



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_λ ;
- 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.

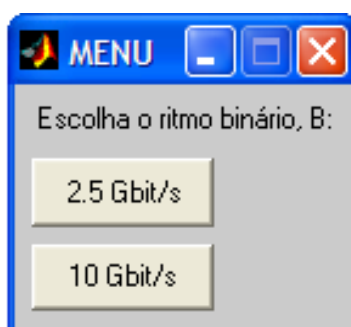


Fig. 1 Primeira janela do simulador em que o utilizador escolhe o ritmo binário do sistema.

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 sensibilidade¹ 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 sensibilidade¹ para a largura de banda óptima do filtro de recepção considerando que este é um filtro de Butterworth / Bessel².
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 / Bessel² 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_λ é a respostividade do PIN, g_t é o ganho de

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

² 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, σ é o desvio padrão do ruído à entrada do circuito de decisão e

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

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

$$\text{com } H(s) = \frac{c_0}{d_0 + d_1s + d_2s^2 + d_3s^3} \Rightarrow \frac{1}{2\pi j} \int_{-\infty}^{+\infty} |H(s)|^2 ds = \frac{c_0^2 d_2}{2d_0} \cdot \frac{1}{d_1 d_2 - d_0 d_3}$$

2. a partir da expressão do majorante obtenha: a penalidade de potência³, em dB, devida ao fecho do olho (obtida considerando unicamente o efeito da redução da abertura de olho); a penalidade de potência³, 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 potência³ 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.⁴
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 simulador⁴;
 - 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 desempenho⁵.

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

³ 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.

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

⁵ 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_λ é o parâmetro de dispersão da fibra, L é o comprimento da fibra, c é a velocidade da luz no vázio. 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_λ é designado por respostividade 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

Tipo e ordem do filtro	Função de transferência, $s=j2\pi f$
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.

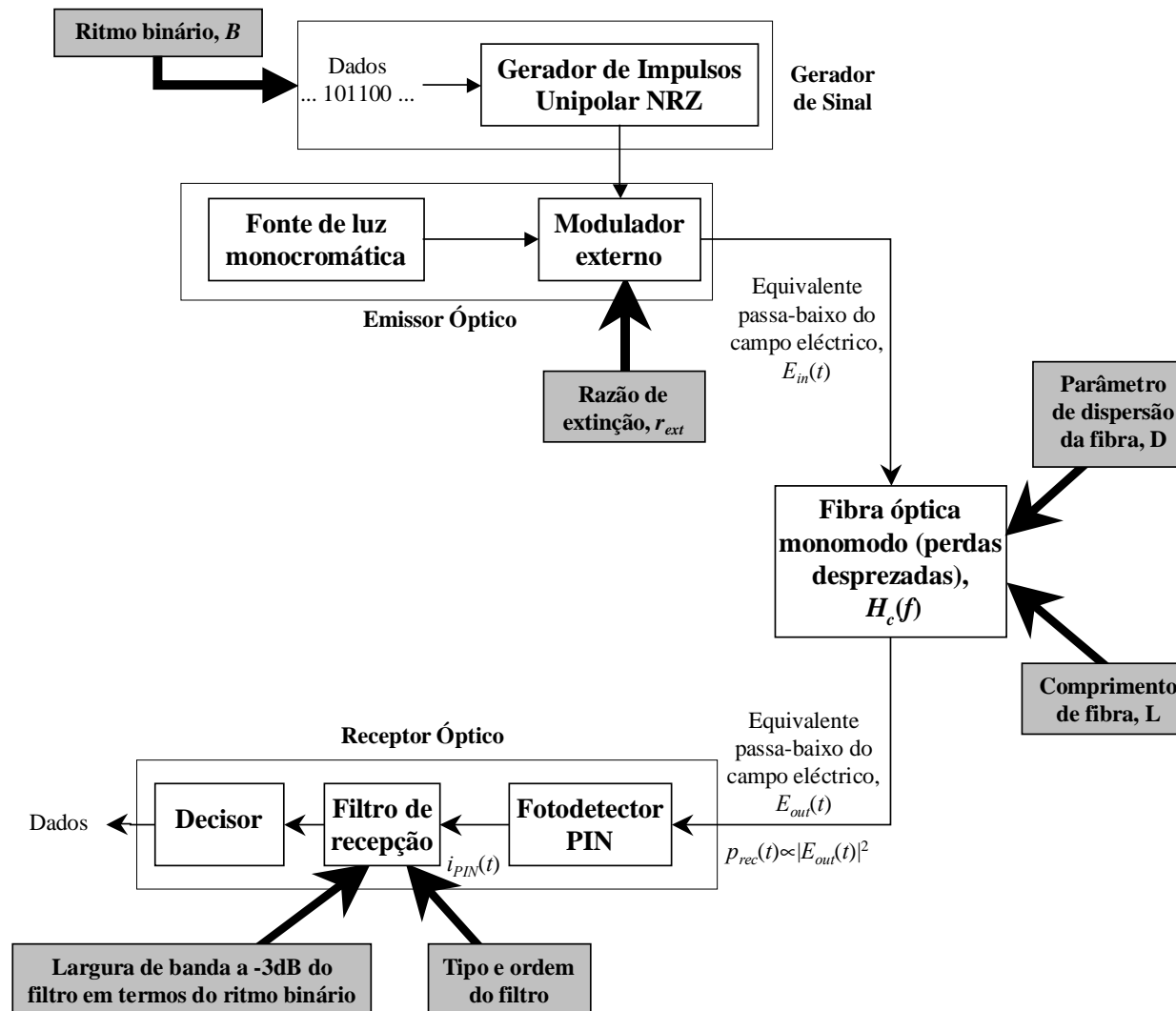


Fig. A1 Diagrama de blocos do sistema de comunicação óptica em que se discriminam os parâmetros que o utilizador pode escolher nos rectângulos com fundo cinzento