



## Laboratório de Princípios de Comunicações

Período 2020.1e

### Guia de Experimentos 5

Tema(s): Comunicações digitais.

Professor(es): Edson P. da Silva e Luciana Veloso

---

## 1 Introdução

O presente guia descreve atividades experimentais a serem realizadas na disciplina Laboratório de Princípios de Comunicações do curso de graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG.

Os experimentos propostos deverão ser realizados no Laboratório de Princípios de Comunicações – LPC, localizado na Central de Laboratórios da Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da UFCG, empregando:

- Computador com software GNU Radio Companion – GRC (<http://gnuradio.org/>) instalado;
- Módulo USRP (do inglês *Universal Software Radio Peripheral*) para transmissão e recepção de sinais numa abordagem conhecida como Rádio Definido por Software – RDS.

Na seção 3 deste guia, propõe-se um conjunto de atividades de preparação a serem desenvolvidas pelo aluno antes da aula em que serão realizadas as práticas experimentais. Sem a realização prévia destas atividades pelo aluno, as práticas experimentais propostas ficarão comprometidas, tanto no tempo necessário para sua realização quanto no aproveitamento pelo aluno. Por essa razão, **o aluno só poderá realizar os experimentos em laboratório se apresentar ao professor no início da aula os resultados da preparação proposta.**

A aula terá duração de duas horas e o aluno deverá entregar ao seu término, por escrito, respostas às questões referentes aos experimentos realizados propostas na Folha de Respostas (parte final do guia).

## 2 Objetivos

As práticas experimentais aqui propostas têm por objetivos:

- Analisar diagrama de olho de sinal digital;
- Projetar e analisar equalizador de canal e seu efeito sobre o sinal recebido;
- Observar emprego de código duobinário sobre sinal transmitido;
- Observar efeito de ruído de canal em BER e SNR em sinal modulado digital transmitido.

## 3 Preparação

### 3.1 Estudo

Revise e pesquise sobre os conceitos:

- Diagrama de olho;
- Equalizador de zero forçado (*zero-forcing equalizer*);
- Código duobinário;
- Modulações M-PAM e M-QAM.

### 3.2 Estudo de caso: compensação da dispersão cromática em fibras ópticas

Em óptica, a dispersão é o fenômeno que ocorre em meios no quais a velocidade de fase de uma onda propagante depende de sua frequência. Meios com essa propriedade são conhecidos como meios dispersivos. Algumas vezes o termo *dispersão cromática* é usado para melhor definir a origem do fenômeno. Embora o conceito seja comumente vinculado à óptica, fenômenos similares pode ocorrer em qualquer tipo de propagação de onda, como é o caso da dispersão acústica de ondas sonoras.

Uma consequência óptica importante e familiar da dispersão é a mudança no ângulo de refração de diferentes cores (componentes de frequência) de luz, como visto no espectro produzido por um prisma dispersivo e na aberração cromática de lentes. O exemplo mais conhecido de dispersão é provavelmente um arco-íris, no qual a dispersão causa a separação espacial de uma luz branca em componentes de diferentes comprimentos de onda (cores diferentes).

Por sua vez, em sistemas de comunicações via fibra óptica, a dispersão cromática faz com que pulsos transmitidos pela fibra se espalhem no tempo, causando interferência entre símbolos e degradando os sinais em longas distâncias de transmissão. O efeito da dispersão cromática numa sequência de pulsos transmitidos por uma fibra óptica está ilustrado na Fig. 1. Perceba que a dispersão é caracterizada pelo alargamento temporal dos pulsos transmitidos, bem como a diminuição da potência de pico do sinal. Num sistema de comunicações, pulsos diferentes carregam informações distintas (*bits* distintos) e a interferência entre eles pode causar erros na recepção da informação, podendo até inviabilizar a comunicação.

Numa fibra óptica, diversos tipos de dispersão cromática podem acontecer. Entretanto, a dispersão de segunda ordem é a mais importante, por gerar a maior contribuição para a interferência entre símbolos nos sinais de comunicação.

Se considerarmos que apenas a dispersão cromática de segunda ordem ocorre na fibra, podemos modelar o efeito da propagação do sinal pelo guia de acordo com a resposta em frequência definida na Eq. 1:

$$H(\omega, z) = e^{-j\frac{\beta_2}{2}\omega^2 z}, \quad (1)$$

em que  $z$  é a distância de propagação do sinal e  $\beta_2$  é o parâmetro que caracteriza a dispersão de segunda ordem e que depende da fibra utilizada na transmissão. Note em 1 que o efeito da dispersão no sinal transmitido dependerá de suas componentes de frequência e de sua distância de propagação.

Felizmente, devido à linearidade do fenômeno, os efeitos da dispersão cromática podem ser revertidos com o uso de equalizadores de zero forçados (*zero-forcing equalizers*). Tais equalizadores podem ser implementados tanto no domínio óptico, via fibras compensadoras de dispersão (*dispersion compensating fibers – DCF's*), ou no domínio digital, como por equalizadores baseados em filtros digitais. Sem estes equalizadores, as altas taxas de transmissão de bits alcançadas

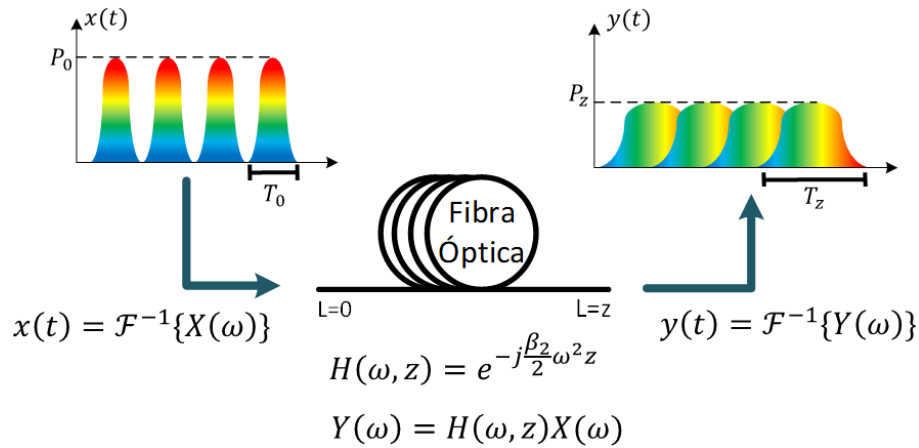


Figura 1: Modelo no domínio da frequência de uma fibra óptica em que os sinais propagantes estão sujeitos apenas ao fenômeno da dispersão cromática de segunda ordem.

nos dias atuais em cabos ópticos submarinos tornariam-se inviáveis, dificultando a expansão da Internet até o seu estado atual.

Considerando o modelo de resposta em frequência definido na Eq. 1, a resposta em frequência do equalizador de zero forçado será expressa por

$$H_{ZF}(\omega, z) = \frac{1}{H(\omega, z)} = \frac{1}{e^{-j\frac{\beta_2}{2}\omega^2 z}} = e^{j\frac{\beta_2}{2}\omega^2 z} \quad (2)$$

Fazendo a transformada de Fourier inversa de  $H_{ZF}(\omega, z)$ , obtém-se a resposta ao impulso  $h_{ZF}(t, z)$  do filtro equalizador que, posteriormente, pode ser aproximada por um filtro digital  $h_{ZF}(kT, z)$  de resposta ao impulso finita (*finite impulse response – FIR*).

### 3.3 Problemas

Os problemas propostos a seguir devem ser obrigatoriamente resolvidos e apresentados por escrito ao professor antes do início das práticas de laboratório. Os resultados destes problemas serão necessários para a realização dos experimentos propostos.

1. Que condição  $H(\omega, z)$  deve satisfazer para que seja possível definir o equalizador de zero forçado  $H_{ZF}(\omega, z)$  como expresso na Eq. 2? Essa condição é satisfeita para o modelo da dispersão cromática descrito na Eq. 1?
2. Utilizando o código **Exp5.m** fornecido pelo professor, use o MATLAB/OCTAVE para calcular os coeficientes dos filtros FIR que modelam a dispersão cromática e o equalizador de zero forçado para as seguintes distâncias:
  - (a)  $z_1 = 1500$  km
  - (b)  $z_2 = 3000$  km
  - (c)  $z_3 = 4000$  km
  - (d)  $z_4 = 8000$  km

Os coeficientes dos filtros FIR projetados (i.e., a saída MATLAB/OCTAVE) serão salvos num arquivo **.TXT**. Estes coeficientes serão utilizados no experimento.

3. De que forma é possível utilizar o mesmo filtro equalizador projetado para  $z_3$  para equalizar  $z_4$ ? (Dica: analise as Eq. 1 e 2))

## 4 Experimentos

A seguir são descritas práticas experimentais a serem realizadas pelo aluno em aula de laboratório.

### 4.1 Experimento 1 – Diagrama de olho

O objetivo deste experimento é identificar os elementos de um diagrama de olho de um sinal 2-PAM e observar seu comportamento mediante adição de ruído.

1. Antes de iniciar as atividades com o GRC, crie uma pasta para guardar os arquivos de seus experimentos e copie nela os modelos de diagrama (arquivos .grc) disponibilizados pelo professor para esta aula. **Não deixe de realizar isso, pois o computador deste laboratório não é para seu uso pessoal e os arquivos que você utilizará serão alterados por você durante o experimento;**
2. Execute o software GRC e abra o arquivo **Labo5-1.grc**. A Figura 2 ilustra o diagrama deste experimento. Ele consiste na transmissão de um sinal 2-PAM e recepção do mesmo acrescido de ruído de canal. O gráfico apresentado permite observar o diagrama de olho construído a partir da parte real do sinal recebido;
3. Para conseguir visualizar o diagrama de olho, marque a opção **Persistence** no canto superior do painel, à direita do gráfico, ajuste o valor **Analog Alpha** (pequena régua deslizante que surge sob a opção **Persistence**) para seu valor mínimo (0.01000) e aguarde a transmissão de vários pulsos para que o diagrama de olho seja desenhado.
4. Um régua deslizante localizada sob o painel do diagrama de olho permite alterar a potência do ruído de canal e observar seu efeito sobre o diagrama de olho e sobre a relação sinal-ruído (SNR) no sinal recebido. Após alterar o nível de ruído, desmarque a opção **Persistence** para limpar o gráfico e volte a marcá-la para que novo diagrama de olho seja desenhado para o novo nível de ruído;

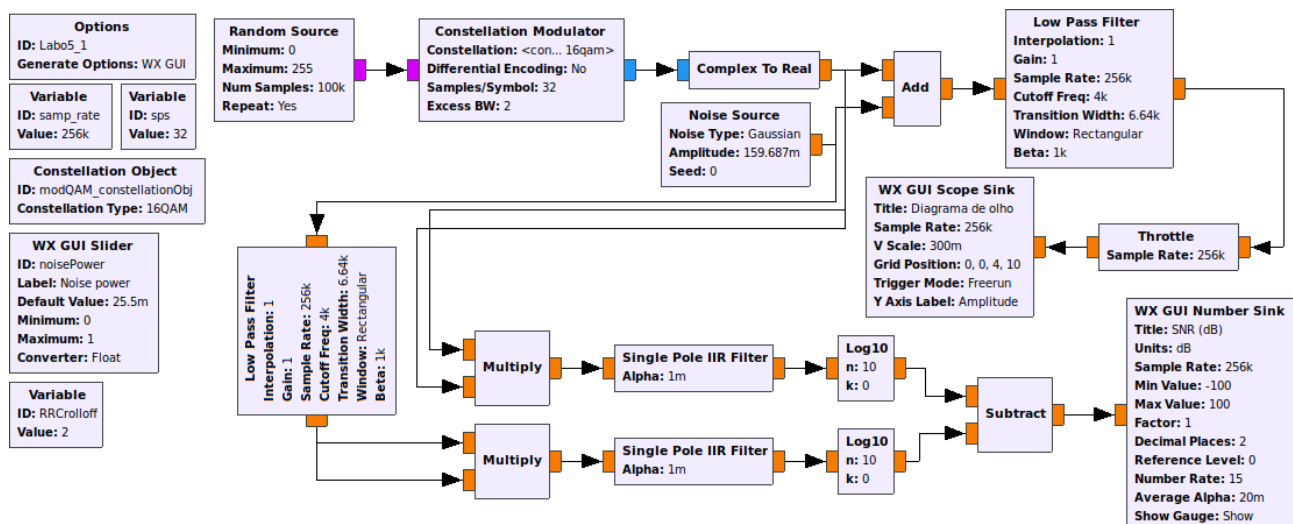


Figura 2: Diagrama de blocos para análise de diagrama de olho de sinal 2-PAM.

5. Execute o diagrama e responda às questões propostas na Folha de Respostas.

## 4.2 Experimento 2 – Equalização

O objetivo deste experimento é analisar o emprego de equalizador de zero forçado para minimizar a interferência intersimbólica observada através de diagrama de olho de sinal recebido após o sinal trafegar por canal com resposta  $H(\omega, z) = e^{-j\frac{\beta_2}{2}\omega^2 z}$  (dispersão cromática no canal óptico).

1. Abra o arquivo **Labo5-2.grc** disponibilizado pelo professor. A Figura 3 ilustra o diagrama deste experimento. Uma modulação 4-PAM é empregada e três diagramas de olho são apresentados:

- um do sinal transmitido, portanto sem distorção de canal, em azul;
- um do sinal recebido não equalizado, portanto distorcido pelo canal, em verde, e;
- um do sinal recebido e equalizado, em vermelho.

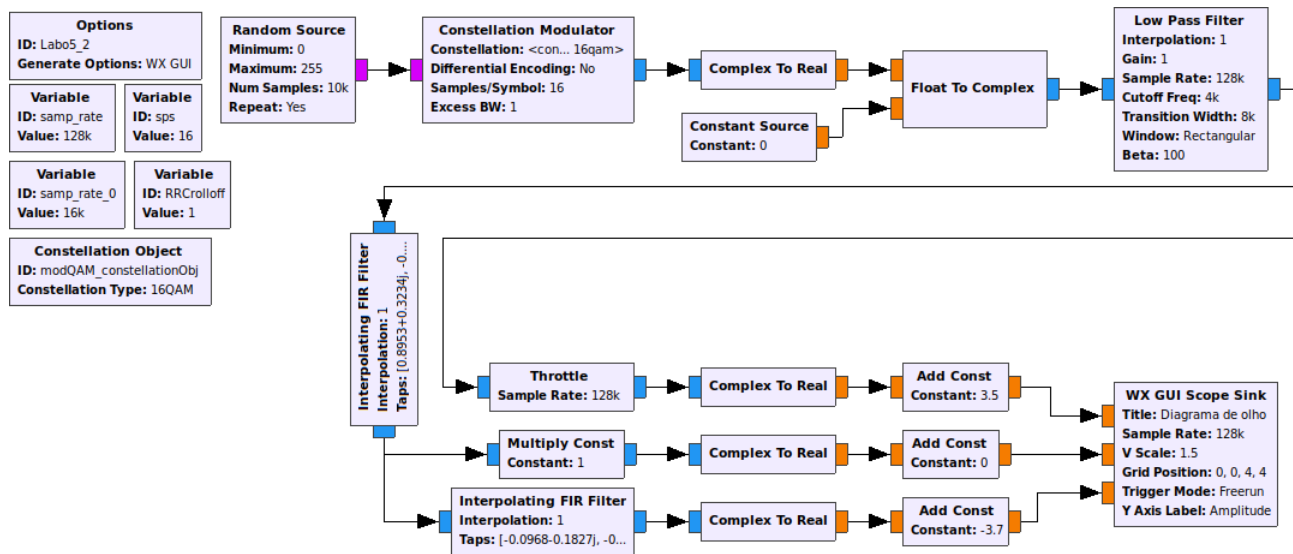


Figura 3: Diagrama de blocos ilustrando a aplicação de um equalizador de zero forçado para compensação da dispersão cromática da fibra óptica.

2. Introduza no bloco **Interpolating FIR Filter** localizado na parte inferior do diagrama, na vertical, os coeficientes do canal calculados na preparação;
3. Introduza no bloco **Interpolating FIR Filter** localizado na parte inferior do diagrama, na horizontal, os coeficientes do equalizador de zero forçado calculados na preparação;
4. Responda as questões propostas na Folha de Respostas.

## 4.3 Experimento 3 – Código duobinário

O objetivo deste experimento é observar o emprego de código duobinário na transmissão digital.

1. Abra o arquivo **Labo5-3.grc** disponibilizado pelo professor. A Figura 4 ilustra o diagrama de blocos deste experimento. Ele consiste de um sistema de transmissão QPSK com pulsos NRZ e com pulsos duobinários, com ajuste da largura de faixa do canal. O objetivo é comparar o efeito de pulsos duobinários em canais com restrição de largura de faixa;
2. Execute o experimento e responda as questões propostas na Folha de Respostas.

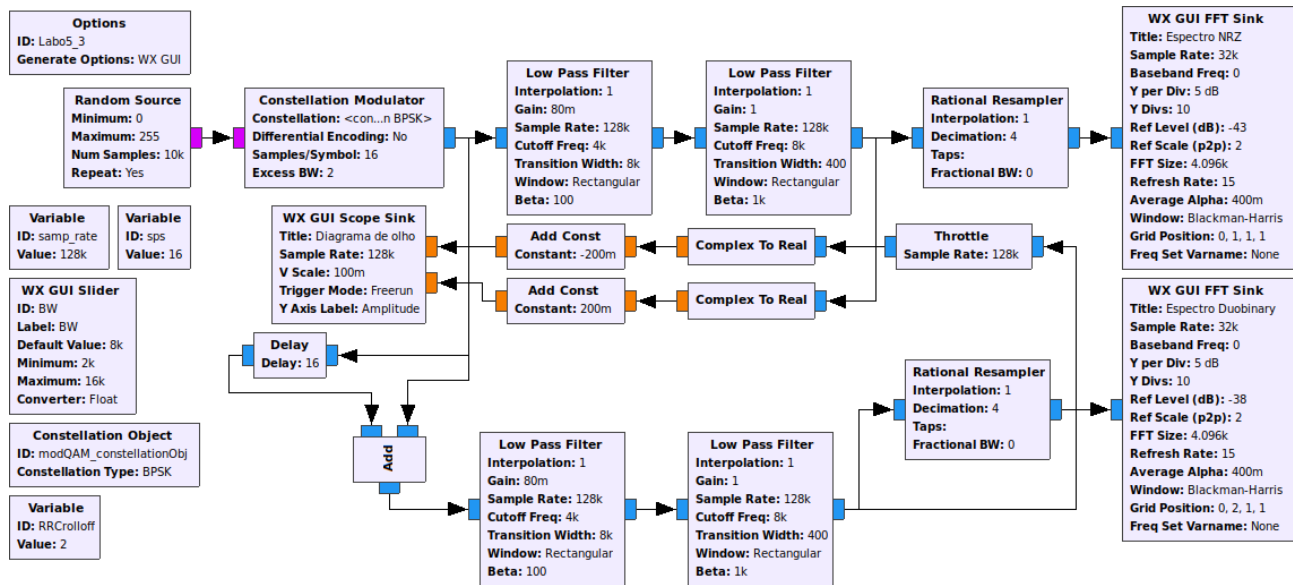


Figura 4: Diagrama de blocos de sistema de transmissão QPSK com pulsos NRZ e com pulsos duobinários.

#### 4.4 Experimento 4 – Modulação digital

O objetivo deste experimento é mostrar o conceito de um receptor FM usando detecção por inclinação.

1. Abra o arquivo **Labo5-4.grc** disponibilizado pelo professor. A Figura 5 ilustra o diagrama deste experimento. Ele consiste de um sistema de transmissão digital modulada, que permite monitorar as constelações dos sinais transmitidos e recebidos, o espectro do sinal recebido, além da taxa de erro de bits (BER) e da relação sinal-ruído (SNR) obtidas na recepção.

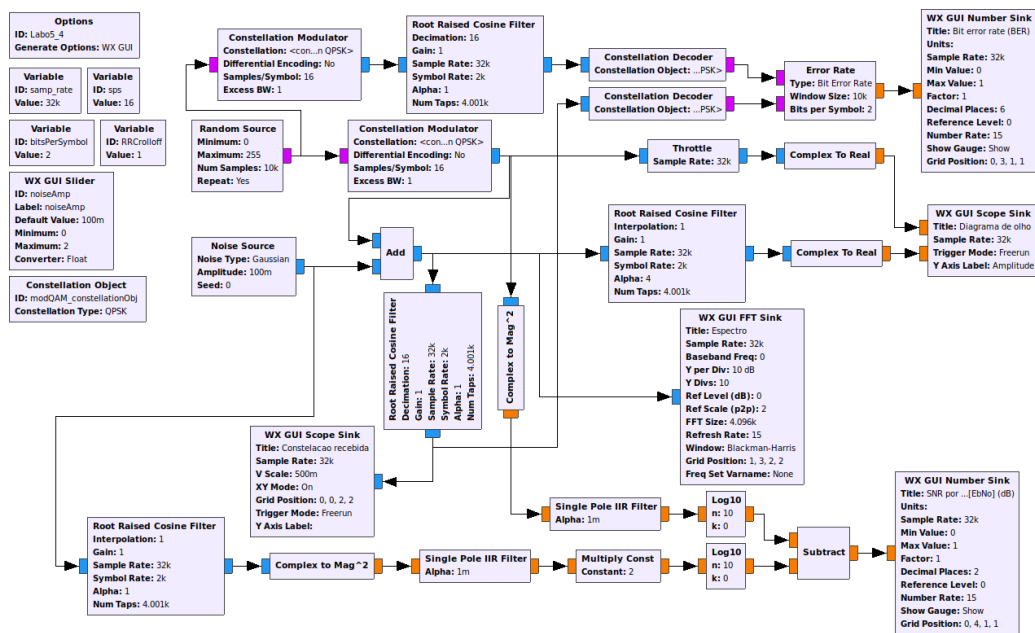


Figura 5: Diagrama de blocos de sistema de transmissão digital modulada.

2. Execute o experimento e responda as questões propostas na Folha de Respostas.



### Laboratório de Princípios de Comunicações

Período 2020.1e

### Guia de Experimentos 5 – Folha de Respostas

Tema(s): Comunicações digitais.

Professor(es): Edson P. da Silva e Luciana Veloso

Aluno: \_\_\_\_\_

Data: \_\_\_\_\_

## Experimento 1 – Diagrama de olho

1. Observe o diagrama de olho desenhado para o sinal 2-PAM recebido sob baixo ruído (SNR de 30 dB). Esboce esse diagrama e identifique suas componentes (período, amplitude de abertura, etc.).

2. Aumente o nível de ruído até obter SNR de  $\approx 20$  dB. Qual o efeito observado no diagrama de olho?

---

---

---

3. Retorne a SNR para 30 dB. Em seguida, altere a variável M de 2 para 4, para mudar a modulação de 2-PAM para 4-PAM. Explique porque o diagrama de olho agora apresenta mais níveis de amplitude e o que cada nível representa.

---

---

---

---

## Experimento 2 – Equalização

1. Descreva o que acontece com o diagrama de olho na saída do canal à medida em que distâncias de propagação aumentam. Justifique.

---

---

---

2. Descreva o que aconteceu com o diagrama de olho do sinal após o emprego do equalizador projetado. Justifique.

---

---

---

3. Que arranjo de blocos permite a equalização da dispersão cromática para uma distância de 4000 km com um filtro projetado para compensar uma distância 2000 km? Teste-o na simulação. Funciona? Desenhe o arranjo abaixo. (Vide questão 3 da preparação)

## Experimento 3 – Código duobinário

1. Considerando o canal com largura de faixa de 2 kHz, como inicialmente configurado, observe os espectros dos sinais e os diagramas de olho para o uso de pulsos NRZ (em azul) e de pulsos duobinários (em verde). Observe que ambos os diagramas de olho apresentam igual nível de abertura do olho. Agora, reduza a largura de faixa do canal para 1 kHz depois para 0.8 kHz e observe os diagramas de olho resultantes. Com base no observado, descreva as vantagens ou desvantagens do uso de pulsos duobinários em sistemas com restrição de largura de faixa em relação a pulsos NRZ.

---

---

---

## Experimento 4 – Modulação digital

1. Qual a  $SNR_b$  (SNR por bit) e a BER observadas? Varie o nível de ruído do canal através da régua deslizante. O que ocorre com a  $SNR_b$  e a BER quando o nível de ruído é aumentado



ou diminuído.

---

---

---

2. A que nível de  $\text{SNR}_b$  obtém-se uma BER de aproximadamente  $10^{-4}$ , ou seja, um erro em cada 10 kbits transmitidos?

---

3. Altere a variável M de 4 para 16 de forma a gerar o formato de modulação 16-QAM. Para esta modulação, a que nível de  $\text{SNR}_b$  obtém-se uma BER de aproximadamente  $10^{-4}$ ? Compare com o valor obtido para 4-QAM e apresente razões para a diferença. Repita o mesmo para  $M = 64$ .

---

---

---

---