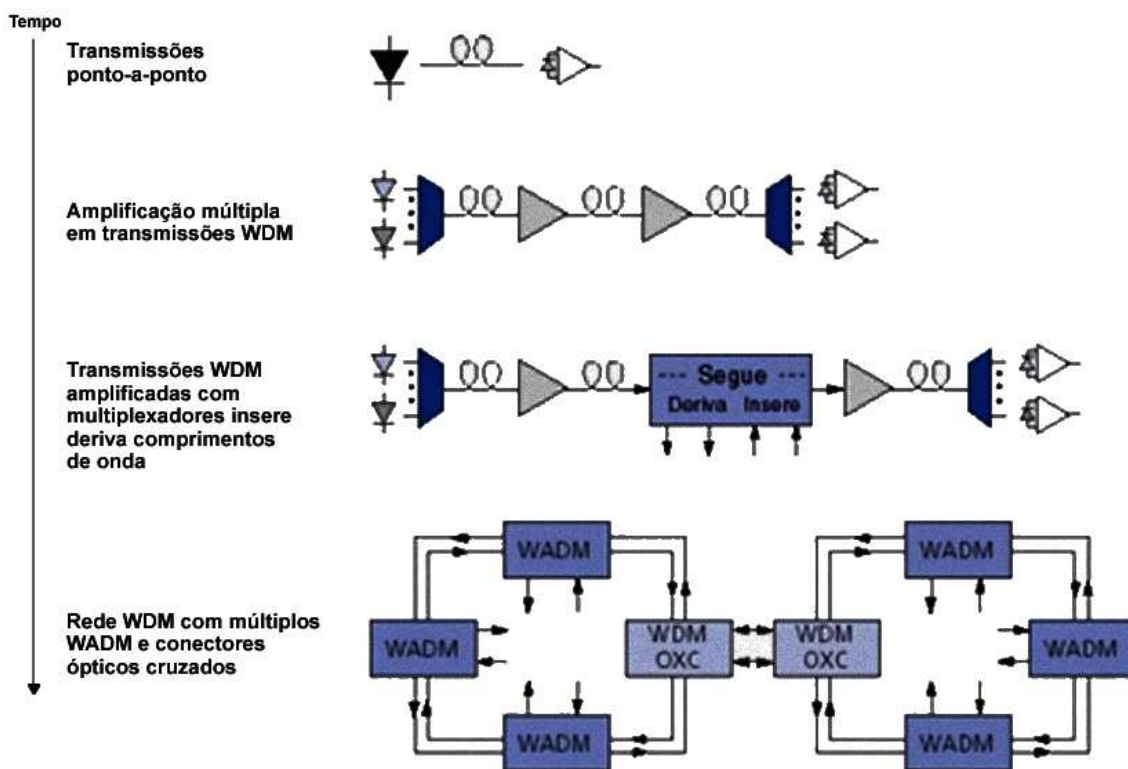


Figura 4.10 – Evolução da transmissão em fibras ópticas. De um enlace ponto-a-ponto a uma rede óptica.

Os primeiros WADM foram do tipo fixo [Bonenfant03], que facilitavam a inserção e remoção de fluxo de dados em canais dedicados. WADM reconfiguráveis – permitem a alteração manual ou por programação dos comprimentos de ondas – são largamente utilizados atualmente. Estes asseguram a inserção ou retirada de comprimentos de onda de acordo com a demanda do tráfego na rede, tornando-a mais eficiente. WADM reconfiguráveis podem ser utilizados na restauração óptica, fornecendo a habilidade de rerrotear o tráfego em volta do nó ou enlace falho [Giles99].

Uma forma de multiplexador insere/deriva de comprimento de onda é mostrado na Figura 4.11. Ele consiste de um demux, seguido por um conjunto de comutadores 2x2 – um por comprimento de onda – seguido por um multiplexador. O WADM pode ser essencialmente “inserido” em um enlace de fibra. Se os dois comutadores estiverem no estado “barra”, então não há perturbação nos fluxos de comprimento de onda através do WADM. No entanto, se um dos comutadores for configurado eletronicamente para o estado “cruzado” (como é o caso de λ_i na figura), então o sinal do comprimento correspondente de onda é localmente derivado, permitindo que seja inserido um novo fluxo de dados [Mukherjee00].

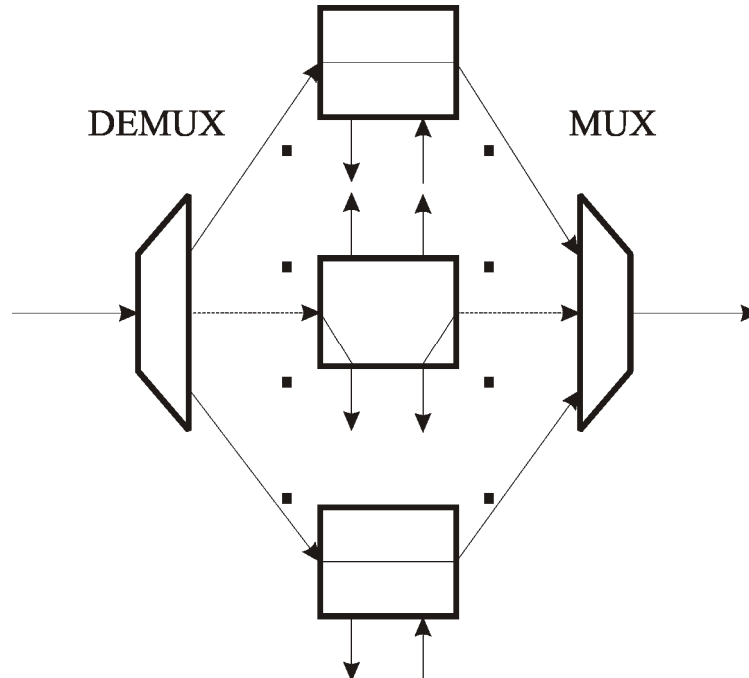


Figura 4.11 – Multiplexador insere/deriva por comprimento de onda.

4.1.2.8 Conectores Ópticos Cruzados (OXC)

Não aconteceu apenas a expansão de capacidade com a adoção do WDM em *backbones* de redes, mas o direcionamento das atuais redes buscando uma nova infraestrutura de rede, conhecida como camada fotônica. Neste processo, os Conectores Ópticos Cruzados (OXC – *Optical Cross Connect*) desempenharam um importante papel, eles formarão o alicerce desta camada fotônica, fornecendo flexibilidade e dinamicidade para a construção de topologias confiáveis de redes. Como exemplo, na Figura 4.12, camadas gerenciam a largura de banda através de uma variedade de elementos de rede. Cada camada executa um certo conjunto de funções, fornecendo determinado conjunto de serviços para as camadas superiores [Jackman99].

A principal função dos OXCs é a reconfiguração dinâmica da rede, ao nível de comprimento de onda, segundo propósitos de recuperação ou para acomodar mudanças na demanda da banda. Para realizar seu papel, eles devem satisfazer [Perrier00]:

- ✓ Gerenciamento de conexões e largura de banda;
- ✓ Suporte ao alinhamento de fluxos;
- ✓ Escalável a serviços entre 10 e 40 Gbps, reduzindo os custos da rede;
- ✓ Proteção/restauração, ao nível de comprimento de onda, maximizando a eficiência e a confiabilidade da infraestrutura de rede instalada;
- ✓ Roteamento e interconexão em nível de comprimento de onda, assim como a distribuição automática de quadros (frames), e
- ✓ Alocação dinâmica de comprimentos de onda.

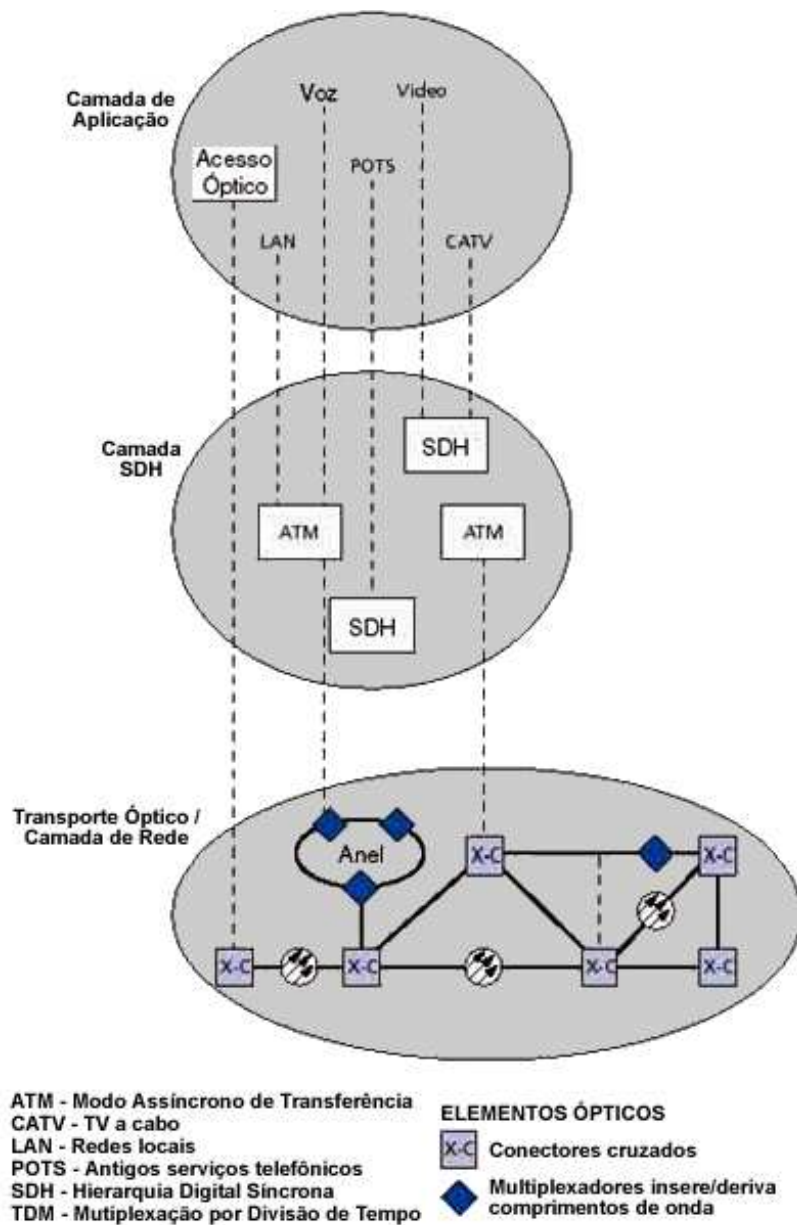


Figura 4.12 – Camadas gerenciando a largura de banda.

4.1.2.9 Multiplexadores Ópticos Insere/Deriva (OADM)

O crescimento do número de comprimentos de ondas e o aumento das distâncias entre os terminais geraram necessidades de inserções e derivações de comprimentos de ondas em localidades intermediárias. Logo, Multiplexadores Ópticos Insere/Deriva (OADM – *Optical Add/Drop Multiplexer*) flexíveis e reconfiguráveis se tornaram elementos críticos em redes WDM pelas necessidades de gerenciamento e de manipulação de canais a níveis ópticos.

OADM expandem a funcionalidade dos WADM por permitir a derivação de parte do tráfego em um comprimento de onda ou por poder extrair toda uma faixa de comprimentos de onda, sem conversões óptico-eletrônicas, oferecendo maiores capacidades de gerenciamento à rede.

4.1.3 Tendências nas Pesquisas em WDM

4.1.3.1 Controle e Gerenciamento da Rede

Em uma rede WDM, é necessário um mecanismo de controle para inserir e derivar novas conexões. Durante a recepção de uma requisição, este mecanismo permite a seleção de uma rota e a associação de determinado comprimento de onda para a conexão e para a configuração apropriada dos comutadores na rede. Este mecanismo, que pode ser centralizado ou distribuído, permite a constante atualização da utilização dos comprimentos de onda na rede.

Sistemas distribuídos são, geralmente, os preferidos para este tipo de controle por serem mais robustos que sistemas centralizados. São vários os objetivos de pesquisa para este tipo de sistema, em que todos buscam minimizar a probabilidade de insucesso de requisições de conexão, os atrasos durante a configuração da conexão e a banda utilizada para as mensagens de controle, assim como, maximizar a escalabilidade destas redes [Mukherjee00].

4.1.3.2 Gerenciamento de falhas

Em uma rede WDM, assim como em outras redes, a falha de um elemento pode gerar perda de informação. Há vários estudos envolvendo este tema, a maioria deles baseada em reserva (*backup*) de recursos ou em restauração dinâmica. Nos casos em que se utiliza reserva de recursos, a interrupção do serviço na rede é resolvida pela utilização do recurso em reserva. Em restauração dinâmica, a capacidade não-utilizada disponível na rede é utilizada para a restauração do serviço afetado pela falha. Geralmente, esquemas de restauração dinâmica são mais eficientes, enquanto que a restauração por reserva de recursos oferece maior velocidade e fornece garantias de recuperação [Mukherjee00].

Três dos esquemas de proteção contra falhas em redes ópticas, são:

- ✓ **Proteção 1 + 1:** Para cada conexão, há uma reserva constituída de um enlace dedicado com rota e comprimento de onda configurado no momento da conexão;
- ✓ **Restauração de enlace:** Todas as conexões que atravessam o enlace falho são reroteadas em volta deste enlace de maneira dinâmica sem que os nós transmissor e o receptor tomem conhecimento da falha, e
- ✓ **Restauração do caminho:** Quando acontece uma falha e os nós fonte e destino tomam conhecimento desta falha, eles, independentemente, se encarregam de achar uma nova rota. Se não for encontrada uma nova rota, a conexão é perdida.

4.1.3.3 Replicação

É a habilidade de uma rede aceitar uma única mensagem de uma aplicação e entregar cópias desta mensagem para múltiplos recipientes em diferentes localizações. Uma árvore permite que um transmissor tenha muitos mais vizinhos lógicos, levando a um denso diagrama virtual de interconexões e a menores distâncias entre pontos na rede. Um conjunto de árvores em uma rede WDM melhora a performance do tráfego *unicast*, *multicast* e difusão. No entanto, tal rede necessita de comutadores ópticos com capacidade de realizar multicast e mais potência no sinal para evitar a perda de potência devido a sua divisão [Mukherjee00].

Há muitas aplicações que fazem replicação, mas suas implementações não são muito eficientes por que as atuais redes foram projetadas para suportar apenas comunicação ponto-a-ponto. Incluem-se entre estas aplicações vídeo conferência, distribuição de arquivos e software, incluindo replicação de arquivos, distribuição de notícias pela Internet, listas de e-mail, etc.

4.1.3.4 Camada Física

Pesquisas em arquiteturas de redes ópticas mostram que sem o conhecimento da capacidade e das limitações dos dispositivos que a compõem, pode-se produzir arquiteturas irrealizáveis; similarmente, pesquisas em novos dispositivos ópticos, nem sempre chegam a conceitos aceitáveis, levando sofisticadas tecnologias ao sub-aproveitamento ou, até mesmo, a sua completa inutilidade. Óptica tem muitas

características desejáveis, mas ela também possui algumas propriedades indesejáveis como a degradação do sinal à medida que ele se propaga pela rede.

A degradação do sinal acontece devido a imperfeições em componente da rede, tais como segmentos de fibra, amplificadores de fibra dopada a érbio (EDFA – *Erbium Doped Fiber Amplification*), comutadores, etc. São três as formas de regeneração do sinal degradado [Mukherjee00]:

- ✓ **1R (Regeneração Óptica):** Amplificação simples usando EDFA ou qualquer outro amplificador;
- ✓ **2R (Regeneração e Reformatação Óptica):** Conversão opto-eletrônica do sinal e remodulação direta através de laser, e
- ✓ **3R (Regeneração, Reformatação e Resincronização Óptica):** Em redes como SDH, que utiliza a fibra óptica apenas como meio de transmissão, o sinal é amplificado primeiro pela conversão do fluxo de informação em um sinal eletrônico de dados, e então retransmitido opticamente.

4.1.3.5 Alinhamento de Fluxos

Alinhamento de fluxos é o termo usado para descrever como diferentes fluxos são multiplexados e tem acesso a camada fotônica. Em uma rede WDM/SDH em anel, cada comprimento de onda pode carregar vários fluxos de velocidade mais lenta (operando segundo o padrão TDM). Uma conexão virtual precisa ser inserida e derivada somente nos dois nós finais da conexão. Como resultado, Multiplexadores Insere/Deriva eletrônico (ADM – *Add/Drop Multiplexer*) em nós intermediários, fazem o *bypass* da janela de tempo (*timeslot*). No lugar de um ADM para todos os comprimentos de onda em todos os nós, é possível se ter alguns nós no mesmo comprimento de onda sem necessidade de ADM em qualquer janela de tempo. Desta forma, tem-se a redução do número total de ADMs na rede e, em consequência, o barateamento desta rede [Mukherjee00].

4.1.3.6 Roteamento de Pacotes em Redes Ópticas

Enquanto telecomunicações e informática convergem, o tráfego de dados gradualmente excede o tráfego telefônico. Isto gera a necessidade de se atualizar as atuais redes de comutação de circuito para redes que suportem o tráfego de dados, ou

seja, comutação de pacote. Enquanto WDM dá-nos a oportunidade de multiplicar a capacidade da rede, as atuais tecnologias ópticas de comutação permitem-nos distribuir rapidamente esta enorme banda WDM. Entre todos os esquemas de comutação, a comutação fotônica de pacotes parece ser um forte candidato, devido a sua alta velocidade, transparência nas taxas e formato dos dados e pela configurabilidade que ele oferece. A meta desta área de pesquisa é investigar casos críticos que envolvam projeto e implementação de redes de comutação fotônica de pacotes, e, através de simulação em computador e experimentos de *hardware*, encontrar a solução adequada [Mukherjee00].

4.1.3.7 Multiplexação Densa por Divisão em Comprimento de Onda (DWDM)

A tecnologia DWDM é uma evolução da tecnologia WDM. A WDM utiliza duas regiões de comprimentos de onda, 1310 nm e 1550 nm. O DWDM aproveita-se dos avanços da tecnologia óptica (exemplo: *lasers* ajustáveis, filtros ópticos precisos, etc.) para gerar vários comprimentos de onda na faixa de 1550 nm. A recomendação G.694.1 do ITU-TS ilustra, na Tabela 4.2, a distribuição de canais DWDM com comprimentos de onda entre 1530.04 e 1624.89 nm e espaçamentos, entre eles, de 12.5, 25, 50 e 100 GHz.

Espaçamento de:				Comprimento de onda (nm)
12.5 GHz	25 GHz	50 GHz	100 GHz	
195.9375	–	–	–	1530.04
195.9250	195.925	–	–	1530.14
195.9125	–	–	–	1530.24
195.9000	195.900	195.90	195.9	1530.33
195.8875	–	–	–	1530.43
195.8750	195.875	–	–	1530.53
195.8625	–	–	–	1530.63
195.8500	195.850	195.85	–	1530.72
195.8375	–	–	–	1530.82
195.8250	195.825	–	–	1530.92
195.8125	–	–	–	1531.02
195.8000	195.800	195.80	195.8	1531.12
195.7875	–	–	–	1531.21
195.7750	195.775	–	–	1531.31
195.7625	–	–	–	1531.41
195.7500	195.750	195.75	–	1531.51

Espaçamento de:				Comprimento de onda (nm)
12.5 GHz	25 GHz	50 GHz	100 GHz	
195.7375	–	–	–	1531.60
195.7250	195.725	–	–	1531.70
195.7125	–	–	–	1531.80
195.7000	195.700	195.70	195.7	1531.90
195.6875	–	–	–	1532.00
195.6750	195.675	–	–	1532.09
195.6625	–	–	–	1532.19
•	•	•	•	•
•	•	•	•	•
•	•	•	•	•
•	•	•	•	•
•	•	•	•	•
•	•	•	•	•
193.2375	–	–	–	1551.42
193.2250	193.225	–	–	1551.52
193.2125	–	–	–	1551.62
193.2000	193.200	193.20	193.2	1551.72
193.1875	–	–	–	1551.82
193.1750	193.175	–	–	1551.92
193.1625	–	–	–	1552.02
193.1500	193.150	193.15	–	1552.12
193.1375	–	–	–	1552.22
193.1250	193.125	–	–	1552.32
193.1125	–	–	–	1552.42
193.1000	193.100	193.10	193.1	1552.52
193.0875	–	–	–	1552.62
193.0750	193.075	–	–	1552.73
193.0625	–	–	–	1552.83
193.0500	193.050	193.05	–	1552.93
193.0375	–	–	–	1553.03
193.0250	193.025	–	–	1553.13
193.0125	–	–	–	1553.23
193.0000	193.000	193.00	193.0	1553.33
192.9875	–	–	–	1553.43
192.9750	192.975	–	–	1553.53
192.9625	–	–	–	1553.63
•	•	•	•	•
•	•	•	•	•
•	•	•	•	•

Espaçamento de:				Comprimento de onda (nm)
12.5 GHz	25 GHz	50 GHz	100 GHz	
•	•	•	•	•
•	•	•	•	•
•	•	•	•	•
184.7750	184.775	–	–	1622.47
184.7625	–	–	–	1622.58
184.7500	184.750	184.75	–	1622.69
184.7375	–	–	–	1622.80
184.7250	184.725	–	–	1622.91
184.7125	–	–	–	1623.02
184.7000	184.700	184.70	184.7	1623.13
184.6875	–	–	–	1623.24
184.6750	184.675	–	–	1623.35
184.6625	–	–	–	1623.46
184.6500	184.650	184.65	–	1623.57
184.6375	–	–	–	1623.68
184.6250	184.625	–	–	1623.79
184.6125	–	–	–	1623.90
184.6000	184.600	184.60	184.6	1624.01
184.5875	–	–	–	1624.12
184.5750	184.575	–	–	1624.23
184.5625	–	–	–	1624.34
184.5500	184.550	184.55	–	1624.45
184.5375	–	–	–	1624.56
184.5250	184.525	–	–	1624.67
184.5125	–	–	–	1624.78
184.5000	184.500	184.50	184.5	1624.89

Tabela 4.2: Distribuição de comprimentos de onda para espaçamentos de 12.5, 25.0, 50.0 e 100,0 GHz.

A tendência é que sistemas DWDM utilizem por volta de 128 canais em uma única fibra. Se cada canal transmitir 10 Gbps, então haverá capacidade de transmissão de até 1,28 Tbps por fibra.

4.1.4 Integração a outras Arquiteturas de Redes

A crescente demanda por serviços Internet faz com que as atuais redes caminhem cada vez mais em direção a opticalização. A escolha das tecnologias e arquiteturas a serem empregadas para acomodar este crescimento envolve decisões econômicas, de desempenho, confiabilidade e projeções futuras. O problema se torna

ainda mais complexo pelas diferentes combinações de tecnologias, sendo as mais comuns (Figura 4.13) [Doshi98]:

- ✓ IP sobre ATM centro da camada de transporte;
- ✓ IP diretamente sobre o centro da camada de transporte;
- ✓ Alternativas do núcleo da camada de transporte:
 - o Anéis SDH sobre WDM;
 - o Redes ligadas por comprimentos de ondas suportados por conectores cruzados ópticos ou elétricos e WDM, e
 - o Redes ponto-a-ponto ligadas por comprimentos de ondas sem conectores cruzados;

Além dos serviços IP, WDM também pode suportar outros serviços e protocolos de rede, sendo esta sua principal vantagem. Desta forma, esta tecnologia permite a coexistência de múltiplos e independentes protocolos de rede em uma mesma fibra [Ghani00].

Devido às altas taxas de transmissão, a falha de um componente leva à perda de grandes quantidades de informação. Sendo assim, são utilizados dois esquemas de proteção: proteção na camada WDM (há um caminho de reserva para cada caminho ativo) e a restauração de dados pela camada IP (falhas são detectadas e os dados são reenviados) são as duas formas de minimizar este problema.

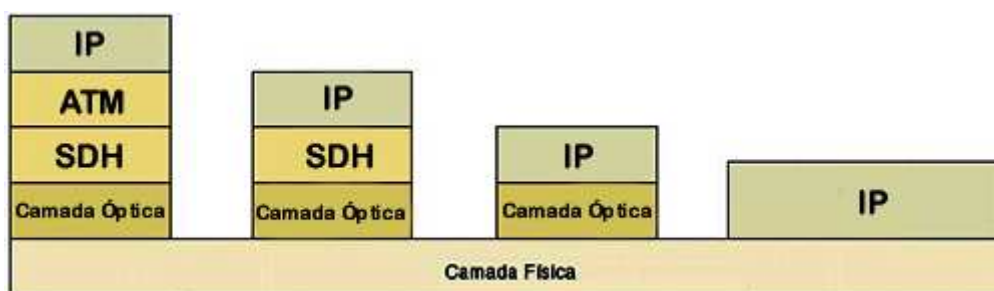


Figura 4.13 – Pilha de protocolos desenvolvidos para a integração de IP sobre WDM.

4.1.4.1 IP sobre ATM (IP/ATM)

As camadas IP ou IP/ATM podem operar sobre a camada SDH por meio de interfaces (Figura 4.14). São duas as principais vantagens do casamento IP sobre ATM [Doshi98]:

- ✓ Primeiro, por ATM ser um protocolo de rede orientado à conexão, que permite o planejamento de tráfego, assim como flexibilidades de roteamento e alinhamento de tráfegos;
- ✓ A segunda vantagem é a habilidade de fornecer diferenciação de Qualidade de Serviço [Fernandez01];

Apesar das vantagens, esta associação introduz uma variação de 20 e 25% de *overhead*, composto principalmente por duas partes: cabeçalhos ATM e atrasos da camada de adaptação ATM (AAL). O uso da camada ATM também significa o emprego de equipamentos adicionais necessários a esta camada.

Logo, a escolha entre IP sobre ATM ou diretamente sobre o núcleo óptico envolve o compromisso, entre ineficiência causada por protocolos e equipamentos adicionais e eficiência gerada por flexibilidades de roteamento e alinhamento de tráfegos fornecidos pela camada ATM.

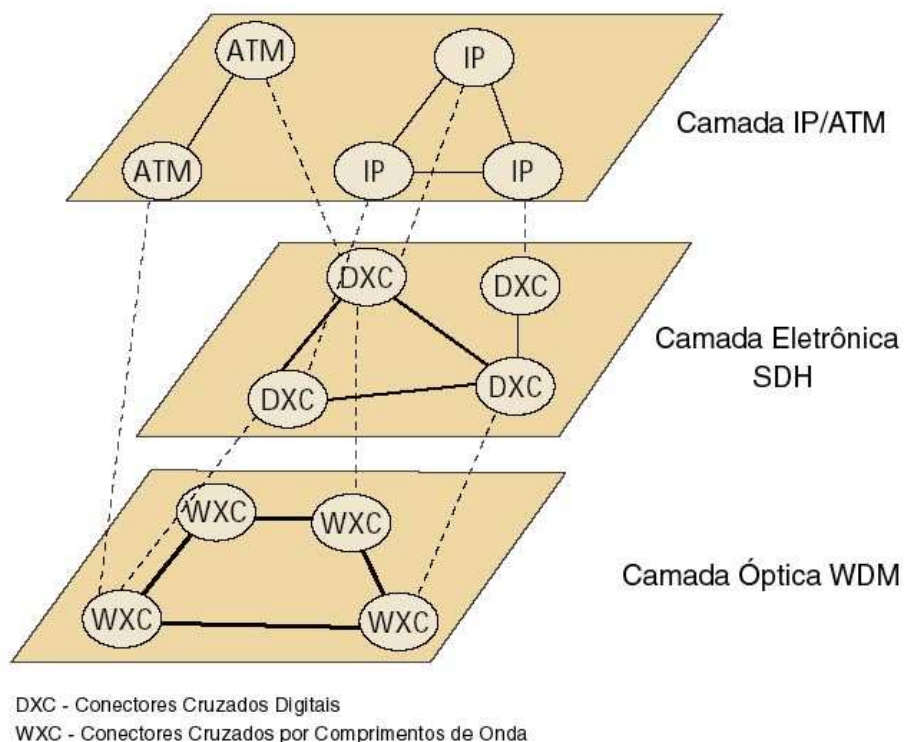


Figura 4.14 – Camadas ATM/IP sobre SDH sobre WDM.

4.1.4.2 IP sobre SDH

Redes SDH são tipicamente organizadas segundo anéis interconectados (Figura 4.15). Esta figura mostra vários anéis SDH, compostos principalmente por

ADMs. Os anéis podem apresentar velocidades diferentes, tais como OC-3 e OC-12. Dispositivos cruzados são utilizados para interconectar estes anéis [Cavendish00].

Apesar desta associação inserir aproximadamente 4% de *overhead* [Anderson99], ela possui funções que permitem o gerenciamento da largura de banda e de canais ativos e a detecção e restauração de falhas. Esta camada também possui interfaces que oferecem suporte direto a IP ou IP sobre ATM [Doshi98].

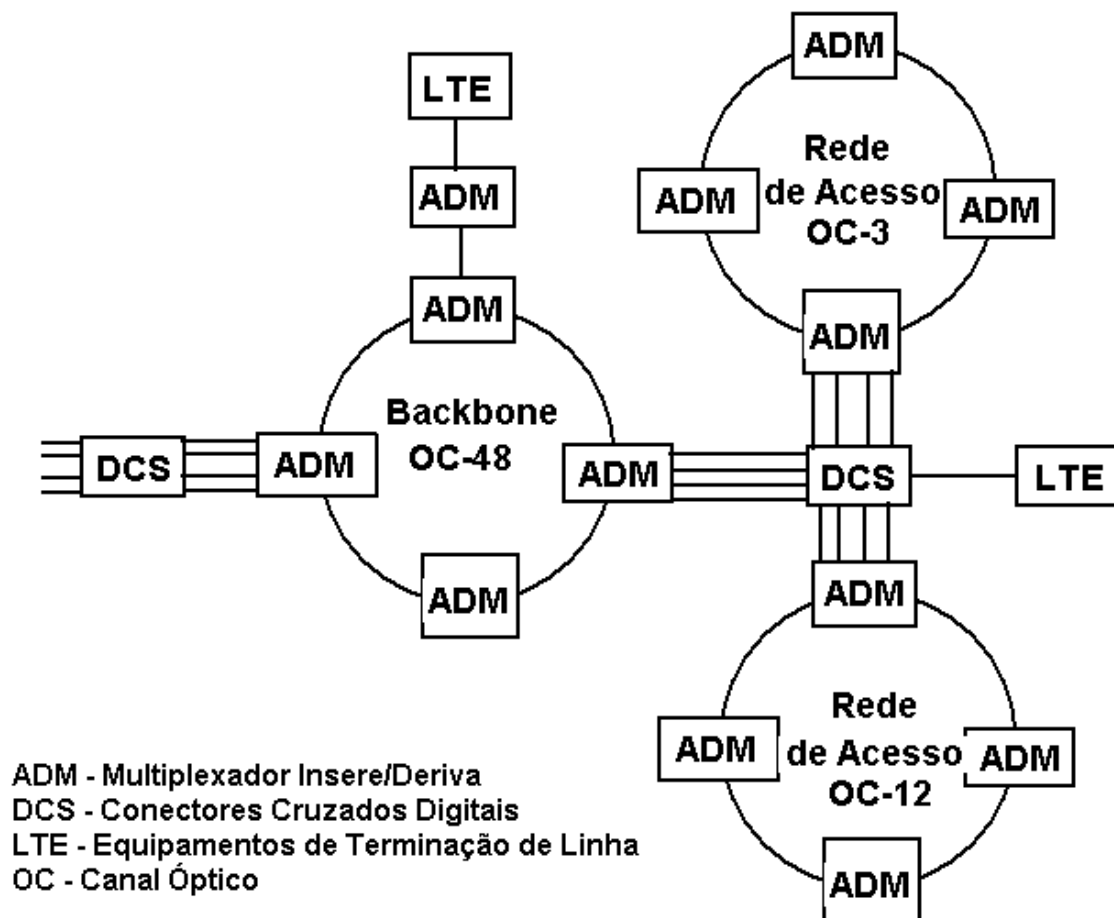


Figura 4.15 – Exemplo de rede SDH.

4.1.4.3 IP Direto Sobre WDM

Grandes esforços estão sendo feitos para o desenvolvimento de padrões e produtos que reduzam o *overhead* de transmissão e permitam a eliminação de camadas superiores, permitindo que IP opere diretamente sobre a camada fotônica segundo WDM. Pelas Tabelas 4.3 e 4.4 [Anderson99] se tem uma idéia da representatividade do *overhead* de transmissão e dos ganhos pela eliminação das camadas SDH e ATM [Kartalopoulos99]. A Tabela 4.3 mostra a distribuição de cinco tamanhos

predominantes de pacotes no *backbone* Internet. Estes dados foram obtidos do *National Laboratory of Advanced Network Research* durante 5 minutos, onde foram transmitidos mais de 5 milhões de pacotes, totalizando 6,7 Gbps. A tabela 4.4 mostra o *overhead* necessário para IP sobre SDH e IP/ATM [Ghani00].

Tamanho do pacote IP	Total de pacotes (%)	Total de bytes (%)
40	38,9	4,4
1500	11,5	48,7
552	10,1	15,8
44	6,1	0,8
576	4,9	7,9

Tabela 4.3: Distribuição do tamanho dos pacotes em *backbones* Internet.

Tamanho do pacote IP	Overhead de IP sobre SDH (%)	Overhead da camada ATM (%)
40	20,0	165,0
1500	0,5	13,1
552	1,4	15,2
44	18,2	140,9
576	1,4	19,6

Tabela 4.4: Percentagem o *overhead* inserido pelas camadas SDH e ATM.

4.2 Multiplexação Óptica por Divisão do Tempo (OTDM)

4.2.1 Princípio

Na multiplexação óptica por divisão do tempo, um fluxo com taxa de bit mais elevada é construído pela multiplexação de diferentes fluxos ópticos que operam em menores taxas de bit, conforme a Figura 4.16.

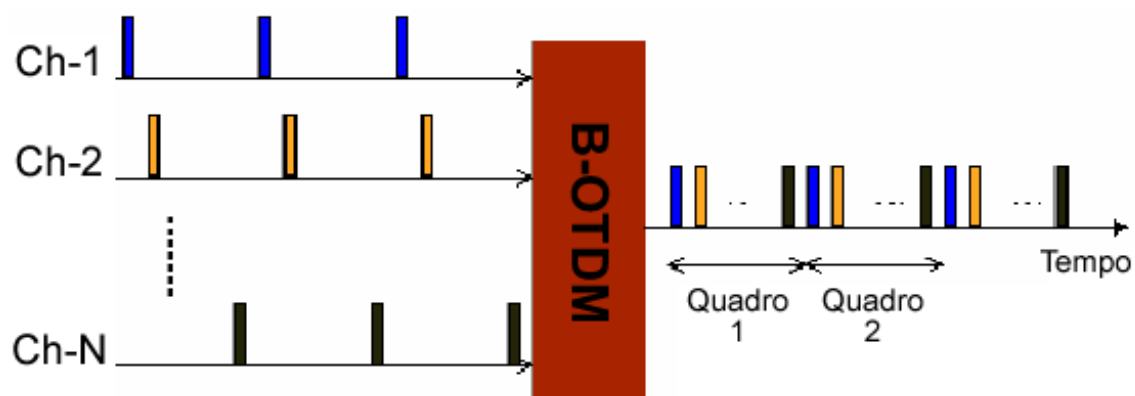


Figura 4.16 – Multiplexação OTDM.

No receptor, acontece a demultiplexação, ou seja, um sinal óptico com alta taxa de bit é demultiplexado em vários outros sinais ópticos de menor taxa, antes da detecção e conversão para o domínio elétrico, conforme a Figura 4.17.

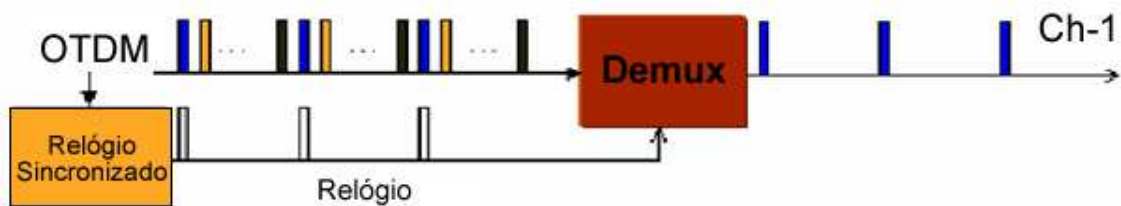


Figura 4.17 – Demultiplexação OTDM.

Para realizar a multiplexação OTDM pulsos operando em menores taxas são multiplexados, pela intercalação de bits, em um fluxo com taxa mais elevada. Na geração dos diferentes canais OTDM, cada um dos N canais é modulado e atrasado individualmente em $1/N$ período do tempo original. Os N canais são recombinaados, gerando o sinal multiplexado, conforme a Figura 4.18.

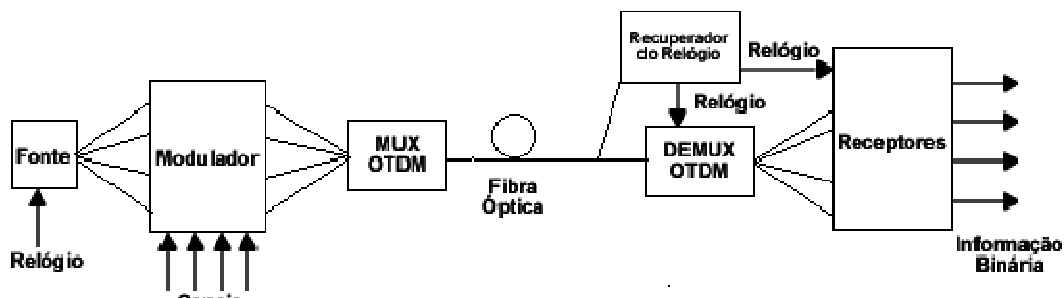


Figura 4.18 – Sistema de transmissão OTDM.

Ao final da transmissão, o canal OTDM é demultiplexado em N fluxos de pulsos ópticos com taxas mais baixas, cuja soma total é igual à taxa do agregado de entrada do demultiplexador. A extração do sincronismo do fluxo de bit, durante a chegada ao receptor, é feita pelo recuperador do relógio. Uma vez extraído o sincronismo, este controlará o bloco responsável pela demultiplexação, ou seja, o processo responsável pela abertura e fechamento da janela de recuperação. O sinal demultiplexado é então entregue ao seu destino.

Basicamente, para realizar um sistema de transmissão OTDM, é necessário uma fonte de dados (fonte pulsante), um meio para a transmissão do sinal (multiplexador OTDM + fibra óptica) e um demultiplexador equipado com um dispositivo para a recuperação do sincronismo (recuperador do relógio + demultiplexador OTDM).

Capítulo 5

Demultiplexador Óptico Temporal Baseado em Anel Não-Linear

Este capítulo apresenta o modelo de um Demultiplexador Óptico Temporal baseado em um NOLM, usando o SOA como elemento gerador de não-linearidades [Chraplyvy90]. Este demultiplexador também é conhecido por Demultiplexador Terahertz Assimétrico (TOAD – *Terahertz Optical Asymmetric Demultiplexer*) [Sokoloff93].

5.1 Interferômetro de Sagnac

Um Interferômetro de Sagnac consiste de um acoplamento óptico 2x2 com as duas portas de saída conectadas por um longo anel de fibra óptica [Agrawal92,Doran88]. Tal configuração é mostrada esquematicamente na Figura 5.1. O sinal luminoso penetra no interferômetro, sendo replicado no acoplador em duas frentes de propagação, uma de sentido horário e a outra de sentido anti-horário. A relação da divisão no acoplador é de $x:1-x$, pela qual uma fração x da potência de entrada P_0 propaga pelo anel do interferômetro no sentido horário e a fração restante da potência de entrada, $1-x$, tem propagação no sentido anti-horário.

Para simplificar a análise do Interferômetro de Sagnac, as amplitudes dos campos ópticos serão analisadas em lugar de suas potências. Sendo a amplitude igual à raiz quadrada da potência, a amplitude de entrada é definida como:

$$A_0 = \sqrt{P_0} \quad (5.1)$$

As potências dos campos ópticos viajando nos sentidos horário e anti-horário são, respectivamente, $P_f = xP_0$ e $P_b = (1 - x)P_0$. Portanto, as amplitudes correspondentes são dadas por:

$$A_f = \sqrt{P_f} = \sqrt{xP_0} = \sqrt{x}A_0 \quad (5.2)$$

e

$$A_b = \sqrt{-P_b} = \sqrt{-(1 - x)P_0} = i\sqrt{1 - x}A_0 \quad (5.3)$$

Pela aplicação da Equação de Euler, observa-se que o sinal que segue em sentido anti-horário sofre um desvio de $\pi/2$ em relação ao sinal que segue em sentido horário quando cruza o acoplador pela segunda vez [Agrawal95].

A saída do interferômetro é na forma de um campo refletido e um transmitido, conforme a Figura 5.1. A reflexão se dá pelo braço de fibra no qual o sinal penetrou no interferômetro enquanto que a transmissão acontece pelo outro.

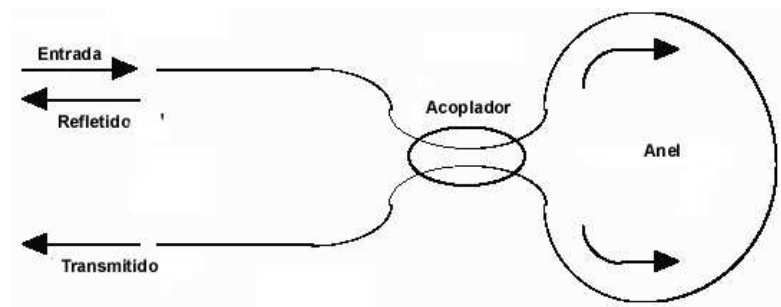


Figura 5.1 – Interferômetro de Sagnac.

Desprezando os efeitos não-lineares, as amplitudes dos campos transmitido e refletido podem ser calculadas pela observação de que a razão da divisão do sinal no acoplamento se mantém constante. Em outras palavras, uma fração x da potência que entra no acoplamento permanece no mesmo braço do anel e a fração restante, $1-x$ da

potência de entrada, é transferida ao outro braço. A amplitude do campo refletido é, portanto:

$$\begin{aligned}
 A_r &= \sqrt{x}A_b + i\sqrt{1-x}A_f \\
 A_r &= i\sqrt{x(1-x)}A_0 + i\sqrt{x(1-x)}A_0 \\
 A_r &= 2i\sqrt{x(1-x)}A_0
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

e a do transmitido

$$\begin{aligned}
 A_t &= \sqrt{x}A_f + i\sqrt{1-x}A_b \\
 A_t &= \sqrt{x}\sqrt{x}A_0 + i^2\sqrt{1-x}\sqrt{1-x}A_0 \\
 A_t &= xA_0 - (1-x)A_0 \\
 A_t &= (2x-1)A_0
 \end{aligned} \tag{5.5}$$

Essas equações governam o comportamento linear do Interferômetro de Sagnac, sendo resumidas graficamente no diagrama da Figura 5.2. Observa-se que o campo transmitido mantém a mesma fase do campo de entrada, ao passo que o campo refletido é desviado em $\pi/2$.

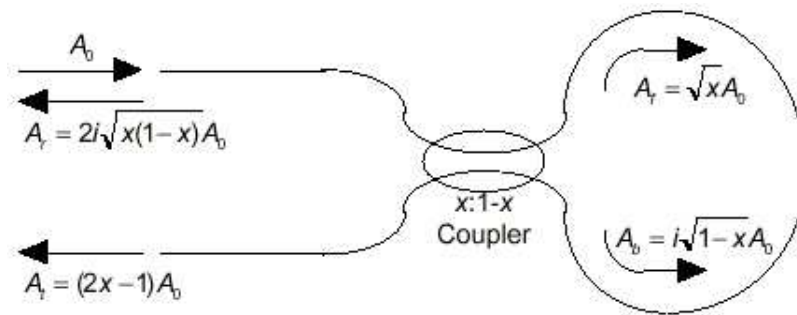


Figura 5.2 – Comportamento linear de um Interferômetro de Sagnac.

Na realidade, deve-se considerar o fenômeno não-linear de Automodulação de Fase (SPM – *Self-Phase Modulation*) e Modulação de Fase Cruzada (XPM – *Cross-Phase Modulation*) nas análises. Ambas as modulações SPM e XPM são resultantes do efeito óptico de Kerr, pelo qual o índice de refração da fibra óptica aumenta com o aumento da intensidade luminosa.

Sendo,

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{eff}} \quad (5.6)$$

n_2 é o índice do coeficiente não-linear, λ é o comprimento de onda e A_{eff} é a área efetiva do núcleo da fibra óptica [Doran88,Agrawal95].

Para os sinais A_f e A_b , de sentidos de propagação horário e anti-horário, as diferenças de fase introduzidas pela SPM, são respectivamente, expressos por:

$$\phi_{fs} = \gamma |A_f|^2 L_{eff} \quad (5.7)$$

e

$$\phi_{bs} = \gamma |A_b|^2 L_{eff} \quad (5.8)$$

onde L_{eff} é igual à $(1-e^{-\alpha L}) / \alpha$, correspondendo ao comprimento efetivo da fibra, α o coeficiente de perda na fibra e L seu comprimento.

Os desvios de fase nos sentidos horário e anti-horário, respectivamente, introduzidos pela XPM são expressos por:

$$\phi_{fx} = \gamma (|A_f|^2 + 2|A_b|^2) L_{eff} \quad (5.9)$$

e

$$\phi_{bx} = \gamma (2|A_f|^2 + |A_b|^2) L_{eff} \quad (5.10)$$

Embora o desvio de fase entre a SPM e a XPM seja diferente, a diferença de fase entre os sinais de sentidos contrários de propagação é idêntica, sendo a diferença de fase total igual a:

$$\Delta\phi = \gamma [x-(1-x)] |A_0|^2 L_{eff} \quad (5.11)$$

Ao passo que a SPM introduz um desvio de fase no campo proporcional à sua própria intensidade, XPM causa um desvio de fase proporcional a intensidade dos

demais campos que se propagam simultaneamente na mesma fibra. Desta maneira, cada um dos sinais luminosos induz o desvio de fase no sinal de sentido contrário. A magnitude do desvio de fase induzido pela XPM é duas vezes maior que o induzido pela SPM para a mesma intensidade de campo [Agrawal95].

Como os campos se propagam em sentidos contrários sob o mesmo comprimento de onda pela mesma fibra, a relação do desvio de fase entre os dois campos depende somente da relação de potência entre eles. Isto, claro, é determinado pela razão $x:1-x$ do acoplamento.

Um caso especial ocorre quando a razão da divisão é exatamente 0.5:0.5. Neste caso os campos de sentidos contrário de propagação apresentam exatamente a mesma potência e experimentam desvios idênticos de fase devido aos efeitos das modulações SPM e da XPM. Desta forma, não há diferença de fase relativa entre os campos devido as não-linearidades da fibra [Chraplyvy90], e nem a SPM ou a XPM afetam o acoplamento destes campos após a volta completa pelo anel de fibra. Neste caso, pode-se usar as equações que descrevem o comportamento linear do Anel de Sagnac para descrever os campos refletido e transmitido. Usando $x = 0.5$, obtemos:

$$\begin{aligned} A_r &= 2i\sqrt{x(1-x)}A_0 \\ A_r &= 2i\sqrt{0.5(1-0.5)}A_0 \\ A_r &= iA_0 \end{aligned} \tag{5.12}$$

e

$$\begin{aligned} A_t &= (2x - 1) A_0 \\ A_t &= (2 \cdot 0,5 - 1) A_0 \\ A_t &= 0 \end{aligned} \tag{5.13}$$

Portanto, quando $x = 0.5$, o Interferômetro de Sagnac atua como um espelho perfeito, refletindo 100% da radiação de entrada.

Quando $x \neq 0.5$, as amplitudes dos campos que seguem em sentidos horário e anti-horário são diferentes, assim as SPM e XPM atuam sobre os mesmos para obter um desvio relativo de fase. Este desvio de fase gera interferências quando os campos voltam ao acoplamento, as quais afetam a razão da luz transmitida e refletida na saída do

interferômetro. Um Interferômetro de Sagnac que tira vantagem dos efeitos não-lineares da fibra é conhecido com Anel Refletivo Não Linear (NOLM) [Uchiyama97].

5.2 Anel Refletivo Não-Linear (NOLM)

Levando-se em conta que os desvios de fase provocados pela SPM e pela XPM, os campos de sentidos horário e anti-horário de propagação que alcançam o acoplamento no final do anel são descritos por [Agrawal01]:

$$A_f' = A_f \exp \left[i\phi_0 + i\gamma \left(|A_f|^2 + 2|A_b|^2 \right) L \right] \quad (5.14)$$

e

$$A_b' = A_b \exp \left[i\phi_0 + i\gamma \left(2|A_f|^2 + |A_b|^2 \right) L \right] \quad (5.15)$$

onde ϕ_0 é o desvio linear de fase devido a dispersão, L é o comprimento do anel de fibra, e

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{eff}} \quad (5.16)$$

Os campos refletido e transmitido na saída do NOLM são:

$$A_r = \sqrt{x} A_b' + i\sqrt{1-x} A_f' \quad (5.17)$$

e

$$A_t = \sqrt{x} A_f' + i\sqrt{1-x} A_b' \quad (5.18)$$

Segue a isto que os dois campos retornam ao acoplamento após serem submetidos ao mesmo atraso. O sinal de saída é determinado pela diferença de fase não-linear $\Delta\phi$ entre eles. É fácil mostrar que para tal configuração, a transmissividade do pulso T é dada por:

$$T \equiv \frac{|A_t|^2}{|A_0|^2} \quad (5.19)$$

$$T = 1 - 2x(1-x)\{1+\cos[\Delta\phi]\}$$

Pode-se verificar que quando $x = 0.5$, a transmissividade é [Agrawal95]:

$$\begin{aligned} T &= 1 - 2 * 0.5(1-0.5)\{1+\cos 0\} \\ T &= 1 - 0.5\{1+1\} \\ T &= 0 \end{aligned} \quad (5.20)$$

sendo que neste caso, o NOLM se comporta com um espelho perfeito. Para $x \neq 0.5$, a transmissividade fica em função da potência injetada dentro do NOLM e chega a 100% sempre que for satisfeita a seguinte relação:

$$(1 - 2x) \gamma |A_0|^2 L = (2m - 1) \pi \quad (5.21)$$

onde m é um inteiro.

5.3 Demultiplexador Baseado no NOLM

São várias as aplicações derivadas do uso de Anel Óptico Não-Linear [Jinno92,Yu02a,Yu02b,Kolleck97,Conelly02]. Dentre as quais, a demultiplexação OTDM é uma das principais [Uchiyama93a,Uchiyama93b,Uchiyama97,Phillips97].

Para a construção do Demultiplexador Óptico Temporal baseado no NOLM é necessária a inserção adicional de um acoplador óptico 2x2 no interior do Anel de Sagnac e um elemento gerador de não-linearidade (SOA) distante do ponto-médio do anel em Δx , conforme a Figura 5.3. O sinal luminoso penetra o anel pelo acoplador principal, sendo replicado em duas frentes de propagação, uma de sentido horário e a outra de sentido anti-horário, sempre localizados em lados opostos do anel e equidistantes de seu ponto médio, conforme descrição de funcionamento do NOLM. Cada uma delas atravessa o SOA apenas uma vez e retornam simultaneamente ao acoplador principal.

Para a recuperação do canal desejado, necessita-se que um dos canais seja replicado em sua origem, dando origem ao sinal de controle (relógio) que permanece alinhado no tempo ao canal original. O pulso de controle é injetado no anel pelo acoplador interno, atravessa o SOA e sai do anel. Ele tem energia suficiente para modificar as propriedades ópticas do SOA segundo uma escala de tempo da ordem de pico-segundos ou até menos [Sokoloff93]. Após esta rápida transição, as propriedades ópticas do SOA são recuperadas.

Quando a assimetria no Anel de Sagnac, em função do posicionamento assimétrico do SOA em seu interior, gera um desvio de fase de 180° entre as réplicas de sentidos opostos de propagação durante seu cruzamento na passagem pelo acoplador principal, ao final da volta completa pelo Anel de Sagnac, abre-se uma janela de transmissão e o canal desejado é recuperado conforme o pulso B na Figura 5.3.

O posicionamento assimétrico do SOA em relação ao centro do anel obriga que as frentes de propagação o atravessem em momentos distintos. O pulso de controle é posicionado no anel de forma que ele chegue ao SOA após a passagem de um dos sinais replicados e, imediatamente, antes da chegada do outro sinal replicado.

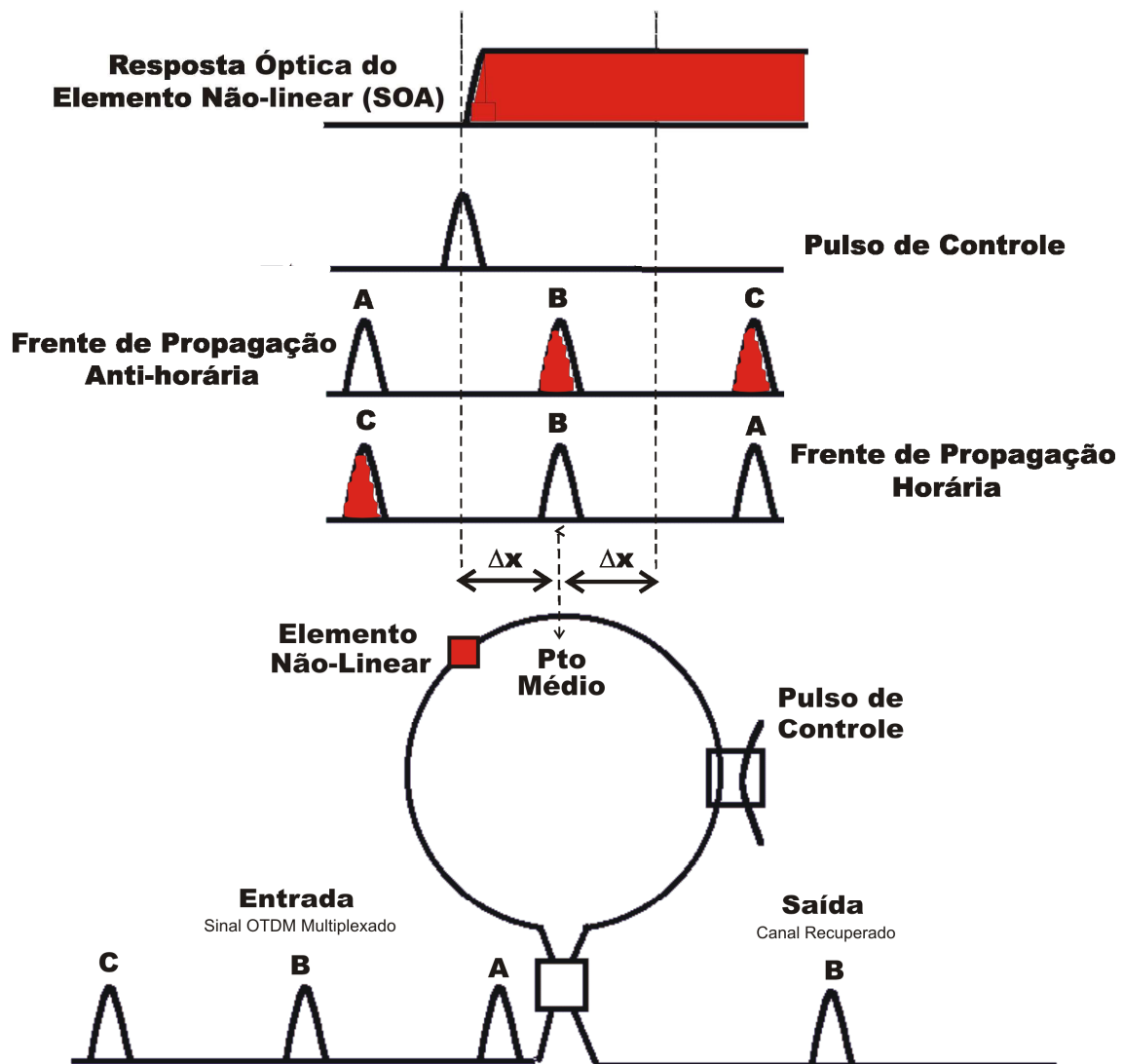


Figura 5.3 – Comportamento não-linear de um Interferômetro de Sagnac.

Demultiplexadores Ópticos Temporais usando SOA [Connelly02] como elemento não linear no Anel de Sagnac são plenamente adaptáveis aos modelos de Redes Totalmente Ópticas por não fazerem uso de dispositivos eletro-eletrônicos e oferecerem vantagens em relação às outras configurações de NOLM. São mais compactos que aqueles usando a não-linearidade de uma fibra óptica que constitui o anel. São, portanto, mais versáteis, sendo capazes de operar com taxas muito elevadas, da ordem de 250 Gbps [Glesk94]. Por este motivo, também são conhecidos como TOAD [Connelly02].

Capítulo 6

Montagem e Configuração do Demultiplexador OTDM

Neste capítulo são apresentados o modelo de um demultiplexador temporal OTDM e aspectos relevantes de sua montagem e configuração no ambiente de simulação *VPItransmissionMaker*.

6.1 Modelo do Demultiplexador OTDM

A Figura 6.1 representa o modelo de um demultiplexador OTDM baseado em anel óptico não-linear. Assume-se para cada um dos sinais (pulsos ópticos) o formato gaussiano. No próximo capítulo, um estudo assumindo formato solitônico é apresentado.

O sinal de controle (relógio) consiste de um trem de pulsos ópticos na taxa de transmissão de um dos canais. Ele é injetado no anel de forma a se propagar somente em uma direção (sentido horário ou no sentido anti-horário). Entre a saída do combinador e o anel de Sagnac ambos os pulsos, multiplexado e de controle, sofrem amplificação. Na chegada ao anel, o sinal multiplexado é replicado em duas frentes de propagação, uma em sentido horário e a outra em sentido anti-horário.

No modelo simulado, um SOA [Conelly02] é introduzido no interferômetro de Sagnac com a finalidade de gerar as não-linearidades necessárias à construção do demultiplexador óptico.

O posicionamento assimétrico do SOA em relação ao centro do anel de Sagnac, conforme a Figura 6.1, obriga que as frentes de propagação o atravessem em momentos distintos. O pulso de controle é posicionado no anel de forma que o mesmo alcance o SOA logo após a passagem de um dos sinais replicados e, imediatamente, antes da chegada do outro sinal replicado.

O índice de refração da região ativa do SOA varia com as densidades de portadores, da mesma forma que o seu ganho. Isto implica na dependência mútua entre a fase e o ganho de um pulso óptico que se propaga pelo amplificador.

Quando um pulso óptico é injetado em um SOA, são provocadas variações nas densidades de portadoras. Devido ao tempo de vida finito das portadoras, a parte dianteira de um pulso sofre atraso de fase diferente daquele experimentado pela parte final (traseira) do pulso. Isto corresponde ao efeito não-linear conhecido como SPM [Agrawal95], responsável por alterações na forma (tempo) e no espectro (frequência) do pulso. Este efeito pode ser usado, por exemplo, para construir um compensador de dispersão, com a finalidade de mitigar dispersão cromática em uma fibra óptica.

Quando mais de um sinal são injetados em um SOA, aparecerá a XPM entre os sinais [Agrawal95]. Como XPM provoca apenas mudanças de fase, o SOA tem que ser colocado na configuração de um interferômetro, com a finalidade de converter variações de fase em variações de intensidade através de interferência construtiva ou destrutiva.

A potência do sinal do relógio é ajustada de forma a introduzir um deslocamento não-linear de fase pela XPM [Agrawal95] de 180° aos pulsos do canal desejado. Desta forma, os pulsos pertencentes ao canal selecionado pelo sinal do relógio são transmitidos pelo anel, enquanto que os demais canais são refletidos de volta no sentido da porta de entrada.

Canais diferentes podem ser selecionados retardando o sinal do relógio em uma quantidade de tempo adequada. Todos os canais podem ser simultaneamente demultiplexados usando um banco de anéis de Sagnac em paralelo.

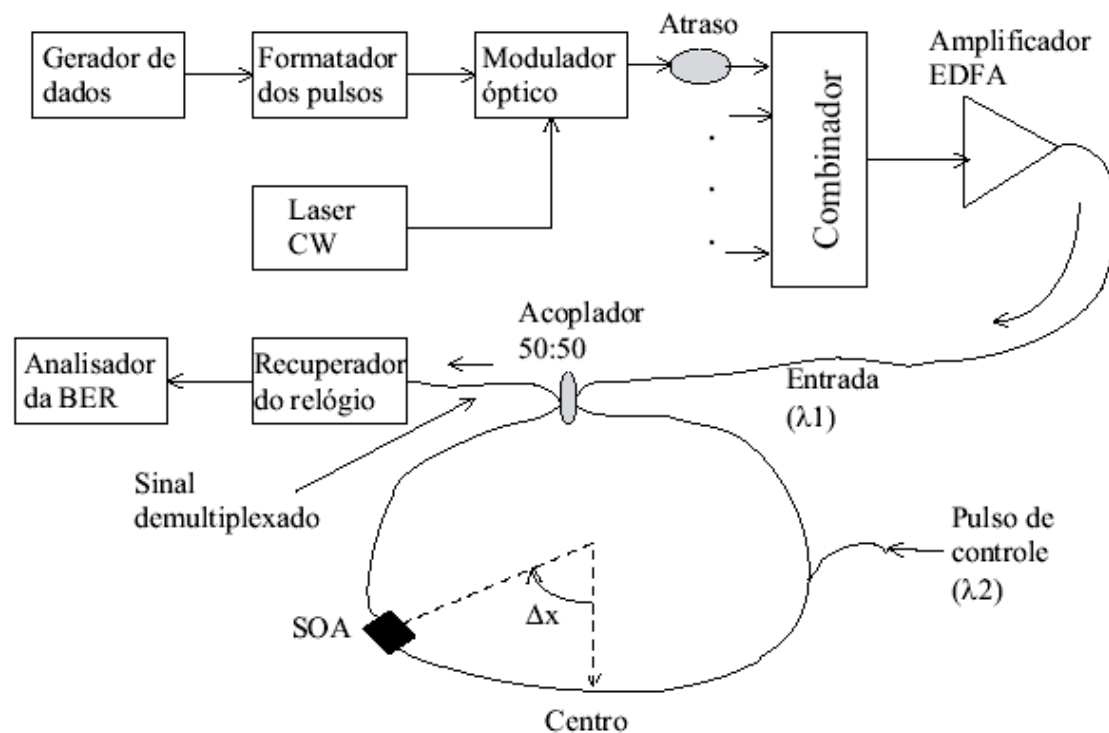


Figura 6.1 – Modelo do sistema.

6.2 Montagem

O demultiplexador, ora proposto, foi modelado conforme apresentado na Figura 6.2. Nela é mostrado o modelo do demultiplexador OTDM implementado no ambiente *VPITransmissionMaker*. Na figura pode-se observar os módulos responsáveis pela transmissão, demultiplexação, recepção e análise da taxa de erro.

6.2.1 Geração

No modelo, em função da necessidade dos sinais luminosos se apresentarem de maneira pulsada, foram utilizados Moduladores em Amplitude (AM – *Amplitude Modulation*), um para cada canal. A informação binária é gerada no gerador pseudo-aleatório, formatada gaussianamente e modulada junto ao *laser* contínuo pelo modulador AM. O sinal de controle é capturado na saída do gerador pseudo-aleatório.

- ✓ **Gerador pseudo-aleatório:** tem por finalidade a geração de bits pseudo-aleatórios. Fontes pseudo-aleatórias geralmente são necessárias na modelagem de sistemas de comunicações digitais. A sequência pode ser gerada a partir de uma semente, especificada de maneira direta pelo projetista ou lida a partir de um arquivo;
- ✓ **Formatador Gaussiano:** este módulo tem por finalidade gerar pulsos ópticos gaussianos modulados por uma sequência binária de entrada;
- ✓ **Laser Contínuo:** este módulo produz um sinal óptico contínuo, sendo necessário o uso de um modulador AM para a geração de sinal óptico pulsado, e
- ✓ **Modulador AM:** este módulo simula um modulador AM ideal.

6.2.2 Multiplexação

Cada um dos canais, com exceção do primeiro, sofre um atraso de $1/8$ da taxa de bits, sendo combinados logo em seguida por um combinador óptico, dando origem ao sinal multiplexado. Tanto o sinal multiplexado quanto o de controle atravessam amplificadores EDFA a fim de obter a potência desejada para a sua correta demultiplexação no NOLM. O sinal de controle ainda tem sua fase alterada, antes de sua entrada no NOLM.

- ✓ **Atraso Óptico:** Este módulo é responsável pelo atraso no tempo de um sinal óptico de entrada, inclusive com o desvio de fase da portadora. A saída de um dos 7 atrasos ópticos presentes no sistema é replicada, em que uma das réplicas segue até o combinador para ser multiplexada junto aos demais canais e a outra é usada como sinal de controle. Desta forma, o sinal de controle fica alinhado no tempo a um dos canais;

- ✓ **Combinador:** Neste módulo, são combinados os 8 canais ópticos de entrada. A saída é o canal OTDM multiplexado. O combinador é um conjunto de 7 acopladores de 3dB, constituindo o que se chama, no *VPItransmissionMaker*, de estrela conforme a Figura 6.3:

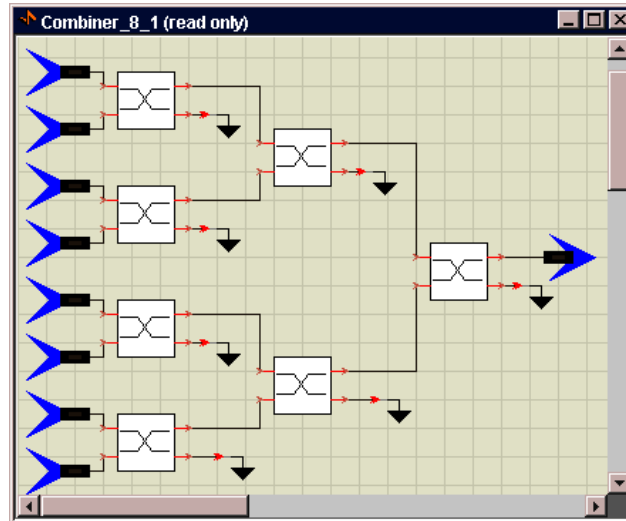


Figura 6.3 – Estrela representando combinador constituído de 7 acopladores 3dB.

- ✓ **Amplificador EDFA:** São usados 2 amplificadores EDFA que tem por função amplificar os canais multiplexados e de controle. Ele simula um amplificador com ganho e figura de ruído independentes de comprimento de onda, e
- ✓ **Conversor de Frequência:** Desvia a frequência do sinal óptico em um dado valor.

6.2.3 Demultiplexação

Os sinais de controle e multiplexado são injetados no NOLM, segundo comprimentos de onda diferentes, através de acopladores 3 dB. Na entrada, o sinal multiplexado é replicado em duas frentes de propagação, uma de sentido horário e a outra de sentido anti-horário. O SOA, que funciona como elemento gerador de não-linearidades, é posicionado assimetricamente, de modo a ser atravessado em momentos distintos pelas frentes de propagação e pelo sinal de controle, que alcança o SOA logo após a passagem da primeira frente de propagação e imediatamente antes da passagem da segunda.

- ✓ **Acoplador de 3dB:** Este módulo modela um acoplador óptico, combinando ou dividindo o sinal óptico. No sistema, os acopladores permitem acesso ao

NOLM aos sinais de controle e multiplexado e servem de saída para o canal transmitido e os canais refletidos, e

- ✓ **Amplificador Óptico a Semicondutor (SOA):** Seu comportamento é definido pela injeção de corrente elétrica (corrente de bombeio).

6.2.4 Componentes de Recepção

Efetua a análise da recepção dos pulsos ópticos com/sem a inclusão de demultiplexador no sistema através da análise da taxa de erro no canal transmitido, logo após a sua conversão para o domínio elétrico, feito pelo fotodiodo.

A análise da taxa de erro é feita pelo sistema composto por um fotodiodo e um recuperador de relógio (que faz a sincronização do sinal recuperado com um dos canais transmitidos) seguidos por um analisador de taxa de erro.

- ✓ **Fotodiodo (PIN):** Converte o campo óptico incidente em elétrico;
- ✓ **Filtro de Bessel:** Este módulo representa um filtro passa baixa de Bessel [Wangenheim91];
- ✓ **Sincronizador:** Analisa o tempo o atraso entre o sinal recebido e o originalmente emitido, o qual é automaticamente regenerado a partir da informação lógica anexada ao sinal recebido, sem a necessidade de uma segunda entrada de referência. Desta forma, este módulo atua como um recuperador de relógio ideal;
- ✓ **Analisador de Taxa de Erro:** Avalia o desempenho do sistema pela estimativa de BER [Zhang00], usando uma aproximação Gaussiana. Ele faz uso da sequência binária contida no canal lógico especificado para as estimativas, e.
- ✓ **Osciloscópios:** Distribuídos ao longo do sistema, são responsáveis pela exibição dos sinais ópticos no domínio do tempo.

6.3 Configuração

O modelo é constituído por oito canais OTDM com taxa de transmissão de 20 Gbps por canal. A largura FWHM dos pulsos Gaussianos é de 12,5 ps. O ganho na amplificação do sinal de controle é de 10 dB e do sinal multiplexado, 14 dB. A potência óptica do sinal

multiplexado e de controle na chegada ao NOLM é, respectivamente, 3,45 mW e 10,5 mW. A relação de acoplamento no combinador de 3 dB, na entrada do NOLM é de 50%.

A depender dos estudos realizados, apresentados no próximo capítulo, estes parâmetros podem ser alterados (i.e., variação das potências, largura FWHM, relações de acoplamento e espaçamento entre os sinais de controle e multiplexado).

O sinal de controle está alinhado no tempo com o canal a ser extraído conforme mostra a Figura 6.4, onde é possível visualizar os oito canais multiplexados, o sinal de controle alinhado a um dos canais e o sinal recuperado com uma pequena defasagem de tempo em relação ao sinal de controle.

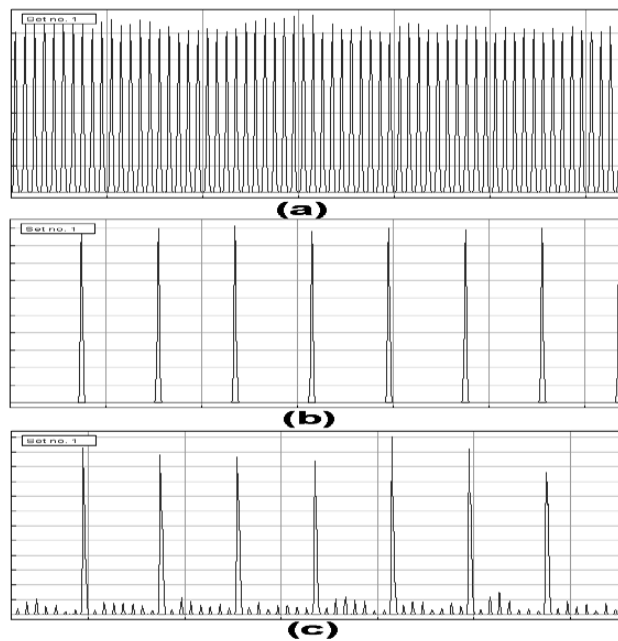


Figura 6.4 – (a) 8 canais OTDM; (b) sinal de controle e (c) canal recuperado.

A análise da taxa de erro é feita pelo sistema composto por um fotodetector e um recuperador de relógio que faz a sincronização do sinal recuperado com um dos canais transmitidos, seguidos por um analisador de taxa de erro, conforme ilustrado pelas Figuras 6.1 e 6.2.

Capítulo 7

Análise dos Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos de simulações realizadas no ambiente *VPITransmissionMaker* com o modelo do demultiplexador óptico OTDM baseado no NOLM. Inicialmente são mostradas as amostras intermediárias do processamento de pulsos ópticos. Em seguida, o desempenho do demultiplexador é analisado considerando a recuperação de pulsos nos formatos Gaussiano e Solitônico e as variações (i) da diferença da frequência central entre os sinais multiplexados e de controle; (ii) da largura FWHM, (iii) do fator de acoplamento entre o sinal multiplexado e o NOLM, e (iv) da potência do sinal multiplexado.

As análises i, ii, iii e iv foram obtidas a partir de 13 repetições sucessivas e as análises feitas mediante o estudo da média dos valores numéricos obtidos entre a segunda e a décima terceira repetição, descartando-se a primeira e mantendo os parâmetros fixos.

7.1 Geração e Evolução dos Pulsos através do Sistema

A Tabela 7.1 mostra os parâmetros utilizados na implementação do sistema. As Figuras 7.1, 7.2, 7.3 e 7.4 mostram respectivamente, a informação binária gerada com formato Gaussiano (saída do formador de pulsos elétricos), o envelope do sinal da portadora (saída do *laser* contínuo), o sinal resultante modulado em AM e o sinal resultante após atraso óptico.

PARÂMETRO	VALOR
Frequência Central de Emissão	193,1 THz
Número de Canais	8
Taxa de Transmissão por Canal	20 Gbps
Largura dos Pulsos (FWHM)	12,5 ps
Bits Transmitidos por Canal	8
Atraso Óptico	1/8 da taxa de transmissão

Tabela 7.1: Parâmetros para a geração de pulsos ópticos.

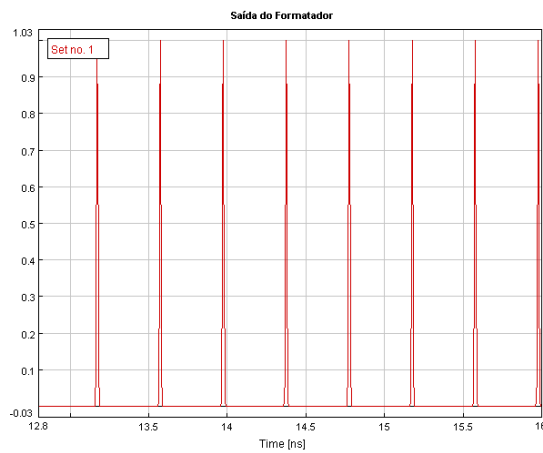


Figura 7.1 – Informação binária no formato Gaussiano.

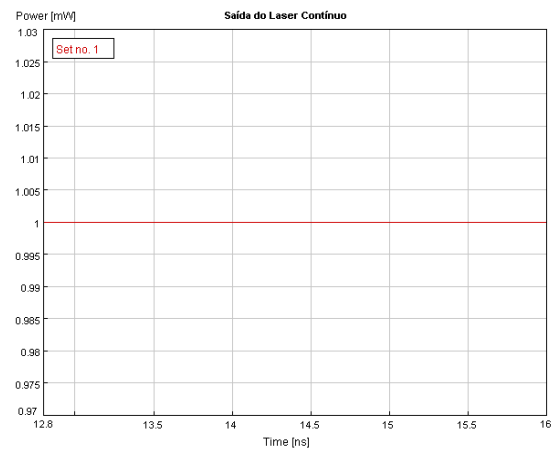


Figura 7.2 – Envelope do sinal de saída do *laser* contínuo.

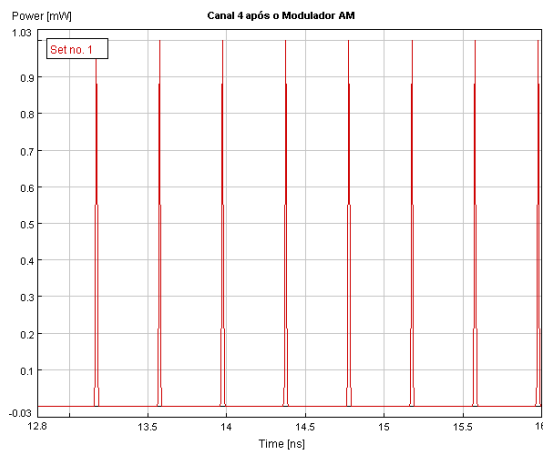


Figura 7.3 – Sinal modulado em amplitude.

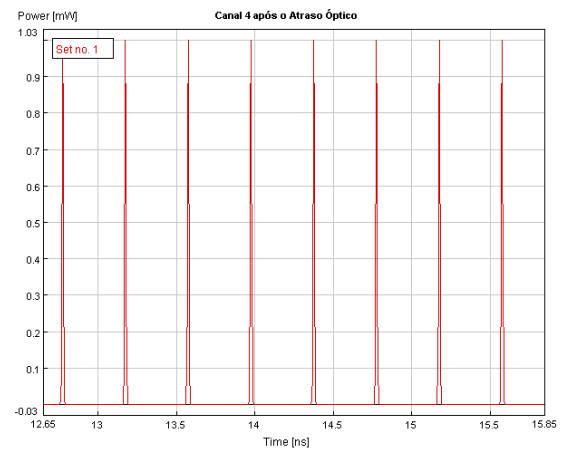


Figura 7.4 – Sinal modulado e com atraso.

7.2 Formatos de Pulsos Gaussiano e Solitônico

A Tabela 7.2 mostra os parâmetros utilizados na implementação do sistema para os formatos de pulso Gaussiano e Solitônico. A Tabela 7.3 apresenta as taxas de erro encontradas nas simulações realizadas.

PARÂMETRO	VALOR
Frequência Central do Canal Multiplexado	193,1 THz
Frequência Central do Canal de Controle	193,4 THz
Número de Canais	8
Taxa de Transmissão por Canal	20 Gbps
Largura dos Pulsos (FWHM)	12,5 ps
Bits Transmitidos por Canal	8
Número de EDFAs	2
Ganho na Amplificação do Sinal Multiplexado	14 dB
Ganho na Amplificação do Sinal De Controle	10 dB
Figura de Ruído	4.0 dB
Potência de Pico do Sinal Multiplexado na entrada do NOLM	3,45 mW
Relação de Acoplamento do Sinal Multiplexado no NOLM	50%
Potência de Pico do Sinal de Controle na Entrada do NOLM	10,5 mW
Relação de Acoplamento do Sinal de Controle no NOLM	50%

Tabela 7.2: Parâmetros de configuração para a obtenção de pulsos nos formatos Gaussiano e Solitônico.

FORMATO	POTÊNCIA (mW)	TAXA DE ERRO (%)
Gaussiano	3,45	$4,28E^{-15}$
Solitônico	3,45	$3,10E^{-24}$

Tabela 7.3: Taxas de erro obtidas para pulsos nos formatos Gaussiano e Solitônico.

As Figuras 7.5 e 7.6 são os diagramas de olho dos sinais transmitidos e refletidos, respectivamente, dos pulsos de formato Gaussiano. As Figuras 7.7 e 7.8 são os diagramas de olho dos sinais transmitidos e refletidos, respectivamente, dos pulsos de formato Solitônico.

PULSOS GAUSSIANOS

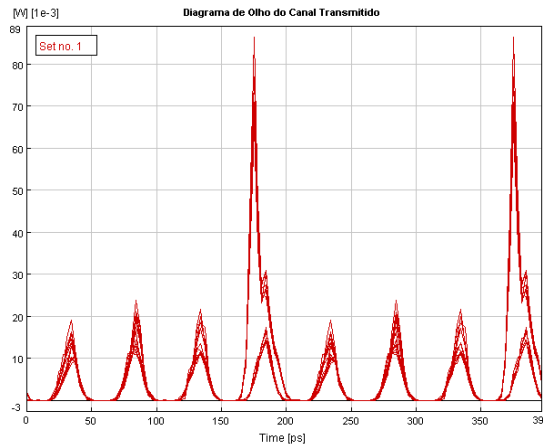


Figura 7.5 – Diagrama de olho do canal transmitido

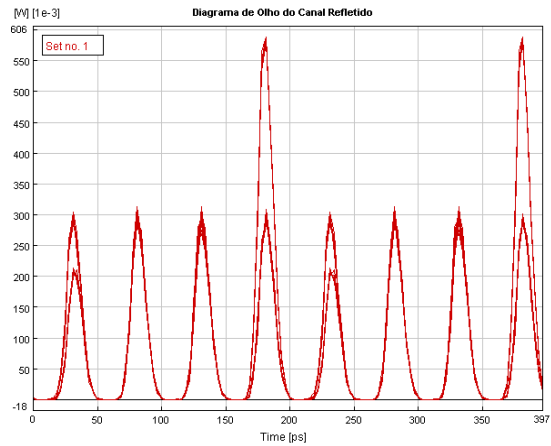


Figura 7.6 — Diagrama de olho dos canais refletidos

PULSOS SOLITÔNICOS

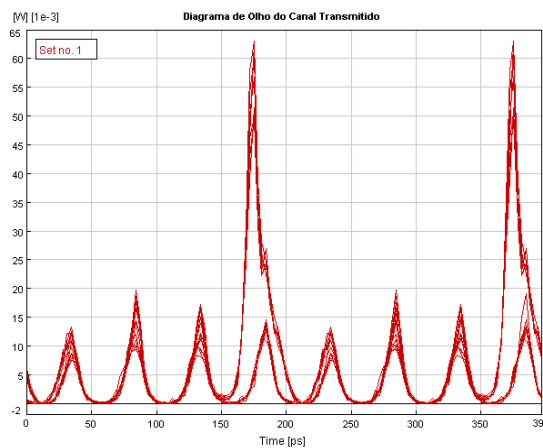


Figura 7.7 – Diagrama de olho do canal transmitido

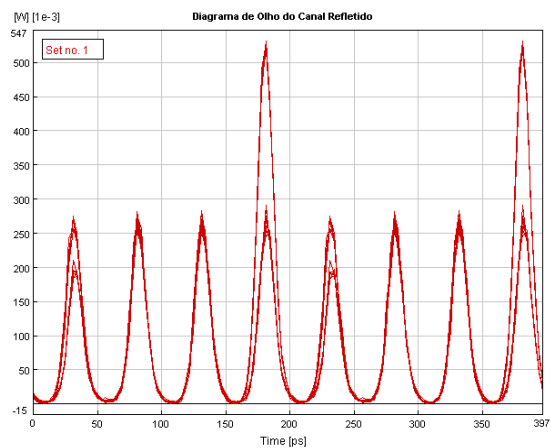


Figura 7.8 – Diagrama de olho dos canais refletidos

- Considerações

- Observa-se, a partir da análise da BER para os pulsos Gaussianos e Solitônicos que, operando sobre condições adequadas, o demultiplexador praticamente não degenera a qualidade do sinal recuperado.
- Para os sinais transmitidos e refletidos, foram extraídos seus respectivos diagramas de olho e realizada a análise numérica a partir da Análise de BER [Zhang00], onde se comparou o valor do bit recebido em relação ao que foi transmitido originalmente.

- Pela análise da taxa de erro, observa-se que o demultiplexador é mais eficiente para recuperar pulsos Solitônicos, pois apresenta menor valor numérico de taxa de erro do que a observada para a demultiplexação de pulsos Gaussianos.
- Foram analisados graficamente (apêndice C), a partir da manutenção dos parâmetros globais, os comportamentos dos sinais multiplexados e de controle na entrada do NOLM e os canais refletidos e recuperado na saída.

7.3 Análise da Diferença da Frequência Central entre os Sinais Multiplexados e de Controle

A Tabela 7.4 mostra os parâmetros utilizados na implementação do sistema considerando a diferença da frequência central entre os sinais multiplexados e de controle. A Tabela 7.5 apresenta as taxas de erro encontradas nas simulações realizadas.

PARÂMETRO	VALOR
Frequência Central do Canal Multiplexado	193,1 THz
Frequência Central do Canal de Controle	Variável
Número de Canais	8
Taxa de Transmissão por Canal	20 Gbps
Largura dos Pulsos (FWHM)	12,5 ps
Bits Transmitidos por Canal	8
Número de EDFAs	2
Ganho na Amplificação do Sinal Multiplexado	14 dB
Ganho na Amplificação do Sinal De Controle	10 dB
Figura de Ruído	4.0 dB
Potência de Pico do Sinal Multiplexado na entrada do NOLM	3,45 mW
Relação de Acoplamento do Sinal Multiplexado no NOLM	50%
Potência de Pico do Sinal de Controle na Entrada do NOLM	10,5 mW
Relação de Acoplamento do Sinal de Controle no NOLM	50%

Tabela 7.4: Parâmetros de configuração para a análise da diferença da frequência central entre os sinais multiplexados e de controle.

DIFERENÇA (GHz)	TAXA DE ERRO (%)
0	$4,22E^{-15}$
500	$4,33E^{-15}$
1000	$4,38E^{-15}$
2000	$4,55E^{-15}$
5000	$5,15E^{-15}$

Tabela 7.5: Taxas de erro obtidas para diferentes valores da frequência central entre os sinais multiplexados e de controle.

As Figuras 7.9 a 7.12 referem-se aos resultados obtidos nas simulações realizadas considerando, inicialmente, a mesma frequência para os sinais multiplexado e de controle e, em seguida, uma diferença de 500 GHz entre esses sinais.

MESMA FREQUÊNCIA

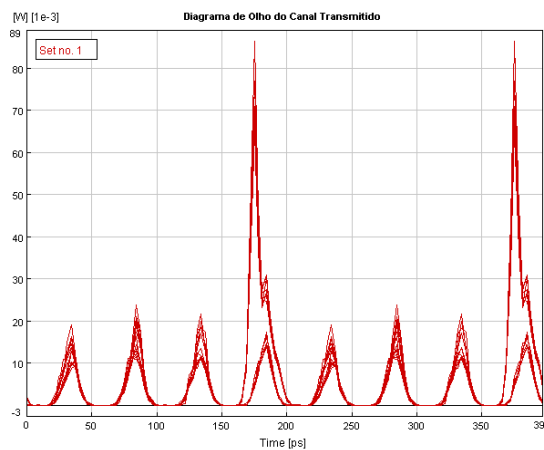


Figura 7.9 – Diagrama de olho do canal transmitido

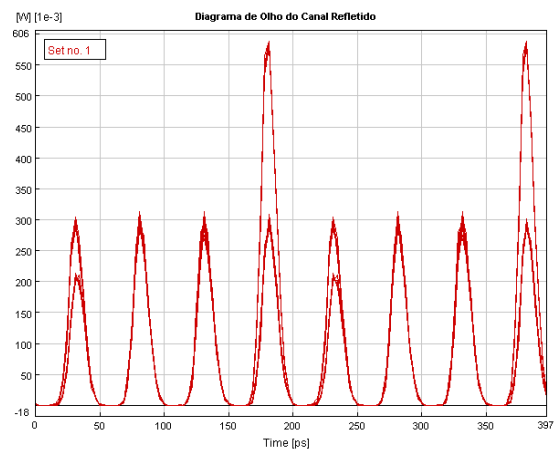


Figura 7.10 – Diagrama de olho dos canais refletidos

DIFERENÇA DE 500GHz ENTRE O SINAL MULTIPLEXADO E DE CONTROLE

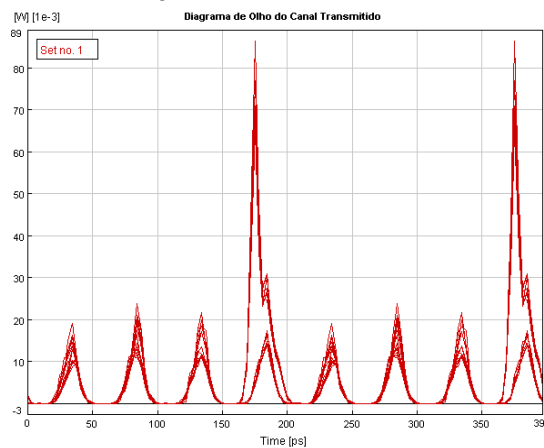


Figura 7.11 – Diagrama de olho do canal transmitido

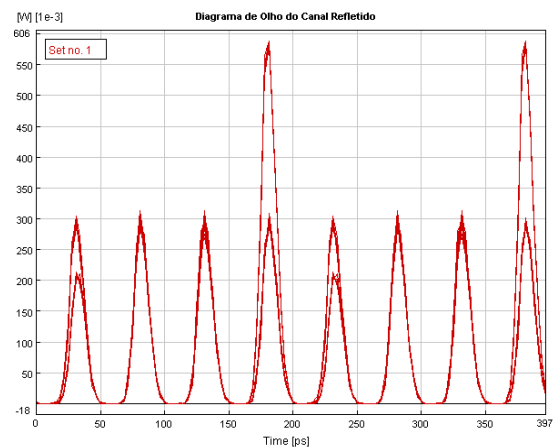


Figura 7.12 – Diagrama de olho dos canais refletidos

- Considerações

- Observa-se, pelos resultados obtidos que a variação da taxa de erro pode ser considerada insignificante, implicando em reduzida influência no desempenho do demultiplexador, quando se observam as diferenças de frequência nas faixas consideradas.
- A observação dos gráficos (apêndice C) respalda os resultados numéricos obtidos.

7.4 Largura FWHM

A Tabela 7.6 mostra os parâmetros utilizados na implementação do sistema considerando a variação da largura FWHM. A Tabela 7.7 apresenta as taxas de erro encontradas nas simulações realizadas.

PARÂMETRO	VALOR
Frequência Central do Canal Multiplexado	193,1 THz
Frequência Central do Canal de Controle	193,4 THz
Número de Canais	8
Taxa de Transmissão por Canal	20 Gbps
Largura dos Pulsos (FWHM)	Variável
Bits Transmitidos por Canal	8
Número de EDFAs	2
Ganho na Amplificação do Sinal Multiplexado	14 dB
Ganho na Amplificação do Sinal De Controle	10 dB
Figura de Ruído	4.0 dB
Potência de Pico do Sinal Multiplexado na entrada do NOLM	3,45 mW
Relação de Acoplamento do Sinal Multiplexado no NOLM	50%
Potência de Pico do Sinal de Controle na Entrada do NOLM	10,5 mW
Relação de Acoplamento do Sinal de Controle no NOLM	50%

Tabela 7.6: Parâmetros de configuração para a análise da largura FWHM.

LARGURA FWHM (%)	TAXA DE ERRO (%)
10	$3,55E^{-13}$
20	$3,62E^{-19}$
30	$2,52E^{-41}$
40	$2,56E^{-61}$
50	$1,10E^{-82}$

Tabela 7.7: Taxas de erro obtidas em diferentes larguras FWHM.

As Figuras 7.13 a 7.17 referem-se aos resultados obtidos nas simulações realizadas considerando a largura FWHM ocupando 10% , 20%, 30%, 40% e 50% da janela de tempo.

- Considerações

- Observou-se que a partir de uma largura FWHM de 30% da janela de sinalização, há uma interferência intersimbólica excessiva entre os pulsos da sequência multiplexada – conforme ilustrado graficamente pelas Figuras 7.13 a 7.17. Por isso, quando a largura FWHM for superior a 30% da janela de sinalização, os resultados são considerados inválidos.

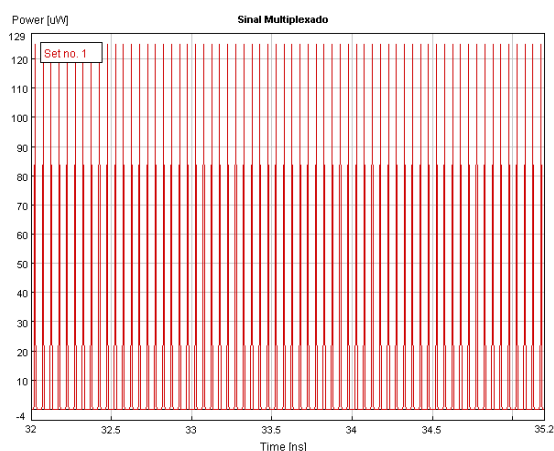


Figura 7.13 – Sinal multiplexado, com largura FWHM ocupando 10% da janela de tempo

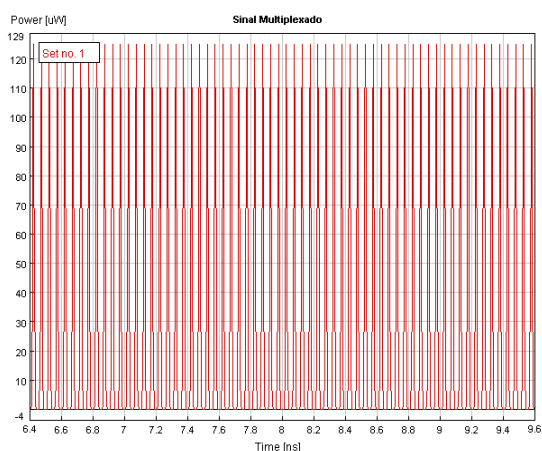


Figura 7.14 – Sinal multiplexado, com largura FWHM ocupando 20% da janela de tempo

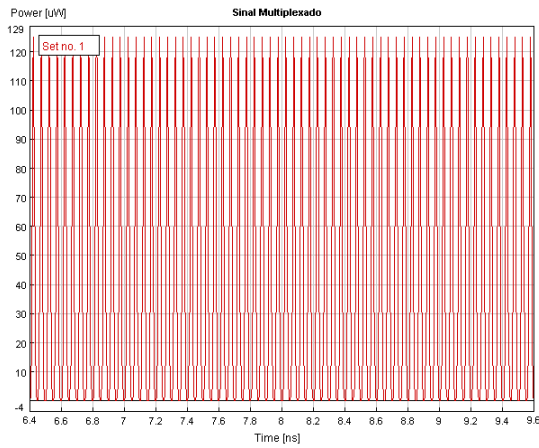


Figura 7.15 – Sinal multiplexado, com largura FWHM ocupando 30% da janela de tempo

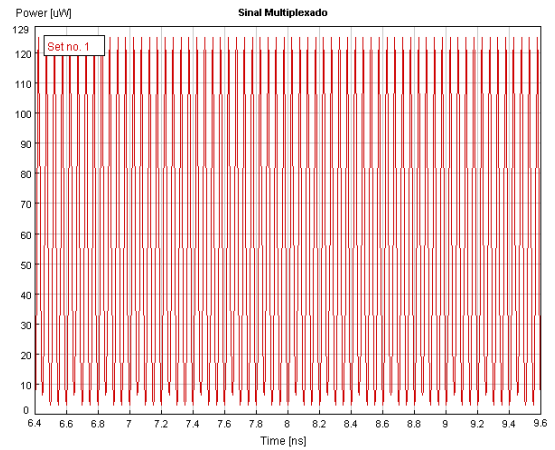


Figura 7.16 – Sinal multiplexado, com largura FWHM ocupando 40% da janela de tempo

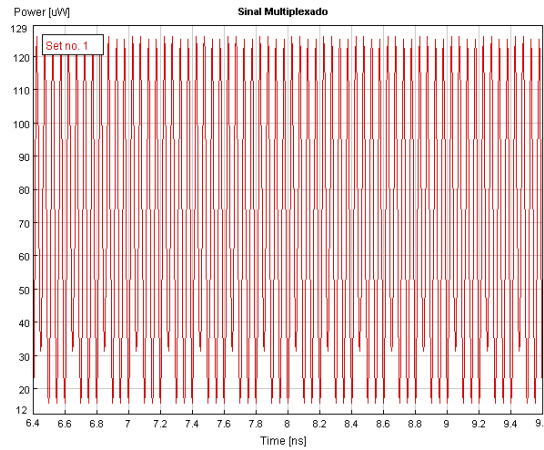


Figura 7.17 – Sinal multiplexado, com largura FWHM ocupando 50% da janela de tempo

7.5 Relação de Acoplamento no NOLM

A Tabela 7.8 mostra os parâmetros utilizados na implementação do sistema considerando a relação de acoplamentos no NOLM. A Tabela 7.9 apresenta as taxas de erro encontradas nas simulações realizadas.

PARÂMETRO	VALOR
Frequência Central do Canal Multiplexado	193,1 THz
Frequência Central do Canal de Controle	193,4 THz
Número de Canais	8
Taxa de Transmissão por Canal	20 Gbps
Largura dos Pulsos (FWHM)	12,5 ps
Bits Transmitidos por Canal	8
Número de EDFAs	2
Ganho na Amplificação do Sinal Multiplexado	14 dB
Ganho na Amplificação do Sinal De Controle	10 dB
Figura de Ruído	4.0 dB
Potência de Pico do Sinal Multiplexado na entrada do NOLM	3,45 mW
Relação de Acoplamento do Sinal Multiplexado no NOLM	Variável
Potência de Pico do Sinal de Controle na Entrada do NOLM	10,5 mW
Relação de Acoplamento do Sinal de Controle no NOLM	50%

Tabela 7.8: Parâmetros de configuração para a análise da relação de acoplamento no NOLM.

RELAÇÃO DE ACOPLAMENTO (%)	TAXA DE ERRO (%)
0,0	$1,25\text{E}^{-06}$
25,0	$5,60\text{E}^{-32}$
50,0	$1,96\text{E}^{-71}$
75,0	$1,60\text{E}^{-01}$
100,0	$1,76\text{E}^{-01}$

Tabela 7.9: Taxas de erro obtidas em diferentes relações de acoplamento no NOLM.

As Figuras 7.18 a 7.23 referem-se aos resultados obtidos nas simulações realizadas considerando, inicialmente, relação de acoplamento nula, em seguida, a relação de acoplamento de 50% e 100%.

- Considerações

Observando os resultados numéricos e os resultados apresentados graficamente, o demultiplexador se comporta de maneira otimizada quando o fator de acoplamento do sinal multiplexado ao NOLM é de 50%, conforme o esperado [Wong97].

RELAÇÃO DE ACOPLAMENTO NULA

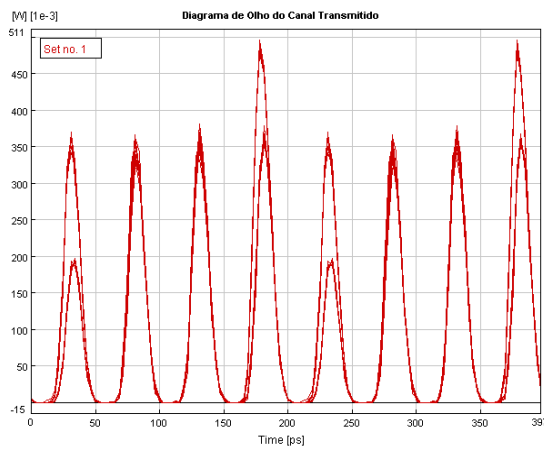


Figura 7.18 – Diagrama de olho do canal transmitido.

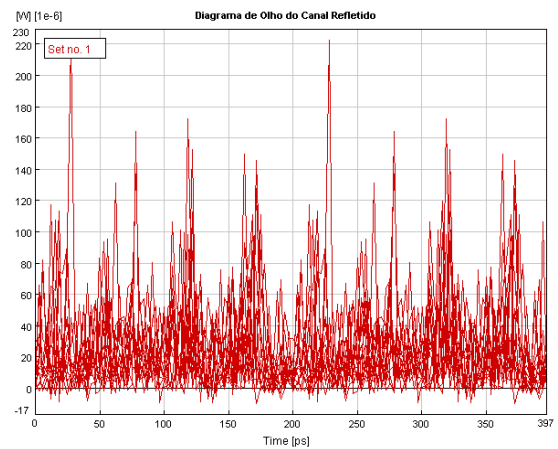


Figura 7.19 – Diagrama de olho dos canais refletidos.

RELAÇÃO DE ACOPLAMENTO DE 50%

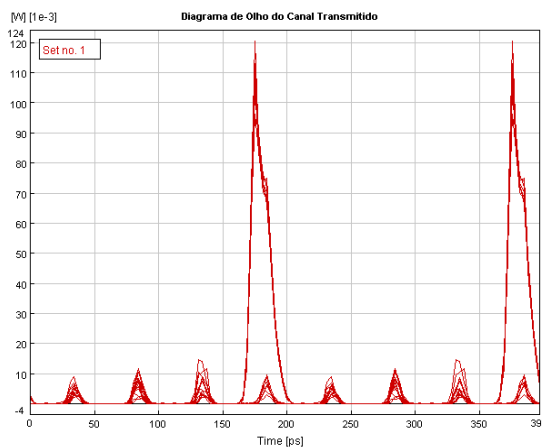


Figura 7.20 – Diagrama de olho do canal transmitido.

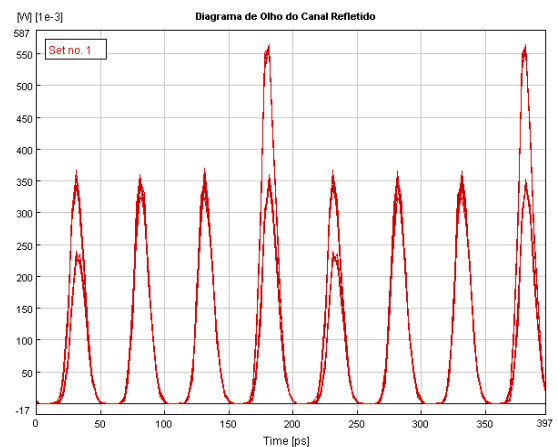


Figura 7.21 – Diagrama de olho dos canais refletidos.

RELAÇÃO DE ACOPLAMENTO DE 100%

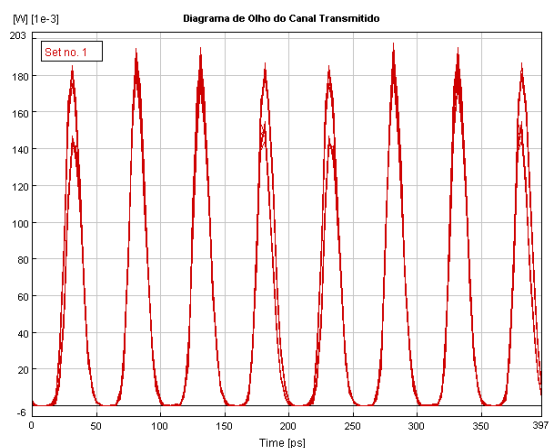


Figura 7.22 – Diagrama de olho do canal transmitido.

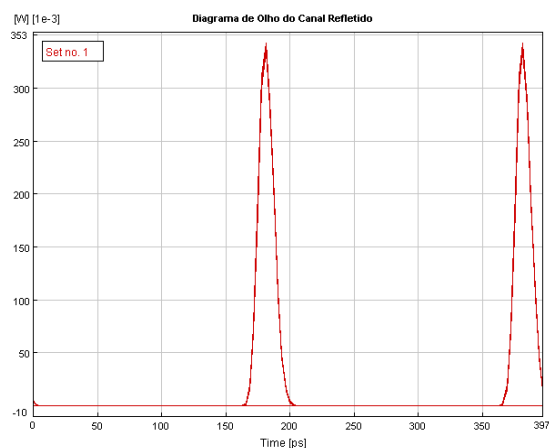


Figura 7.23 – Diagrama de olho dos canais refletidos.

7.6 Análise da Variação da Potência do Sinal Multiplexado

A Tabela 7.10 mostra os parâmetros utilizados na implementação variando a potência do sinal multiplexado. A Tabela 7.11 apresenta as taxas de erro encontradas nas simulações realizadas.

PARÂMETRO	VALOR
Frequência Central do Canal Multiplexado	193,1 THz
Frequência Central do Canal de Controle	193,4 THz
Número de Canais	8
Taxa de Transmissão por Canal	20 Gbps
Largura dos Pulsos (FWHM)	12,5 ps
Bits Transmitidos por Canal	8
Número de EDFAs	2
Ganho na Amplificação do Sinal Multiplexado	Variável
Ganho na Amplificação do Sinal De Controle	10 dB
Figura de Ruído	4.0 dB
Potência de Pico do Sinal Multiplexado na entrada do NOLM	3,45 mW
Relação de Acoplamento do Sinal Multiplexado no NOLM	Variável
Potência de Pico do Sinal de Controle na Entrada do NOLM	10,5 mW
Relação de Acoplamento do Sinal de Controle no NOLM	50%

Tabela 7.10: Parâmetros de configuração para a análise da variação da potência do sinal multiplexado.

POTÊNCIA (mW)	TAXA DE ERRO (%)
0,43	$1,44\text{E}^{-20}$
1,36	$2,53\text{E}^{-13}$
4,30	$2,10\text{E}^{-11}$
13,70	$2,62\text{E}^{-07}$

Tabela 7.11: Taxas de erro obtidas em diferentes potências do sinal multiplexado.

As Figuras 7.24 a 7.30 referem-se aos resultados obtidos nas simulações realizadas considerando a variação da potência, conforme valores apresentados na Tabela 7.10.

- Considerações

Para uma relação (potência de pico do sinal de controle)/(potência de pico do sinal multiplexado) da ordem de 20 encontra-se o desempenho ótimo para o demultiplexador. Por outro lado, quando esta relação se aproxima de 1 (um), o desempenho é fortemente penalizado.

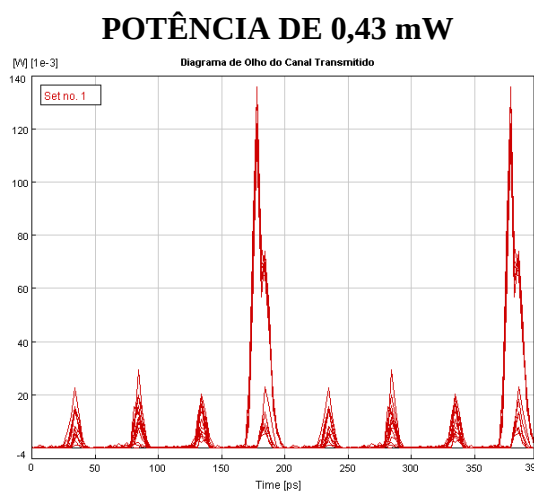


Figura 7.24 – Diagrama de olho do canal transmitido.

POTÊNCIA DE 1,36 mW

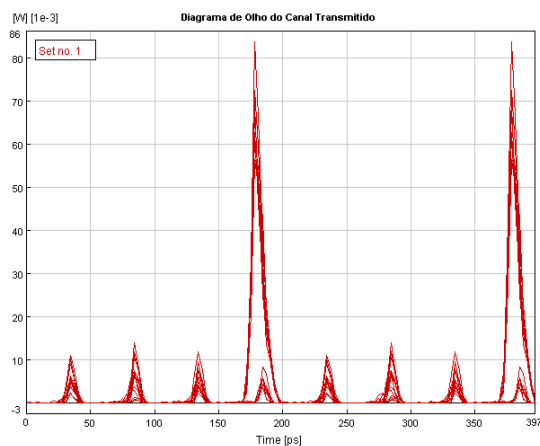


Figura 7.25 – Diagrama de olho do canal transmitido.

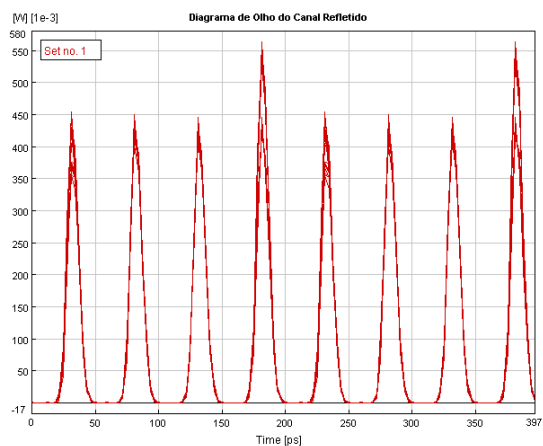


Figura 7.26 – Diagrama de olho do canal refletido.

POTÊNCIA DE 4,30 mW

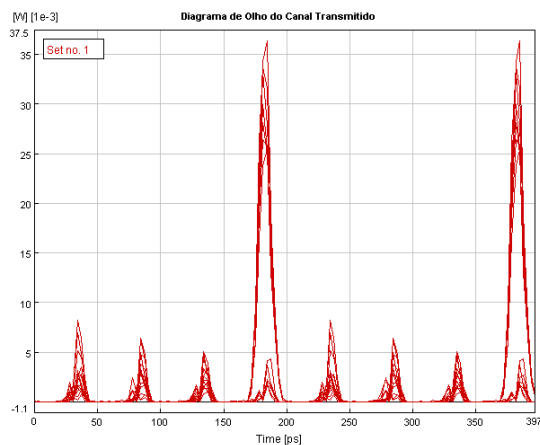


Figura 7.27 – Diagrama de olho do canal transmitido.

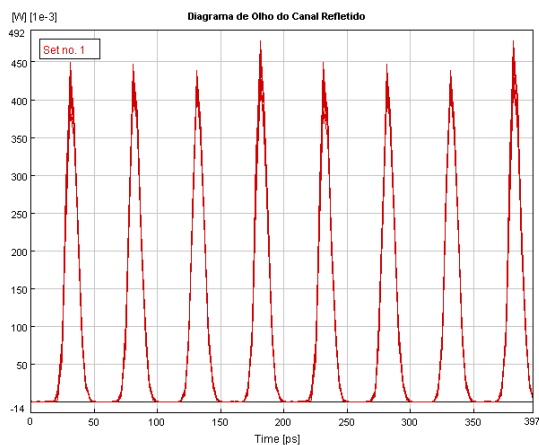


Figura 7.28 – Diagrama de olho do canal refletido.

POTÊNCIA DE 13,70 mW

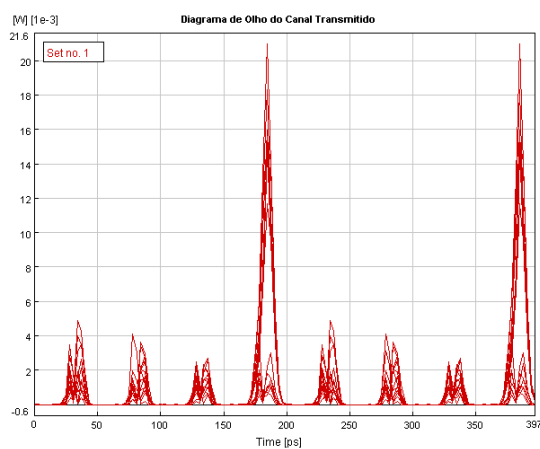


Figura 7.29 – Diagrama de olho do canal transmitido.

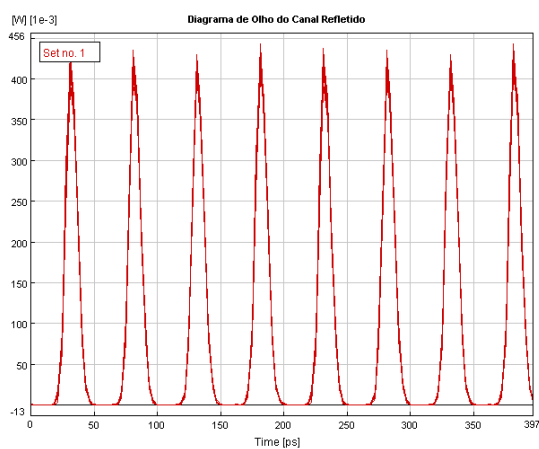


Figura 7.30 – Diagrama de olho do canal refletido.

Capítulo 8

Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

Este trabalho teve como objetivos projetar e implementar um demultiplexador OTDM baseado no NOLM tendo o SOA como elemento gerador de não-linearidade, também conhecido como TOAD [Connelly02]. Este modelo foi implementado no ambiente *VPItransmissionMaker* permitindo a simulação de vários cenários para a recuperação do sinal multiplexado.

Em [Prucnal02], foi feita uma comparação do desempenho do TOAD em relação a outras implementações de demultiplexadores OTDM, no que se refere a tempo de chaveamento, taxa de repetição, energia do pulso de controle, figura de ruído e facilidade de integração a Circuitos Integrados (CI), conforme a Tabela 8.1.

Dispositivo	Tempo de Chaveamento	Taxa de Repetição (GHz)	Energia do Pulso de Controle (pJ)	Figura de Ruído (dB)	Facilidade de Integração
NOLM	0,8 os	100+ GHz	50+	0	BAIXA
TOAD	< 1 ps	100+ GHz	0,25	6	ALTA
UNI	<1 ps	100+ GHz	0,25	6	MÉDIA
NLWG	0,2 ps	40+ GHz	50	<2	BAIXA

Tabela 8.1: Estudo comparativo entre o TOAD e outras quatro implementações de demultiplexadores OTDM: NOLM, Interferômetro Não-linear ultra-rápido(UNI – Ultrafast Nonlinear Interferometer) [Patel96] e o Guia de ondas não-lineares (NLWG – Nonlinear Waveguide) [Nakamura98].

Nos estudos de simulação feitos com o modelo de TOAD apresentado neste trabalho, foram analisados (i) os desempenhos do demultiplexador considerando a recuperação de pulsos nos formatos gaussianos e solitônicos. Em seguida, foram analisadas as variações (ii) da diferença entre a frequência central entre os sinais multiplexados e de controle; (iii) da largura FWHM, (iv) do fator de acoplamento entre o sinal multiplexado e o NOLM, e (v) da potência do sinal multiplexado. Em todas as situações, foi analisada a BER, dos canais recuperados, com a apresentação numérica dos resultados.

Quanto aos estudos realizados:

- ✓ **(i) O desempenho do demultiplexador considerando a recuperação de pulsos nos formatos gaussianos e solitônicos:** observa-se, a partir da análise de BER para os pulsos gaussianos e solitônicos que, operando sobre condições adequadas, o demultiplexador praticamente não degenera a qualidade do sinal recuperado. Pela análise de BER observa-se que o demultiplexador é mais eficiente para recuperar pulsos solitônicos, pois apresenta menor BER do que a observada para a demultiplexação de pulsos gaussianos.
- ✓ **(ii) A variação da diferença entre a frequência central dos sinais multiplexados e de controle:** nas simulações realizadas (considerando a mesma frequência para os sinais multiplexado e de controle e uma diferença de 500 GHz entre esses sinais), observa-se que a variação da taxa de erro pode ser considerada insignificante, implicando em reduzida influência no desempenho do demultiplexador, quando se observam as diferenças de frequência nas faixas consideradas. A observação dos gráficos respalda os resultados numéricos obtidos.
- ✓ **(iii) A variação da largura FWHM:** observa-se que a partir de uma largura FWHM de 30% da janela de sinalização, há uma interferência intersimbólica excessiva entre os pulsos da sequência multiplexada. Por isso, quando a largura FWHM for superior a 30% da janela de sinalização, os resultados são considerados inválidos.
- ✓ **(iv) A variação da relação de acoplamento entre o sinal multiplexado e o NOLM:** observando os resultados numéricos e os resultados

apresentados graficamente, o demultiplexador se comporta de maneira otimizada quando o fator de acoplamento do sinal multiplexado ao NOLM é de 50%, conforme esperado.

- ✓ (v) **A variação da potência do sinal multiplexado:** para uma relação entre potência de pico do sinal de controle e a potência de pico do sinal multiplexado da ordem de 20 encontra-se o desempenho ótimo para o demultiplexador. Por outro lado, quando esta relação se aproxima de 1 (um), o desempenho é fortemente penalizado.

A construção do modelo de simulação do demultiplexador OTDM apresentado nesta Dissertação ressalta o conhecimento das tecnologias fotônicas e alternativas de montagem e configuração para a simulação deste tipo de rede no ambiente *VPItransmissionMaker*. No processo de montagem do modelo simulado foram utilizados componentes ópticos básicos (transmissores, amplificadores, receptores, acopladores, combinadores, visualizadores, etc) que, com certeza, farão parte de qualquer outra montagem que venha a ser feita para o desenvolvimento de novos componentes ópticos. O modelo simulado pode ser naturalmente adaptável aos modelos de redes totalmente ópticas por não utilizar dispositivos eletro-eletrônicos.

Sugestões de estudos futuros se direcionam para:

- ✓ (i) Análise dos limites de funcionamento do SOA (com relação aos níveis de potência dos sinais ópticos na entrada do NOLM) e de desempenho do NOLM mediante o aumento das taxas de transmissão do agregado de entrada.
- ✓ (ii) Implementação em hardware do demultiplexador ora proposto, levando-se em consideração os parâmetros ideais obtidos neste trabalho.

Apêndice A

Taxa de Erro de Bit

A performance de um sistema óptico é julgada pela análise da BER, que é definida como sendo a probabilidade de identificação incorreta de um bit pelo circuito receptor. Para sistemas ópticos, são aceitáveis valores de BER inferiores a 10^{-9} .

A flutuação do sinal elétrico no receptor é passada para o circuito de decisão, que efetua a amostragem periodicamente, conforme a taxa de bit, para determinar os bits individualmente. O valor amostrado, I , flutua bit a bit em torno das médias I_1 ou I_0 , dependendo de qual bit corresponde a “1” ou “0” no fluxo binário. O circuito de decisão compara o valor amostrado com o valor médio de potência (I_D), verificando se o valor amostrado corresponde a um bit “1” ($I > I_D$) ou se corresponde a um bit “0” ($I < I_D$). Um erro ocorre quando for detectado $I < I_D$ para um bit “1” ou $I > I_D$ para um bit “0”. Ambas as fontes de erro podem ser incluídas pela probabilidade de erro definida como:

$$BER = p(1)P(0/1) + p(0)P(1/0) \quad (\text{A.1})$$

onde $p(1)$ e $p(0)$ são as probabilidades do recebimento dos bits “1” e “0”, respectivamente, sendo $P(0/1)$ a probabilidade condicional de se decidir “0” quando “1” for recebido e $P(1/0)$ a probabilidade condicional de se decidir “1” quando “0” for recebido. Como “1” e “0” apresentam a mesma possibilidade de acontecer em fluxos binários realísticos, $p(1) = p(0) = 1/2$, ficando a BER definida como:

$$BER = \frac{1}{2} [P(0/1) + P(1/0)] \quad (A.2)$$

A.1 Analisador de Taxa de Erro de Bit

Avalia o desempenho do sistema pela estimativa da BER, usando aproximação Gaussiana, sendo levada em conta à influência da interferência intersimbólica (ISI – *Intersymbol interferences*).

Modelos numéricos investigam pequenos fluxos de bits para evitar elevados esforços computacionais. Alguns bits são necessários para se fazer suposições sobre a distribuição do ruído. A estimação da BER, assumindo a distribuição Gaussiana em ambos os níveis, "0s" e "1s" é imprecisa na presença de forte ISI. A inconsistência aparece devido à suposição de que o diagrama de olho consiste de somente duas distribuições Gaussianas. Quando a ISI está presente, a suposição não é mais válida e leva, geralmente a superestimação do desvio padrão e consequentemente a valores empobrecidos de BER.

A BER é estimada de maneira similar a aproximação do tipo Gaussiana, exceto pelo fato de levar em conta a ISI. A técnica usada é descrita em [Agrawal95]. Há muitos processos que levam padrões de dados a aparecerem em um diagrama de olho, como exemplos, não-linearidades, dispersão, filtragem. Para dados NRZ, uma primeira aproximação, o padrão de cada bit é dependente do bit que o antecede e do que o sucede. Por exemplo, um bit "1" isolado será afetado por um filtro passa-baixa de maneira diferente de um bit "1" embutido em uma *string* de bits "1".

A partir deste fato, é possível relacionar cada bit "1" de oito padrões diferentes de seqüências de bits. Na prática há quatro padrões associados a cada nível de codificação: 010, 110, 011, 010 para representar o nível "1" de potência e 101, 001, 100, 000 para representar o nível "0" de potência.

Oito diferentes padrões podem ser representados como oito distribuições separadas de ruído. Se os bits na seqüência são classificados por padrão, significa dizer que pode ser calculado o desvio padrão para cada um dos padrões. Cada uma dessas distribuições conduz a probabilidade de erro de um padrão particular; desta forma, é mantida a suposição de que o ruído é Gaussiano. A probabilidade de erro depende do nível de decisão D e pode ser calculado para cada padrão p de acordo com:

$$BER_p(D) = \text{erfc} \left(\frac{|\mu_p - D|}{\sqrt{2}\sigma_p} \right) \quad (\text{A.3})$$

Se há somente uma ocorrência de qualquer padrão, o desvio padrão é zero e, então, a probabilidade de erro não pode ser calculada. Nota-se que dada uma sequência pseudo-aleatória de bit com tamanho razoável ($> 64\text{bits}$), a probabilidade de uma única ocorrência de qualquer padrão é pequena. A BER total é encontrada pelo somatório das contribuições dos oito padrões, obrigando a representar a frequência de cada padrão dentro da sequência original de bit,

$$BER(D) = \sum_{p=1}^8 \frac{n_p}{n} BER_p(D) \quad (\text{A.4})$$

onde n_p é o número de ocorrências do padrão p .

Apêndice B

Amplificador Óptico a Semicondutor

Em geral, amplificadores ópticos podem ser divididos em duas classes: amplificadores em fibra óptica (OFA – *Optical Fiber Amplifier*) e amplificadores ópticos a semicondutores (SOA) [Conelly02]. Os primeiros tendem a predominar em sistemas de comunicação convencionais, tais como ampliações na linha, para compensar perdas na fibra. No entanto, devido a avanços nas técnicas de fabricação dos amplificadores ópticos a semicondutores, especialmente nos últimos cinco anos, eles apresentam grande potencial para uso em redes ópticas de comunicações. Podendo ser usados em muitas aplicações, tais como chaveadores ópticos, moduladores e conversores de comprimento de onda. Essas funções, que não necessitam de conversão eletro-óptica, são necessárias a redes ópticas transparentes.

Em comparação a AFO, o SOA apresenta menores ganhos e podem funcionar como fonte de ruído e não-linearidades. A Tabela B.1 compara as principais características entre OFAs e SOAs e a Figura B.1 ilustra algumas das aplicações passíveis de implementação com SOA.

Característica	OFA	SOA
Ganho interno máximo (dB)	30-50	30
Inserção de perda (dB)	0,1 - 2	6 – 10
Sensível a polarização?	Não	Fraca (2 dB)
Fonte de bombeio	Óptica	Elétrica
Largura da banda de ganho 3dB (nm)	30	30-50
Efeitos não-lineares	Desprezíveis	Sim
Potência de Saturação (dBm)	10 – 15	5 – 20
Figura de ruído (dB)	3 – 5	7 – 12 dBm
Compatibilidade com circuitos fotônicos integrados	Não	Sim
Possibilidade de uso em outras funções?	Não	Sim

Tabela B.1: Comparação das principais características entre OFA e SOA.

Como a Figura B1 mostra, o futuro do SOA é claro, e mais aplicações aparecem com o amadurecimento da tecnologia e a redução de seus custos.

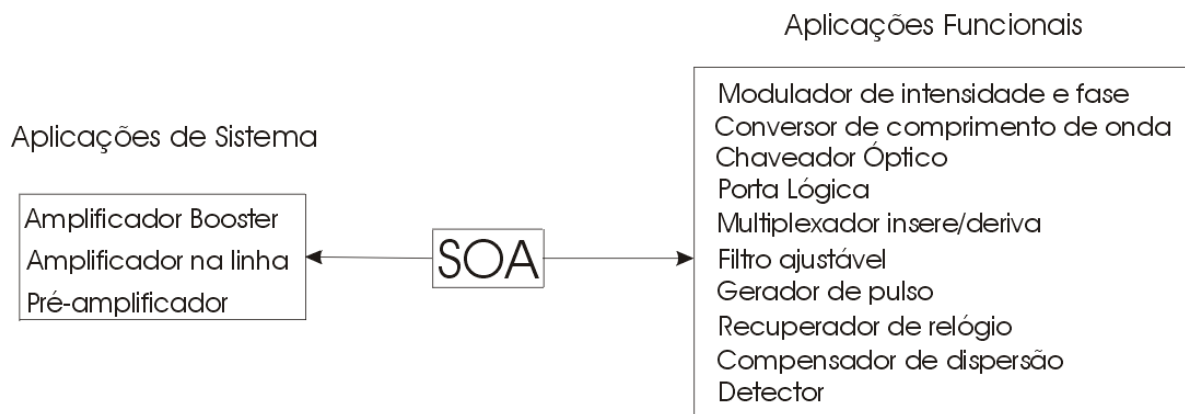


Figura B.1: Aplicações típicas do SOA.

Apêndice C

Resultados das Simulações

C.1 Formatos de Pulso Gaussiano e Solitônico

As Figuras C.1 a C.6 referem-se aos resultados obtidos das simulações realizadas com formato de pulso gaussiano. As Figuras C.7 a C.12 referem-se aos resultados obtidos nas simulações realizadas com formato de pulso solitônico.

C.1.1 Pulsos Gaussianos

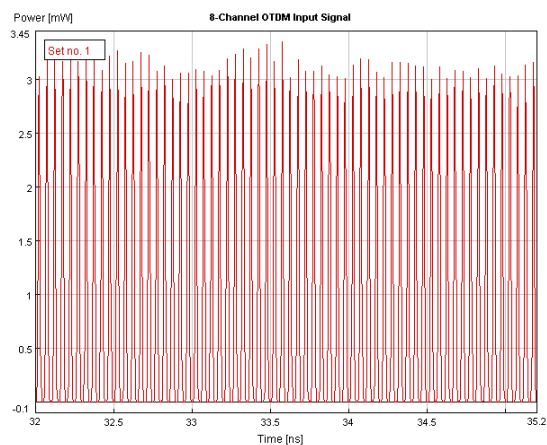


Figura C.1 – Sinal multiplexado.

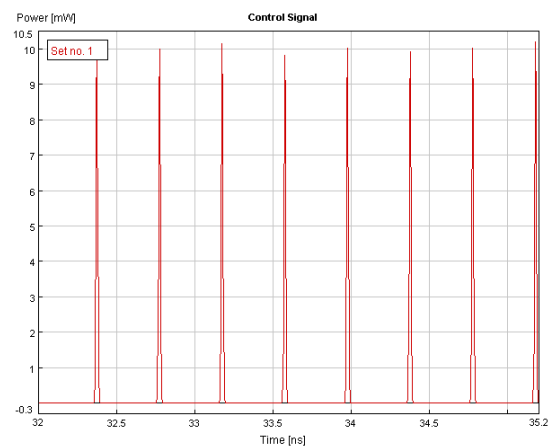


Figura C.2 – Canal de controle.

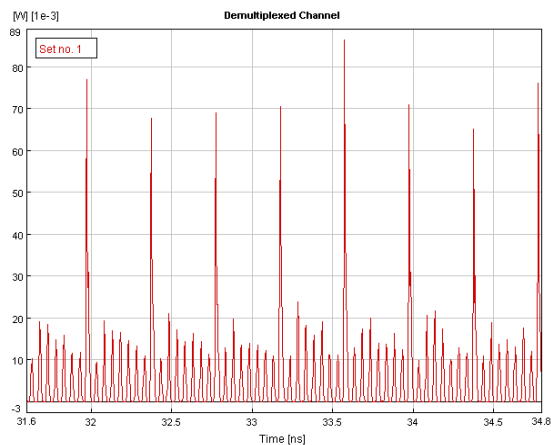


Figura C.3 – Canal transmitido.

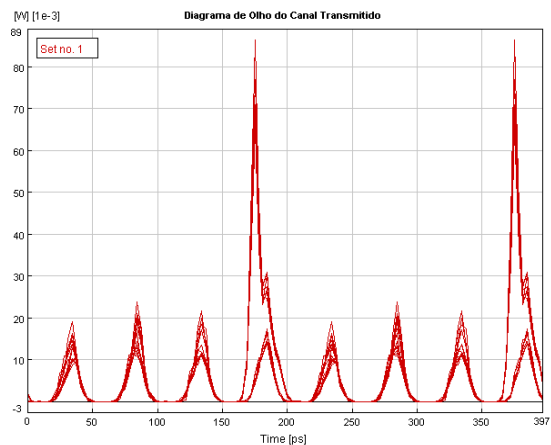


Figura C.4 – Diagrama de olho do canal transmitido.

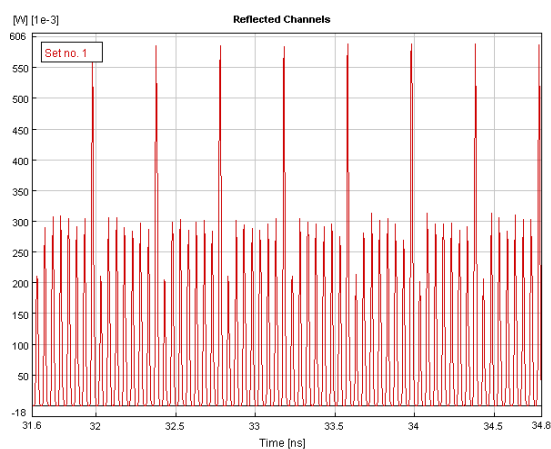


Figura C.5 – Canais refletidos.

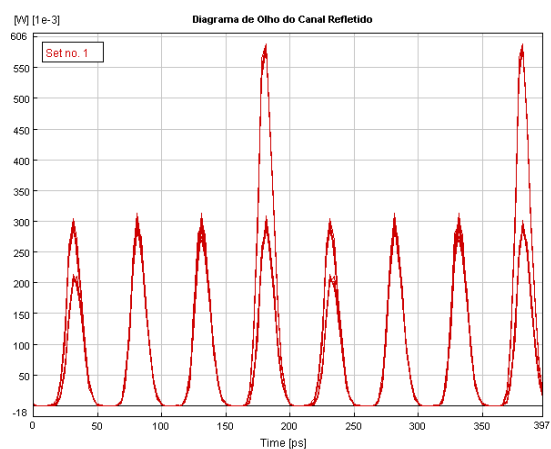


Figura C.6 – Diagrama de olho dos canais refletidos.

C.1.2 Pulsos Solitônicos

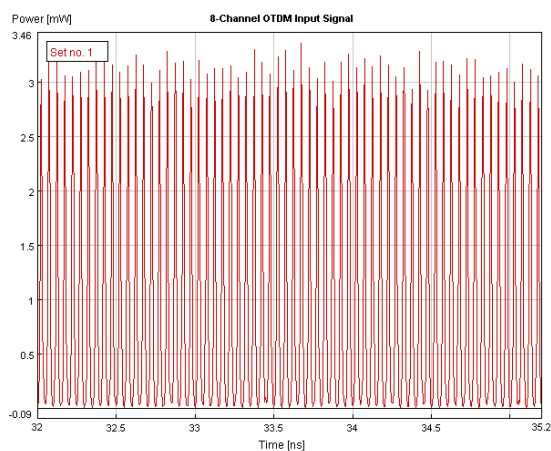


Figura C.7 – Sinal multiplexado.

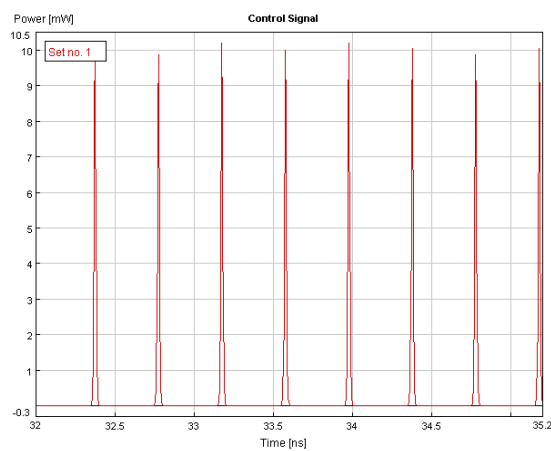


Figura C.8 – Canal de controle.

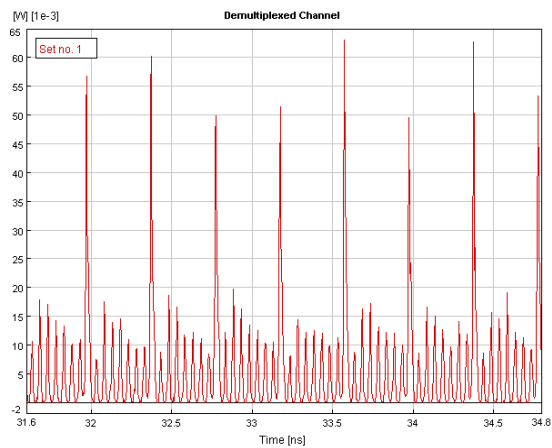


Figura C.9 – Canal transmitido.

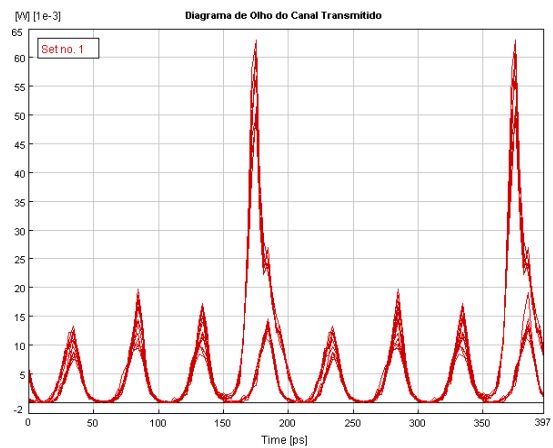


Figura C.10 – Diagrama de olho do canal transmitido.

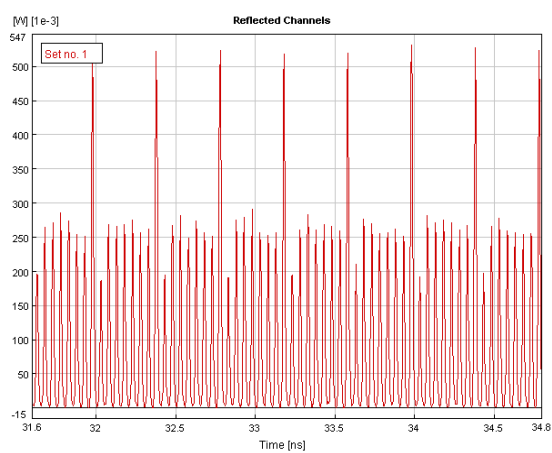


Figura C.11 – Canais refletidos.

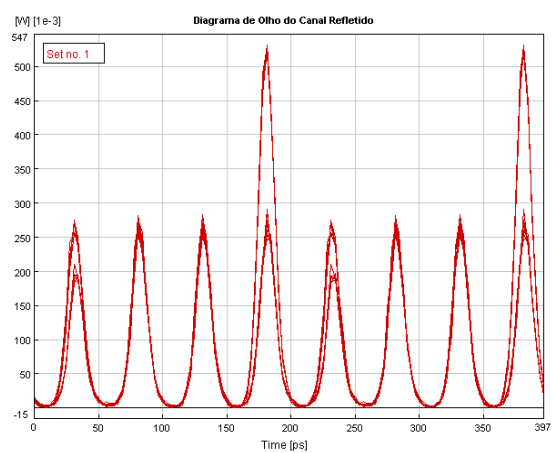


Figura C.12 – Diagrama de olho dos canais refletidos.

C.2 Diferença da Frequência Central entre os Sinais Multiplexados e de Controle

As Figuras C.13 a C.24 referem-se aos resultados obtidos das simulações realizadas considerando, inicialmente, a mesma frequência para os sinais multiplexado e de controle e, em seguida, uma diferença de 500 GHz entre esses sinais.

C.2.1 Mesma Frequência

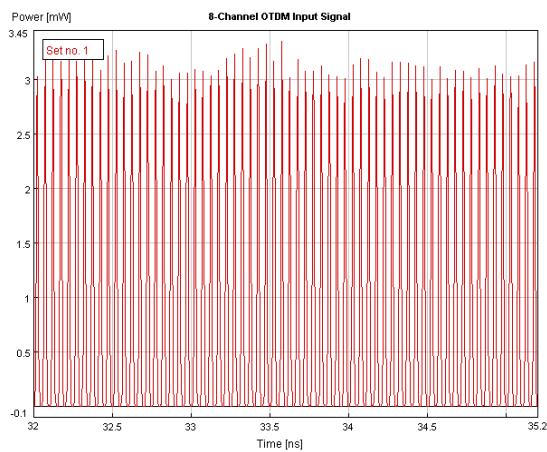


Figura C.13 – Sinal multiplexado.

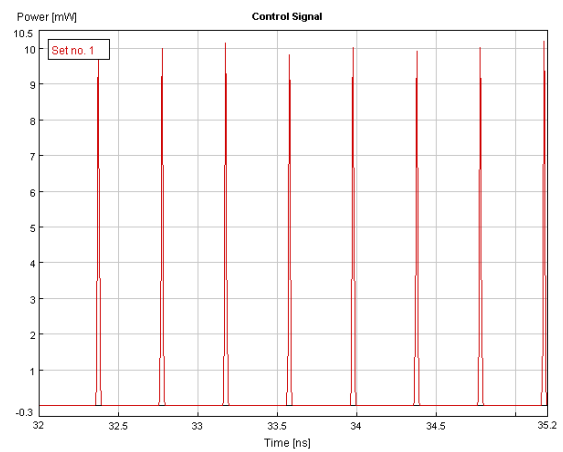


Figura C.14 – Canal de controle.

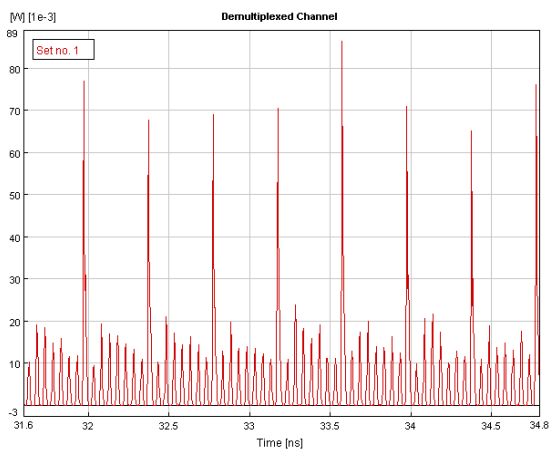


Figura C.15 – Canal transmitido.

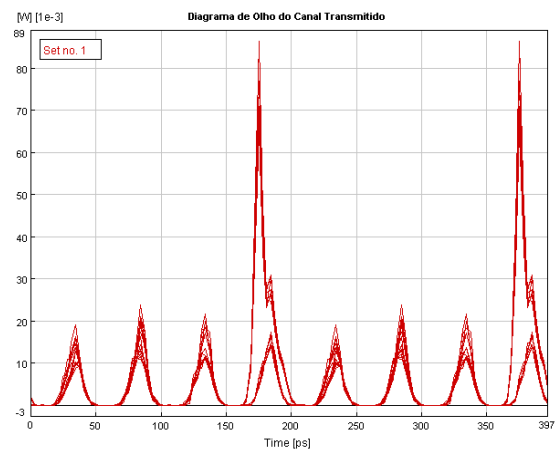


Figura C.16 – Diagrama de olho do canal transmitido.

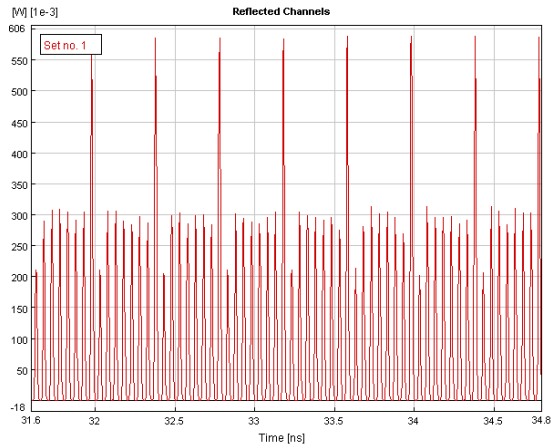


Figura C.17 – Canais refletidos.

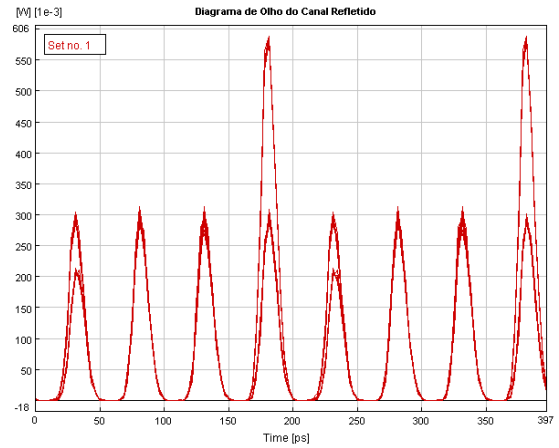


Figura C.18 – Diagrama de olho dos canais refletidos.

C.2.2 Diferença de 500 GHz entre o Sinal Multiplexado e o de Controle

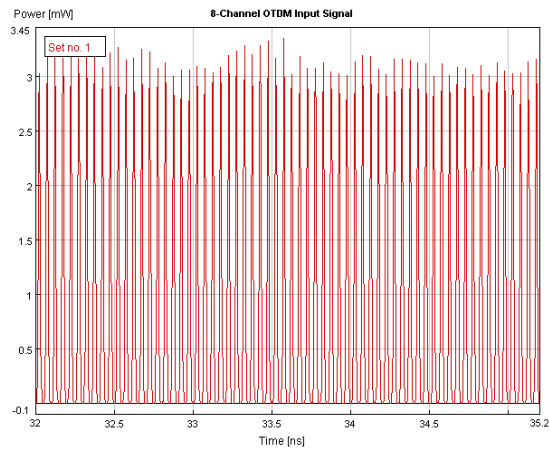


Figura C.19 – Sinal multiplexado.

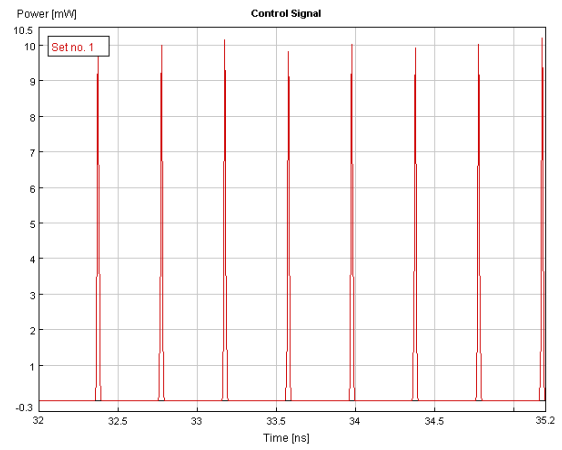


Figura C.20 – Canal de controle.

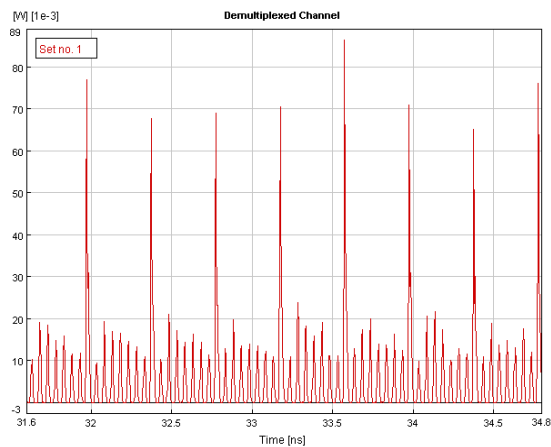


Figura C.21 – Canal transmitido.

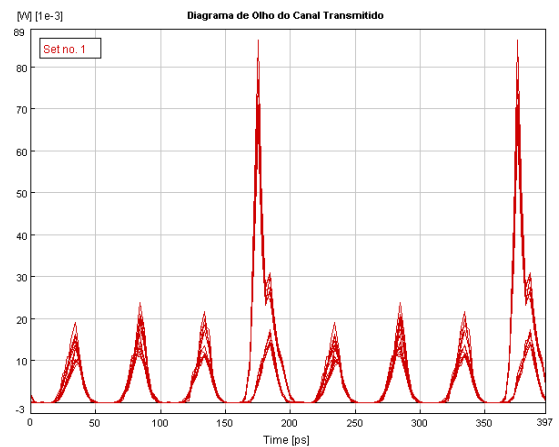


Figura C.22 – Diagrama de olho do canal transmitido.

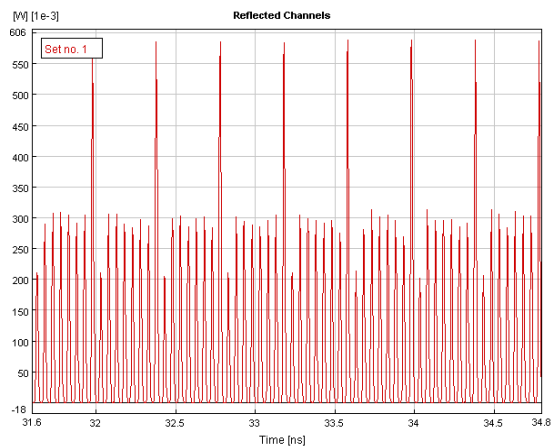


Figura C.23 – Canais refletidos.

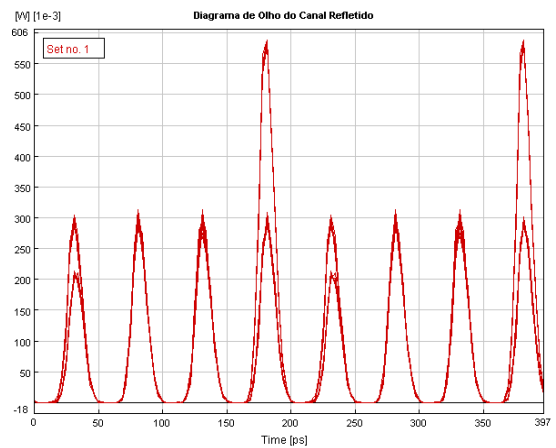


Figura C.24 – Diagrama de olho dos canais refletidos.

C.3 Largura FWHM

As Figuras C.25 a C.54 referem-se aos resultados obtidos das simulações realizadas considerando a largura FWHM ocupando 10% , 20%, 30%, 40% e 50% da janela de tempo.

C.3.1 Largura FWHM Ocupando 10% da Janela de Tempo

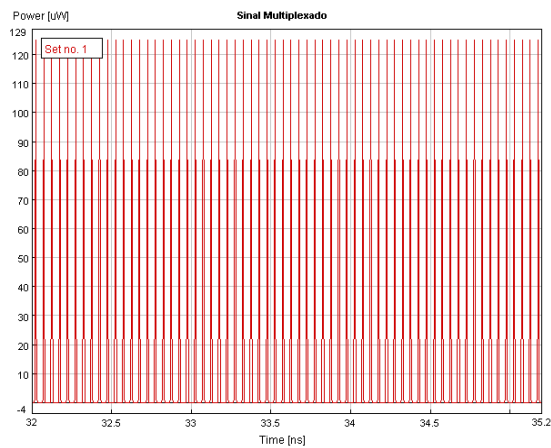


Figura C.25 – Sinal multiplexado.

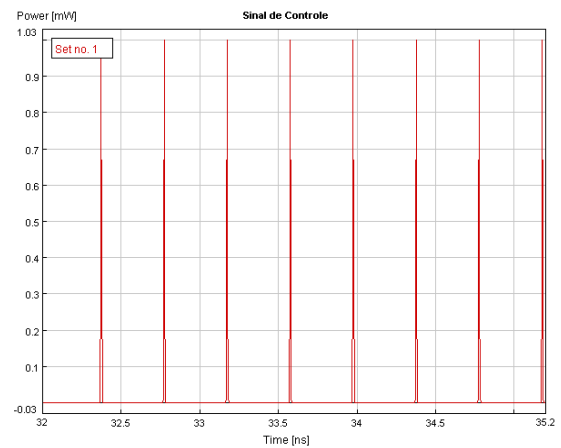


Figura C.26 – Canal de controle.

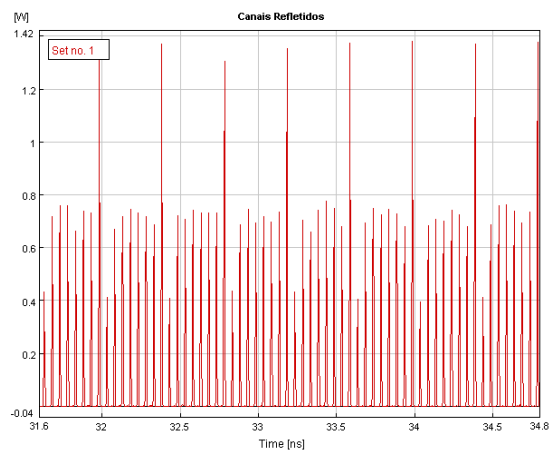


Figura C.27 – Canais refletidos.

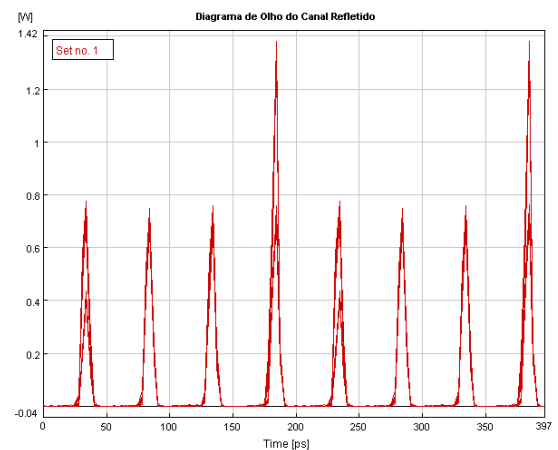


Figura C.28 – Diagrama de olho dos canais refletidos.

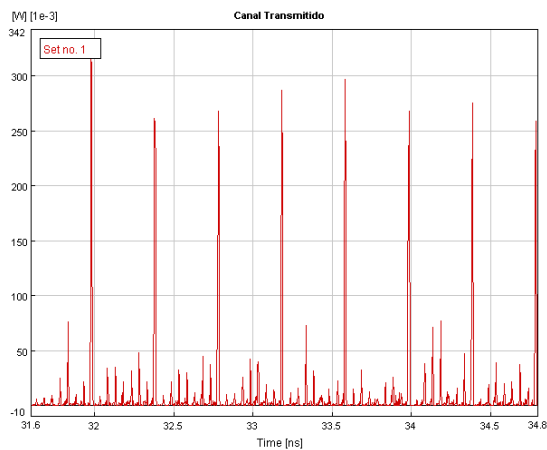


Figura C.29 – Canal transmitido.

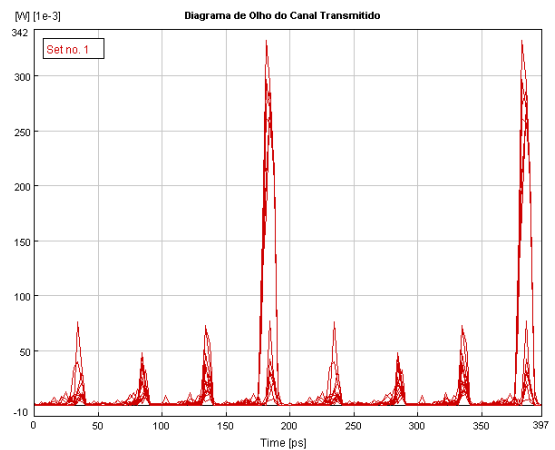


Figura C.30 – Diagrama de olho do canal transmitido.

C.3.2 Largura FWHM Ocupando 20% da Janela de Tempo

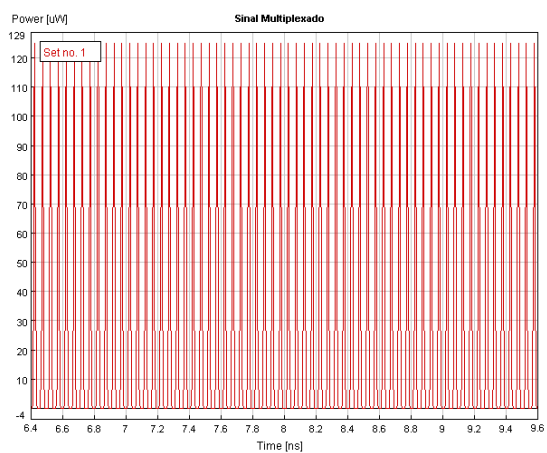


Figura C.31 – Sinal multiplexado.

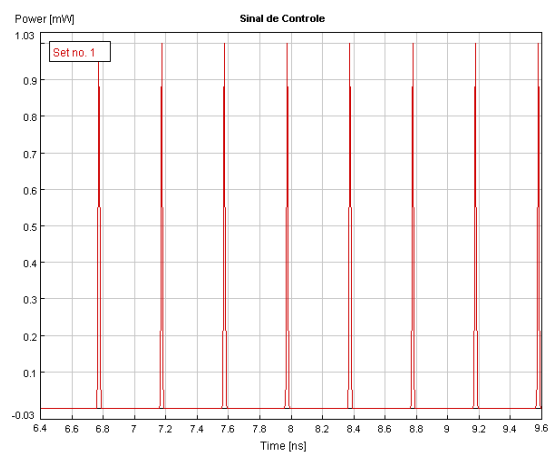


Figura C.32 – Canal de controle.

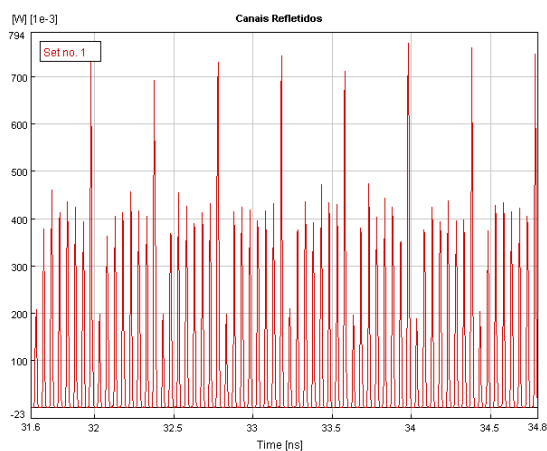


Figura C.33 – Canais refletidos.

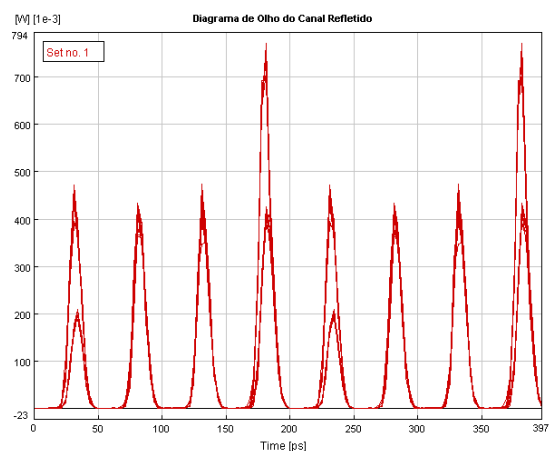


Figura C.34 – Diagrama de olho dos canais refletidos.

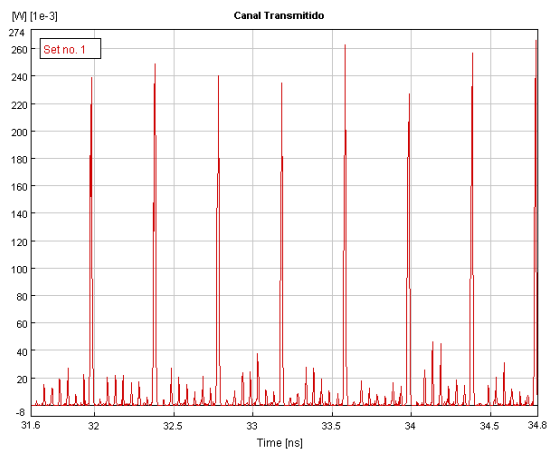


Figura C.35 – Canal transmitido.

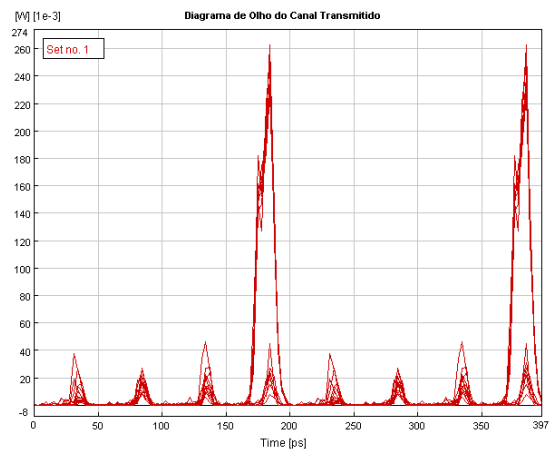


Figura C.36 – Diagrama de olho do canal transmitido.

C.3.3 Largura FWHM Ocupando 30% da Janela de Tempo

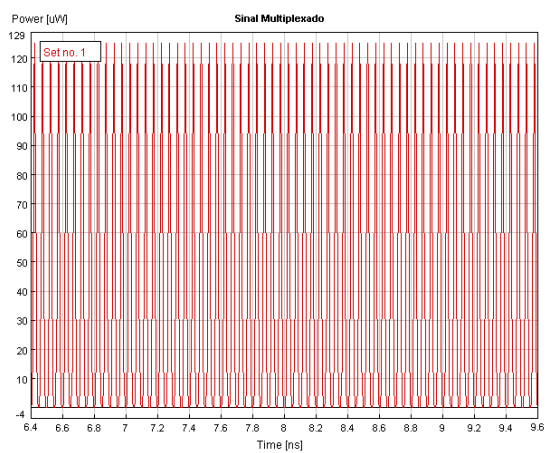


Figura C.37 – Sinal multiplexado.

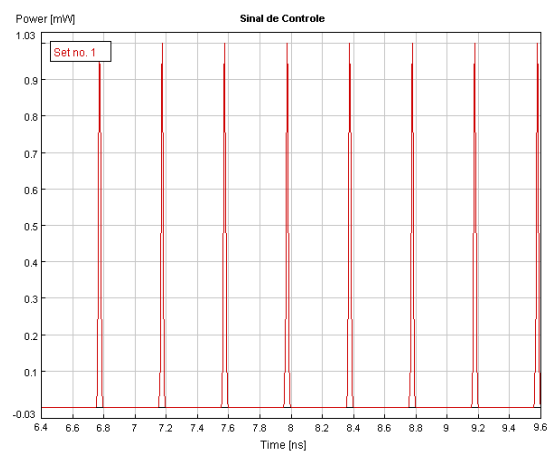


Figura C.38 – Canal de controle.

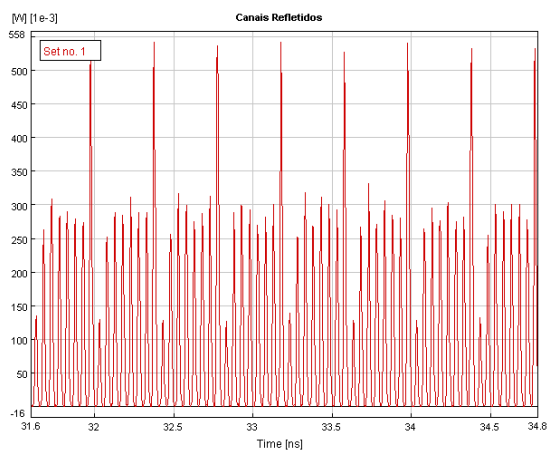


Figura C.39 – Canais refletidos.

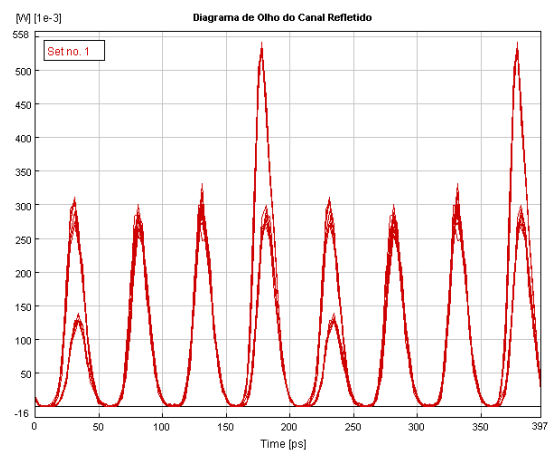


Figura C.40 – Diagrama de olho dos canais refletidos.

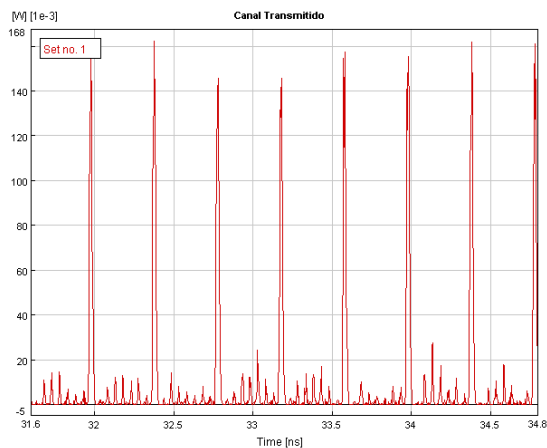


Figura C.41 – Canal transmitido.

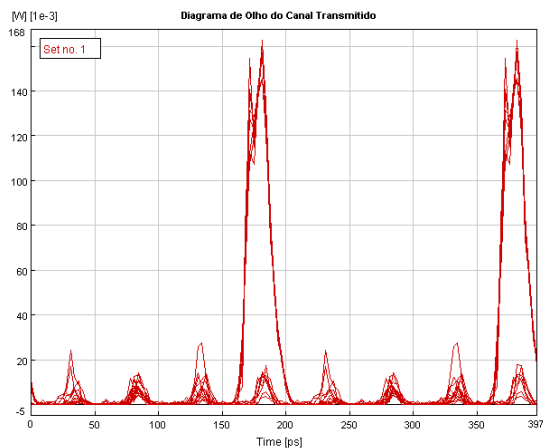


Figura C.42 – Diagrama de olho do canal transmitido.

C.3.4 Largura FWHM Ocupando 40% da Janela de Tempo

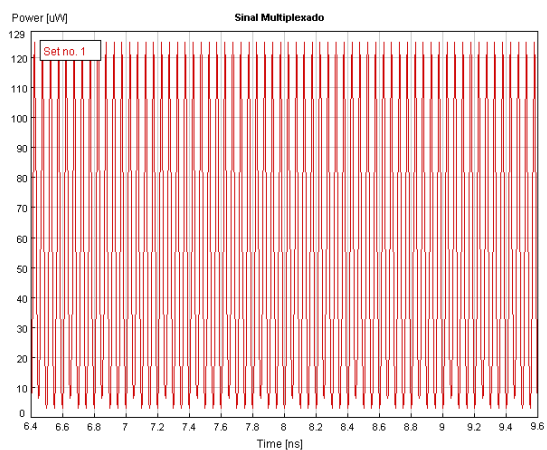


Figura C.43 – Sinal multiplexado.

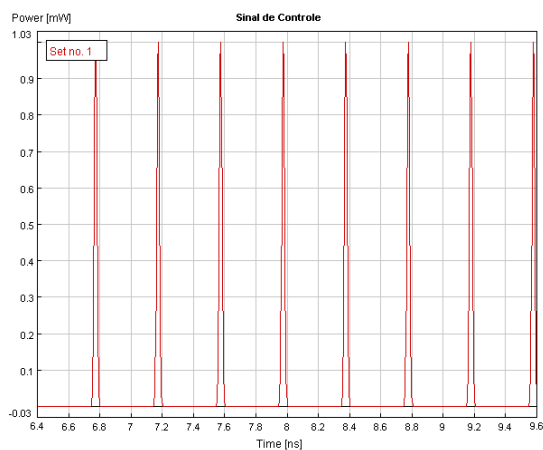


Figura C.44 – Canal de controle.

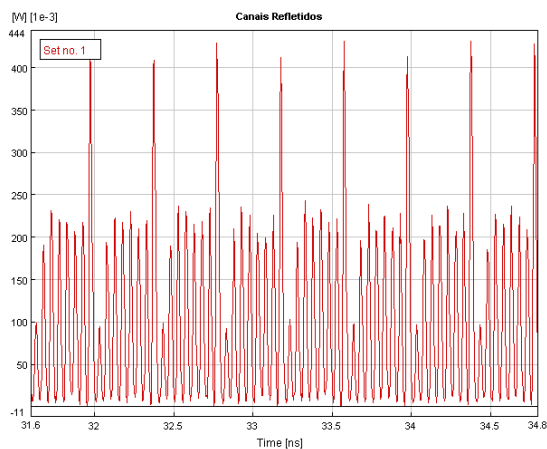


Figura C.45 – Canais refletidos.

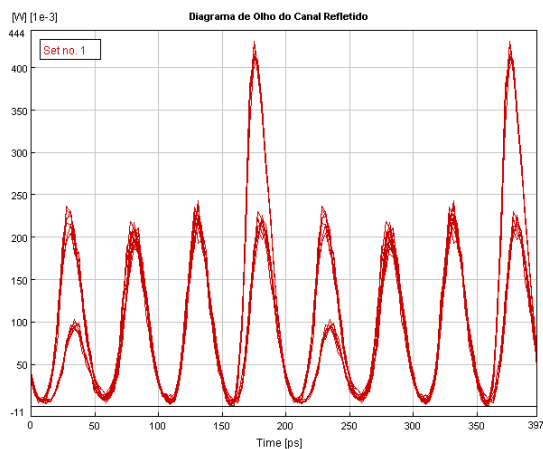


Figura C.46 – Diagrama de olho dos canais refletidos.

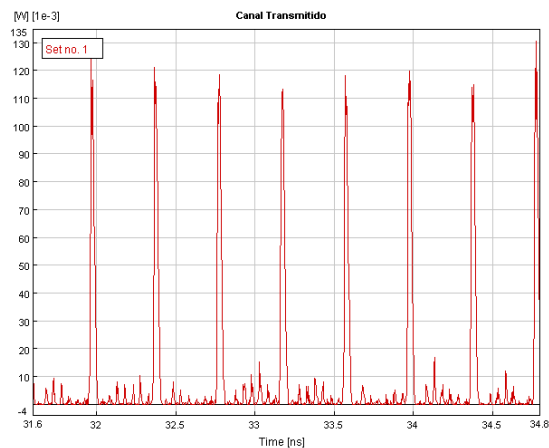


Figura C.47 – Sinal transmitido.

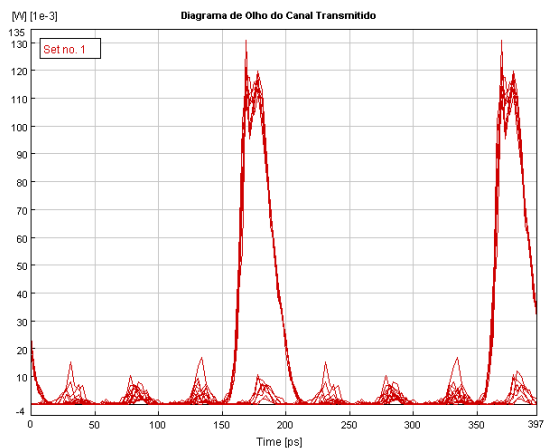


Figura C.48 – Diagrama de olho do canal transmitido.

C.3.5 Largura FWHM Ocupando 50% da Janela de Tempo

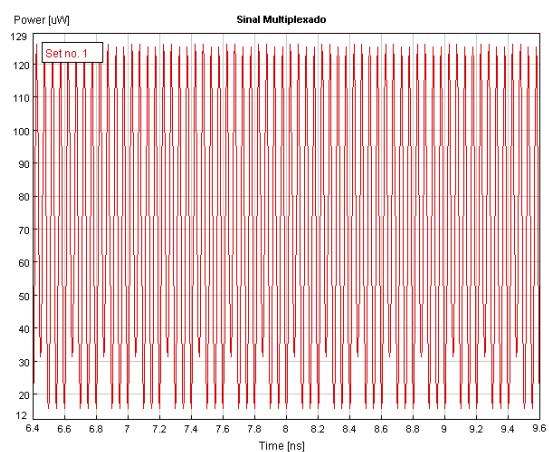


Figura C.49 – Sinal multiplexado.

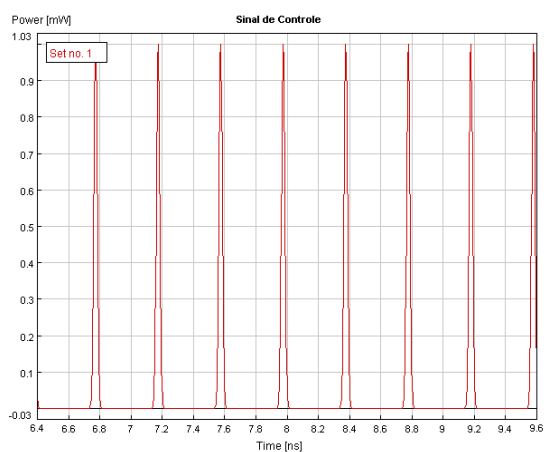


Figura C.50 – Canal de controle.

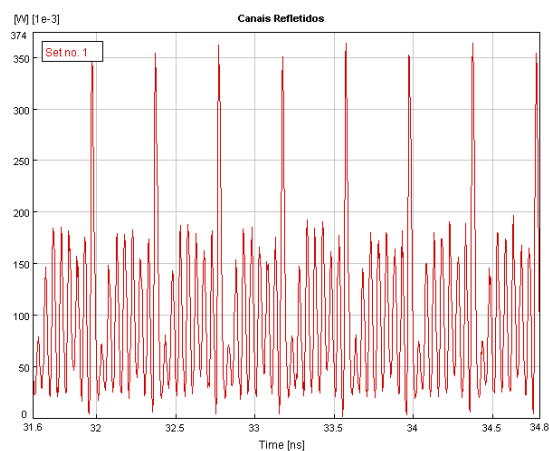


Figura C.51 – Canais refletidos.

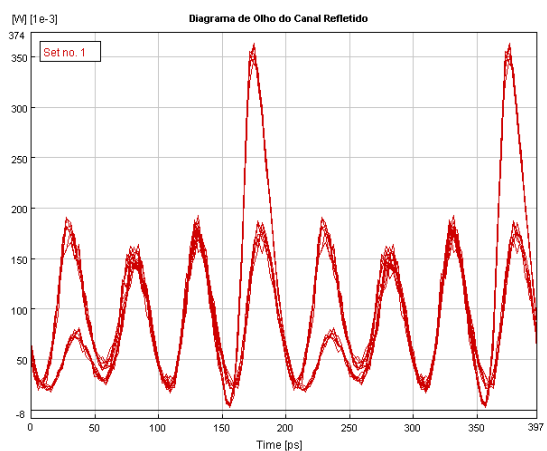


Figura C.52 – Diagrama de olho dos canais refletidos.

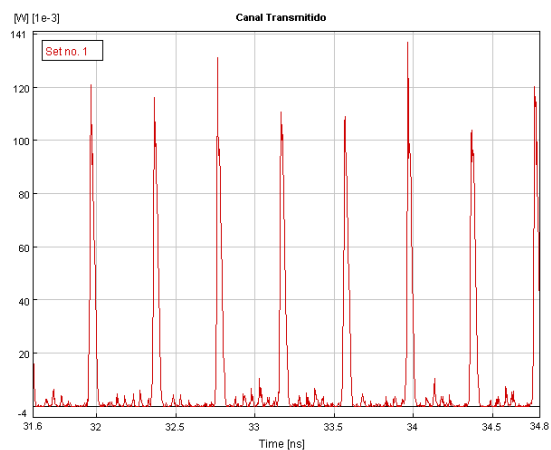


Figura C.53 – Canal transmitido.

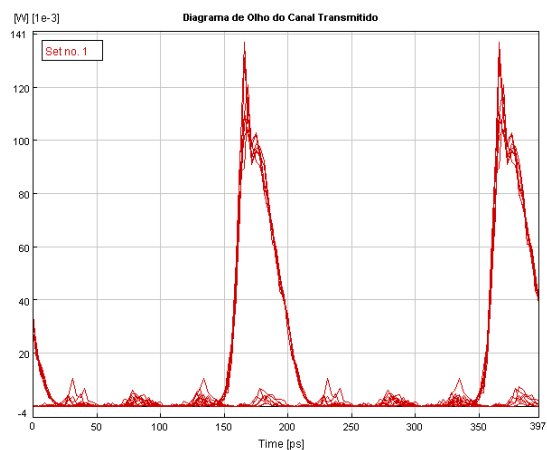


Figura C.54 – Diagrama de olho do canal transmitido.

C.4 Relação de Acoplamento no NOLM

As Figuras C.55 a 7.84 referem-se aos resultados obtidos das simulações realizadas considerando, inicialmente, relação de acoplamento nula, em seguida, a relação de acoplamento de 25%, 50%, 75% e 100%.

C.4.1 Relação de Acoplamento Nula

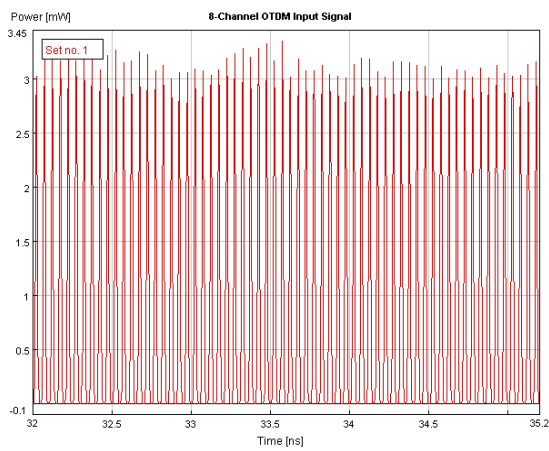


Figura C.55 – Sinal multiplexado.

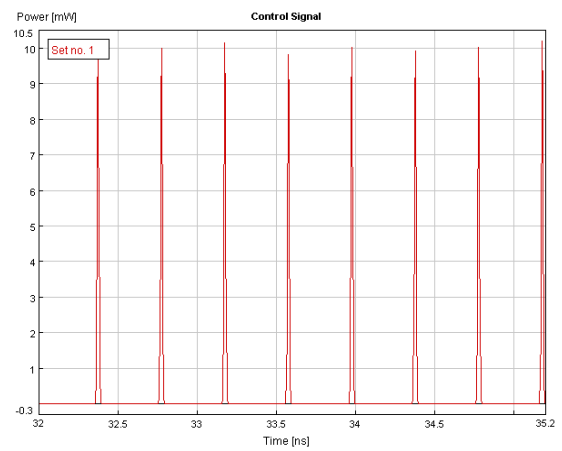


Figura C.56 – Canal de controle.

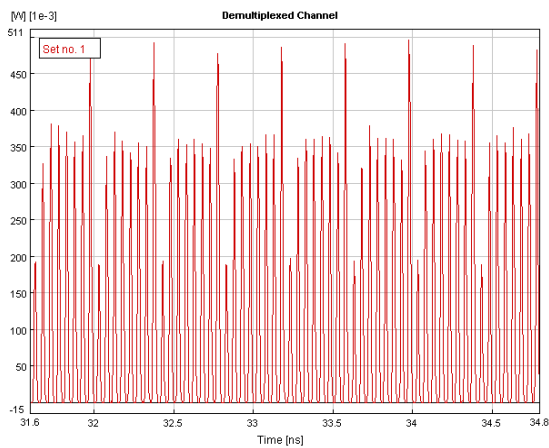


Figura C.57 – Canal transmitido.

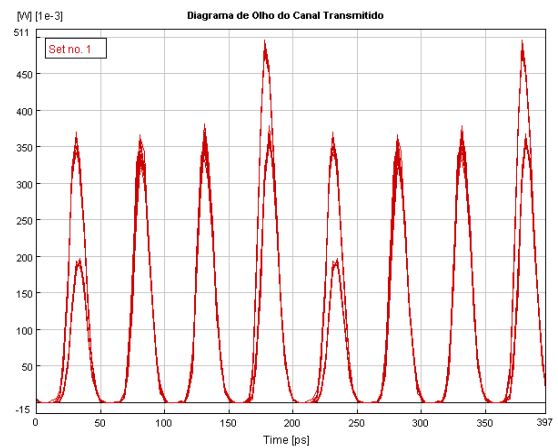


Figura C.58 – Diagrama de olho do canal transmitido.

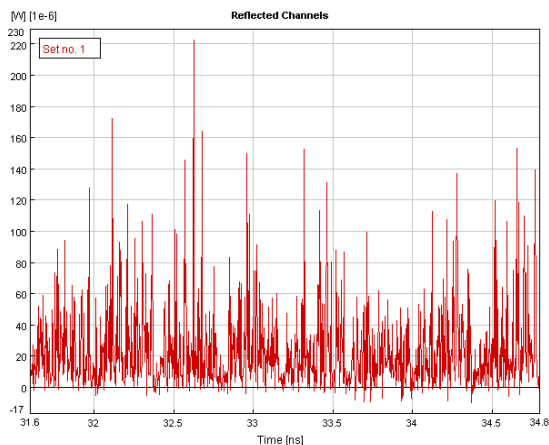


Figura C.59 – Canais refletidos.

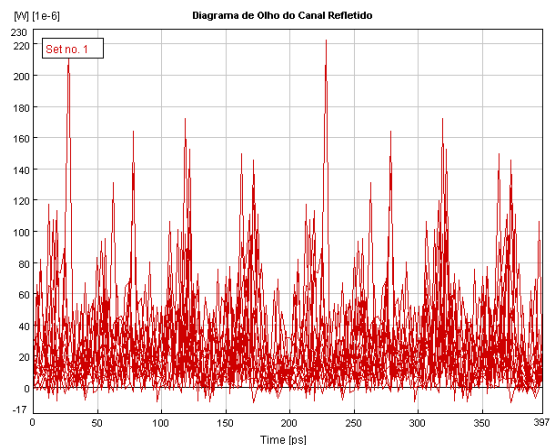


Figura C.60 – Diagrama de olho dos canais refletidos.

C.4.2 Relação de Acoplamento de 25%

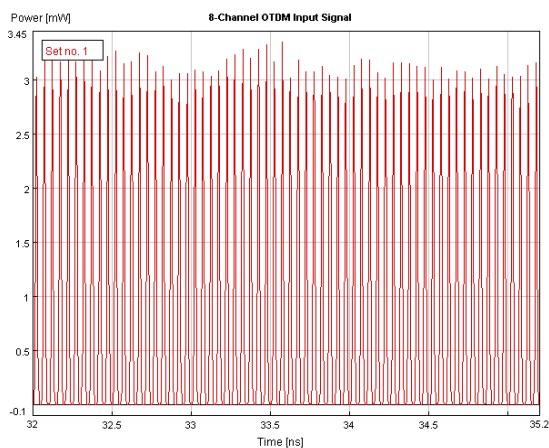


Figura C.61 – Sinal multiplexado.

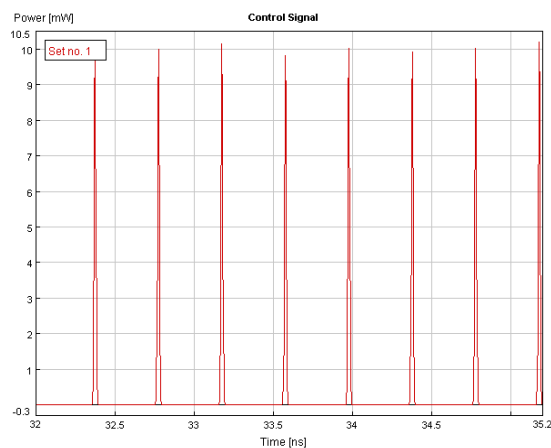


Figura C.62 – Canal de controle.

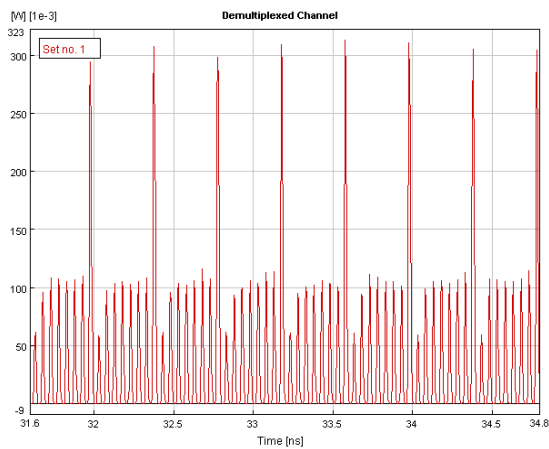


Figura C.63 – Canal transmitido.

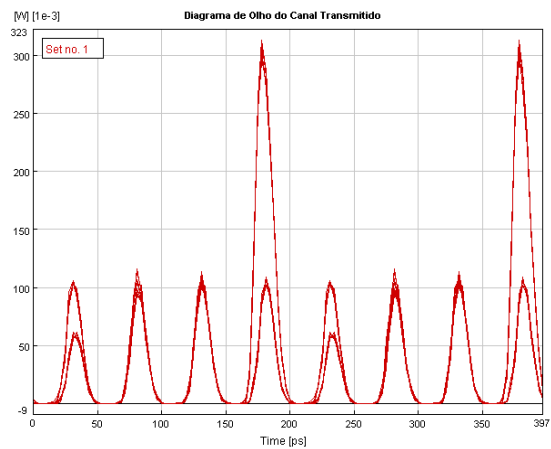


Figura C.64 – Diagrama de olho do canal transmitido.

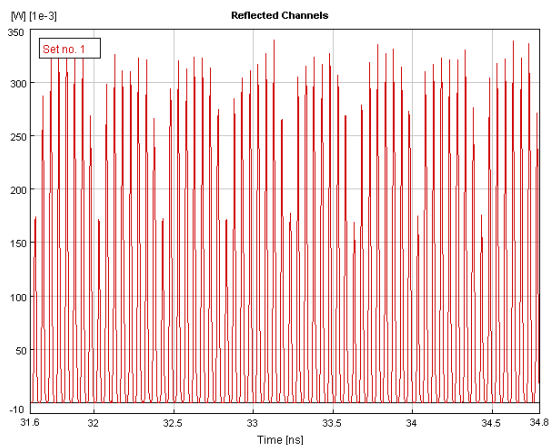


Figura C.65 – Canais refletidos.

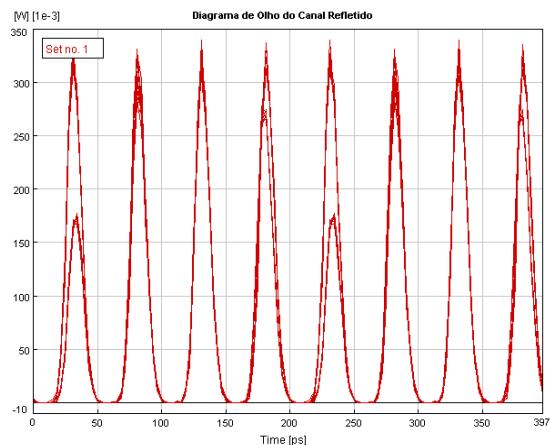


Figura C.66 – Diagrama de olho dos canais refletidos.

C.4.3 Relação de Acoplamento de 50%

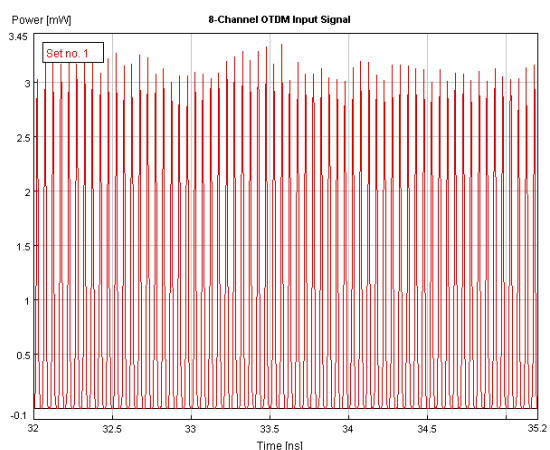


Figura C.67 – Sinal multiplexado.

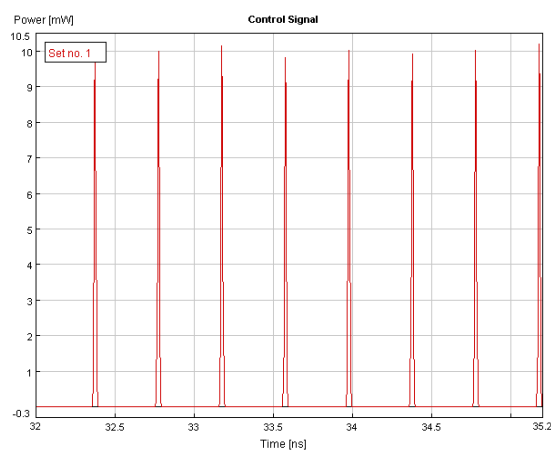


Figura C.68 – Canal de controle.

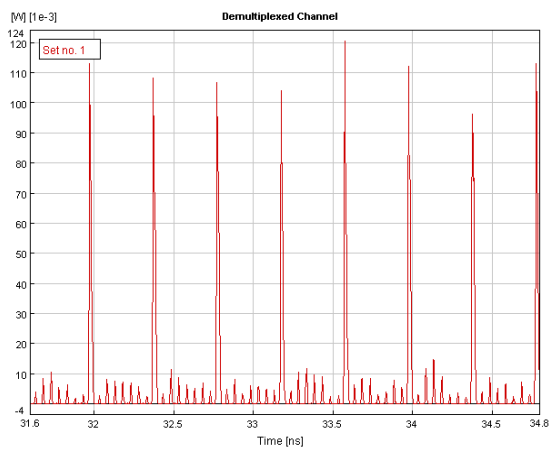


Figura C.69 – Canal transmitido.

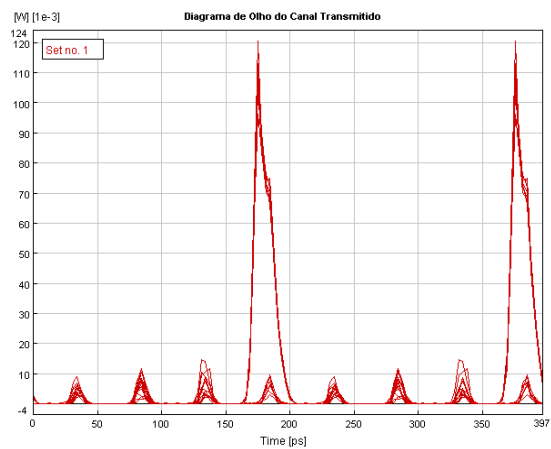


Figura C.70 – Diagrama de olho do canal transmitido.

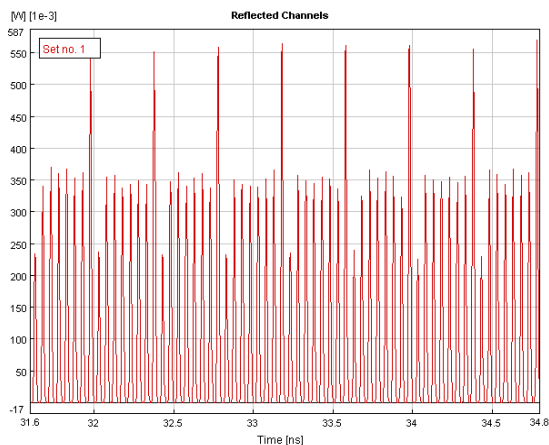


Figura C.71 – Canais refletidos.

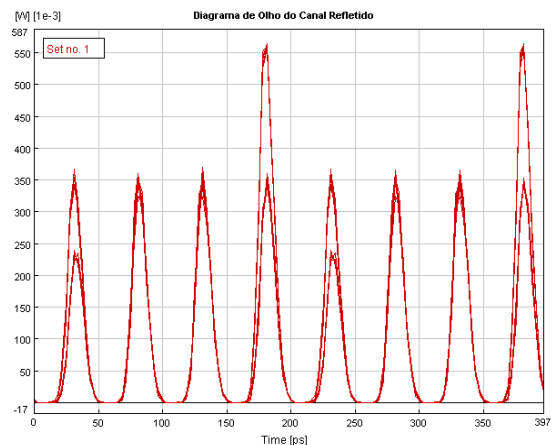


Figura C.72 – Diagrama de olho dos canais refletidos.

C.4.4 Relação de Acoplamento de 75%

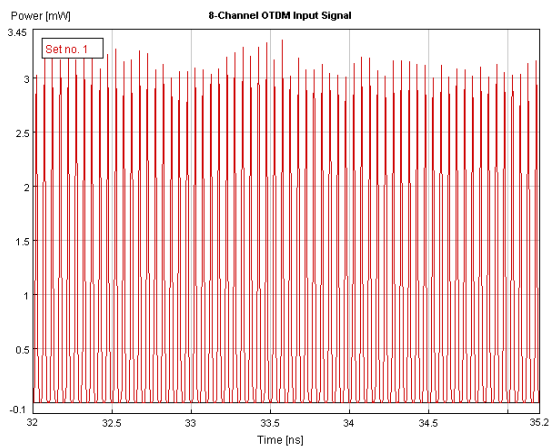


Figura C.73 – Sinal multiplexado.

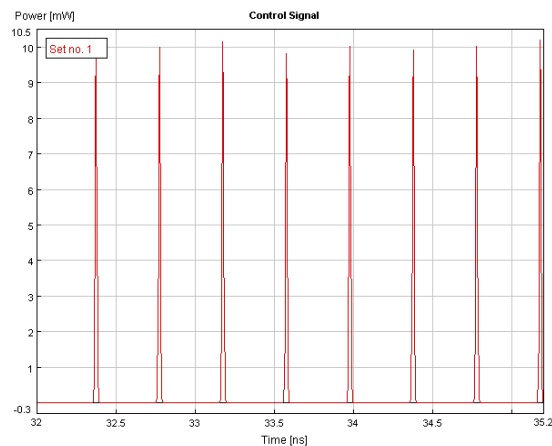


Figura C.74 – Canal de controle.

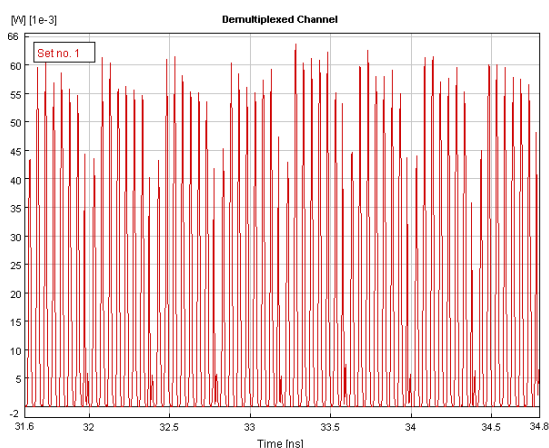


Figura C.75 – Canal transmitido.

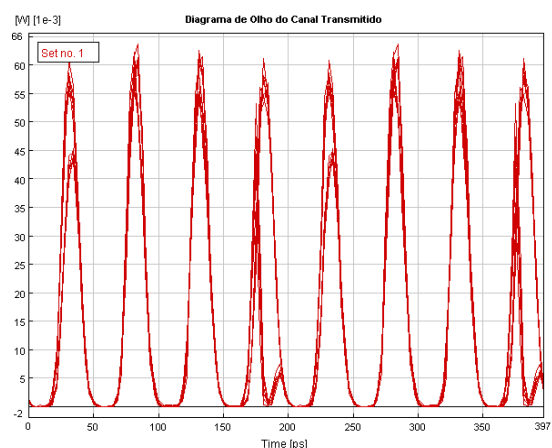


Figura C.76 – Diagrama de olho do canal transmitido.

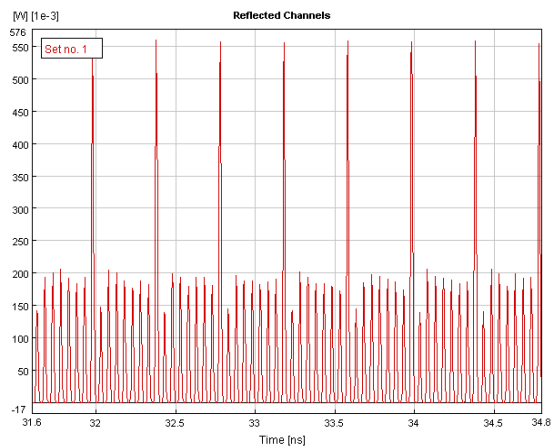


Figura C.77 – Canais refletidos.

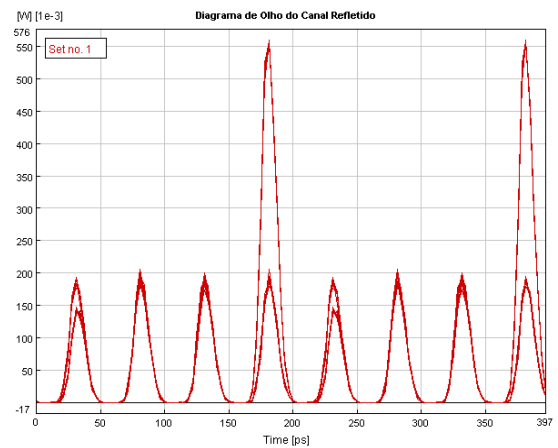


Figura C.78 – Diagrama de olho dos canais refletidos.

C.4.5 Relação de Acoplamento de 100%

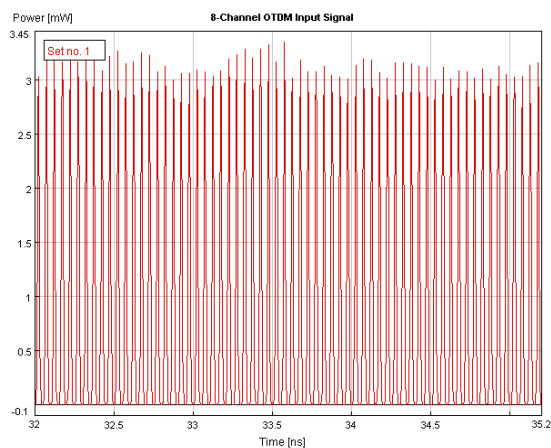


Figura C.79 – Sinal multiplexado.

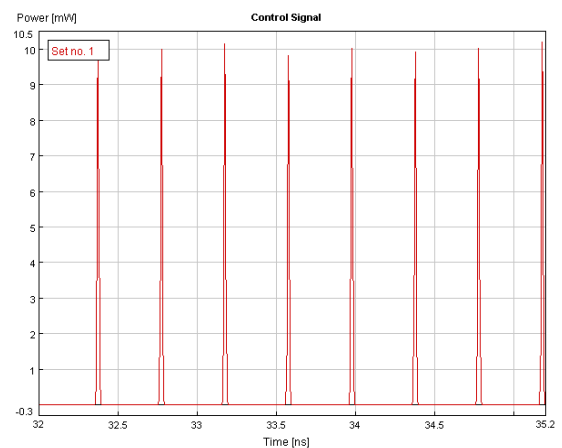


Figura C.80 – Canal de controle.

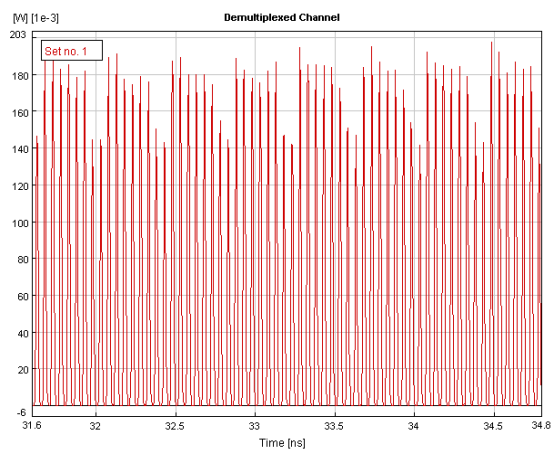


Figura C.81 – Canal transmitido.

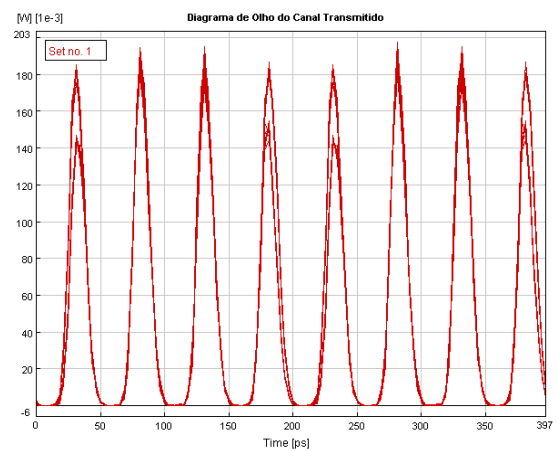


Figura C.82 – Diagrama de olho do canal transmitido.

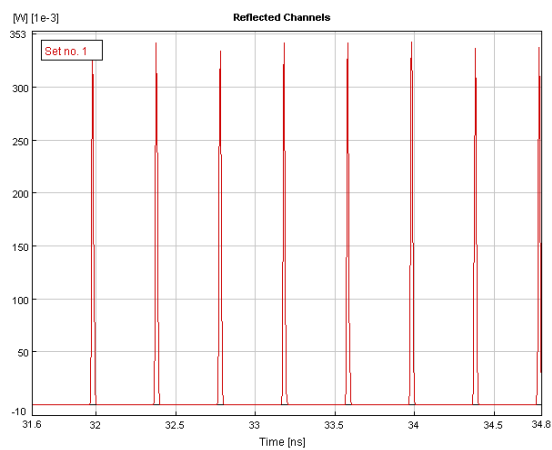


Figura C.83 – Canais refletidos.

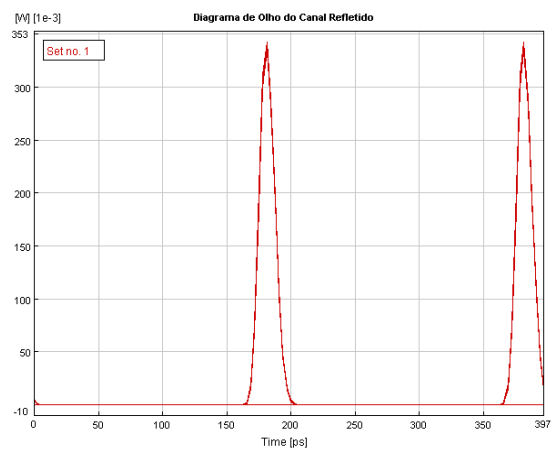


Figura C.84 – Diagrama de olho dos canais refletidos.

C.5 Análise da Variação da Potência do Sinal Multiplexado

As Figuras C.85 a C.107 referem-se aos resultados obtidos das simulações, com a análise da potência nos valores de 0,43 mW, 1,36 mW, 4,30 mW e 13,70 mW.

C.5.1 Potência de 0,43 mW

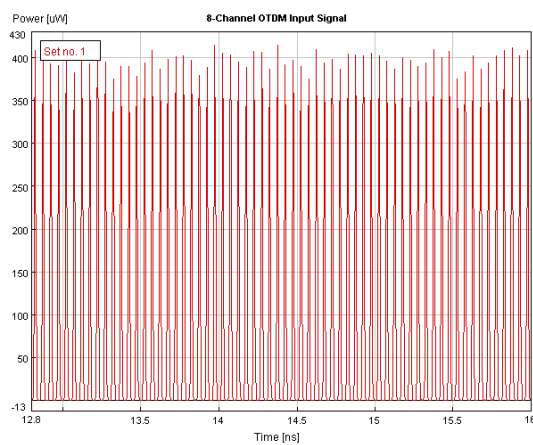


Figura C.85 – Sinal multiplexado.

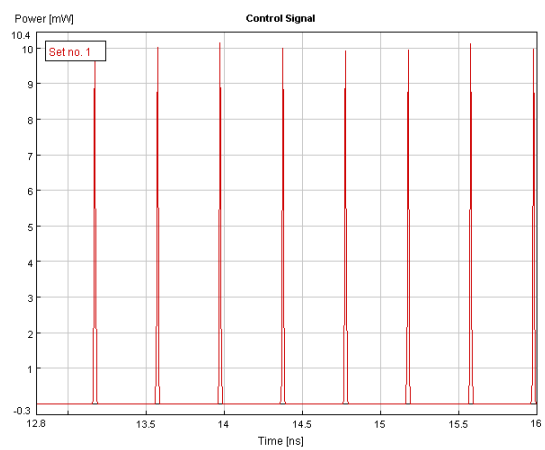


Figura C.86 – Canal de controle.

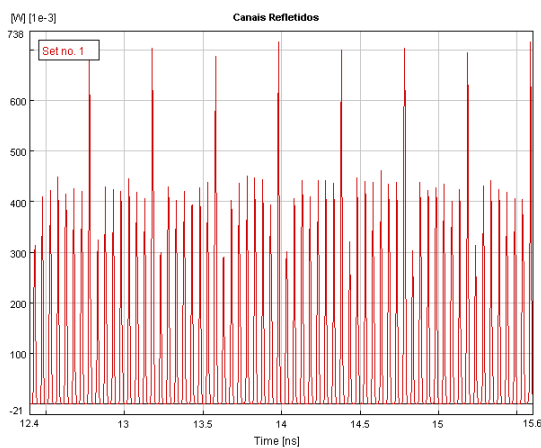


Figura C.87 – Canais refletidos.

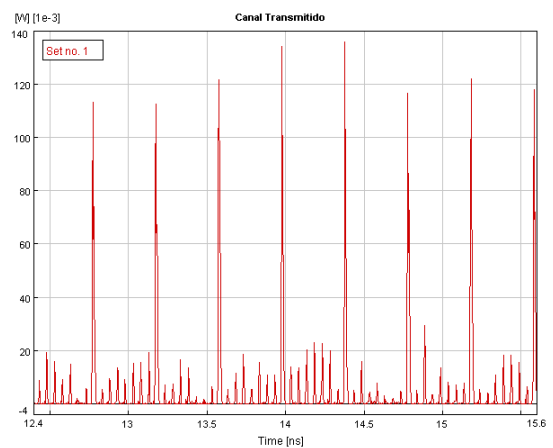


Figura C.88 – Canal transmitido.

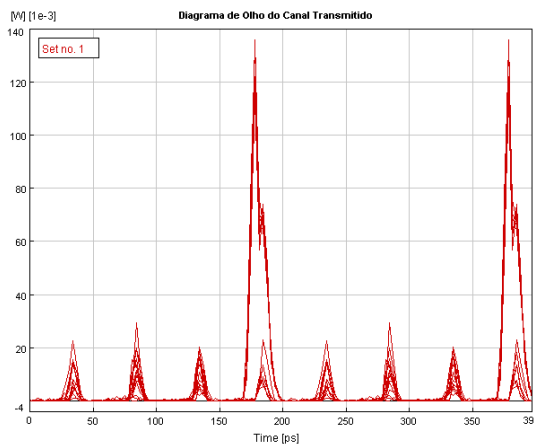


Figura C.89 – Diagrama de olho do canal transmitido.

C.5.2 Potência de 1,36 mW

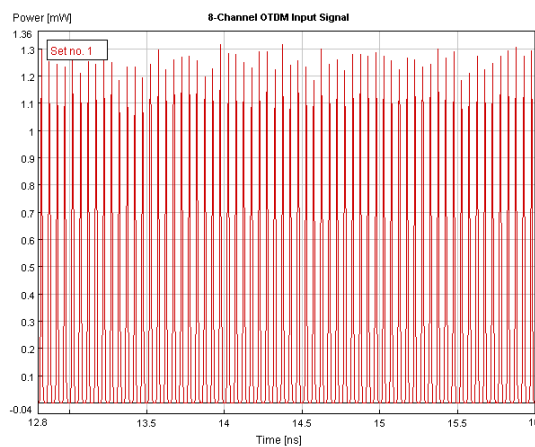


Figura C.90 – Sinal multiplexado.

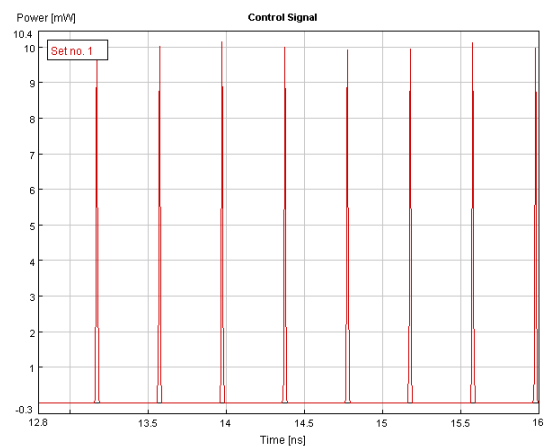


Figura C.91 – Canal de controle.

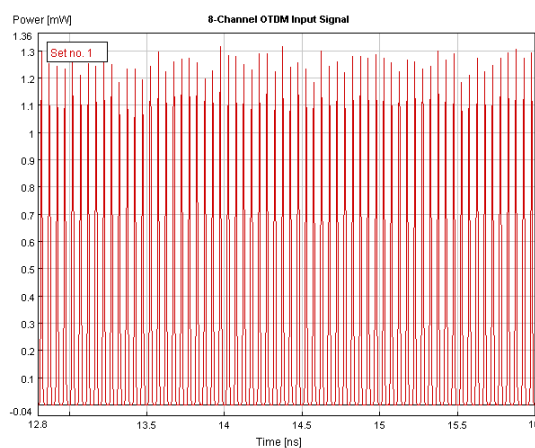


Figura C.92 – Canal transmitido.

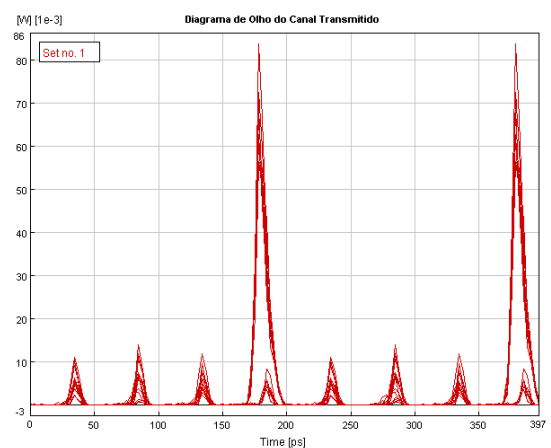


Figura C.93 – Diagrama de olho do canal transmitido.

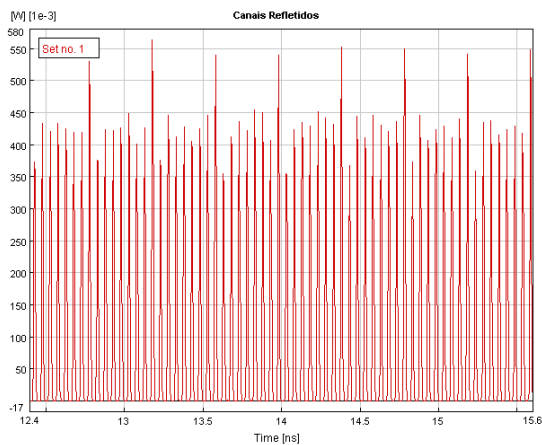


Figura C.94 – Canais refletidos.

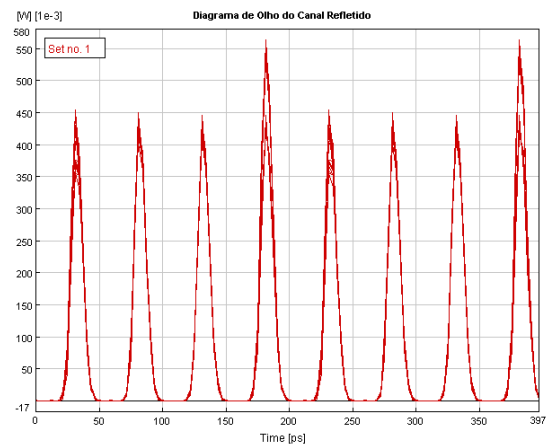


Figura C.95 – Diagrama de olho dos canais refletidos.

C.5.3 Potência de 4,30 mW

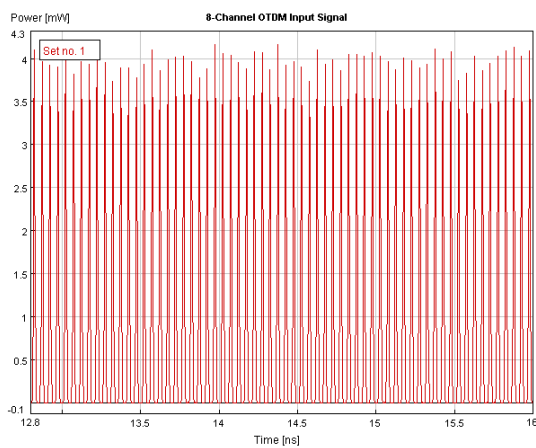


Figura C.96 – Sinal multiplexado.

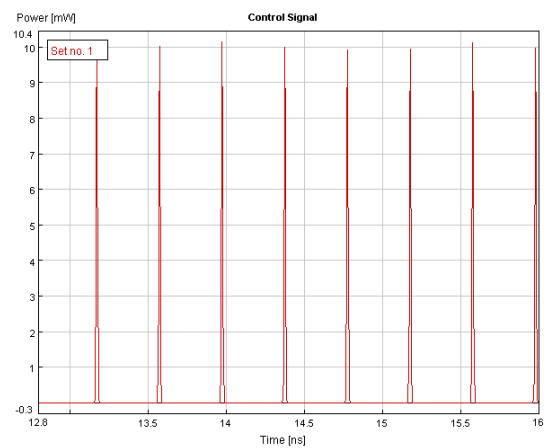


Figura C.97 – Canal de controle.

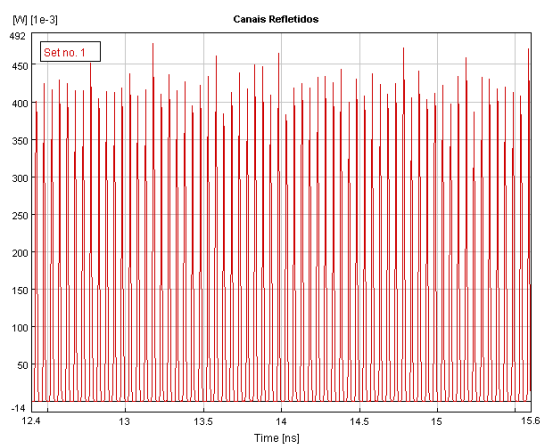


Figura C.98 – Canais refletidos.

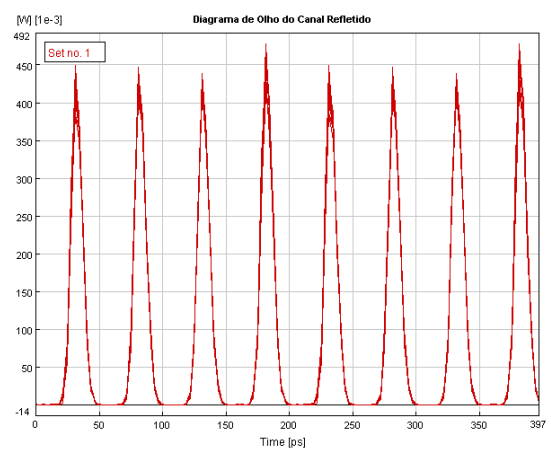


Figura C.99 – Diagrama de olho dos canais refletidos.

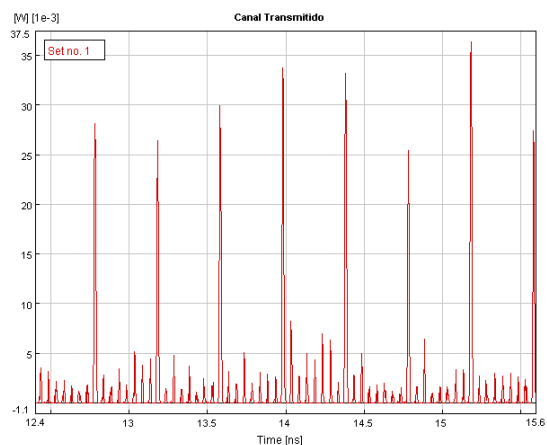


Figura C.100 – Canal transmitido.

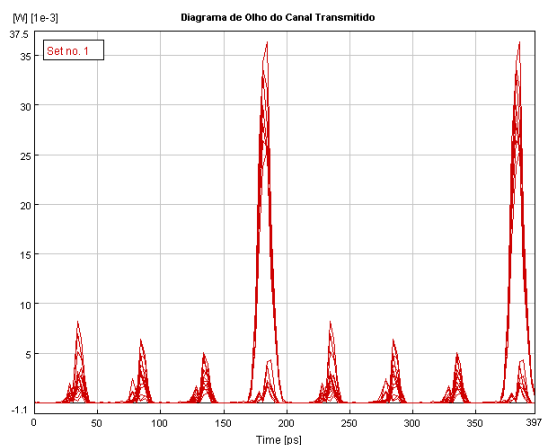


Figura C.101 – Diagrama de olho do canal transmitido.

C.5.4 Potência de 13,70 mW

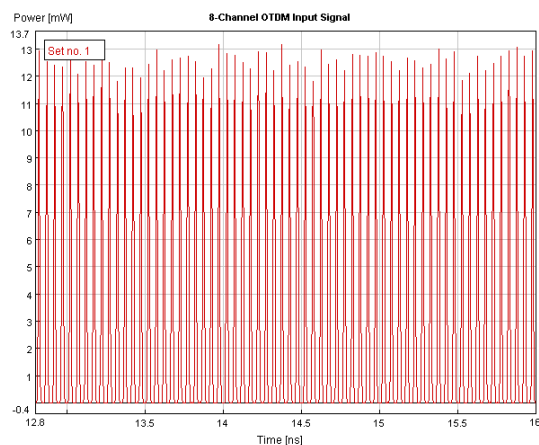


Figura C.102 – Sinal multiplexado.

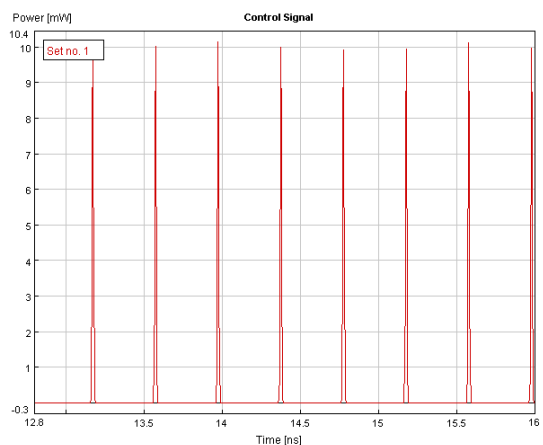


Figura C.103 – Canal de controle.

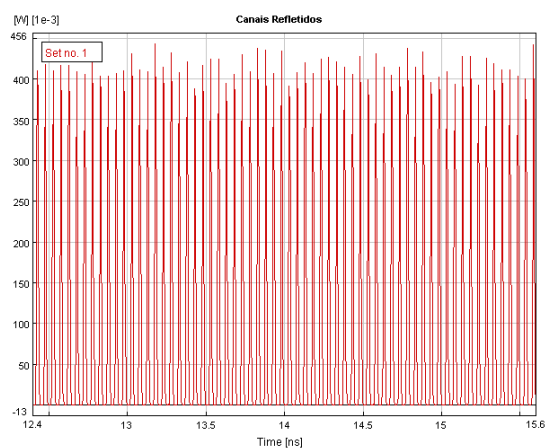


Figura C.104 – Canais refletidos.

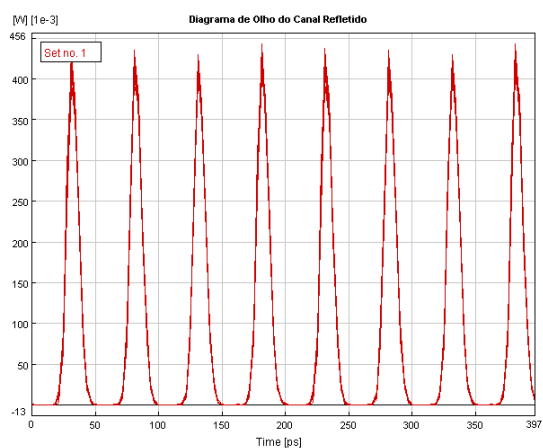


Figura C.105 – Diagrama de olho dos canais refletidos.

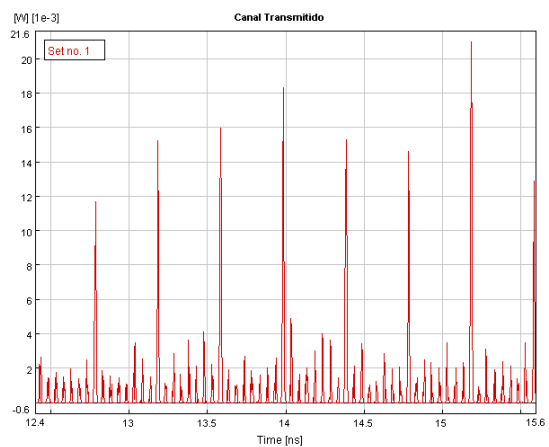


Figura C.106 – Canal transmitido.

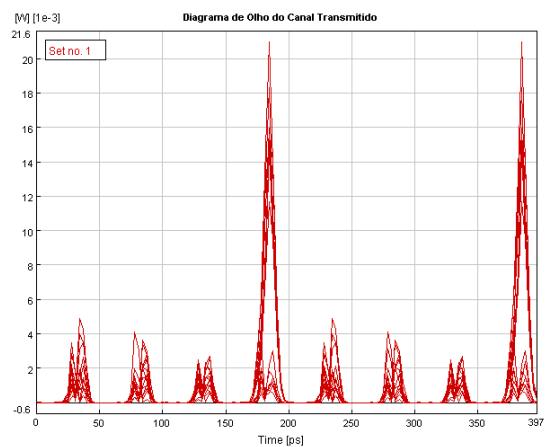


Figura C.107 – Diagrama de olho do canal transmitido.

Referências Bibliográficas

[Abelém02] ABELÉM, Antônio Jorge G., STANTON, Michael A., “Inter-redes IP baseadas em Redes Ópticas”, Anais do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, 2002.

[Agrawal95] AGRAWAL, G. P., “*Fiber-Optic Communication Systems*”, 2ª Edição, Academic Press, 1995.

[Agrawal01] AGRAWAL, G. P., “*Applications of Nonlinear Fiber Optics*”, Academic Press, 2001.

[Alcatel02] ALCATEL, “*Optical Networks*”, Web ProForum Tutoriais (www.iec.org), 2003.

[Alferness00] ALFERNES, Rod C., KOGELNIK, Herwig, WOOD, Thomas H., “*The Evolution of Optical Systems: Optics Everywhere*,” Bell Labs Technical Journal, pp. 188-202, janeiro-março/2000.

[Anderson99] ANDERSON, Jon, MANCHESTER, James S., RODRIGUES-MORAL, Antonio, VEERARAGHAVAN, Malathi, “*Protocols and Architectures for IP Optical Networking*,” Bell Labs Technical Journal, pp. 105-124, janeiro-março/1999.

[Bonenfant03] Paul Bonenfant, “*The evolution of SONET/SDH over WDM*”, OSA Optics & Photonics News, vol. 14, nº. 3, março 2003, pp. 32-37.

[Borella97] BORELLA, Michael S., JUE, Jason P., BANERJEE, Dhritiman, RAMAMURTHY, Byrav, MUKHERJEE, Biswanath, “*Optical Components for WDM Lightwave Networks*,” Proceedings of the IEEE, vol. 85, nº 8, pp. 1274–1307, agosto/1997.

[C++Sim99] “*C++SIM User's Guide, Public Release 1.5*”, University of Newcastle upon Tyne, UK.

[CACI03] Products Company, “*Simulation & Modeling*” “<http://www.caciasl.com/>”, 2003.

[Chraplyvy90] CHRAPLYVY, Andrew R., “*Limitations on Lightwave Communications Imposed by Optical Fiber Nonlinearities*,” J. Lightwave Tech., vol. 8, nº 10, pp. 1548-1557, outubro/1990.

[Chraplyvy99] CHRAPLYVY, Andrew R., “*High-Capacity Lightwave Transmission Experiments*,” Bell Labs Technical Journal, pp. 230-245, janeiro-março/1999.

[Conelly02] CONELLY, M. J., “*Semiconductor Optical Amplifier*,” Kluwer Academic Publishers, 2002.

- [CPqD03] CPqD Telecom & IT Solutions, "<http://www.cpqd.br/>", 2003.
- [Dias92] DIAS, Maria Madalena, "SIMILE - Um Simulador Reutilizável para Avaliação de Desempenho de Redes Locais", UFPB, 1992.
- [Doran88] DORAN, N. J. e WOOD, D., "*Nonlinear-Optical Loop Mirror*," *Opt. Lett.*, janeiro/ 1988.
- [Farias97] FARIAS, José Ewerton, "*Comunicações Ópticas*," 2º edição, março/1997.
- [Farias99] FARIAS, José Ewerton, "Uma Contribuição à Minimização de Jitter Acústico em Sistemas Solitônicos," Tese de Doutorado, Unicamp, 1999.
- [Geoffrey78] GEOFFREY, G., "*System Simulation*", 2a edição, New Jersey, Prentice-Hall, 1978.
- [Giozza86] GIOZZA, William Ferreira, et al, "Redes Locais de Computadores: Protocolos de Alto Nível e Avaliação de Desempenho", McGraw-Hill/EMBRATEL, São Paulo, 1986.
- [Ghani00] GHANI, Nasir, DIXIT, Sudhir, WANG, Ti-Shiang, "*On IP-Over-WDM Integration*," IEEE Communication Magazine, pp. 72-84, março/2000.
- [Glass00] GLASS, Alastair M., DIGIOVANNI, David J., STRASSER, Thomas A., STENTZ, Andrew J., SLUSHER, Richard E., WHITE, Alice E., KORTAN, A. Refik, EGGLETON, Benjamin J., "*Advances in Fiber Optics*," Bell Labs Technical Journal, pp. 168-187, janeiro-março/2000.
- [Glesk94] GLESK, I, et al, "*Demonstration of all-optical demultiplexing of TDM data at 250 Gbit/s*", Electronics Letters, vol. 30, nº. 4, pp. 339-341, fevereiro/1994.
- [Hamilton02] HAMILTON, S. A. et al, "*100 Gb/s Optical Time-division Multiplexed Networks*," IEEE/OSA Journal Lightwave Technology, vol. 20, nº 12, pp. 2086-2100, dezembro/2002.
- [Hecht03] HECHT, Jeff, "*A Fiber-Optic Chronology*", "<http://www.sff.net/people/Jeff.Hecht/chron.html>", 2003.
- [Jinno92] JINNO, Masahiko e MATSUMOTO, Takao, "*Nonlinear Sagnac Interferometer Switch an Its Applications*," IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. 28, nº 4, abril/1992.
- [Kao66] KAO, K. C. e HOCKHAM, G. A., "*Dielectric Surface Waveguides for Optical Frequencies*," Proc. IEEE, vol. 113, pp. 1151-1158, 1966.
- [Kartalopoulos99] KARTALOPOULOS, Stamatios V., "*Understanding SONET/SDH and ATM*". IEEE Press, 1999.

[Kelton98] KELTON, W. D. et al., "*Simulation with ARENA*", McGraw-Hill, 1998.

[Kleinrock75] KLEINROCK, Leonard, "*Queueing system - Volume I: Theory*", Los Angeles, John Wiley and Sons, 1975.

[Kolleck97] KOLLECK, C. et al, "All-Optical Wavelength Con-version of NRZ and RZ Signal Using a Non-linear Optical Loop Mirror", J. of Lightwave Technology, vol. 15, nº 10, pp. 1906-1913, outubro/1997.

[Kurtzke93] KURTZKE, C., "Hsupression of Fiber Nonlinearities by Appropriate Dispersion Management," Photon Technol. Lett., vol. 5, nº 10, pp. 1250-1253, outubro/1993.

[Lula01] LULA, Juliana C. L. de Andrade, "Especificação de Componentes para um Ambiente de Simulação de Rede TCP/IP", Dissertação de Mestrado, UFPB, 2001.

[McNab99] MCNAB, Ross, "*A Guide to the Simjava Package*"; "<http://www.dcs.ed.ac.uk/home/hase/simjava>", dezembro/1999.

[Midwinter00] MIDWINTER, J. E. "*The start of Optical Fiber Communications as Seen from U.K. Perspective*", IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 6, nº 6, pp. 1307-1311, novembro-dezembro/2000.

[Mitra02] MITRA, Partha, "*Limits of Fiber – Scientist Find the Glass Ceiling*", 2001 Lucent Technologies, <http://www.bell-labs.com./project/feature/archives/glassceiling>, abril/2002.

[Mukherjee00] MUKHERJEE, Biswanath, "*WDM Optical Communication Networks: Progress and Challenges*," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 18, nº 10, pp. 1810–1824, outubro/2000.

[Nakamura98] NAKAMURA, S., UENO, Y, TAJIMA, K., "Ultrafast (200-fs switching, 1.5 Tb/s demultiplexing) and high repetition (10 GHz) operations of a polarization discriminating symmetric Mach-Zehnder all-optical switch", IEEE Photonics Technology Letters, vol. 10, pp. 1575-1577, 1998.

[NS98]UCB/LBLN/VINT "Network Simulator - NS", (version 2): "<http://www.isi.edu/nsnam/ns/>", 2003.

[OPNET02] OPNET-Optimum Network Performance, Modeler, "Network Simulator", "<http://www.opnet.com/products/modeler/home.html>, 2002".

[OSA/IEEE00] OSA/IEEE, "Journal of Lightwave Technology," Numero Especial Sobre Redes Ópticas, vol. 18, nº 12, dezembro/2000.

[PARAGON99] PARAGON, "Arena – Introdução a Simulação com Arena," São Paulo, 1999.

- [Patel96] PATEL, N. S., HALL< K. L., RAUSCHENBACH, "40-Gb/s demultiplexing using an ultrafast nonlinear interferometer (UNI)", IEEE Photonic Technology Letters, vol. 8, pp. 1695-1697, 1996.
- [Pegden81] PEGDEN, Claude Dennis, PRITSKER, A. Alan, "SLAM Tutorial", 13^o Conference on Winter Simulation, pp. 91-100, vol. 1, 1981.
- [Pegden83] PEGDEN, Claude Dennis, "introduction to SIMAN", 15^o Conference on Winter Simulation, pp. 231-241, vol. 1, 1983.
- [Phillips97] PHILLIPS, I. D., et al "Simultaneous demulti-plexing, data regeneration, and clock recovery with a single semiconductor optical amplifier-based nonlinear optical loop mirror", Optics Letters, vol. 22, n^o 17, setembro/1997.
- [Prucnal02] PRUCNAL, Paul, RUNSER, Robert, SINGER, Martin H., "Optical Switching Techniques for the Next Generation Internet: A Competitive Study", Ultra fast Optical Systems, 2002.
- [Ptolemy02] "Ptolemy II - Heterogeneous Concurrent Modelling and Design in Java", University of California at Berkeley, "<http://ptolemy.eecs.berkeley.edu>", 2002.
- [Python03] "<http://www.python.org/>", 2003.
- [Ramaswami01] RAMASWAMI, Rajiv, SIVARAJAN, Kumar, "Optical Networks: A Practical Perspective," Morgan Kaufmann, 2^a edição, outubro/2001.
- [Roberts98] ROBERTS, Chell A. and DESSOUKY, Yasser M., "An Overview of Object-Oriented Simulation", n^o 70, pp. 359-368, junho/1998.
- [Rocha02] ROCHA, Flávio Gonçalves da, "Implementação e Validação de Componentes para a Construção de Ambientes de Simulação de Redes TCP/IP", Dissertação de Mestrado, UFPB, 2002.
- [TeleÓpticos94] Simposio de Telegrafos Ópticos, "<http://www.telemuseum.se/historia/optel/otsymp/Home.html>", Stockholm, junho/1994.
- [Sriharshavardhan96] SRIHARSHAVARDHAN, M. N., "Optical computers," IEEE Potentials, abril-maio/1996.
- [Smith00] SMITH, Roger D., "Simulation", Encyclopedia of Computer Science, Groves Dictionaries", julho/2000.
- [Soares90] SOARES, Luiz Fernando G., "Modelagem e Simulação Discreta de Sistemas", VII Escola de Computação - São Paulo, 1990.
- [Sokoloff93] SOKOLOFF, J. P., et al, "A Terahertz Optical Asymmetric Demultiplexer (TOAD)," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 5, n^o 7, julho/1993.

[Uchiyama93a] UCHIYAMA, K., et al "*Effects of control-signal pulse walk-off on BER performance of nonlinear optical loop mirror demultiplexer*", Eletronics Letters, vol. 29, nº 15, pp. 1313-1314, julho/1993.

[Uchiyama93b] UCHIYAMA, K., et al "*100 Gbit/s all-optical demultiplexing using a nonlinear optical loop mirror with gating-width control*", Eletronics Letters, vol. 29, nº 21, pp. 1870-1871, outubro/1993.

[Uchiyama97] UCHIYAMA, K, MORIOKA, T. e KAWANISHI, S., et al, "*Signal-to-Noise Ratio Analysis of 100 Gb/s Demultiplexing Using Nonlinear Optical Loop Mirror*", Journal of Lightwave Technology, vol. 15, nº 2, pp. 194-201, 1997.

[Vasconcelos02] VASCONCELOS, Geovane Vitor, "Especificação de Componentes para Modelagem de Redes Locais de Computadores Sem Fio Padrão IEEE 802.11", Dissertação de Mestrado, UFPB, 2002.

[VPI01] Virtual Photonics Inc., VPItransmissionMakerTM Software "<http://www.virtualphotonics.com>", 2001.

[Wagner00] WAGNER, Marcos V. S., "Especificação de Componentes para Simulação de Redes TCP/IP", Dissertação de Mestrado, UFPB, 2000.

[Wangenheim91] L. Wangenheim, "*Aktive Fiter in RC*", SC-Technik, Hüthig Buch Verlag GmbH, Heidelberg, 1991.

[Yu02a] YU, J. et al, "*40-Gb/s All-Optical Wavelength Conversion Based on a Nonlinear Optical Loop Mirror*", J. of Lightwave Technology, vol. 18, nº 7, pp. 1001-1005, julho/2002.

[Yu02b] YU, J. et al, "*All-Optical Wavelength Conversion of Short Pulses and NRZ Signal Based on a Nonlinear Optical Loop Mirror*", Journal of Lightwave Technology, vol. 18, nº 7, pp. 1007-1017, julho/2002.

[Zhang00] ZHANG, Jianfeng, et al, "*Bit Error Rate Analysis of OTDM System Based on Moment Generation Function*", Journal of Lightwave Technology, vol. 18, nº 11, pp. 1513-1518, novembro/2002.