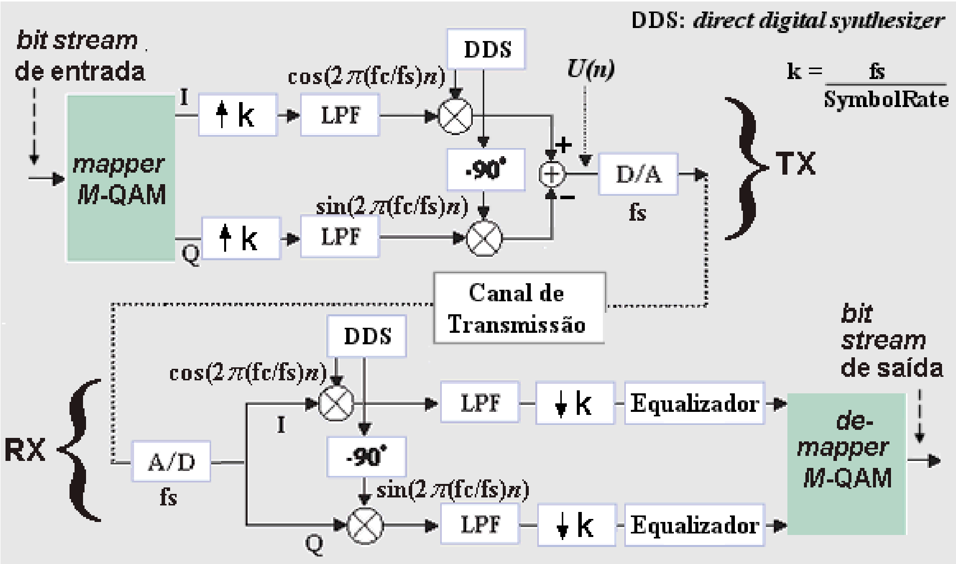
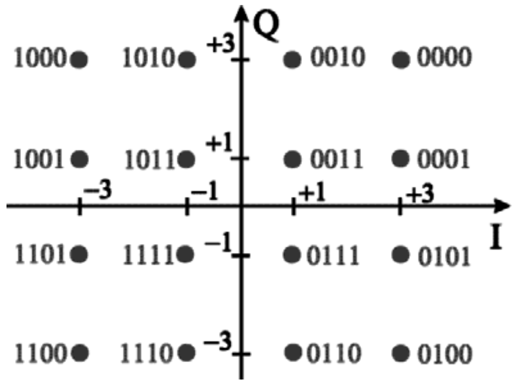
O diagrama na Figura 1 abaixo mostra a etapa de modulação de um sistema de comunicação digital:

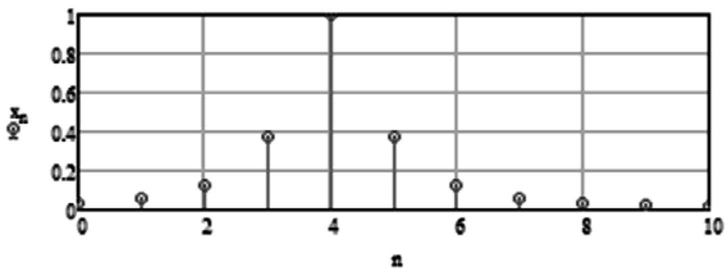




mapper & de-mapper

<u>Figura 1</u>: Etapa de modulação de um sistema de comunicação digital 16-QAM. O bloco "**Equalizador**" no RX é um filtro digital FIR (*Finite Impulse Response*) que efetua a convolução de sua resposta ao impulso com a resposta ao impulso do "Canal de Transmissão", de forma a minimizar os efeitos do multipercurso na curva de resposta em freqüência do sistema. O *shaping filter* (LPF) do TX e o *matched filter* (LPF) do RX são também filtros FIR com resposta ao impulso característica de uma resposta em freqüência tipo *root-raised-cosine*.

Sabe-se que o Canal de Transmissão é tal que o sistema opera sob multipercurso. Para caracterizar o cenário de multipercurso mediu-se em campo o *delay profile* do "Canal de Transmissão" e obteve-se a seguinte resposta discreta ao impulso $x(n)$:



x =

	0
0	0.036
1	0.062
2	0.129
3	0.372
4	1
5	0.372
6	0.129
7	0.062
8	0.036
9	0.023
10	0.016

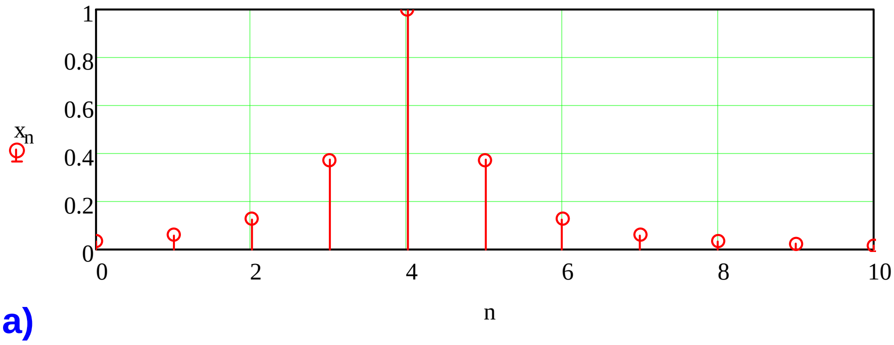
a) Utilizando a forma matricial $\underline{q} = \mathbf{X}\underline{c}$ da equação 8.6.27 do slide 114 "Projeto de Equalizadores ZF no Domínio Tempo" Vol 1 da apostila, onde $\mathbf{X}$ é definida pela resposta ao impulso do "Canal de Transmissão", determine o vetor $\underline{c} = \mathbf{X}^{-1}\underline{q}$ de 7 elementos que define a resposta ao impulso do filtro FIR do bloco "Equalizador" na Figura 1 tal que $\underline{q} = \begin{bmatrix}0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}^T$, i.e., determine $\underline{c}$ de forma ao sistema aproximar a condição *zero-forcing* (isto é, determine $\underline{c}$ de forma a minimizar os efeitos do multipercurso).

b) Plote o gráfico do sinal $y(n) = x(n) * c(n)$ na saída do bloco "Equalizador" na Figura 1, sendo $y(n)$ a convolução da resposta ao impulso $x(n)$ do "Canal de Transmissão" com a da resposta ao impulso $c(n) \leftarrow \underline{c}$ do "Equalizador".

c) Verifique o quanto a solução encontrada para $\underline{c}$ aproxima a condição *zero-forcing* calculando a $\text{ISI}_{(\text{peak})}$ (*peak intersymbol interference*) através de $\text{ISI}_{(\text{peak})} = \dfrac{\sum_k |y_k| - \max_k |y_k|}{\max_k |y_k|}$, onde y_k são os elementos do vetor $\underline{y}$ e que correspondem às amostras de $y(n)$ obtidas em b), isto é, $\underline{y} \leftarrow y(n)$.

d) Repita a), b) e c) utilizando um equalizador com um filtro FIR de 3 coeficientes ao invés de 7 e para $\underline{q} = \begin{bmatrix}0 & 1 & 0\end{bmatrix}^T$. Qual equalizador resulta no menor $\text{ISI}_{(\text{peak})}$?

Solução:



$$x = \begin{array}{c|c} & 0 \\ \hline 0 & 0.036 \\ 1 & 0.062 \\ 2 & 0.129 \\ 3 & 0.372 \\ 4 & 1 \\ 5 & 0.372 \\ 6 & 0.129 \\ 7 & 0.062 \\ 8 & 0.036 \\ 9 & 0.023 \\ 10 & 0.016 \end{array}$$

a)

$$X = \begin{pmatrix} 1 & 0.372 & 0.129 & 0.062 & 0.036 & 0 & 0 \\ 0.372 & 1 & 0.372 & 0.129 & 0.062 & 0.036 & 0 \\ 0.129 & 0.372 & 1 & 0.372 & 0.129 & 0.062 & 0.036 \\ 0.062 & 0.129 & 0.372 & 1 & 0.372 & 0.129 & 0.062 \\ 0.036 & 0.062 & 0.129 & 0.372 & 1 & 0.372 & 0.129 \\ 0.023 & 0.036 & 0.062 & 0.129 & 0.372 & 1 & 0.372 \\ 0.016 & 0.023 & 0.036 & 0.062 & 0.129 & 0.372 & 1 \end{pmatrix}$$

→ Matriz **X** da equação 8.6.27 do do slide 114 "Projeto de Equalizadores ZF no Domínio Tempo" Vol 1 da apostila escrita na forma matricial: **q=Xc**. A matrix **X** é denominada matriz de convolução do canal de transmissão.

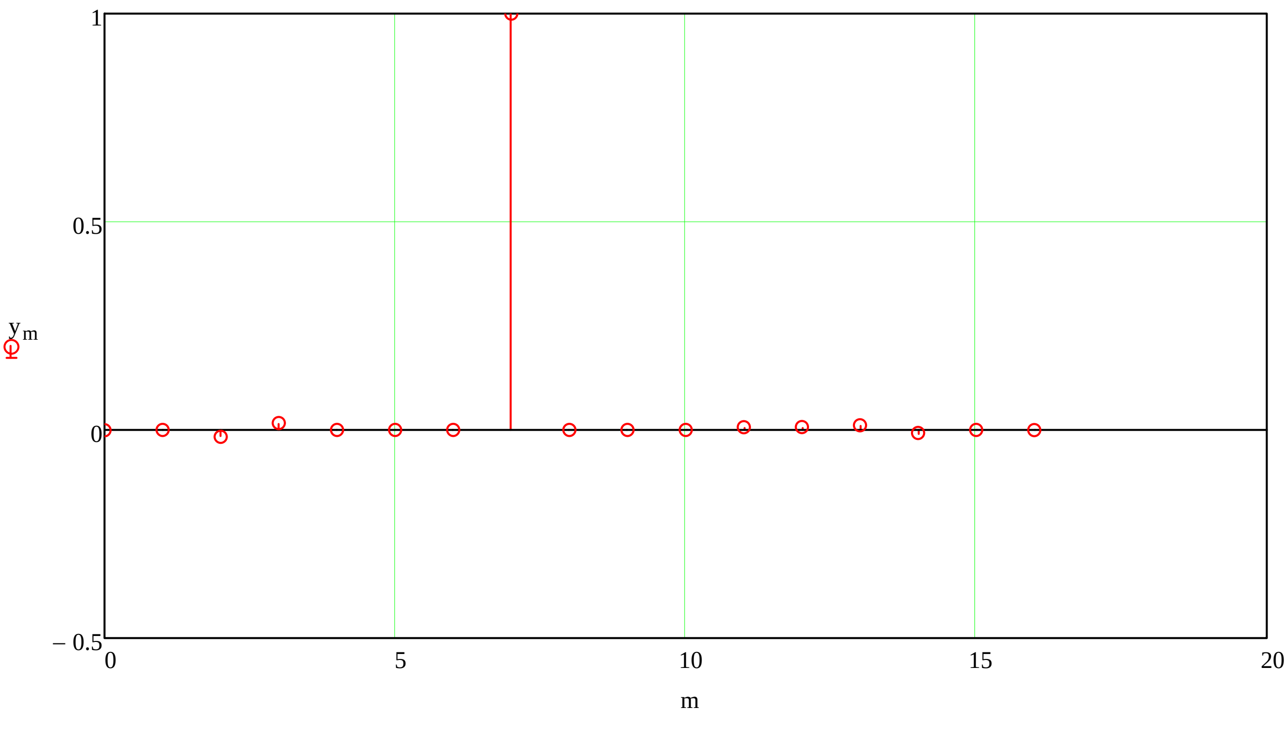
$$c\_ := X^{-1} \cdot q\_ \qquad q\_ = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \rightarrow c\_ = \begin{pmatrix} -0.019 \\ 0.028 \\ -0.444 \\ 1.326 \\ -0.445 \\ 0.029 \\ -0.02 \end{pmatrix}$$

→ c_ é o vetor que contém a seqüência de amostras correspondente à resposta ao impulso do equalizador que faz o sistema operar na condição zero-forcing (a solução que minimiza o problema do multipercurso)

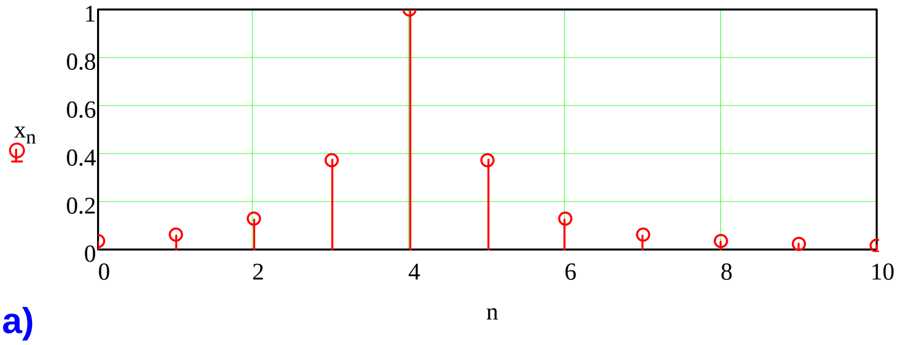
b & c)

$y := \text{Convolve}(x, c\_)$ → denota a operação de convolução entre as sequencias de amostras x (resposta ao impulso do canal) e c_ (resposta ao impulso do equalizador)

$$ISI := \frac{\sum \overrightarrow{|y|} - \max(|y|)}{\max(|y|)} \rightarrow ISI = 0.065$$



Solução item d):



a)

$$x = \begin{array}{c|c} & 0 \\ \hline 0 & 0.036 \\ 1 & 0.062 \\ 2 & 0.129 \\ 3 & 0.372 \\ 4 & 1 \\ 5 & 0.372 \\ 6 & 0.129 \\ 7 & 0.062 \\ 8 & 0.036 \\ 9 & 0.023 \\ 10 & 0.016 \end{array}$$

$$X = \begin{pmatrix} 1 & 0.372 & 0.129 \\ 0.372 & 1 & 0.372 \\ 0.129 & 0.372 & 1 \end{pmatrix}$$

→ Matriz **X** da equação 8.6.27 do do slide 114 "Projeto de Equalizadores ZF no Domínio Tempo" Vol 1 da apostila escrita na forma matricial: **q=Xc**. A matrix **X** é denominada matriz de convolução do canal de transmissão.

$$c\_ := X^{-1} \cdot q\_ \qquad q\_ = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \rightarrow \quad c\_ = \begin{pmatrix} -0.436 \\ 1.324 \\ -0.436 \end{pmatrix}$$

→ c_ é o vetor que contém a seqüência de amostras correspondente à resposta ao impulso do equalizador que faz o sistema operar na condição zero-forcing (a solução que minimiza o problema do multipercurso)

b & c)

$y := \mathrm{Convolve}(x, c\_)$ → denota a operação de convolução entre as sequencias de amostras x (resposta ao impulso do canal) e c_ (resposta ao impulso do equalizador)

$$ISI := \frac{\sum \overrightarrow{|y|} - \max(|y|)}{\max(|y|)} \quad \rightarrow \quad ISI = 0.128$$