Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Elétrica Departamento de Telemática

## **SUN-SIMFO:**

## Um Ambiente Computacional para Analisar e

## Simular Componentes e Sistemas de

## Comunicação Fotônicos

Autor:Karin Marie/EnnserOrientador:Prof. Dr. Edson Moschim XCo-orientador:Prof. Dr. Rui Fragassi Souza X

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Campinas – FEE–UNICAMP, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Este exemplar corre	epondo à edação final da tese
defendida por KARin	MARIE ENNSER
WITH BOAR HIS RAY IN SUCCESSION AND A REAL AND	e tocada pela Comissão
Julgadora em 17	11 / 1993.
NQVEMBRO – 1993.	Clientador
UNICAMP BULIOTECA CENTRAL	

## Agradecimentos

Agradeço a todos os amigos, professores e funcionários da FEE que, de uma forma ou outra, me ajudaram no desenvolvimento deste trabalho. Em especial :

- O Prof. Edson Moschim e o Prof. Rui Fragassi, pela orientação;
- Miguel Rozsas, pelas dicas e sugestões na programação e por sua paciência;
- Fabio Gaion, também pela ajuda na programação e pelo constante incentivo e dedicação;
- O pessoal do DMO e DT pela amizade que proporcionou um ambiente gostoso;
- Marciano, pela colaboração na revisão lingüística e montagem desta tese;
- Aos amigos e desconhecidos, que me deram carona para vir e sair da Unicamp, particularmente, nas madrugadas e feriados;
- Kaki, pela colaboração na montagem da tese.

Este trabalho contou com o apoio financeiro da CAPES.

#### RESUMO

O objetivo deste trabalho consiste em desenvolver um ambiente computacional específico para projetar e analisar componentes e sistemas de comunicação fotônicos, utilizando-se, para isso, da técnica de simulação. A escolha da estação Sun associada com o ambiente padrão Openwindows deve-se ao fato deste proporcionar um ambiente amigável e interativo e aquela possibilitar uma maior rapidez no processamento dos dados. Vários tipos de componentes optoeletrônicos disponíveis atualmente no mercado foram introduzidos em uma biblioteca de modelos, sendo que os parâmetros destes podem ser alterados visando a otimização do sistema que se quer projetar.

### ABSTRACT

The purpose of this work is to present the development of an specific computer environment to project and to analise components and fiber optic communication systems, using a simulation technique. The choice of the Sun wokstation, which give an interactive and friendly environment, was associate with the Openwindows. Many types of photonics components, nowadays available were introduced in the library. The parameters of these components can be modified by the user in order to optimize the system configuration. In this work we present the basic components of a communication system, the implemented mathematical models and the general organization and structure of the software. The facilities provided to the user are showed and exemplified by menus and graphics.

# Conteúdo

Intro	odi	ıcão	geral
		- 30.0	8

1	Cor	nponentes básicos de um sistema de comunicação por fibra óptica
	1.1	Introdução
	1.2	Sistema de comunicação digital
	1.3	Elementos básicos do modelo
		1.3.1 Terminal Transmissor
		1.3.2 Canal
		1.3.3 Terminal Receptor
	1.4	Conclusão
	Refe	rências Bibliográficas
2	$\mathbf{E}\mathbf{st}$	rutura do SUN-SIMFO 14
	2.1	Introdução
	2.2	Características do SUN-SIMFO 15
	2.3	Estruturas para tratamento de telas
	2.4	Considerações sobre a implementação
		2.4.1 Rotinas auxiliares
		2.4.2 Esforço computacional 18
		2.4.3 Limitações
	2.5	Conclusão
	Refe	rências Bibliográficas
3	A d	escrição do ambiente SUN-SIMFO 21
	3.1	Descrição das telas e subtelas
		3.1.1 Tela principal
		3.1.2 Opção Arquivo
		3.1.3 Opção Componente
		3.1.4 Opção Configurador
		3.1.5 Opção Processamento
		3.1.6 Opção Gráfico
		3.1.7 Opção Sair
		3.1.8 Opcão Copyright
		31.9 Opcão Aiuda
	3.2	Conclusão
		SD

1

4 A <sub>I</sub> 4.1 4.2 4.3	plicação do SUN-SIMFO         Introdução         2 Análise das características estáticas de componentes         3 Simulação sistêmica         4.3.1 Tecnologia de fibras ópticas de plástico         4.3.2 Tecnologia de fibras ópticas de sílica         Conclusão	<b>37</b> 37 42 42 42 47
Concl	lusão Geral	50
A Mo nicaçã A.1 A.2	odelamento matemático dos componentes básicos de um sistema de comu-         ão digital por fibra óptica         1 Introdução	52 52 52 53 53 53 54 58 59 59 61
A.4 A.5 Ref	A.3.4       Modelo linear em campo óptico         4       Modelo do Receptor         A.4.1       Fotodiodo         A.4.2       Pré-amplificador         A.4.3       Filtro         A.4.4       Ruído do receptor         A.4.5       Filtro         Ferências Bibliográficas	63 64 64 65 67 69 73 74
<ul> <li>B Val</li> <li>B.1</li> <li>B.2</li> <li>B.3</li> <li>B.4</li> <li>B.5</li> <li>C Dia</li> </ul>	lores típicos dos parâmetros dos modelos LED	76 76 76 77 77 79 80

ii

# Introdução geral

A tecnologia de software e hardware tem se desenvolvido rapidamente, fazendo da simulação computacional uma importante ferramenta para se projetar e avaliar o desempenho de sistemas de comunicação. Esta tecnologia tem direcionado seus esforços para alguns objetivos básicos como: desenvolvimento de modelos de simulação mais eficientes computacionalmente; aprimoramento da eficiência computacional; desenvolvimento de novas técnicas de simulação e, principalmente, a integração de simulação de enlaces com a simulação de circuitos e redes. As vantagens de se utilizar a tecnologia de simular sistemas, em vez de implementá-los fisicamente, são o baixo custo de investimento e a rapidez e eficiência na obtenção de um projeto adequado. Atualmente, poderosas estações de trabalho e computadores pessoais oferecem a possibilidade de se desenvolver ambientes de trabalho mais amigáveis, com recursos visuais e saídas gráficas de alta resolução, assim como um tempo de execução extremamente rápido que possibilita uma maior interação do usuário com o projeto.

Os programas atualmente disponíveis para simulação de sistemas de comunicação encontramse em duas categorias: com topologia fixa e com topologia variável, definida pelo usuário. Nos programas que trabalham com topologia fixa, é aprasentada a topologia do sistema a ser simulado ao usuário, que seleciona através de menus cada um dos componentes que participam na construção dos blocos que compõem o sistema. Nos programas com topologia variável, o usuário especifica a topologia do sistema a ser simulado, a partir da montagem de um diagrama de blocos, utilizando os módulos presentes em uma biblioteca de modelos, e, em seguida, seleciona os componentes que representam cada um desses blocos. Em ambos os casos, a simulação é executada após a definição dos componentes do sistema.

O trabalho aqui desenvolvido apresenta um programa de simulação concebido dentro da filosofia de topologia variável, cujo objetivo principal é funcionar como ferramenta no projeto de sistemas de comunicação por fibra óptica. Embora o ambiente concebido viabilize o projeto e a avaliação de qualquer sistema, seja ele analógico ou digital, ponto-a-ponto ou multi-ponto, assim como qualquer tipo de componente fotônico, a preocupação fundamental foi a implementação de um modelo de sistema digital ponto-a-ponto, do tipo modulação por intensidade e detecção direta.

O processo de simulação no ambiente desenvolvido pode ser definido em três fases básicas. A primeira fase consite em definir a configuração do sistema a ser simulado. Os componentes que compõem esses sistemas são escolhidos de uma biblioteca de modelos. Os valores dos parâmetros que caracterizam o modelo podem ser alterados conforme as necessidades do usuário. Para auxiliar na escolha, são oferecidas algumas opções de análise para os modelos da biblioteca. Desta forma, pode-se conhecer o comportamento do componente e, assim, variar os valores dos parâmetros a fim de ajustar as características necessárias. Através desses recursos, a escolha dos componentes ficará melhor direcionada para que o sistema gerado atue conforme as especificações desejadas. Na segunda fase, será feita a execução da simulação. O usuário é informado de possíveis erros nos dados de entrada ou na execução da tarefa. Durante a execução, são geradas as amostras do sinal no domínio do tempo e/ou freqüência e é feita uma análise das amostras. Na última etapa, são produzidas as saídas para o usuário visualizar os resultados da etapa anterior. Estes podem ser apresentados através de gráficos, diagramas de olho, tabelas, arquivos de dados, formas de onda e parâmetros de desempenho do sistema.

Para garantir uma maior flexibilidade na implementação e modificação do sistema a ser simulado, usou-se a estrutura modular com quatro subdivisões: *Biblioteca de modelos* - neste módulo estão os modelos pré-programados dos blocos funcionais do sistema de comunicação; *Configurador de simulação* - este módulo é usado para selecionar os modelos dos blocos funcionais da biblioteca e conectá-los na topologia desejada do sistema; *Gerenciador de simulação* - este módulo supervisiona a simulação dos blocos funcionais. Ele é responsável também pela geração e armazenagem de formas de onda, fluxos de bits e de eventos nos pontos desejados do sistemas; *Pós-processador* - este módulo examina os dado obtidos da simulação e é utilizado para medir o desempenho do sistema. Nesta etapa, o sistema pode ser avaliado, determinando se os seus requisitos e especificações foram cumpridos. Caso contrário, deve-se alterar a topologia e/ou os valores dos parâmetros do sistemas para adequar ao projeto desejado. Com esta orientação é possível simular cada estágio do sistema e avaliar, através de gráficos e de outras medidas, o seu desempenho. Desta forma, a interação do usuário é mais intensa com o programa.

Esta dissertação é composta por quatro capítulos, organizados de acordo com a descrição que segue. No capítulo I, apresenta-se uma introdução aos sistemas de comunicação e aos seus componentes fundamentais. Neste capítulo, descreve-se somente as propriedades básicas desses componentes. Os modelos matemáticos adotados para implementá-los, assim como os valores dos parâmetros físicos e geométricos usados nestes modelos são apresentados no anexo A e anexo B, respectivamente. No capítulo II, é apresentado uma introdução sobre o ambiente de trabalho SUN-SINFO. No capítulo III, são apresentados, com maiores detalhes, os modelos informáticos utilizados para a construção do ambiente descritos no capítulo anterior. Os fluxogramas representativos das funções oferecidas pelo ambientes são apresentados no anexo C. A título de validar o programa, o capítulo IV apresenta alguns exemplos de aplicações possíveis de serem implementados com o SUN-SINFO. Finalmente, é feito uma conclusão geral onde são apresentados sugestões para trabalhos futuros.

# Capítulo 1

# Componentes básicos de um sistema de comunicação por fibra óptica

Neste capítulo são descritos os principais elementos que compõem um sistema de comunicação por fibra óptica. O modelo adotado, como idéia básica para implementação do simulador SUN-SIMFO, considera um sistema digital ponto-a-ponto formado por um transmissor, um canal e um receptor. A partir deste modelo pode-se construir diferentes arquiteturas sistêmicas.

## 1.1 Introdução

O objetivo de um sistema de comunicação é de transmitir informação de um ponto a outro no espaço e/ou tempo, com a melhor eficiência possível. Esta eficiência geralmente é traduzida em termos de uma medida de desempenho, como por exemplo taxa de erros para sistemas digitais, ou através de outros parâmetros como custo, confiabilidade, etc. Geralmente, a informação a ser transmitida é convertida num sinal elétrico (variante no tempo) chamado de sinal mensagem, que por sua vez modula um parâmetro de uma portadora. Há duas categorias distintas de modulação da portadora: analógica e digital. No caso análogico, o sinal modulante é contínuo e assemelha-se à mensagem original. No sinal digital, o sinal modulante é discreto e, para sistemas de dois níveis, adota valores binários representados por  $\theta$ 's e 1's.

De acordo com o tipo de ligação existente entre os elementos, o sistema de comunicação pode ser dividido em dois grupos: sistema ponto-a-ponto, onde existe uma conexão individual entre um terminal transmissor e um terminal receptor; e sistemas multiponto, nos quais em uma mesma linha podem estar conectados diversos terminais. Na transmissão multiponto, onde as configurações mais comuns são o barramento, o anel e a estrela, pode-se ter uma estação enviando simultaneamente para várias outras através da mesma via ou várias estações tentando enviar uma informação ao mesmo tempo. Neste tipo de transmissão, um acoplador (passivo ou ativo) é utilizado para distribuir o sinal. A orientação do transporte da informação da origem ao destino e o gerenciamento do compartilhamento do canal são feitos através de protocolos de comunicação [1].

Embora o software SUN-SIMFO possibilite o tipo de sistema descrito acima, sua implementação foi baseada na configuração de um sistema digital ponto-a-ponto do tipo modulação por intensidade e detecção direta. Este tipo de sistema cobre, atualmente, a maior parte dos sistemas de comunicação por fibra óptica implementados fisicamente.

## 1.2 Sistema de comunicação digital

Em sistemas de comunicação por fibra óptica, a transferência da informação é feita através da modulação de um parâmetro da portadora óptica, que é enviada por uma fibra. Atualmente, a maioria dos sistemas de comunicação implementados fisicamente é do tipo incoerente, ou seja, o parâmetro modulado da portadora é a intensidade. Estes sistemas são chamados de sistemas de modulação por intensidade (IM)<sup>1</sup>. Os principais componentes deste sistema estão esquematizados na Fig. 1.1. O terminal transmissor consiste em um gerador de sinais, um codificador, um modulador, ou driver, e a fonte óptica. A luz emitida pela fonte é acoplada à fibra que conduz o sinal ao receptor<sup>2</sup>. Este sinal luminoso é recebido por um detector óptico e convertido em sinal elétrico. Este sinal, geralmente pequeno, devido a maximização do enlace, é amplificado e filtrado para eliminar interferências, ruídos e distorções, e em seguida amostrado e comparado com um limiar para a reconstrução da seqüência transmitida. A medida mais usual de avaliação de desempenho de sistema é a taxa de erros [1].

A seguir serão descritos os elementos básicos de um sistema de comunicação digital por fibra óptica e algumas propriedades importantes para a compreensão dos modelos matemáticos que apresentados no apêndice A.

## 1.3 Elementos básicos do modelo

Além dos componentes básicos descritos anteriormente, um sistema de comunicação apresenta ainda dois componentes associados ao sistema: a fonte e o destino da informação. Apresentamos a seguir uma descrição básica dos elementos necessários para o modelamento do sistema descrito anteriormente.

### **1.3.1** Terminal Transmissor

#### 1.3.1.1 Gerador de sinal

A informação introduzida no transmissor é produzida por um gerador de sinais. O conteúdo transmitido é formatado numa seqüência de sinais binários a uma determinadataxa de transmissão. Serão tratados aqui 3 tipos de seqüência: trêm de pulsos, pulso isolado e seqüência aleatória. O trêm de pulsos consiste em um seqüência alternada de 0's e 1's. O pulso isolado é formado pelo primeiro bit 1 e os demais bits 0's. A seqüência aleatória é formada por um gerador de números aleatórios. A rigor, a seqüência gerada por computador é quase aleatória, pois cada número, exceto o primeiro, depende do número anterior [2]. Portanto, um determinado valor inicial(semente) gera sempre a mesma série de números. Um gerador de números aleatórios é considerado bom se produzir uma distribuição estatisticamente uniforme, independente e reprodutível [3]. Por isso, usaram-se geradores múltiplos com média de 0,49316 usando o método da congruencialidade linear [2]. A probabilidade, na seqüência aleatória, de que o número seja zero é definido pelo usuário ao selecionar um valor entre 0 e 9. Por exemplo, se o número 4 for selecionado, 40% dos números gerados serão iguais a zero.

 $<sup>^1 \</sup>rm Nos$ sistemas coerentes, a portadora pode ser modulada em amplitude, em fase, em freqüência ou em polarização .

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Atualmente, existe a possibilidade de se utilizar amplificadores ópticos no enlace para compensar as perda: do canal.



Figura 1.1: Modelo dos principais componentes de um sistema de comunicação digital por fibra óptica ponto-a-ponto de tipo IM/DD.

#### 1.3.1.2 Codificador de linha

Para minimizar a ocorrência de longas seqüências de zeros e/ou uns e dar forma adequada à densidade espectral do sinal transmitido, usam-se os codificadores de linhas [4]. Os tipos de esquemas de codificação abordados neste trabalho são: Não Retorno a Zero(NRZ), Retorno a Zero(RZ) e Manchester. O código NRZ é simples e fácil de implementar. No bit 1, o pulso dura o período do intervalo de tempo, enquanto o bit  $\theta$  é representado pela ausência de pulso. No código RZ (50%), o pulso representando o bit 1 dura a metade do intervalo de tempo de um bit. No bit  $\theta$ , ocorre a ausência do pulso. No código Manchester, quando o bit é 1, o pulso dura a primeira metade do intervalo de tempo de um bit, enquanto que o bit  $\theta$  ocupa a segunda metade do intervalo de tempo. A Fig. 1.2, na página seguinte, ilustra os códigos descritos.

#### 1.3.1.3 Modulador ou driver

Após o codificador de linha, o sinal pode modular a freqüência de uma sub-portadora, possibilitando a multiplexagem de vários sinais (sistemas IM/SC). No caso analisado aqui, o sinal após o codificador é convertido por um driver num sinal de corrente que modula diretamente a fonte de luz.

#### 1.3.1.4 Fonte óptica

As fontes de luz utilizadas como transmissores em sistemas de comunicação por fibra óptica são basicamente junções pn em semicondutores [6]. Quando a junção é polarizada diretamente, parte da energia fornecida ao dispositivo pela corrente elétrica é emitida em forma de luz, proporcional ao sinal nã entrada do transmissor. A potência óptica emitida pela fonte de luz deve ser suficiente para sobrepor todas as perdas no sistema e produzir um sinal que possa ser detectado e amplificado no receptor.

Os lasers a semicondutor e os LEDs são as fontes de potência de luz mais apropriadas, dadas as suas características: configuração e tamanho compatíveis com as fibras; emissão de radiação nos comprimentos de onda de baixa atenuação das fibras; simplicidade de modulação direta até a faixa de GHz para o laser; facilidade de acoplamento com fibras através de conectores; largura espectral estreita (minimizando a dispersão); manutenção da potência de saída constante com o envelhecimento; baixo preço e alta confiabilidade.

Os lasers e LEDs apresentam qualidades particulares de operação e a escolha entre um ou outro está relacionada com o tipo de sistema desejado. Os parâmetros básicos de julgamento para o projeto de sistemas são: nível de potência de transmissão; sensitividade à temperatura e ao envelhecimento; tempo de resposta; resposta em freqüência; linearidade na potência de transmissão; tempo de vida e largura espectral.

O laser é uma fonte apropriada para sistemas de alta velocidade devido ao rápido tempo de resposta e a uma largura espectral estreita, podendo acoplar um alto nível de potência em fibras ópticas e apresenta um tempo de vida em temperatura ambiente entre  $10^5$  a  $10^6$  horas de operação. A grande desvantagem é a diminuição da estabilidade da potência transmitida com a elevação da temperatura e com o envelhecimento.

Em sistemas com baixa velocidade ou modulação analógica de pequeno alcance, o LED apresenta-se como a fonte mais apropriada. Sua grande vantagem está na estabilidade da potência transmitida com a temperatura e com o envelhecimento durante a sua longa vida de



Figura 1.2: Simulação da forma de onda na saída do gerador de dados. (a) NRZ. (b) RZ. (c) Código Manchester.

operação ( $10^6$  a  $10^7$  horas).

Na modelagem das fontes ópticas, as características mais importantes são a potência óptica, o espectro de radiação e a forma de onda do sinal óptico na saída do transmissor, que depende da resposta em freqüência do dispositivo.

- A potência óptica emitida pelo LED é, com uma boa aproximação, proporcional à corrente injetada, embora exista uma tendência à saturação na saída para altos níveis de potência, conforme a temperatura da junção aumenta. O comportamento do laser é mais complexo. Ele é construído de forma que, acima de uma corrente de limiar o mecanismo de geração de luz muda: a baixas correntes, a potência emitida é produzida da mesma maneira que em um LED, através de emissão espontânea. Acima do limiar, correspondendo à região de emissão estimulada, o laser atua como um oscilador.
- A radiação emitida pelo LED é incoerente e cobre um amplo espectro de comprimento de onda. No caso do laser, abaixo da corrente de limiar a radiação é produzida da mesma forma que no LED. Acima do limiar, porém, há uma mudança na característica da radiação emitida: ela se torna mais direcional, mais coerente e o espectro se torna mais estreito. Tanto a corrente de limiar quanto o espectro de radiação são sensíveis à temperatura e podem variar com as condições ambientais e altas potências.
- A resposta em freqüência de uma fonte de luz relaciona a potência emitida com a corrente injetada, modulada em freqüência no dipositivo, definindo a banda passante.

Os modelos matemáticos que caracterizam o LED e o laser são apresentados no anexo A. Para a implementação do modelo da fonte de luz, foram adotados dois critérios: Para LEDs e lasers multimodos, adotou-se o modelo linear, isto é, a relação da corrente injetada na fonte de luz e a potência óptica de saída são descritas através de uma função de transferência caracterizada pelos parâmetros físicos e geométricos da fonte de luz. Neste modelo, podemos descrever a potência óptica de saída como dada por um fator que caracteriza a eficiência de conversão eletro-óptica por uma resposta em freqüência normalizada que caracteriza a dinâmica de modulação da fonte óptica. Para diodos lasers monomodo, adotou-se o modelo não linear, descrito pelas equações de taxas que relaciona o número de elétrons injetados na região ativa do laser com o número de fótons e a fase do campo óptico gerado na saída. A partir destas equações é possível obter a potência óptica na saída do laser.

### 1.3.2 Canal

As fibras ópticas são guias de onda de forma cilíndrica fabricadas de materiais dielétricos e transparentes, cuja função é confinar e guiar energia eletromagnética na região do comprimento de onda de 0.4 a 1.6  $\mu$ m [7]. O princípio de guiamento é a reflexão interna total, obtida por uma interface entre duas regiões de índice de refração diferentes, denominadas núcleo e casca. Os materiais básicos para a fabricação de fibras são os vidros ( $S_iO_2$ ) e os plásticos (polímeros). A tecnologia de fibras ópticas em plástico oferece um menor custo, entretanto, seu desempenho é inferior ao das fibras de sílica devido às grandes perdas.

As fibras atualmente disponíveis para uso como suporte de transmissão em sistemas de comunicação são de dois tipos: multimodo, que permitem a propagação de centenas de modos através de um núcleo com diâmetro da ordem de 50 a  $1000\mu$ m; e monomodo, que possuem o diâmetro do núcleo pequeno (3 a  $10\mu$ m) e permitem a propagação de um único modo. As fibras multimodo possuem ainda uma caracterização em relação ao perfil do índice de refração, podendo ser: índice degrau, que apresenta uma distribuição do índice de refração homogênea no núcleo limitada por uma casca com índice de refração menor; e índice gradual, que apresenta uma distribuição do índice de refração não-homogênea no núcleo, decrescendo em sentido radial continuamente do núcleo até a casca, sendo constante nesta.

As principais características de transmissão das fibras ópticas são a abertura numérica, a atenuação e a dispersão. Estas características estão diretamente ligadas às propriedades do material que constitui a fibra.

- A abertura numérica de uma fibra dá a medida do ângulo de aceitação dos raios incidentes e, por conseqüência, a potência da fonte que pode ser acoplada na fibra para uma máxima transferência.
- A atenuação, que é devida à absorção e à difusão, dá a perda de potência do sinal emitido durante o percurso na fibra. A atenuação não depende somente do material do núcleo, por onde o sinal é transmitido, mas também da casca, já que no processo de reflexão interna os campos eletromagnéticos penetram na interface núcleo-casca e se estendem na casca. Se esta for de baixa qualidade irá contribuir na atenuação geral da fibra.
  - A absorção converte a energia eletromagnética guiada em calor (fótons → fónons). Dois tipos de absorção são correntemente encontrados nas fibras ópticas: a absorção intrínseca, que é inerente ao material que constitui a fibra e, portanto, não pode ser eliminada, e a absorção extrínseca, que é devida às impurezas e pode ser minimizada em função do processo de fabricação da fibra. A absorção intrínseca aparece em função dos átomos que compõem o material da fibra. Na região do ultravioleta ( $\lambda < 0.6\mu m$ ) esta absorção é devido às transições eletrônicas e na região do infravermelho ( $\lambda > 1.6\mu m$ ), assim como nos picos da região visível, é devido às vibrações harmônicas dos radicais CH, OH e NH. A absorção extrínseca ocorre devido à contaminação pelos componentes metálicos que têm uma influência na região de comprimento de onda visível, como cobre, cromo, manganês e ferro. Em geral, o nível destas contaminações é controlado no processo de fabricação e esta perda pode ser minimizada.
  - A difusão, ou espalhamento, converte parte da energia eletromagnética guiada em energia não-guiada. Dois mecanismos de difusão são importantes em uma fibra óptica: a difusão devido ao material (difusão intrínseca) e difusão devido a irregularidades na interface núcleo/casca (difusão extrínseca). A difusão intrínseca, cujo principal mecanismo é a difusão Rayleigh, é causada pela não-homogeneidade da fibra em pequena escala e à flutuação térmica do material.

As fibras ópticas apresentam uma perda suplementar independente do comprimento de onda, mas dependente do comprimento da fibra, chamada perda do guia de onda. Esta elimina os raios com ângulos próximos ao ângulo crítico e ocorre devido à fronteira entre o núcleo e a casca da fibra, podendo ser decomposta em duas partes: uma devido à absorção da interface (atenuação da interface) e outra devido às irregularidades da interface (difusão da interface). • A dispersão é um mecanismo que limita a banda passante das fibras ópticas e é devido à dispersão modal, à dispersão cromática ou material e dispersão do guia de onda. A dispersão modal ocorre em fibras multimodo e é devido à diferença nas velocidades de propagação dos modos guiados. A dispersão cromática, comum a todas as fibras, é devido à diferença de velocidade na propagação da energia eletromagnética para os diferentes comprimentos de onda emitidos pela fonte de radiação. Esta dispersão pode ser minimizada com a utilização de fontes de luz monocromáticas. A dispersão do guia de onda ocorre devido à variação da velocidade de grupo com o comprimento de onda para um modo particular.

## **1.3.3** Terminal Receptor

O ruído do receptor é importante em comunicação por fibra óptica por ser um limitador da sensibilidade do sistema. Portanto, o receptor é a parte do sistema que determina o ponto crítico do projeto. As principais fontes de ruídos estão no fotodiodo e no pré-amplificador. No fotodiodo, têm-se o ruído quântico, ruído devido à corrente de escuro e de fundo. No caso específico do APD, existe um ruído associado à natureza aleatória do mecanismo de ganho [1]. O pré-amplificador contribui principalmente com o ruído térmico na resistência de entrada e com outros oriundos dos elementos ativos que o compõe.

#### 1.3.3.1 Fotodetector

O fotodetector consiste de um fotodiodo e seus circuitos eletrônicos associados. Os fotodiodos são basicamente junções pn polarizadas reversamente em semicondutores que convertem a energia luminosa incidente sobre sua superfície em uma corrente eletrônica de forma proporcional à sua responsividade e, se for o caso, ao seu ganho de avalanche. Os dois tipos de detectores usados em sistemas de comunicação por fibras ópticas são: PIN (positive-intrinsic-negative), que não amplifica o sinal, e APD (avalanche photodetector), que produz um ganho sobre o sinal [8]. A escolha entre fotodiodos PIN ou APD é feita geralmente levando-se em conta o custo x sensitividade necessária. Para aplicações nas quais um sinal óptico de baixa potência é recebido, um fotodiodo de avalanche é normalmente usado, dado que tem uma maior sensibilidade devido ao mecanismo interno de ganho (efeito de avalanche). Os principais parâmetros dos fotodiodos são a eficiência quântica e a velocidade de resposta.

- A eficiência quântica é definida como a taxa de potência óptica absorvida por colisões de ionização na região de depleção em relação à potência incidente total e está relacionada com a quantidade de pares elétron-lacuna gerados pela irradiação, diretamente proporcional ao volume do fotodiodo irradiado. A eficiência quântica pode ser interpretada como a probabilidade de que um fóton incidente irá produzir um par elétron-lacuna.
- A velocidade de resposta é definida como a taxa que o fotodiodo pode responder a mudanças na intensidade do sinal óptico de entrada e é a medida da taxa de transmissão máxima ou largura de banda do fotodetector. A velocidade de resposta está limitada ao tempo de trânsito dos pares elétron-lacuna fotogerados: quanto maior o volume irradiado, maior o tempo gasto no percurso destes pares e, por conseqüência, menor a velocidade

de resposta do fotodiodo. Existe, assim, um compromisso entre a eficiência quântica e a velocidade de resposta dos fotodiodos.

#### 1.3.3.2 Pré-amplificador

Na maioria dos casos, o sinal na saída de um fotodiodo é fraco e geralmente requer amplificação de baixo ruído para um futuro processamento. Geralmente, o estágio de pré-amplificação apresenta um controle automático de ganho (AGC) para compensar as variações no nível de potência recebido. Assim, o circuito seguindo o fotodetector pré-amplifica e formata o sinal através de um filtro e o envia a um circuito de extração da informação [9]. O projeto do amplificador que segue o fotodiodo é de importância crítica, porque é no amplificador que as maiores fontes de ruído aparecem.

Duas configurações de pré-amplificadores são freqüentemente usadas em receptores ópticos: alta-impedância e transimpedância. O amplificador de alta-impedância apresenta uma alta resistência de entrada para reduzir o efeito do ruído térmico. Esta estrutura, porém, apresenta uma resposta em freqüência degradada, já que aumenta a impedância de baixa freqüência. A saída do detector é efetivamente integrada em uma constante de tempo e deve ser restaurada por diferenciação, atenuando os componentes de baixa freqüência do sinal e reduzindo a faixa dinâmica. A configuração de transimpedância supera a anterior através da utilização de um amplificador com realimentação negativa de baixo ruído. A maior vantagem desta configuração é a grande faixa dinâmica, resultante do mecanismo de atenuação diferente para os componentes de baixa freqüência do sinal, que são amplificados pela malha fechada no dispositivo.

O transistor menos ruidoso é o transistor a efeito de campo, FET, que controla o fluxo de corrente com um campo elétrico produzido por uma voltagem aplicada na entrada do dispositivo. A alta-impedância de entrada, associada ao seu baixo ruído e capacitância, fazem com que o FET seja mais apropriado para amplificação de sinais fotodetectados. Contudo, as propriedades superiores do FET sobre os transistores bipolares são limitadas pela sua comparativamente baixa transcondutância, restringindo o ganho. Assim, em freqüências acima de 25 MHz o transistor bipolar é mais adequado.

#### 1.3.3.3 Filtro

A função do filtro é maximizar a relação sinal/ruído, preservando as características essenciais do sinal, isolando-o de interferências, ruídos e distorções. Um filtro pode ser equalizante, quando compensa a distorção do sinal devido a características do transmissor, do canal e do receptor, ou não equalizante, quando apenas reduz a banda do ruído [7].

O filtro equalizante é formado por um circuito de compensação do efeito integrador do transmissor, do efeito dispersivo do canal, do efeito integrador do receptor e por um estágio de filtragem para dar a forma desejada de sinal equalizado e eliminar o ruído fora da faixa útil [11]. Este estágio define a banda equivalente de ruído do receptor e o formato do pulso detectado. Para pequenas dispersões no canal não existe diferença significativa no desempenho de receptores equalizantes ou não-equalizantes. Para altas dispersões, os não-equalizantes apresentam uma penalidade de potência média menor do que os equalizantes.

O tipo de filtro mais simples é o butterworth passa-baixa de n-ésima ordem, cujo circuito contém n elementos reativos (capacitores e indutores). O filtro do tipo cosseno levantado introduz mais ruído, porém é mais tolerante a rajadas e espalhamento do pulso.

### 1.3.3.4 Circuito de decisão

Em um receptor digital, a filtragem é seguida por um componente responsável por regenerar o sinal recebido. Após a amplificação, a informação de relógio é extraída do sinal e é usada para comandar um circuito amostrador/comparador, que amostra a forma de onda em algum ponto durante cada período de bit e compara com um limiar previamente definido. Se a amplitude excede o limiar estabelecido, um 1 é regenerado, se não, um 0 é assumido. Quando ocorrem erros, a forma de onda regenerada difere da originalmente transmitida.

### 1.3.3.5 Decodificador

Os pulsos regenerados requerem decodificação a fim de recuperar a forma de onda original do sinal. O tipo de codificação determina, obviamente, a forma do decodificador, que deve fazer a operação inversa do codificador.

#### 1.3.3.6 Ruído

As fontes de ruído do sistema são devidas principalmente ao ruído do fotodetector, resultante do processo de conversão fóton-elétron, e ao ruído térmico, associado com o circuito amplificador [11]. Em receptores que utilizam fotodiodos PIN ou fotodiodos APD operando a baixo ganho, o efeito do ruído balístico gerado pelo diodo no processo de fotodetecção é desprezível se comparado ao ruído térmico introduzido no estágio de amplificação. Neste caso, o ruído será praticamente independente do sinal e sua variância será relacionada à variância do ruído térmico estacionário introduzido no pré-amplificador. Em receptores que utilizam fotodiodos APD, operando com alto ganho, o ruído balístico é realçado pelo mecanismo de avalanche e se torna comparável ou maior que o ruído térmico.

## 1.4 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados de maneira descritiva os elementos básicos que compõem um sistema de transmissão digital por fibra óptica. O projeto de um sistema de comunicação envolve a análise de diversas configurações. O ponto inicial compreende geralmente algumas especificações descrevendo os objetivos do sistema e parâmetros de desempenho. Todos os componentes apresentam características que podem limitar o desempenho do sistema, portanto, é necessária uma compreensão de cada um deles antes que o projeto seja executado. No capítulo seguinte será apresentada a estrutura do simulador SUN-SIMFO.

# Referências Bibliográficas

- [1] P. Kaminow, "Photonic local networks", cap 26, optical fiber telecommunications II, editado por S. Miller e I. Kaminow, John Willey, 1988.
- [2] J. Senior, Optical Fiber Communications Principles and Practice, Prentice-Hall, 1985.
- [3] H. Schildt, C Avançado Guia do Usuário, McGraw Hill, 1989.

- [4] R. Y. Rubinstein, Simulation and the Monte Carlo Method, John Wiley&Sons, 1981.
- [5] A. F. Elrefaie et al., "Computer Simulation of Digital Ligtwave Links", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, SAC-6, pp. 94-105 (1988).
- [6] H. Kressel e J. K. Butler, Semiconductor lasers and heterojunction LEDs, Academic Press, 1977.
- [7] J. E. Midwinter, Optical fibers for transmission, Wiley-Interscience, 1979.
- [8] D. P. Schinke, R. G. Smith e A. R. Hartman, "Photodetectors", cap 3, Semiconductor devices for optical communication - Topics in applied physics, editado por H. Kressel, Springer-Verlag, 1980.
- [9] R. G. Smith e S. D. Personick, "Receiver design for optical fiber communication systems", cap 4, Semiconductor devices for optical communication - Topics in applied physics, editado por H. Kressel, Springer-Verlag, 1980.
- [10] A. B. Carlson, Communication systems An introduction to signals and noise in electrical communication, McGraw-Hill, 1986.
- [11] S. D. Personick, "Receiver design for digital fiber optical communication systems I and II", Bell Syst. Tech. J., vol 52, pp. 843-886 (1973).

# Capítulo 2

# Estrutura do SUN-SIMFO

Neste capítulo, descreve-se o ambiente de simulação SUN-SIMFO concebido a partir do modelo sistêmico descrito no capítulo anterior. Este define a configuração do sistema a ser simulado através de menus e procede a simulação que consiste em: gerar amostras do sinal que se deseje transmitir; executar operações de processamento no sinal no domínio do tempo e da freqüência em cada um dos blocos; gerar e amostrar os valores do sinal transmitido nos vários pontos selecionados; avaliar os pontos amostrados obtidos ao final da simulação e obter medidas de desempenho.

## 2.1 Introdução

O uso de recursos computacionais em sistemas de comunicação iniciou-se na década de 50. As primeiras simulações em nível de formas de onda eram processadas principalmente em computadores analógicos. Na década de 60, as simulações digitais de sistemas analógicos eram feitas com linguagens orientadas por bloco, como MIDAS, SCADS e CSMP [1]. No início da década de 70, os avanços no processamento de sinais digitais e em sistemas discretos no tempo trouxeram novas aproximações na simulação de sistemas digitais. Técnicas como FFT no domínio da freqüência e transformada Z-bilinear no domínio do tempo foram introduzidos nos softwares (SYSTID, LINK, CMSP e CHAMP) para redes de comunicação por satélite. Geralmente as simulações usavam computadores de mainframe operando no modo batch [2]. A linguagem mais utilizada é o FORTRAN(ou linguagem de alto nível) como SYSTID, para ser compilada para FORTRAN. Para o fim da década de 70, os super minicomputadores e pósprocessadores passam a ser mais usados. Na ultima década surgiriam softwares mais poderosos e com interfaces mais interativas. Alguns exemplos desses pacotes são BOSS [3], FONS[4], SCOPE[5], BLOSIM [6] e PC-SIMFO[7].

O software SUN-SIMFO é uma ferramenta computacional para análise e simulação de sistemas de comunicação digital por fibras ópticas. O objetivo principal do pacote é auxiliar o usuário na modelagem, análise e simulação de sistemas de comunicação existentes ou em esboço, permitindo visualizar de uma forma rápida e econômica situações da vida real. O SUN-SIMFO não prioriza somente efetuar cálculos e simulações de sistemas, mas também fornecer um ambiente de trabalho amigável e de fácil uso onde o usuário possa interagir intensamente. Cada modelo matemático pode ser analisado e simulado separadamente. São fornecidos valores padrões dos parâmetros dos modelos que podem ser alterados, testados e salvados em arquivos para posterior recorrência. Com isso, o projetista terá maior subsídios na escolha de cada elemento que formará o sistema de comunicação .

A Figura 2.1 apresenta, em fluxograma, a relação entre as partes modulares da estrutura do pacote de software desenvolvido.



Figura 2.1: Fluxograma de operações do pacote de software

## 2.2 Características do SUN-SIMFO

O SUN-SIMFO foi desenvolvido em uma estação de trabalho SPARC SUN (SUN workstation) com o sistema operacional SUN-OS (UNIX) e é um ambiente totalmente orientado a menus. Algumas das vantagens da estação SUN sobre os computadores pessoais são a maior velocidade de processamento computacional, maior disponibilidade de memória e sistema operacional multitarefa. Este programa foi implementado em C e Xwindows fazendo-se uso de ambiente gráfico OPENWINDOWS. Optou-se pela linguagem C por ser uma linguagem estruturada com recursos como alocação dinâmica da memória, recursão e estruturas de dados sofisticadas. Juntamente com esta linguagem, foi utilizado a programação Xwindow (Xview, Xlib, X11, Xintrinsic, etc..), que permitiu a elaboração de um ambiente gráfico com a geração de telas, menus, gráficos e uso do mouse. Este ambiente é característico do OPENWINDOWS e foi escolhido por proporcionar um ambiente amigável ao usuário e de fácil compreensão a iniciantes. A programação Xwindow é orientada a eventos. Portanto, uma ação em uma determinada janela gera um evento responsável por uma série de comandos interligando várias partes do programa. Isto facilitou a estruturação modular do software implementado.

# 2.3 Estruturas para tratamento de telas

As bibliotecas mais utilizadas do Xwindows para implementar a interface com o usuário foram o Xview e o Xlib por oferecerem funções que permitem construir programas com a interface do ambiente OPENWINDOWS. Este é composto por objetos associados que formam as telas e subtelas, sendo definido, a seguir, alguns termos que os designam para que se possa descrever a estrutura destas.

- Frame: objeto principal que representa a moldura da tela onde são associados todos os outros objetos Xwindows.
- Panel: objeto que representa o quadro da tela. Nesta área são criados os objetos de controle como *buttons*, mensagens ao usuário, área de entrada de dados. É através deste objeto que o usuário se comunica com o pacote de software.
- Button: um tipo de objeto de controle do panel. Este contém um nome circundado por uma moldura elíptica.
- Canvas: objeto que proporciona uma área de desenho.
- Menu: objeto que lista opções em sua área. Este pode estar associado a um button do panel ou ser criado através do botão direito (botão de menu) do mouse.

A estrutura principal de interface do SUN-SIMFO é um frame básico onde foram criados, sobre este, os demais objetos. Associado a este frame há um panel com buttons que chamam as subtelas do programa. Todas as subtelas contêm um panel com objetos de controle, sendo que cada uma delas representa um subframe (frame de comando) que pode conter vários objetos do tipo panel e, em alguns casos, canvas. O canvas foi criado nas subtelas para gerar gráficos e a área de desenho do configurador de sistemas de comunicação . Para os buttons marcados com um triângulo, foram criados menus oferecendo as opções relacionadas nestes. O usuário, desejando ter acesso a elas, deverá pressionar o botão à direita do mouse. Um menu pode ter outros submenus que também são indicados por triângulos. Ao clicar o botão de menu sobre uma opção do menu principal, o submenu relacionado aparecerá. Uma forma de chamar as subtelas é selecionando uma opção do menu ou um button do panel. Esta seleção é feita clicando o botão da esquerda do mouse. Há subtelas que são geradas para mostrar resultados de tarefas inicializadas por algum evento como, por exemplo, processar dados. As subtelas apresentam no canto superior esquerdo um pino, que ativado, 'prega' a subtela. Portanto, para sair de uma subtela, basta selecionar duas vezes este. Caso o pino esteja desativado, representado pelo pino inclinado, ao efetuar alguma tarefa, a subtela desaparecerá. Em geral, as subtelas não apresentam um button 'Sair', pois para sair, é só desativar o pino.

## 2.4 Considerações sobre a implementação

Nesta secção, serão levantados aspectos de implementação do SUN-SIMFO, como o esforço computacional empregado na elaboração do software e a implementação das rotinas auxiliares contendo as bibliotecas de modelos. Desta forma, o software será delineado quanto as suas características e limitações.

### 2.4.1 Rotinas auxiliares

Descreve-se aqui as funções das rotinas auxiliares que implementam os modelos matemáticos apresentados no anexo A. Para cada tipo de análise de componente, foram criados arquivos contendo as equações matemáticas relacionadas. Estes estão listados a seguir:

- 1. p.led\_pot.c : calcula a curva de potência óptica emitida pelo LED em função da corrente.
- 2. p.led\_desp.c : calcula a curva da distribuição espectral de potência do LED em função do comprimento de onda deste diodo.
- 3. p.led\_fc.c : calcula a resposta em freqüência do LED, obtendo-se assim a função de transferência deste.
- 4. p.laser\_pot.c : calcula a curva de potência óptica emitida pelo laser em função da corrente.
- 5. p.laser\_desp.c : calcula a curva da distribuição espectral de potência do laser em função do comprimento de onda deste diodo.
- 6. p.laser\_fc.c : calcula a resposta em freqüência do laser, obtendo-se assim a função de transferência deste.
- 7. p.fibra\_esp.c : calcula a curva de distribuição espectral da fibra em função do comprimento de onda da fonte.
- 8. p.fibra\_at.c : calcula as curvas de atenuação da fibra.
- 9. p.fibra\_fc.c : calcula a resposta em freqüência da fibra, obtendo-se assim a função de transferência deste.
- 10. p.foto\_fc.c : calcula a resposta em freqüência do fotodiodo, obtendo-se, assim, a função de transferência deste. Também calcula as densidades espectrais dos ruídos.
- 11. p.amp\_fc.c : calcula a resposta em freqüência do pré-amplificador, obtendo-se, assim, a função de transferência deste, e a densidade espectral dos ruídos associados.
- 12. p.filtro\_fc.c : calcula a resposta em freqüência do filtro, obtendo-se assim a função de transferência deste.

Estas rotinas geram seus resultados em arquivos que depois serão acessados para análise e simulação de componentes e sistemas.



## 2.4.2 Esforço computacional

### 2.4.2.1 Ferramentas computacionais

Para a elaboração do SUN-SIMFO, foi necessário um estudo do ambiente gráfico que forneceu recursos para elaborar uma interface amigável homem-máquina. Optou-se pelo ambiente OPENWINDOWS [8],[9] e [10], utilizando-se as bibliotecas contidas neste ambiente. Escolheu-se este ambiente pela crescente padronização, e pela sua portabilidade, uma vez que este funciona em um bom número de equipamentos diferentes. As bibliotecas mais utilizadas foram o Xview e o Xlib. O Xlib engloba o Xview e possue funções de baixo nível para elaboração de desenhos, produção de gráficos, fontes de letras e cores. O Xview é uma biblioteca montada sobre o Xlib com funções de mais alto nível que servem para tratar estruturas como frames, menus, panels, canvas e outros. Foi requerido um período de aprendizagem das bibliotecas para elaboração do software.

O SUN-SIMFO possui 1 frame principal e 49 subframes ligados ao primeiro. Cada frame possui uma rotina para criação, manipulação e ativação /desativação . Cada frame possui um panel associado. Os panels possuem as estruturas de interfaceamento com o usuário. São elas buttons, menus, campos para aquisição de dados, listas de elementos, etc. Foram criados 380 menus. Cada button contido no panel tem uma rotina que é acessada quando este é clicado através do mouse. Os campos de dados são checados e verificados quanto a sua coerência. Caso houver algum erro, uma mensagem é enviada ao usuário, alertando-o. Há também mensagens explicativas a fim de esclarecer algumas particularidades do programa, como, por exemplo, o formato de dados. A maior parte dessas mensagens são enviadas ao usuário nas barras dos rodapés dos frames. O tipo de enfoque de programação das bibliotecas do OPENWINDOWS é chamada de programação orientada a eventos. Isto porque quando um button é clicado ou um ítem de um menu é acessado, um evento é gerado e atua em um ponto do programa. Foram criados dois canvas. Estes são utilizados para gerar a tela de gráfico e para gerar a planilha de desenho do configurador de sistemas de comunicação. Esta estrutura precisa de uma rotina que providencie a apresentação dos desenhos na tela. A cada modificação, é necessário repintar todos os elementos anteriores mais o novo desenho. Para isto, é preciso manter as posições e o formato dos desenhos em estruturas de dados para fazer recorrência. O programador deve parametrizar o tamanho do canvas (altura e largura) para poder elaborar a rotina de atualização, respeitando os tamanhos dos objetos a serem desenhados sem que isto prejudique a apresentação e compreensão da tela gráfica. Esta rotina deve ser genérica tanto quanto possível para permitir um largo espectro de modificações . Por isso, as estruturas de canvas demandaram um bom tempo de trabalho.

Para efetuar a simulação do sistema de comunicação desenhado no configurador, elaborouse rotinas para checar a coerência dos elementos escolhidos. Vários tipos de funções foram feitas para atuar como um checador. Implementou-se a rotina para simular o sistema com a preocupação de se garantir maior eficiência computacional e menor tempo de processamento.

### 2.4.2.2 Dificuldades computacionais

Este ítem absorveu tempo e trabalho na implementação dos modelos. Isto porque não basta inserir as equações, é preciso verificar as rotinas implementadas e processar convenien-

temente os dados gerados por estas. Estudou-se os dados dos modelos para ajustar o melhor número de amostragens, sem que este sobrecarregasse em termos computacionais o programa.

#### 2.4.2.3 Características do programa

Serão listados alguns parâmetros que indicam o nível de computação envolvidos neste projeto:

- O programa fonte foi subdividido em 52 arquivos: 39 arquivos com rotinas (.c), 7 arquivos com definições (.h) e 6 arquivos com os valores típicos da biblioteca de modelos (.std);
- O arquivo executável tem 1,261 Kbytes;
- O programa possue 19.100 linhas de código fonte;
- Os 52 arquivos que compõem o software ocupam 513 Kbytes de espaço em disco;

Não foi calculado o tempo gasto para linkedição e compilação dos arquivos, pois estes dados dependem de quão carregada está a rede e do tipo de máquina em que se está trabalhando.

### 2.4.3 Limitações

A biblioteca de modelos contém modelos matematicamente simples e que abrangem alguns casos de sistemas. As restrições destes foram citadas no Capítulo 1. Como trata-se de uma primeira versão, voltou-se para a implementação de um ambiente computacional para, posteriormente, incluir novos modelos mais complexos e de aplicações diversas. Novos modelos provavelmente vão requerer cálculos matemáticos mais sofisticados e que consumam maior tempo de processamento. Isto terá de ser analisado e estudado para dinamizar o software. Uma forma seria utilizar outras técnicas de métodos numéricos e comparar suas eficiências. A opção Ajuda da tela principal não foi implementada. Pretende-se embutir nesta, um sumário do SUN-SIMFO esclarecendo sua estrutura e fornecendo uma ajuda ao usuário.

## 2.5 Conclusão

Neste capítulo, foram descritos as características do software SUN-SIMFO. Abordou-se as estruturas de telas, suas funções e características. Com isso, pretendeu-se dar uma visão dos recursos oferecidos pelo sistema. O levantamento de alguns aspectos de implementação mostrou a estrutura computacional e o esforço embutido neste trabalho. Este projeto não tem a pretensão de ser uma versão final, e sim, uma proposta de um ambiente computacional para simulação e análise de componentes e sistemas de comunicação.

# Referências Bibliográficas

 K.S. Shanmugan, "An Update in Software Packages for Simulations of Communication Systems (Links)", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, SAC-6, pp. 5-12 (1988).

- [2] W.H. Tranter, "Simulation of Communication System Using Personal Computers", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, SAC-6, pp. 13-23 (1988).
- [3] K.S. Shanmugan et al., "Interactive Communication System of Digital Communication Systems", in *Proc MILCOM'86*, Out. 1986, paper 36.1.
- [4] C.S. Bergstron e J.C. Palais, "Digital Fiber Optic Network Synthesis", IEEE LTS, pp. 27-33, Fev. (1992).
- [5] T. Zhang et al., "Simulator Models Lightwave Systems at Microwave Rates", in Microwaves & RF, pp. 114-119, Nov (1991).
- [6] D.G. Messerschmitt, "A Tool for Strutured Functional Simulations", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, SAC-2, No 1, pp. 137-147 (1984).
- [7] P. M. S. Lobão, "PC-SIMFO: Um Software para Simulação de Sistemas de Comunicação por Fibra Óptica", tese mestrado em engenharia elétrica, Unicamp, Campinas, 1992.
- [8] Xlib Programming Manual, O'Reilly & Associates, 1990.
- [9] Xlib Reference Manual, O'Reilly & Associates, 1990.
- [10] Xview Programming Manual, An OPEN LOOK Toolkit for X11, O'Reilly & Associates, 1990.

# Capítulo 3

# A descrição do ambiente SUN-SIMFO

Neste capítulo, o ambiente SUN-SIMFO é descrito através de suas telas e subtelas.

## 3.1 Descrição das telas e subtelas

A descrição, que será apresentada nos ítens a seguir, foram ilustradas em diagramas hierárquicos de funções do ambiente SUN-SIMFO. Estes retratam o fluxograma de funcionamento do software e seguem a estrutura do tipo *top-down*, sendo apresentados no Apêndice C

### 3.1.1 Tela principal

A tela inicial do SUN-SIMFO apresenta na barra de cabeçalho o nome do programa e na barra de rodapé contém o *copyright*. A área central é reservada para apresentar as subtelas. Logo abaixo da barra de cabeçalho, tem-se a barra de menu. Esta barra contém oito *buttons*. As opções são: Arquivo, Componente, Configurador, Processamento, Gráfico, Sair, Copyright e Ajuda. Associados aos *buttons* de Componente e Processamento, tem-se os menus e submenus alternativos.



Figura 3.1: Tela principal

## 3.1.2 Opção Arquivo

Ao selecionar-se a opção Arquivo, é apresentada uma subtela. A função desta opção é de permitir ao usuário ver arquivos e, se for o caso, modificá-los, sem abandonar o programa.

### Subtela de Arquivo

Esta tela de diálogo apresenta na sua barra de cabeçalho o nome da opção a que se refere. Na barra de menu, tem-se dois *buttons*: **Diretório** e **Imprimir**. Na área central, intitulada por "EDITOR DE TEXTO" está a janela para manuseio do texto. Associado a esta janela, há um *menu* que aparece ao acionar-se o botão esquerdo do *mouse*. Este menu fornece todas os comandos do editor de texto do OPENWINDOWS.

O button Diretório mostra o diretório corrente e os subdiretórios deste. Os subdiretorios são indicados por um triângulo que ao se apertar o botão de menu do mouse aparecerá a listagem dos arquivos contidos nele. Caso seja selecionado algum arquivo, o nome deste será escrito na barra do rodapé à esquerda.

A função do *button* Imprimir é de possibilitar a impressão de arquivos. A tela de diálogo deste *button* pede a impressora em que o usuário deseja imprimir o arquivo. É fornecido duas alternativas: 'Default' e 'Outra'. Se a escolha for a impressora default, a opção 'Default' será escrita na linha ao lado. Caso contrário, a linha ficará em branco e será solicitado ao usuário, através da mensagem "Indique o nome da impressora", que este preencha a lacuna.

Adotou-se neste software que, por default, será apresentado na lacuna do parâmetro Diretório o diretório em que está o programa.

O button Imprimir arquivo, localizado no fim deste quadro, executa a tarefa de impressão do arquivo.

	ARQVIVO	
JIF & LOFIC	> S (Imprimir)	
	6	
	Imprimir arguiyo	
None	Impressora: (v) Default	L
10 10 10 AL 10 10	Diretorio: /tmp_mnt/pome/powe/	F
	Applied to the state of the sta	
Pharma she a sec	con prot	ŀ-
CodB	(Imprimir smuther)	
C00_1		
NIDADES		1
Gerac	or de Stinel	
~.c	DAT [n, binario * n. da asostra]	
Codif	1 cador	1
~.6	lat in. binario * n. da maostra]	1
		1
Gerado	ATTICAS DOS ELEMENTOS:	1
8 0 Q L 0		
Codtfi	Cédor n - 1	
<001 g	00 - NRZ	
	THE PARTY FIM DO RELATORIO	1
		11
		1
		[]

Figura 3.2: Subtela da opção Arquivo

## 3.1.3 Opção Componente

Nesta opção, está embutida a biblioteca de modelos. Os componentes foram subdivididos em três partes e são apresentados no menu como: FONTE, FIBRA e RECEPTOR.

É importante frisar que os dados das telas COMPONENTE devem estar preenchidos, pois são utilizados nos cálculos de análise e simulação do componente.

A fonte luminosa está subdividida em LED e laser, que podem ser escolhidos através do submenu.

### Subtela do COMPONENTE - LED

O menu do button Arquivo oferece a opção de carregar e salvar arquivos com os parâmetros do componente LED. Para cada função, tem uma subtela para ler o diretório e o nome do arquivo.

O menu do *button* **Tipo** apresenta os tipos de LEDs segundo o comprimento de onda de emissão. Os valores são 570nm, 650nm, 850nm e 1300nm. Ao selecionar um tipo, são carregados os valores típicos dos parâmetros listados na janela.

O menu do *button* Análise mostra os tipos de análise disponíveis da fonte LED. Estas são indicadas por: Potência, Dist. Espectral e Resp. em freqüência. Para cada uma dessas análises, há uma subtela relacionada descrita a seguir:

- Potência: a tela de diálogo apresenta o *button* Gráfico. Ao ser selecionado, será gerado um arquivo com os dados da curva de potência versus corrente, que é traçada numa tela gráfica. À esquerda do rodapé da tela gráfica, encontra-se o nome do arquivo gerado.
- Dist. Espectral: a tela de diálogo apresenta o *button* Gráfico que, selecionado, gera a curva de distribuição espectral da fonte LED. É pedido ao usuário um parâmetro para traçar a curva. Caso este não o fornecer ou atribuir um valor incoerente, aparecerá a mensagem "Dado incorreto!" no rodapé da janela, alertando-o. O nome do arquivo gerado encontra-se no rodapé da tela gráfica.
- Resp. em freqüência: a tela de diálogo não precisa de nenhum parâmetro a mais para apresentar o gráfico, além das características do LED escolhido. Possui um button Gráfico que gera o arquivo complexo denominado 'led.trf' e a curva da resposta em freqüência do módulo dos valores deste arquivo. Neste caso, o nome do arquivo apresentado no rodapé da tela gráfica é referente ao arquivo gerado com os valores em módulo.

A tela de diálogo do button Simulação apresenta os parâmetros necessários para simular o LED, sendo que o tipo de sinal de entrada do dispositivo pode ser escolhido. Caso optar-se por 'Randômica', o ítem Prob( bit='0') será ativado. Isto porque este dado é pertinente somente nesta escolha. A potência emitida pela fonte pode ser no domínio da freqüência ou do tempo. O button Execute aciona a simulação da fonte LED. Após a execução, são mostrados os arquivos gerados dos sinais numa janela. O button Mostra Gráfico plota o arquivo indicado pelo número do ítem.



Figura 3.3: Subtelas da opção COMPONENTE - LED

COMPONENTE - LASER	1
(Arguivo V) (Tipo V) (Analise V) (Simulaceo)	
Tipo de Lesor: <u>1550</u> Comprimonte de onde (nm): <u>1550</u>	Сत्वगळ
Corrents de lissier (mA): <u>10</u> Tempo de vida des pertadores (ma): <u>3</u>	
Tamps de vida dos fotons (ps): 2 Largura espoctral (mm): 1	Parametro da Curva de Dist. Espectral de Lasas
Temps de recombinação radiativa (ns): <u>0,5</u> Temps de recomb, nas radiativa (ns): <u>5</u>	Corrente Injstada (mA):
Eficiencia de injecao (8-1); <u>1</u> Indice de refracas do semicondutor: <u>3.52</u>	
Fater de perdas (1/m): <u>3.5e3</u> Reflectancia des espelhos: <u>0.32</u>	Resposta em frequencia do Laser
Dimensae de laser (mitrem.): <u>300</u> Temperatura (K): <u>300</u>	Cerrente de pre-polarizacao(mA):
<b>1</b>	

Figura 3.4: Subtela do COMPONENTE-LASER

### Subtela do COMPONENTE-LASER

O menu do *button* Arquivo possui as mesmas funções descritas na subtela do COMPO-NENTE - LED.

O menu do button Tipo apresenta os tipos de lasers segundo o comprimento de onda de emissão. Os valores são 670nm, 850nm, 1300nm e 1550nm. Ao selecionar um tipo, são carregados os valores típicos dos parâmetros listados na janela.

O menu do button Análise mostra os tipos de análise disponíveis da fonte lasers, que são os mesmos do LED.

- Potência: a tela de diálogo apresenta o *button* Gráfico e se comporta como no caso do LED.
- Dist. Espectral: a tela de diálogo apresenta o button Gráfico e também pede um dado para traçar a curva. Seu funcionamento é o mesmo do caso LED.
- Resp. em freqüência: neste caso, a tela de diálogo precisa de dois parâmetros. Possui um button Gráfico que gera o arquivo complexo denominado 'laser.trf' e a curva da resposta em freqüência do módulo dos valores deste arquivo. Neste caso também, o nome do arquivo apresentado no rodapé da tela gráfica é referente ao arquivo gerado com os valores em módulo, que é caracterizado pelo nome do arquivo com extensão trocada por '.mod'.

A tela de diálogo do *button* Simulação apresenta os mesmos parâmetros necessários para a simulação do LED. A janela com os nomes dos arquivos gerados é a mesma do LED.

Parametros da Simulacao do Laser
Execute
Corrente de pre-polarizacao(mA):
Corrente de modulacao(mA):
Sequencia de entrada: 🔽 Pulso
Prob( bit='0'): (· (· · · ]
Taxa de bits (Mbits/s):
Resposta no Dominio: Tempo Frequencia

Figura 3.5: Subtelas da opção COMPONENTE- LASER

## Subtela do COMPONENTE - FIBRA

O menu do *button* Arquivo possui as mesmas funções descritas na subtela do COMPO-NENTE - LED. O comprimento da fibra não é considerado um parâmetro característico da fibra, e sim, um dado desta.

O menu do *button* **Tipo** apresenta os tipos de fibras: monomodo, multimodo degrau plástico, multimodo degrau PCS, multimodo degrau sílica, multimodo gradual PCS e multimodo gradual

sílica. Ao selecionar um tipo, são carregados os valores típicos dos parâmetros listados na janela, exceto o comprimento da fibra.

O menu do *button* Análise mostra os tipos de análise disponíveis da fibra que são: Espectro, Curva de atenuação e Resp. em freqüência. As telas de diálogo são descritas a seguir:

- Espectro: O menu do button Gráfico desta subtela oferece opções de traçar o espectro de entrada e o espectro de saída da fibra.
- Curva de atenuação: o tipo de curva de atenuação pode ser escolhido para ser traçado pelo *button* Gráfico. A descrição de cada tipo de atenuação está no capítulo 1. Os tipos são:
  - Atenuação experimental: representa a soma de todas as atenuações: perda devido ao espalhamento Rayleigh, absorção do ultra-violeta e do infra-vermelho, absorção devido a impurezas e a perda por guia de onda.
  - Atenuação teórica: representa a soma de todas as atenuações exceto a atenuação por absorção devido a impurezas.
  - Atenuação por Rayleigh: representa a perda devido ao espalhamento Rayleigh.
  - Atenuação por absorção: representa a perda devido a absorção do ultra-violeta e do infra-vermelho.
- Resp. em freqüência: para gerar a resposta em freqüência da fibra são necessários dados da fonte. A eficiência de acoplamento da fibra é apresentada à direita no rodapé da tela de diálogo. O *button* Gráfico gera o arquivo complexo e o arquivo com os valores em módulo para traçar o gráfico.

A tela de diálogo do *button* Simulação apresenta os parâmetros necessários para a simulação da fibra. A janela com os nomes dos arquivos gerados é uma tela padrão e igual para LEDs, lasers e fibras. Esta tela por ser uma janela para apresentação de resultados, só aparecerá ao simular um desses componentes citados.



Figura 3.6: Subtelas da opção COMPONENTE - FIBRA

#### Subtela do COMPONENTE - RECEPTOR

A rigor, o receptor não é um componente, mas um conjunto. No caso, está se referindo aos componentes da "frente de entrada" do receptor óptico composto pelo fotodiodo, préamplificador e filtro.

O button Tipo de Componentes apresenta as telas de diálogo de cada componente. Ao escolher um tipo de componente, este ativa a linha correspondente na janela COMPONENTE-RECEPTOR. Portanto, por exemplo, se o fotodiodo selecionado na tela de diálogo COM-PONENTE-FOTODIODO for PIN, na tela do receptor aparecerá em negrito a frase 'Tipo de fotodiodo' e na lacuna o nome 'PIN'.

As telas de diálogo de cada componente possui um button Arquivo e um Tipo. O button Arquivo oferece as funções de carregar e salvar. Cada função pede o diretório e o nome do arquivo. O leitor pode observar que este tipo de button possui as mesmas características das outras subtelas da opção Componente da tela principal. Procurou-se normalizar para facilitar a aprendizagem e utilização pelo usuário.

As telas de diálogo dos componentes do receptor estão denominadas como:

- COMPONENTE-FOTODIODO: os tipos oferecidos de fotodiodo são: PIN e APD.
- COMPONENTE PRÉ-AMPLIFICADOR: o menu do button Tipo apresenta as opções: Trans-Z bipolar, Trans-Z FET, Alta-Z bipolar e Alta-Z FET. O termo 'Trans-Z' simboliza transimpedância e o termo 'Alta-Z' representa alta-impedância. Conforme o tipo selecionado, alguns parâmetros são desativados. Isto porque os modelos apresentam características peculiares a cada tipo de pré-amplificador.

 COMPONENTE-FILTRO: os tipos de filtro são de Butterworth e cosseno levantado. Neste caso, não existem valores típicos pré-estabelecidos. Mesmo assim, são introduzidos valores nas lacunas que podem ser alterados.



Figura 3.7: Subtelas da opção COMPONENTE - RECEPTOR, FOTODIODO, PRÉ-AMPLIFICADOR e FILTRO

Após a escolha dos tipos de componentes, pode-se analisar ou simular o receptor. Caso o usuário selecione o *button* Análise ou Simulação, a mensagem 'Escolha os componentes do receptor!' no rodapé alertará da necessidade de se indicar o tipo de cada componente, caso já não o tenha feito.

O menu do *button* Análise oferece a análise Resp.em freqüência. A tela de diálogo desta opção é apenas o *button* Gráfico que providenciará a geração do arquivo de dados e do gráfico da curva de resposta em freqüência do receptor.

A tela de diálogo do *button* Simulação apresenta os parâmetros necessários. No caso do parâmetro Ganho médio de avalanche, este só será ativado quando um fotodiodo APD for escolhido. O *button* Execute, após realizar a simulação do receptor, ativará a tela de resultados com os arquivos gerados. O *button* Mostra Gráfico tem a função de traçar os valores dos arquivos referente ao ítem selecionado.

Nesta tela, foram discriminados os arquivos segundo o componente a que se refere. O ruído calculado são os do fotodiodo e do pré-amplificador.



Figura 3.8: Subtelas da opção COMPONENTE - RECEPTOR

## 3.1.4 Opção Configurador

A subtela da opção Configurador apresenta na barra de menu as opções: Projeto, Insere, Move, Apaga, Grade, Parâmetros, Simula e Sair. A área central é a região para desenho do esquemático do projeto do sistema de comunicação. À esquerda da barra do rodapé, aparecem mensagens explicativas referente ao *button* selecionado. No lado direito do rodapé, está o nome do projeto. Caso não for nomeado, aparecerá a expressão 'semnome.proj'. Adotouse o termo 'componente' para indicar os componentes optoeletrônicos e o termo 'elemento' para fazer referência aos 'componentes' e ao somador.

O menu do button Projeto apresenta as seguintes funções:

- Carrega: a tela de diálogo solicita o diretório e o nome do arquivo que contêm o esquemático do projeto. A mensagem 'Arquivo \*.proj' no rodapé esclarece que o arquivo deve ter extensão '.proj'. Ao selecionar o *button* Carrega projeto, o esquemático do projeto será desenhado na área central.
- Salva: neste caso, o esquemático é salvo num arquivo com extensão '.proj' para posterior recorrência.
- Abandona: o projeto é abandonado, limpando-se a planilha de desenho da tela do configurador.

O menu do *button* Insere possui as seguintes alternativas: COMPONENTE, SOMA-DOR, LIGAÇÃO e PONTA DE PROVA. Uma vez selecionada uma destas alternativas, a função de inserir fica ativada enquanto não for trocada por outra função. Essas são descritas logo abaixo:

- COMPONENTE: o submenu associado apresenta a lista de componentes disponíveis. Estes são: Gerador de sinal, Gerador de ruído, Codificador, LED, Laser, Fibra, Fotodiodo, Pré-amplificador e Filtro. Ao escolher um dos itens, deve-se selecionar a posição na planilha e pressionar o botão esquerdo do mouse. No local, aparecerá um retângulo com o nome do tipo do componente. No canto superior esquerdo, encontra-se um número que o identificará. Os geradores apresentam um triângulo à direita, indicando que possuem apenas saída. No caso do filtro, é colocado apenas um triângulo na entrada, indicando que não possui saída para ligação com outro elemento. Esta restrição é devido ao modelo adotado em que o receptor foi modelado como um corpo conexo. Para os demais componentes, há dois triângulos, um indicando a entrada e o outro, a saída.
- SOMADOR: ao ser selecionado, deve-se indicar o local na planilha e pressionar o botão esquerdo do mouse. Este elemento é representado por um retângulo numerado conforme os componentes. Para indicar que este elemento soma a saída de dois e apenas dois elementos, foi simbolizado por dois caracteres '+' à esquerda do retângulo. A saída é indicada por um triângulo à direita do quadro. Caso o usuário queira somar mais de dois elementos, basta combinar em cascata vários somadores, formando a combinação desejada.
- PONTA DE PROVA: mostra as alternativas Tempo, Freqüência e Ambos. Estes se referem ao domínio em que se deseja o arquivo gerado na simulação de um determinado componente. Selecionando uma das alternativas, esta deve indicar o componente. Após esta operação, será desenhado um triângulo com a base inclinada na saída do componente, registrando com as letras 'T' (dom. do tempo), 'F' (dom. da freqüência) e 'TF' ( no caso de ambos os domínios) o tipo de ponta de prova.
- LIGAÇÃO: para inserir-se a ligação entre dois elementos, deve-se selecionar o elemento donde sairá o sinal e, a seguir, o elemento em que entrará o sinal. No caso de seleções impróprias, aparecerá uma mensagem à esquerda do rodapé. Um exemplo seria ligar a saída óptica do LED à entrada elétrica do pré-amplificador. Devido a incompatibilidade desta ligação, esta operação não será efetuada.

O button Move permite mudar a posição de um elemento desenhado na tela. Esta função ao ser ativada também só será desativada quando for chamada outra da subtela do configurador. Para mover um elemento, este deve ser selecionado com o botão esquerdo do *mouse* e despressionado na posição de destino. Procurou-se impedir a sobreposição de elementos através de rotinas de controle.

																					<u> </u>	ON	nc	UR.	AD	30															-	
P .	oj	<b>e</b> t <	> 4	)	C II	15.0	r o	2	• (	M	0V9	0		p∍gi	. 4	2	(0	ad		D	C	सर स	me	ros,	$\mathbf{\Sigma}$	C	imu	â.,,	$\mathbf{x}$	\$2.	$\mathcal{O}$											-
			,		2 C 2 2 2	201	M P 4 Al	ÓN DO AO	ÆN R	TE			Þ	7	•	•								• •				-	-													
•	•		^	L	P	0	4T/	۹D	EI	280	3VA	•	Þ		٠	•	• •		•	٠	·	·	÷	• •		·	: •	•	·	•	•	·		•	÷ •		۲	•	÷	•		
r	C',	Gen.	r md	iers:	٦		0.	Ce	đi	£,.	·	1.	L3		1. 23	>	7		Æ	F	iba		'n		lz.	P	wite	<b>t</b>	٦		1	Pase	-		i.	7		110		٦		
L	τ,	943 99	125.A		1		-		*		<b>g</b> 4n.	1	-	85	Đes		╉	-	T	*	tom	• '	+		┢	۰.	-	ø	╈		7.	antes de	<b>*</b> 1	a ip	1	t	2915	t i ma	-	1	•	
•	•		•	Ξ	1	•			:	•	•	•		÷	-			-	•		-	,		• .	-	-	; •	,	-	•				-					:	•		
				÷										÷			. ,	-	-				:	. ,			:				:				÷.				-			
				÷					-									÷					:												;				÷			
•	•		•	÷	•	•		•	:		•		•	÷	•			:	•	·	·	•	÷	• •	•		•			-			÷	•	1	•	•		-	• •		
	•			÷	•	•			÷					÷				;					į.		-					÷	: .				: .				1			
				ł					-					÷									-				•												-			
-	ĺ	Ĵ		÷		'	·		:		,	•		-		• •		ł	•			٣	: `		•	•		•	•	۰.		•	1	•		1	1	·	-	• •	•	
	•	•	•	:	,	٠	•	·	÷	•	,	•		÷	•			-		•			: •						·	•		~										
				;					2					:				:					2																-			
																										******	·			•••••	•••••										is.	pr

Figura 3.9: Subtelas da opção CONFIGURADOR

Q	Parametros do LED
Tipo:⊽	850nm Padrao : 🔽 SIM
Diretoria:	/tmp_mnt/home/zeus/karin/soft/projeto
Arquiro:	
Corrente d	e pre-polarizacao(0-100mA): <u>30.00</u>
Corrente d	e modulacao(mA): 50.00,
	Aplicar

Figura 3.10: Subtela do button Parâmetros do LED

O menu do *button* Apaga lista as alternativas para remoção. Estas são COMPONENTE, SOMADOR, LIGAÇÃO e PONTA DE PROVA. Cada uma se refere a um tipo de desenho que se pretende remover. Uma vez selecionada esta função, ela também permanece ativada até que outra seja selecionada. Para apagar basta selecionar o desenho a que refere a opção, exceto
no caso da ligação . Neste caso, deve-se indicar o elemento em que sai a ligação e a seguir, o que recebe esta.

O menu do *button* Grade oferece a possibilidade de colocar ou retirar a grade da planilha. Se for selecionado SIM, será desenhada a grade, no caso da seleção do ítem NÃO, a grade será retirada.

O button Parâmetros serve para discriminar as características e os parâmetros dos componentes. Ao selecionar-se um componente, a sua tela de diálogo será apresentada. Após a escolha, pode-se associar os dados ao componente, bastando para isso, pressionar o button Aplicar da tela de parâmetros deste. Após a aplicação, é acrescido, abaixo do seu nome, um termo que refere-se ao tipo de componente escolhido. Por exemplo, ao escolher a seqüência do tipo trêm de pulso para o gerador de sinal, o termo 'T. Pulsos' será desenhado no retângulo Gerador de Sinal. Assim procedendo, pode-se identificar os tipos selecionados de cada um. Feito isso, para visualizar a escolha dos valores de parâmetros dados ao componente, basta resselecionar o desenho para que a tela de diálogo seja carregada com estes dados. Para alterar, bastar modificar e reaplicar.

O parâmetro Padrão em algumas das telas de diálogo de parâmetros, refere-se aos valores típicos da biblioteca de modelos, que são apresentados nas subtelas da opção COMPONEN-TE - nome do componente. Caso não se deseje esses valores pré-estabelecidos, serão reativadas as lacunas para diretório e nome do arquivo com os dados. Este arquivo é gerado pela opção Arquivo das subtelas dos componentes da biblioteca de modelos.

A tela de diálogo do *button* Simula é para executar a simulação do projeto que é ativada pelo *button* Execute. Os arquivos gerados durante a simulação são listados no quadro abaixo do título 'Arquivos gerados'. O nome dos arquivos são montados a partir do nome do projeto acrescido de uma barra e o número do elemento a que se refere. A extensão '.dat' indica um arquivo com valores no domínio do tempo e a extensão '.frq' refere-se ao domínio da freqüência. Neste domínio, os arquivos possuem valores complexos.

Ao ressimular um mesmo projeto, os arquivos mostrados no quadro são usados na execução. Caso não se queira aproveitar estes arquivos, deve-se apagá-los do quadro. Se, por exemplo, ao alterar-se um parâmetro de um componente, ao se ressimular, os arquivos referentes a este e aos componentes ligados depois devem ser retirados da lista. Uma conseqüência imediata deste aproveitamento de arquivos gerados é a diminuição do tempo de processamento computacional em casos como quando é acrescentado um componente ou feita uma pequena modificação . Após a simulação, é possível gerar um relatório ao selecionar o *button* **Relatório**. O nome do arquivo gerado é composto pelo nome do projeto com a extensão '.relat'. Neste, são apresentados a taxa de bits, os arquivos gerados, as unidades dos valores dos arquivos e as características de cada elemento.



Figura 3.11: Subtela do button Simulação

## 3.1.5 Opção Processamento

O menu desta opção oferece quatro tipos de processamento de arquivos. São os seguintes itens: FFT, POLAR, +-%\* e INTEGRAL. As telas de diálogo são descritas a seguir:

- FFT: a função desta tela de diálogo é de executar a Transformada Rápida de Fourier de um arquivo. O método numérico empregado pela rotina é próprio apenas para números pares de valores. No caso dos arquivos gerados pelo SUN-SIMFO, estes preenchem este requisito. O nome do arquivo final desta operação é listado no rodapé desta tela.
- POLAR: na tela de diálogo, pode-se optar em calcular o módulo dos valores do arquivo e/ou a fase. Na barra de rodapé são apresentados os nomes dos arquivos gerados.
- +-%\*: Este ítem refere-se às operações matemáticas com dois arquivos. São elas: soma, subtração, multiplicação e divisão. Após processar, o nome do arquivo gerado será mostrado no rodapé desta tela.
- INTEGRAÇÃO: a função deste ítem é de calcular a integral de um arquivo com dados reais. O valor é mostrado no rodapé da tela de diálogo. Uma mensagem à esquerda avisa que o arquivo deve conter somente dados reais.



Figura 3.12: Subtela dos itens FFT e POLAR

(Arquivo)	(Componente #)	(Configurador	Processamento P	Contico)	(Cala)	
						Copyright (Aluda)
	ß	Ofersi	coss Matematicas cos	n Arquivez	J	
Operanan: 🔄 Some						
Diretories /tmp_met/home/zeus/iarin/soft/projeto_						
	3. Ary slug:					
	Diretorie: /tmp_mnt/home/zeus/karin/soft/projeto					
	2. Angelve:					
		Pro	0C8152)		1	
	L	······································				
		8		) mize	-	1
		Dim	eterio: /tmp_mat/bon	e/zeus/karin/	oft/projeta	
		An	quivo:			
				Processe		
		LAD	inceo: arquivo deve cont	er numeros rei	121	

Figura 3.13: Subtela dos itens +-%\* e INTEGRAÇÃO

Os arquivos gerados pelo SUN-SIMFO são dispostos no seguinte formato na primeira coluna estão os dados do eixo x, na segunda coluna, os valores reais e na terceira, os valores imaginários.

#### 3.1.6 Opção Gráfico

A subtela desta opção oferece na sua barra de menu os seguintes ítens: Arquivo, Modo, Grade, Precisão, Escala, Título e Imprimir. A área central é a região de desenho. À esquerda da barra de rodapé, é apresentado o nome do arquivo e, caso sejam traçado dois arquivos, o nome do outro arquivo será apresentado à direita desta barra.

Esta subtela foi elaborada usando as bibliotecas Xlib e XView. Não foi utilizado nenhum pacote pronto para traçar gráficos. Isto foi feito para tornar o SUN-SIMFO mais auto-suficiente. A seguir, será apresentado a descrição de cada *button* da barra de menu.

- Arquivo: a tela de diálogo oferece a possibilidade de carregar um ou dois arquivos para traçar. Caso o arquivo de dados contiver valores complexos, a parte imaginária será ignorada, pois só são traçados gráficos bidimensionais. Sugere-se que os arquivos complexos sejam processados na opção PROCESSAMENTO POLAR e convertido em um arquivo com valores em módulo. No caso de dois arquivos serem traçados, apresenta-se logo acima da barra de rodapé uma pequena legenda dos tipos de linhas utilizados para traçar os arquivos. A indicação '1', refere-se ao arquivo à esquerda do rodapé e a indicação '2', para o arquivo à direita.
- Modo: o menu indica os modos gráficos disponíveis. Estes são:
  - LINEAR-LINEAR: os dados carregados são apresentados em um gráfico de escala linear no eixo x e y.
  - LINEAR-LOG: os dados são traçados com escala do eixo x em logaritmo e a escala do eixo y, linear.
  - LOG-LINEAR: os dados são traçados com eixo linear em x e em logaritmo em y.
  - LOG-LOG: os dados são traçados em escala di-log.
  - dB-LOG: os dados são convertidos para valores em dB no eixo y e logaritmo no eixo x.
  - DIAG. OLHO: é gerado, a partir dos dados, um diagrama de olho com o tamanho de um pulso e meio.
- Grade: oferece a opção de incluir ou não a grade no gráfico.
- Precisão: pode-se mudar o número de algarismos após a virgula dos eixos x e y, que variam de 0 a 5.
- Escala: a tela de diálogo apresenta os números de mínimo e máximo dos eixo x e y. O button Automático executa a operação, conforme os valores dos dados carregados. O button Refazer retraçará os dados segundo os valores introduzidos nas lacunas desta subtela.
- Título: a tela de diálogo apresenta lacunas para carregar ou alterar os nomes do título do eixo x e y e o título do gráfico.

• Imprimir: ao selecionar, é ativado o programa SNAPSHOT oferecido pelo OPENWIN-DOWS. Este permite salvar e imprimir a tela gráfica.



Figura 3.14: Subtela da opção GRÁFICO

#### 3.1.7 Opção Sair

Opção para abadonar o programa SUN-SIMFO. Este apresenta uma tela pedindo confirmação .

## 3.1.8 Opção Copyright

Indica as informações sobre os direitos autorais.

## 3.1.9 Opção Ajuda

Esta opção é destinada a apresentar um sumário, descrevendo o funcionamento do SUN-SIMFO.

## 3.2 Conclusão

O objetivo deste capítulo foi de mostrar o projeto implementado. Através da apresentação das telas e subtelas, foram descritas as funções oferecidas e o funcionamento do software.

# Capítulo 4 Aplicação do SUN-SIMFO

Neste capítulo, serão apresentados alguns exemplos de utilização do SUN-SIMFO. Dois tipos de situações são apresentados: uma na qual as características estáticas dos componentes fotônicos para compor o sistema de comunicação são avaliadas e outra que apresenta o comportamento da transmissão de um sinal por um sistema especificado.

## 4.1 Introdução

Uma das maiores vantagens do SUN-SIMFO é permitir a simulação de diferentes configurações sistêmicas com grande simplicidade, possibitando a comparação entre elas e auxiliando na escolha da mais adequada. Outra vantagem, é que o usuário tem à sua disposição, alguns parâmetros de desempenho que podem ser utilizados para analisar componentes individuais.

## 4.2 Análise das características estáticas de componentes

O SUN-SIMFO permite além de simulação de componentes e sistemas, a possibilidade de avaliação das características estáticas de componentes individuais. Vários tipos de análise de desempenho são oferecidos, podendo o usuário determinar os parâmetros e projetar um novo componente através da verificação do desempenho deste.

Para os transmissores ópticos, estão disponíveis as opções de análise de potência emitida, a distribuição espectral e a resposta em freqüência. A figura 4.1 ilustra essas análises para um LED de 650nm.



Figura 4.1: Características estáticas de um LED emitindo em 650nm.(a) Potência emitida. (b) Distribuição espectral. (c) Resposta em freqüência.

Foram obtidos, também, as curvas das características estáticas para um laser. A figura 4.2 mostra a curva de potência emitida do laser de 850nm, a distribuição espectral e a resposta de freqüência.



Figura 4.2: Características estáticas de um laser emitindo em 850nm. (a) Potência emitida do laser. (b) Distribuição espectral. (c) Resposta em freqüência.

As opções de análise de fibra são a resposta em freqüência, as curvas de atenuação e o espectro na sua saída. A figura 4.3 apresenta a resposta em freqüência de uma fibra monomodo no comprimento de 5km, supondo uma fonte óptica do tipo laser de 850nm emitindo na entrada desta. Também é mostrada a distribuição espectral óptica da fonte, assim como sua curva de atenuação.





4.3: Características estáticas de um fibra monomodo de 5km. (a) Resposta em cia. (b) Espectro de saída. (c) Curva de atenuação .

análise do receptor pode ser feita através da resposta em freqüência deste. Esta depende remalmente do filtro em questão. O filtro tipo butterworth varia de ordem e banda A figura 4.4 apresenta a resposta em freqüência do receptor para filtro butterworth anda passante de 100MHz e o filtro de cosseno levantado com fator de ocupação uesma taxa.

di Chu







Figura 4.4: Resposta em freqüência do receptor. (a) filtro butterworth de ordem 3. (b) filtro cosseno levantado

## 4.3 Simulação sistêmica

Nesta seção, serão apresentados exemplos de duas tecnologias de fibras ópticas usadas: a tecnologia de fibras ópticas de plástico e a tecnologia de fibras ópticas de sílica. Também será realizada uma comparação das vantagens e desvantagens de cada uma dessas tecnologia.

### 4.3.1 Tecnologia de fibras ópticas de plástico

Um dos parâmetros de avaliação de um sistema é, além das características de desempenho, o custo dos componentes. Dependendo das especificações do sistema desejado, a tecnologia de fibras ópticas de plástico apresenta resultados satisfatórios a baixos custos. Uma opção ecônomica seria usar um LED de 650nm como fonte óptica, uma fibra multimodo de plástico como canal transmissor e um receptor formado por um fotodiodo do tipo PIN, um pré-amplificador de transimpedância com transistor FET e um filtro tipo Butterworth.

A fibra plástica não é apropriada para sistemas de longas distâncias devido à sua alta perda, sendo utilizada, no entanto, para sistemas de curtas distâncias devido ao seu baixo custo, pois, neste caso, as perdas não são tão significativas. Um exemplo de configuração usando componentes de menor custo é especificado a seguir:

#### Configuração com fibra plástica

- Fonte óptica: LED 650nm
- Canal: Fibra multimodo de plástico
- Receptor: Fotodiodo PIN Pré-amplificador de transimpedância com transistor FET Filtro tipo butterworth de ordem 2 não equalizante

O comprimento da fibra utilizado foi de 100m. A fonte LED de 650nm foi considerado como tendo com uma corrente de modulação de 20mA e uma corrente de pré-polarização de 20mA. O ganho do pré-amplificador adotado foi de 10. As taxas de simulação para o processamento foram de 1, 5 e 10Mbit/s. Observou-se que à medida em que se aumentou o valor da taxa, o diagrama de olho foi fechando, mostrando que para taxas superiores a perda da qualidade de transmissão é significativa. Isto pode ser verificado na figura 4.5. Nas figuras 4.6, 4.7 e 4.8, são mostrados as respectivas formas de onda no tempo em alguns pontos especificados. Observamos que o sinal recebido apresenta erros à medida em que se aumenta a taxa. Esta configuração é adequada para enlaces de curtas distâncias à baixa taxa de transmissão.

DIAGRAMA de DLHO ( taxa = 1 Mbit/s)



DIACRAMA de OLHO (taxa = 5Mbit/s)



#### DIACRAMA de OLHO (taxa = 10Mbit/s)



Figura 4.5: Diagrama de olho. (a) taxa = 1Mbit/s. (b) taxa = 5Mbit/s. (c) taxa = 10Mbit/s



Figura 4.6: Sinal em diversos pontos da configuração com fibra plástica para taxa = 1Mbit/s.



Figura 4.7: Sinal em diversos pontos da configuração com fibra plástica para taxa = 5Mbit/s.



Figura 4.8: Sinal em diversos pontos da configuração com fibra plástica para taxa = 10 Mbit/s.

## 4.3.2 Tecnologia de fibras ópticas de sílica

A tecnologia de fibras ópticas de sílica não se limita a baixas taxas de transmissão e a pequenas distâncias. A configuração especificada a seguir apresenta os componentes utilizados para ilustrar esta tecnologia.

#### Configuração com fibra sílica

- Fonte óptica: Laser 1300nm
- Canal: Fibra monomodo
- Receptor: Fotodiodo APD Pré-amplificador de transimpedância com transistor FET Filtro tipo butterworth de ordem 3

As formas de ondas geradas em diversos pontos por esta configuração estão apresentadas na figura 4.9. Neste caso, utilizaram-se 10km de fibra monomodo. Foi aplicado uma corrente de pré-polarização 50% acima do limiar e uma corrente de modulação de 20mA. O fotodiodo APD foi escolhido por proporcionar uma amplificação no sinal óptico recebido, sendo seu ganho de 10 e o ganho do pré-amplificador de 20.

Este sistema foi simulado a uma taxa de 100Mbit/s. Percebe-se a presença marcante do ruído no sinal de saída do pré-amplificador. Este é filtrado a seguir pelo filtro, diminuindo na saída deste sistema.

Inúmeras configurações de sistemas de comunicação usando a tecnologia de fibra de sílica podem ser analisadas. Vários tipos de fibras de sílica estão disponíveis ao projetista. Optou-se por um exemplo ilustrativo para mostrar o potencial do SUN-SIMFO.



Figura 4.9: Sinal em diversos pontos da configuração com fibra monomodo.

## Conclusão Geral

Neste trabalho, apresentou-se a implementação de um ambiente computacional para projetar e simular componentes e sistemas de comunicação fotônicos, cujas vantagens principais em relação aos demais softwares similares são: proporcionar um ambiente de trabalho amigável e interativo, capaz de fornecer resultados com rapidez e eficiência na análise e projeto de sistemas de comunicação por fibra óptica, possibilitando uma otimização dos componentes e do sistema projetado com poucas interações . Para uma obtenção de uma maior rapidez no processamento de dados e de uma maior memória disponível, optou-se pela estação de trabalho SUN, seguindo as tendências atuais na área.

O objetivo de se desenvolver este ambiente computacional foi o de se obter uma ferramenta prática e específica para projetar e analisar sistemas de comunicação por fibra óptica, utilizandose da técnica de simulação computacional. Esta é uma tendência que está se generalizando em todas as áreas de engenharia, visto possibilitar com uma melhor relação custo e benefício no desenvolvimento tecnologico.

O mecanismo fundamental que caracteriza o funcionamento do SUN-SIMFO é a possibilidade de se avaliar o desempenho de um componente ou sistema de comunicação através de uma seqüência de amostras de sinais. Estas amostras são processadas através de blocos funcionais que caracterizam cada elemento que compõem o sistema em estudo. Cada bloco funcional representa um modelo introduzido na biblioteca de modelos. A vantagem de utilização desta estrutura é a possibilidade de expandi-la, acrescentando-se novos modelos.

Uma das concepções básicas foi desenvolver um software o mais modular possível e de fácil manuseio, para facilitar futuras modificações e melhoramentos. Este trabalho abre caminho para diversas alternativas de continuação, tais como:

- Ampliação da biblioteca de modelos através do acréscimo de novos modelos e mesmo, incluindo sistemas analógicos e híbridos.
- Implantação de novas técnicas de análise de componentes e sistemas.
- Aperfeiçoamento e inclusão de novas técnicas de simulação computacional.
- Utilização de técnicas de Inteligência Artificial para desenvolver um sistema especialista baseado em conhecimento. Isto permitirá que o simulador auxilie o usuário na escolha dos componentes ao apresentar uma base de conhecimento.

• Elaboração de um sumário que esclareça os termos utilizados e as funções de cada parte do programa numa opção de tutorial.

Por fim, a utilização deste software possibilita a capacitação de recursos humanos especializados na área de comunicação fotônica e o domínio e desenvolvimento desta tecnologia, assim como tenta preencher uma lacuna no mercado, oferecendo um produto específico na área de simulação de sistemas por fibra óptica.

## Apêndice A

## Modelamento matemático dos componentes básicos de um sistema de comunicação digital por fibra óptica

Neste anexo são apresentados os modelos matemáticos dos componentes básicos discutidos no capítulo 1. Os modelos adotados, amplamente divulgados na literatura, foram implementados de uma maneira modular que torna possível trocá-los por modelos atualizados, ou mesmo acrescentar novos modelos.

## A.1 Introdução

O sistema de comunicação implementado apresenta as seguintes características: a potência óptica da fonte é modulada em intensidade e o fotodiodo converte a potência óptica em corrente diretamente (sistemas IM/DD).

O modelamento matemático proposto para os componentes fotônicos baseia-se (com excecção do laser monomodo) no princípio da linearidade, ou seja, é possível obter uma função de transfêrencia do componente que relaciona a entrada e a saída. Em geral, o princípio da linearidade é aplicado no domínio da potência óptica. Para fibras monomodo operando com laser monomodo, optou-se pelo modelo da linearidade em campo óptico. Como todo tipo de detecção é baseado na conversão da potência óptica em corrente eletrônica (detecção direta), o campo óptico na saída da fibra monomodo é convertido em potência óptica por uma operação de extração de módulo quadrático do campo óptico.

## A.2 Modelo do Transmissor

## A.2.1 Modelo do Gerador

O gerador de sinais fornece a seqüência binária da informação que se deseja transmitir. Foram escolhidas três tipos de sinais: pulso isolado, trem de pulsos e sinal randômico. Matematicamente, o sinal na saída do gerador é definido por:

$$S(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} S_k \delta(t - kT_s)$$
(A.1)

onde:

 $S_k =$  seqüência binária na saída do gerador ( $\theta$ 's e 1's)

 $\delta(t) = \acute{\mathrm{e}}$  função de Dirac

 $T_s =$ janela de tempo

O modelo acima pode representar qualquer tipo de sinal gerado usando a seguinte decomposição :

$$S(t) = P_0 \delta(t) + \sum_{n = -\infty, n \neq 0, n = par}^{+\infty} P_n \delta(t - nT_s) + \sum_{m = -\infty, m \neq 0, m = impar}^{+\infty} P_m \delta(t - mT_s)$$
(A.2)

Se o sinal é um pulso isolado  $P_m$  e  $P_n$  são zeros. Se o simal é um trem de pulsos, a seqüência impar é zero. Se o sinal é aleatório os  $P_k$  assumem valores zero ou um aleatóriamente.

## A.2.2 Modelo do codificador

O sinal na saída do gerador passa por um codificador, cuja saída é um sinal voltagem varaindo de 0 a 5 Volts, com formato retangular, dependendo do tipo de código.

## A.2.3 Modelo do driver

O sinal na saída do codificador é convertido em uma corrente elétrica para excitar a fonte óptica. A saída do driver é dado por:

$$i_d(t) = I_0 + \sum_{k=-\infty}^{+\infty} b_k g(t + kT_s)$$
 (A.3)

onde:

 $I_0 = \text{corrente de pré-polarização (A)}$ 

$$b_k =$$
 seqüência binária na saída do codificador ( $0$ 's e 1's)

g(t) = formato do pulso na saída do codificador

 $T_s =$ janela de tempo

O formato do pulso g(t) é modelado como um sinal retangular de amplitude  $I_m$ , dado por:

$$g(t) = \begin{cases} I_m & \text{se } 0 \le t \le T, \quad T \le T_s \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

onde:

 $I_m = \text{corrente de modulação (A)}$ 

T=tempo de ocupação do pulso na janela de tempo  $T_{s}$ 

Embora a corrente de pré-polarização melhore o tempo de resposta da fonte, ela introduz uma penalidade no receptor denominada de taxa de extinção. Existe um modelo analítico que caracteriza o efeito da taxa de extinção no desempenho do sistema em termos de uma penalidade da taxa de extinção. Esta penalidade é causada pela corrente mínima não nula que gera uma potência indesejada no sinal emitido.

### A.2.4 Modelo da fonte óptica

Dois modelos são usuais para caracterizar a conversão eletro-óptica da fonte óptica: o modelo linear, que caracteriza os diodos emissores de luz e os lasers multimodo e o modelo nãolinear, que caracteriza os lasers monomodo.

#### Modelo linear da fonte

No caso do modelo linear, a conversão eletro-óptica pode ser representada por uma função de transferência a partir dos parâmetros da fonte de luz. Supôs-se que o tempo de resposta da fonte é bem menor que do circuito acionador. A potência óptica emitida pela fonte está relacionada com a corrente injetada, no domínio da freqüência, por:

$$P_e(f) = I_d(f)H_T(f) \tag{A.4}$$

onde:

 $P_e(f)$  = transformada de Fourier da potência óptica emitida (W)

 $I_d(f)$  = transformada de Fourier da corrente injetada (A)

 $H_T(f) =$ função de transferência da fonte de luz (W/A)

No domínio do tempo, a função de transferência da fonte de luz é representada por sua resposta impulsiva  $(h_T)$ .

A função de transferência da fonte de luz pode ser modelada genericamente, conforme o modelo da Fig. A.1, como um produto:

$$H_T(f) = H_T(0)H_T^*(f)$$
 (A.5)

 $H_T(0) =$ eficiência quântica da fonte de luz (W/A)

 $H_T^*(f)$  = resposta em freqüência normalizada da fonte de luz



Figura A.1: Modelo linear da fonte de luz

A resposta em freqüência normalizada do LED é dada por [8]:

1

$$H_{T}^{*}(f) = \frac{1}{1 + j(\frac{f}{f_{c}})}$$
  
$$f_{c} = \frac{1}{2\pi\tau_{r}}$$
 (A.6)

onde:

 $f_c =$ freqüência de corte (3dB óptico)

 $\tau_r = \text{tempo de recombinação radiativa (s)}$ 

A eficiência quântica é dada por [9]:

$$H_T(0) = \left(\frac{hc}{\lambda q}\right) \eta_{int} \eta_{ext} \eta_{inj} \tag{A.7}$$

onde:

 $\eta_{ext} =$ eficiência quântica externa

 $\eta_{inj}$  = eficiência de injeção de corrente

 $\eta_{int}=$ eficiência quântica interna

 $h = \text{constante} \text{ de Planck} (6,6256 \times 10^{-34} \text{ J.s})$ 

c=velocidade da luz no vácuo (2,99793  $\times\,10^8$  m/s)

 $\lambda =$ comprimento de onda (m)

$$q = \text{carga eletrônica} (1,60218 \times 10^{-19} \text{ C})$$

A equação de eficiência quântica interna está relacionada com os tempos de recombinação e é definida por:

$$\eta_{int} = \frac{\tau_{nr}}{\tau_r + \tau_{nr}} \tag{A.8}$$

 $\tau_{nr}$  = tempo de recombinação não-radiativa (s)

 $\tau_r = \text{tempo de recombinação radiativa (s)}$ 

A eficiência quântica externa relaciona o índice de refração do meio externo com o do semicondutor de que é composto o LED [10]:

$$\eta_{ext} = \left[1 - \left(\frac{n_s - n_m}{n_s + n_m}\right)^2\right] \left[1 - \cos\left(\frac{n_m}{n_s}\right)\right] \tag{A.9}$$

onde:

 $n_s =$ índice de refração do semicondutor

 $n_m =$  índice de refração do meio (ar = 1)

A resposta em freqüência normalizada do laser é dada por [12]:

$$H_{T}^{*}(f) = \frac{f_{0}^{2}}{f_{0}^{2} - 4\pi^{2}f^{2} + j\beta 2\pi f}$$

$$f_{0}^{2} = \frac{(I_{0} - I_{th})}{\tau_{sp}\tau_{ph}I_{th}}$$

$$\beta = \frac{I_{0}}{\tau_{sp}I_{th}}$$
(A.10)

onde:

 $I_{th} = \text{corrente de limiar (A)}$ 

 $I_0 = \text{corrente de pré-polarização (A)}$ 

 $\tau_{sp}$  = tempo de recombinação dos portadores (s)

 $\tau_{ph}$  = tempo de vida dos fótons (s)

 $\beta$  = freqüência de amortecimento (Hz)

 $f_0 =$ freqüência de ressonância (Hz)

Conforme já esclarecido anteriormente, a laser abaixo de um valor limiar de corrente comportase como um LED (região espontânea) e acima deste valor inicia a emissão estimulada.

Portanto, para  $I_d < I_{th}$ , a equação da eficiência quântica é a mesma que a equação (A.7) do LED.

Para a região de emissão estimulada, onde  $I_d > I_{th}$ , a equação é dada por [13]:

$$H_T(0) = \left(\frac{hc}{\lambda q}\right) \eta_{int} \eta_{ext} \left[\frac{I_d - I_{th}}{I_d}\right]$$
(A.11)

 $\eta_{int} = ext{eficiência} ext{ quântica interna do laser}$  $\eta_{ext} = ext{eficiência} ext{ quântica externa do laser}$  $I_d = ext{corrente injetada} (A)$  $I_{th} = ext{corrente de limiar} (A)$ 

A eficiência quântica interna é dada por:

$$\eta_{int} = \frac{\tau_{nr}}{\tau_r + \tau_{nr}} \tag{A.12}$$

A eficiência quântica externa é dada por [13]:

$$\eta_{ext} = \frac{\ln(\frac{1}{R_1})}{\gamma l + \ln(\frac{1}{R_1})} \tag{A.13}$$

onde:

 $R_1 =$ reflectância dos espelhos

 $\gamma = \text{coeficiente de perdas (m}^{-1})$ 

l = distância entre os espelhos na concavidade do laser (m)

#### Modelo não-linear da fonte

Neste caso, a relação entre a potência óptica emitida pela fonte e a corrente de injeção é dado pelas equações de taxa, ou seja, [14]:

$$\frac{dp}{dt} = \Gamma G(n - n_0)p - \frac{p}{\tau_p} + \frac{\beta \Gamma n}{\tau_n}$$
(A.14)

$$\frac{dn}{dt} = \frac{I(t)}{qV_a} - G(n - n_0)p - \frac{n}{\tau_n}$$
(A.15)

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{1}{2}\alpha[\Gamma v_g a_0(n-n_0) - \frac{1}{\tau_p}]$$
(A.16)

$$G = v_g a_0 (1 - \epsilon p) \tag{A.17}$$

onde p e n são as densidades de fótons e elétrons na região ativa,  $\phi$  é a fase do campo óptico,  $\Gamma$  é o fator de confinamento do modo na cavidade,  $n_0$  é a concentração de elétrons na transparência,  $\tau_p$  é o tempo de vida do fóton,  $\beta$  é a fração de emissão espontânea,  $\tau_n$  é o tempo de vida do elétron, I(t) é a corrente injetada, q é a carga eletronica,  $V_a$  é o volume da região ativa,  $\alpha$  é o fator de largura de linha,  $v_g$  é a velocidade de grupo,  $a_0$  é o coeficiente de ganho da região ativa são consideradas uniformes e o fator de largura de linha e o fator de largura de larg

#### Distribuição espectral

Foi adotado o modelo gaussiano para caracterizar a distribuição espectral. Este modelo é uma função do comprimento de onda de pico da fonte, da largura espectral e da corrente injetada [11]. Para os LEDs temos:

$$S(\lambda) = \frac{H_T(0)I_d}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp(\frac{-(\lambda - \lambda_p)^2}{2\sigma_s^2})$$
(A.18)

onde:

 $S(\lambda) = distribuição espectral de potência (W/m)$ 

 $\sigma_s = \text{largura espectral rms do LED (m)}$ 

 $\lambda_p =$ comprimento de onda de pico do LED (m)

No caso do laser, a distribuição espectral apresenta várias ondulações, com envoltória gaussiana, e é dada por [15]:

$$S(\lambda) = \frac{H_T(0)I_d}{\sigma_s\sqrt{2\pi}} \exp(\frac{-(\lambda-\lambda_p)^2}{2\sigma_s^2}) \times \sum_{k=-n}^n \frac{1}{\sigma_s'\sqrt{2\pi}} \exp(\frac{-(\lambda-k\lambda_p)^2}{2{\sigma_s'}^2})$$
$$\sigma_s' = \sigma_s/10$$
(A.19)

onde:

 $S(\lambda) = distribuição espectral de potência (W/m)$ 

 $\sigma_s =$ largura espectral rms do laser (m)

 $\lambda_p =$ comprimento de onda de pico do laser (m)

## A.3 Modelo do canal

Assim como a fonte luminosa, a fibra também apresenta dois modelos apropriados: um modelo linear em potência óptica [16] e um modelo linear em campo óptico. Em ambos os casos podemos representar a fibra por uma função de transferência do tipo:

$$H_F(f) = \eta_F H_F(0) H_F^*(f)$$
 (A.20)

onde:

 $\eta_F = ext{eficiência} ext{ de acoplamento}$ 

 $H_F(0) =$ fator de atenuação

 $H_F^\ast(f)=\mathrm{resposta}$ em freqüência normalizada da fibra

A função de transferência da fibra foi subdividida em três partes. Este modelo considera a potência óptica emitida pela fonte óptica. Isto permite variar o efeito de acoplamento no desempenho do sistema variando o parâmetro  $\eta_F$ .



Figura A.2: Modelo genérico para fibra óptica

## A.3.1 Eficiência do acoplamento

Define-se como eficiência de acoplamento a relação entre potência óptica acoplada à fibra  $(P_a)$  e a potência emitida pela fonte  $(P_e)$  [17]:

$$\eta_F = \frac{P_a}{P_e} = 1 - (1 - AN^2)^{\frac{m+1}{2}}$$
(A.21)

onde:

AN = abertura numérica

m = fator dependente da configuração geométrica da fonte óptica

A abertura numérica é obtida pela relação dos índices de refração do núcleo e da casca:

$$AN = \sqrt{n_n^2 - n_c^2} \tag{A.22}$$

onde:

 $n_n =$ índice de refração do núcleo

 $n_c =$ índice de refração da casca

Em termos dos parâmetros do sistema, tem-se:

$$\eta_F = 1 - \left(1 - n_c^2 + n_n^2\right)^{\frac{m+1}{2}} \tag{A.23}$$

## A.3.2 Fator de atenuação

O fator de atenuação é função da atenuação total da fibra, da distribuição espectral da fonte e do comprimento da fibra. Seu valor médio é definido por:

$$H_F(0) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} S(\lambda) 10^{-\frac{A(\lambda)L}{10}} d\lambda}{H_T(0)I_d}$$
(A.24)

onde:

 $S(\lambda) = distribuição espectral de potência (W/m)$ 

 $A(\lambda) = \operatorname{atenuação} \operatorname{da fibra} (\mathrm{dB/km})$ 

L =comprimento da fibra (km)

A atenuação total é a soma de várias perdas e é dada por:

$$A(\lambda) = A_{abs}(\lambda) + A_R(\lambda) + A_{gd} \tag{A.25}$$

onde:

 $A_{abs} = \text{perda devido à absorção (dB/km)}$ 

 $A_R$  = perda devido ao espalhamento Rayleigh (dB/km)

 $A_{gd}$  = perda devido ao guia de onda (dB/km)

A atenuação devido à absorção é subdividida em três partes:

$$A_{abs}(\lambda) = A_{uv}(\lambda) + A_{ir}(\lambda) + A_{imp}(\lambda)$$
(A.26)

onde:

 $A_{uv}$  = absorção do ultra-violeta

 $A_{ir} = absorção do infra-vermelho$ 

 $A_{imp} = absorção devido a impurezas$ 

Essas perdas são expressas pelas seguintes equações [18]:

$$A_{uv} = A \exp\left(B/\lambda\right) \tag{A.27}$$

$$A_{ir} = C \exp(-D\lambda) \tag{A.28}$$

$$A_{imp} = \sum_{n=1}^{k} a_n \lambda^n \tag{A.29}$$

onde os parâmetros  $a_n, A, B, C \in D$  são característicos do tipo de fibra usado. Esses valores são listados no Apêndice A.

A perda devido o espalhamento de Rayleigh é descrita por:

$$A_R(dB/km) = K\lambda^{-4} \tag{A.30}$$

onde:

 $K = \acute{\mathrm{e}}$  o coeficiente de espalhamento (dB/km. $\mu m^{-4}$ )

A perda do guia de onda é formada pela perda por absorção e por difusão da interface núcleo/casca da fibra. A absorção é independente do comprimento da fibra e é representada por uma constante de absorção. A difusão é dependente do comprimento da fibra. Estas perdas são ajustadas pela expressão [6]:

$$A_{gd} = [E + F \exp(-G \times 10^{-3}L)]A_g \tag{A.31}$$

L =comprimento da fibra (km)

 $A_g$  = atenuação da interface núcleo/casca (dB/km)

Os valores E, F e G dependem da fibra utilizada e são apresentados no Apêndice A.

## A.3.3 Modelo linear em potência óptica

Neste caso, a fibra óptica pode ser representada por uma função de transferência que caracteriza a propagação da potência óptica. Relacionando a potência de entrada e a de saída no domínio da freqüência tem-se:

$$P_r(f) = P_e(f)H_F(f) \tag{A.32}$$

onde:

 $P_r(f)$  = transformada de Fourier da potência óptica na saída da fibra (W)

 $P_e(f) = \text{transformada}$  de Fourier da potência óptica na entrada da fibra (W)

 $H_F(f) =$ função de transferência da fibra

A resposta em freqüência normalizada da fibra é caracterizada por um filtro passa-baixa [12]:

$$H_F^*(f) = \frac{1}{1 + j\sqrt{3\frac{f}{R}}}$$
(A.33)

onde:

B =largura de faixa de 3dB (MHz)

Há dois fatores que limitam a largura de faixa de 3dB que são: dispersão modal e a dispersão romática [6], [15], [23]:

$$B_{1} = \left[\sqrt{\frac{1}{B_{0}^{2}}l^{2\gamma}}\right]^{-1}$$
(A.34)

$$B_2 = \left[\sqrt{\left(\frac{10^{-6}D\sigma_s}{0,44}\right)^2 l^2}\right]^{-1} \tag{A.35}$$

$$B = B_1 + B_2 \tag{A.36}$$

onde:

 $B_1 =$ parcela relativa à dispersão modal

 $B_2 =$  parcela relativa à dispersão cromática

 $B_0$  = produto largura de banda x distância devido à dispersão modal (MHz.km)

 $\gamma = fator de concatenação (0,7 a 1)$ 

D = dispersão cromática da fibra óptica (ps/nm.km)

 $\sigma_s =$ largura espectral da fonte (nm)

l = comprimento da fibra (km)

No cálculo da largura de faixa da fibra monomodo, leva-se apenas em consideração a dispersão cromática. No caso da fibra multimodo de plástico, despreza-se a dispersão cromática e apenas a parcela relativa à dispersão modal é calculada.

Por aproximações analíticas [4], a dispersão cromática é dada por:

$$D = 10^{15} \frac{S}{c} \frac{(\lambda - \lambda_0)}{\lambda^2} \tag{A.37}$$

onde:

S = constante do material (0,047 para sílica)

c = velocidade da luz no vácuo

 $\lambda_0 = \text{comprimento}$  de onda de mínima dispersão cromática (1312 nm para sílica)

 $\lambda = \text{comprimento de onda (nm)}$ 

Conforme o perfil de índice de refração da fibra, o valor do produto largura de banda x distância é calculado,

para Fibra degrau, por:

$$B_0 = \frac{c}{AN^2} n_n \cdot 10^{-9} \tag{A.38}$$

para Fibra gradual, por:

$$B_0 = \frac{2c}{AN^4} n_n^3 .10^{-9} \tag{A.39}$$

onde:

AN = abertura númerica  $n_n$  = índice do núcleo

#### A.3.4 Modelo linear em campo óptico

A função de transferência de uma fibra óptica, com relação a um campo óptico propagante, é dada por [24]:

$$H(\omega) = exp[-\gamma(\omega)Z]$$
(A.40)

onde:

$$\gamma(\omega) = \alpha(\omega) + j\beta(\omega) \tag{A.41}$$

onde  $\gamma(\omega)$  é a constante de propagação ,  $\alpha(\omega)$  é a constante de atenuação e  $\beta(\omega)$  é a constante de fase. Zamorano et al. demonstrou que os efeitos de  $\beta$  que podem ser analisados através de uma expansão em série e que no caso de regime de propagação linear o termo mais importante da série é a dispersão da velocidade de grupo (GVD), o qual expressa-se através dos parâmetros físicos da fibra. Deste modo, tem-se:

$$\frac{1}{2}\frac{\partial^2\beta}{\partial\omega^2} = \frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial\omega^2}(\frac{\partial\beta}{\partial\omega}) \tag{A.42}$$

sendo que, por definição:

$$\frac{\partial \beta}{\partial \omega} \equiv \frac{1}{v_g} \tag{A.43}$$

onde  $v_g$  é a velocidade de grupo, e também:

$$\frac{\partial}{\partial\lambda}(\frac{1}{v_g}) \equiv D \tag{A.44}$$

onde D é o coeficiente de dispersão da fibra dado em ps/nm/km. Dado que  $\lambda = 2\pi c/\omega$ , o termo "GVD é expresso por:

$$\frac{1}{2}\frac{\partial^2\beta}{\partial\omega^2} = -\frac{\lambda^2 D}{4\pi c} \tag{A.45}$$

que substituída na equação A.40, e sem considerar o termo de atenuação , permite obter a função de transferência de uma fibra de comprimento z = L:

$$H(\omega) = exp[j\frac{\lambda^2 D(\omega - \omega_0)^2)L}{4\pi c}]$$
(A.46)

Aplicando a transformada inversa de Fourier à equação A.46 obtém-se a resposta impulsiva de uma fibra óptica monomodo:

$$h(t) = \sqrt{\frac{1}{j2\pi\beta_2 L}} exp[-\frac{t^2}{j2\beta_2 L}]$$
(A.47)

onde  $\beta_2 = \frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2}$ 

## A.4 Modelo do Receptor

A potência óptica incide no fotodetector gerando uma corrente  $i_{PD}(t)$ . O modelo proposto descreve o fotodiodo por uma fonte de corrente em paralelo com uma capacitância  $C_d$  e um resistor de polarização  $R_p(t)$ , sendo este responsável por uma corrente de ruído térmico  $i_{Rp}(t)$ . Há outros ruídos gerados no fotodiodo: o ruído quântico que é inerente ao sinal fotodetectado e é caracterizado por uma distribuição de Poisson; o ruído de avalanche criado pelos fotodiodos de avalanche e o ruído devido à corrente de escuro proveniente da corrente inversa e radiações parasitas.

A entrada do pré-amplificador tem a resistência  $R_a$  e a capacitância  $C_a$  em paralelo. De acordo com a configuração do pré-amplificador, a resistência  $R_f$  é introduzida. No caso, modelou-se duas configurações : transimpedância e alta-impedância. A configuração de transimpedância possui uma resistência de realimentação  $(R_f)$  e no caso da alta-impedância esta é infinita. O pré-amplificador tem duas fontes de ruído térmico: a fonte de corrente  $i_a(t)$ , gerada pela resistência de entrada  $R_a$ ; e fonte de tensão  $e_a(t)$ , gerada pelo canal do amplificador. As fontes de ruído do amplificador são descritas pelas densidades espectrais do ruído,  $S_{ia}$  e  $S_{ea}$  e são consideradas como gaussianas. A resistência de realimentação, quando incorporada à configuração, gera uma fonte de ruído térmico  $i_{Rf}$ .



Figura A.3: Modelo elétrico da frente de entrada do receptor óptico

#### A.4.1 Fotodiodo

A corrente  $i_{PD}(t)$  pode ser considerada uma seqüência de impulsos correspondentes aos elétrons gerados no fotodiodo devido à incidência luminosa, à excitação térmica ou à colisão iônica [19]. Esta saída é descrita por:

$$i_{PD}(t) = \langle i_{PD}(t) \rangle + n_{PD}(t)$$
 (A.48)

onde:

 $i_{PD}(t) =$ corrente gerada pelo fotodido (A)

 $\langle i_{PD}(t) \rangle =$  valor médio estatístico da fotocorrente (A)

 $n_{PD}(t) =$ corrente ruído gerada no fotodiodo (A)

O valor médio de fotocorrente no intervalo de um bit e a responsividade dependem do tipo de fotodiodo utilizado e são dados por:

$$\langle i_{PD}(t) \rangle = RGp_{\tau}(t)$$
 (A.49)

$$R = \frac{\lambda q}{hc} \eta \tag{A.50}$$

onde:

R = responsividade do fotodiodo (A/W)

G =ganho médio de avalanche (G = 1 para fotodiodo PIN)

 $p_r(t) = \text{potência óptica recebida (W)}$ 

 $\eta$  = eficiência quântica do diodo

## A.4.2 Pré-amplificador

A saída do pré-amplificador é uma tensão composta pelo valor médio de voltagem proveniente do sinal de informação e da soma dos ruídos do fotodiodo e do pré-amplificador.

$$v_{PA}(t) = \langle v_{PA}(t) \rangle + n_{PA}(t)$$
 (A.51)

onde:

 $\langle v_{PA}(t) \rangle =$  valor médio da voltagem (V)

 $n_{PA}(t) =$  voltagem de ruído gerada pelo fotodiodo + pré-amplificador (V)

O sinal de informação está representado pelo valor médio da voltagem:

$$\langle v_{PA}(t) \rangle = \langle i_{PD}(t) \rangle * h_{PA}(t)$$
 (A.52)

onde:

 $h_{PA}(t) =$  resposta impulsiva do pré-amplificador (V/A)

No domínio da freqüência, a função de transferência que caracteriza o pré-amplificador é dada por:

$$H_{PA}(f) = H_{PA}(0)H_{PA}^{*}(f) \tag{A.53}$$

onde:

 $H_{PA}(0) =$  ganho de transimpedância do pré-amplificador

 $H_{PA}^{*}(f) =$  função de transferência normalizada do pré-amplificador

A função de transferência do pré-amplificador varia conforme a configuração utilizada e são descritas a seguir.

#### Transimpedância

O pré-amplificador de transimpedância apresenta uma função de transferência dada por [21]:

$$H_{PA}(f) = \frac{R_f}{1 + j2\pi R_f C_T f/A}$$
(A.54)

onde:

A = ganho de voltagem do pré-amplificador em malha aberta

 $R_f = \text{resistência de realimentação}(\Omega)$ 

 $C_T$  = capacitância total de entrada do pré-amplificador (F)

O valor da capacitância total de entrada é dado pela soma das capacitâncias:

$$C_T = C_d + C_a \tag{A.55}$$

onde:

 $C_a = \text{capacitância de entrada do pré-amplificador (F)}$ 

 $C_d = \text{capacitância do fotodiodo (F)}$ 

A resistência de realimentação depende da taxa de transmissão do sistema:

$$R_f = \frac{A}{2\pi C_T \times 0.8T_b} \tag{A.56}$$

onde:

 $T_b = taxa de transmissão (bit/s)$ 

#### Alta-impedância

O pré-amplificador de alta-impedância apresenta uma função de transferência dada por [21]:

$$H_{PA}(f) = \frac{AR_T}{1 + j2\pi R_T C_T f} \tag{A.57}$$

onde:

A = ganho de voltagem do pré-amplificador

 $R_T$  = Resistência total na entrada do pré-amplificador ( $\Omega$ )

A resistência total é a combinação em paralelo das resistências do pré-amplificador:

$$R_T = \frac{R_p R_a}{R_p + R_a} \tag{A.58}$$

 $R_a$  = Resistência na entrada do pré-amplificador ( $\Omega$ )

 $R_p$  = Resistência de polarização do fotodiodo ( $\Omega$ )

#### A.4.3 Filtro

No modelo aqui tratado, o filtro não é gerador de ruído. A tensão na saída dele é composta pelo valor médio de voltagem representando o sinal da informação e o ruído proveniente dos elementos anteriores da frente de entrada do receptor:

$$v_S(t) = \langle v_S(t) \rangle + n_S(t)$$
 (A.59)

onde:

 $\langle v_S(t) \rangle =$  valor médio da voltagem (V)

 $n_S(t) =$  voltagem de ruído na saída do filtro (V)

O valor médio é dado por:

$$< v_{S}(t) > = < v_{PA}(t) > *h_{R}(t)$$
  
=  $< i_{PD}(t) > *h_{PA}(t) * h_{R}(t)$   
=  $RGp_{r}(t) * h_{PA}(t) * h_{R}(t)$  (A 60)

onde:

 $h_R(t) =$ resposta impulsiva do filtro

Convertendo para o domínio de freqüência, a equação (A.60) é expressa por:

$$V_{S}(f) = \langle V_{PA} \rangle H_{R}(f)$$
  
=  $\langle I_{PD}(f) \rangle H_{PA}(f) H_{R}(f)$   
=  $RGP_{r}(f) H_{PA}(f) H_{R}(f)$  (A.61)

onde:

 $H_R(f) =$ função de transferência do filtro

Os filtros para formatação do sinal e filtragem do ruído aqui tratados são dos tipos Butterworth e cosseno levantado.

### **Tipo Butterworth**

A função de transferência deste filtro de ordem n é dada por [7]:

$$H_n(f) = \frac{1}{P_n(jf/B)} \tag{A.62}$$

B =largura de banda de 3dB

 $P_n(jf/B) =$ polinômio complexo

A família de polinômios de Butterworth segue a seguinte propriedade:

$$|P_n(jf/B)|^2 = 1 + (f/B)^{2n}$$
(A.63)

Substituindo na equação da função de transferência, o módulo passa a ser:

$$|H_n(f)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (f/B)^{2n}}}$$
(A.64)

A Tabela A.1 lista o polinômio de Butterworth para de 1 a 4, usando a variável normalizada p $={\rm jf}/{\rm B}.$ 

n	$P_n(p)$
1	1 + p
2	$1 + \sqrt{2}p + p^2$
3	$(1+p)(1+p+p^2)$
4	$(1+0,765p+p^2)(1+1,848p+p^2)$

Tabela A.1: Polinômios de Butterworth

#### Tipo Cosseno levantado

A função de transferência leva em conta o fator de ocupação de faixa ( $\alpha$ ). Assim, pode-se discriminar as funções como [19]:

Se  $\alpha = 0$ 

$$H_n(f) = \begin{cases} 1 & \text{se } 0 < f/T_b \le \frac{1}{2} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Se  $\alpha = 1$ 

$$H_n(f) = \begin{cases} 0, 5[1 - sen(\frac{\pi f/T_b}{\alpha} - \frac{\pi}{2\alpha})] & \text{se } 0 \le f/T_b \le \frac{1}{2} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$
Se  $0 < \alpha < 1$ 

$$H_n(f) = \begin{cases} 1 & \text{se } 0 < f/T_b \le \frac{1-\alpha}{2} \\ 0, 5[1 - sen(\frac{\pi f/T_b}{\alpha} - \frac{\pi}{2\alpha})] & \text{se } \frac{1-\alpha}{2} \le f/T_b \le \frac{1+\alpha}{2} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

onde:

 $\alpha$  = fator de ocupação do intervalo

 $T_b = taxa de transmissão (bit/s)$ 

O filtro pode apresentar características equalizantes ou não. Portanto, um receptor é equalizante quando a função de transferência do filtro for equalizante. Esta é descrita por:

$$H_{R}(f) = H_{T}(f)^{-1}H_{F}(f)^{-1}H_{PA}(f)^{-1}H_{n}(f)$$

$$H_{T}(f)^{-1} = H_{eq_{trans}}(f)$$

$$H_{F}(f)^{-1} = H_{eq_{fib}}(f)$$

$$H_{PA}(f)^{-1} = H_{eq_{pre}}(f)$$
(A.65)

onde:

 $H_{eq_{trans}} = {\rm função}$  de equalização do transmissor

 $H_{eq_{fib}}=$ função de equalização da fibra

 $H_{eq_{pre}}=$ função de equalização do pré-amplificador

 $H_n =$  função de formatação do sinal e eliminação do ruído

Caso contrário, a função de transferência do filtro depende somente da função de equalização do pré-amplificador e do estágio de formatação do sinal e de eliminação do ruído:

$$H_R(f) = H_{PA}(f)^{-1} H_n(f)$$
(A.66)

Neste caso, denomina-se o receptor de não equalizante.

#### A.4.4 Ruído do receptor

O ruído considerado no modelamento é o do fotodiodo e do pré-amplificador da frente de entrada do receptor óptico.

#### Ruído do filtro

A corrente de ruído total  $n_{PD}(t)$  é composta pela corrente de ruído interna do fotodiodo e pela corrente de ruído gerada pela resistência de polarização do fotodiodo. A densidade espectral do ruído é dada por: onde:

 $S_{n_{PD}} = S_{i_B} + S_{R_p} \tag{A.67}$ 

 $S_{n_{PD}}$  = densidade espectral da corrente de ruído total do fotodiodo (A<sup>2</sup>/Hz)

 $S_{i_B}$  = densidade espectral da corrente de ruído interna do fotodiodo (A<sup>2</sup>/Hz)

 $S_{R_p}$  = densidade espectral da corrente de ruído gerada pela resistência de polarização do fotodiodo (A<sup>2</sup>/Hz)

A densidade espectral da corrente de ruído interna do fotodiodo é dada por [22]:

$$S_{i_B} = 2q\{[\langle i_{PD}(t) \rangle + i_{obs_M}] \langle g^2 \rangle + i_{obs_{NM}}\}$$
(A.68)

onde:

 $i_{obs_M}$  = fotocorrente de escuro criada na região de ganho do fotodiodo (A)  $i_{obs_{NM}}$  = fotocorrente de escuro criada na superfície do fotodiodo (A)

g = ganho de avalanche

O valor quadrático médio do ganho de avalanche é aproximado por [22]:

$$\langle g^2 \rangle = G^2 F(G)$$
  
 $F(G) = G[1 - (1 - k_{ef})(\frac{G - 1}{G})^2]$  (A.69)

onde:

F(G) = fator de excesso de ruído do fotodiodo

G =ganho de avalanche médio

 $k_{ef} = taxa$  de ionização

Substituindo esta equação anterior na equação (A.68), tem-se:

$$S_{i_B} = 2q\{[\langle i_{PD}(t) \rangle + i_{obs_M}]G^2F(G) + i_{obs_{NM}}\}$$
(A.70)

O ruído associado à corrente do fotodiodo devido a resistência de polarização tem a seguinte densidade espectral dada por [21]:

$$S_{R_p} = \frac{4K_BT}{R_p} \tag{A.71}$$

onde:

 $R_p$  = resistência de polarização do fotodiodo ( $\Omega$ )

 $K_B = \text{constante} \text{ de Boltzmann} (1, 38054 \times 10^{-23} \text{ J/K})$ 

T =temperatura (K)

#### Ruído do pré-amplificador

O ruído do pré-amplificador é formado pela fonte de voltagem de ruído  $e_a$  em série e a fonte de corrente de ruído  $i_a$  em paralelo conforme já descrito em secção anterior. Este ruído é caracterizado pela distribuição espectral gaussiana.

De acordo com o transistor utilizado, FET ou bipolar, as densidades espectrais variam.

Caso FET

A resistência de entrada  $R_a$  de um típico FET é muito alta e, desta forma, pode-se considerála infinita. A resistência total passa a ser a resistência de polarização  $R_p$ . A densidade espectral da corrente de ruído  $S_{ia}$  é descrita por [21]:

$$S_{i_a} = \frac{4K_BT}{R_a} \tag{A.72}$$

A densidade espectral  $S_{ia}$  é desprezível devido à alta resistência de entrada. Portanto, a fonte de ruído básica é o ruído térmico da resistência do canal de condução, caracterizado pela transcondutância  $g_m$ .

A densidade espectral da voltagem de ruído é dada por [21]:

$$S_{e_a} = \frac{2}{3} \frac{4K_B T}{g_m} \tag{A.73}$$

onde:

 $g_m = \text{transcondutância do FET (S)}$ 

Caso Bipolar

A resistência de entrada do amplificador  $R_a$  é a combinação paralela da resistência de polarização do transistor e da resistência de entrada do transistor  $R_{in}$ . A resistência interna de entrada do bipolar é dada por:

$$R_{in} = \frac{K_B T}{q i_B} \tag{A.74}$$

onde:

 $i_B = \text{corrente} \text{ de base do transistor (A)}$ 

A densidade espectral de ruído  $S_{ia}$  é produto do ruído balístico de corrente de base e é dada por [21]:

$$S_{i_a} = \frac{4K_BT}{R_{i_n}} \tag{A.75}$$

A densidade espectral da voltagem de ruído é dada por:

$$S_{e_a} = \frac{4K_BT}{g_m} \tag{A.76}$$

A transcondutância  $g_m$  é dada por:

$$g_m = \frac{\beta}{R_{in}} \tag{A.77}$$

onde:

 $\beta$  = ganho de corrente do transistor

Quando a configuração do pré-amplificador for de transimpedância há mais uma fonte de ruído gerada pela resistência de realimentação  $R_f$ , cuja densidade espectral é dada por:

$$S_{R_f} = \frac{4K_BT}{R_f} \tag{A.78}$$

#### Ruído total

O conjunto de fontes de ruídos no receptor é representado por uma fonte total de ruído equivalente na entrada do pré-amplificador. O efeito produzido na saída por esta fonte equivalente é idêntico ao do conjunto de ruídos. A densidade espectral equivalente da corrente de ruído é dada por:

$$S(f) = S_{A} + f^{2}S_{B}$$

$$S_{A} = S_{i_{B}} + S_{R_{p}} + S_{R_{f}} + S_{i_{a}} + \frac{S_{e_{a}}}{R_{T}^{2}}$$

$$S_{B} = 2\pi C_{T}^{2}S_{e_{a}}$$
(A.79)

onde:

 $S_{i_B}$  = densidade espectral da corrente de ruído do fotodiodo (A<sup>2</sup>/Hz)

- $S_{R_p}$  = densidade espectral da corrente de ruído da resistência de polarização (A<sup>2</sup>/Hz)
- $S_{R_f}$  = densidade espectral da corrente de ruído da resistência de realimentação (se o préamplificador possui realimentação) (A<sup>2</sup>/Hz)

 $S_{i_a}$  = densidade espectral da corrente de ruído do pré-amplificador (A<sup>2</sup>/Hz)

 $S_{e_a}$  = densidade espectral da voltagem de ruído do pré-amplificador (V<sup>2</sup>/Hz)

No domínio do tempo, o ruído total do sistema na saída do filtro é dado por:

$$n_s(t) = v_B(t) + v_{th}(t)$$
 (A.80)

onde:

 $v_B(t) =$ tensão do ruído balístico

 $v_{th}(t) =$ tensão do ruído térmico

A variância de  $n_s(t)$  é dada por:

$$\langle n_{S}^{2}(t) \rangle = \langle [v_{s}(t) - \langle v_{s}(t) \rangle]^{2} \rangle$$

$$= \langle v_{s}^{2}(t) \rangle - \langle 2v_{s}(t) \langle v_{s}(t) \rangle + \langle v_{s}(t) \rangle^{2}$$

$$= \langle v_{s}^{2}(t) \rangle - \langle v_{s}(t) \rangle^{2}$$

$$= \langle v_{B}^{2}(t) \rangle + \langle v_{th}^{2}(t) \rangle$$
(A.81)

onde

 $\langle v_B^2(t) \rangle =$  variância do ruído balístico do fotodiodo

 $\langle v_{th}^2(t) \rangle =$  variância do ruído térmico do pré-amplificador

A variância do ruído total na saída do filtro,  $\langle n_S^2(t) \rangle$ , define a densidade espectral de potência deste ruído e é representada por:

$$\langle n_S^2(t) \rangle \stackrel{\Delta}{=} \int_{-\infty}^{+\infty} S(f) |H_{PA}(f)H_R(f)|^2 df$$
 (A.82)

Levando a equação (A.79) em (A.82), tem-se:

$$< n_S^2(t) > = S_A \int_{-\infty}^{+\infty} |H_{PA}H_R(f)|^2 df + S_B \int_{-\infty}^{+\infty} f^2 |H_{PA}H_R(f)|^2 df$$
 (A.83)

#### A.5 Conclusão

Neste anexo, foi apresentada a descrição matemática dos três blocos básicos de um sistema de comunicação por fibra óptica, ou seja: transmissor, canal e receptor. Cada bloco foi descrito matematicamente por uma função de transferência, que representa o efeito no sinal processado. Em geral, o modelamento assumiu a linearidade em potência óptica. Esta aproximação é válida para taxas de até Mbit/s e comprimentos de enlaces de até 20km. Para sistemas mais sofisticados, ou seja, sistemas monomodo, as equações de taxa e modelo linear em campo óptico da fibra podem ser utilizados.

#### Referências Bibliográficas

- [1] J. Senior, Optical Fiber Communications Principles and Practice, Prentice-Hall, 1985.
- [2] H. Schildt, C Avançado Guia do Usuário, McGraw Hill, 1989.
- [3] R. Y. Rubinstein, Simulation and the Monte Carlo Method, John Wiley&Sons, 1981.
- [4] A. F. Elrefaie et al., "Computer Simulation of Digital Ligtwave Links", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, SAC-6, pp. 94-105 (1988).
- [5] J. C. Palais, Fiber Optic Communications, Prentice-Hall, 1984.
- [6] E. Moschim, "Contribuition à la modélisation des composants photoniques et des systèmes de communication utilisant les fibres optiques en plastique comme support de transmission", thèse docteur en science physique, Université de Paris-Sud, Orsay, France, 1989.
- [7] A. B. Carlson, Communication systems An introduction to signals and noise in electrical communication, McGraw-Hill, 1986.
- [8] D. Gloge et al., "High-speed digital lightwave communication using LEDs and PIN photodiodes at 1.3 μm", Bell System Tech. J., vol 59, pp. 1365-1382 (1980).
- [9] M. T. Abuelma'atti, "Nonlinear distortion properties of fibre-optic analogue transceivers", Int. J. of Optoelectronics, vol 4, pp. 163-172 (1989).
- [10] A. A. Bergh e P. J. Dean, Light emitting diodes, Claredon, London, 1976.
- [11] J. Gimlett e N. Cheung, "Dispersion penalty analysis for LED/ single mode fiber transmission systems", IEEE J. Lightwave Technol., vol LT-4, pp. 1381-1392 (1986).
- [12] D. J. Channin, "Optoelectronic Performance Issues in Fiber-Optic Communications", RCA Review, vol. 46, pp. 240-269 (1985).
- [13] J. Wilson e J.F.B. Hawkes, Optoelectronics: An Introduction, Prentice-Hall, 2nd edition, 1991.
- [14] M. Zamorano e E. Moschim, "Modelamento de uma Transmissão Digital Aplicada em Sistemas de Comunicação por Fibra Óptica", 13 Simpósio Brasileiro de Telecomunicações , Natal, RN, set 1993.
- [15] P. M. S. Lobão, "PC-SIMFO: Um Software para Simulação de Sistemas de Comunicação por Fibra Óptica", tese mestrado em engenharia elétrica, Unicamp, Campinas, 1992.
- [16] S. D. Personick, "Baseband linearity and equalization in digital fiber optical communication systems", Bell Syst. Tech. J., vol 52, pp. 1175-1193 (1973).
- [17] M. K. Barnaski, "Coupling components for optical fiber waveguides", in Fundamentals of optical fiber communications, edited by M. K. Barnaski, Academic Press, 1976.
- [18] K. Inada, "A new method relating to optical fiber attenuation", Opt. Comm., vol 19, pp. 437-440 (1976).

- [19] S. D. Personick, "Receiver design for digital fiber optical communication systems I and II", Bell Syst. Tech. J., vol 52, 843-886 (1973).
- [20] G. Keiser, Optical Fiber Communications, McGraw Hill, 1983.
- [21] R. G. Smith e S. D. Personick, "Receiver design for optical fiber communication systems", in Semiconductor devices for optical communication, edited by H. Kressel, Springer-Verlag (1980).
- [22] R. J. McInyre, "The distribution of gains in uniformily multiplying avalanche photodiodes: theory", IEEE Trans. Electron. Devices, vol ED-19, pp. 703-721 (1972).
- [23] A. Moncalvo e R. Pietroiusti, "Transmission numérique sur fibres optiques", Journal des Télécommunications, vol 49-II, pp. 84-92 (1982).
- [24] P. J. Corvini and T. L. Koch, "Computer simulation of high-bit-rate optical fiber transmission using single-frequency lasers", J. Lightwave Technol., vol LT-5, 1591 (1987).

# Apêndice B Valores típicos dos parâmetros dos modelos

Neste apêndice são apresentados os valores dos parâmetros da biblioteca de modelos.

#### B.1 LED

Os parâmetros utilizados para análise e cálculo da função de transferência deste dispositivo são: comprimento de onda de pico,  $\lambda_p$ ; largura espectral,  $\sigma_s$ ; tempo de recombinação radiativa,  $\tau_r$ ; tempo de recombinação não-radiativa,  $\tau_{nr}$ ; eficiência de injeção de corrente,  $\eta_{inj}$ ; índice de refração do semicondutor,  $n_s$ ; e temperatura absoluta, T. A Tabela B.1 apresenta os valores utilizados no software para várias faixas de comprimentos de onda,  $\lambda$ .

$\lambda(\text{nm})$	$\lambda_p(\mathrm{nm})$	$\sigma_s(\mathrm{nm})$	$\tau_r(ns)$	$\tau_{nr}(ns)$	$\eta_{inj}$	$n_s$	T(K)
570	567	26	5000	375	0,9	3,33	300
650	665	35	21	80	0,93	3,67	300
850	832	50	10	40	0,95	3,62	300
1300	1310	62	$^{2,5}$	10	1	3,56	300

Tabela B.1: Parâmetros para análise de LED

#### B.2 Laser

A Tabela B.2 apresenta os valores dos seguintes parâmetros deste dispositivo: comprimento de onda de emissão do laser,  $\lambda$ ; tempo de recombinação radiativa,  $\tau_r$ ; tempo de recombinação não-radiativa,  $\tau_{nr}$ ; eficiência de injeção de corrente,  $\eta_{inj}$ ; coeficiente de perdas,  $\gamma$ ; reflectância dos espelhos, R1; distância entre os espelhos da cavidade do laser, l; corrente de limiar,  $I_{th}$ ; tempo de vida dos portadores minoritários,  $\tau_{sp}$ ; tempo de vida dos fótons,  $\tau_{ph}$ ; largura espectral,  $\sigma_s$ , e temperatura absoluta, T.

$\lambda(\text{nm})$	$\lambda_p(\text{nm})$	$\tau_r(ns)$	$\tau_{nr}(ns)$	$\eta_{inj}$	n <sub>s</sub>	$R_1$	$\gamma$ (m <sup>-1</sup> )	$l(\mu m)$
670	665	21	80	0,93	3,67	0,32	3500	300
850	832	10	40	0,95	3,62	0,32	3500	300
1300	1310	2,5	10	1	3,56	0,32	3500	300
1550	1550	0,5	5	1	3,52	0,32	3500	300

$\lambda(\mathrm{nm})$	$I_{th}(mA)$	$\tau_{sp}(ns)$	$ au_{ph}(\mathrm{ps})$	$\sigma_s(\text{nm})$	T(K)
670	50	15	6	10	300
850	35	10	2	4	300
1300	20	5	2	2	300
1550	10	3	2	1	300

Tabela B.2: Parâmetros para análise de laser

## B.3 Fibra Óptica

A Tabela B.3 apresenta os seguintes valores dos parâmetros da fibra: índice de refração do núcleo,  $n_n$ , índice de refração da casca,  $n_c$ , coeficiente de espalhamento, k, e perda devido ao guia de onda,  $A_g$ .

	$n_n$	$n_c$	k	$A_g(dB/km)$
monomodo	1,456	1,452	1,0	0,2
mult.degrau.plástico	1,5	1,4	2,75	40
mult.degrau PCS	1,456	1,4	$^{2,2}$	2,2
mult.degrau sílica	1,456	1,449	$1,\!6$	1,6
mult.gradual PCS	$1,\!456$	1,4	2,0	2,0
mult.gradual sílica	1,456	1,449	1,2	0,7

Tabela B.3: Parâmetros para cálculo da função de transferência da fibra

Os parâmetros utilizados para o cálculo da perda devido à absorção no ultra-violeta e no infra-vermelho são apresentados na Tabela B.4.

No caso da absorção devido a impurezas, os valores da aproximação polinomial dependem do tipo de fibra utilizado. As Tabelas B.5 e B.6 apresentam os valores para fibra de PCS, de sílica e de plástico.

#### B.4 Fotodiodo

A Tabela B.7 apresenta os seguintes valores dos parâmetros para fotodiodos: capacitância do fotodiodo,  $C_d$ ; corrente de escuro não multiplicativa,  $I_{obs_{NM}}$ ; corrente de escuro multiplicativa,  $I_{obs_M}$ ; eficiência quântica,  $\eta$ ; taxa de ionização,  $k_{ef}$ , e resistência de polarização,  $R_p$ .

	A	B	С	D	E	F	G
plástico	4,61e-12	11,8	0	0	0,25	0,64	20
PCS	1e-4	4,63	3,69e-8	9,855e-3	0,15	0,35	30
sílica	3e-5	4.63	3,69-8	9,855e-3	0,1	0,25	50

Tabela B.4: Valores para cálculo de absorções

	$400 \le \lambda \le 500 \; (\rm{nm})$	$500 < \lambda \leq 580 \text{ (nm)}$
al	1,69497858937164e4	7,97133762022781e4
a2	-0,0105257172256e4	-0,04642691794967e4
a3	0,00002185450686e4	0,00008987843312e4
a4	-0,00000001514705e4	-0,00000005780417e4

	$580 < \lambda \le 645 \text{ (nm)}$	$645 < \lambda \le 690 \text{ (nm)}$
al	1,57452869077286e6	1,64454018075768e6
a2	-0,00781705458246e6	-0,0073876724266e6
a3	0,00001291916674e6	0,00001105391122e6
a4	-0,00000000710691e6	-0,00000000550830e6

	$690 < \lambda \le 765 \text{ (nm)}$	$\lambda > 765 \ (nm)$
al	5,8381811754371e6	4,79629453699527e5
a2	-0,02477042022331e6	-0,01823268725733e5
a3	0,0000349733643e6	0,00002252121034e5
a4	-0,0000001642915e6	-0,00000000899032e5

Tabela B.5: Valores dos coeficientes  $a_n$  para fibra de plástico

	$400 \le \lambda \le 1250 \text{ (nm)}$	$1250 < \lambda < 1400 \text{ (nm)}$
al	-25,34740165215096	1.86492809610377e+3
a2	0,09877027136335	-0,00384829080547e+3
a3	-0,00011452586743	0,00000260063918e+3
a4	0,0000004189356	-0,0000000057198e+3

	$1400 \le \lambda \le 1600 \text{ (nm)}$
al	4,95179672780497e+03
a2	-0,00963271220680e+03
a3	0,00000624645383e+03
a4	-0,0000000135015e+03

Tabela B.6: Valores dos coeficientes  $a_n$  para fibras de PCS e de sílica

	$C_d(\mathbf{F})$	$I_{obs_{NM}}(\mathbf{A})$	$I_{obs_M}(A)$	η	k <sub>ef</sub>	$R_p(\Omega)$
PIN	5e-12	1e-11	0	$0,\!5$	0,1	1e6
APD	le-12	1e-12	1e-11	0,5	0,01	1e5

Tabela B.7: Parâmetros para cálculo do sinal na saída do fotodiodo

### B.5 Pré-amplificador

A Tabela B.8 apresenta os valores dos parâmetros deste dispositivo: transcondutância do FET, gm; resistência de entrada do transistor,  $R_a$ ; capacitância de entrada do pré-amplificador,  $C_a$ ; ganho de corrente do transistor,  $\beta$ ; corrente de base do transistor bipolar,  $i_B$ , e temperatura absoluta, T.

	gm(S)	$R_a(\Omega)$	$C_a(F)$	β	$i_B(A)$	T(K)
trans.bipolar	0	20e3	10e-12	50	5e-6	300
trans.FET	5e-3	-	5e-12	0	0	300
alta bipolar	0	20e3	10e-12	50	5e-6	300
alta FET	5e-3		5e-12	0	0	300

Tabela B.8: Parâmetros para cálculo do sinal na saída do pré-amplificador

# Apêndice C

# Diagramas hierárquicos de funções do ambiente SUN-SIMFO

Neste apêndice, são apresentados os diagramas hierárquicos seguindo a estrutura do tipo topdown.

Pretende-se com os diagramas, mostrar o fluxo de operações e funções do sistema. Um dos objetivos é de facilitar a compreensão das descrições apresentadas no capítulo 3. Um outro motivo seria de proporcionar uma referência para futuras modificações e ampliações do software.

























