

# AE1 - OFDM

Jessica de Souza, Luísa Machado

Engenharia de Telecomunicações, Instituto Federal de Santa Catarina

[jessica.souzajds@gmail.com](mailto:jessica.souzajds@gmail.com), [luisamachado@gmail.com](mailto:luisamachado@gmail.com)

27 de agosto de 2018

## 1. Introdução

O objetivo deste trabalho é aplicar os conhecimentos adquiridos sobre técnicas de modulação multiportadora, especificamente em OFDM (modulação por divisão ortogonal de frequência). Na modulação OFDM, a informação pode ser formatada utilizando técnicas como QAM ou PSK. Os dados antes de serem transmitidos, são divididos em diversos fluxos, os quais estão divididos em diferentes subcanais. A interferência intersimbólica neste tipo de modulação é menor, e pode até ser eliminada por completo através do uso do prefixo cíclico [1].

Para esta simulação, foram realizados quatro experimentos referente à OFDM: O primeiro consistiu em implementar um transmissor OFDM e realizar uma transmissão de dados, o segundo realizou a implementação de um receptor OFDM seguido de equalização e com variação de coeficientes de canal, o terceiro realiza o cálculo do desempenho de erro teórico e prático do sistema criado anteriormente. Por fim, o quarto experimento representa o sinal em sua envoltória instantânea e os seus respectivos espectros de frequência.

## 2. Metodologia

Os experimentos foram executados na ordem descrita na introdução. Para a realização das simulações foi utilizado o *software Octave*, sendo necessário carregar um pacote extra para executar o terceiro e o quarto experimento, o pacote *communications*, para isto no *prompt* de comando do *Octave* digita-se: *pkg load communications*. A seguir, o detalhamento de como foi realizado cada um deles.

## 2.1. Experimento 1

Na primeira questão foi implementado um transmissor OFDM com os parâmetros descritos a seguir. Foi realizada a Transformada Inversa de Fourier de uma sequência de dados  $X[k]$  e em seguida foi inserido o prefixo cíclico para que a informação possa ser transmitida através do canal.

- Sequência de símbolos da modulação:  $X[k] = [1 \ 1 \ -1 \ -1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1]$
- Número de subportadoras:  $N = 4$
- Comprimento do prefixo cíclico:  $\mu = 2$

A Figura 1 mostra o diagrama de blocos previsto para o transmissor OFDM.

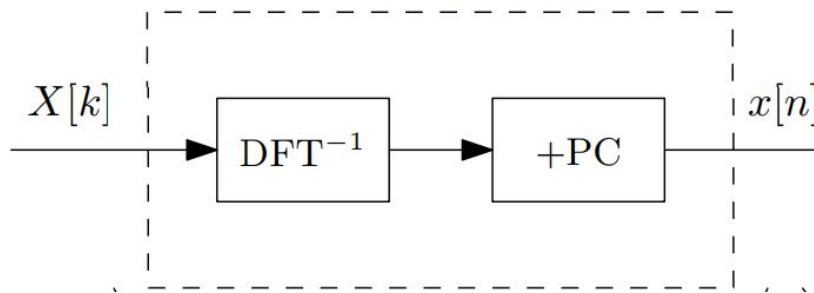


Figura 1 - Transmissor OFDM.

Antes de calcular a Transformada Inversa de Fourier do sinal é necessário fazer a paralelização do sinal da entrada. Em seguida, com o resultado da transformada podemos inserir o prefixo cíclico da informação. O último passo no processo que prepara o sinal para a transmissão é a serialização do sinal para transmitir no canal. O código a seguir apresenta todos os passos do realizados para fazer uma transmissão OFDM.

```
3 function x = transmissor(X, N, mi)
4     reshape_X = reshape(X, [N, length(X)/N]);
5     x_semPC = ifft(reshape_X);
6     aux = x_semPC(N - mi + 1: end, :);
7     x_comPC = [aux; x_semPC];
8
9     x = reshape(x_comPC, 1, []);
10 endfunction
```

Figura 2 - Código da função transmissor.

## 2.2. Experimento 2

O experimento dois implementa o receptor OFDM. Antes do sinal passar pelo receptor, é realizada a convolução do sinal transmitido  $x[n]$  (obtido no experimento 1) com o coeficiente de ganho do canal  $h[n]$ . Nesta simulação foi desconsiderado o efeito do ruído branco Gaussiano do canal, portanto na Figura 3, não implementamos a soma do sinal com  $W[k]$ . Os componentes implementados no receptor são o sinal recebido do canal  $X[k]$ , os coeficientes do canal  $H[k]$  e o equalizador.

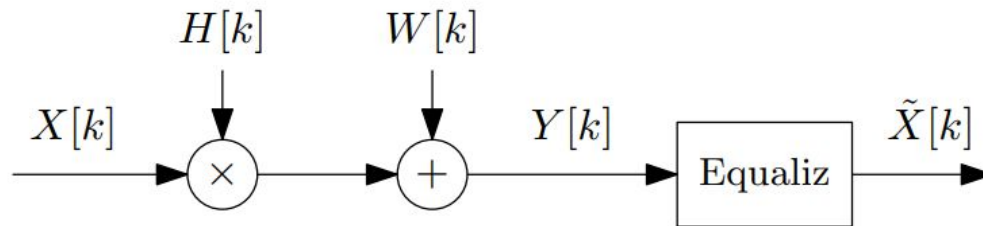


Figura 3 -Receptor OFDM.

O código do receptor tem os seguintes parâmetros de entrada: A sequência recebida do canal  $y[n]$  (que é a convolução entre  $x[n]$  e  $h[n]$ ), o número de subportadoras  $N$ , o comprimento do prefixo cíclico  $\mu$  e o ganho do canal  $h[n]$ . No receptor, para que se possa realizar a recuperação do sinal, foi realizada a Transformada de Fourier dos sinais  $y[n]$  e  $h[n]$  para facilitar esta parte da operação, assim é preciso fazer uma simples divisão de  $Y[k]$  por  $H[k]$ . A seguir o código referente ao receptor OFDM.

```
10 function X_til = receptor(y, N, mi, h)
11     reshape_y = reshape(y, (N + mi), []);
12     y_semPC = reshape_y(mi + 1 : end, :);
13     H = fft(h, N);
14     Y = fft(y_semPC, N);
15     aux = Y ./ repmat(H, 1, size(Y, 2));
16
17     X_til = reshape(aux, 1, []);
18 endfunction
```

Figura 4 - Código da função receptor.

Para realizar alguns testes neste receptor, foi feita a variação do fator  $h[n]$  para quatro casos: (a)  $[1]$ , (b)  $[1 \ 0,25]$ , (c)  $[1 \ 0,25 \ 0,5]$  e (d)  $[1 \ 0,25 \ 0,5 \ 0,25]$ . Obtivemos os seguintes resultados no receptor para cada variação de  $h[n]$ .

- Para (a)  $h[n] = [1]$ , (b)  $h[n] = [1 \ 0,25]$  e (c)  $h[n] = [1 \ 0,25 \ 0,5]$ :
  - $X_{\text{til}} = [1 \ 1 \ -1 \ -1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1]$
- Para (d)  $h[n] = [1 \ 0,25 \ 0,5 \ 0,25]$ :
  - $X_{\text{til}} = [0.94 - 0.06i \ 0.75 - 0.25i \ -1.13 - 0.13i \ -1.25 - 0.25i \ -0.94 - 0.06i \ 1.25 - 0.25i \ -0.88 - 0.13i \ 1.25 - 0.25i]$

Para os casos (a), (b) e (c) o resultado na saída do receptor foi igual ao sinal original  $X[k]$ , ou seja, mesmo com a variação dos coeficientes do canal, o valor na saída do receptor não foi alterado. Enquanto no caso (d), podemos observar que o resultado na saída em  $X_{\text{til}}$  foi alterado para valores aproximados, porém com componentes complexas. Isso se deve ao fato de que o coeficiente  $h[n]$  não obedeceu à equação a seguir:

$$\mu \geq \text{length}(h[n]) - 1$$

Nas questões de (a) até (c), o comprimento do prefixo cíclico que era 2, mantinha o comprimento de  $h[n]$  dentro do parâmetro mostrado na equação acima. Porém em (d) o prefixo cíclico é menor do que o número de componentes em  $h[n]-1$ , causando uma maior interferência entre os canais e assim alterando o sinal na saída. Mesmo assim, se for colocado ao final do sistema um limiar de decisão, é possível com um passo a mais de processamento, obter o sinal original na saída de acordo com este caso.

### 2.3. Experimento 3

No terceiro experimento, foi utilizado ambos receptor e transmissor para simular um envio e recebimento de dados com modulação OFDM. Foi realizada a simulação do desempenho deste sistema e as probabilidades de erro de bit do canal. Foram utilizados os seguintes parâmetros para a simulação:

- Modulação BPSK.
- Número de subportadoras:  $N = 16$ .
- Comprimento do prefixo cíclico:  $\mu = 4$ .
- Número de blocos OFDM transmitidos:  $L = 50.000$ .
- Canal de comunicação dado por  $h[n] = [2 \ -0,5 \ 0,5]$ .
- $E_b/N_0$  no RX variando de 0 a 10 dB, com passo de 1 dB.

Foi gerado um vetor de informação com tamanho  $N \times L$ , que considera o número de blocos total e as subportadoras. Logo em seguida, a informação foi transformada de binária para polar e transmitida através da função construída na questão 1. O resultado da informação transmitida é convolvido com o canal  $h[n]$  antes de passar pelo receptor desenvolvido na questão 2. Logo após, foi criado um *for loop* para variar o valor de  $E_b/N_0$  na adição do ruído branco gaussiano, que foi adicionado no canal do receptor. Por fim, ainda no *for loop* é realizado os cálculos da probabilidade de erro de bit teórica e prática. A probabilidade de erro prática foi calculada através da função `biterr()`, comparando a informação gerada sem ser polar e a informação recebida com delimitador maior do que 0. Já na probabilidade de erro teórica foi utilizada a função `qfunc( $\sqrt{2 \frac{E_b}{N_0}}$ )` para realizar o cálculo de erro de bit. A seguir o código desenvolvido para esta simulação:

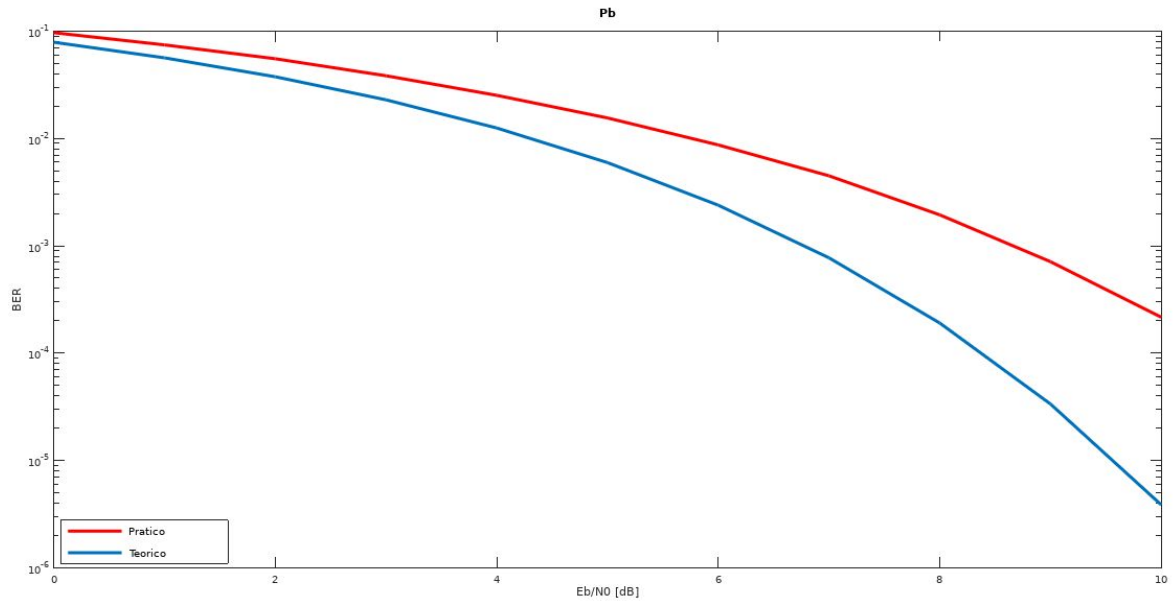
```

17 info = randint(1, N*L, 2);
18 X = pskmod(info, 2);
19 x = transmissor(X, N, mi);
20 y = filter(h,1,x); % convolucao antes de ir para Rx
21
22 Eb_No_max = 10;
23 for Eb_No = 0 : Eb_No_max
24     info_rec = awgn(y, Eb_No, 'measured');
25     X_til = receptor(info_rec, N, mi, h);
26     info_demod = pskdemod(X_til, 2);
27     % BER (Taxa de erro):
28     [num_erro(Eb_No + 1), taxa_erro(Eb_No + 1)] = biterr(info, info_demod>0);
29     Pb(Eb_No + 1) = qfunc(sqrt(2*10^(Eb_No/10)));
30 end

```

Figura 5 - Código do experimento 3.

A Figura 6 mostra o resultado do código construído acima, podemos observar que a probabilidade de erro de bit teórica apresenta um melhor desempenho em relação à prática.



**Figura 6 - Probabilidade de erro de bit: prática (laranja) e teórica (azul).**

## 2.4. Experimento 4

O experimento 4 consiste em plotar as envoltórias dos sinais de  $x[n]$  e  $y[n]$  e seus respectivos espectros. Os seguintes parâmetros foram utilizados neste experimento:

- Modulação BPSK.
- Taxa de bits de informação:  $R_b^{\text{info}} = 16$  Mbps.
- Número de subportadoras:  $N = 64$ .
- Comprimento do prefixo cíclico:  $\mu = 16$ .
- Número de blocos OFDM transmitidos:  $L = 100$ .
- Canal de comunicação dado por  $h[n] = [2/\sqrt{5} \ 0 \ 1/\sqrt{5}]$ .
- Ausência de ruído.

Para esse experimento não foi necessário fazer a recepção do sinal, apenas foi realizada a transmissão da informação utilizando o transmissor programado na questão 1, sendo que o  $x(t)$  é o resultado na saída da função transmissor, e  $y(t)$  é o  $x(t)$  convolvido com o  $h(t)$ . A seguir está apresentado o código feito para este experimento.

```

21 info = randint(1, N*L, 2);
22 X = pskmod(info, 2);
23 x = transmissor(X, N, mi);
24
25 % convolucao
26 y = filter(h,1,x);
27
28 % superamostrando o sinal para a interpolacao
29 xx = resample(x,Nsamp,1);
30 yy = resample(y,Nsamp,1);
31
32 % vetor de tempo:
33 aux = mi/N; % considera o PC para taxa de simbolos
34 fa = Nsamp * Rb * (1 + aux);
35 t = (0:(length(xx)-1))/length(xx);
36
37 % vetor de frequencia:
38 f = (t.*fa)-fa/2;
39
40 % Transformada
41 XX = fftshift(fft(xx));
42 YY = fftshift(fft(yy));

```

Figura 7 - Código do experimento 4.

Na Figura 8 estão apresentadas a envoltória do sinal de  $x[n]$  e o seu espectro de frequência, respectivamente. Enquanto a Figura 9, apresenta a envoltória e o espectro de  $y[n]$ , respectivamente. Para os sinais em  $y[n]$ , foi realizada a interpolação dos sinais utilizando um fator de superamostragem  $N_{\text{samp}} = 5$ .

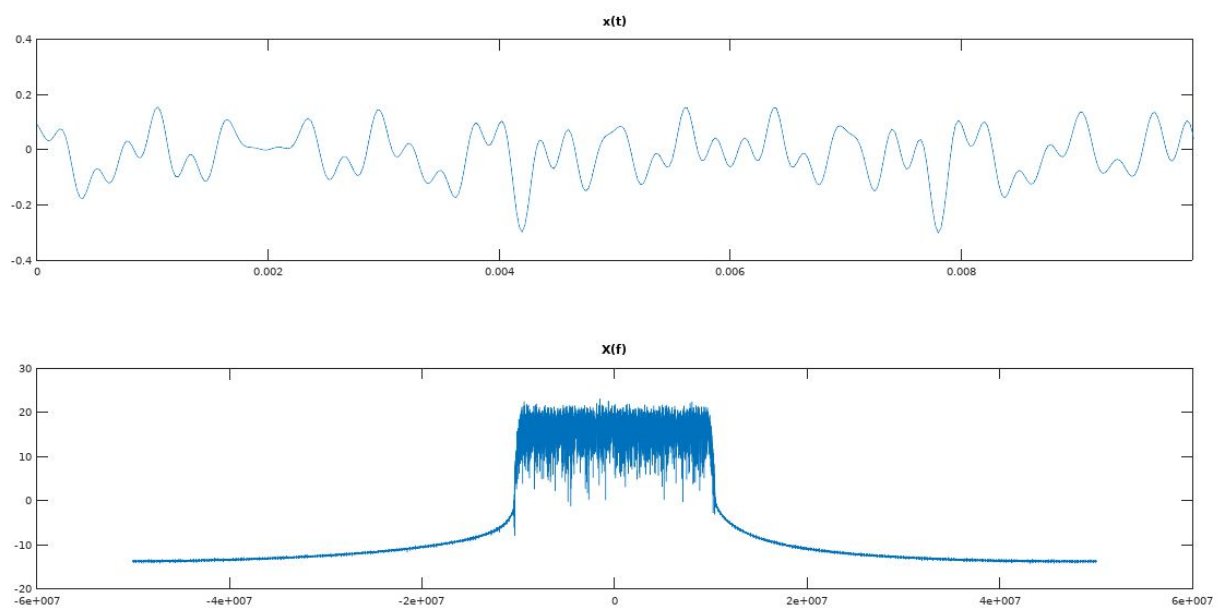
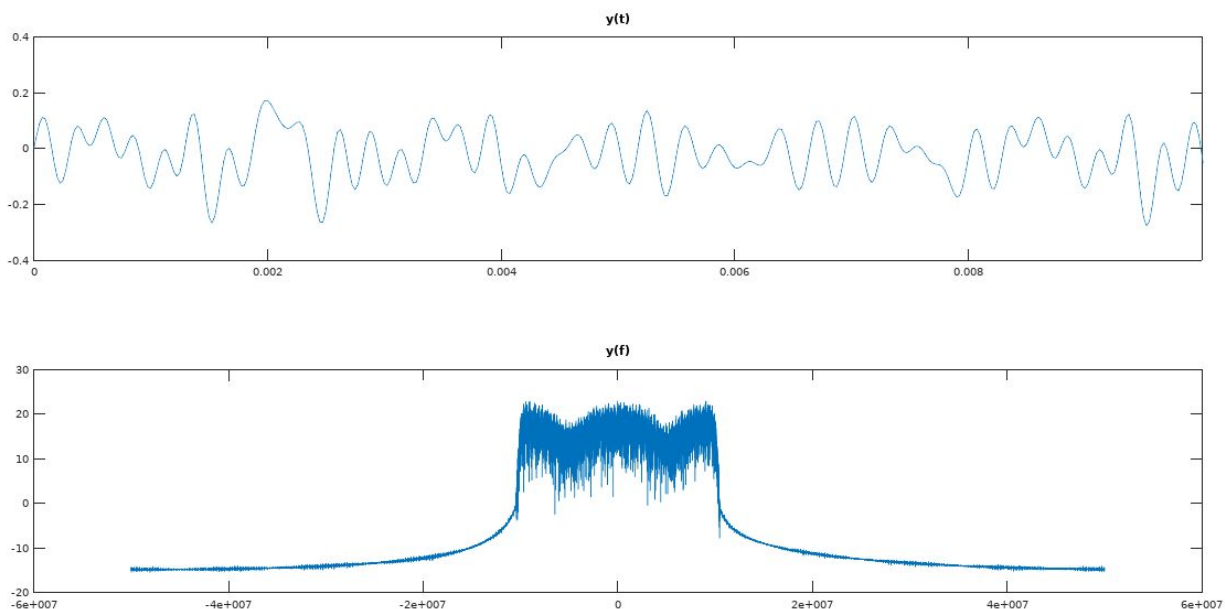


Figura 8 -  $x(t)$  no tempo e na frequência.



**Figura 9 -  $y(t)$  no tempo e na frequência.**

Ao comparar as Figuras 8 e 9, podemos observar que aumentando o número de amostras para a interpolação, a largura de banda diminui, se tornando mais seletivo no espectro de frequência. Porém isso trás uma menor imunidade à erros e distorções, o que foi o caso da figura 9. Mesmo assim, a informação ainda consegue ser recuperada se utilizado um equalizador após a obtenção de  $y[t]$ .

### **3. Conclusão**

Este trabalho buscou explorar a técnica de modulação OFDM, de forma a simular uma transmissão e recepção de sinal completa. Pode-se observar a importância da definição dos parâmetros do sistema, tais como o prefixo cíclico e número de subportadoras. A modulação OFDM é considerada robusta devido a sua junção de altas taxas de transmissão e utilização de subportadoras para transmitir dados, além de ser mais imune a erros.

### **4. Referências**

[1] GOLDSMITH, A. Wireless Communications. Stanford University. 2004.