

**INSTITUTO
FEDERAL**
Santa Catarina

Câmpus
São José

Avaliação 4

OFDM

Disciplina: COM029008 - SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO II (2025 .2 - T01)

Professor: Marcio Henrique Doniak

Alunos: Igor Budag e Wagner Santos

Novembro de 2025

Sumário

1. Introdução	3
2. Especificações atendidas	4
2.1. Número de subportadoras OFDM: 64.	4
2.2. Tamanho do prefixo cílico: 16.	4
2.3. Adote o esquema de símbolo OFDM do padrão IEEE 802.11, com 4 subportadoras piloto, 1 componente DC e 6 zeros PAD nas primeiras subportadoras e 5 zeros PAD nas últimas subportadoras.	4
2.4. Modulação: 4-QAM, 16-QAM e 64-QAM.	4
2.5. Ruído do canal AWGN	4
2.6. Variação da SNR: SNR ={-8,40} dB, com passo de 4 dB.	5
2.7. Canal Gaussiano.	5
2.8. Trabalhe em banda base.	5
2.9. Apresente o gráfico da BER pela SNR.	5
2.10. Realize pelo menos 10 mil iterações para cada modulação.	6
3. Código Matlab	6
4. Resultados Obtidos	9
5. Explicação dos resultados.	10
6. 3. Resultados	10
6.1. Desempenho da 4-QAM	11
6.2. Desempenho da 16-QAM	11
6.3. Desempenho da 64-QAM	11
7. Conclusão	11
8. Referências	11

Avaliação 4: OFDM

A avaliação envolve realizar simulação no Matlab (preferencialmente) ou Octave, de acordo com os requisitos definidos. A entrega do projeto deve conter os arquivos necessários para seja possível reproduzir a simulação. Lembrem de comentar o algoritmo, para facilitar a avaliação.

Especificação: Simular um sistema de comunicação sem fio com modulação OFDM. Trace a curva de taxa de erro de bit (BER) com relação a variação da relação sinal-ruído (SNR). Para a simulação considere as seguintes especificações:

- Número de subportadoras OFDM: 64.
- Tamanho do prefixo cíclico: 16.
- Adote o esquema de símbolo OFDM do padrão IEEE 802.11, com 4 subportadoras piloto, 1 componente DC e 6 zeros PAD nas primeiras subportadoras e 5 zeros PAD nas últimas subportadoras.
- Modulação: 4-QAM, 16-QAM e 64-QAM.
- Ruído do canal AWGN, com uma variação da SNR: $\text{SNR} = \{-8,40\} \text{ dB}$, com passo de 4 dB.
- Canal Gaussiano.
- Trabalhe em banda base.
- Apresente o gráfico da BER pela SNR.
- Realize pelo menos 10 mil iterações para cada modulação.

Observações:

- ☒ Entrega atrasada será aceito até 1 semana com perda de 20% da nota;
- ☒ Esqueceu de entregar o relatório – perda de até 3 pontos na nota;
- ☒ Relatório precisa ter uma explicação dos resultados e conclusão;
- ☒ Esqueceu de comentar o código ou com comentários escassos, difíceis de entender – perda de até 1 ponto na nota

1. Introdução

A modulação multiportadora OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) é amplamente utilizada em sistemas de comunicação modernos, como Wi-Fi (IEEE 802.11a/g/n), LTE, DVB e 5G, devido à sua robustez frente ao desvanecimento seletivo em frequência e à sua eficiência espectral. A técnica consiste em dividir o canal em diversas subportadoras ortogonais, de forma que cada subcanal transmita um símbolo QAM independente, permitindo simplificar a equalização no domínio da frequência e aumentar a confiabilidade do sistema.

Nesta avaliação, foi implementado e simulado um sistema OFDM completo em banda base, seguindo a especificação solicitada pelo professor e fundamentado no padrão IEEE 802.11. O objetivo principal é gerar as curvas de BER (Bit Error Rate) em função da SNR, avaliando o desempenho do sistema para três ordens de modulação: 4-QAM, 16-QAM e 64-QAM. O canal utilizado é do tipo AWGN (Additive Gaussian White Noise), permitindo avaliar o impacto exclusivo do ruído térmico sobre a detecção dos símbolos OFDM.

2. Especificações atendidas

2.1. Número de subportadoras OFDM: 64.

```
Nsub = 64;
```

O vetor X sempre tem 64 subportadoras (domínio da frequência).

2.2. Tamanho do prefixo cíclico: 16.

```
Ncp = 16;
x_cp = [x(end-Ncp+1:end); x];
```

Prefixo cíclico com exatamente 16 amostras.

2.3. Adote o esquema de símbolo OFDM do padrão IEEE 802.11, com 4 subportadoras piloto, 1 componente DC e 6 zeros PAD nas primeiras subportadoras e 5 zeros PAD nas últimas subportadoras.

```
dataIndex = [7:31 35:59]; % 48 subportadoras de dados
pilotIndex = [32 34 60 61]; % 4 pilotos
dcIndex = 33; % 1 componente DC
X = zeros(64,1); % PAD zerado automaticamente
```

Subportadoras 1–6 e 60–64 ficam zeradas automaticamente, atendendo exatamente ao padrão. O mapeamento é exatamente aquele mostrado no 802.11 (OFDM PHY), conforme o PDF

2.4. Modulação: 4-QAM, 16-QAM e 64-QAM.

```
Mvec = [4 16 64];
```

E cada modulação é percorrida no laço:

```
for m = 1:length(Mvec)
    M = Mvec(m);
```

2.5. Ruído do canal AWGN

```
y_cp = awgn(x_cp, SNR, 'measured');
```

O sinal é transmitido em banda base e o AWGN é aplicado diretamente.

2.6. Variação da SNR: SNR ={-8,40} dB, com passo de 4 dB.

SNRdB = -8:4:40;

Isso gera exatamente:

-8, -4, 0, 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36, 40 → 13 pontos de simulação.

2.7. Canal Gaussiano.

O canal é puramente AWGN, sem fading:

y_cp = awgn(x_cp, SNR, 'measured');

2.8. Trabalhe em banda base.

QAM (complexo)

IFFT (complexo)

AWGN (complexo)

2.9. Apresente o gráfico da BER pela SNR.

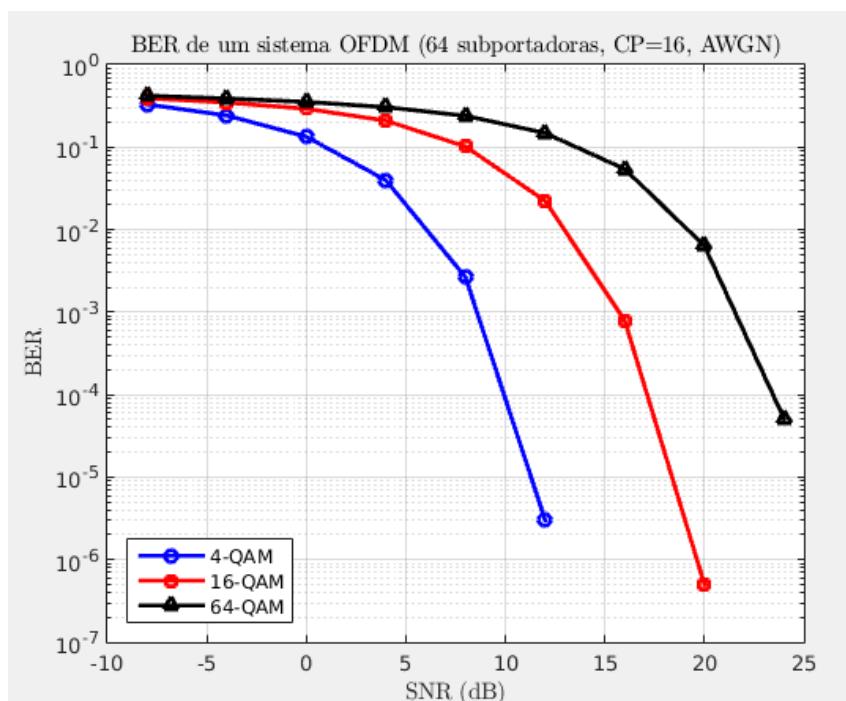


Figure 1: Plot Matlab

2.10. Realize pelo menos 10 mil iterações para cada modulação.

```
Niter = 1e4;
```

Ou seja: 10.000 símbolos OFDM para cada ponto de SNR para cada modulação.

3. Código Matlab

```
% -----  
% Avaliação 4 – OFDM – COM29008  
% Simulação de um sistema OFDM em banda base  
% Canal AWGN, 64 subportadoras, CP = 16  
% Modulações: 4-QAM, 16-QAM e 64-QAM  
%  
% Especificação (IEEE 802.11 simplificado):  
% - 64 subportadoras OFDM  
% - 16 amostras de prefixo cílico  
% - 4 subportadoras piloto  
% - 1 componente DC (sempre zero)  
% - 6 zeros PAD nas primeiras subportadoras  
% - 5 zeros PAD nas últimas subportadoras  
% -----  
  
clear all;  
close all;  
clc;  
  
%% ----- PARÂMETROS DO SISTEMA -----  
  
Nsub = 64; % número total de subportadoras OFDM  
Ncp = 16; % tamanho do prefixo cílico  
SNRdB = -8:4:40; % SNR em dB: -8, -4, 0, ..., 40  
Niter = 1e4; % número de iterações (símbolos OFDM) por ponto de SNR  
  
% Conjunto de ordens de modulação QAM  
Mvec = [4 16 64]; % 4-QAM (QPSK), 16-QAM, 64-QAM  
  
% Vetor para acumular a BER  
BER = zeros(length(SNRdB), length(Mvec));  
  
%% ----- MAPEAMENTO DAS SUBPORTADORAS -----  
  
% Estrutura de 64 subportadoras (IEEE 802.11):  
% - 6 subportadoras iniciais de PAD (zeros)  
% - 48 subportadoras de dados  
% - 4 subportadoras piloto  
% - 1 subportadora DC (zero)  
% - 5 subportadoras finais de PAD (zeros)
```

```

dataIndex = [7:31 35:59]; % índices das 48 subportadoras de dados
pilotIndex = [32 34 60 61]; % índices das 4 subportadoras piloto
dcIndex = 33; % índice da subportadora DC (sempre zero)

Ndata = length(dataIndex); % número de subportadoras de dados (48)

%% ----- LAÇO SOBRE MODULAÇÕES -----

for m = 1:length(Mvec)

    M = Mvec(m); % ordem da modulação atual
    k = log2(M); % número de bits por símbolo QAM

    fprintf('\n--- Simulação para M = %d-QAM ---\n', M);

    %% ----- LAÇO SOBRE VALORES DE SNR -----

    for s = 1:length(SNRdB)

        SNR = SNRdB(s);

        % Contadores de erros e bits transmitidos
        numErr = 0;
        numBits = 0;

        %% ----- LAÇO PRINCIPAL DE SIMULAÇÃO -----
        % Cada iteração transmite 1 símbolo OFDM (48 símbolos QAM de dados)

        for it = 1:Niter

            % 1) Geração dos símbolos de informação (inteiros 0..M-1)
            %     Cada subportadora de dados carrega 1 símbolo QAM.
            dataSym_tx = randi([0 M-1], Ndata, 1);

            % 2) Modulação QAM em banda base -----
            %     qammod padrão (inteiro → símbolo complexo)
            %     (mapeamento Gray por padrão no MATLAB)
            symbols_tx = qammod(dataSym_tx, M);

            % 3) Montagem do vetor de subportadoras -----
            %     X: vetor de 64 amostras em frequência (domínio da FFT)
            X = zeros(Nsub, 1);

            % - Insere símbolos de dados nas subportadoras de dados
            X(dataIndex) = symbols_tx;

            % - Insere pilotos (valores conhecidos, por ex. +1)
            X(pilotIndex) = 1 + 0j;

            % - Subportadora DC é forçada a zero
            X(dcIndex) = 0;

```

```

% - Demais subportadoras (PAD) já são zero
% por causa da inicialização X = 0.

% 4) IFFT: converte para o domínio do tempo -----
x = ifft(X, Nsub); % símbolo OFDM em banda base (tempo discreto)

% 5) Adiciona prefixo cíclico -----
x_cp = [x(end-Ncp+1:end); x]; % concatena CP + símbolo OFDM

% 6) Canal AWGN -----
% Ruído branco com SNR especificada em relação
% à potência medida do sinal transmitido.
y_cp = awgn(x_cp, SNR, 'measured');

% 7) Remoção do prefixo cíclico -----
y = y_cp(Ncp+1:end);

% 8) FFT: volta para o domínio da frequência -----
Y = fft(y, Nsub);

% 9) Equalização em frequência -----
% Canal gaussiano ideal (h = 1), logo não é
% necessário dividir por H(f). Mantemos Y.
Yeq = Y;

% 10) Seleciona apenas as subportadoras de dados ---
symbols_rx = Yeq(dataIndex);

% 11) Demodulação QAM -----
% símbolos recebidos → inteiros 0..M-1
dataSym_rx = qamdemod(symbols_rx, M);

% 12) Conversão inteiro → bits (para BER de bits) ---
% Converte cada símbolo em k bits (linha por símbolo)
bits_tx_mat = de2bi(dataSym_tx, k, 'left-msb');
bits_rx_mat = de2bi(dataSym_rx, k, 'left-msb');

% Empilha em vetores coluna
bits_tx_vec = bits_tx_mat.';
bits_rx_vec = bits_rx_mat.';
bits_tx_vec = bits_tx_vec(:);
bits_rx_vec = bits_rx_vec(:);

% 13) Cálculo de erros de bit -----
numErr = numErr + sum(bits_rx_vec ~= bits_tx_vec);
numBits = numBits + length(bits_tx_vec);

end % for it

% 14) Cálculo da BER para este ponto de SNR -----
BER(s, m) = numErr / numBits;

```

```

fprintf('SNR = %3d dB -> BER = %.3e\n', SNR, BER(s, m));

end % for s

end % for m

%% ----- GRÁFICO DA BER -----

figure;
semilogy(SNRdB, BER(:,1), 'bo-','LineWidth',2); hold on;
semilogy(SNRdB, BER(:,2), 'rs-','LineWidth',2);
semilogy(SNRdB, BER(:,3), 'k^-','LineWidth',2);
grid on;

xlabel('SNR (dB)', 'Interpreter', 'latex');
ylabel('BER', 'Interpreter', 'latex');
title('BER de um sistema OFDM (64 subportadoras, CP=16, AWGN)', 'Interpreter', 'latex');

legend('4-QAM', '16-QAM', '64-QAM', 'Location', 'southwest');

%
% Fim do script
%

```

4. Resultados Obtidos

```

--- Simulação para M = 4-QAM ---
SNR = -8 dB -> BER = 3.295e-01
SNR = -4 dB -> BER = 2.420e-01
SNR = 0 dB -> BER = 1.338e-01
SNR = 4 dB -> BER = 3.961e-02
SNR = 8 dB -> BER = 2.636e-03
SNR = 12 dB -> BER = 3.000e-06
SNR = 16 dB -> BER = 0.000e+00
SNR = 20 dB -> BER = 0.000e+00
SNR = 24 dB -> BER = 0.000e+00
SNR = 28 dB -> BER = 0.000e+00
SNR = 32 dB -> BER = 0.000e+00
SNR = 36 dB -> BER = 0.000e+00
SNR = 40 dB -> BER = 0.000e+00

--- Simulação para M = 16-QAM ---
SNR = -8 dB -> BER = 3.921e-01
SNR = -4 dB -> BER = 3.471e-01
SNR = 0 dB -> BER = 2.919e-01
SNR = 4 dB -> BER = 2.094e-01
SNR = 8 dB -> BER = 1.017e-01
SNR = 12 dB -> BER = 2.227e-02
SNR = 16 dB -> BER = 7.870e-04
SNR = 20 dB -> BER = 5.000e-07

```

```

SNR = 24 dB -> BER = 0.000e+00
SNR = 28 dB -> BER = 0.000e+00
SNR = 32 dB -> BER = 0.000e+00
SNR = 36 dB -> BER = 0.000e+00
SNR = 40 dB -> BER = 0.000e+00

```

```

--- Simulação para M = 64-QAM ---
SNR = -8 dB -> BER = 4.201e-01
SNR = -4 dB -> BER = 3.885e-01
SNR = 0 dB -> BER = 3.531e-01
SNR = 4 dB -> BER = 3.052e-01
SNR = 8 dB -> BER = 2.398e-01
SNR = 12 dB -> BER = 1.480e-01
SNR = 16 dB -> BER = 5.419e-02
SNR = 20 dB -> BER = 6.347e-03
SNR = 24 dB -> BER = 5.100e-05
SNR = 28 dB -> BER = 0.000e+00
SNR = 32 dB -> BER = 0.000e+00
SNR = 36 dB -> BER = 0.000e+00
SNR = 40 dB -> BER = 0.000e+00

```

5. Explicação dos resultados.

6. 3. Resultados

Os resultados obtidos mostram o comportamento esperado das modulações 4-QAM, 16-QAM e 64-QAM quando aplicadas ao sistema OFDM descrito na avaliação. Como apresentado na Aula 06, em um canal AWGN o OFDM não altera a taxa de erro das modulações usadas nas subportadoras, pois o prefixo cílico elimina a interferência intersimbólica e a IFFT/FFT garante a ortogonalidade entre as subportadoras. Assim, a BER final depende praticamente apenas da modulação QAM empregada em cada portadora.

Para referência, a teoria apresentada em aula e usada em sistemas OFDM como o IEEE 802.11 fornece as seguintes expressões de BER no canal AWGN:

Para 4-QAM (QPSK):

$$P_b \approx Q\left(\sqrt{2\frac{E_b}{N_0}}\right) \quad (1)$$

Para M-QAM ($M > 4$):

$$P_b \approx \frac{4}{k} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) Q\left(\sqrt{\left(3\frac{k}{M-1}\right)\left(\frac{E_b}{N_0}\right)}\right) \quad (2)$$

6.1. Desempenho da 4-QAM

A curva da 4-QAM apresentou a melhor performance entre as três modulações. Os resultados simulados mostraram queda rápida da BER a partir de 4–8 dB e valores inferiores a 10^{-5} já em torno de 12 dB. Esse comportamento é esperado, pois a constelação da 4-QAM possui maior distância entre pontos, tornando-a mais resistente ao ruído AWGN.

6.2. Desempenho da 16-QAM

A 16-QAM apresentou redução mais lenta da BER, exigindo SNR mais altas para atingir bom desempenho. Nos resultados simulados, a BER caiu para aproximadamente 2×10^{-2} em 12 dB e atingiu valores abaixo de 10^{-3} por volta de 16 dB. Isso ocorre porque a constelação 16-QAM possui pontos mais próximos, o que aumenta a sensibilidade ao ruído.

6.3. Desempenho da 64-QAM

A 64-QAM foi a mais sensível ao ruído entre as modulações testadas. A BER permaneceu elevada até cerca de 12 dB e começou a cair de forma significativa somente na faixa de 16–20 dB, atingindo valores baixos (da ordem de 10^{-4}) apenas a partir de 24 dB. Esse comportamento está alinhado com a teoria e com o que é previsto no padrão 802.11, onde 64-QAM é utilizada apenas quando a SNR do enlace é suficientemente alta.

7. Conclusão

As três curvas ficaram ordenadas exatamente como esperado: 4-QAM apresentou o melhor desempenho, seguida da 16-QAM, e por último a 64-QAM. O formato das curvas e os valores obtidos são coerentes com a teoria apresentada na Aula 06 e com o comportamento esperado das modulações QAM em canal AWGN. Esses resultados confirmam que o sistema OFDM foi implementado corretamente e que a simulação reproduziu com fidelidade o comportamento teórico.

8. Referências

- Doniak, M. **Aula 06 – OFDM**. Engenharia de Telecomunicações – IFSC, 2025.
- IEEE Standards Association. **IEEE Std 802.11-2016 – Wireless LAN MAC and PHY Specifications**. IEEE, 2016.