



## Laboratório de Princípios de Comunicações

Período 2023.1

### Guia de Experimentos 5

Tema(s): Introdução às 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 antes da aula em que serão realizadas as práticas experimentais. Sem a realização prévia destas atividades, as práticas experimentais propostas ficarão comprometidas, tanto no tempo necessário para sua realização quanto no aproveitamento. Por essa razão, **só poderá realizar os experimentos em laboratório quem apresentar ao(a) professor(a) no início da aula os resultados da preparação proposta.**

A aula terá duração de duas horas e cada participante deverá entregar ao seu término, a Folha de Respostas (parte final do guia) com as respostas cada um dos questionamentos de cada experimento.

## 2 Objetivos

As práticas experimentais aqui propostas têm por objetivos:

- Analisar diagrama de olho de sinais digitais;
- 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 Diagrama de olho

Um diagrama de olho, no contexto de sistemas de comunicações, é uma ferramenta amplamente utilizada para a análise e avaliação da qualidade de sinais transmitidos. Ele é especialmente útil em sistemas digitais de comunicação, como telecomunicações e transmissões de dados, onde a detecção precisa dos pulsos transmitidos é essencial. Um exemplo de um diagrama de olho para um sinal binário NRZ está ilustrado na Fig. 1.

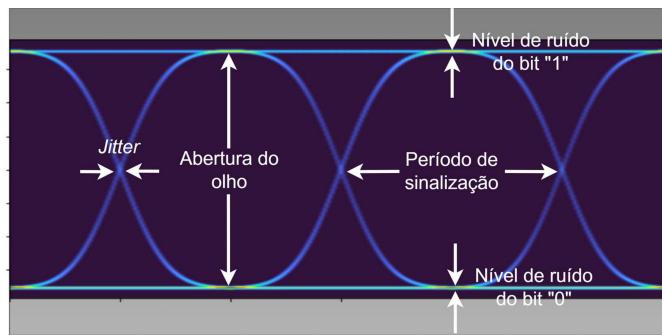


Figura 1: Diagrama de olho e suas principais características.

O diagrama de olho é uma representação gráfica obtida a partir de um sinal recebido em um osciloscópio, onde os pulsos transmitidos são sobrepostos ao longo do tempo. É chamado de *diagrama de olho* devido à semelhança visual com um par de olhos e pálpebras. Para construir um diagrama de olho, o sinal é amostrado em momentos específicos que correspondem ao período de sinalização. As amostras de múltiplos símbolos transmitidos são sobrepostas no mesmo gráfico. A repetição das formas de onda de símbolos adjacentes dá o formato de *olho* ao diagrama.

O diagrama de olho serve a alguns propósitos:

- Avaliação da qualidade e integridade do sinal: Ele permite uma avaliação visual da qualidade do sinal, ajudando a identificar problemas de transmissão, como ruído, distorção, atenuação e *jitter* (variação no atraso dos sinais).
- Sincronização temporal: também é usado para verificar se os símbolos estão sincronizados adequadamente no receptor. Como Funciona:

Um diagrama de olho *aberto* e bem definido é desejável, indicando que os níveis do sinal são facilmente distinguíveis, o que é fundamental para uma detecção precisa dos símbolos e bits transmitidos. Um diagrama de olho *fechado* ou distorcido sugere problemas de transmissão que podem afetar a qualidade da comunicação.

Logo, trata-se de uma ferramenta que permite a realização uma avaliação visual da qualidade de sinais, processo necessário durante a otimização da transmissão e recepção de sinal digitais.

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

Em óptica, a dispersão é o fenômeno que ocorre em meios nos 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 podem 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. 2. 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.

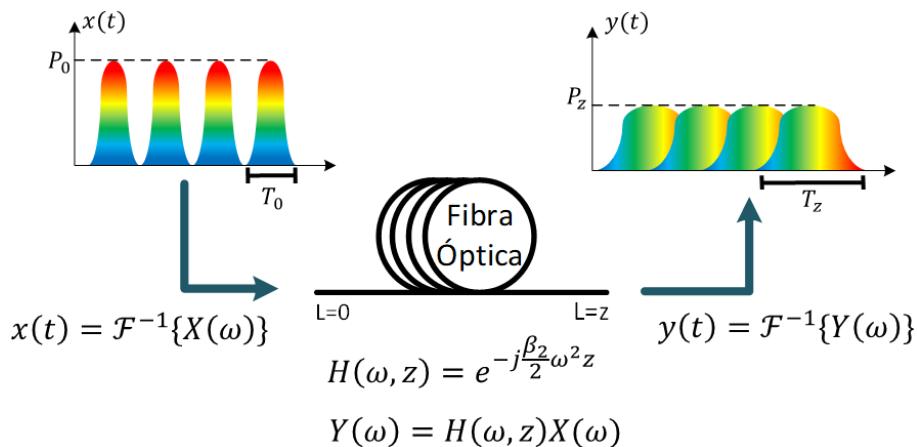


Figura 2: Modelo no domínio da frequência de uma fibra óptica em que os sinais propagantes estão sujeitos apenas ao fenômeno da dispersão cromática de segunda ordem.

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 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*).

### 3.4 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 do 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.

- Execute o software GRC e abra o arquivo **Labo5-1.grc**. A Figura 3 ilustra o diagrama deste experimento. Ele consiste na transmissão de um sinal 2-PAM e recepção do mesmo acrescido de ruído. O gráfico apresentado permite observar o diagrama de olho do sinal recebido;
- 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.

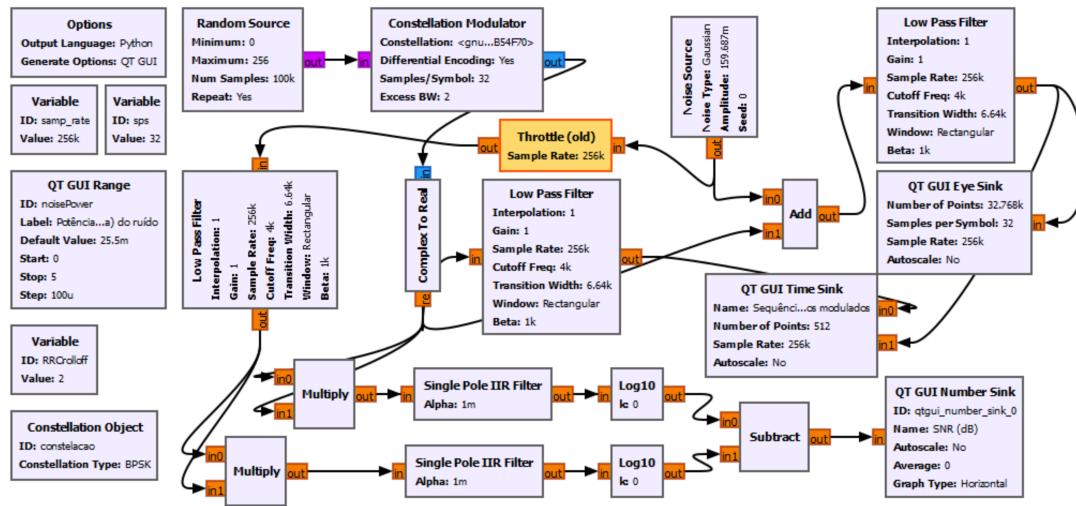


Figura 3: Diagrama de blocos para análise de diagrama de olho de sinal 2-PAM (ou BPSK).

- 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 intersímbólica (ISI) observada através de diagrama de olho de sinal recebido após o sinal trafegar por canal com resposta  $H(\omega, z) = e^{-j\frac{\beta_2}{2}\omega^2z}$  (dispersão cromática na fibra óptica).

- Abra o arquivo **Labo5-2.grc** disponibilizado pelo professor. A Figura 4 ilustra o diagrama deste experimento. Uma modulação 4-PAM é empregada e três diagramas de olho são apresentados:
  - um com o sinal enviado ao canal, portanto livre de ISI;
  - um com o sinal recebido na saída do canal, distorcido pela ISI, e;
  - um com sinal recebido após ser processado pelo equalizador.
- Introduza no bloco **Interpolating FIR Filter** localizado na parte superior do diagrama, os coeficientes do canal calculados na preparação para 1500 km;
- Introduza no bloco **Interpolating FIR Filter** localizado na parte inferior do diagrama, os coeficientes do equalizador de zero forçado calculados na preparação para 1500 km;
- Responda as questões propostas na Folha de Respostas.

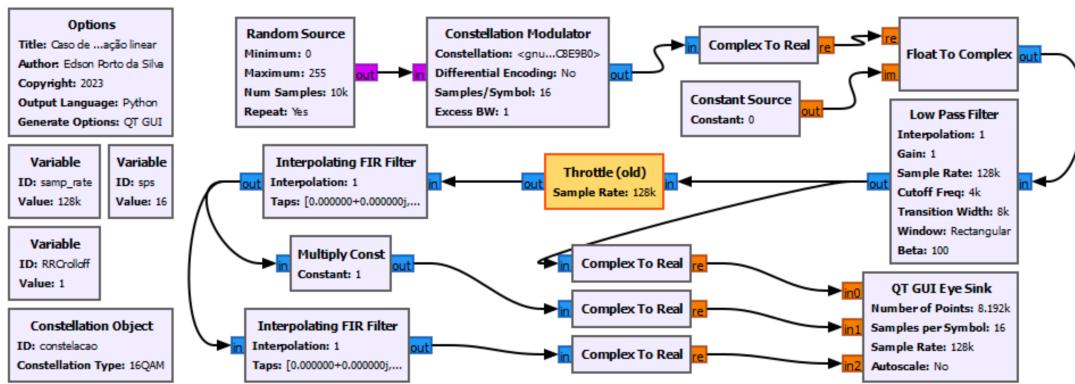


Figura 4: Diagrama de blocos ilustrando a aplicação de um equalizador de zero forçado para compensação da dispersão cromática em fibras ópticas.

### 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 5 ilustra o diagrama de blocos deste experimento. Ele consiste de um sistema de transmissão 2-PAM 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;

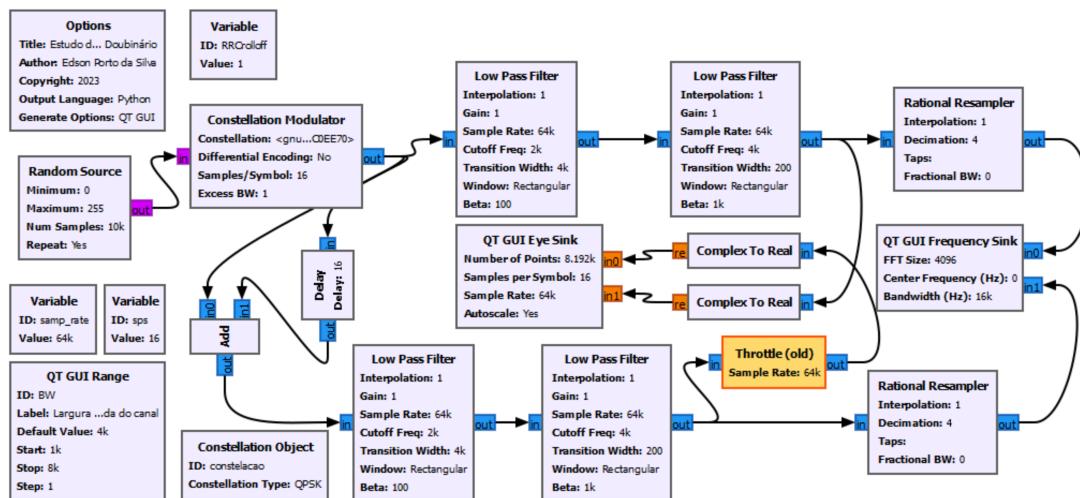


Figura 5: Diagrama de blocos de sistema de transmissão 2-PAM com pulsos NRZ e com pulsos duobinários.

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

### 4.4 Experimento 4 – Modulação digital

O objetivo deste experimento é avaliar a relação entre qualidade de sinal e taxa de erro de bit em um sistema de comunicação digital.

1. Abra o arquivo **Labo5-4.grc** disponibilizado pelo professor. A Figura 6 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.

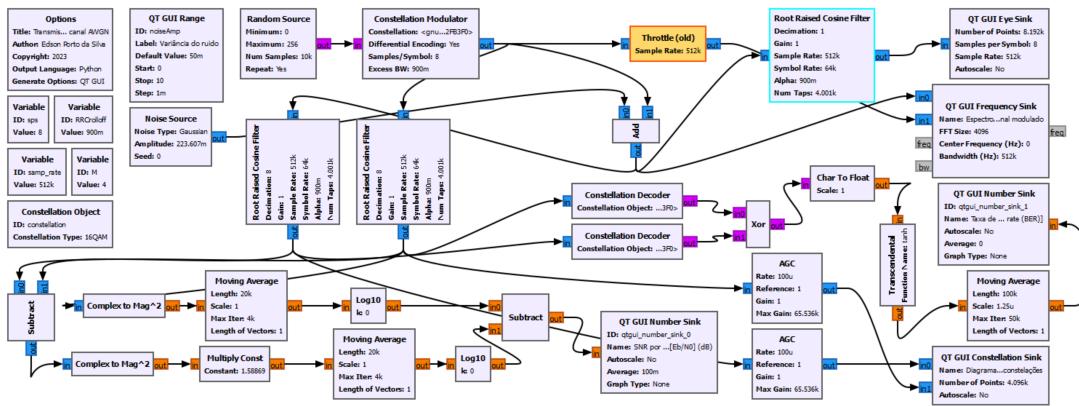


Figura 6: Diagrama de blocos de sistema de transmissão digital modulada.

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



### Laboratório de Princípios de Comunicações

Período 2023.1

### Guia de Experimentos 5 – Folha de Respostas

Tema(s): Introdução às comunicações digitais

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

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

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

## Experimento 1 – Diagrama de olho

- Observe o diagrama do sinal 2-PAM, com cada nível representando um bit (0 ou 1). Varie o nível de ruído de modo que a SNR varie entre 30 dB e 10 dB e observe o que acontece com o digrama de olho. Descreva qualitativamente a relação entre SNR e as características do diagrama de olho.

---

---

---

---

---

---

---

- Altere o *Constellation Type* no bloco *Constellation Object* para 16QAM. Note que agora o diagrama de olho apresenta quatro níveis, correspondendo ao diagrama de olho de um sinal 4-PAM. Ajuste a SNR para  $\approx 30$  dB. Explique o que cada nível do sinal representa.

---

---

---

---

---

## Experimento 2 – Equalização

- Teste a simulação para diferentes combinações de canal e equalizador (diferentes distâncias). 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 para aquela distância. Justifique.

---

---

---

## Experimento 3 – Código duobinário

1. Considerando o canal com largura de faixa de 4 kHz, como inicialmente configurado, observe os espectros dos sinais e os diagramas de olho para o uso de pulsos NRZ e de pulsos duobinários. Observe que ambos os diagramas de olho apresentam igual nível de abertura do olho. Agora, reduza a largura de banda do canal para 2 kHz e depois para 1.6 kHz e observe os diagramas de olho resultantes. Justificando com base no que foi observado nos diagramas de olho, indique qual dos sinais é mais resiliente à filtragem de componentes de frequência pelo canal.

---

---

---

## Experimento 4 – Modulação digital

1. Varie o nível de ruído do canal através da régua deslizante de modo a alterar os valores de  $\text{SNR}_b$ . Descreva qualitativamente a relação entre a  $\text{SNR}_b$  e a BER, justificando as conclusões com valores observados no experimento.

---

---

---

---

2. A que nível de  $\text{SNR}_b$  obtém-se uma BER de aproximadamente  $10^{-4}$ , ou seja, um bit detectado com erro em cada 10 mil bits transmitidos?
3. Altere a variável M de 4 para 16 e o parâmetro *Constellation Type* no bloco *Constellation Object* para 16QAM, de forma a gerar na simulação 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.

---

---

---