

**João Lucas Dourado do Val**

# **Modelos Matemáticos e Ferramentas de Simulação para Estudo de Sistemas Ópticos**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
à Escola de Engenharia de São Carlos, da  
Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia de Computação com  
ênfase em Computação Móvel e  
Telecomunicações

ORIENTADORA: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Mônica de Lacerda Rocha

São Carlos

2012

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

Val, João Lucas Dourado

V135m Modelos matemáticos e ferramentas de simulação para estudo de sistemas ópticos / João Lucas Dourado do Val ; orientador Mônica de Lacerda Rocha. -- São Carlos, 2012.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Computação com ênfase em Computação Móvel e Telecomunicações) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2012.

1. Comunicação óptica. 2. Simulação de sistemas ópticos. 3. Modelagem matemática. 4. Transmissor óptico. 5. Fibra óptica. 6. Receptor óptico. I. Título.

# FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: João Lucas Dourado do Val

Título: “Modelos Matemáticos e Ferramentas de Simulação para Estudo de Sistemas Ópticos”

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado  
em 27/06/2012,

com NOTA 5,0 (Cinco, zero), pela comissão julgadora:



---

Prof. Associado Ben-Hur Viana Borges - SEL/EESC/USP



---

M. Sc. Mariana Massimino Feres - SEL/EESC/USP



---

Prof. Associado Evandro Luís Linhari Rodrigues  
Coordenador pela EESC/USP do  
Curso de Engenharia de Computação

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por tudo.

Aos meus pais Gilberto Ribeiro do Val e Ana Maria Moreira Dourado por todo incentivo nessa difícil etapa.

A minha namorada Maiara pelo apoio

À prof<sup>a</sup>. Dra Mônica de Lacerda Rocha pela orientação.

Aos meus colegas de sala de aula pela amizade e suporte nos momentos mais complicados.



## RESUMO

Val, J. L. D. do, "**Modelos matemáticos e ferramentas de simulação para estudo de sistemas Ópticos**", 2012. Dissertação (trabalho de conclusão de curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2012.

Este trabalho estuda os componentes básicos de um sistema de transmissão óptica: transmissor, fibra óptica e receptor. O objetivo é adquirir o conhecimento necessário para trabalhar com os simuladores e poder implementar as próprias simulações, quando necessário. As equações que governam o comportamento de cada uma das partes de um sistema de comunicação óptica foram descritas. Detalharam-se dois formatos de modulação: um de fase, NRZ DPSK, e outro de amplitude, duobinário.

Para validar o modelo matemático estudado, foram utilizados simuladores e plataformas de desenvolvimento. As simulações aconteceram no software *Optisystem v7.0* da empresa *Optiwave*. As implementações ocorreram na plataforma Simulink® do software MATLAB®.

Duas configurações de sistema foram estudadas, considerando cada modulação, tanto para simulação como implementação: o transmissor ligado diretamente ao receptor, *back-to-back*, e, uma fibra óptica entre transmissor e receptor. No simulador avaliou-se o desempenho do sistema por meio da taxa de erro de *bi* e do diagrama de olho. Os resultados obtidos comprovam a necessidade de maior potência óptica transmitida na presença da fibra óptica e uma menor sensibilidade do receptor na modulação duobinária [1]. Para avaliar o funcionamento da implementação no Simulink, observou-se o comportamento da onda transmitida por meio de visualizadores de sinais e diagramas de olhos.

Palavras-chave: Comunicação óptica, simulação de sistemas ópticos, modelagem matemática, transmissor óptico, fibra óptica, receptor óptico.



## ABSTRACT

Val, J. L. D. do, "**Modelos matemáticos e ferramentas de simulação para estudo de sistemas Ópticos**", 2012. Dissertação (trabalho de conclusão de curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2012.

This undergraduate work analyzes the basic components of an optical transmission system: transmitter, receiver and fiber optic. The objectives are: to learn the analytical approach for an optical transmission system, to learn how to use a simulator and to implement some components of an optical system. The equations governing the behavior of each part of an optical communication system are described. Two modulation formats have been described: a phase modulation format, NRZ DPSK, and an amplitude modulation format, duobinary.

The simulations were carried out by using the commercial software Optisystem (version 7.0), from the Canadian company Optiwave Systems Inc. The modeling implementations were made by using the Simulink® platform and MATLAB®.

Two system configurations were analyzed, considering each modulation described: the transmitter connected directly to the receiver, i.e. back-to-back, and an optical fiber between transmitter and receiver. The simulated systems performance was evaluated by measurements of the bit error rate and by visualization of the eye diagrams. The obtained results confirm the need of using optical amplification and also a lower receiver sensitivity for duobinary modulation format [1]. In the Simulink, implemented systems were analyzed through visual analyze and eye diagrams.

Key-words: Optical communications, simulation of optical systems, mathematical modeling, optical transmitter, optical fiber, optical receiver.





# SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>iii</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>v</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>vii</b>
<b>SUMÁRIO</b> .....	<b>ix</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>xi</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>xiii</b>
<b>LISTA DE ACRÔNIMOS</b> .....	<b>xv</b>
<b>CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 2- MODELOS MATEMÁTICOS</b> .....	<b>5</b>
2.1 - INTRODUÇÃO .....	5
2.2 – TRANSMISSORES ÓPTICOS .....	5
2.2.1 – <i>Laser</i> .....	6
2.2.2 – Moduladores Ópticos.....	6
2.2.3 – Gerador de <i>bits</i> e Codificador elétrico .....	9
2.3 – FORMATOS DE MODULAÇÃO.....	9
2.3.1 – Modulação NRZ DPSK [1,4,19].....	10
2.3.2 – Modulação Duobinária [1,4,19].....	10
2.4 – FIBRA ÓPTICA .....	12
2.5– RECEPTOR .....	13
<b>CAPÍTULO 3- FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO</b> .....	<b>15</b>
3.1 - INTRODUÇÃO .....	15
3.2 – SISTEMA NRZ DPSK .....	15
3.3 – SISTEMA DUOBINÁRIO.....	17
3.4 – SIMULAÇÕES .....	19
3.4.1 – Simulação NRZ DPSK .....	21
3.4.2 – Simulação duobinária.....	22
<b>CAPÍTULO 4- MATLAB</b> .....	<b>26</b>
4.1 - INTRODUÇÃO .....	26
4.2 – MODELAGENS DO TRANSMISSOR .....	26
4.2.1 - Transmissor NRZ DPSK.....	27

4.2.2 – Transmissor duobinário .....	32
4.3 – MODELAGENS DO RECEPTOR.....	34
4.3.1 - Receptor NRZ DPSK.....	34
4.3.2 – Receptor duobinário .....	37
4.4 – MODELAGENS DA FIBRA ÓPTICA.....	38
4.5 – SIMULAÇÕES .....	40
<b>CAPÍTULO 5- CONCLUSÕES .....</b>	<b>45</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>47</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>49</b>
INICIALIZAÇÃO DOS PARÂMETROS .....	49
ALGORITMO SSFM .....	49

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Composição básica de um transmissor [4]	6
Figura 2 - Modulador óptico-elétrico de fase	7
Figura 3 – MZM	8
Figura 4 - Diagrama de olho padrão para formato NRZ DPSK	10
Figura 5 - Formato padrão para diagrama de olho duobinário	12
Figura 6 - Duobinary Precoder	16
Figura 7 - Transmissor NRZ DPSK	16
Figura 8 - Receptor NRZ DPSK	17
Figura 9 - Transmissor Duobinário	18
Figura 10 - Receptor Duobinário	19
Figura 11 - Relação do logaritmo da taxa de erro com a potência emitida	21
Figura 12 - Diagrama de olho no caso back-to-back para $BER = 10^{-12}$	22
Figura 13 - Diagrama de olho na presença da fibra para $BER = 10^{-12}$	22
Figura 14 - Relação do logaritmo da taxa de erro com a potência emitida	23
Figura 15 - Diagrama de olho, modulação duobinária, no caso back-to-back para $BER = 10^{-12}$	24
Figura 16 - Diagrama de olho, modulação duobinária, na presença de fibra óptica para $BER = 10^{-12}$	24
Figura 17 - Configuração do gerador de bits	27
Figura 18 - Seqüência de bits gerada	27
Figura 19 - Codificador DPSK	28
Figura 20 - Sinal DPSK	28
Figura 21 - Onda senoidal funcionando como laser	29
Figura 22 - Configuração do modulador dual-drive MZM	30
Figura 23 - Modulador de fase dos braços do MZM	30
Figura 24 – Parte real do sinal modulado no primeiro braço do MZM	31
Figura 25 – Parte real do sinal modulado no segundo braço do MZM	31
Figura 26 – Fase do sinal transmitida	31
Figura 27 - Codificador duobinário	32
Figura 28 - Sinal elétrico duobinário gerado	33
Figura 29 – Parte real do sinal no primeiro braço do MZM	33
Figura 30 – Parte real do sinal no segundo braço do MZM	33
Figura 31 – Parte real do sinal transmitido	34
Figura 32 - Receptor NRZ DPSK	34
Figura 33 - Fotodiodo construtivo	35

<i>Figura 34 – Parte real do sinal na saída do primeiro fotodiodo</i>	35
<i>Figura 35 – Parte real do sinal na saída do segundo fotodiodo</i>	36
<i>Figura 36 – Parte real do sinal após a interação entre os sinais resultantes do fotodiodo</i>	36
<i>Figura 37 - Comparativo entre: (a) bits gerados e (b) fase do sinal elétrico resultante</i>	36
<i>Figura 38 - Normalizar parte real do sinal</i>	37
<i>Figura 39 - Receptor duobinário</i>	37
<i>Figura 40 - Sinal elétrico após ajuste de fase.</i>	38
<i>Figura 41 - Comparativo entre: (a) bits gerados e (b) bits recebidos</i>	38
<i>Figura 42 - Implementação da propagação na fibra óptica</i>	39
<i>Figura 43 - Diagrama de olho na configuração back-to-back sem filtro Gaussiano</i>	41
<i>Figura 44 - Diagrama de olho na configuração back-to-back com filtro Gaussiano</i>	41
<i>Figura 45- Espectro da modulação NRZ DPSK</i>	42
<i>Figura 46- Espectro da modulação duobinária</i>	42
<i>Figura 47 - Diagrama de olho na presença da fibra</i>	43
<i>Figura 48 - Fase do sinal NRZ DPSK após fibra óptica</i>	43
<i>Figura 49 - Parte real do sinal duobinário após fibra óptica</i>	44

## LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 - Lista de Acrônimos</i> _____	xv
<i>Tabela 2 - Exemplo de codificação duobinária</i> _____	11
<i>Tabela 3 - Valores dos parâmetros globais de simulação</i> _____	19
<i>Tabela 4 - Valores dos parâmetros utilizados nos transmissores</i> _____	20
<i>Tabela 5 - Valores dos parâmetros utilizados nos receptores</i> _____	20
<i>Tabela 6 - Valores dos parâmetros utilizados na fibra óptica</i> _____	20
<i>Tabela 7 - Entradas do SSFM</i> _____	40



## LISTA DE ACRÔNIMOS

Tabela 1 - Lista de Acrônimos

BER	Bit-error rate	Taxa de erro de bit
DB	Duobinary	Duobinário
DCF	Dispersion-compensating fiber	Fibra compensadora de dispersão
DFB	Distributed-feedback laser	Laser de retroalimentação distribuída
DPSK	Differential phase shift keying	Chaveamento por deslocamento de fase diferencial
EAM	Electroabsorption modulator	Modulador de eletroabosrção
EOM	Electro-optic modulator	Modulador elétrico-óptico
MZDI	Mach-Zehnder delay interferometer	Interferômetro de atraso Mach-Zehnder
MZM	Mach-Zehnder modulador	Modulador Mach-Zehnder
NRZ	Non-return-to-zero	Não retorno ao zero
SSFM	Split-step Fourier method	Método Split Step Fourier
SSMF	Standard single-mode fiber	Fibra monomodo padrão





# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

Um sistema de comunicação tem por função transmitir informação de um ponto a outro, independentemente da distância. Vários têm sido os meios empregados pelo homem para conseguir esse fim, por exemplo: telégrafo (1835), telefone (1886), sistema de comunicação via cabo coaxial (1940) [2]. Um dos métodos pensados desde a Antiguidade, refere-se ao uso da luz como transmissora de informação. Apesar disso, efetivamente, apenas no século 20 a luz se tornou uma das principais formas de comunicação em maior escala. Em 1966, a primeira fibra óptica é criada, porém com uma atenuação de 1000 dB/km. Todavia, em 1970, consegue-se uma fibra com atenuação de 20 dB/km, o que transformou as fibras ópticas numa opção viável para sistemas de comunicação [3]. A partir da década de 80, as telecomunicações avançaram mais significativamente e as fibras começam a substituir os cabos coaxiais [3]. Verifica-se, dessa maneira, que os sistemas ópticos revolucionaram o cenário das comunicações utilizando por princípio básico a transmissão de informação por ondas de luz. Paralelamente, a crescente demanda pela transmissão do maior número de dados o mais rápido possível, além do aumento do número de usuários, faz das comunicações ópticas um alicerce importante para promoção da integração e desenvolvimento sócio-econômico global. Atender a esta crescente demanda se torna um desafio cada dia maior. Atualmente, as transmissões ópticas operam com taxas de 40 Gb/s sendo já testadas e comercializadas transmissões a taxas de 100 Gb/s [4].

Os sistemas ópticos podem ser divididos em três grandes subsistemas: transmissores, o meio de transmissão, que pode ser tanto o espaço livre como a fibra óptica, e os receptores. Nos transmissores gera-se uma onda de luz que transporta, através da utilização de um determinado formato de modulação, a informação a ser transmitida. O segundo subsistema, a fibra óptica (em sua maioria), é o meio por onde a informação irá passar antes de chegar ao seu destino. Durante esse trajeto acontecem várias formas de degradação e distorção da onda de luz, as quais, se não forem tratadas, podem acarretar na perda da informação. O último subsistema, receptor, é responsável por receber essa luz, decodificá-la e regenerar a informação transmitida. Por causa das atenuações e distorções da fibra, podem existir, entre o transmissor e o receptor, formas de tratar o sinal para que ele consiga ser transmitido, como fibras compensadoras de dispersão e elementos que proporcionam ganho ao sistema. Também pode-se ter a presença de filtros e outros elementos.

Para o desenvolvimento e teste desses subsistemas e do sistema como um todo, ferramentas de simulação foram desenvolvidas e são amplamente comercializadas. Dentre estas, podemos citar o *software Optisystem* da empresa *Optiwave* [3,5-6], cujas vantagens são: a possibilidade de simular protótipos de custo variável, permitir uma visão geral do desempenho do sistema, possibilidade de configurar diversas opções que caracterizam o sistema [3].

Todavia, apesar das vantagens dos simuladores, sendo ferramentas extremamente úteis ao planejamento e projeto de sistemas, existem algumas desvantagens: a aplicação didática em nível, por exemplo, de graduação, possui custo relativamente alto e o seu uso sem o conhecimento prévio da formulação matemática envolvida pode acarretar em dificuldades de operação do *software* e em erros de simulação. Portanto, por mais que o simulador possa ser fácil de trabalhar, a falta de conhecimento teórico leva a erros, sistemas impossíveis na prática, uma vez que os simuladores não informam se um sistema é fisicamente possível de ser construído. Assim, visando adquirir um conhecimento mais profundo do simulador, realizou-se um estudo das formulações matemáticas envolvidas em cada parte básica de um sistema óptico e como elas influenciam o comportamento do simulador.

O ambiente de desenvolvimento escolhido foi o Simulink®, incluso no pacote MATLAB®. O Simulink® é um ambiente de simulação baseado no projeto de modelos que permite o desenvolvimento de algoritmos, análise de dados e visualização [7]. Ele conta com uma interface gráfica intuitiva e uma grande quantidade de blocos prontos em sua biblioteca. Ele também permite a visualização dos resultados. Além disso, utilizou-se um arquivo criado em MATLAB® com os parâmetros de inicialização do sistema.

Todo o estudo matemático e principalmente a parte de desenvolvimento em MATLAB® foi baseada no livro *Optical Fiber Communications System Theory and Practice with MATLAB® and Simulink Models*, escrito por Le Nguyen Binh (CRC Press 2010) [4] e nas Ref. [8-17] publicadas por Le Nguyen Binh. A parte de configurações do simulador foram baseadas nos estudos apresentados na dissertação de mestrado de Clenilson Rodrigues da Silveira, “Estudos de formatos especiais de modulação digital para comunicações ópticas” [1] e nos tutoriais anexos ao *software Optisystem v7.0* [5-6,18]. De posse desse material, foram estudados os principais conceitos matemáticos envolvidos, o que propiciou uma visão sobre a experiência de construção de um simulador de sistemas de transmissão óptica. Assim, pode-se entender o funcionamento dos sistemas, vê-los funcionando e construí-los.

O cronograma deste trabalho, correspondendo ao período de 1 ano, foi organizado como se segue

- Estudo de sistemas e subsistemas de transmissão óptica por meio do livro acima citado.
- Treinamento com o *software* MATLAB® e simulador *Optisystem*.

- Configuração das paletas de simulação e ferramentas de análise sistêmicas para projetos de sistemas e subsistemas de transmissões ópticas.
- Realização das simulações, MATLAB® e Optisystem®, e posterior análise dos resultados.

Este trabalho está organizado da seguinte maneira: no capítulo 2, Modelos Matemáticos, trata-se da formulação matemática, apresentando as equações básicas que governam os subsistemas, permitindo assim uma maior compreensão do comportamento dos mesmos. No capítulo 3, Ferramentas de Simulação, detalha-se todas as simulações realizadas no *software Optisystem*, mostrando o funcionamento em acordo com o equacionamento matemático. O capítulo 4, abrange o trabalho da implementação das equações estudadas na plataforma Simulink® do *software MATLAB®*. No capítulo seguinte, cinco, encontram-se as conclusões. Na sequência encontram-se as referências. Por fim, os anexos.



## CAPÍTULO 2

### MODELOS MATEMÁTICOS

#### 2.1 - INTRODUÇÃO

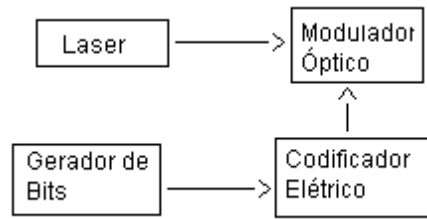
Um sistema de transmissão óptica é composto por três subsistemas básicos: transmissor, a fibra óptica (que é o meio de propagação mais usual) e o receptor. Cada um desses subsistemas possui realidades bem peculiares sendo governados por suas próprias formulações matemáticas. Ao longo deste capítulo procura-se estudar e entender cada uma dessas realidades e como elas interagem para a propagação da informação: o transmissor convertendo sinal elétrico em óptico, a fibra servindo de guia para esse sinal óptico, e o receptor, que deve receber o sinal óptico e decodificar o sinal elétrico enviado. O capítulo está organizado em três tópicos: transmissores ópticos, no qual se estudam os *lasers*, moduladores, geradores de bits, codificadores elétricos e as formas de codificação. Em seguida as fibras ópticas e como resolver numericamente a equação que governa a propagação da onda e, por fim, os receptores ópticos explicando sobre a decodificação elétrica.

#### 2.2 – TRANSMISSORES ÓPTICOS

O transmissor tem por função converter sinal elétrico em óptico e lançá-lo na fibra óptica. Um transmissor óptico (em particular, para sistemas de alta capacidade) é composto geralmente por quatro partes [4]:

- Fonte de laser: o qual gera uma onda contínua que levará as informações.
- Modulador óptico: recebe a onda contínua do laser e a informação a ser transmitida realizando o processo de modulação, ou seja, inserção dessas informações na onda portadora. Para algumas taxas de transmissão, como 2,5 Gb/s e 10 Gb/s, utiliza-se modulação direta, ou seja, o *laser* é modulado diretamente não sendo necessário o uso de um modulador externo [2].
- Pré-codificador elétrico: transforma os bits da informação a ser transmitida em sinais elétricos para que possam ser modulados.
- Gerador de dados: gera os bits das informações.

O modelo do transmissor óptico é ilustrado na figura 1.



**Figura 1- Composição básica de um transmissor [4]**

### 2.2.1 – Laser

O nome *laser* vem do inglês *light amplification by stimulated emission of radiation*, ou seja, amplificação de luz pela emissão estimulada de radiação. O funcionamento dos lasers está relacionado ao mecanismo de emissão de luz dos semicondutores, os quais, em condições ideais, absorvem a mesma quantia de luz que emitem.

Sejam dois níveis de energia,  $E_1$  e  $E_2$ , onde  $E_2$  é maior que  $E_1$ , e o estado  $E_2$  corresponde ao estado de excitação dos átomos. Seja também um fóton incidente no material fornecendo energia suficiente para que o átomo passe para o segundo nível de energia: esse processo é conhecido por absorção. Porém, átomos excitados normalmente retornam ao seu estado inicial e emitem luz nesse processo, realizando, portanto, o processo de emissão espontânea. O processo de emissão de luz pode ser espontâneo, no qual o átomo emite fótons em direções aleatórias, ou, estimulado, onde a emissão dos fótons é controlada. Para os *lasers*, o processo de emissão majoritário é a emissão estimulada. [19].

Existe uma diversidade de *lasers*, sendo os mais comuns: Fabry-Perot (FP) laser, *Distributed-Feedback (DFB) laser*, *Distributed-Bragg reflector (DBR) laser*, *Single Quantum Well (SQW) laser*, *multi-quantum well (MQW) laser* [1]. Neste trabalho foi utilizado o *DFB laser* por ser atualmente o mais empregado em sistemas de alta capacidade. No *DFB laser*, que em português significa laser com retroalimentação distribuída, o mecanismo de retroalimentação de energia óptica está distribuído ao longo do comprimento de sua cavidade. Para a implementação na seção 4 deste capítulo, o sinal gerado pelo *laser* será representado por uma onda senoidal.

### 2.2.2 – Moduladores Ópticos

O processo de modulação pode ser direto, realizado dentro da cavidade do laser por manipulação da emissão estimulada. O outro tipo de modulação possível, a qual é utilizada neste trabalho, é a modulação externa, que apresenta melhor desempenho principalmente em sistemas de alta

capacidade [4]. Os moduladores ópticos externos mais usados são dos tipos: eletro-absorção (EAM) e eletro-ópticos (EOM), com o segundo apresentando maior vantagem para aplicações de altas taxas [4]. Utilizando os EOMs, consegue-se obter a modulação da fase ou intensidade da portadora óptica.

Na figura 2, pode-se ver um modulador eletro-óptico de fase, que funciona a partir da aplicação de tensão de RF no seu eletrodo, situado sobre um guia de onda crescido num cristal (em geral, niobato de lítio) [19].



**Figura 2 - Modulador óptico-elétrico de fase**

Como resultado desta tensão, o índice de refração do guia de onda se altera, introduzindo um atraso nas ondas ópticas. Esses atrasos correspondem a mudanças de fase. A variação de fase correspondente a uma determinada tensão aplicada é apresentada na equação seguinte:

$$\varphi(t) = \pi \frac{(V(t) + V_{bias})}{V_{\pi}} \quad (2.1)$$

Sendo:  $\varphi(t)$  = variação de fase

$V(t)$  = tensão de entrada

$V_{bias}$  = tensão de polarização

$V_{\pi}$  = tensão necessária para criar um deslocamento de  $\pi$  na fase da portadora

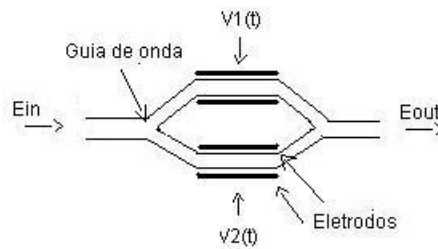
O campo óptico resultante é dado pela seguinte equação:

$$E_o = E_i(t)e^{-j\varphi(t)} \quad (2.2)$$



onde  $E_0$  e  $E_i$  correspondem aos campos de saída e entrada do modulador, respectivamente.

O modulador óptico-elétrico de intensidade é composto por dois moduladores EOMs de fase, os quais formam uma estrutura paralela, conhecida por interferômetro Mach-Zehnder ou modulador de intensidade Mach-Zehnder (MZM). O MZM, portanto, possui dois braços, sendo cada um EOM. O campo óptico que incide no MZM divide-se igualmente entre esses dois braços por meio de um acoplador, sofrendo modulação de fase em cada um. Na ausência de tensão externa, os campos nos dois braços sofrem deslocamentos de fase idênticos e interferem construtivamente na saída do acoplador. O deslocamento de fase adicional induzida em dos braços, por meio da mudança no índice de refração induzida por tensão, reduz a natureza construtiva da interferência e consequentemente reduz a intensidade transmitida. Quando a diferença de fase entre os dois braços é igual a  $\pi$ , nenhuma luz é transmitida devido à interferência totalmente destrutiva entre os dois sinais. Através dessas interferências, portanto, acontece a modulação da intensidade da onda portadora, conhecida por modulação "ON-OFF", pois as ondas se somam ou se subtraem resultando em zeros (*off*) e uns (*on*). Pode-se ver o esquema do MZM na figura 3 .



**Figura 3 – MZM**

O MZM pode ser classificar em dois tipos: *single-drive*, possui apenas uma tensão a qual é aplicada a um dos seus braços, ou *dual-drive*, no qual os dois braços possuem tensões aplicadas. Pode-se, por exemplo, aplicar  $V(t)$  ao primeiro braço enquanto o segundo não possuirá tensão de entrada. O campo óptico resultante é dado pela seguinte equação:

$$E_o(t) = \frac{E_i(t)}{2} \left[ 1 + e^{j\pi \frac{(V(t)+V_{bias})}{V_\pi}} \right] = E_i \cos \left[ \frac{\pi}{2} \frac{(V(t)+V_{bias})}{V_\pi} \right] e^{-j \left[ \frac{\pi}{2} \frac{(V(t)+V_{bias})}{V_\pi} \right]} \quad (2.3)$$

A presença do termo de fase na equação (2.3) implica em um efeito conhecido como *chirp*, ou modulação de fase residual, que ocorre ao se modular a intensidade desejada [1]. Para evitar esse efeito indesejável, neste trabalho será utilizado o *dual-drive* MZM. Neste modulador aplica-se a mesma tensão a cada um dos braços do MZM, porém defasadas entre si. Desta forma, o campo óptico resultante pode ser escrito como se segue:

$$E_o(t) = \frac{E_i(t)}{2} \left[ e^{j\pi \frac{(V(t)+V_{bias})}{V_\pi}} + e^{j\pi \frac{-(V(t)+V_{bias})}{V_\pi}} \right] = E_i \cos \left[ \frac{\pi}{2} \frac{(V(t)+V_{bias})}{V_\pi} \right] \quad (2.4)$$

### 2.2.3 – Gerador de *bits* e Codificador elétrico

As sequências de *bits* correspondem às informações que se deseja transmitir. Não existe uma ordem específica para sua geração. Por isso, simuladores como o *Optisystem* fornecem um gerador de *bits* aleatório. As linguagens de programação (Java, C, Matlab, entre outras) também permitem esse tipo de geração aleatória. No Simulink®, existe um bloco que gera bits de forma aleatória de acordo com a distribuição de Bernoulli. Sendo assim, utiliza-se essas gerações aleatórias para poder realizar simulações sistêmicas.

O codificador elétrico transforma a seqüência de *bits* gerada, de forma aleatória, em um sinal elétrico com uma codificação específica. Cada codificador elétrico é construído em acordo com a modulação desejada, não existindo, portanto, um modelo genérico.

## 2.3 – FORMATOS DE MODULAÇÃO

É possível transmitir informações por meio de uma onda óptica, que se propaga por fibras monomodo, alterando-se pelo menos uma de suas propriedades físicas seguintes: intensidade, fase, frequência e polarização. Esse processo de se alterar uma das características da portadora proporcionalmente às informações contidas em um sinal elétrico é conhecido por modulação [19]. Dentro desses tipos de modulação (intensidade, fase, frequência e polarização) existem diversas possibilidades de implementação prática que caracterizam formatos de modulação específicos. Para efeito de estudo, neste trabalho as simulações e implementações serão de apenas dois tipos de modulação, a saber: NRZ DPSK, *non return to zero differential phase shift keying*, (modulação de fase) e DB, duobinário (modulação de amplitude), tendo como referência os estudos realizados C. Silveira [1].

### 2.3.1 – Modulação NRZ DPSK [1,4,19]

O formato NRZ (*non return to zero*) implica que se o *bit* for "0", o nível lógico será baixo durante todo o período do *bit*. Caso seja "1", o nível lógico será alto durante todo período do *bit*.

Na codificação DPSK, *differential phase shift keying*, a informação é codificada nos deslocamentos de fase 0 ou  $\pi$ . O *bit* "1" é codificado se o *bit* atual e o anterior são opostos. Casos eles sejam iguais, é codificado o *bit* "0". Essa operação pode ser feita por uma porta *xor* entre o *bit* atual e o anterior.

Em termos de óptica, uma codificação 1 significa uma mudança de fase de  $\pi$ . Já com a codificação 0, não há mudança de fase. Na figura 4, tem-se um padrão de diagrama de olho para o formato, obtido por meio do *software Optisystem*, em condições ideais. Nele pode-se ver o melhor instante para a amostragem, pois o mesmo apresenta a máxima diferença entre os níveis do sinal do *bit* '1' e do *bit* '0'. Esse instante corresponde ao da máxima abertura do olho.

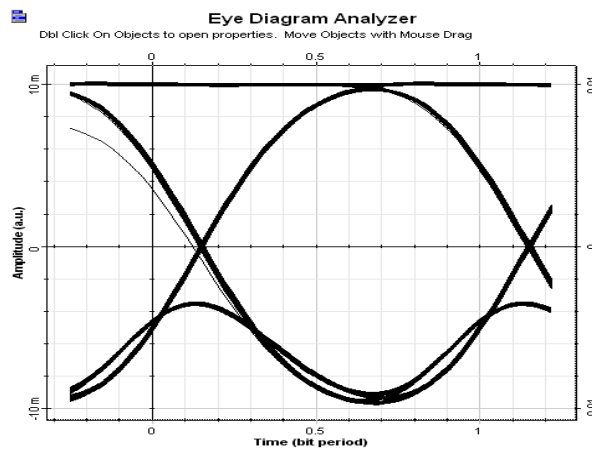


Figura 4 - Diagrama de olho padrão para formato NRZ DPSK

### 2.3.2 – Modulação Duobinária [1,4,19]

No sistema duobinário, o *bit* 0 é codificado como ausência de pulso. Por sua vez, o *bit* "1" é codificado com um pulso de luz com fase 0 ou  $\pi$ . A fase do *bit* "1" é escolhida de maneira que exista uma alteração de fase de  $\Pi$  entre *bits* "1" separados por um número ímpar de *bits* "0". A configuração de *bits* "1", "0" e "1" é codificada como +1, 0, -1. Sendo assim, o codificador elétrico do sistema duobinário pode ser construído com uma porta *xor*, na qual uma das entradas é o *bit*

anterior e, a outra, o *bit* atual. Porém, para gerar o nível zero, é necessária a presença de um filtro. Abaixo segue uma fórmula para geração da pré-codificação duobinária [4]:

$$p_k = b_k \oplus p_{k-1} \quad (2.5)$$

sendo  $p_k$  o sinal pré-codificado

$b_k$  é o sinal de dado

A codificação duobinária pode ser gerada pela seguinte fórmula, com circuitos de atraso e adição: [1]

$$c_k = p_k + p_{k-1} - 1 \quad (2.6)$$

Sendo o sinal recebido após a detecção  $r_k = |c_k|$ .

Na tabela 2, tem-se um exemplo de codificação duobinária. Na primeira linha encontram-se os dados binários e, na segunda linha, os dados binários invertidos. Na terceira linha têm-se os dados pré-codificados. Na quarta linha tem-se os dados codificados em duobinário. Na última linha têm-se os dados recebidos.

**Tabela 2 - Exemplo de codificação duobinária**

$b_k$	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1
$\overline{b_k}$	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0
$p_k$	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1
$c_k$	0	0	+1	0	-1	-1	-1	0	0	-1	0	+1
$r_k$	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1

Na figura 5, tem-se um padrão de diagrama de olho para o formato obtido por meio do *software Optisystem*, em condições ideais. Pode-se observar o melhor instante para amostragem, que é o instante de maior abertura de olho, representando a maior diferença entre os níveis do sinal do *bit* 1 e do sinal do *bit* 0.

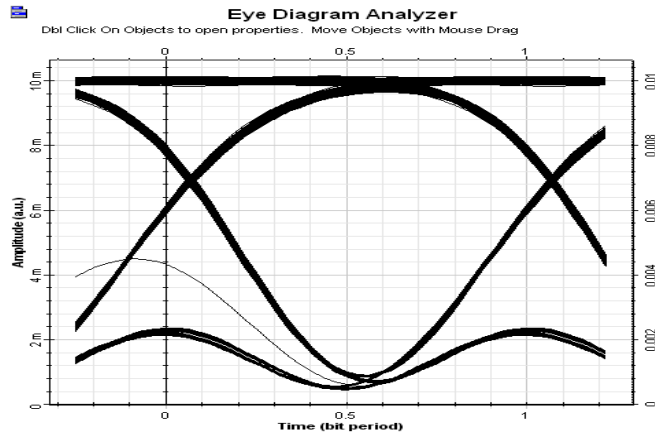


Figura 5 - Formato padrão para diagrama de olho duobinário

## 2.4 – FIBRA ÓPTICA

A fibra óptica é o canal pelo qual a informação viaja. Basicamente ela consiste de dois dielétricos cilíndricos concêntricos. O cilindro interior, conhecido por núcleo, tem um índice de refração maior que o cilindro exterior, conhecido por casca. Para uma fibra monomodo baseada em sílica, o núcleo possui tipicamente 4-9  $\mu\text{m}$  de diâmetro e a casca cerca de 125  $\mu\text{m}$  [4]. As fibras são classificadas de acordo com as suas características de dispersão, sendo as mais conhecidas a *standard single-mode fiber* (SSMF) ou fibra padrão monomodo, conhecida também por ITU-G.652 [4]. As fibras apresentam uma série de fatores que causam impactos negativos ao desempenho do sistema. Esses empecilhos são classificados em atenuações, dispersões da fibra e não-linearidades. Para efeitos deste trabalho, não serão descritas as características desses fatores, porém a contribuição matemática deles pode ser visto na equação 2.7, a qual governa a propagação do pulso pela fibra óptica e é conhecida por equação não-linear de Schrödinger [20].

$$\frac{\partial A(z,t)}{\partial z} + \frac{\alpha}{2} A(z,t) + \beta_1 \frac{\partial A(z,t)}{\partial t} + \frac{j}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A(z,t)}{\partial t^2} - \frac{1}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 A(z,t)}{\partial t^3} = -j\gamma |A(z,t)|^2 A(z,t) \quad (2.7)$$

Sendo:

$z$ : coordenada espacial de longitude

$\alpha$ : atenuação da fibra

$\beta_1$ : indica DGD (*differential group delay*), atraso de grupo diferencial

$\beta_2, \beta_3$ : fatores de dispersão de segunda e terceira ordem

$\gamma$ : coeficiente de não-linearidades

Nesta equação já estão inclusas as atenuações, as dispersões e as não-linearidades da fibra.

Para a solução numérica da mesma, existe um método conhecido por SSFM (*split-step Fourier method*) [20]. O método divide a fibra em vários pequenos segmentos de comprimento  $\delta z$ . Por causa do tamanho pequeno de  $\delta z$ , a dispersão da fibra e a não-linearidade são assumidas estatisticamente independentes uma da outra. Esta independência estatística implica que dois operadores podem ser separados: um envolvendo a atenuação e a dispersão da fibra e o outro envolvendo a não linearidade. Assim, tem-se:

$$\begin{aligned}\widehat{D} &= -\frac{j}{2}\beta_2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3}{\partial t^3} - \frac{\alpha}{2} \\ \widehat{N} &= J\gamma|A|^2\end{aligned}\quad (2.8)$$

Sendo  $A=A(z,t)$ ,

A equação 2.8 pode ser reescrita como

$$\frac{\partial A}{\partial z} = (\widehat{D} + \widehat{N})A \quad (2.9)$$

A solução aproximada é dada por:

$$A(z + h, T) = e^{h\widehat{D}} e^{h\widehat{N}} A(z, T) \quad (2.10)$$

## 2.5– RECEPTOR

O receptor recebe um sinal óptico e deve convertê-lo em um sinal elétrico com potência suficiente para a aplicação a qual será utilizado. O trabalho dos receptores é mais complicado do que o dos transmissores, pois eles precisam detectar sinais distorcidos, fracos e tomar decisões [21]. Assim como os transmissores, os receptores dependem do formato de modulação que está sendo usado. Neste trabalho são usadas as codificações NRZ DPSK e duobinária. Para a demodulação NRZ DPSK, é necessário comparar o *bit* anterior com o atual. Para isso, utiliza-se um *Mach Zehnder delay interferometer* (MZDI), o qual gera um atraso de um *bit*. Após o MZDI, os bits serão comparados em dois fotodiodos, ocorrendo interferência construtiva em um dos fotodiodos e destrutiva no outro. Quando não existir mudança de fase entre dois *bits* adjacentes, a potência máxima aparecerá na interferência construtiva. Porém, se existir mudança de fase, a potência máxima aparece na interferência destrutivo. Os fotodiodos convertem o sinal óptico em elétrico, e

esses, são invertidos entre si, necessitando passar por um comparador para restaurar o sinal original. Após passar pelo comparador, o sinal ainda é filtrado para eliminação de frequências indesejadas. O receptor duobinário é construído de forma mais simples, sendo constituído por apenas um fotodiodo e um filtro. Como o fotodiodo, matematicamente, possui comportamento quadrático, a sequência  $(-1, 0, 1)$ , será transformada em  $(1,0,1)$  de acordo com a informação transmitida.

## CAPÍTULO 3

### FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO

#### 3.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresentam-se a experiência de uso e os resultados obtidos utilizando o *software* para simulação de sistemas ópticos, o *Optisystem v7.0* da empresa *Optiwave*. O simulador, em questão, é um *software* de preço bastante elevado e já se encontra em versões mais avançadas. Ele possui uma interface gráfica bastante intuitiva e de fácil utilização. Junto do *software* encontram-se tutoriais de utilização [6]. O *software* traz implementado vários componentes como *lasers*, geradores de sinais elétricos, geradores de *bits*, moduladores, visualizadores de onda, medidores de potência. Sua biblioteca possui mais de 400 dispositivos ativos e passivos no domínio elétrico e óptico [3]. Portanto, o trabalho passa ser combinar esses elementos e configurá-los de maneira que formem o sistema desejado. É importante possuir o conhecimento teórico para utilizá-lo, pois o *software* permite a construção de sistemas fisicamente inviáveis.

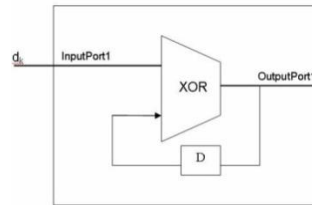
Nas simulações realizadas utilizaram-se sistemas simples: transmissor, fibra óptica, receptor, amplificadores e fibras de compensação de dispersão. Os sistemas foram baseados em duas modulações: modulação por fase do tipo NRZ DPSK e modulação por amplitude do tipo duobinária. Para cada um desses sistemas, realizou-se uma simulação *back-to-back*, transmissor ligado diretamente ao receptor, e, outra simulação na presença de fibra óptica. Para cada uma dessas simulações, variou-se a potência do *laser* e mediu-se a taxa de erro de *bit* equivalente. Geraram-se diagramas de olho para a  $BER=10^{-12}$ .

#### 3.2 – SISTEMA NRZ DPSK

O sistema NRZ DPSK implementado é constituído de um transmissor, uma fibra óptica SSMF e um receptor óptico. A fibra já é implementada automaticamente pelo simulador, sendo necessário configurar paletas para o transmissor e o receptor [1].

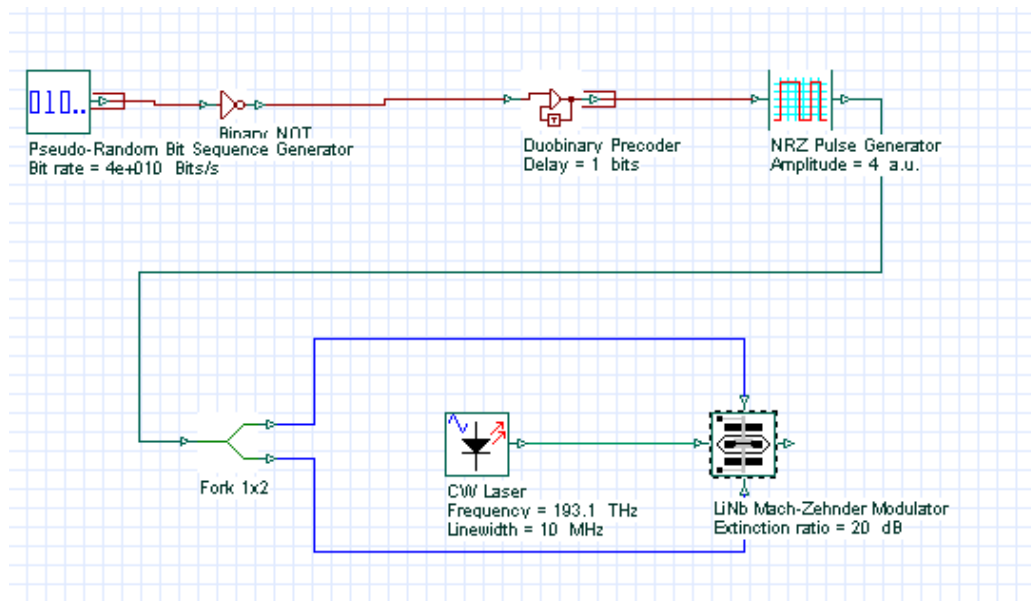


O transmissor óptico é composto por um gerador de bits aleatório, na taxa de 40 Gb/s, onde as informações são geradas. Para se configurar a modulação DPSK, enviam-se os bits para uma porta lógica *not* e em seguida para um bloco conhecido como *duobinary precoder*, na qual o bit de saída é atrasado e combinado com o bit de entrada em uma porta lógica *xor* como ilustrado no esquema da figura 6.



**Figura 6 - Duobinary Precoder**

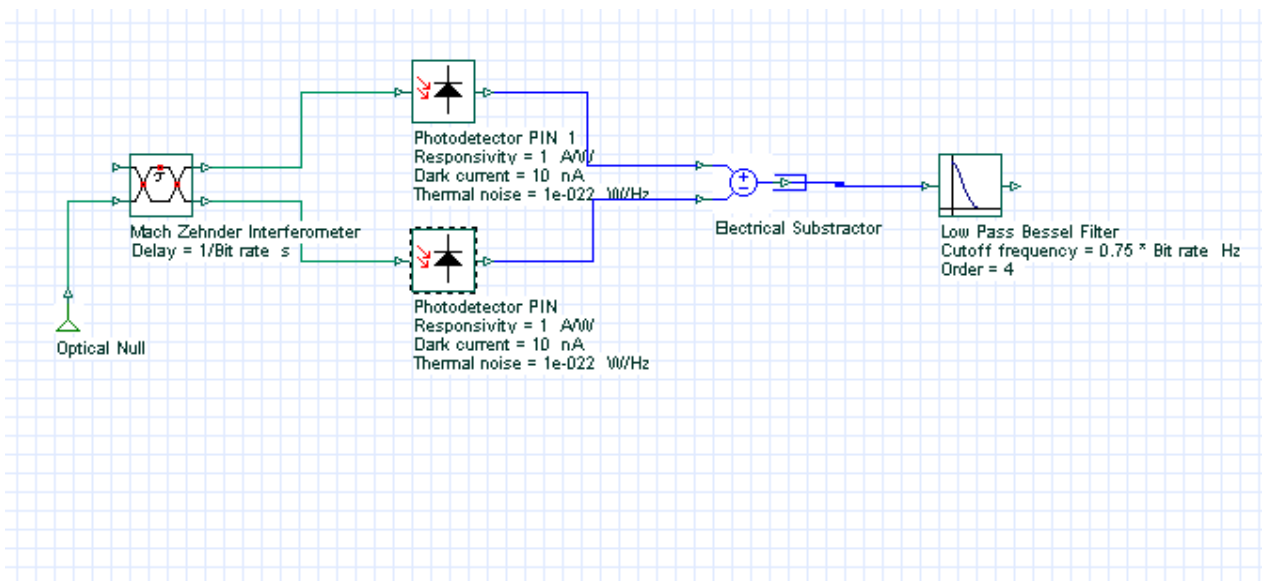
Os bits, agora em formato DPSK, devem ser transformados em um sinal elétrico do tipo NRZ, por meio de um bloco conhecido por *NRZ Pulse Generator*, atuando como um codificador elétrico. É necessário imprimir a informação elétrica na onda portadora, gerada pelo *laser* de onda contínua com frequência de 193,1 THz. Esta modulação é realizada por meio de de um modulador Mach-Zehnder. O sinal elétrico fornece as tensões para os terminais do modulador, as quais são complementares entre si . A paleta do transmissor pode ser vista na figura 7.



**Figura 7 - Transmissor NRZ DPSK**

Para a demodulação do sinal NRZ DPSK, configurou-se a paleta do receptor com um interferômetro Mach-Zehnder que gera atraso (MZDI). Do interferômetro saem dois sinais

defasados em um *bit*, cada um alimentando a um fotodetector do tipo *pin*. Os fotodetectores convertem os sinais ópticos em elétricos. Os sinais elétricos se sobrepõem por adição e subtração, ou seja, interferências destrutivas e construtivas, resultando no sinal elétrico inicial. Para, eliminar-se frequências indesejadas, utiliza-se um filtro passa-baixa de Bessel, ordem 4, e, frequência de 30 GHz. Na figura 8 está a paleta do receptor. É interessante notar o bloco nomeado como *Mach Zehnder Interferometer Delay*. Ele possui uma estrutura diferente da conhecida para um Mach-Zehnder: tem duas entradas e duas saídas, possuindo dois acopladores conectados por dois guias de onda.



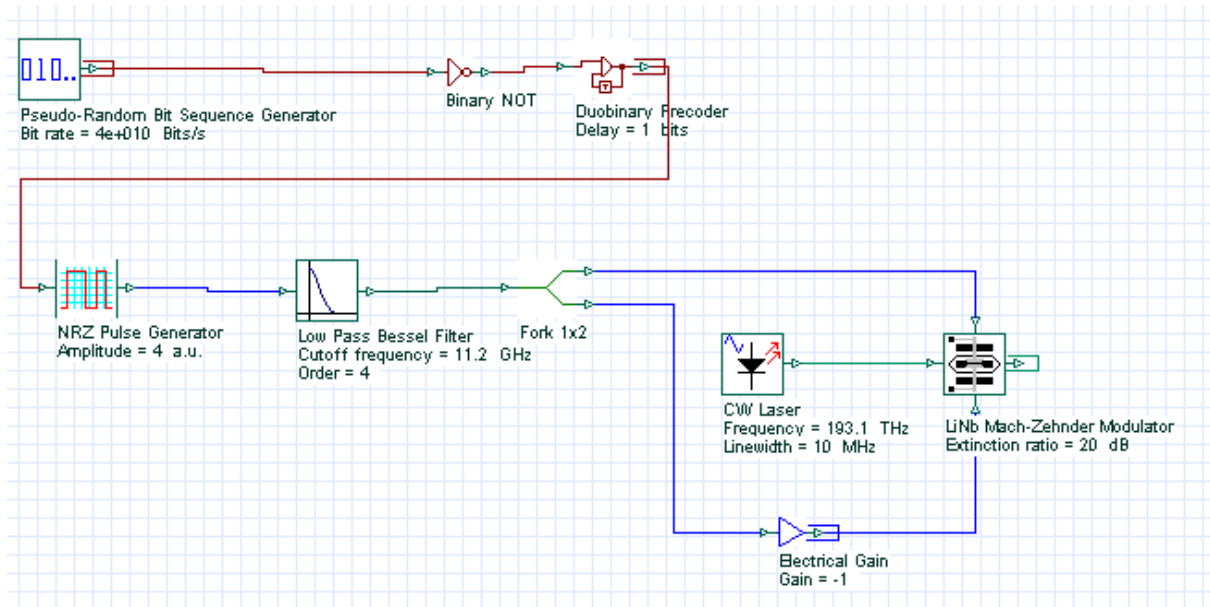
**Figura 8 - Receptor NRZ DPSK**

### 3.3 – SISTEMA DUOBINÁRIO

O sistema duobinário implementado é constituído de forma semelhante ao NRZ DPSK: um transmissor, uma fibra óptica SSMF e um receptor óptico. A fibra é implementada pelo simulador, sendo necessário configurar as paletas do transmissor e do receptor óptico [1].

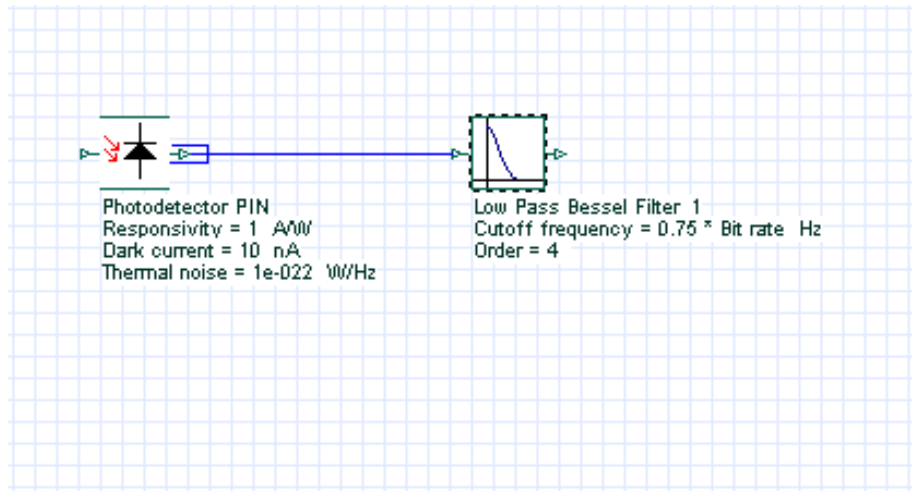
O transmissor óptico é composto por um gerador de bits aleatório, na taxa de 40 Gb/s, sendo, portanto, as informações a serem transmitidas. Os bits gerados devem ser modulados no formato duobinário. Este processo ocorre de forma semelhante ao NRZ DPSK: os bits são enviados para uma porta lógica *not*, bloco *duobinary precoder* e o gerador de sinais elétricos NRZ. No entanto, para ser transformado em sinal duobinário, o sinal elétrico é filtrado em uma frequência de 11,2 GHz, por um filtro de Bessel de quarta ordem.

É necessário imprimir o sinal duobinário na onda portadora, a qual é gerada por um *laser DFB* [19] de onda contínua na frequência de 193,1 THz. O sinal óptico e o elétrico são combinados em um modulador Mach-Zehnder. As tensões de controle do modulador são fornecidas pelo sinal duobinário, uma o oposto da outra. O sistema pode ser visto na figura 9.



**Figura 9 - Transmissor Duobinário**

A recepção do sinal duobinário é realizada de forma mais simples do que na modulação NRZ DPSK. O sinal óptico que chega ao receptor encontra um fotodetector do tipo *pin*. O fotodetector converte o sinal óptico em elétrico, e, esse sinal elétrico passa por um filtro de Bessel de quarta ordem com frequência de corte em 30 GHz. A configuração da paleta do receptor pode ser vista na figura 10.



**Figura 10 - Receptor Duobinário**

### 3.4 – SIMULAÇÕES

Após a configuração das paletas de transmissão e recepção para os modelos NRZ DPSK e duobinário, realizaram-se, para cada um deles, duas simulações. A primeira simulação foi do tipo *back-to-back*, ou seja, o transmissor é ligado diretamente ao receptor. Nesta simulação inseriu-se um amplificador óptico, EDFA (*erbium doped fiber amplifier*), logo após o transmissor. Antes de atingir o receptor, o sinal óptico passou por um filtro Gaussiano de 2ª ordem e largura de banda de 3 dB com valor de 85 GHz. A simulação consistiu em colocar-se um atenuador de potência, variando os seus valores, e relacionar a potência na entrada do receptor com a taxa de erro de bit (BER). Além disso, obteve-se o diagrama de olho para a taxa de erro de bit de interesse,  $10^{-12}$ . Na segunda simulação variaram-se os valores do atenuador na presença de uma fibra óptica do tipo SSMF (*standart single-mode fiber*) de 100 km. Por causa da dispersão da fibra, inseriu-se um compensador de dispersão, DCF (*dispersion compensating fiber*). Também foram colocados o amplificador e o filtro óptico na entrada do receptor. Os valores utilizados nos elementos do sistema são apresentados a seguir na seqüência de tabelas 3 a 6.

**Tabela 3 - Valores dos parâmetros globais de simulação**

<b><i>Parâmetros Globais</i></b>	<b><i>Valores</i></b>
Decaimento do pulso elétrico	exponencial
Taxa de bits	40 Gb/s
Número de bits da simulação	1024
Número de amostras por bit	32

**Tabela 4 - Valores dos parâmetros utilizados nos transmissores**

<b><u>Parâmetros do Transmissor</u></b>	<b><u>Valores</u></b>
Frequência do laser	193,1 THz
Largura de linha do laser	10 MHz
Formato do filtro passa-baixa do transmissor duobinário	Bessel de 4 <sup>a</sup> ordem
Frequência de corte do filtro passa-baixa do transmissor duobinário	11,2 GHz
Razão de extinção do MZM	20 dB
Tensão de polarização 1 do MZM	0 V
Tensão de polarização 2 do MZM	4V
Ganho do amplificador óptico na saída do transmissor	20 dB
Figura de ruído do amplificador óptico na saída do transmissor	4 dB

**Tabela 5 - Valores dos parâmetros utilizados nos receptores**

<b><u>Parâmetros do Receptor</u></b>	<b><u>Valores</u></b>
Coefficiente de acoplamento do MZDI	0,5
Responsividade do fotodiodo <i>pin</i>	1 A/W
Corrente de escuro do fotodiodo <i>pin</i>	10 nA
Ruído térmico do fotodiodo <i>pin</i>	$1 \times 10^{-22}$ W/Hz
Formato do filtro passa-baixa do receptor	Bessel de 4 <sup>a</sup> ordem
Frequência de corte do filtro passa-baixa do receptor	30 GHz
Formato do filtro óptico na entrada do receptor	Gaussiano de 2 <sup>a</sup> ordem
Frequência de corte do filtro óptico na entrada do receptor	85 GHz
Formato do filtro óptico na entrada do receptor	Gaussiano de 1 <sup>a</sup> ordem
Frequência de corte do filtro óptico na entrada do receptor	85 GHz

**Tabela 6 - Valores dos parâmetros utilizados na fibra óptica**

<b><u>Parâmetros da Fibra Óptica</u></b>	<b><u>Valores</u></b>
Comprimento da onda	1550 nm
Comprimento da fibra	100 km
Atenuação da fibra	0,2 dB/km
Dispersão cromática da fibra	17 ps/nm.km
Inclinação da dispersão	0,075 ps/nm <sup>2</sup> .km
Atraso de grupo diferencial	0,2 ps/km
Área efetiva	80 $\mu\text{m}^2$
Coefficiente não-linear da fibra	$2,6 \times 10^{-20}$ m <sup>2</sup> /W
Contribuição fracionada Raman	0,18
Comprimento da fibra de compensação de dispersão (DCF)	10 km
Dispersão da fibra de compensação de dispersão (DCF)	-170 ps/nm.km
Inclinação da dispersão da fibra de compensação de dispersão (DCF)	-0,85 ps/nm <sup>2</sup> .km

### 3.4.1 – Simulação NRZ DPSK

A primeira simulação realizada foi a *back-to-back*. Na saída do transmissor colocou-se um amplificador óptico além de um filtro óptico na entrada do receptor. Inseriu-se um atenuador e entre transmissor e receptor e variou-se os valores de atenuação para obter a relação potência na entrada do receptor e taxa de erro de *bit*.. A segunda simulação foi realizada com a presença de uma fibra óptica SSMF (*standard single-mode fiber*) e um compensador de dispersão, DCF (*dispersion compensating fiber*). Também se realizou a variação dos valores do atenuador.

Para valores dentro das faixas de erro aceitáveis e reais, em ambas as simulações, traçaram-se os gráficos relacionando a taxa de erro de bit, BER (*bit error rate*), com a potência na entrada do receptor. Os gráficos podem ser vistos na figura 11. A taxa de erro de bit encontra-se na escala logarítmica e a potência em dBm.

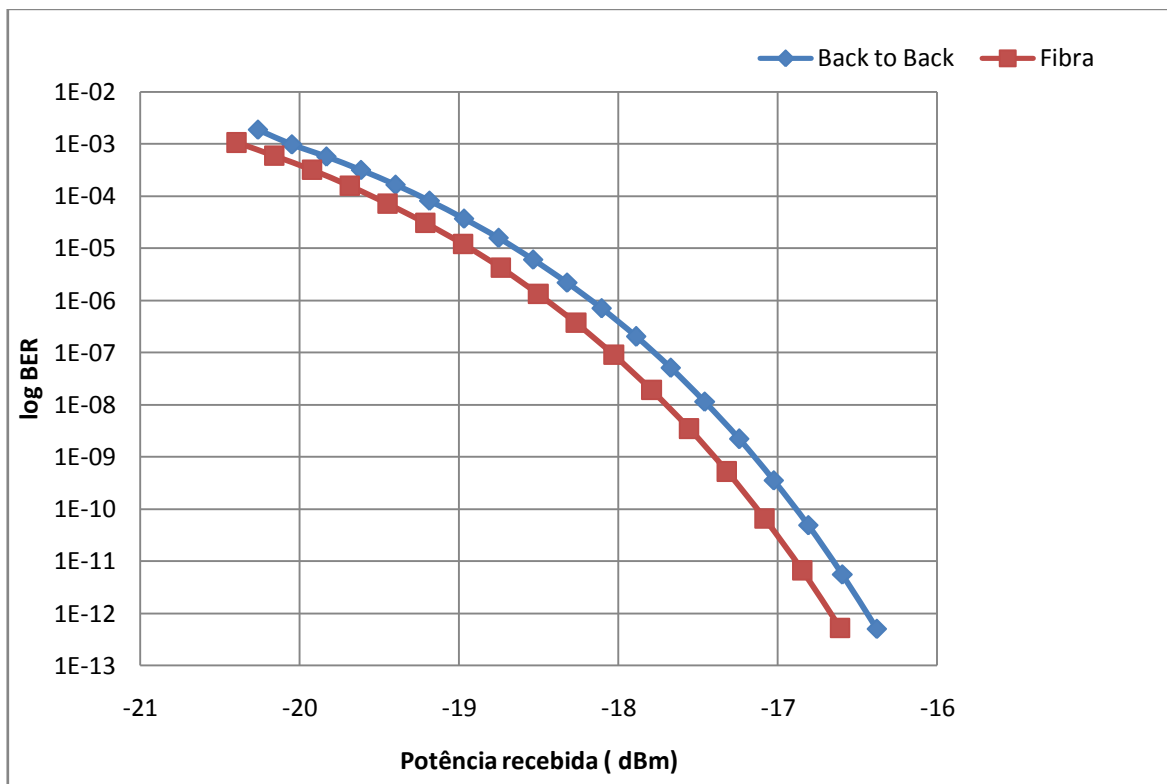


Figura 11 - Relação do logaritmo da taxa de erro com a potência emitida

Pela análise dos gráficos, percebe-se que, a potência necessária na presença da fibra óptica para atingir a mesma taxa de erro de *bit* foi ligeiramente inferior, ou seja, obteve-se um ganho. Calculou-se o ganho da potência recebida, considerando-se a taxa de erro de bit de  $10^{-12}$ , e encontrou-se um valor de 0,4 dB. Para a taxa de erro de bit de  $10^{-12}$ , são mostradas na seqüência, figuras 12 e 13, os diagramas de olho obtidos tanto no caso *back-to-back* quanto na presença da fibra.

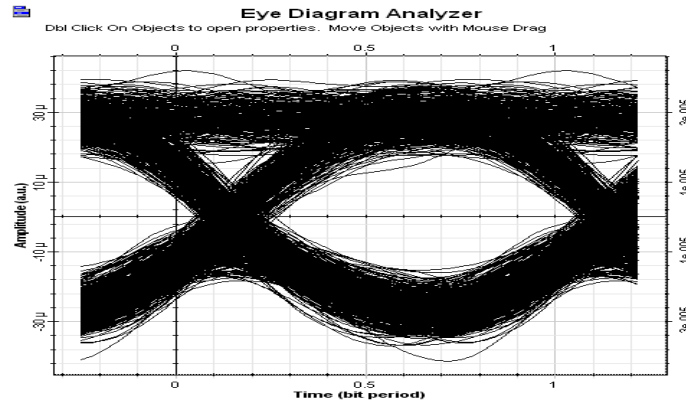


Figura 12 - Diagrama de olho no caso *back-to-back* para BER =  $10^{-12}$

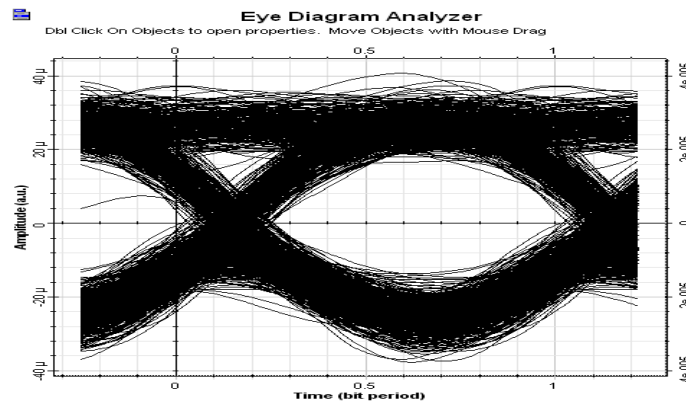


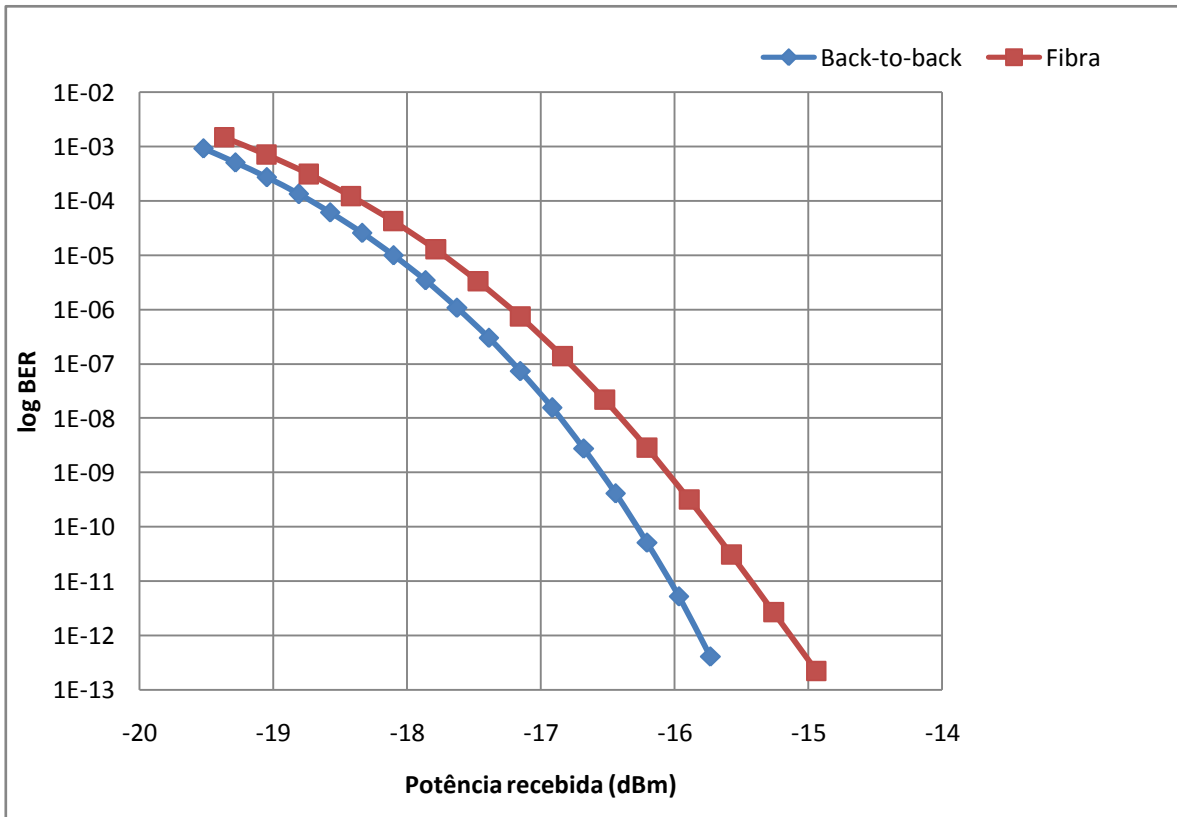
Figura 13 - Diagrama de olho na presença da fibra para BER =  $10^{-12}$

Os diagramas de olho apresentados estão de acordo com o esperado para o formato NRZ DPSK, conforme mostrado na seção 2.2.3.1 figura 4. No entanto, percebe-se a presença de ruídos.

### 3.4.2 – Simulação duobinária

Da mesma forma que no modelo NRZ DPSK, realizaram-se simulação *back-to-back* e simulação na presença da fibra óptica, com as mesmas condições. Na primeira simulação, transmissor ligado diretamente no receptor, variou-se o atenuador de 20 a 40 dB. A partir dessa variação, obtiveram-se

os valores de potência na entrada do receptor relacionados a determinadas taxas de erro de bit. Para valores reais, é apresentado o gráfico azul na figura 14. De maneira semelhante, na presença da fibra, variou-se os valores do atenuador, entre 0 e 20 dB, e obteve-se o gráfico vermelho da figura 14.



**Figura 14 - Relação do logaritmo da taxa de erro com a potência emitida**

Analisando os gráficos presentes na figura 14, nota-se a necessidade de uma menor potência para a configuração *back-to-back*. Calculando-se a penalidade para uma taxa de erro de bit de  $10^{-12}$ , encontra-se o valor de 0,9 dB. Também é interessante notar que, em relação ao sistema NRZ DPSK, o sistema duobinário necessitou de um pouco mais de potência no receptor para atingir as mesmas taxas de erro de *bit*.

Analogamente ao caso NRZ DPSK, apresenta-se a seguir, nas figuras 15 e 16, os diagramas de olho obtidos para cada uma das simulações, na  $BER = 10^{-12}$ .



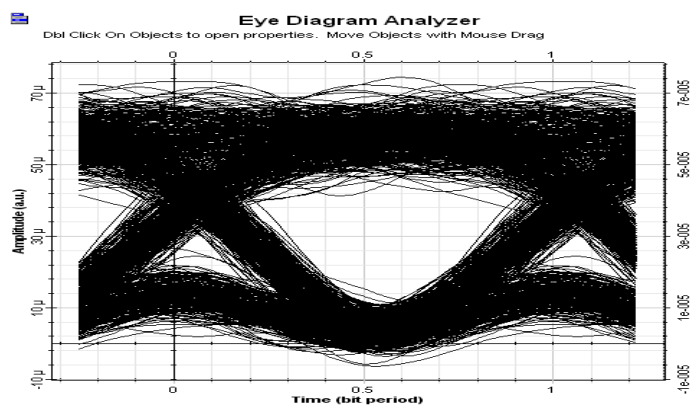


Figura 15 - Diagrama de olho, modulação duobinária, no caso back-to-back para BER =  $10^{-12}$

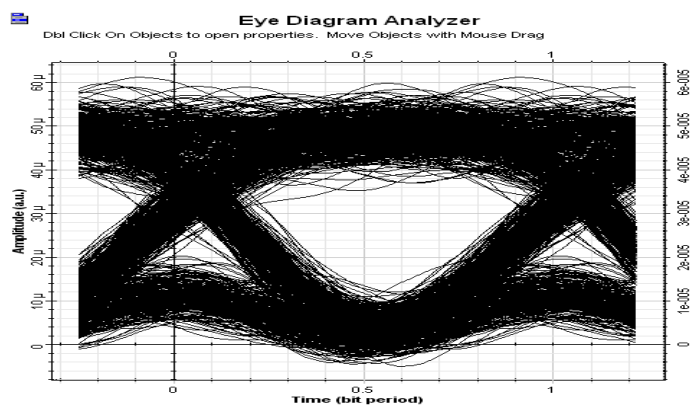


Figura 16 - Diagrama de olho, modulação duobinária, na presença de fibra óptica para BER =  $10^{-12}$

Apesar da presença de ruídos, os diagramas de olho estão em acordo com os apresentados na seção 2.2.3.2 figura 5 para o caso duobinário.



## **CAPÍTULO 4**

### **MATLAB**

#### **4.1 - INTRODUÇÃO**

Este capítulo trata da implementação de um sistema de transmissão óptica em MATLAB®/Simulink®. Foram desenvolvidos dois sistemas: o primeiro sistema com modulação NRZ DPSK e o segundo utilizando-se de modulação duobinária para transmissão dos dados. Em cada um desses sistemas realizou-se um primeiro teste com o transmissor ligado diretamente ao receptor e, um segundo teste, em presença de uma fibra óptica entre transmissor e receptor. A implementação se deu por meio do *software* de desenvolvimento MATLAB®. A plataforma MATLAB® implementa a sua própria linguagem de programação, facilitando o tratamento matemático. Dentre as diversas ferramentas do MATLAB®, utilizou-se o Simulink®, uma opção visual e que possui blocos prontos. No Simulink®, combinam-se, de maneira visual os componentes, e assim, tem-se a opção de visualizar os resultados de maneira gráfica, como num osciloscópio, por exemplo. O Simulink® já conta com blocos especiais para processamento de sinais e sistemas de comunicação, facilitando a programação.

Nas próximas seções serão apresentados os processos e passos para essa modelagem matemática, bem como os resultados obtidos. Toda a modelagem no Simulink® seguiu os passos que são descritos no livro da Ref. [4]. Também foram estudadas as Ref. [8-16].

#### **4.2 – MODELAGEM DO TRANSMISSOR**

A modelagem de um transmissor para um sistema de transmissão óptico varia de acordo com a modulação utilizada. Neste trabalho, as modulações usadas foram NRZ-DPSK e duobinário. Portanto, na seção seguinte, são explicadas as construções do transmissor para cada um dos formatos de modulação usados.

#### 4.2.1 - Transmissor NRZ DPSK

O livro da Ref. [4] implementa como exemplo o transmissor RZ (*return-to-zero*) DPSK. Entretanto, a diferença para o NRZ DPSK acaba sendo apenas a presença de um modulador que gera o formato RZ e valores de alguns parâmetros. Portanto, os passos a serem seguidos são praticamente os mesmos.

A primeira parte do transmissor a ser modelada é a geradora dos dados a serem transmitidos, sendo necessário gerar *bits* de formas aleatórias. Dessa forma, utilizou-se um bloco do Simulink® chamado *Bernoulli Binary Generator*, o qual gera números binários de forma aleatória por meio da distribuição de Bernoulli. O único parâmetro a ser configurado é a taxa de amostragem, sendo que para sistemas de transmissão de 40 Gb/s, deve ser 25 ps. Nas figuras 17 e 18, tem-se a configuração do bloco gerador de bits e a seqüência gerada.

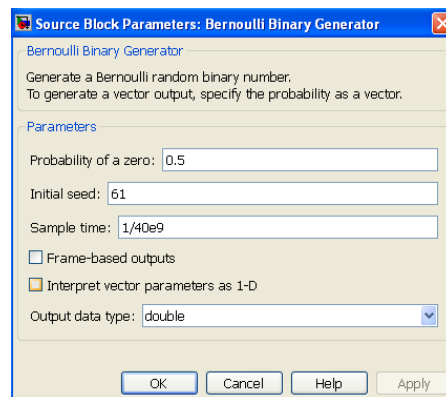


Figura 17 - Configuração do gerador de bits

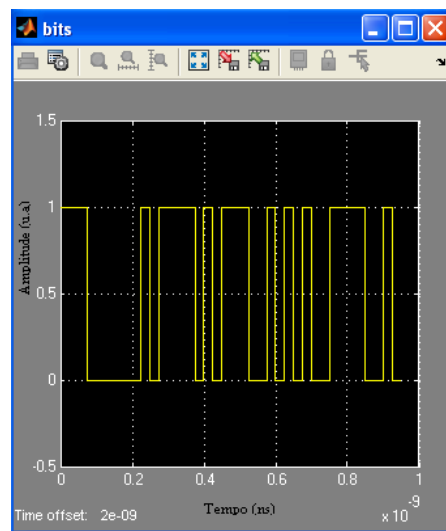
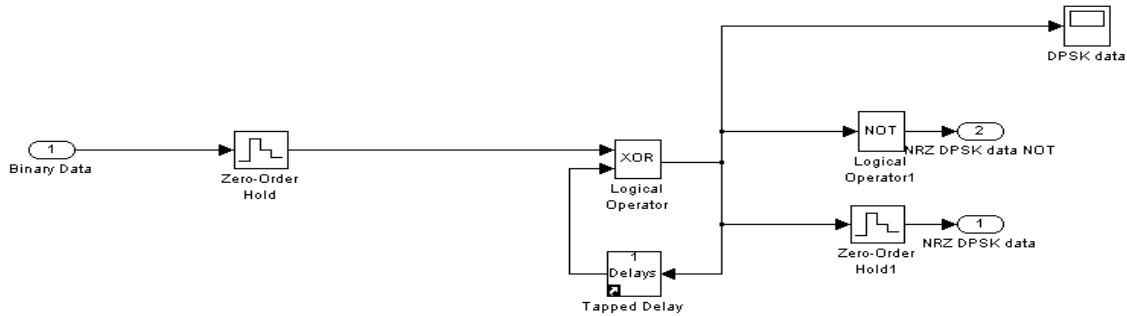


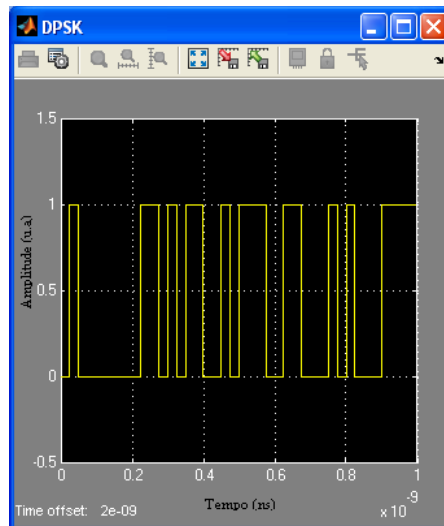
Figura 18 - Seqüência de bits gerada

O próximo bloco do transmissor a ser modelado é o codificador elétrico, o qual transformará a seqüência de *bits* em um sinal elétrico do tipo DPSK. Na figura 19, mostra-se a modelagem do codificador. Não é necessária nenhuma configuração adicional.



**Figura 19 - Codificador DPSK**

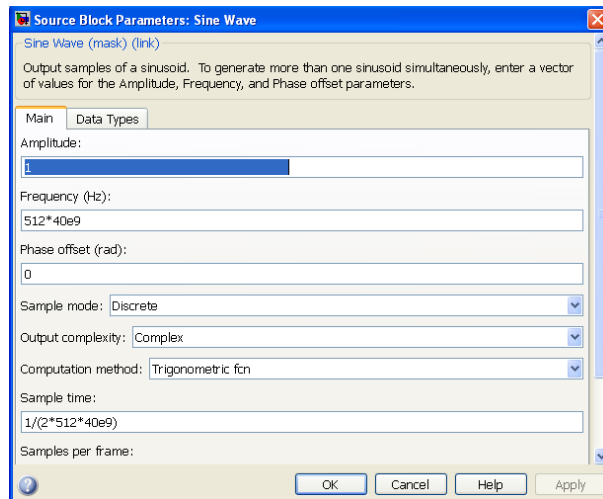
A codificação DPSK pode ser feita através de uma porta *xor* que recebe o *bit* atual e o último. O bloco *Tapped Delay* atrasa o *bit* para efeito dessa comparação. Os blocos *Zero-Order Hold* servem para garantir que a amostra foi sincronizada. O codificador gera duas saídas: o sinal DPSK codificado e o seu inverso. O sinal DPSK pode ser visto na figura 20.



**Figura 20 - Sinal DPSK**

A seqüência de *bits* agora é um sinal elétrico NRZ, não necessitando de nenhuma codificação adicional. A próxima etapa é enviar o sinal elétrico para o modulador junto com a onda portadora, emitida pelo *laser*. O *laser* será simulado por um bloco gerador de onda senoidal, bastando

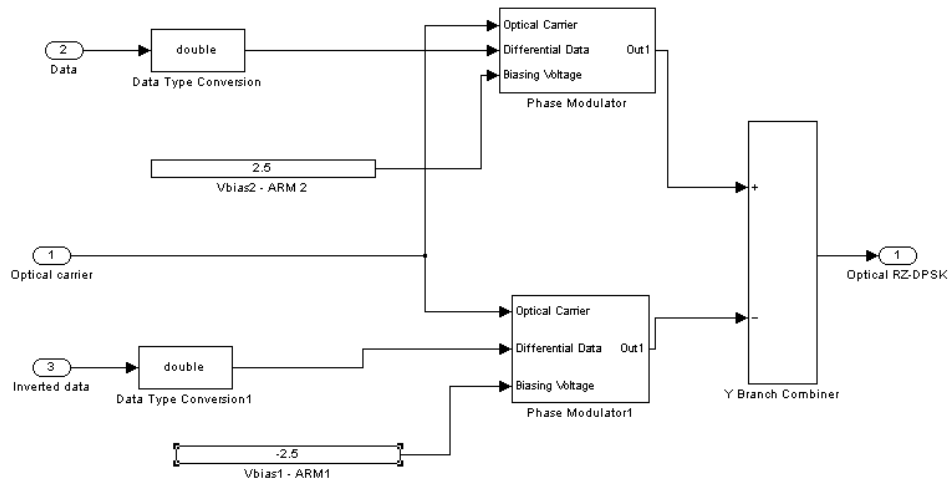
especificar a frequência e a taxa de amostragem. Para saber exatamente o período do *bit* na hora de atrasá-lo no receptor, optou-se por uma frequência 20,4 THz, permitindo que o bloco de atraso do receptor utilize um valor exato de 512 amostras. A taxa de amostragem é  $\frac{1}{2f}$ , conforme a condição de Nyquist, resultando em 0,24 fs. Na figura 21 tem-se a configuração do *laser*.



**Figura 21 - Onda senoidal funcionando como *laser***

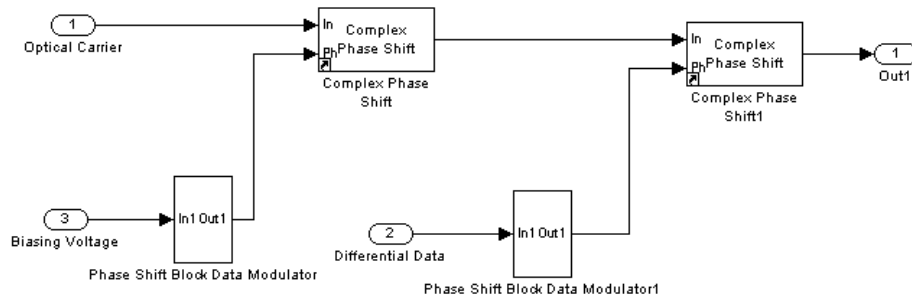
Convém notar que no livro da Ref. [1] a frequência que aparece no bloco de configuração da onda senoidal está como  $\frac{1}{512 \times 40 \times e^9}$  e o tempo de amostragem como  $\frac{1}{2 \times 100 \times 512 \times 40 \times e^9}$ . Tentou utilizar-se desses valores, todavia os resultados foram incoerentes, visto que o valor da frequência está configurado para ser colocado em Hz diretamente e não como um  $\frac{1}{\text{valor}}$ . Além disso, alterou-se a taxa de amostragem para a taxa mínima de Nyquist,  $\frac{1}{2f}$ .

A onda óptica fornecida pelo *laser* deve ser modulada com a informação elétrica, formato NRZ DPSK. A modulação é feita por um modulador do tipo *dual-drive MZM*. A configuração do modulador é apresentada na figura 22.



**Figura 22 - Configuração do modulador *dual-drive* MZM**

Cada braço do modulador MZM é alimentado pelo sinal elétrico NRZ, sendo, contudo, o sinal que entra em um braço invertido em relação ao outro. Nos braços ocorre a modulação de fase da portadora, utilizando uma tensão de polarização,  $V_{\text{bias}}$ , igual à metade da tensão de chaveamento do MZM,  $V_{\pi} = 5 \text{ V}$ . O processo de modulação de fase é apresentado na figura 23.



**Figura 23 - Modulador de fase dos braços do MZM**

Uma primeira modulação ocorre na onda portadora, com um deslocamento de fase de  $\pi$  radianos, em virtude da tensão de polarização,  $V_{\text{bias}} = 2,5 \text{ V}$ . Um segundo deslocamento de fase acontece em virtude do sinal elétrico, o qual é multiplicado por  $\pi$  dentro do bloco *Phase Shift Block Data Modulator1*. O bloco *Phase Shift Block Data Modulator* multiplica o valor de entrada por outro valor, dado em função de  $\pi$ . A saída do bloco fornece, portanto, o deslocamento de fase que a portadora irá sofrer.

O processo de deslocamento de fase da portadora ocorre igualmente nos dois braços do MZM. Os sinais resultantes de cada um dos braços recombina-se por meio de interferências no bloco *Y Branch Combiner*, o qual realiza a subtração ou adição dos sinais. A saída do modulador MZM é o sinal óptico NRZ DPSK. Nas figuras 24 e 25 vêem-se os sinais gerados em cada braço do MZM. A figura 26 mostra o sinal óptico formado.

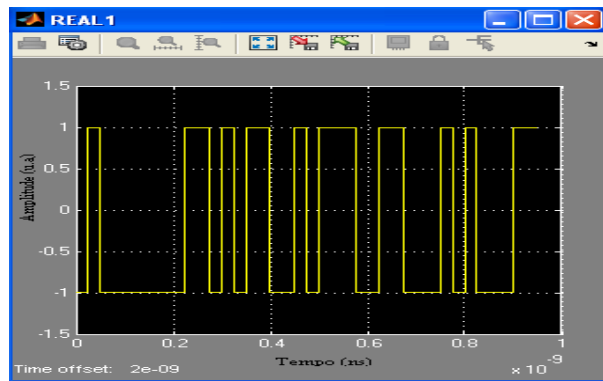


Figura 24 – Parte real do sinal modulado no primeiro braço do MZM

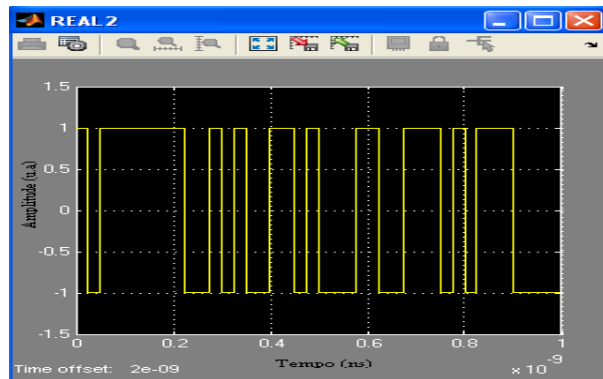


Figura 25 – Parte real do sinal modulado no segundo braço do MZM

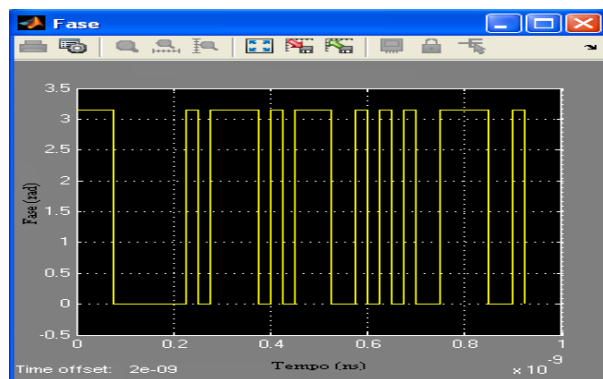


Figura 26 – Fase do sinal transmitida



## 4.2.2 – Transmissor duobinário

Assim como na modulação NRZ DPSK descrita, o sinal óptico será modulado em um MZM por dois sinais elétricos invertidos, além da onda portadora. A geração de bits e o modelo do *laser* são exatamente os mesmos descritos para a modulação NRZ DPSK. Os bits gerados pelo bloco *Bernoulli Binary Generator* devem ser codificados eletricamente como duobinários. O esquema do codificador duobinário é apresentado na figura 27.

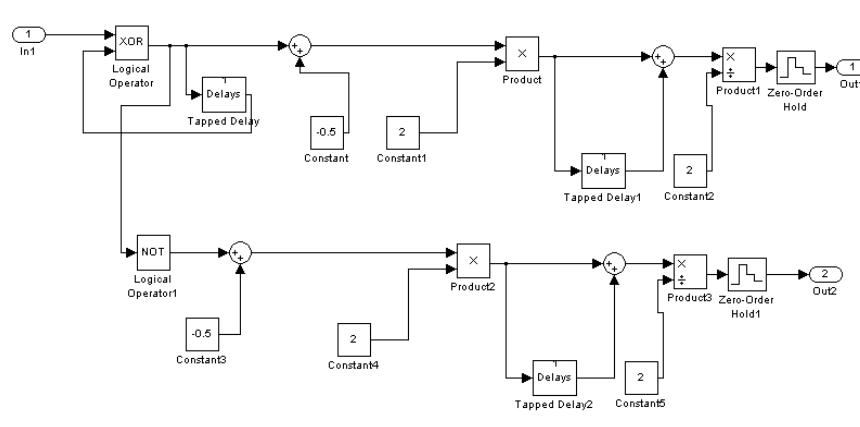
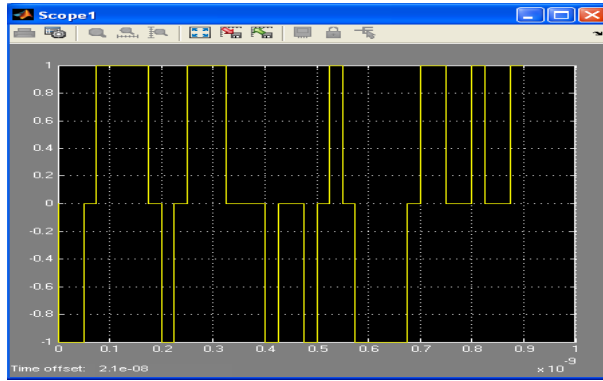


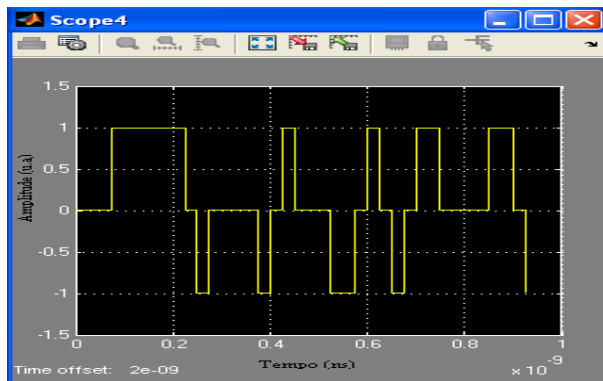
Figura 27 - Codificador duobinário

O codificador duobinário é composto por dois ramos, os quais geram os mesmos sinais, porém invertidos, para acionar o MZM. A codificação se inicia de forma idêntica a DPSK: o *bit* anterior e o atual são comparados em uma porta *xor*. A partir daí, deve-se ser possível codificar o *bit* de entrada como -1, 0 ou 1. Para isto, primeiro subtrai-se 0,5, gerando um sinal com picos em 0,5 e -0,5. Este sinal é multiplicado por 2, gerando picos de -1 e 1. Entretanto, ainda falta a possibilidade de codificar o *bit* como 0. Para isso, compara-se o *bit* anterior com o atual por meio de uma porta *xor*, a semelhança do realizado no início. Obtém-se então a possibilidade da codificação como -2, 0 e 2. Para resultar em -1, 0 e 1, realiza-se uma divisão por 2. O resultado pode ser visto na figura 28.

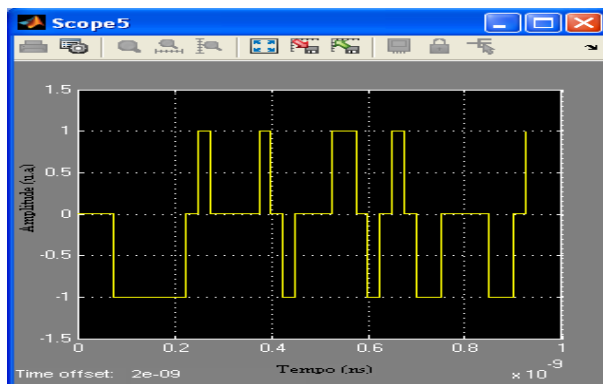


**Figura 28 - Sinal elétrico duobinário gerado**

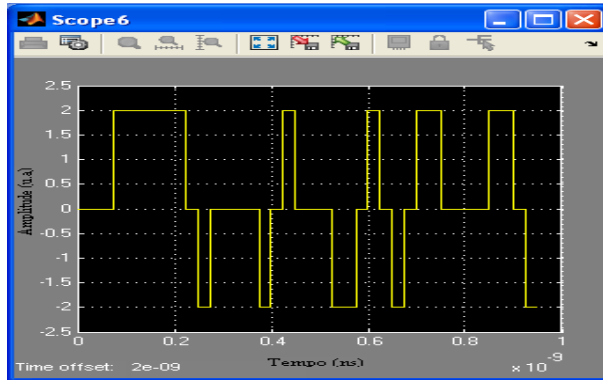
À semelhança da modelagem do sinal NRZ DPSK, o sinal duobinário alimenta o modulador MZM. Em cada um dos seus braços acontecerá a modulação da portadora, somando-se 1 ao sinal elétrico e deslocando-o de  $\pi/2$ , para que o valor da fase da portadora seja deslocada por esse valor. As figuras 29, 30, 31 mostram a portadora resultante no primeiro braço, no segundo braço e o sinal óptico resultante.



**Figura 29 – Parte real do sinal no primeiro braço do MZM**



**Figura 30 – Parte real do sinal no segundo braço do MZM**



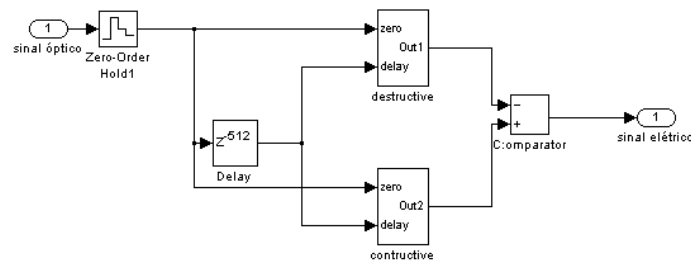
**Figura 31 – Parte real do sinal transmitido**

### 4.3 – MODELAGENS DO RECEPTOR

Assim como no transmissor, a modelagem do receptor varia de acordo com a modulação adotada. Novamente serão apresentados os esquemas para cada modulação, NRZ DPSK e duobinário. Para o NRZ DPSK, o receptor é composto por um MZDI, dois fotodiodos e um comparador. O receptor da codificação duobinária é formado por apenas um fotodiodo.

#### 4.3.1 - Receptor NRZ DPSK

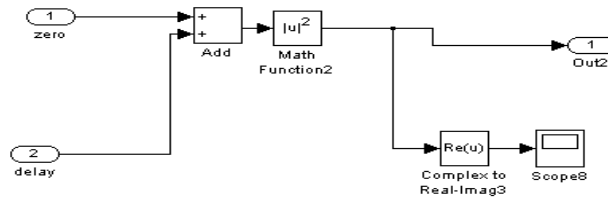
Apesar do exemplo do livro da Ref. [4] ser RZ DPSK, a modelagem do receptor é a mesma para os dois casos. O esquema do receptor NRZ DPSK é apresentado na figura 32.



**Figura 32 - Receptor NRZ DPSK**

O sinal óptico que chega passa pelo bloco do *Zero-Order Hold1* por questão de sincronia. Para fazer a decodificação DPSK é necessário comparar o *bit* atual com o anterior, por isso o sinal passa

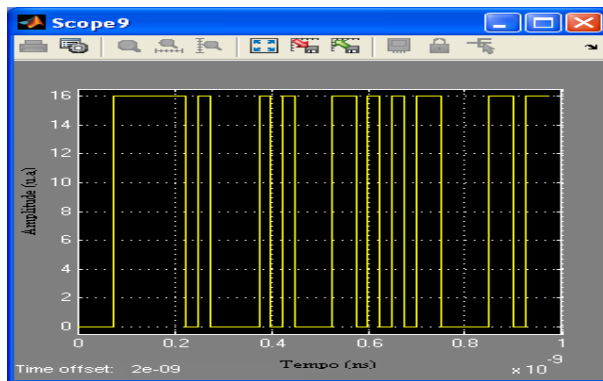
por um bloco de atraso. Este bloco possui como valor de atraso 512, o exato tempo de um *bit*. O *bit* atual e o anterior são comparados em dois fotodiodos: um de interferência construtiva e outro de interferência destrutiva. O módulo do resultado da soma ou subtração é elevado ao quadrado, pois o fotodiodo converte sinal óptico em elétrico. Quando não ocorrer mudança de fase entre o *bit* atual e o anterior, acontecerá interação construtiva. Na figura 33, tem-se o fotodiodo positivo.



**Figura 33 - Fotodiodo construtivo**

O fotodiodo, no qual ocorre interação destrutiva, possui como diferença a subtração do *bit* anterior em relação ao *bit* atual. Portanto, a única diferença na implementação do fotodiodo, no qual ocorre interação destrutiva, é possuir a segunda entrada do bloco *Add* como subtração.

Os sinais resultantes das saídas dos fotodiodos podem ser vistos na figura 34 e 35 respectivamente. A figura 36 apresenta o sinal resultando do bloco *Comparator*, o qual é o resultado da interação dos sinais resultantes do fotodiodo.



**Figura 34 – Parte real do sinal na saída do primeiro fotodiodo**

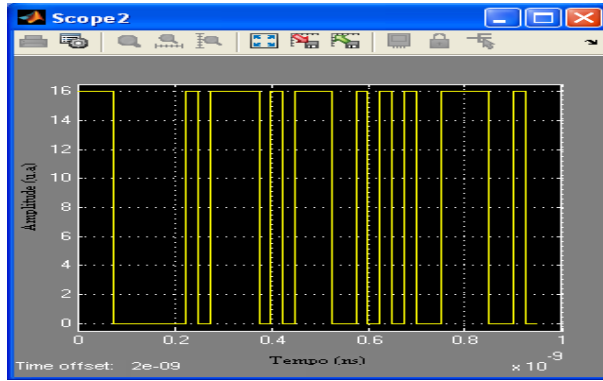


Figura 35 – Parte real do sinal na saída do segundo fotodiodo

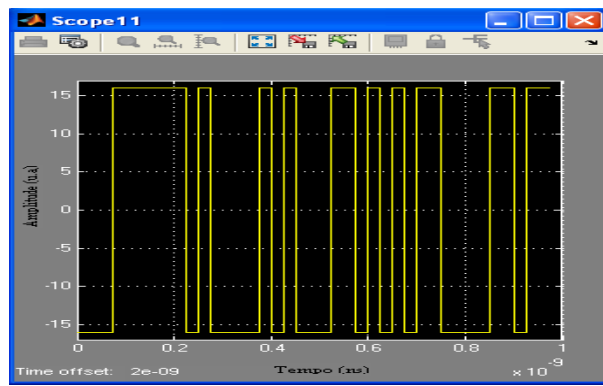
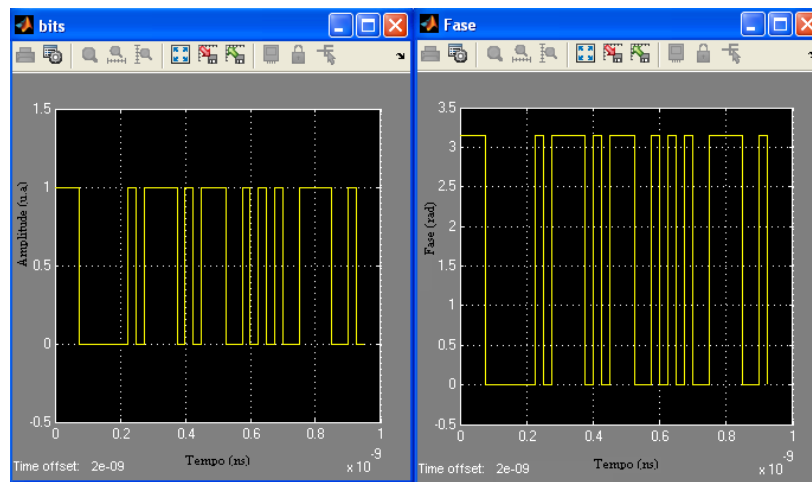


Figura 36 – Parte real do sinal após a interação entre os sinais resultantes do fotodiodo

Por fim tem-se na fase do sinal, a seqüência de *bits* do início. A figura 37 mostra um comparativo entre os *bits* gerados e a fase resultante. A fase carrega a mesma seqüência de *bits* transmitida.



(a)

(b)

Figura 37 - Comparativo entre: (a) *bits* gerados e (b) fase do sinal elétrico resultante

Apesar de não constar na Ref. [4], para que a parte real do sinal, mostrada na figura 36, seja exatamente igual aos *bits* de entrada, basta fazê-la passar pelo esquema descrito na figura 38. O sinal é dividido por uma constante. Os valores do sinal que forem maior que 1 passam pela comparação e recebem 1. Os valores inferiores a 1, recebem 0.

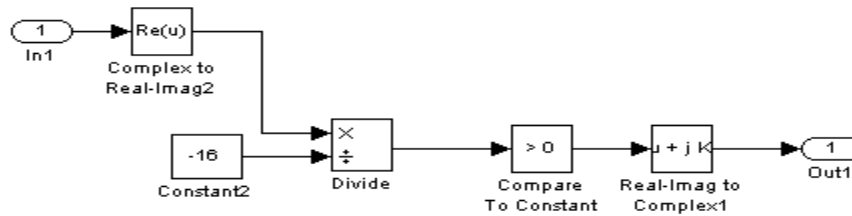


Figura 38 - Normalizar parte real do sinal

### 4.3.2 – Receptor duobinário

O receptor duobinário é composto por apenas um fotodiodo. Após a conversão do sinal óptico deve-se deslocar a fase em  $\pi$ , visto que o sinal encontra-se invertido. Em seguida acontece um pequeno ajuste para que o sinal, com picos em 0 e -4, fique em 0 e 1. Neste ajuste, os valores do sinal que forem maiores que -2 recebem o valor 1 e, o resto, recebe 0. Desta forma, inverte-se o sinal.

Na figura 39, encontra-se o receptor duobinário.

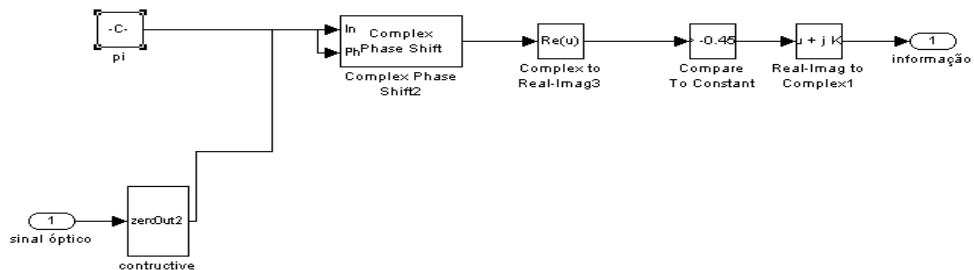


Figura 39 - Receptor duobinário

Na figura 40 é apresentado o sinal elétrico após passar pelo bloco de ajuste de fase.

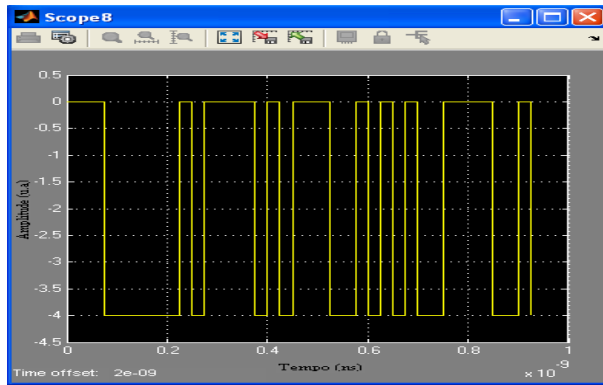
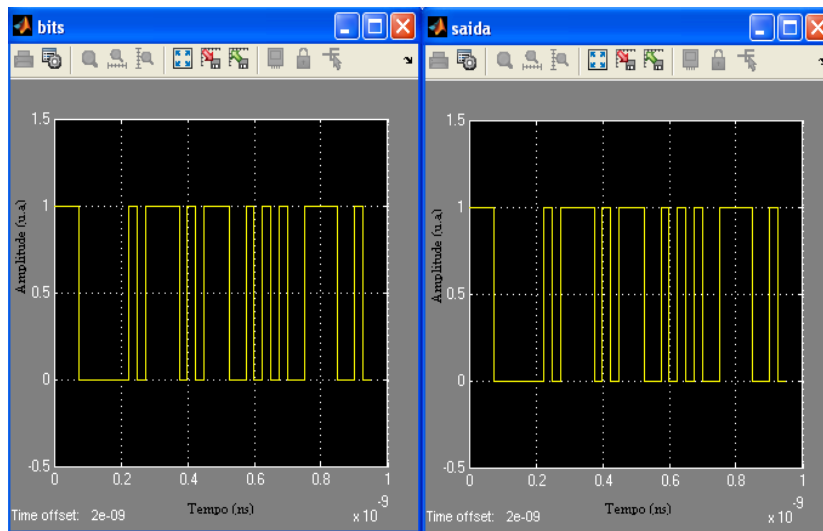


Figura 40 - Sinal elétrico após ajuste de fase.

Os *bits* gerados e recebidos são comparados na figura 42. Em condições ideais, transmissor ligado diretamente no receptor, não existem erros.



(a)

(b)

Figura 41 - Comparativo entre: (a) *bits* gerados e (b) *bits* recebidos

#### 4.4 – MODELAGENS DA FIBRA ÓPTICA

A propagação do sinal óptico na fibra, as atenuações e as distorções sofridas foram modeladas pela equação 2.7. Para a solução da numérica da mesma, foi utilizado o SSFM (*split-step Fourier method*), explicado na seção 2.3. O código em MATLAB do SSFM [4] é mostrado no anexo. A implementação no Simulink® pode ser vista na figura 41.

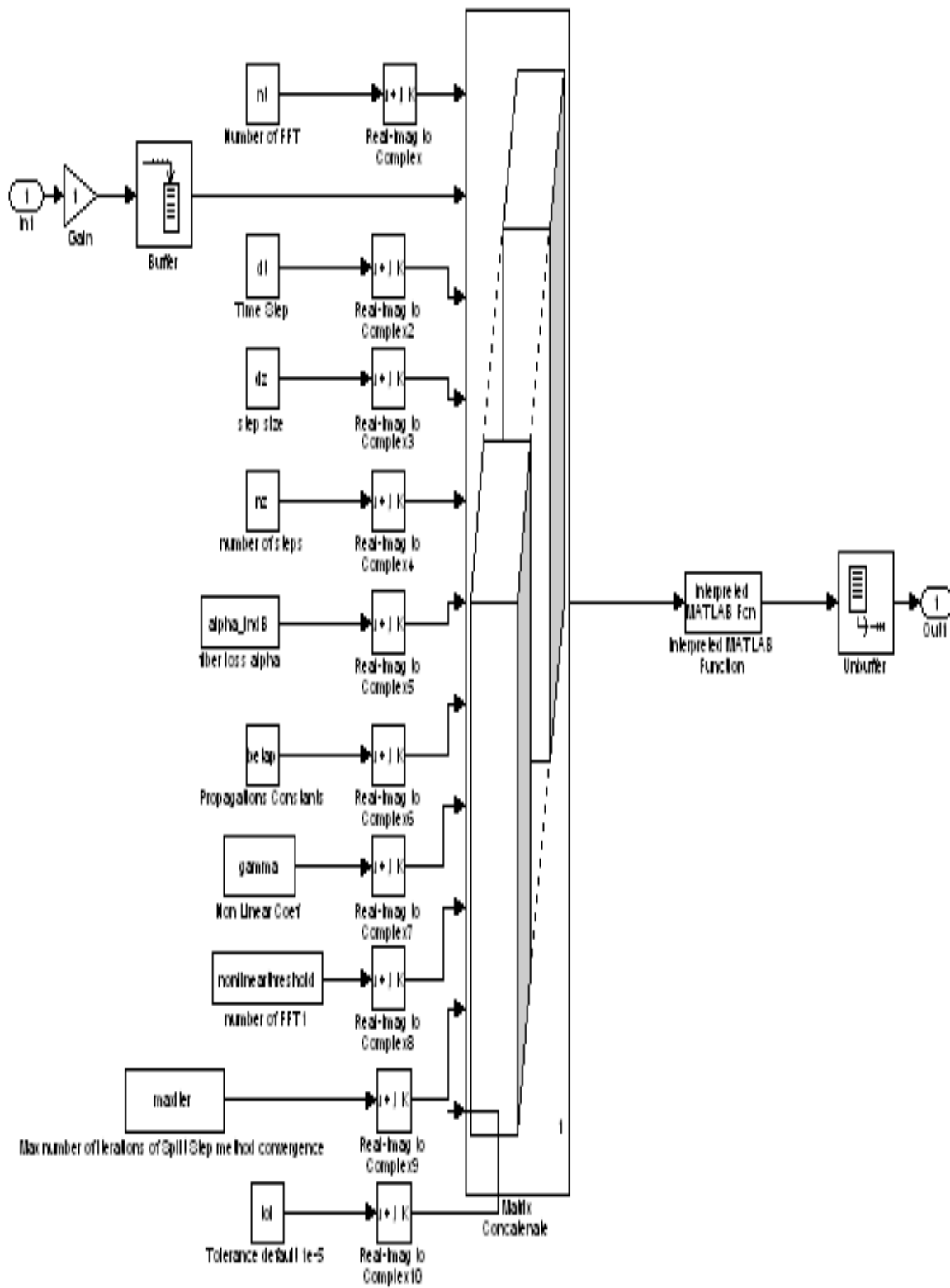


Figura 42 - Implementação da propagação na fibra óptica



A implementação é constituída por dez blocos de constantes. Essas constantes, cujos valores são apresentados na tabela 7, passam pelo bloco *Real-Imag to Complex* para serem transformadas em números complexos. Os valores complexos das constantes são enviados para um vetor, *Matrix Concatenate*, como os parâmetros que inicializarão o algoritmo SSFM. Neste vetor está também o sinal de entrada, que ao passar pelo bloco de *buffer*, se torna um vetor de 2048 amostras. Após passar pelo algoritmo SSFM, o sinal de entrada deixa de ser um vetor de 2048 amostras por meio do bloco de *Unbuffer*, retornando a ser um número complexo. A inicialização dos dados utilizados é fornecida para o programa por um arquivo de inicialização [4] apresentado no anexo. O sinal de saída passa pelo bloco de *unbuffer* a fim de voltar a possuir a dimensão de *double* e ser processado pelo receptor.

**Tabela 7 - Entradas do SSFM**

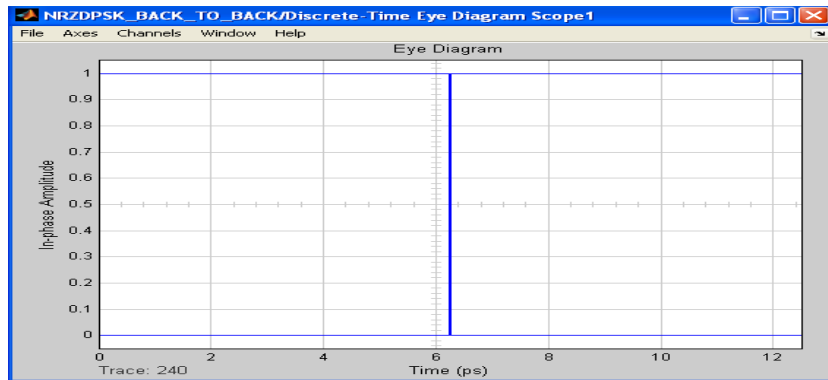
<u>Variáveis</u>	<u>Valores</u>
nt : Janela do <i>Fast Fourier</i>	16384
dt : Tempo do passo (ps)	0,78.
dz : Tamanho do passo (m)	10
nz : Número de passos	100
alpha_indB : perda (dB/km)	0,2
betap : vetor de dispersão ( $0 \ 0 \ s^2/m \ s^3/m$ )	$[0 \ 0 \ 2,1 \cdot 10^{-26} \ 0,3 \cdot 10^{-39}]$
gamma : coeficiente de não-linearidade ( $m^{-1} \cdot W^{-1}$ )	1000
nonlinearthreshold : pico da tensão <i>threshold</i> (mW)	0,005
maxiter : número máximo de iterações	20
tol : tolerância de erro	$1e^{-5}$

## 4.5 – SIMULAÇÕES

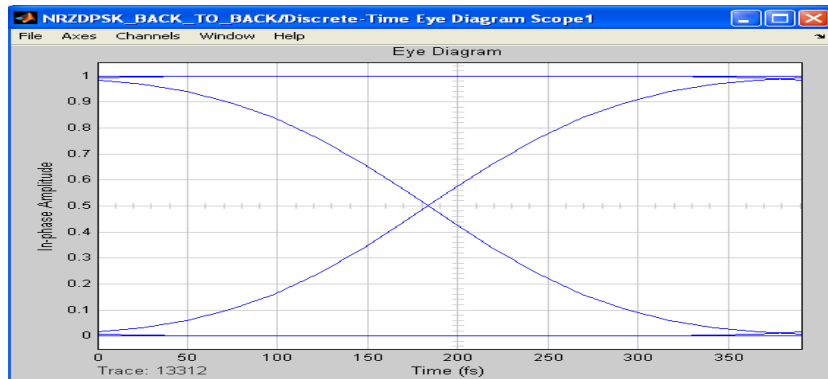
A plataforma SIMULINK® fornece duas ferramentas para avaliação de sistema: *Discrete-Time Eye Diagram Scope*, diagrama de olho, B-FFT, para visualizar o espectro de potência e *Error Rate Calculation*, uma forma de cálculo da taxa de erro de *bit*. Na presença delas realizaram-se algumas medições. O bloco *Discrete-Time Eye Diagram Scope* é ligado diretamente à saída do sistema. O bloco *Error Rate Calculation* avalia dois sinais: um de transmissão e outro de recepção. O B-FFT é conectado na saída do modulador.

Na configuração *back-to-back*, transmissor ligado diretamente ao receptor, o erro apontado foi zero em ambas as modulações. Como as duas modulações geraram os mesmos *bits* de entrada, o diagrama de olho também foi o mesmo. Na figura 43, tem-se o diagrama de olho obtido. Na figura

44, tem-se o diagrama de olho obtido com a presença do bloco de filtro Gaussiano antes do *Discrete-Time Eye Diagram Scope*.

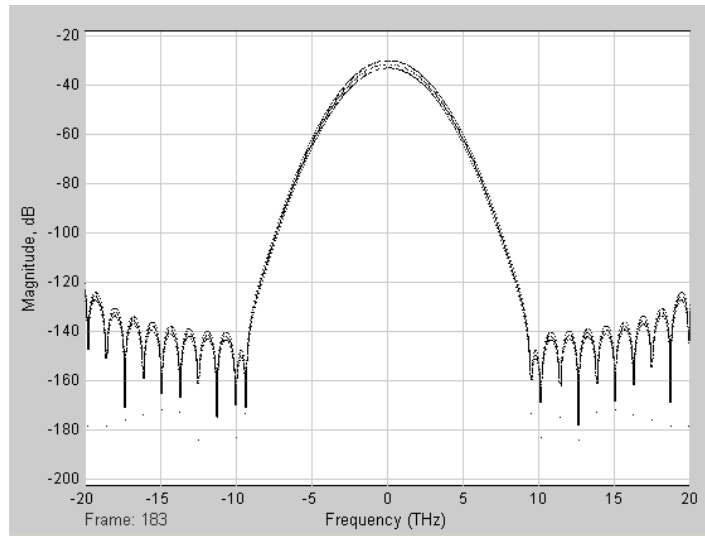


**Figura 43 - Diagrama de olho na configuração *back-to-back* sem filtro Gaussiano**

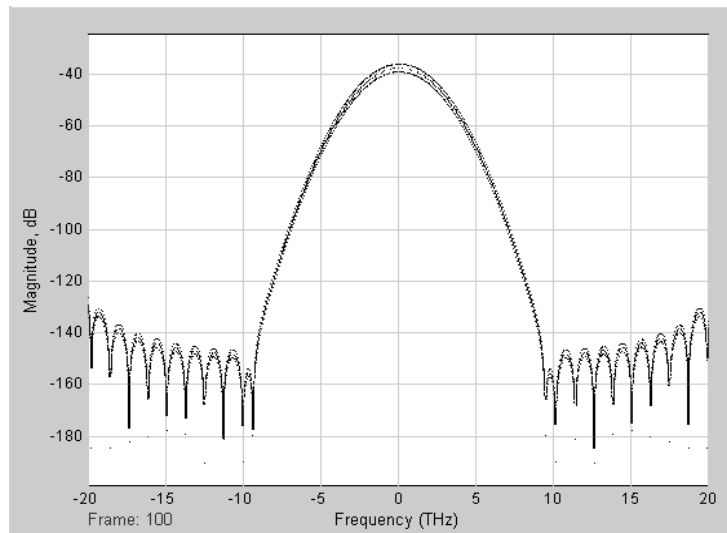


**Figura 44 - Diagrama de olho na configuração *back-to-back* com filtro Gaussiano**

Obteve-se também o espectro de potência na saída dos moduladores. A figura 45 mostra o espectro obtido para a modulação NRZ DPSK e a figura 46 mostra o espectro obtido para a modulação duobinária.



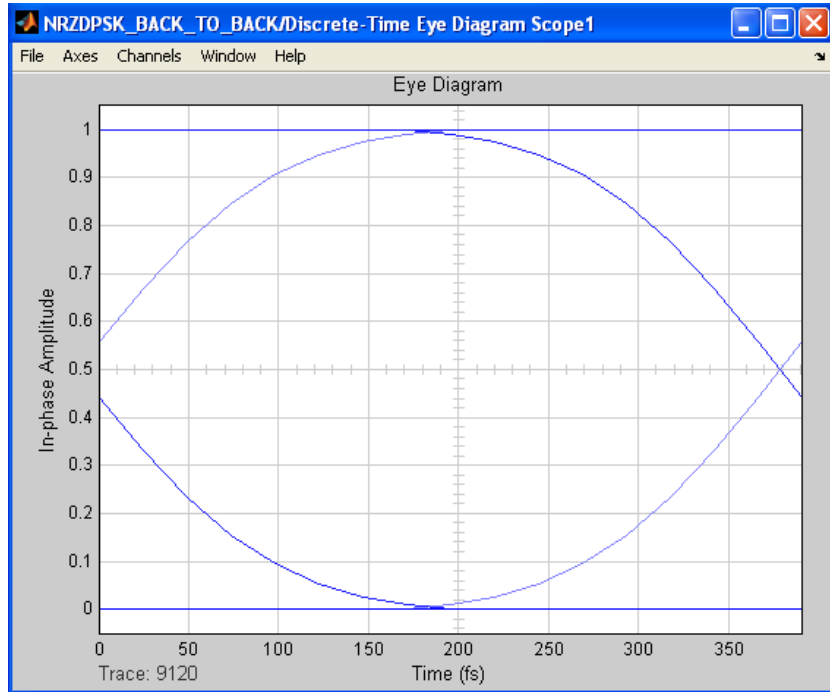
**Figura 45- Espectro da modulação NRZ DPSK**



**Figura 46- Espectro da modulação duobinária**

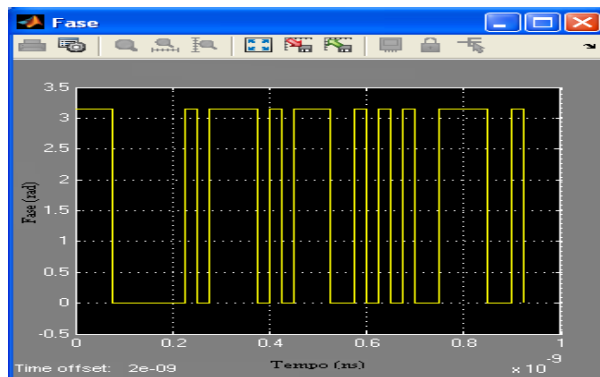
Na simulação utilizando fibra óptica, variou-se o comprimento da mesma e verificou-se que o sinal conseguia ser recuperado com uma fibra de comprimento de até 50 km. Após a fibra óptica, inseriu-se uma fibra compensadora de dispersão (DCF) à semelhança do que foi feito no Optisystem. O livro da Ref. [4] não apresentou muitas informações a respeito dos medidores de desempenho do sistema.

Obteve-se o diagrama de olho na presença do filtro Gaussiano conforme figura 47.



**Figura 47 - Diagrama de olho na presença da fibra**

Para o comprimento de fibra igual a 50 km é mostrado nas figuras 49 e 50 a fase do sinal NRZ DPSK e da parte real do sinal duobinário, respectivamente. É possível perceber a atenuação no sinal duobinário.



**Figura 48 - Fase do sinal NRZ DPSK após fibra óptica**

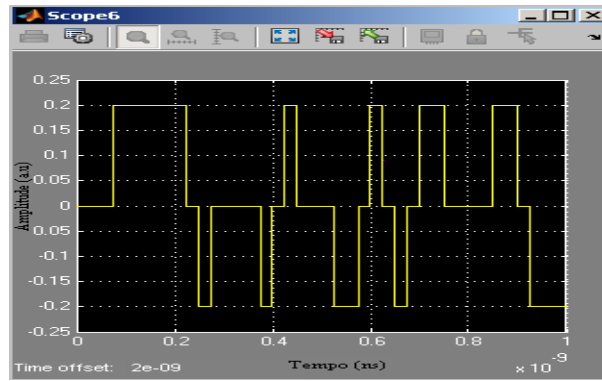


Figura 49 - Parte real do sinal duobinário após fibra óptica

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES

Neste trabalho analisou-se o comportamento matemático de um sistema de transmissão óptica para poder verificá-lo em testes no simulador e na modelagem do próprio sistema. Realizou-se um estudo sobre as componentes chaves de um sistema de transmissão óptica: transmissor, fibra óptica e receptor. Analisou-se cada componente desses blocos chaves de um sistema de transmissão óptica, buscando o entendimento de seu comportamento e o equacionamento de seu funcionamento, quando necessário. Também foram discutidos os dois formatos de modulação utilizados ao longo do trabalho: duobinário e NRZ DPSK.

Realizaram-se simulações no *software Optisystem v7.0* a fim de verificar os comportamentos das partes analisadas anteriormente. Realizaram-se dois tipos de simulação: *back-to-back*, transmissor ligado diretamente no receptor, e, na presença de uma fibra óptica de 100 km do tipo SSFM (*standard single-mode fiber*), para os formatos NRZ DPSK e duobinário. Foi necessária a presença de um amplificador na saída do transmissor e um na entrada do receptor. Na presença da fibra óptica foi necessária a inclusão de uma fibra compensadora de dispersão. Na simulação *back-to-back*, transmissor ligado diretamente ao receptor, variou-se a potência emitida pelo *laser* atingindo-se diversas taxas de erro de *bit*. Ao colocar-se a fibra óptica, inseriu-se em seguida uma fibra compensadora de dispersão. Nesta configuração variou-se a potência emitida pelo *laser* para diversas taxas de erro de *bit*. Os resultados mostram a necessidade de uma potência emitida pelo *laser* cerca de 20 dB a mais quando na presença da fibra. Também se pode verificar uma menor sensibilidade do receptor duobinário.

Implementou-se em MATLAB® e Simulink®, sistemas de comunicação óptica com os mesmos formatos de modulação utilizados anteriormente. O uso do Simulink® permite um acompanhamento visual do desenvolvimento e resolução do problema, validando os sistemas desenvolvidos. A modelagem dos sistemas foi baseada na Ref. [4], com algumas adaptações para o formato NRZ DPSK, visto que na Ref [4] é modelado um sistema RZ DPSK. Também encontrou-se alguns erros de valores fornecidos na Ref [4], como por exemplo, a taxa de amostragem da onda senoidal. Para a construção do transmissor duobinário, seguiu-se passo a passo a Ref. [4], optando-

se inclusive por um dos dois modelos de transmissores fornecidos. O modelo do receptor duobinário foi desenvolvido por sugestões da Ref. [4].

Utilizou-se como fonte de *laser* uma onda senoidal. Os dados foram gerados aleatoriamente por um bloco do Simulink® conhecido por *Bernoulli Binary Generator*. Para cada modulação, implementou-se um transmissor e receptor específicos. Na presença da fibra, utilizou-se uma fibra compensadora de dispersão (DCF). A avaliação dos modelos construídos deu-se pelo acompanhamento dos sinais por meio dos visualizadores de onda fornecidos pela plataforma de desenvolvimento. Desta maneira, utilizando de um bloco fornecido pelo Simulink®, encontrou-se o diagrama de olho para a configuração *back-to-back* com taxa de erro de *bit* igual a zero.

Modelou-se a fibra óptica utilizando-se o algoritmo *Split-Step Fourier Method* Ref. [4]. O algoritmo encontra-se no anexo 1. Foi necessário incorporar o algoritmo ao modelo do Simulink® por meio de um bloco conhecido por *Interpreted MATLAB Function*. Também foi necessário adicionar ao modelo um arquivo contendo os parâmetros de inicialização Ref [4]. O arquivo é apresentado no anexo 2. O arquivo de inicialização permitiu a variação de diversos fatores, como o comprimento da fibra, o coeficiente de atenuação, o coeficiente de não-linearidade. Também foi adicionada uma fibra compensadora de dispersão (DCF). Entretanto, para efeitos de resultado de simulação, variou-se o comprimento da fibra óptica e verificou-se ser possível utilizar a configuração até 50 km.. O sistema duobinário possui menor sensibilidade de receptor. Obtiveram-se os diagramas de olho para as duas modulações, e a exemplo do descrito na configuração *back-to-back*, foram os mesmos. Os sinais NRZ DPSK e duobinário após passarem pela fibra também foram apresentados. O modelo construído, portanto, acabou apresentando limitações, diferentemente do simulador comercial.

Os simuladores comerciais apresentam a facilidade de ser necessária apenas a configuração de parâmetros. Todavia, eles não indicam se os parâmetros são fisicamente viáveis. Desta forma, se faz necessário o conhecimento teórico dos conceitos envolvidos no seu desenvolvimento. O desenvolvimento do próprio sistema de simulação, por sua vez, é uma alternativa aos altos preços cobrados pelos *softwares* comerciais. Apesar de ambientes de desenvolvimento como o Simulink®, o qual inclusive fornece uma biblioteca sobre comunicações com diagrama de olho e taxa de erro de *bit*, alguns pontos são de difícil ajuste como a avaliação do desempenho do sistema.

Como continuação do trabalho, sugere-se o uso complementar das duas plataformas, por exemplo, para utilizar os visualizadores do *Optisystem* ou para o desenvolvimento de módulos de dispositivos que não estejam incluídos em uma das bibliotecas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **Silveira, Clenilson Rodrigues da.** Estudos de Formatos Especiais de Modulação Digital para Comunicações Ópticas. *Dissertação de Mestrado*. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2009.
2. <http://www.poli.br/~pan/Apostila%20de%20fibras%20%F3ticas/1%20%20Sistemas%20de%20Comunica%20E3o%20%20D3ptica.pdf> [accessado: Junho 08, 2012].
3. [http://www.gta.ufrj.br/grad/08\\_1/wdm1/Histria.html](http://www.gta.ufrj.br/grad/08_1/wdm1/Histria.html) [accessado: Junho 08, 2012].
4. **Binh, Le Nguyen.** *Optical Fiber Communications Systems: Theory and Practice with MATLAB and Simulink Models*, CRC Press, 2010.
5. [http://www.lea.ufpa.br/Training\\_OptiSystem\\_Belem.pdf](http://www.lea.ufpa.br/Training_OptiSystem_Belem.pdf) [accessado: Junho 08, 2012].
6. Tutoriais anexos ao software Optisystem v7.0.
7. <http://www.mathworks.com> [accessado: Junho 08, 2012].
8. **Binh, Le Nguyen.** *40G Overlay 10G DWDM Photonic Transmission Systems Using Advanced Modulation Formats*. 2006.
9. **Binh, Le Nguyen.** *40Gb/s Amplitude and Phase Modulation Optical Fibre Transmission Systems*. 2006.
10. **Binh, Le Nguyen** *A SIMULINK Model for Simulation of Optical Communication Systems: Part I Single Channel Transmission*. 2004.
11. **Binh, Le Nguyen.** *An Optical Fiber Dispersion Measurement Technique and System*. 2005.
12. **Binh, Le Nguyen.** *DPSK RZ Modulation Formats Generated From Dual Drive Electro-phonic Modulators*. 2006.
13. **Binh, Le Nguyen.** *DWDM ADVANCED OPTICAL COMMUNICATION - Part V: Long-haul ASK and DPSK Simulink Modeling and Experimental Demonstration Test-Beds*. 2005.
14. **Binh, Le Nguyen.** *DWDM Optically Amplified Transmission Systems - SIMULINK Models and Test-Bed: Part III DPSK*. 2005.
15. **Binh, Le Nguyen.** *SIMULINK Model for Optically Amplified Transmission Systems: Part V: Linear and Nonlinear Fiber Propagation Models*. 2005.
16. **Binh, Le Nguyen.** *SIMULINK Models for Advanced Optical Communications: Part IV-DQPSK Modulation Format*. 2005.
17. **Binh, Le Nguyen.** *Raman optically amplified MSK multi-span transmission systems: simulation*. 2007.
18. <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialpassiva/pagina2.asp> [accessado: Junho 08, 2012].



19. **Agrawal, Govind.** *Fiber-Optic Communication Systems*. s.l. : John Wiley & Sons Inc, 2002.
20. **Rieznik, Andrés Aníbal.** Modelagem da propagação não linear em fibras ópticas: sistemas de transmissão de dados e amplificadores paramétricos. *Tese de Doutorado*, Instituto de Física Gleb Wataghin, Universidade Estadual de Campinas, 2008.
21. **Keiser, Gerd.** *Optical Fiber Communications*. McGraw-Hill : s.n., 2000.

## ANEXOS

Neste anexo são apresentados os arquivos de inicialização dos parâmetros e o algoritmo utilizado para realizar o SSFM. Os parâmetros foram ajustados para os testes realizados neste trabalho.

### ANEXO 1- ALGORITMO SSFM

```
function output = ssprop_matlabfunction_modified(input)

nt=input(1);
u0=input(2:nt+1);
dt=input(nt+2);
dz=input(nt+3);
nz=input(nt+4);
alpha_indB=input(nt+5);
betap=input(nt+6:nt+9);
gamma=input(nt+10);
P_non_thres=input(nt+11);
maxiter=input(nt+12);
tol=input(nt+13);

%-----
% Original author: Thomas E. Murphy (tem@alum.mit.edu)
% Adapted and modified by Thanh Liem Huynh (thanh.huynh@eng.monash.edu.au)
%-----
% This function solves the nonlinear Schrodinger equation for
% pulse propagation in an optical fiber using the split-step
% Fourier method described in:
%
% Agrawal, Govind. Nonlinear Fiber Optics, 2nd ed. Academic
% Press, 1995, Chapter 2
%
% The following effects are included in the model: group velocity
% dispersion (GVD), higher order dispersion, loss, and self-phase
% modulation (gamma).

% USAGE

% u1 = ssprop(u0,dt,dz,nz,alpha,betap,gamma);

% u1 = ssprop(u0,dt,dz,nz,alpha,betap,gamma,maxiter);

% u1 = ssprop(u0,dt,dz,nz,alpha,betap,gamma,maxiter,tol);

% INPUT
```

```

% u0 - starting field amplitude (vector)

% dt - time step - [in ps]

% dz - propagation stepsize - [in km]

% nz - number of steps to take, ie, ztotal = dz*nz

% alpha - power loss coefficient [in dB/km], need to convert to linear to have  $P=P_0*\exp(-\alpha*z)$ 

% betap - dispersion polynomial coefs, [beta_0 ... beta_m] [in  $\text{ps}^{(m-1)}/\text{km}$ ]

% gamma - nonlinearity coefficient [in  $(\text{km}^{-1}.\text{W}^{-1})$ ]

% maxiter - max number of iterations (default = 4)

% tol - convergence tolerance (default = 1e-5)

% OUTPUT

% u1 - field at the output

%-----

% Convert alpha_indB to alpha in linear domain

%-----

alpha = 1e-3*log(10)*alpha_indB/10;           % alpha (1/km) - see Agrawal p57

ntt = length(u0);

w = 2*pi*[(0:ntt/2-1),(-ntt/2:-1)]/(dt*nt);
clear halfstep

halfstep = -alpha/2;

for ii = 0:length(betap)-1;

    halfstep = halfstep - (j*betap(ii+1)*(w.^ii))/factorial(ii);

end

clear LinearOperator

% Linear Operator in Split Step method

LinearOperator = halfstep;

halfstep = exp(halfstep*dz/2);

```

```

u1 = u0;

ufft = fft(u0);

% Nonlinear operator will be added if the peak power is greater than the
% Nonlinear threshold

iz = 0;

while (iz < nz) && (max((abs(u1).^2+abs(u0).^2)) > P_non_thres)

    iz = iz+1;

    uhalf = ifft(halfstep.*ufft);

    for ii = 1:maxiter,

        uv = uhalf .* exp(-1i*gamma*(abs(u1).^2 + abs(u0).^2)*dz/2);

        ufft = halfstep.*fft(uv);

        uv = ifft(ufft);

        if (max(uv-u1)/max(u1) < tol)

            u1 = uv;

            break;

        else

            u1 = uv;

        end
    end

    if (ii == maxiter)

        % warning(fprintf( 'Failed to converge to %f in %d iterations',tol,maxiter));

    end

    u0 = u1;

end

if (iz < nz) && (max((abs(u1).^2 + abs(u0).^2)) < P_non_thres)    ufft = fft(u1);

    ufft = ufft.*exp(LinearOperator*(nz-iz)*dz);

```

```

    u1 = ifft(ufft);
end
output = u1;

```

## ANEXO 2- INICIALIZACAO DOS PARAMETROS

% Initialization m-file: SMF\_Q\_Initialisation\_ssprop\_Slunit.m

```
close all
```

```
clear all
```

```
% CONSTANTS
```

```
c = 3e8; % speed of light (m/s)
```

```
% NUMERICAL PARAMETERS
```

```
numbitspersymbol = 1;
```

```
P0 = 0.001; % peak power (W)
```

```
FWHM = 25e-12 ; % pulse width FWHM (ps)
```

```
FWHMps = 25e-12;
```

```
halfwidth = FWHM ; % for square pulse
```

```
bitrate = 1/halfwidth; % THz
```

```
bitrateG = 1/FWHMps;
```

```
baudrate = bitrate/numbitspersymbol;
```

```
signalbandwidth = baudrate;
```

```
%%%%%%%%%
```

```
PRBSlength = 2^6;
```

```
num_samplesperbit = 32; % should be 2^n
```

```
dt = FWHMps/num_samplesperbit ; % sampling time(ps); % time step (ps) -> 7.83e-13
```

```

nt = PRBSlength*num_samplesperbit;          % FFT length--> 64, nt 2048

dz = 500;                                    % distance stepsize (m)

nz = 100;                                    % number of z-steps

maxiter = 20;                                % max # of iterations

tol = 1e-5;                                  % error tolerance

% OPTICAL PARAMETERS

nonlinearthreshold = 0.005; % 5mW Nonlinear Threshold Peak Power for silica core fibre

lambda = 1550e-9;

optical_carrier = c/lambda;                  % carrier freq

num_samplesperperiod = 8;

sampling_fac = 16;

carrier_freq = num_samplesperperiod*num_samplesperbit*bitrateG; % artificial freq

alpha_indB = 0.2;                            % loss (dB/km)

D = 17e-6;                                   % NZDSF GVD (s/m^2); (for compensation),D is negative

ng = 0.2;                                    % group index

n2 = 2.6e-20;                                % nonlinear index (m^2/W)

Aeff = 80e-3;                                % effective area (um^2)

% CALCULATED QUANTITIES

T = nt*dt;                                  % FFT window size in sec.should be about 10-20 times of the pulse width

alpha_loss = log(10)*alpha_indB/10^4;       % alpha (1/m)

beta2 = D*lambda^2/(2*pi*c);                 % beta2 (s^2/m);

beta3 = 0.3e-39;                             % GVD slope (s^3/m)

gamma = 2*pi*n2/(lambda*Aeff);               % nonlinearity coef (m^-1.W^-1)

% STARTING FIELD

L = nz*dz ;

```

```

Lnl = 1/(P0*gamma);          % nonlinear length (m)

Ld = halfwidth^2/abs(beta2); % dispersion length (m)

N = sqrt(abs(Ld./Lnl)) ; % governing the which one is dominating: dispersion or Non-linearities

ratio_LandLd = L/Ld ;      % if L << Ld --> NO Dispersion Effect

ratio_LandLnl = L/Lnl ;    % if L << Lnl --> NO Nonlinear Effect

% Monitor the broadening of the pulse with relative the Dispersion Length

% Calculate the expected pulsewidth of the output pulse

% Eq 3.2.10 in Agrawal "Nonlinear Fiber Optics" 2001 pp67

FWHM_new = FWHM*sqrt(1+(L/Ld)^2);

% N<<1 --> GVD ; N >>1 ---> SPM

Leff = (1-exp(-alpha_loss*L))/alpha_loss;

expected_normPout = exp(-alpha_loss*2*L);

NlnPhaseshiftmax = gamma*P0*Leff ;

betap = [0 0 beta2 beta3]';

% ***** Standard Constant *****

h = 6.626068e-34;          %Plank's Constant

```