

# EL68B - Comunicações Digitais

## Diagrama de Olho e Equalização

**Professor:** Bruno Sens Chang

Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR  
Departamento Acadêmico de Eletrônica - DAELN

# Diagrama de Olho

# Introdução

- O diagrama de olho é uma ferramenta de avaliação da qualidade de uma transmissão digital.
- Permite visualizar robustez ao ruído, a erros de sincronismo, e aos efeitos da IES.
- É construído pela superposição no tempo de diversas recortes de sinal recebido (após a filtragem casada) com duração de um período de símbolo.

## Exemplo

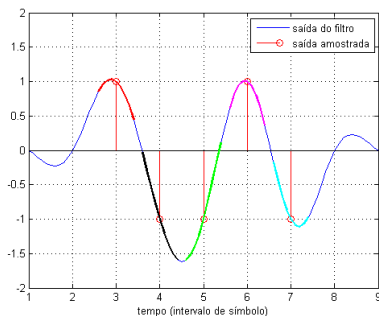


Figura: Recortes no Sinal Recevido

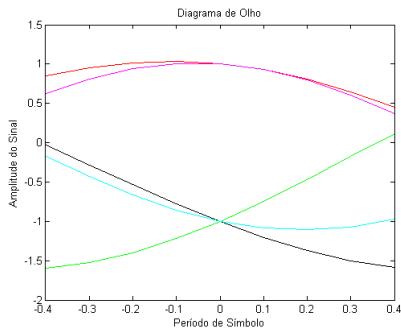


Figura: Diagrama de Olho

## Exemplo

Diagramas de olho sem, com pouco e com muito ruído

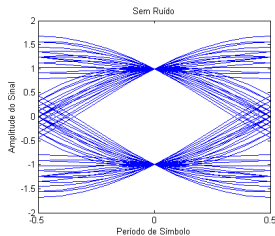


Figura: Sem Ruído

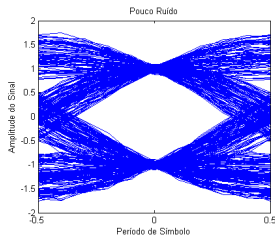


Figura: Pouco Ruído

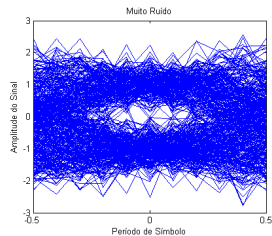


Figura: Muito Ruído

## Discussão

**Tarefa:** A abertura vertical do olho está relacionada com o que?

**Tarefa:** A abertura horizontal do olho está relacionada com o que?

**Tarefa:** Como ficaria o diagrama para o caso de 4-PAM?

# Canal Seletivo

## Introdução

- Até agora consideramos que o canal de banda limitada é plano.
- E se o canal não for plano, se for seletivo em frequência?

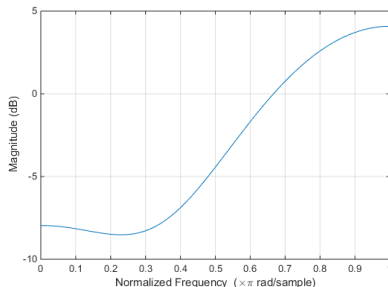


Figura: Resposta em frequência de um canal seletivo.



## Consequência

O sinal transmitido sofrerá uma filtragem indesejada, gerando IES.

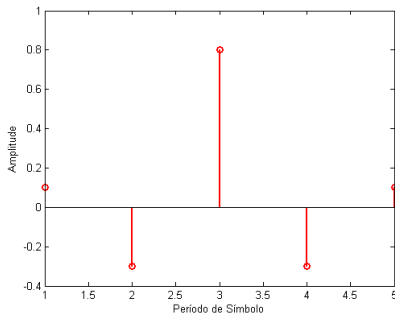


Figura: Resposta ao Impulso

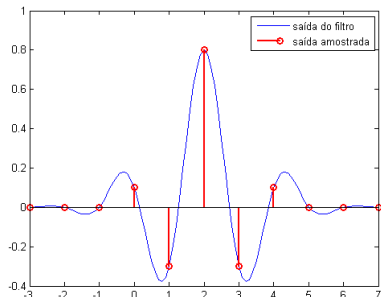


Figura: Saída do Filtro Casado

O pulso após a filtragem casada **não é um pulso de Nyquist!**

## Consequência

O efeito também pode ser visto pelo diagrama de olho.

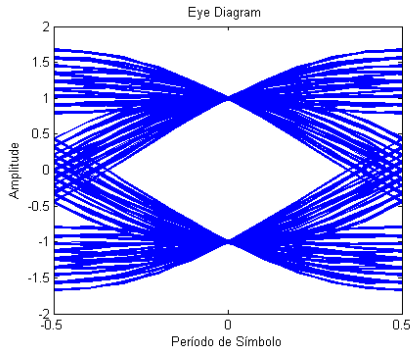


Figura: Canal Plano

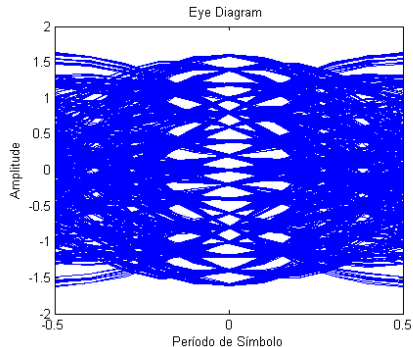


Figura: Canal Seletivo

Para combater a IES uma das opções é o uso de um **equalizador**.

# Equalização

## Introdução

- Seja  $h[n]$  a resposta ao impulso do canal seletivo amostrada a taxa de símbolos.
- A IES pode ser combatida no receptor por um equalizador, cuja resposta ao impulso é  $c[n]$ .
- O equalizador em geral é implementado como um filtro FIR.

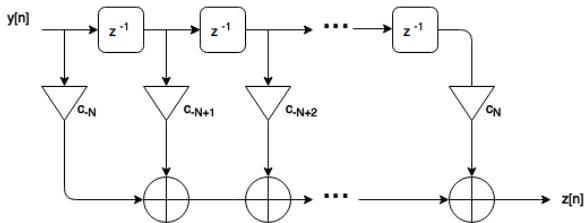


Figura: Diagrama de blocos de um equalizador como um filtro FIR.

## Definição

- O equalizador deveria “inverter” o efeito do canal,  $c[n] \star h[n] = \delta[n]$ .
- Os coeficientes  $c_n$  do equalizador (onde  $c[n] = c_n \delta[n]$ ) podem ser determinados a partir de:

$$\sum_{k=-N}^N c_k h_{n-k} = \begin{cases} 1, & n = 0 \\ 0, & n = \pm 1, \pm 2, \dots, \pm N \end{cases}.$$

## Definição

De forma matricial podemos reescrever a expressão como:

$$\begin{bmatrix} h_0 & \cdots & h_{-N+1} & h_{-N} & h_{-N-1} & \cdots & h_{-2N} \\ \vdots & \ddots & & & & & \\ h_{N-1} & \cdots & h_0 & h_{-1} & h_{-2} & \cdots & h_{-N-1} \\ h_N & \cdots & h_1 & h_0 & h_{-1} & \cdots & h_{-N} \\ h_{N+1} & \cdots & h_2 & h_1 & h_0 & \cdots & h_{-N+1} \\ \vdots & \ddots & & & & & \\ h_{2N} & \cdots & h_{N+1} & h_N & h_{N-1} & \cdots & h_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{-N} \\ \vdots \\ c_{-1} \\ c_0 \\ c_1 \\ \vdots \\ c_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

Este tipo de projeto gera um equalizador de forçagem a zero (ZF).

## Exemplo

Um equalizador ZF com três coeficientes pode ser projetado como

$$\begin{bmatrix} h_0 & h_{-1} & h_{-2} \\ h_1 & h_0 & h_{-1} \\ h_2 & h_1 & h_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{-1} \\ c_0 \\ c_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

## Exemplo

Sejam os coeficientes da resposta ao impulso do canal

$$[0.1; -0.3; 0.8; -0.3; 0.1]$$

Portanto:

$$\begin{bmatrix} 0.8 & -0.3 & 0.1 \\ -0.3 & 0.8 & -0.3 \\ 0.1 & -0.3 & 0.8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{-1} \\ c_0 \\ c_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

o que resulta em

$$\begin{bmatrix} c_{-1} \\ c_0 \\ c_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.55 \\ 1.67 \\ 0.55 \end{bmatrix}.$$



## Exemplo

Diagrama de olho antes e depois da equalização.

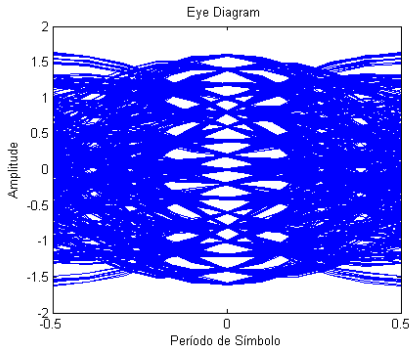


Figura: Antes do equalizador

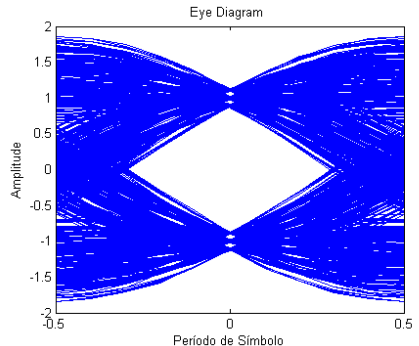


Figura: Após equalizador

O diagrama após a equalização ficou igual ao do canal plano?

## Exemplo

É comum ver o efeito do equalizador através da constelação.

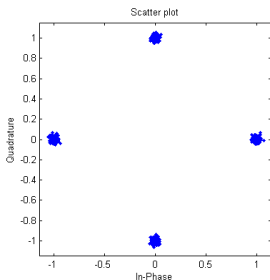


Figura: Canal Plano

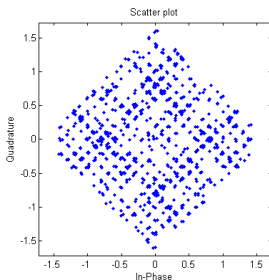


Figura: Canal Seletivo

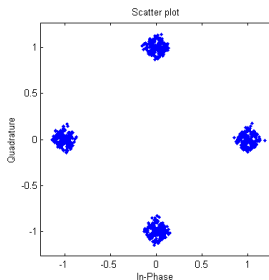


Figura: Equalizado

Constelações antes do decisor usando **modulação QPSK**

## Tarefas

- 1 Como é a resposta em frequência do canal telefônico?
- 2 O que é um equalizador MMSE?
- 3 Estudar os exemplos 3.5 e 3.6 do Sklar.
- 4 Exercício 3.18 do Sklar.
- 5 O que é OFDM?