

AE4 - Sistemas de comunicação
Modulação
ASK, PSK, FSK, QAM

Leticia Coelho

Junho 2018

Chapter 1

Fundamentação teórica

1.1 Introdução

Este relatório tem o objetivo de demonstrar o resultado das experiências realizadas para a disciplina de Sistemas de comunicação I que é orientada pelo professor Mario Noronha. Seu objetivo principal é demonstrar os experimentos efetuados para entendimento de conceitos de modulações digitais. Realizando experimentos que simulam e comparam modulações ASK, PSK, FSK e QAM. As especificações a seguir serão demonstrados nos próximos tópicos considerando seus gráficos e códigos criados com o software Matlab.

1.2 Conceitos básicos

1.2.1 Canal AWGN

O canal AWGN (Additive White Gaussian Noise) é um modelo matemático que reflete as principais características dos meios de transmissão de sinais e das alterações necessárias introduzidas nos sinais que para transmissão. Este modelo apresenta uma probabilidade de erro que decai de maneira exponencial com o aumento da SNR (Relação sinal ruído - Energia do bit dividida pela densidade espectral do ruído).

1.2.2 SNR

O SNR é a relação sinal ruído, ou seja é determinado pela comparação entre o nível de do sinal desejado com o nível do ruído de fundo. Quanto mais alta a relação sinal-ruído, menor é o efeito do ruído de fundo sobre a detecção ou medição do sinal.[6]

1.2.3 Sinalização NRZ

O processo de modulação possui diferentes técnicas de sinalização, dentre elas a sinalização NRZ (Non Return to Zero) possui o objetivo de transmitir dados analógicos de forma digital. Na Figura 2 podemos verificar uma demonstração dos modos de sinalização NRZ, e seus diferentes níveis de tensão.

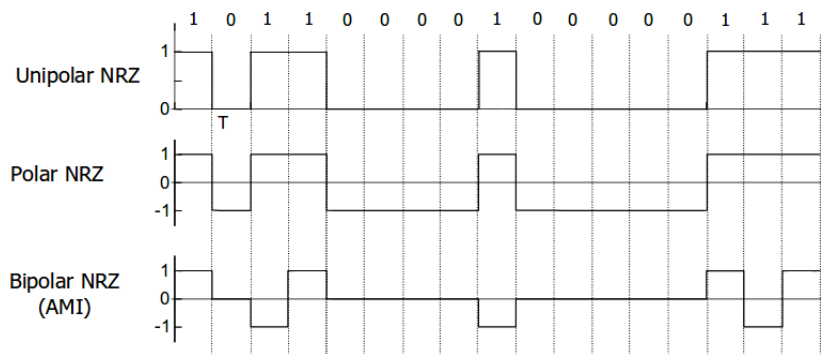


Figure 1.1: Codificação de linha - NRZ[2]

1.3 Modulação

O processo de modulação é utilizado para transmissão de sinais analógicos ou digitais. A modulação digital consiste em transformar símbolos em formas de onda compatíveis com as características do canal de transmissão, onde utilizará de uma onda portadora para realizar a transmissão do sinal.

A modulação digital (banda base) possui técnicas de realização que consideram modificações na amplitude, frequência e/ou fase do sinal modulado.

O processo de demodulação é realizado retirando-se a onda portadora para detectar o sinal de informação. Entre as técnicas utilizadas para esse processo a detecção do sinal poderá ser coerente, ou seja, utilizar a fase da portadora para detectar o sinal ou não coerente, não utilizando a fase da portadora. [5]

1.3.1 Modulação PSK

A modulação PSK (Phase Shift Keying) é baseada em alteração da fase, ou seja, o sinal digital altera a fase da portadora deslocando para transmissão da informação original.

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(\omega_0 t + 2\pi i/M)$$

$$i = 1, 2, \dots, M$$

$$0 \leq t \leq T$$

Figure 1.2: Expressão analítica - PSK[2]

Portanto, a modulação PSK é uma modulação coerente pois utiliza a fase da portadora para realizar a transmissão do sinal, assim, não será susceptível a degradações por ruídos ou terá tantas exigências de banda pois irá variar a fase, deixando a amplitude e a frequência constantes.

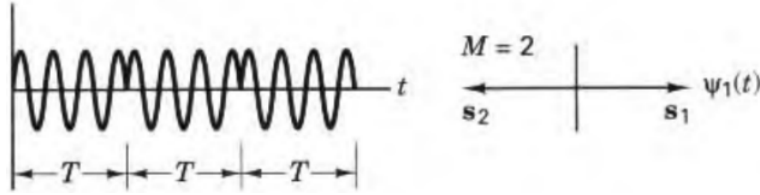


Figure 1.3: Modulação PSK[2]

1.3.2 Modulação ASK

A modulação ASK (Amplitude Shift Keying) é baseada em alteração da amplitude, ou seja, o sinal digital altera a amplitude da portadora para transmissão da informação original.

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E_i(t)}{T}} \cos(\omega_0 t + \phi)$$

$$i = 1, 2, \dots, M$$

$$0 \leq t \leq T$$

Figure 1.4: Expressão analítica - ASK[2]

Utilizando os níveis de tensão do sinal, atua com o 'chaveamento' da informação, possuindo normalmente dois níveis de amplitude para transmissão do sinal sendo '0' e '1'. A técnica também possibilita transmissão multinível, ou seja, com diferentes níveis de tensão.

Apesar de simples realização, esta técnica é muito sensível a ruídos e possui alto uso de largura de faixa do transmissor, além de perda de potência relativa a onda da portadora. Podendo ter o problema de largura de faixa limitado quando os pulsos empregados são limitados em banda, com a taxa de Nyquist, antes da modulação.

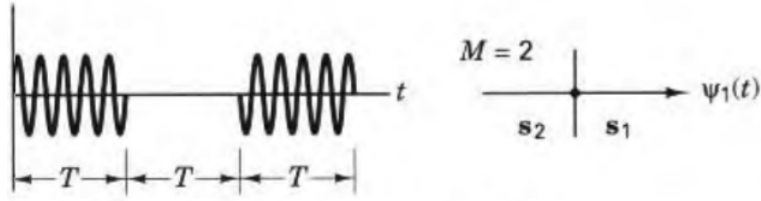


Figure 1.5: Modulação ASK[2]

1.3.3 Modulação FSK

A modulação FSK (Frequency Shift Keying) é baseada em alteração da frequência, ou seja, o sinal digital altera a frequência da portadora para transmissão da informação original. [1]

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(\omega_i t + \phi)$$

$$i = 1, 2, \dots, M$$

$$0 \leq t \leq T$$

Figure 1.6: Expressão analítica - FSK[2]

Utilizando a frequência para a transmissão a amplitude do sinal é mantida e a frequência variada conforme o sinal. Esta técnica possibilita modulação multinível, ou seja, com a utilização de mais de duas frequências, no entanto, aumenta a largura de banda.

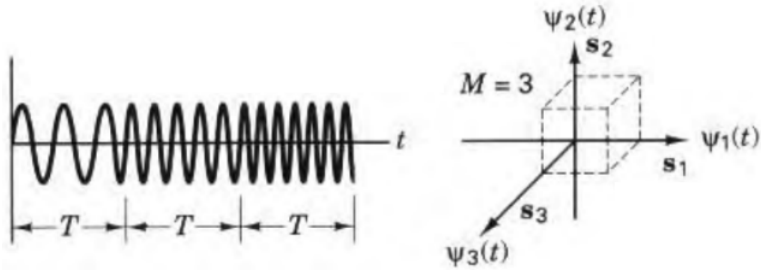


Figure 1.7: Modulação FSK[2]

1.3.4 Modulação QAM

A modulação QAM (Quadrature Amplitude Modulation) também conhecida como APK (Amplitude-phase keying) é baseada em alteração da fase e da amplitude, ou seja, o sinal digital altera as características de fase e amplitude da portadora para transmissão da informação original.

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E_i(t)}{T}} \cos [\omega_0 t + \phi_i(t)]$$

$$i = 1, 2, \dots, M$$

$$0 \leq t \leq T$$

Figure 1.8: Expressão analítica - QAM[2]

Nesta técnica os símbolos são mapeados em um diagrama de fase e quadratura, sendo que cada símbolo apresenta uma distância específica da origem do diagrama que representa a sua amplitude. Isto significa que as informações são inseridas nos parâmetros de amplitude e quadratura da onda portadora.[3] O resultado desse processo é representado por uma constelação de pontos no espaço de amplitude e fase, onde os valores demonstra os valores que pode assumir. Assim, é possível perceber na constelação QAM o número de níveis da modulação ao observar o número de pontos representado.[4]

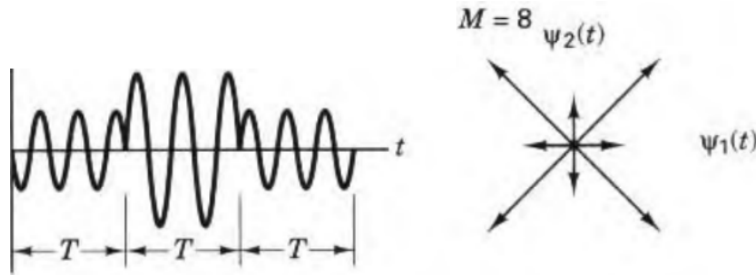


Figure 1.9: Modulação QAM[2]

As etapas de modulação e demodulação QAM foram executadas experimentalmente no software matlab. O desenvolvimento de ambas etapas está relacionado aos módulos apresentados pela Figura 1.10.

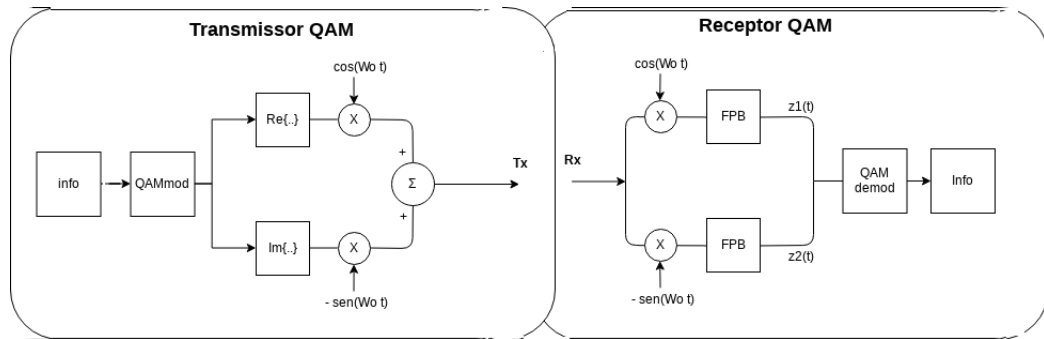


Figure 1.10: Modulação QAM[2]

Chapter 2

Experimentos práticos

2.1 Sinais modulados

Utilizando uma sequência de informação com 10 bits, gere as formas dos sinais modulados para as modulações PSK,FSK e ASK.

2.1.1 Experimento

```
%% Utilizando uma sequencia de informação de 10 bits, gere as formas dos
% sinais modulados para as modulações ASK, PSK e FSK

Tx_Trans = 500;
niveis = 2;
bit = 10;
fp = 1000;
upSample = 40;
tb = 1/Tx_Trans;
ts = tb/upSample;
t = [0:ts:(tb*bit)-ts];

% Gerar a informação

info = [0 0 1 0 1 0 1 0 1 1];
filtro_tx = ones(1,upSample);
info_up = upsample(info,upSample);
sinal_tx = filter(filtro_tx,1,info_up);
```

```

%% ASK
A = 1;
phi = 0;
ct = A*cos(2*pi*fp*t+phi);ask = sinal_tx.*ct;

figure(1);
subplot(511);plot(t,sinal_tx);title('Sinal transmitido');ylim([-0.1 1.2]);
subplot(512);plot(t,ct);title('Sinal com portadora');
subplot(513);plot(t,ask);title('Modulação ASK');

%% PSK
phi = (2*pi*sinal_tx)/niveis;
s_t_PSK = A*cos(2*pi*fp*t + phi + (pi/2));

subplot(514);plot(t,s_t_PSK);title('Modulação PSK');

%% FSK
s_t_FSK = A * cos(2*pi*fp*t.*(sinal_tx+1));

subplot(515);plot(t,s_t_FSK);title('Modulação FSK');

```


2.1.2 resultado

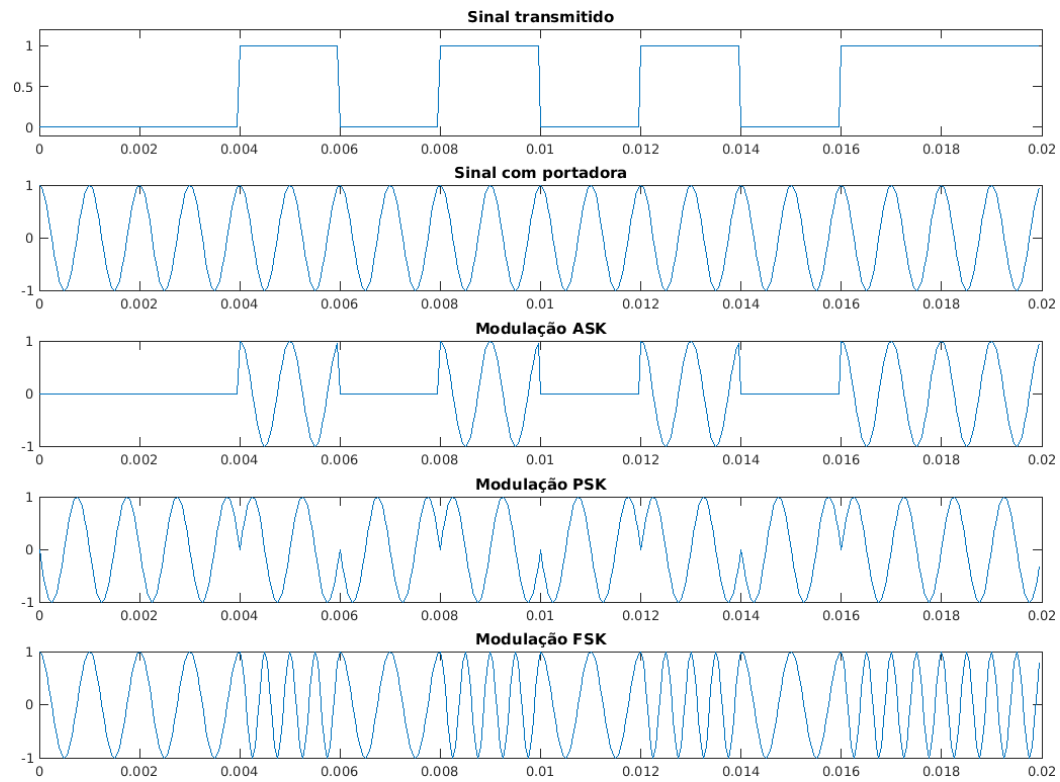


Figure 2.1: Modulação ASK, PSK e FSK.

2.2 Sinais modulados - 4 símbolos com 10 bits

Utilizando uma sequência de informação com 10 bits, em que cada símbolo possui 4 bits, gere as formas dos sinais modulados para as modulações PSK,FSK e QAM(APK).

2.2.1 Experimento

```
Tx_Trans = 500; %bps
k = 4; %Número de bits por simbolo
M = 2; %Número de níveis
fp = 1000;
bits = 10;
upSample = 100;
tb = 1/Tx_Trans;
ts = tb/upSample;
t = [0:ts:(tb*bits)-ts];

% Informação
info = [0 0 1 0 1 0 1 0 1 1];
filtro_tx = ones(1,upSample);
info_up = upsample(info,upSample);
sinal_tx = filter(filtro_tx,1,info_up);

% ASK
A = 1;
phi = 0;
ct = A*cos(2*pi*fp*t+phi);
ask = sinal_tx.*ct;

% PSK
phi = (2*pi*sinal_tx)/M;
psk = A*cos(2*pi*fp*t + phi + (pi/2));

% QAM
qam = sinal_tx.*psk;

figure();subplot(5,1,1);
plot(t,sinal_tx);title('Sinal transmitido');ylim([-0.1 1.2]);
subplot(5,1,2);plot(t,ct);title('Sinal portadora');
subplot(5,1,3);plot(t,ask);title('Modulação ASK');
subplot(5,1,4);plot(t,psk);title('Modulação PSK');
subplot(5,1,5);plot(t,qam);title('Modulação QAM');
```

2.2.2 Modulações

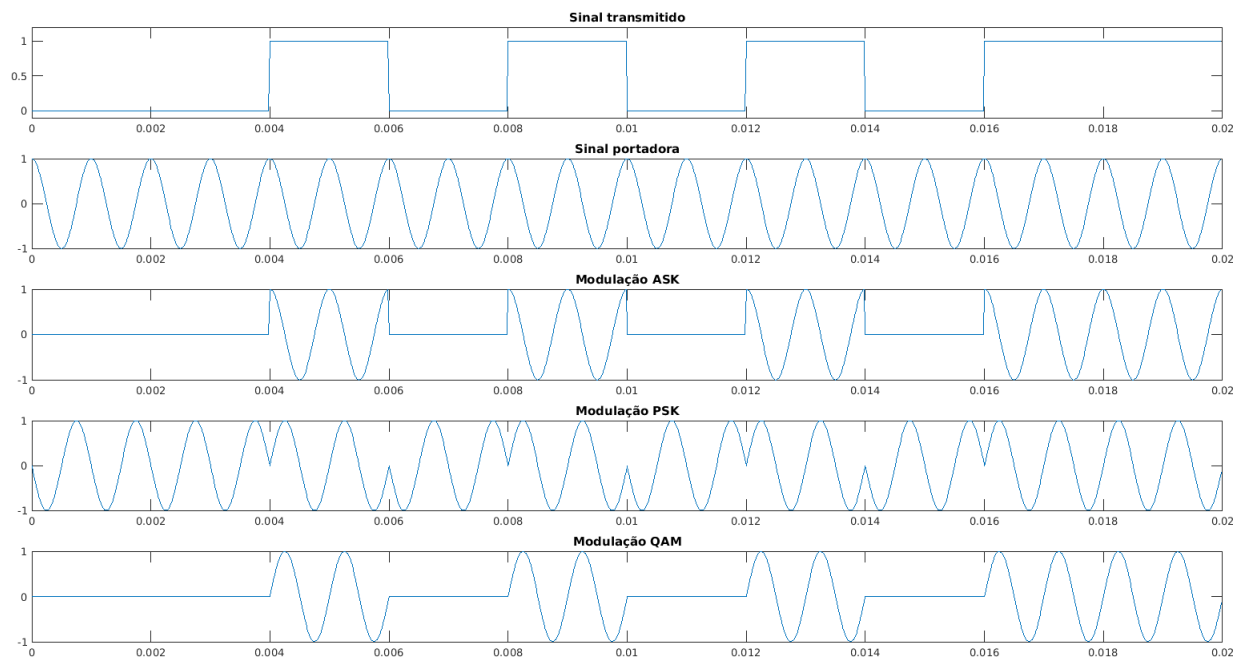


Figure 2.2: Modulações ASK, PSK e QAM

2.3 Modulação MPSK

Realize uma comparação entre o desempenho das modulações MPSK, para $M = 2, 4, 8$ e 16 . Utilize a probabilidade de erro de símbolo e a SNR como parâmetros para esta comparação.

2.3.1 Experimento

```
% Parâmetros MPSK
bit=10000; SNR = 1000;

% Informação MPSK
n_2=2; info_2=randint(1,bit,n_2);      % 2PSK
n_4=4; info_4=randint(1,bit,n_4);      % 4PSK
n_8=8; info_8=randint(1,bit,n_8);      % 8PSK
n_16=16; info_16=randint(1,bit,n_16);  % 16PSK

% Mapeando os inteiros em complexo
PSK_2 = pskmod(info_2,n_2);
PSK_4 = pskmod(info_4,n_4);
PSK_8 = pskmod(info_8,n_8);
PSK_16 = pskmod(info_16,n_16);

% Informação modulada
scatterplot(PSK_2,20);title('Informação - 2PSK');
scatterplot(PSK_4,20);title('Informação - 4PSK');
scatterplot(PSK_8,20);title('Informação - 8PSK');
scatterplot(PSK_16,20);title('Informação - 16PSK');

% Recebe a informação
info_r_2 = awgn(PSK_2,20);
info_r_4 = awgn(PSK_4,20);
info_r_8 = awgn(PSK_8,20);
info_r_16 = awgn(PSK_16,20);

% Informação recebida
scatterplot(info_r_2);title('Informação recebida - 2PSK');
scatterplot(info_r_4);title('Informação recebida - 4PSK');
scatterplot(info_r_8);title('Informação recebida - 8PSK');
scatterplot(info_r_16);title('Informação recebida - 16PSK');

%Verifica o erro de símbolo e SNR
for R = 0:SNR
    info_r_2 = awgn(PSK_2,R);
    info_r_4 = awgn(PSK_4,R);
    info_r_8 = awgn(PSK_8,R);
    info_r_16 = awgn(PSK_16,R);

    PSK_Demod_2 = pskdemod(info_r_2,n_2);
    PSK_Demod_4 = pskdemod(info_r_4,n_4);
    PSK_Demod_8 = pskdemod(info_r_8,n_8);
    PSK_Demod_16 = pskdemod(info_r_16,n_16);

    [n2(R+1),t2(R+1)]=symerr(info_2,PSK_Demod_2);
    [n4(R+1),t4(R+1)]=symerr(info_4,PSK_Demod_4);
    [n8(R+1),t8(R+1)]=symerr(info_8,PSK_Demod_8);
    [n16(R+1),t16(R+1)]=symerr(info_16,PSK_Demod_16);
end

semilogy([0:SNR],t2,[0:SNR],t4,[0:SNR],t8,[0:SNR],t16);
legend('2PSK','4PSK','8PSK','16PSK');
ylabel('Relação Sinal Ruído - SNR');xlabel('SNR - dB');
```

2.3.2 2PSK

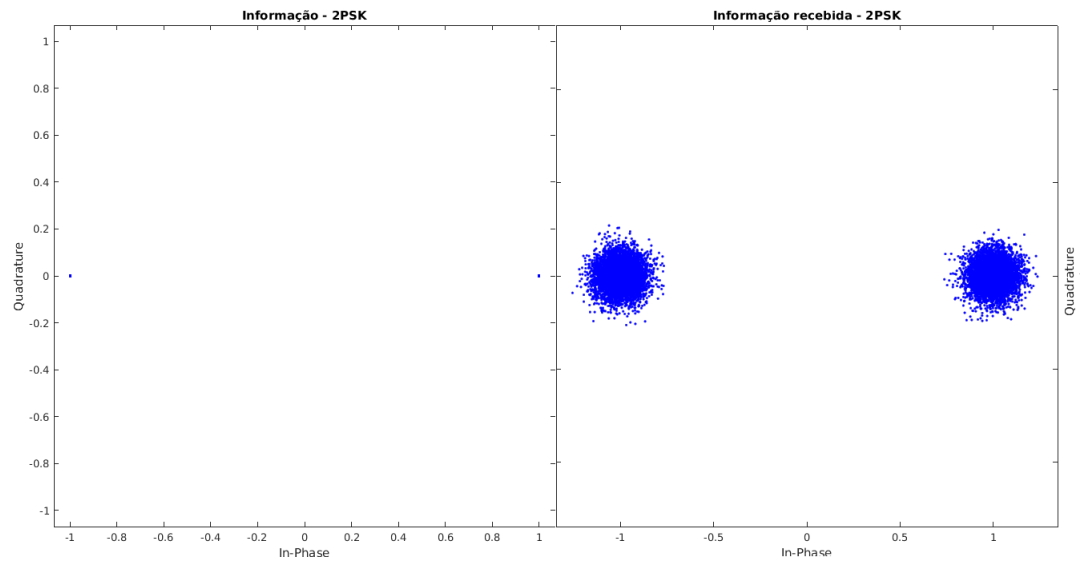


Figure 2.3: Modulação 2PSK.

2.3.3 4PSK

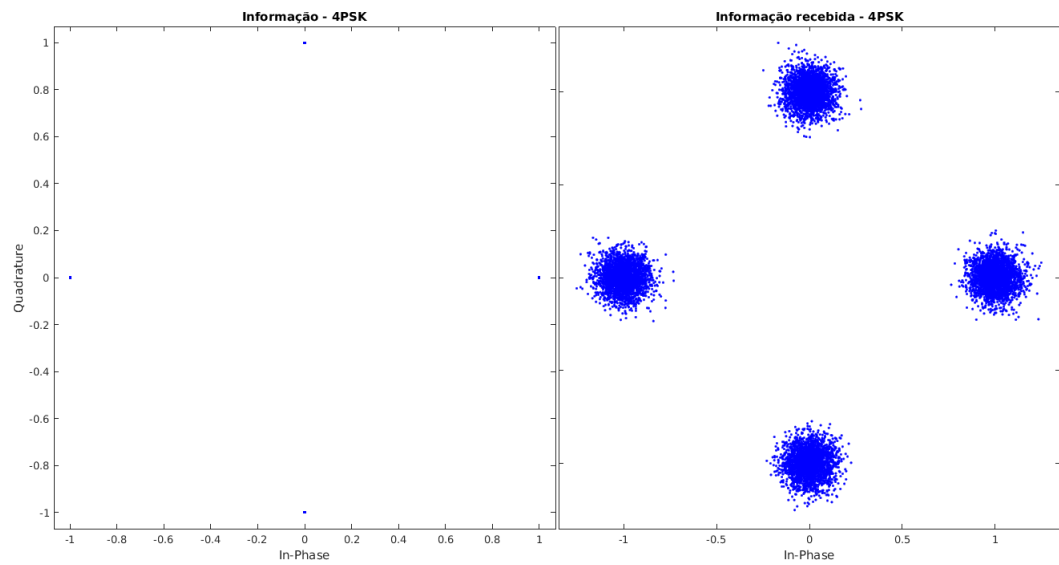


Figure 2.4: Modulação 4PSK.

2.3.4 8PSK

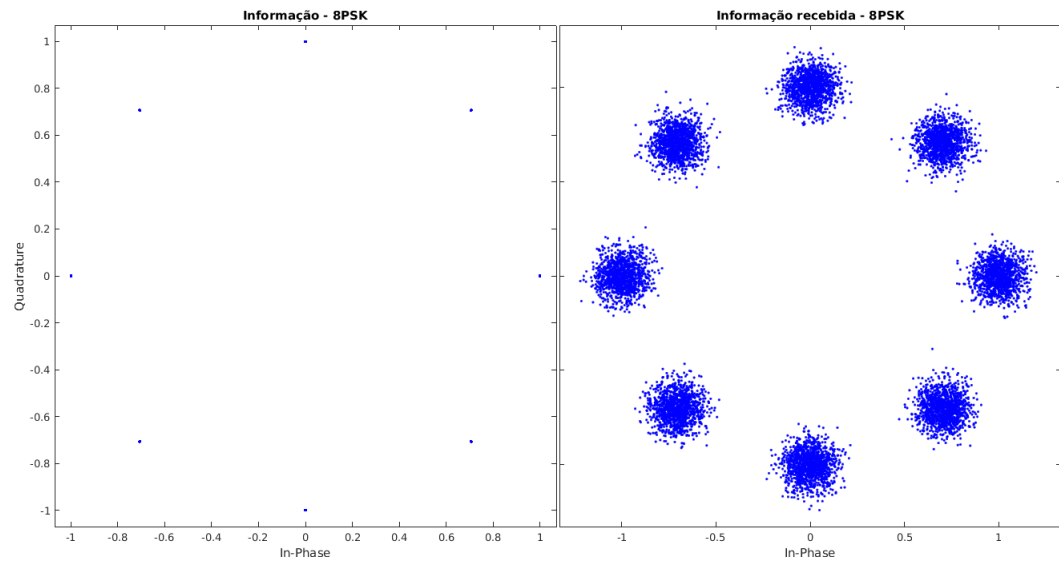


Figure 2.5: Modulação 8PSK.

2.3.5 16PSK

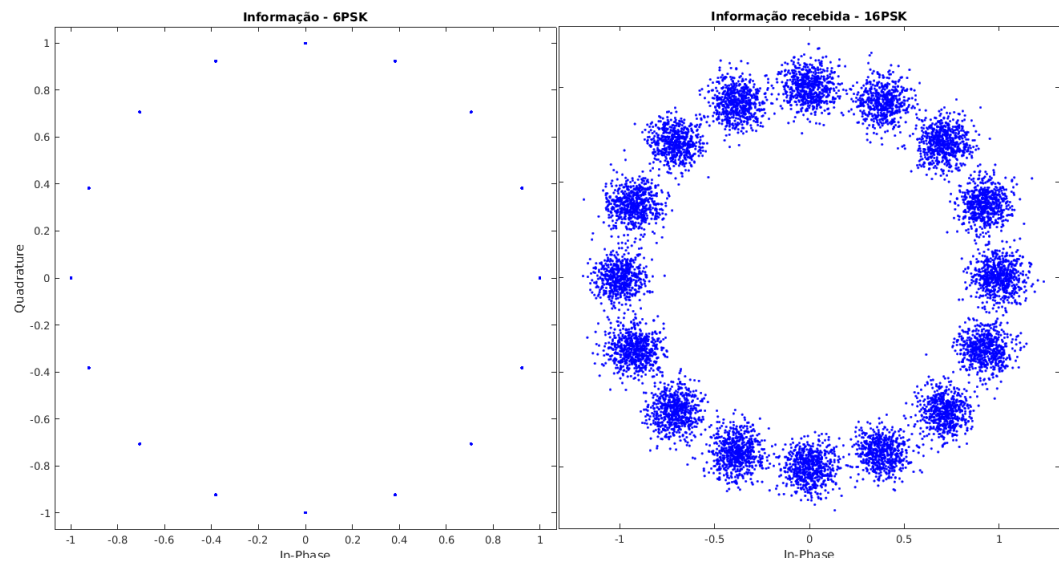


Figure 2.6: Modulação 16PSK.

2.3.6 Comparação SNR

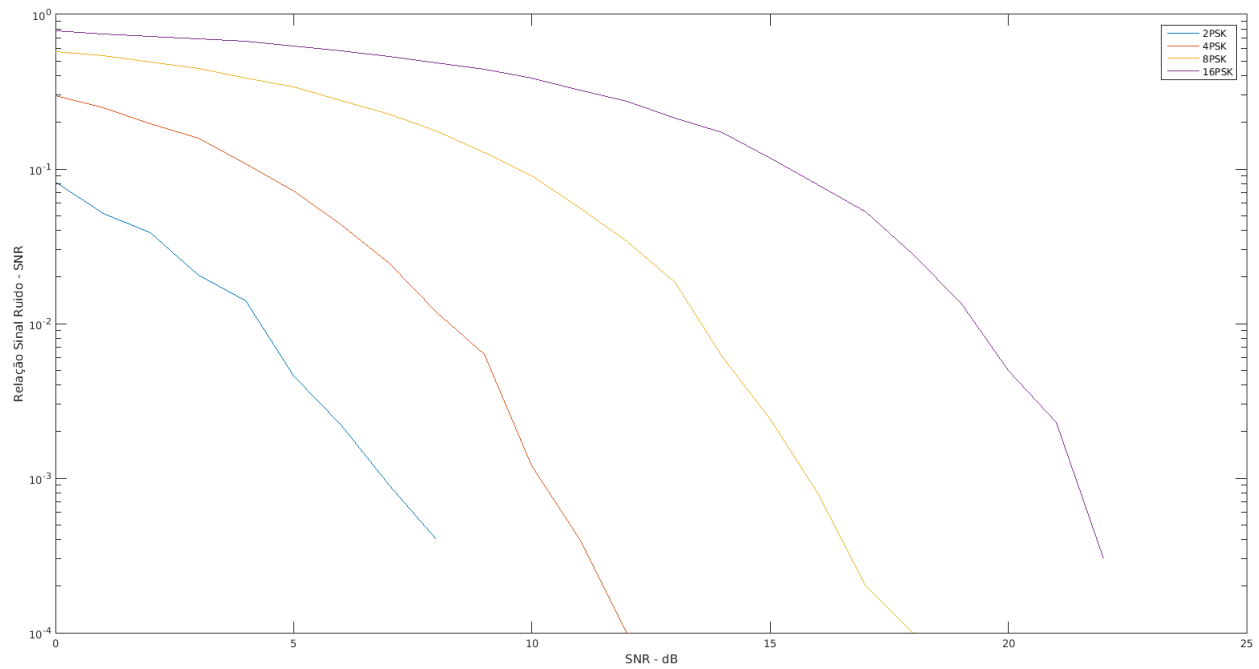


Figure 2.7: SNR

2.4 Modulação MQAM

Realize uma comparação entre o desempenho das modulações MQAM, para $M = 4, 16$ e 64 . Utilize a probabilidade de erro de símbolo e a SNR como parâmetros para esta comparação.

2.4.1 Experimento

```
% Parâmetros MQAM
bit=10000;SNR = 1000;

% Informação MQAM
n_2=2; info_2=randint(1,bit,n_2);      % 2QAM
n_4=4; info_4=randint(1,bit,n_4);      % 4QAM
n_8=8; info_8=randint(1,bit,n_8);      % 8QAM
n_16=16; info_16=randint(1,bit,n_16);  % 16QAM

% Mapeando os inteiros em complexo
QAM_2 = qammod(info_2,n_2);
QAM_4 = qammod(info_4,n_4);
QAM_8 = qammod(info_8,n_8);
QAM_16 = qammod(info_16,n_16);

% Informação modulada
scatterplot(QAM_2,20);title('Informação - 2QAM');
scatterplot(QAM_4,20);title('Informação - 4QAM');
scatterplot(QAM_8,20);title('Informação - 8QAM');
scatterplot(QAM_16,20);title('Informação - 16QAM');

% Recebe a informação
info_r_2 = awgn(QAM_2,20);
info_r_4 = awgn(QAM_4,20);
info_r_8 = awgn(QAM_8,20);
info_r_16 = awgn(QAM_16,20);

% Informação recebida
scatterplot(info_r_2);title('Informação recebida - 2QAM');
scatterplot(info_r_4);title('Informação recebida - 4QAM');
scatterplot(info_r_8);title('Informação recebida - 8QAM');
scatterplot(info_r_16);title('Informação recebida - 16QAM');

%Verifica o erro de símbolo e SNR
for R = 0:SNR
    info_r_2 = awgn(QAM_2,R);
    info_r_4 = awgn(QAM_4,R);
    info_r_8 = awgn(QAM_8,R);
    info_r_16 = awgn(QAM_16,R);

    QAM_Demod_2 = qamdemod(info_r_2,n_2);
    QAM_Demod_4 = qamdemod(info_r_4,n_4);
    QAM_Demod_8 = qamdemod(info_r_8,n_8);
    QAM_Demod_16 = qamdemod(info_r_16,n_16);

    [n2(R+1),t2(R+1)]=symerr(info_2,QAM_Demod_2);
    [n4(R+1),t4(R+1)]=symerr(info_4,QAM_Demod_4);
    [n8(R+1),t8(R+1)]=symerr(info_8,QAM_Demod_8);
    [n16(R+1),t16(R+1)]=symerr(info_16,QAM_Demod_16);
end

semilogy([0:SNR],t2,[0:SNR],t4,[0:SNR],t8,[0:SNR],t16);
legend('2QAM','4QAM','8QAM','16QAM');
ylabel('Relação Sinal Ruído - SNR');xlabel('SNR - dB');
```


2.4.2 resultado

2.4.3 2QAM

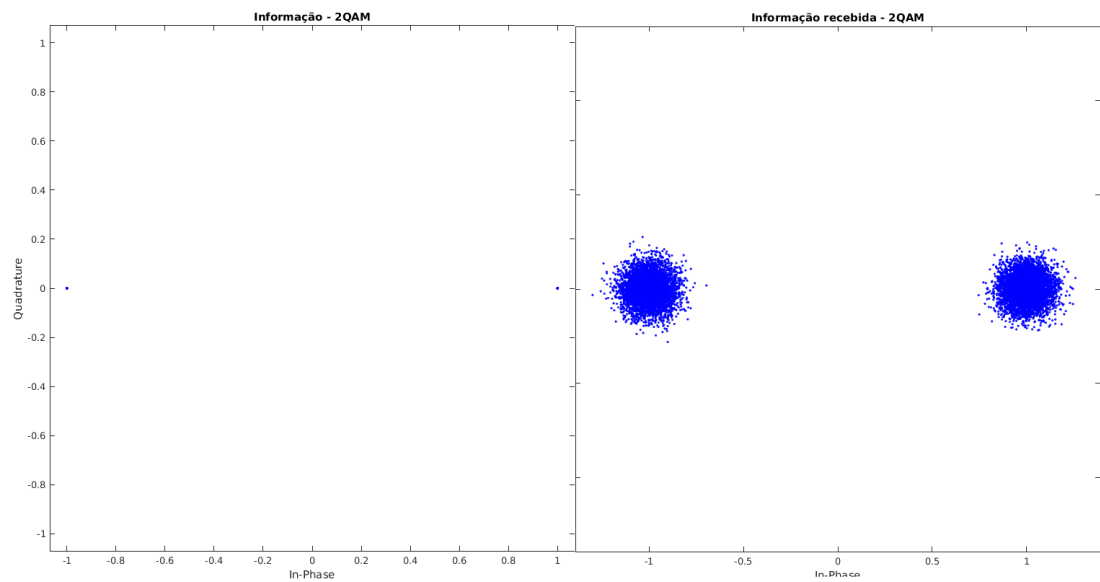


Figure 2.8: Modulação 2QAM.

2.4.4 4QAM

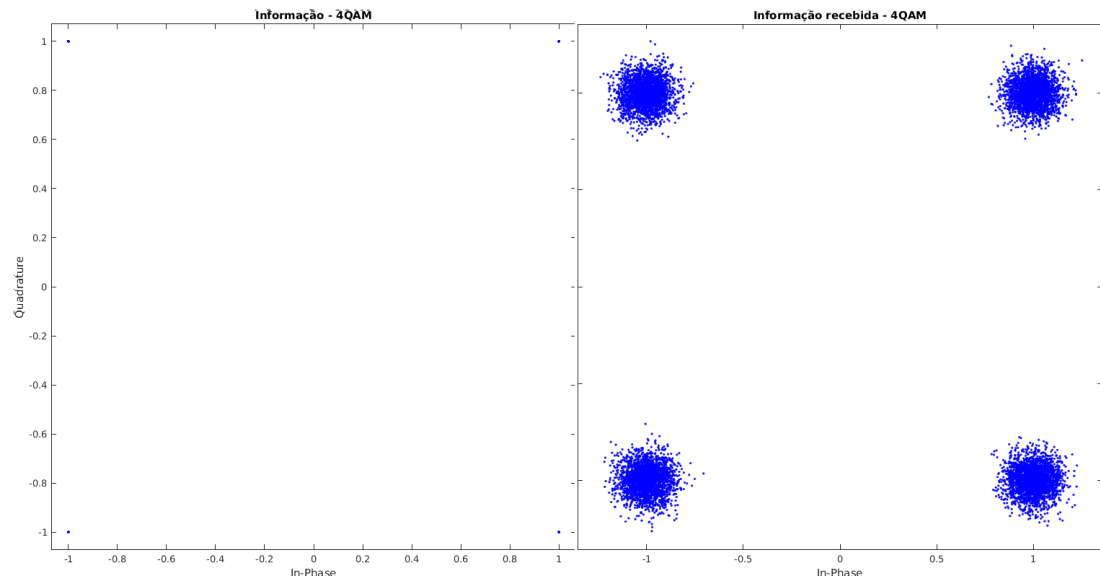


Figure 2.9: Modulação 4QAM.

2.4.5 8QAM

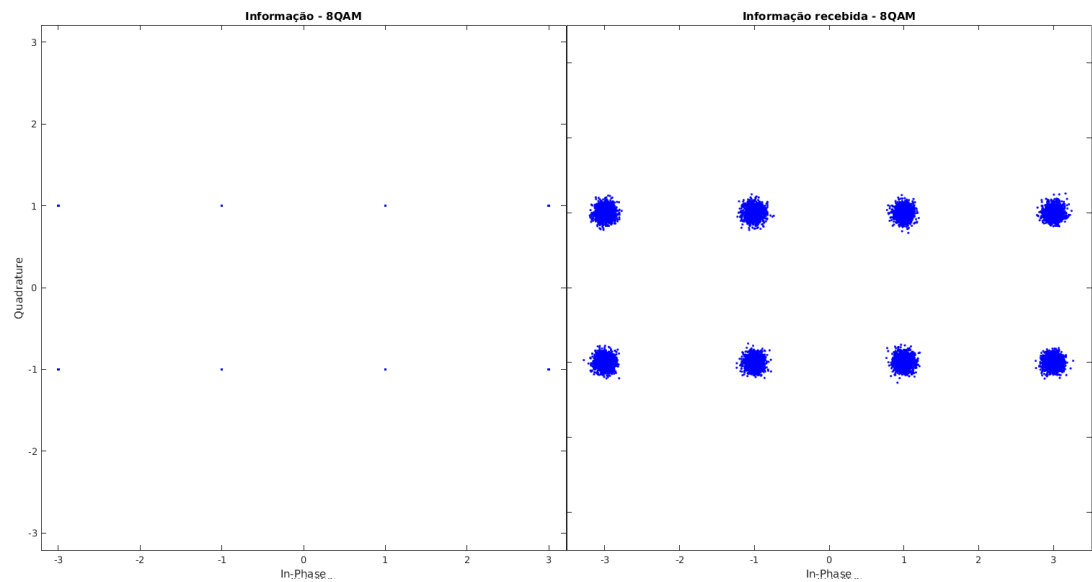


Figure 2.10: Modulação 8QAM.

2.4.6 16QAM

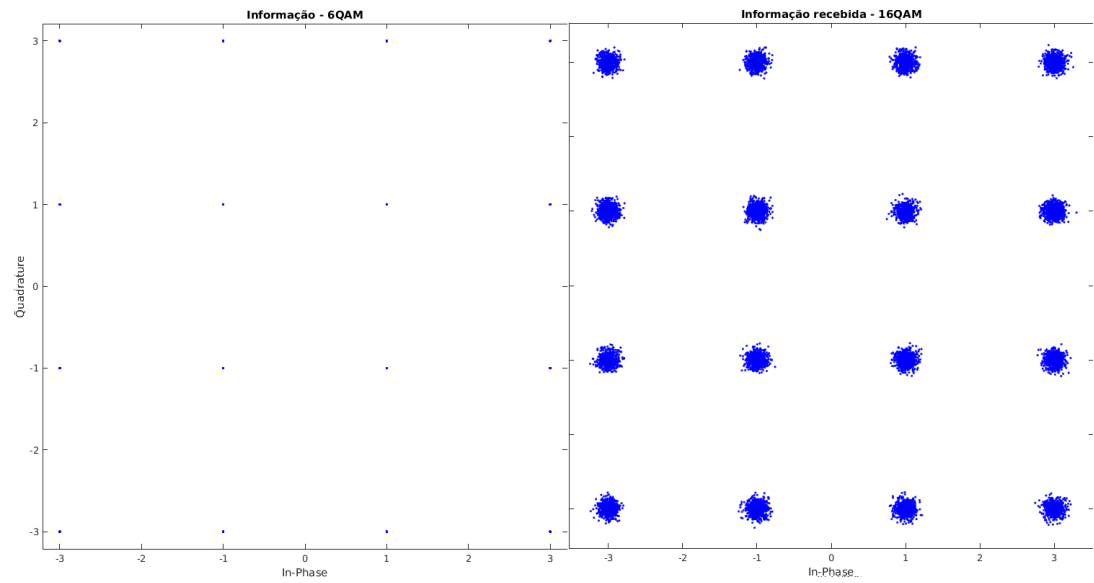


Figure 2.11: Modulação 16QAM.

2.4.7 Comparação SNR

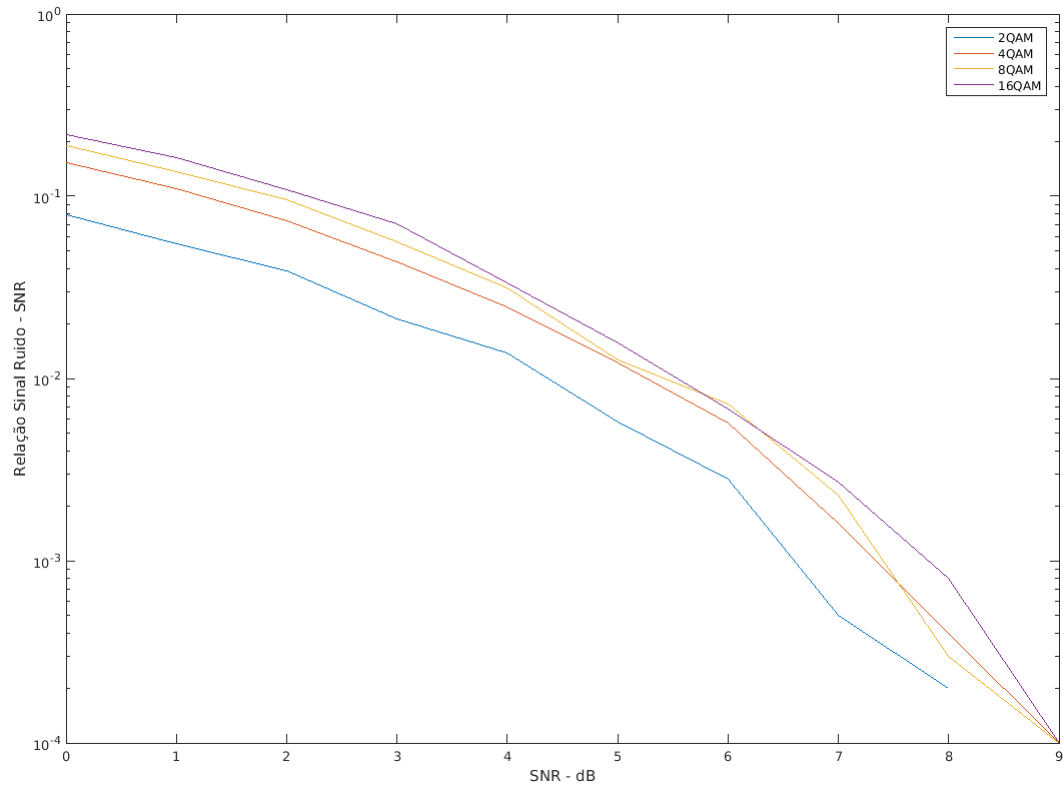


Figure 2.12: SNR

2.5 Modulações 16-PSK e 16-QAM

Realize uma comparação entre o desempenho das modulações 16-PSK e 16-QAM. Utilize a probabilidade de erro de símbolo e a SNR como parâmetro para essa comparação.

2.5.1 Experimento

```
%% Parâmetros da informação - Modulação
bits = 10;
Rb = 1e3;
up = 100; %comprimento
fc = 4e3;
fa = 10*fc;
%Modulador QAM
k = 4;
M = 2.^k;
N = 100;

% Gera e manipula a informação
info = randi([0 1],1,up);

%% Filtro NRZ - Modulação
filtro_tx = ones(1,up);
filtro_tx = flip(filtro_tx); % SNR maximizada

%% Modulação QAM - Modulação
QAM = qammod(info,M);
% Separa parte real e imaginária
info_real = real(QAM);
info_imaginaria = imag(QAM);

%% Formata o sinal - Modulação
real_filter = filter(filtro_tx,1,upsample(info_real,up));
imaginario_filter = filter(filtro_tx,1,upsample(info_imaginaria,up));

v = length(real_filter)/fa-(1/fa); t = [0:1/fa:v];

figure(1)
subplot(211);plot(t,real_filter);title('Informação - parte real');
subplot(212);plot(t,imaginario_filter);title('Informação - parte imaginária');

%% Portadora - Modulação
port_real = cos(2*pi*fc*t);
port_imag = -sin(2*pi*fc*t);
real_TX = real_filter.*port_real;
imag_TX = imaginario_filter.*port_imag;
info_TX = real_TX + imag_TX;
scatterplot(QAM,M);title('Informação modulada');
%Complexa
QAM_c = filter(filtro_tx,1,upsample(QAM,N));
QAM_mod = QAM_c.*exp(j*2*pi*fc*t);
info_TX_c = real(QAM_mod);
figure(2)
subplot(211);plot(t,info_TX);title('Informação modulada');xlim([0 0.025]);
subplot(212);plot(t,info_TX_c);title('Informação modulada complexa');xlim([0 0.025]);

%% Portadora - Demodulação
info_RX = info_TX;

info_RX_real = info_RX.*port_real;
info_RX_ima = info_RX.*port_imag;

%% Filtro passa baixa - Demodulação
Wc = (fc)./(fa/2);
FPB_fir = fir1(40,Wc,'low');
% FPB - parte real
FPB_real=filter(FPB_fir,1,info_RX_real);
% FPB - parte imaginaria
FPB_imag=filter(FPB_fir,1,info_RX_ima);
figure(3);
subplot(211);plot(t,FPB_real);ylim([-1.7 -1.3]);xlim([0 0.05]);title('Informação filtrada - parte real');
subplot(212);plot(t,FPB_imag);xlim([0 0.05]);title('Informação filtrada - parte imaginaria');
```

2.5.2 resultado

2.5.3 Informação enviada

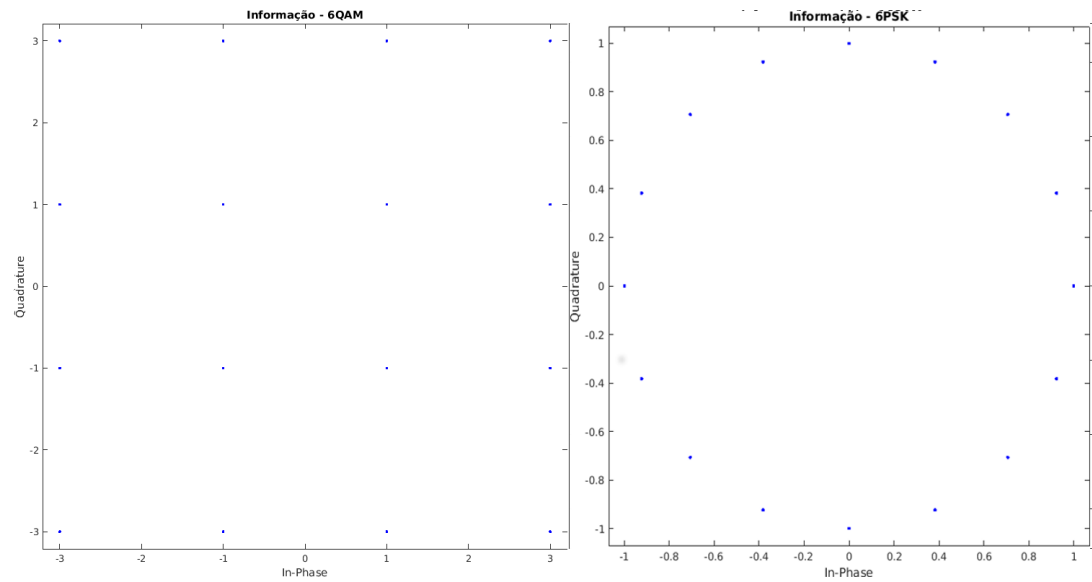


Figure 2.13: Modulação 16-QAM e 16-PSK.

2.5.4 Informação recebida

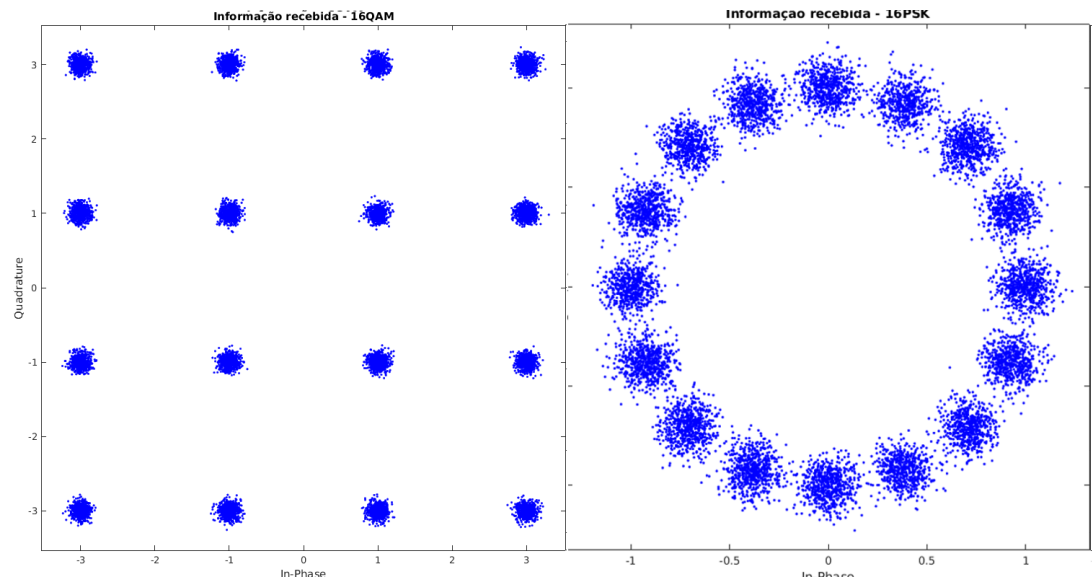


Figure 2.14: Modulação 16-QAM e 16-PSK.

2.5.5 Comparação SNR

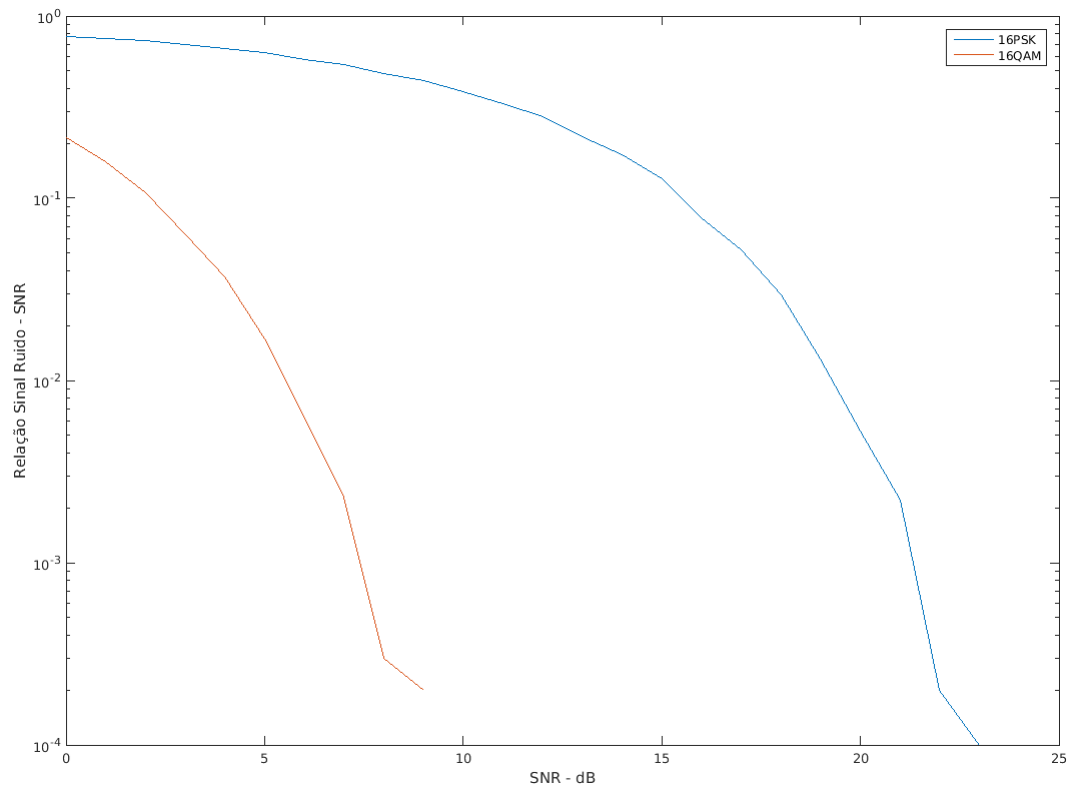


Figure 2.15: SNR

2.6 Modulação em quadratura

Desenvolva em matlab um script para simular um modulador/demodulador em Quadratura utilizando:

- Arquitetura QAM.
- Representação complexa do sinal.

Utilize a modulação 16-QAM como base.

2.6.1 Experimento

```
%% Parâmetros da informação - Modulação
bits = 10;
Rb = 1e3;
up = 100; %comprimento
fc = 4e3;
fa = 10*fc;
%Modulador QAM
k = 4;
M = 2.^k;
N = 100;

% Gera e manipula a informação
info = randi([0 1],1,up);

%% Filtro NRZ - Modulação
filtro_tx = ones(1,up);
filtro_tx = flip(filtro_tx); % SNR maximizada

%% Modulação QAM - Modulação
QAM = qammod(info,M);
% Separa parte real e imaginária
info_real = real(QAM);
info_imaginaria = imag(QAM);

%% Formata o sinal - Modulação
real_filter = filter(filtro_tx,1,upsample(info_real,up));
imaginario_filter = filter(filtro_tx,1,upsample(info_imaginaria,up));

v = length(real_filter)/fa-(1/fa); t = [0:1/fa:v];

figure(1)
subplot(211);plot(t,real_filter);title('Informação - parte real');
subplot(212);plot(t,imaginario_filter);title('Informação - parte imaginária');

%% Portadora - Modulação
port_real = cos(2*pi*fc*t);
port_imag = -sin(2*pi*fc*t);
real_TX = real_filter.*port_real;
imag_TX = imaginario_filter.*port_imag;
info_TX = real_TX + imag_TX;
scatterplot(QAM,M);title('Informação modulada');
%Complexa
QAM_c = filter(filtro_tx,1,upsample(QAM,N));
QAM_mod = QAM_c.*exp(j*2*pi*fc*t);
info_TX_c = real(QAM_mod);
figure(2)
subplot(211);plot(t,info_TX);title('Informação modulada');xlim([0 0.025]);
subplot(212);plot(t,info_TX_c);title('Informação modulada complexa');xlim([0 0.025]);

%% Portadora - Demodulação
info_RX = info_TX;

info_RX_real = info_RX.*port_real;
info_RX_ima = info_RX.*port_imag;

%% Filtro passa baixa - Demodulação
Wc = (fc)./(fa/2);
FPB_fir = fir1(40,Wc,'low');
% FPB - parte real
FPB_real=filter(FPB_fir,1,info_RX_real);
% FPB - parte imaginaria
FPB_imag=filter(FPB_fir,1,info_RX_ima);
figure(3);
subplot(211);plot(t,FPB_real);ylim([-1.7 -1.3]);xlim([0 0.05]);title('Informação filtrada - parte real');
subplot(212);plot(t,FPB_imag);xlim([0 0.05]);title('Informação filtrada - parte imaginaria');
```

```

%% Amostragem do sinal - Demodulação

real_amos = FPB_real(N:N:end);
imag_amos = FPB_imag(N:N:end);
% Formula informação com sinal complexo
info_complex = real_amos + (j*imag_amos);
%% Demodulação 16-QAM
QAM_demod = qamdemod(info_complex,M);
% Complexa
info_RX_c = info_TX_c;
info_RX_c_real = (info_RX_c.*exp(-1j*2*pi*fc*t))*2;
% FPB
FPB_c_real = filter(FPB_fir,1,info_RX_c_real);
% Amostragem
real_amos_c = FPB_c_real(N:N:end);
% Demodulacao
demod_c = qamdemod(real_amos_c,M);
figure(4)
subplot(211);plot(t,info_RX);title('Informação demodulada');xlim([0 0.025]);
subplot(212);plot(t,demod_c);title('Informação demodulada complexa');ylim([-0.1 1.1]);
figure(5);
subplot(311);plot(t,info_TX);title('Informação original');xlim([0 50]);ylim([-0.1 1.1]);
subplot(312);plot(t,info_TX);title('Informação modulada');xlim([0 35e-3]);
subplot(313);plot(t,demod_c);title('Informação demodulada');ylim([-0.1 1.1]);xlim([0 50]);

```

2.6.2 resultado

Gerar e modular a informação

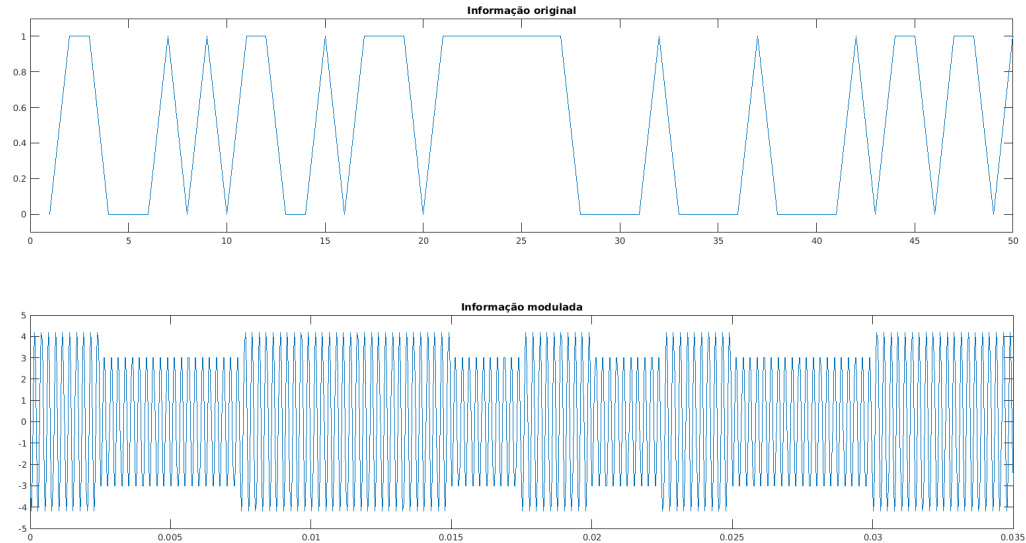


Figure 2.16: Informação Original e modulada

Informação modulada 16-QAM

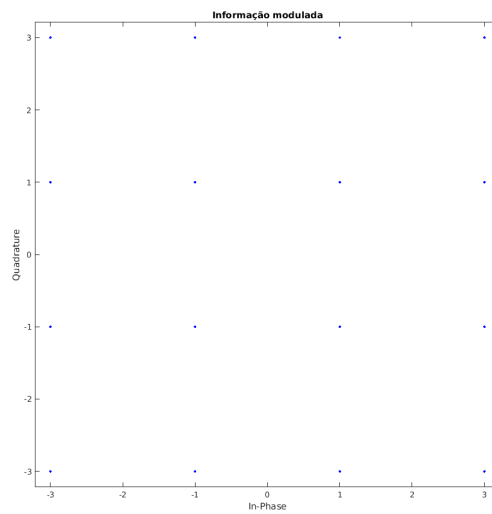


Figure 2.17: Modulação 16-QAM

Informação Modulada

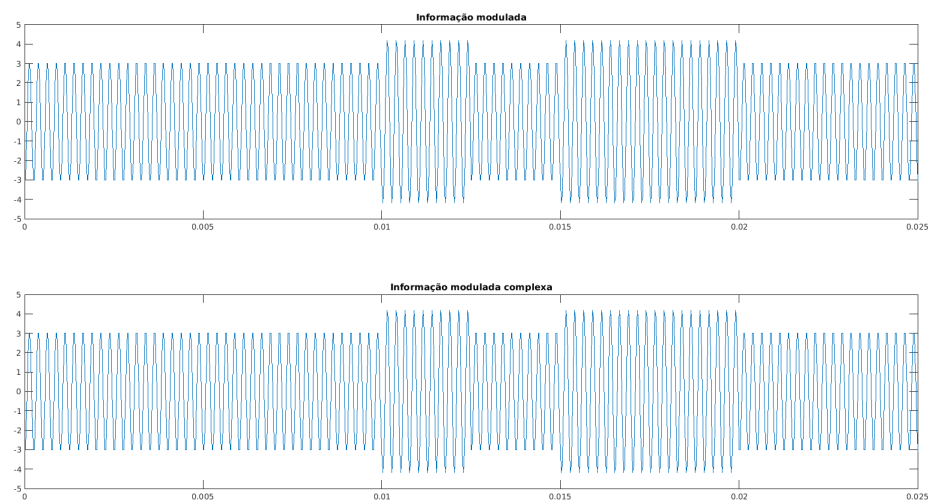


Figure 2.18: Informação modulada

Informação filtrada

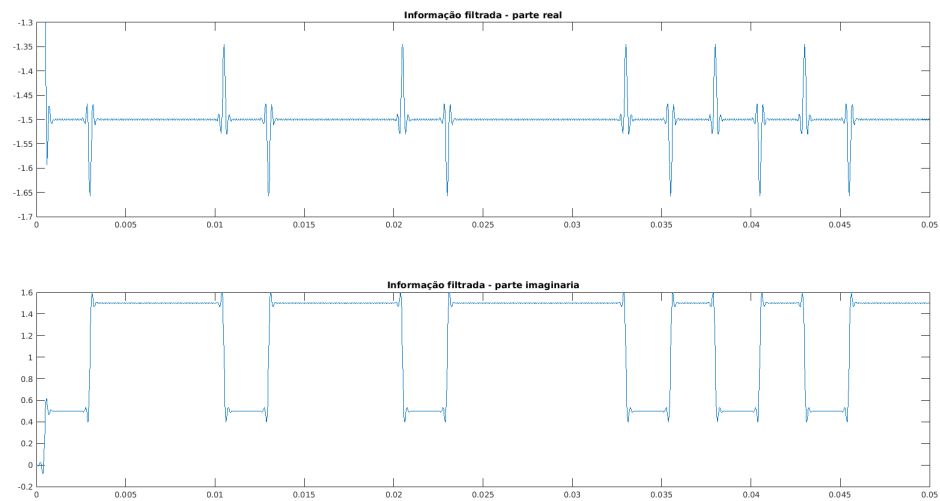


Figure 2.19: Informação filtrada

Informação filtrada

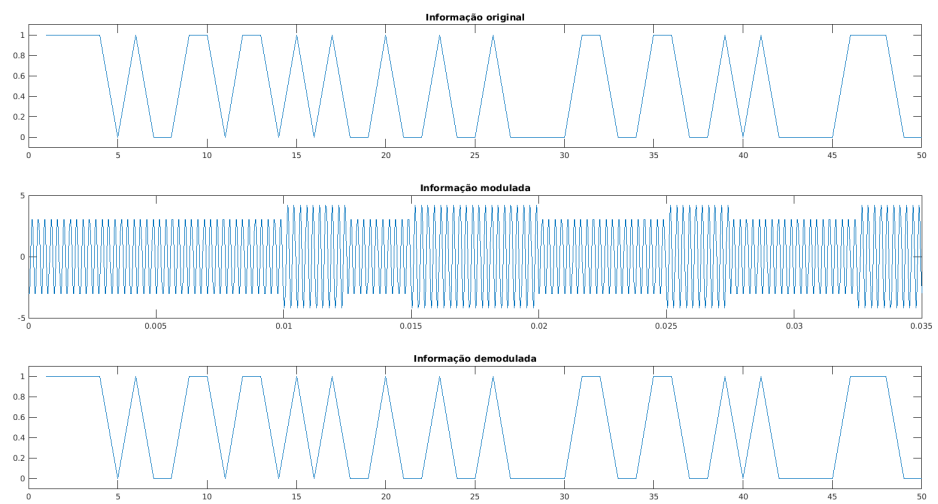


Figure 2.20: Informação enviada e recebida

Bibliography

- [1] Newton C Braga. *Modulação Digital*.
<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/almanaque-tecnologico>.
- [2] Michael. Haykin, Simon; Moher. *Introdução aos Sistemas de Comunicação*.
4ª Edição.
- [3] Maria Moura Malburg. *MODULAÇÃO*.
<https://www.gta.ufrj.br/grad/042/Modulacao/>.
- [4] Teleco. *TV Digital II: Modos de Transmissão e Modulação*.
<http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialtvdconsis2/pagina4.asp>.
- [5] UFRG. *Modulação Digital*. <http://penta2.ufrgs.br/Alvaro>.
- [6] Wikipedia. *Relação sinal-ruído*. https://pt.wikipedia.org/wiki/Relação_sinal-ruído.