



**INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO**

**LICENCIATURA EM  
ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA E DE COMPUTADORES**

**GUIA DO 2º TRABALHO DE LABORATÓRIO**

**DE**

**SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES I**

**Análise de desempenho de um sistema de  
comunicação óptica**

**Ano Lectivo de 2002/2003**



## **2º Trabalho de Laboratório: Análise de desempenho de um sistema de comunicação óptica**

### **Objectivos**

Observar, analisar e quantificar a influência de vários parâmetros do emissor, fibra óptica e receptor no desempenho de um sistema de comunicação por fibra óptica sem amplificação óptica.

### **Tempo médio da sessão de laboratório**

Cinquenta minutos.

### **Introdução**

Esta sessão utiliza

- 1) um simulador de um sistema de comunicação por fibra óptica desenvolvido em MATLAB;
- 2) um PC com relógio de 166 MHz ou superior (preferencialmente), e equipado com o software MATLAB, versão 5.3 ou posterior, para correr o simulador e mostrar os resultados da simulação.

### **Equipamento necessário**

- i) PC com ecrã, de preferência a cores, e com as características referidas anteriormente;
- ii) software MATLAB, versão 5.3 ou posterior;
- iii) simulador do sistema de comunicação por fibra óptica.

### **Montagem (software)**

Ligue o PC e, no ambiente Windows, entre no ambiente MATLAB, carregando no símbolo do MATLAB. Dentro do ambiente MATLAB, instale-se na directoria de trabalho introduzindo o comando:

```
» cd c:\trab <Enter>
```

Este comando muda a directoria de trabalho para a directoria onde estão os programas a usar. Depois, corra o simulador introduzindo o comando:

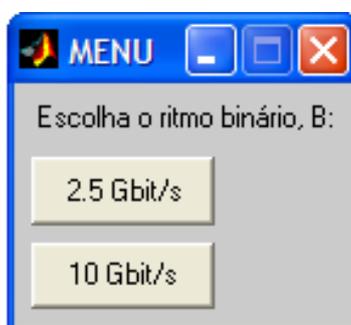
```
» co1 <Enter>
```

Nesta altura, o ecrã do PC deve apresentar a primeira das várias janelas com que o utilizador interage com o simulador. A Figura 1 mostra o aspecto da parte interactiva da primeira janela em que o utilizador tem a hipótese de escolher o débito binário do sistema, *B*. É através destas janelas que o utilizador indica os valores dos vários parâmetros que caracterizam o emissor óptico, a fibra óptica e o receptor óptico. A descrição detalhada do sistema que está a ser simulado encontra-se no Apêndice A.

Os parâmetros que o utilizador pode escolher são, por ordem de introdução no simulador:

- débito binário da ligação,  $B$ ;
- o tipo de fibra através da escolha do parâmetro de dispersão,  $D_\lambda$ ;
- o comprimento da fibra,  $L$ ;
- o tipo e ordem de filtro eléctrico do receptor;
- a largura de banda deste filtro;
- a razão de extinção imposta pelo emissor óptico,  $r_{ext}$ .

Estes parâmetros estão indicados nos rectângulos com fundo cinzento na Fig. A1, os quais apontam para o subsistema que é afectado ao escolher o parâmetro.



**Fig. 1 Primeira janela do simulador em que o utilizador escolhe o ritmo binário do sistema.**

O simulador devolve ao utilizador os seguintes resultados:

- diagramas de olho (sem ruído) normalizados, correspondentes:
  - ao campo eléctrico à saída do emissor óptico;
  - à intensidade (potência) do campo à saída da fibra;
  - à tensão de sinal à entrada do circuito de decisão;
- a curva da probabilidade de erro em função da potência óptica incidente no fotodetector PIN;
- o valor da abertura de olho normalizada,  $A_n$ , à entrada do circuito de decisão e o instante em que essa abertura se observa no diagrama de olho à entrada do circuito de decisão.

**Os parâmetros de trabalho serão fornecidos ao grupo no início da sessão de laboratório. Considere que a sensibilidade é definida para a probabilidade de erro indicada para o seu grupo de trabalho.**

## ESTUDOS A REALIZAR

### 1) Determinação da largura de banda óptima do filtro de recepção

No laboratório:

Neste ponto, considere sempre que  $L=0$  (sistema em costas-com costas) e  $r_{ext}=\infty$ .

1. Obtenha, correndo o simulador, e tome nota dos valores de sensibilidade<sup>1</sup> do sistema para larguras de banda entre  $0.4B$  e  $0.8B$  com passo de  $0.05B$ , assim como as aberturas de olho normalizadas à entrada do circuito de decisão (o valor desta abertura surge na linha de comandos com a designação de "abert\_opt\_nor" e também pode ser obtida por leitura do padrão de olho). Determine a largura de banda óptima do filtro de recepção que corresponde à máxima sensibilidade.
2. Obtenha, correndo o simulador, e tome nota da sensibilidade<sup>1</sup> para a largura de banda óptima do filtro de recepção considerando que este é um filtro de Butterworth / Bessel<sup>2</sup>.
3. Analise os padrões de olho correspondentes aos dois tipos de filtro com a largura de banda determinada no ponto 1)-1. e tome nota das principais diferenças que irá relatar no relatório do trabalho, assim como das sensibilidades e aberturas de olho normalizadas observadas com cada um.

No relatório do trabalho:

- apresente a resposta de amplitude e de atraso (até 100 GHz), em diagramas de Bode, do filtro de recepção com a largura de banda óptima;
- apresente a resposta de amplitude e de atraso do filtro, em diagramas de Bode, considerando que este é um filtro de Butterworth / Bessel<sup>2</sup> com a largura de banda óptima determinada anteriormente;
- compare as duas características e tire conclusões quanto às propriedades de distorção destes filtros;
- explique o comportamento da sensibilidade em função da largura de banda do filtro de recepção. Para tal,
  1. sobreponha, no mesmo gráfico, a sensibilidade obtida pelo simulador e a sensibilidade obtida a partir do majorante da probabilidade de erro e conclua acerca do rigor da estimativa da probabilidade de erro fornecida pelo majorante. Este majorante é obtido contabilizando a interferência inter-simbólica a partir do fecho do olho e é dado pela expressão

$$P_e = \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erfc} \left( \frac{(1-r)A_n \bar{\mu}}{\sqrt{2} \cdot \sigma \cdot (1+r)} \right) \quad (1)$$

em que  $r$  é a razão de extinção que se relaciona com a definição utilizada pela ITU-T,  $r_{ext}$ , por  $r=1/r_{ext}$ .  $A_n$  é a abertura de olho normalizada (toma o valor unitário para a máxima abertura possível para uma dada razão de extinção),  $\bar{\mu}$  é o valor médio da tensão à entrada do circuito de decisão, dado por  $\bar{\mu} = g_t R_\lambda \bar{p}$  onde  $\bar{p}$  é a potência média incidente no fotodetector,  $R_\lambda$  é a respostividade do PIN,  $g_t$  é o ganho de

<sup>1</sup> Estes valores são extraídos do gráfico da probabilidade de erro e podem ser obtidos com bastante precisão realizando a ampliação ("zoom") do gráfico.

<sup>2</sup> Se o filtro que deve considerar no seu trabalho é um filtro de Butterworth, então considere aqui um filtro de Bessel com a mesma ordem; se fôr um filtro de Bessel, então considere um filtro de Butterworth com a mesma ordem.

transimpedância do filtro de recepção,  $\sigma$  é o desvio padrão do ruído à entrada do circuito de decisão e

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_x^{+\infty} e^{-t^2} dt.$$

Para o cálculo da largura de banda equivalente de ruído do receptor óptico utilize o seguinte resultado:

$$\text{com } H(s) = \frac{c_0}{d_0 + d_1s + d_2s^2 + d_3s^3} \Rightarrow \frac{1}{2\pi j} \int_{-\infty}^{+\infty} |H(s)|^2 ds = \frac{c_0^2 d_2}{2d_0} \cdot \frac{1}{d_1d_2 - d_0d_3}$$

2. a partir da expressão do majorante obtenha: a penalidade de potência<sup>3</sup>, em dB, devida ao fecho do olho (obtida considerando unicamente o efeito da redução da abertura de olho); a penalidade de potência<sup>3</sup>, em dB, devida ao aumento da potência de ruído (obtida considerando unicamente o efeito do aumento da potência de ruído); o total da penalidade de potência dado pela soma das duas contribuições anteriores. Sobreponha no mesmo gráfico as três penalidades e a penalidade de potência<sup>3</sup> calculada a partir da sensibilidade obtida pelo simulador. Tire conclusões acerca do interesse de utilização da expressão (1) no cálculo da sensibilidade ou penalidade.
- Indique as principais diferenças observadas entre os padrões de olho correspondentes aos dois tipos de filtro (Butterworth e Bessel) com a largura de banda ótima e a mesma ordem, observadas no laboratório. Indique as sensibilidades e aberturas de olho normalizadas observadas com cada um, e explique qualitativamente, baseando-se nas características dos filtros, as diferenças observadas nestas grandezas. Tire conclusões quanto ao tipo de filtro mais favorável.

## 2) Análise da influência dos efeitos distorcivos da fibra no desempenho do sistema

No laboratório:

Neste ponto, considere sempre que  $r_{ext} = \infty$  e que a largura de banda do filtro de recepção é igual à largura de banda ótima determinada em 1).

1. Obtenha, correndo o simulador, e tome nota dos valores de sensibilidade do sistema para os três comprimentos de fibra sugeridos no simulador considerando, **apenas neste ponto**, que a fibra é do tipo DSF.<sup>4</sup>
2. Considerando que a fibra é do tipo indicado nos seus parâmetros de trabalho
  - a) obtenha, correndo o simulador, e tome nota dos valores de sensibilidade do sistema para os três comprimentos de fibra sugeridos no simulador<sup>4</sup>;
  - b) observe, para dois valores de comprimento de fibra (um dos quais é 0), os padrões de olho à saída da fibra e entrada do circuito de decisão e tome nota dos valores da amplitude normalizada que são observados e que considera mais importantes para efeitos de análise de desempenho<sup>5</sup>.

No relatório do trabalho:

- Represente a evolução da penalidade de potência, devida à transmissão, em função do produto  $D_\lambda L$  para os dois tipos de fibra. Estabeleça uma regra de variação da penalidade

<sup>3</sup> Sugestão: considere, para efeitos de cálculo de penalidade, que as condições ideais de funcionamento correspondem à existência do filtro com a largura de banda de 0.8B.

<sup>4</sup> Sugestão: se quiser, obtenha também a sensibilidade para outros comprimentos de fibra à sua escolha.

<sup>5</sup> Os valores das amplitudes extraídos dos padrões de olho podem ser obtidos com bastante precisão realizando a ampliação do gráfico.

com a dispersão e comprimento da ligação. Compare com os resultados previstos teoricamente. Tire conclusões quanto aos resultados obtidos.

- A partir dos padrões de olho observados no laboratório, avalie e conclua acerca da influência da transmissão na fibra e do efeito do filtro eléctrico de recepção, na qualidade do sinal entregue ao circuito de decisão.

### 3) **Extracção da razão de extinção a partir do diagrama de olho e análise da degradação da sensibilidade devida à razão de extinção**

No laboratório:

Neste ponto, considere sempre que

- $L=0$  (sistema em costas-com-costas);
- a largura de banda do filtro de recepção é igual à largura de banda óptima determinada em 1);
- $r_{ext}$  é igual ao valor indicado no conjunto de parâmetros do seu grupo de trabalho.
  1. Observe os padrões de olho à entrada da fibra, saída da fibra e entrada do circuito de decisão, e tome nota dos valores da amplitude normalizada que são mais relevantes para efeitos de cálculo da razão de extinção.
  2. Obtenha, correndo o simulador, e tome nota do valor de sensibilidade e da abertura de olho normalizada.

No relatório do trabalho:

- Indique os valores da amplitude normalizada, à entrada da fibra, saída da fibra e entrada do circuito de decisão, extraídos durante a sessão de laboratório e calcule o valor da razão de extinção em cada um daqueles pontos do sistema. Explique o procedimento utilizado para obter a razão de extinção a partir do padrão de olho.
- Compare o valor de sensibilidade obtido em 3.2 com o obtido em 2.2.a) referente ao comprimento de fibra 0.
- Obtenha estimativas da sensibilidade a partir da expressão (1), correspondentes às razões de extinção consideradas em 2) e 3). Compare os valores com os obtidos no ponto anterior e tire conclusões.

### 4) **Escolha de emissor óptico para ligação com duas secções de regeneração**

No relatório do trabalho:

- Considere uma ligação por fibra óptica com duas secções de regeneração (cujos comprimentos são fornecidos ao grupo no início da sessão de laboratório) que utiliza o tipo de fibra e receptor indicado para o grupo de trabalho e a razão de extinção considerada em 3). Os parâmetros da fibra são os indicados na Tabela 1. Considere, para simplificar, que as perdas das juntas e conectores estão incluídas no coeficiente de atenuação da fibra. Admita que o emissor e receptor ópticos do regenerador são iguais ao emissor e receptor da ligação. Indique, justificando, qual dos emissores ópticos apresentados na Tabela 2 é o mais adequado para a ligação. Indique, justificando, se a ligação é limitada pela atenuação ou pela dispersão.

**Tabela 1. Parâmetros da fibra óptica**

Tipo de fibra	Coefficiente de atenuação (dB/km)	Parâmetro de dispersão (ps/nm/km)
SMF	0.22	16
NZDSF	0.3	4

**Tabela 2. Características dos emissores ópticos disponíveis**

Identif. emissor	Tipo de modulação	Fonte óptica	Pot. óptica média acopl. fibra (mW)	Largura de banda a -3 dB	Largura de linha	Factor de enriquecimento largura de linha
A	Directa	FP	2	2.8 GHz	1 nm	6
B	Directa	FP	4	3 GHz	2 nm	6
C	Directa	FP	6	2.5 GHz	3 nm	6
D	Directa	FP	8	1 GHz	4 nm	6
E	Directa	DFB	1	3 GHz	2.5 MHz	5
F	Directa	DFB	2	11 GHz	5 MHz	6
G	Directa	DFB	4	4.5 GHz	10 MHz	7
H	Directa	DFB	8	12 GHz	12.5 MHz	6
I	Externa	DFB	1	15 GHz	1 MHz	0
J	Externa	DFB	2	18 GHz	2 MHz	0
K	Externa	DFB	4	20 GHz	4 MHz	0
L	Externa	DFB	8	14 GHz	6 MHz	0

## Apêndice A

Neste apêndice descreve-se o sistema de comunicação óptica cujo desempenho vai ser estudado utilizando o simulador.

O sistema de comunicação por fibra óptica funciona a  $B$  Gbit/s no comprimento de onda de  $\lambda=1550\text{nm}$ , e utiliza modulação de intensidade (IM) e detecção directa (DD). O esquema de blocos simplificado do sistema está representado na Figura A1. As características dos vários sub-sistemas são as descritas seguidamente.

- Os impulsos unipolar NRZ à entrada do emissor óptico (saída do gerador de sinal) têm a forma rectangular. Estes impulsos representam a tensão que comanda o modulador externo.
- A fonte de luz emite um sinal não modulado (contínuo) monocromático. O modulador externo converte os impulsos do gerador de sinal em variações da potência óptica que é injectada na fibra óptica. O modulador externo produz uma limitação na banda do sinal modelada por um filtro de Bessel de segunda ordem com largura de banda de  $B$ . Além disso, o modulador externo impõe um certo valor à razão de extinção,  $r_{ext}$ . Esta é definida pela razão entre as potências, em estado estacionário, correspondentes ao nível lógico "1",  $p_{s,1}$ , e ao nível lógico "0",  $p_{s,0}$ :  $r_{ext}=p_{s,1}/p_{s,0}$ .
- A transmissão linear (no campo eléctrico) na fibra óptica monomodo é modelada por uma função de transferência (em campo eléctrico) equivalente passa-baixo descrita por

$$H_c(f) = \exp\left(j\pi D_\lambda L \lambda^2 f^2 / c\right)$$

em que  $D_\lambda$  é o parâmetro de dispersão da fibra,  $L$  é o comprimento da fibra,  $c$  é a velocidade da luz no vácuo. Note-se que, uma vez que a análise se concentra nos efeitos distorcivos da fibra, as perdas da fibra foram desprezadas.

- Na recepção, o fotodetector PIN efectua a detecção da potência óptica nele incidente. A corrente eléctrica à sua saída,  $i_{PIN}(t)$ , relaciona-se com a potência óptica incidente,  $p_{rec}(t)$ , através da relação  $i_{PIN}(t)=R_\lambda p_{rec}(t)$  em que o parâmetro  $R_\lambda$  é designado por responsividade cujo valor é  $R_\lambda=1\text{A/W}$ .
- O ruído presente à entrada do filtro de recepção é branco, gaussiano, de média nula e apresenta uma densidade espectral **bilateral** de potência de  $10^{-22}\text{A}^2/\text{Hz}$ .
- A parte de filtragem no receptor óptico assegura a formatação e/ou igualação do sinal e eliminação de algum ruído presente à entrada. O filtro de recepção é modelado por um filtro cujo tipo, ordem e largura de banda são escolhidos pelo utilizador. Os filtros que o utilizador pode escolher são de Butterworth e Bessel, de segunda e terceira ordem. As suas funções de transferência são apresentadas na tabela A1.

**Tabela A1 Funções de transferência do filtro de recepção**

<b>Tipo e ordem do filtro</b>	<b>Função de transferência, <math>s=j2\pi f</math></b>
Butterworth de 2ª ordem	$H(s) = \frac{1}{1 + \sqrt{2} \cdot s/(2\pi f_{3dB}) + [s/(2\pi f_{3dB})]^2}$ $f_{3dB} = \text{frequência de corte a -3dB}$
Butterworth de 3ª ordem	$H(s) = \frac{1}{[s/(2\pi f_{3dB}) + 1] \cdot [s/(2\pi f_{3dB}) - s_1] \cdot [s/(2\pi f_{3dB}) - s_2]}$ $f_{3dB} = \text{frequência de corte a -3dB}, \quad s_1 = \exp(j2\pi/3), \quad s_2 = \exp(-j2\pi/3)$
Bessel de 2ª ordem	$H(s) = \frac{3}{3 + 3 \cdot s/(2\pi f_{3dB}/a) + [s/(2\pi f_{3dB}/a)]^2}$ $f_{3dB} = \text{frequência de corte a -3dB}, \quad a = \sqrt{3 \cdot (\sqrt{5} - 1)}/2$
Bessel de 3ª ordem	$H(s) = \frac{15}{15 + 15 \cdot s/(2\pi f_{3dB}/a) + 6 \cdot [s/(2\pi f_{3dB}/a)]^2 + [s/(2\pi f_{3dB}/a)]^3}$ $f_{3dB} = \text{frequência de corte a -3dB}, \quad a = 1.7529$

No cálculo da probabilidade de erro, admite-se que o ruído à entrada do circuito de decisão apresenta uma distribuição gaussiana. A influência da interferência inter-simbólica à entrada do circuito de decisão na probabilidade de erro é contabilizada, discriminando a contribuição de cada bit da sequência para a probabilidade de erro, através da seguinte expressão:

$$P_e = \frac{1}{N_b} \cdot \left[ \sum_{\substack{l=1 \\ (a_l=0)}}^{N_b} \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{F - \mu_{0,l}}{\sigma_{0,l} \sqrt{2}} \right) + \sum_{\substack{l=1 \\ (a_l=1)}}^{N_b} \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\mu_{1,l} - F}{\sigma_{1,l} \sqrt{2}} \right) \right] \quad (1)$$

onde  $N_b$  é o número de bits da sequência à entrada do sistema,  $a_l$  é o  $l$ -ésimo bit da sequência à entrada,  $\mu_{i,l}$  e  $\sigma_{i,l}$  ( $i=0,1$ ) são a média e o desvio padrão da tensão à entrada do circuito de decisão no instante de amostragem  $t_l$  (o instante em que o olho apresenta a máxima abertura) do bit  $l$  da sequência e  $F$  é o limiar de decisão otimizado numericamente para minimizar a probabilidade de erro.

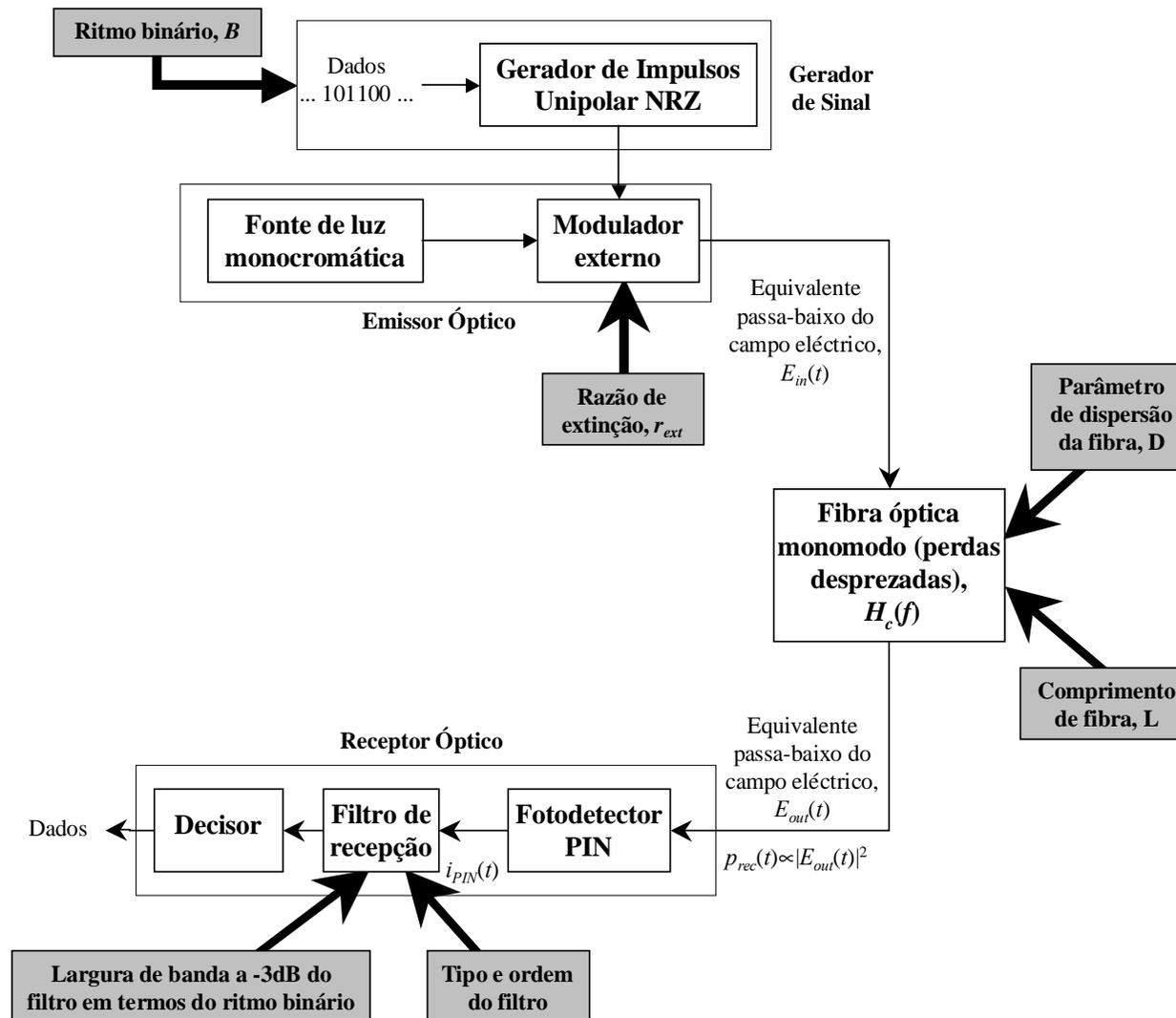


Fig. A1 Diagrama de blocos do sistema de comunicação óptica em que se discriminam os parâmetros que o utilizador pode escolher nos rectângulos com fundo cinzento