

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
Trabalho de Conclusão de Curso

**ESTUDO SOBRE SISTEMAS COM MODULAÇÃO
ADAPTATIVA**

JOSENILDO FERREIRA GALDINO

Campina Grande – PB
Março – 2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
Trabalho de Conclusão de Curso

**ESTUDO SOBRE SISTEMAS COM MODULAÇÃO
ADAPTATIVA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande, em
cumprimento parcial as exigências para
obtenção do grau de Engenheiro Eletricista

Professor Orientador: EDMAR CANDEIA
GURJÃO.

Campina Grande - PB
Março - 2009

ESTUDO SOBRE SISTEMAS COM MODULAÇÃO ADAPTATIVA

JOSENILDO FERREIRA GALDINO

Aprovada em ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Edmar Candeia Gurjão, Dr. Eng - Orientador

Prof. Bruno Barbosa Albert, Dr. Eng

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

G149e

2009 Galdino, Josenildo Ferreira.

Estudo sobre sistemas com modulação adaptativa / Josenildo Ferreira Galdino. — Campina Grande, 2009.

40 f. : il

TCC (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática.

Referências.

Orientador: Dr. Edmar Candeia Gurjão.

1. Modulação Adaptativa. 2. Transmissão Digital. 3. Canal AWGN e QAM. I. Título.

CDU- 621.376 (043)

“Somos o que fazemos repetidamente.
Por isso o mérito não está na ação e sim no
hábito.”

Aristóteles.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, José Galdino Fernandes e Aurenir Freitas Fernandes é uma homenagem que faço a vocês em vida.

Dedico este trabalho aos meus irmãos Juraci, Jurandir e Joelma pelo apoio e compreensão.

Dedico este trabalho a mais uma outra pessoa, que considero a mais importante da minha vida, DEUS. As dificuldades foram muitas, mas você mostrou que com fé tudo é possível.

Agradecimentos

Desejo expressar os meus sinceros agradecimentos.

Primeiramente, agradeço a DEUS por proporcionar-me a conclusão de mais uma etapa da vida que se consuma neste trabalho.

Aos meus pais, José Galdino Fernandes e Aurenir Freitas Fernandes, aos meus irmãos Juraci, Jurandir e Joelma, agradeço todo o amor, carinho, respeito e compreensão perante uma infinidade de finais de semana integralmente consumidos pelos estudos.

Ao Professor Edmar Candeia Gurjão, sou grato não só pela orientação, mas pela confiança em mim depositada, e pela experiência que me foi concedida como monitor do Laboratório de Princípios de Comunicações. Agradeço pelas discussões e reflexões que possibilitaram o enriquecimento e realização deste trabalho.

Aos amigos, em especial, Bruno, Célio, Cícero, Cláudio, Delleon, Elieber, Emanuel, Emanuela, Ester, Ivson, Jocélio, Josy, Karolie, Kelly, Lidiane, Luana Mércia, Nelson, Niedja, Rafaela, Rosilda, Thiago, Valentina, Vanessa e Wilker e, que incentivaram e contribuíram para o sucesso deste trabalho. Agradeço também aos meus alunos do Motiva e do Cursinho Pré-Vestibular Solidário da UFCG pelo apoio e amizade, e a todos os meus amigos da faculdade.

Aos primos, em especial, Antonio Manuel, Bárbara, Bruna, Daniela, Edinalva, Fátima, Francisco, Geraldo, Jacinta(Angel), José, Kassandra, Kelen, Lúcia, Maria José, Neide, Raquel, Reginaldo, Rowania e Paulo. Enfim, todos aqueles que me incentivaram e acreditaram em mim.

Aos professores da graduação, pelas valiosas críticas e sugestões.

Aos funcionários da coordenação de Engenharia Elétrica.

Resumo

Este trabalho tem como finalidade abordar o tema de modulação adaptativa para canais submetidos ao efeito do desvanecimento plano. Este tema de pesquisa vem ganhando destaque na literatura especializada, por propiciar melhores características de desempenho do que as modulações fixas. Ao contrário destas, cujas constelações permanecem fixas e são dimensionadas a partir das condições severas de propagação, na modulação adaptativa é possível variar a constelação durante o enlace. Alguns dos parâmetros como, potência de transmissão e tipo de modulação utilizada são escolhidos como parâmetro que reflita o desempenho do enlace.

As técnicas de modulação adaptativa são adequadas para canais afetados pelo desvanecimento plano. Na modulação adaptativa a definição do parâmetro a ser utilizado para realizar a adaptação, a escolha dos limiares de adaptação e o conjunto de esquemas de modulação a ser adotado são importantes e objetivam um compromisso entre a eficiência espectral e a taxa de erro de bit, conhecida como (BER – do inglês *Bit Error Rate*).

Neste trabalho realizar-se-á um estudo sobre modulação adaptativa. São descritas avaliações e comparações de desempenho dos sistemas encontrados na literatura. Os resultados encontrados indicam que a modulação adaptativa apresenta melhores características de desempenho que as obtidas usando modulação fixa.

Palavras-Chave: Modulação Adaptativa, Transmissão Digital, Canal AWGN e QAM

Sumário

1. INTRODUÇÃO	01
2. SISTEMAS DE COMUNICAÇÕES	03
2.1 Canal AWGN	03
2.2 Canal Rayleigh	04
3. MODULAÇÃO CLÁSSICA	06
3.1 - Esquemas de Modulação Digitais	07
3.1.1 - ASK – Amplitude Shift Keying	07
Características da Modulação ASK	09
3.1.2 - PSK – Phase Shift Keying	09
Curvas Teóricas do M-PSK	10
Simulação do 4-PSK	10
3.1.3 - QAM – Quadrature Amplitude Modulation	13
Probabilidade de Erro de Bit para o QAM	14
Simulação do 4-QAM	15
Simulação do 16-QAM	17
Simulação do 64-QAM	18
4. MODULAÇÃO ADAPTATIVA	19
4.1 Diagrama de blocos de um esquema de modulação adaptativa	19
4.2 Modulação adaptativa em canais com desvanecimento plano	20
4.3 Análise comparativa entre a modulação adaptativa e convencional	21
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	23

ANEXOS	24
Anexo A Curvas Teóricas do 2-PSK, 4-PSK, 8-PSK, 16-PSK, 32-PSK.	24
Anexo B Curvas Teóricas do QAM	25
Anexo C Simulação do 2-PSK e 4-PSK	27
Anexo D Simulação do 4-QAM e 16-QAM para canal AWGN	28
Anexo E Funções Implementadas	31
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 39

Lista de Figuras

- Figura 1: Modelo do Canal AWGN
- Figura 2: Modelo do Canal Rayleigh
- Figura 3: Diagrama de blocos de um sistema de comunicação digital.
- Figura 4: Sinal modulado (ASK)
- Figura 5: Curva de probabilidade de erro de símbolo para ASK.
- Figura 6: Curva de probabilidade de erro de símbolo para ASK.
- Figura 7: Regiões de decisão para um detector ML para constelação 4-PSK
- Figura 8: Curva de probabilidade de erro de símbolo para o 2-PSK.
- Figura 9: Curva de probabilidade de erro de símbolo para 4-PSK.
- Figura 10 : Constelação 16-QAM e 64-QAM
- Figura 11: Curvas Teóricas do 4-QAM, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM
- Figura 12: Regiões de decisão para um detector ML para constelação 4-QAM
- Figura 13: Curva de probabilidade de erro de bit para o 4-QAM.
- Figura 14: Regiões de decisão para um detector ML para constelação 16-QAM
- Figura 15: constelação 16-QAM com código Gray.
- Figura 16: Curva teórica e simulada de probabilidade de erro de bit para o 4-QAM.
- Figura 17: Curva teórica e simulada de probabilidade de erro de símbolo para o 64-QAM.
- Figura 18: Diagrama de bloco de básico de um sistema de comunicação com modulação adaptativa
- Figura 19: Probabilidade de Erro de um sistema de comunicação com modulação adaptativa.

Figura 20: Eficiência Espectral de um sistema de comunicação com modulação adaptativa.

Lista de Tabelas

Tabela 1: Modulação Adaptativa com cinco estratégias de transmissão.

Tabela 2: Limiares de Adaptação.

Lista de Abreviações

AWGN - Do inglês, Additive White Gaussian Noise, Ruído branco aditivo Gaussiano

ASK – Amplitude-Shift Keying

BPSK - Binary Phase Shift Keying

DEP – Densidade Espectral de Potência

DSP – Digital Signal Processor

PSK – Phase-Shift Keying

QAM – Quadrature Amplitude Modulation

QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying)

BER – Bit Error Rate, Taxa de Erro de Bit

SNR – Signal-Noise Ratio,

ML – Maximum Likelihood

Capítulo 1

1. INTRODUÇÃO

O aumento de demanda por sistemas de comunicações digitais em canais sem fio, bem como as restrições de largura de banda que, em geral, caracterizam esses canais, tem motivado o desenvolvimento de técnicas de transmissão digital com boas características de desempenho, particularmente no que se refere à elevada eficiência espectral, aos baixos valores de taxa de erro de *bit* e ao uso parcimonioso de potência. Tais características de desempenho são conflitantes, uma vez que a melhoria de uma delas normalmente é acompanhada de alguma degradação nas demais. Sendo assim, é importante estabelecer requisitos mínimos de desempenho e empregar estratégias de transmissão que propiciem boas soluções de compromisso. A modulação adaptativa vem ganhando destaque, sendo, bastante utilizada para os canais de comunicação submetidos ao efeito do desvanecimento plano.

Ao contrário das técnicas de modulação clássicas, cujas constelações são fixas e dimensionadas com base nas condições de propagação severas, as técnicas de modulação adaptativa variam as constelações durante o enlace, em resposta às mudanças das condições momentâneas de propagação do canal de comunicação.

Uma das técnicas de transmissão adaptativa que vem ganhando destaque nos últimos anos na literatura especializada é o esquema de modulação adaptativa (MOHAMMAD, 2005; CONTI, 2005; EKPENYONG, 2006). Esta técnica consiste em variar o esquema de modulação adotado pelo transmissor em resposta ao estado do canal. Objetiva-se melhorar a eficiência espectral quando o canal apresentar melhores condições de propagação e, simultaneamente, atender a uma taxa de erro de bit alvo. A otimização da eficiência espectral média é obtida por meio do aumento do número de pontos da constelação utilizada no esquema de modulação, quando as condições do canal assim permitirem. Por outro lado, quando o canal apresenta condições de severa atenuação, escolhe-se um esquema de modulação com poucos pontos de constelação, a fim de fornecer uma taxa de erro aceitável para o sistema. Vale salientar que essa abordagem de modulação adaptativa permite aos sistemas atingir uma alta vazão de dados à custa da variação da taxa de transmissão.

Objetivo

O objetivo deste trabalho é estudar as modulações digitais em alguns sistemas de comunicações convencionais, tais como, o BPSK e QAM. Em seguida, estudar um sistema de comunicação básico com modulação adaptativa e comparar os resultados para os diversos cenários de modulação.

Capítulo 2

Para a simulação de sistemas de comunicação é importante definir as características do meio de transmissão, ou seja, o canal de transmissão. A modelagem de canais de comunicação é uma técnica empregada para simular os efeitos a que está sujeito um sinal entre a transmissão e recepção. Podem-se classificar os canais de comunicação em dois tipos: Canais com Ruído Branco Aditivo Gaussiano, AWGN (do inglês *Additive White Gaussian Noise*) e Canais com Desvanescimento Multipercurso (Rayleigh). Neste trabalho serão considerados dois modelos de canais físicos, o canal submetido ao ruído branco aditivo *Gaussiano* (AWGN) e o canal com desvanecimento *Rayleigh*.

2.1 - Canal AWGN

O canal AWGN é um tipo de canal em que o ruído responsável por perturbar a comunicação é um ruído branco adicionado ao sinal. O Ruído Branco Aditivo Gaussiano (AWGN) tem esse nome devido ao fato de que o ruído inserido na entrada do receptor, tem o comportamento de uma variável aleatória com distribuição estatística Gaussiana, além de possuir uma largura banda infinita. Nas comunicações é comum utilizar o modelo do canal AWGN, pois este fornece uma base para o projeto do receptor ótimo.

O canal AWGN pode ser representado matematicamente pela equação.

$$y(t) = x(t) + n(t)$$

onde $x(t)$ representa o sinal de saída do transmissor, $n(t)$ é o ruído e $y(t)$ é o sinal que chega na entrada do receptor. O modelo em diagrama de blocos é representado na figura 1.

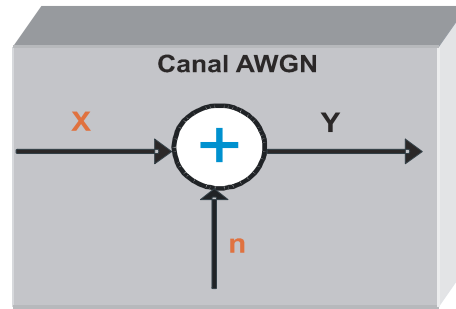


Figura 1: Modelo do Canal AWGN

O canal AWGN é utilizado para modelar sistemas de comunicação fixa e com linha de visada, como por exemplo, satélite, produzindo resultados próximos dos sistemas físicos.

2.2 - Canal Rayleigh

O Canal Rayleigh é utilizado para modelar sistemas de comunicação móvel e sem linha de visada. É utilizado principalmente em modelos onde se deseja analisar o efeito de desvanecimento. Este efeito deve-se principalmente ao fato do meio apresentar multi-percursos para o sinal. Do lado do receptor, chegam cópias do sinal enviado com atrasos e atenuações distintas. O efeito do atraso ocorre por causa dos obstáculos naturais encontrados pelo sinal até chegar ao seu destino que é o receptor, obstáculos como edifícios e montanhas. Este por sua vez, faz com que cópias do sinal passem por caminhos diferentes. Diversos efeitos podem afetar o sinal e sua chegada ao receptor, tais como, reflexão, refração e difração. Dependendo do caminho percorrido pelo sinal, a soma vetorial dos sinais que chegam ao receptor podem apresentar uma interferência construtiva ou destrutiva, causando uma alteração na potência do sinal. Esta alteração é conhecida como desvanecimento e apresenta-se conforme uma distribuição Rayleigh.

O canal com desvanecimento ou canal Rayleigh, é definido como o produto do sinal transmitido por um coeficiente complexo de desvanecimento, conforme a seguinte equação:

$$y(t) = h(t) \cdot x(t) + n(t)$$

Sendo $y(t)$ o sinal corrompido pelo canal, $n(t)$ é o ruído aditivo Gaussiano e $h(t)$ a componente multiplicativa do canal. A Figura 2 ilustra um modelo para este canal.

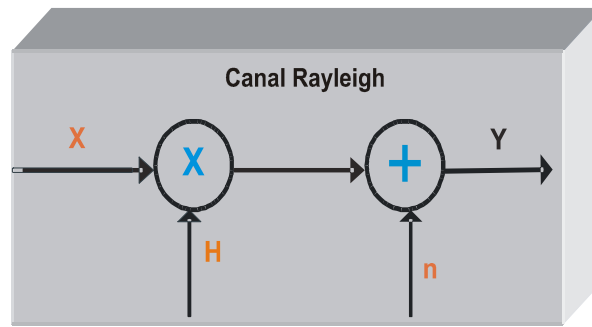


Figura 2: Modelo do Canal Rayleigh

Analisando-se o diagrama de blocos da figura 2, observe-se que o ruído AWGN também faz parte do modelo e é adicionado após o efeito de desvanecimento.

Capítulo 3

O objetivo de um sistema de comunicação é transmitir sinais portadores de informação por meio de um canal de comunicação que separa o transmissor do receptor. Um sistema de comunicação digital pode ser representado por diagramas de blocos, conforme mostrado na Figura 1. O sistema é composto basicamente por quatro componentes: Fonte, Transmissor, Canal e Receptor.

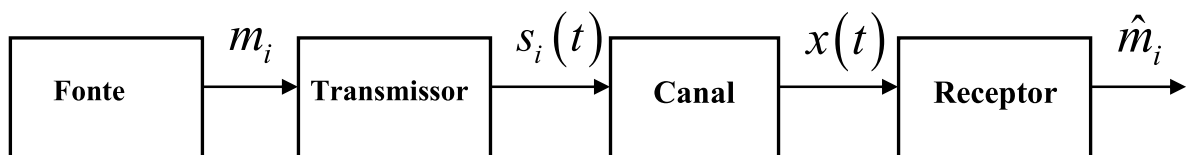


Figura 3: Diagrama de blocos de um sistema de comunicação digital.

A Fonte gera símbolos a cada período T dado em segundos, estes símbolos pertencem a um alfabeto de M símbolos. O Transmissor codifica a mensagem m_i em um sinal $s_i(t)$ apropriado para ser transmitido pelo canal. Adiciona-se ao sinal um ruído, obtendo o sinal $x(t)$, ao chegar no receptor é feita uma estimativa para o sinal, baseado em algum critério de decisão.

Um sistema de transmissão digital deve ter algumas características desejáveis tais como:

- Baixa Taxa de erro de bit - BER.
- Alta eficiência em potência.
- Alta eficiência espectral.
- Desempenho satisfatório em canais com desvanecimento.
- Utilizar pouca largura de banda.
- Fácil implementação.
- Baixo custo.

3.1 Esquemas de Modulação Digitais

3.1.1 - ASK – Amplitude Shift Keying

O esquema de modulação digital ASK é um sistema de Chaveamento de Deslocamento de Amplitude, mais conhecida como chaveamento Liga-Desliga. O ASK é um sistema de dois símbolos binários digitais, zero e um, e são representados por pulsos de uma portadora senoidal de frequência f_c com duas amplitudes A_0 e A_1 . Geralmente, assume-se A_0 como sendo o zero. Nesta modulação, temos:

$$f(t) = \begin{cases} A_1 \Pi(t/T_0) \cos(2\pi f_c t), & \text{para o dígito 1} \\ 0, & \text{para o dígito 0} \end{cases}$$

Na figura 4, temos a representação de um sinal modulado para o ASK. Tanto a fase como a frequência da portadora são mantidos constantes para este esquema de modulação.

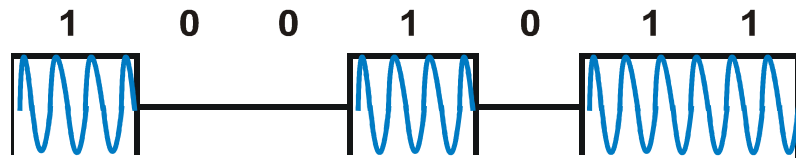


Figura 4: Sinal modulado (ASK)

A expressão de probabilidade de erro foi consultada no artigo intitulado *Modulação Adaptativa: princípios e características de desempenho*. A probabilidade de erro de símbolo para uma modulação M-ASK, em função da relação sinal ruído dada em decibéis é dada por:

$$P_M = \frac{2(M-1)}{M} Q \left(\sqrt{\frac{6 \log_2 M}{(M^2-1)} \cdot \frac{E_b}{N_0}} \right)$$

Na qual

$$Q(x) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{\sqrt{2}} \right)$$

Reescrevendo a função de probabilidade de erro de símbolo em termos da função erro complementar erfc, temos:

$$P_M = \frac{M-1}{M} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{6 \log_2 M}{2(M^2-1)} \cdot \frac{E_b}{N_0}} \right)$$

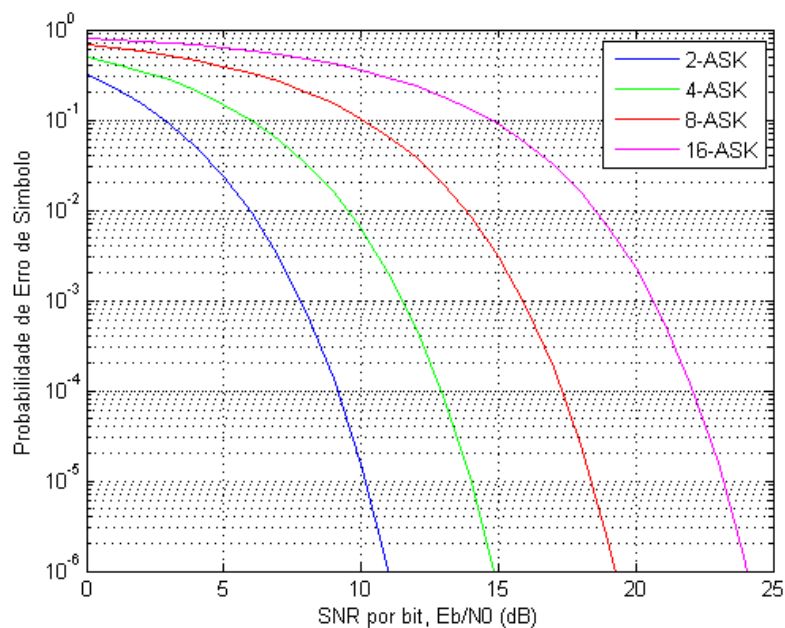


Figura 5: Curva teórica de probabilidade de erro de símbolo para ASK.

A curva de probabilidade de erro de símbolo para o ASK mostrada anteriormente, pode ser obtida a partir do scrip file gerado no MATLAB. Veja o arquivo de comando.

```
% UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG
% PROGRAMADOR: JOSENILDO FERREIRA GALDINO
% E-MAIL: JOSENILDOFG@GMAIL.COM
% DATA:09/12/08
% CURVA DE PROBABILIDADE DE ERRO DE SIMBOLO PARA O 2-ASK, 4-ASK, 8-ASK e
% 16- ASK
clf
clear all
snr_i = 0; snr_inc = 1; snr_f = 25;
snr_db = snr_i:snr_inc:snr_f;
M = [2 4 8 16];
for k = 1:4
for n = 1:length(snr_db)
    snr = 10^(0.1*snr_db(n));
    Pe(n) = (M(k)/(M(k)-1))*erfc(sqrt((6*log2(M(k))*snr)/(2*(M(k)^2-1))));
end
if (k == 1)
```

```

        semilogy(snr_db, Pe, 'b');
end
if (k == 2)
    semilogy(snr_db, Pe, 'g');
end
if (k == 3)
    semilogy(snr_db, Pe, 'r');
end
if (k == 4)
    semilogy(snr_db, Pe, 'm');
    legend('2-ASK', '4-ASK', '8-ASK', '16-ASK');
end
hold on;
xlabel('SNR por bit, Eb/N0 (dB)');
ylabel('Probabilidade de Erro de Simbolo');
axis([0 25 10e-7 1]);
grid on;
end

```

Características da Modulação ASK

- A largura de banda necessária para a transmissão do sinal é o dobro da banda necessária para a transmissão do sinal modulador em banda-base.
- Metade de toda potência transmitida corresponde à portadora que não conduz informação;
- As perdas de transmissão dificultam o estabelecimento de níveis de decisão do receptor.
- É muito sensível a ruídos e interferências.

3.1.2 - PSK – Phase Shift Keying

O esquema de modulação digital PSK é um sistema de Chaveamento de Deslocamento de Fase, em que a fase da portadora é variada de forma a representar os dígitos 0 e 1. Neste caso, tanto a amplitude como a frequência da portadora são mantidos constantes. Esta modulação também é conhecida como BPSK (*Binary Phase Shift Keying*)

Neste sistema de modulação, quando ocorre uma transição de um bit 0 para um bit 1, ou de um bit 1 para um bit 0, a portadora modifica sua fase de 180 graus.

Curvas Teóricas do M-PSK

A curva de probabilidade de erro de bit para o PSK é mostrada na figura 5. Pode ser obtida a partir do Scrip file gerado no MATLAB. Ver em Anexo A o arquivo de comando bpsk.m

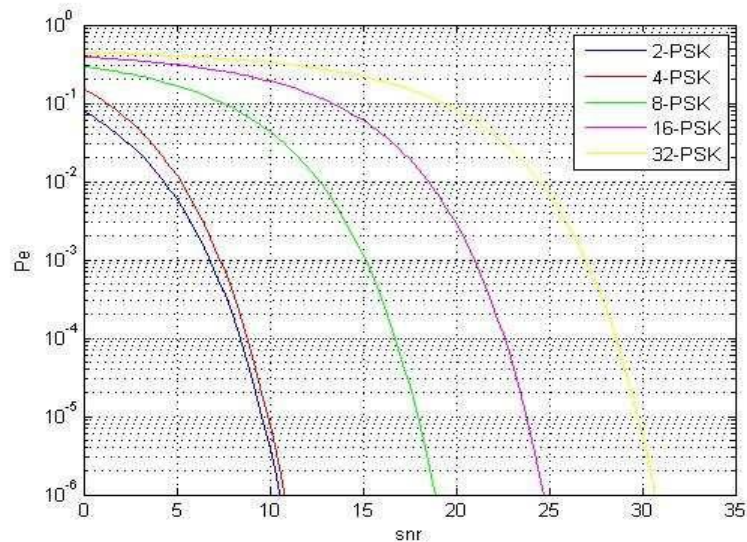
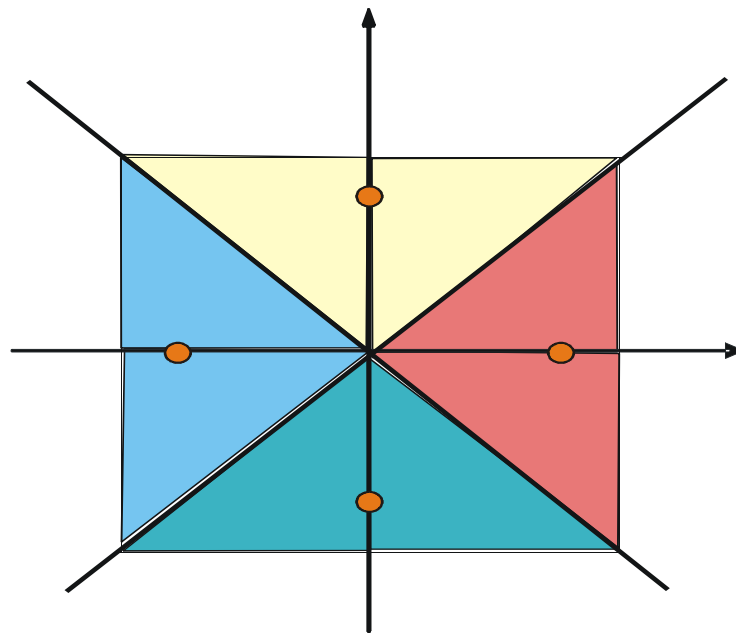
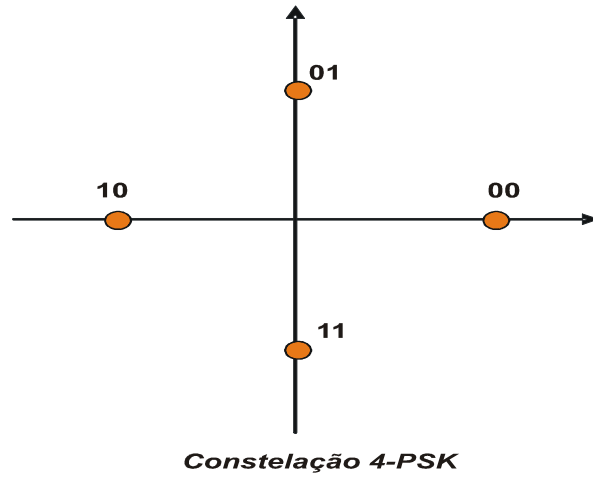


Figura 6: Curva teórica de probabilidade de erro de símbolo para o ASK

Simulação do 4-PSK

Na constelação do 4-PSK são utilizados 4 símbolos. Cada símbolo por sua vez, envia dois bits de informação. Neste caso a amplitude da portadora é mantida constante, o parâmetro a ser variado é sua fase, por isso, o nome Chaveamento por Deslocamento de Fase (PSK). Comumente, a constelação 4-PSK é denominada de QPSK (*Quadrature Phase-Shift Keying*). Na figura 7, temos a representação da constelação 4-PSK e dos limiares de decisão, onde, considera-se que a fonte de informação gera dígitos binários (bits) estatisticamente independentes e equiprováveis.



Constelação 4-PSK, com os Limiares de Decisão

Figura 7: Regiões de decisão para um detector ML para constelação 4-PSK

As curvas de probabilidade de erro em função da relação sinal ruído para as modulações 2 e 4 PSK são mostradas nas figuras 8 e 9, respectivamente, nesta ordem. Para ver o arquivo de script do Matlab da simulação, ver anexo C.

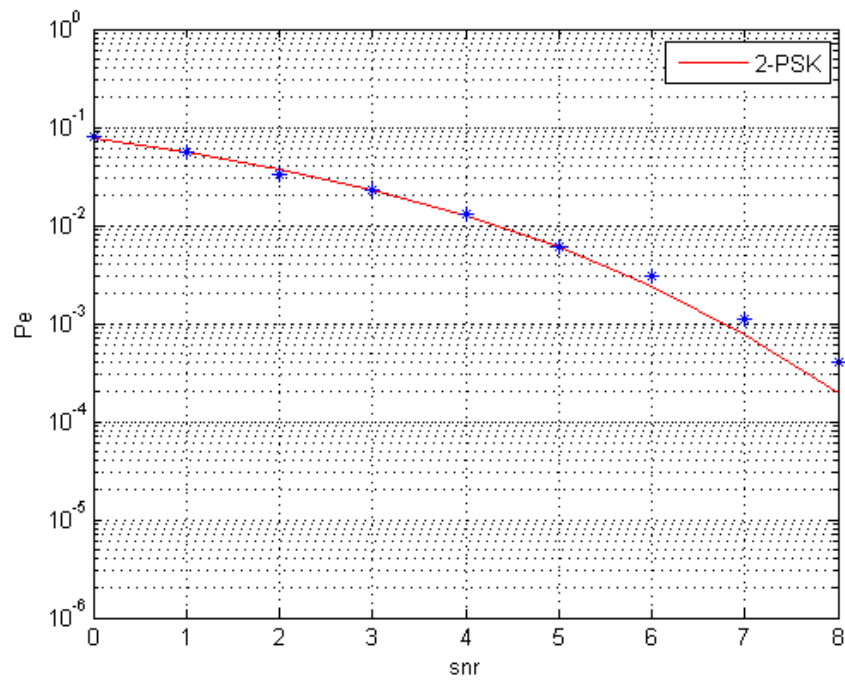


Figura 8: Curva teórica e simulada da probabilidade de erro de símbolo para o 2-PSK

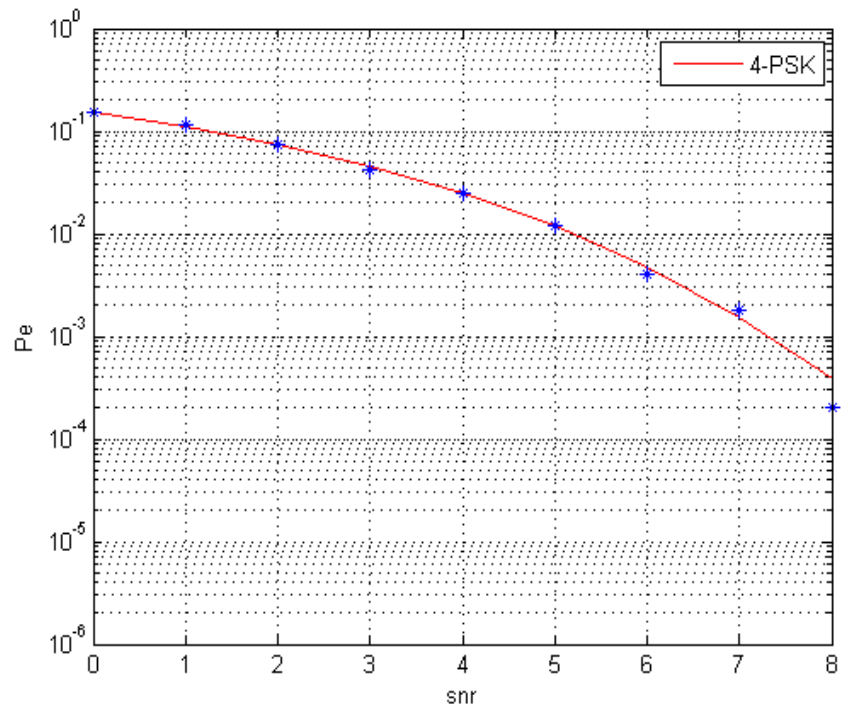


Figura 9: Curva teórica e simulada da probabilidade de erro de símbolo para 4-PSK

3.1.3 - QAM – *Quadrature Amplitude Modulation*

O esquema de modulação QAM pode ser definida como sendo:

O QAM, modulação por amplitude em quadratura, é um sistema otimizado de modulação que modifica duas características da portadora: amplitude e fase. Também é conhecido por modulação combinada de amplitude e fase: AMPSK. (MEDEIROS, 2004).

A modulação QAM pode ser vista como uma modulação híbrida, sendo o resultado da combinação da modulação PSK e ASK. Na PSK, a informação digital está inserida na fase da portadora, enquanto que na ASK está inserida na amplitude da portadora. Sendo assim, na modulação QAM os parâmetros fase e amplitude da portadora variam conforme a informação digital que está sendo transmitida.

A modulação QAM apresenta algumas vantagens em relação à modulação PSK, tais como: maior taxa de erro de bit para uma mesma relação sinal ruído e maior velocidade de transmissão. Entretanto, o sistema QAM requer uma maior complexidade computacional do que o PSK, este problema atualmente, vem sendo combatido com a utilização dos DSP's (*Digital Signal Processors*).

Na constelação 16-QAM, temos 16 símbolos, sendo 4 em cada quadrante. Neste caso, cada símbolo é formado por 4 bits. Na constelação 64-QAM, temos 64 símbolos, sendo 16 em cada quadrante. Cada símbolo é representado por 6 bits. Na Figura 10, temos a constelação 16-QAM e 64-QAM.

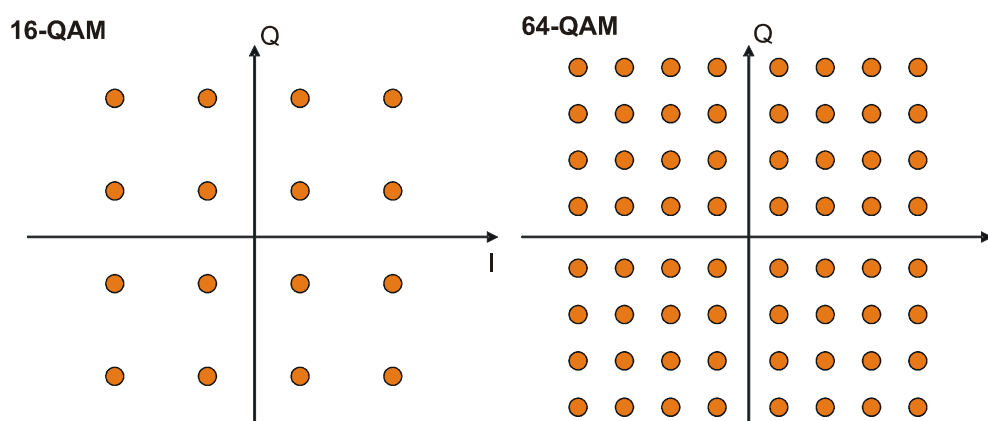


Figura 10: Constelação 16-QAM e 64-QAM

A constelação 16-QAM apresenta uma taxa de transmissão inferior ao da constelação 64-QAM, pelo fato de que no 16-QAM cada símbolo transmitido é formado por um número menor de bits (4 bits). Entretanto, a constelação 16-QAM tem a vantagem de que o receptor tem uma probabilidade de decidir por um símbolo errado bem inferior ao do 64-QAM, visto que os símbolos da constelação 16-QAM estão mais afastados espacialmente, ou seja, a distância euclidiana entre os símbolos é bem maior neste caso. Por outro lado, a taxa de transmissão do 64-QAM é maior do que a do 16-QAM, por poder transmitir 6 bits

De acordo com (DUARTE,2004), a modulação 64-QAM permite mandar ainda mais bits por símbolo do que a modulação 16-QAM, porém é necessária uma melhor SNR para ser possível sobrepor as interferências e manter uma determinada taxa de erro de bits

Probabilidade de Erro de Bit para o QAM

Para a modulação M-QAM, sob o critério ML e com um canal AWGN, as expressões de probabilidade de erro de bit podem ser escritas da seguinte forma. A expressão mostrada a seguir da probabilidade de erro foi consultada no artigo intitulado *Modulação Adaptativa: princípios e características de desempenho*

$$P_b(e / \gamma, M) = \frac{1}{\log_2 \sqrt{M}} \sum_{m=1}^{\log_2 \sqrt{M}} P_b(m)$$

Sendo,

$$P_b(m) = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{n=0}^{(1-2^{-m})\sqrt{M}-1} A_{m,n} B_n$$

Onde

$$A_{m,n} = (-1)^{\left\lfloor \frac{n \cdot 2^{m-1}}{\sqrt{M}} \right\rfloor} \cdot \left(2^{m-1} - \left\lfloor \frac{n \cdot 2^{m-1}}{\sqrt{M}} + \frac{1}{2} \right\rfloor \right)$$

e

$$B_n = \text{erfc} \left((2n + 1) \sqrt{\frac{3 \log_2 M \gamma}{2(M - 1)}} \right)$$

Nessas equações $\text{erfc}(x)$ representa a função erro complementar, (para mais detalhes Ver apêndice), $\lfloor x \rfloor$ é a função maior inteiro que x , γ é a razão sinal ruído, que comumente é expressa em termos da energia média e bit e da DEP (Densidade Espectral de Potência) do ruído aditivo da seguinte forma: $\gamma = \frac{E_b}{N_0}$

A figura 11 representa as curvas teóricas da probabilidade de erro de bit, dada uma relação sinal ruído em decibéis. O arquivo de comando do MATLAB gerado e utilizado para gerar a curva esta em anexo. (Ver anexo B).

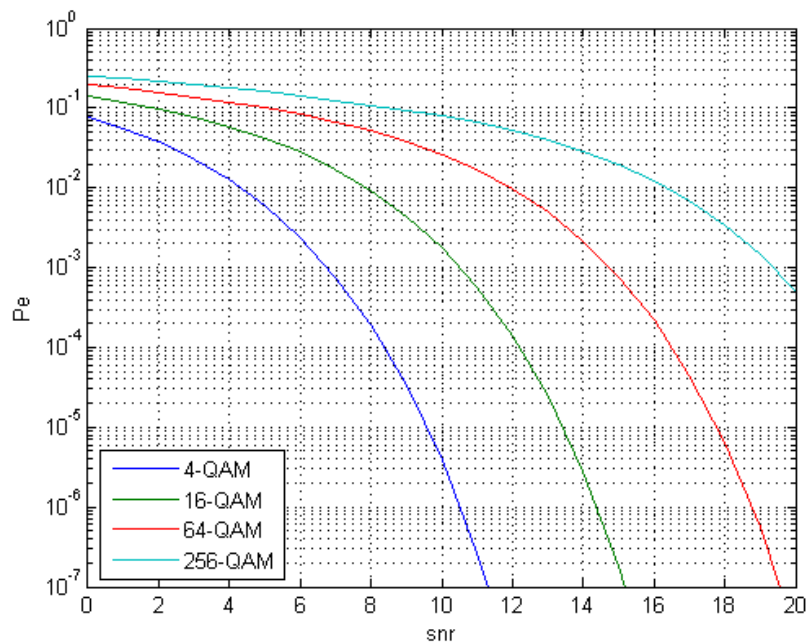
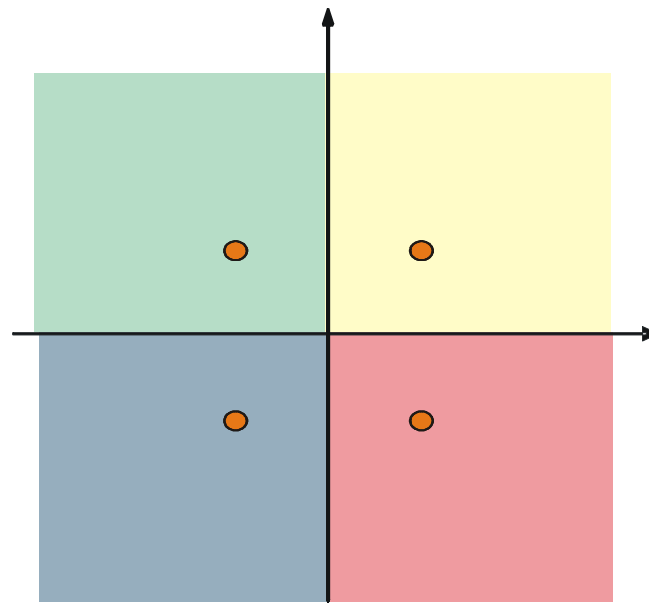


Figura 11: Curvas Teóricas do 4-QAM, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM

Simulação do 4-QAM

Neste esquema de modulação a informação é transmitida por variações na amplitude e fase. O M-QAM codifica $\log_2 M$ bits. Para o caso 4-QAM utiliza-se para cada símbolo dois bits. Na figura 12, temos a constelação 4-QAM, bem como os limiares de decisão.



Constelação 4-QAM, com os Limiares de Decisão

Figura 12: Regiões de decisão para um detector ML para constelação 4-QAM

A curva de probabilidade de erro para o 4-QAM é mostrada na Figura 13. Para ver o arquivo de script do matlab da simulação, ver anexo D.

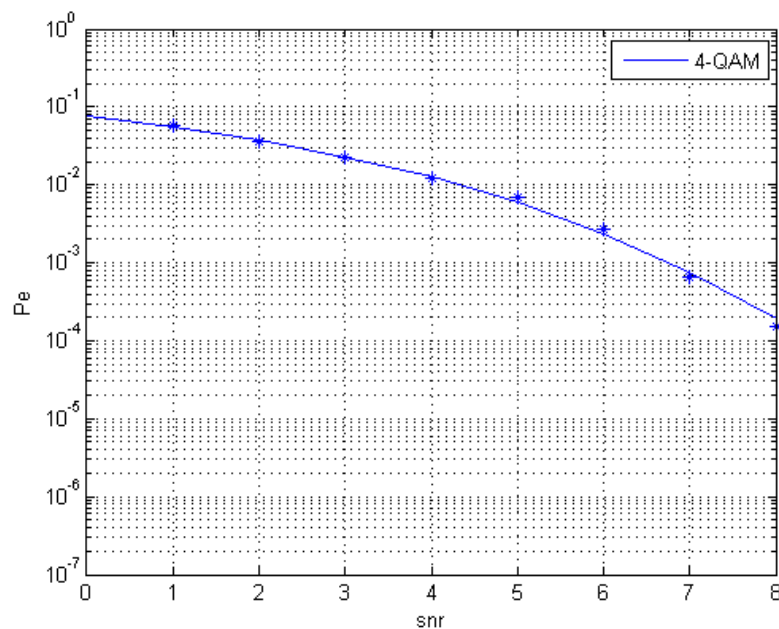
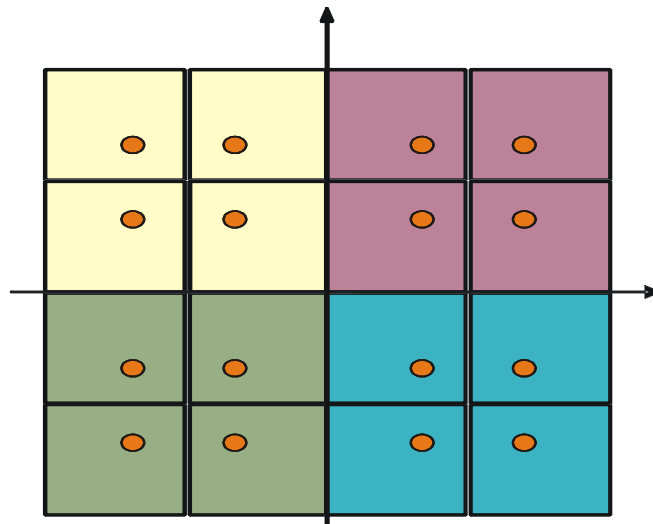


Figura 13: Curva teórica e simulada de probabilidade de erro de bit para o 4-QAM.

Simulação do 16-QAM

Neste esquema de modulação a informação é transmitida por variações na amplitude e fase. O M-QAM codifica $\log_2 M$ bits. Para o caso 16-QAM utiliza-se para cada símbolo quatro bits. Na figura 14 temos a constelação 16-QAM, bem como os limiares de decisão.



Constelação 16-QAM, com os limiares de decisão

Figura 14: Regiões de decisão para um detector ML para constelação 16-QAM

Comumente, a constelação de sinais pode ser codificada utilizando um código. Uma possibilidade é utilizar o código Gray,. Neste código, apenas um bit varia de um símbolo para seu vizinho. Na Figura 15, temos a constelação 16-QAM com código Gray.

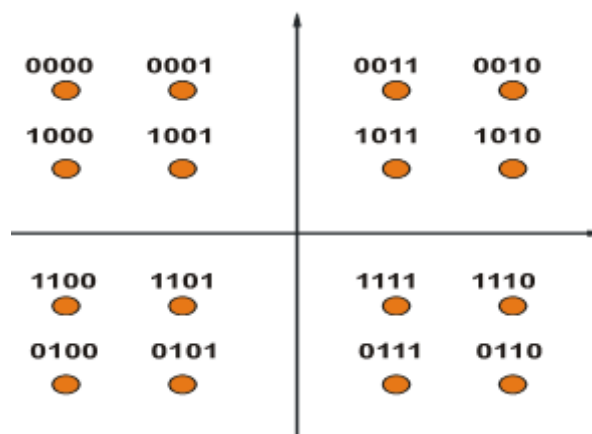


Figura 15: constelação 16-QAM com código Gray.

A curva de probabilidade de erro para o 16-QAM é mostrada na Figura 16. Para ver o arquivo de script do matlab da simulação, ver anexo D.

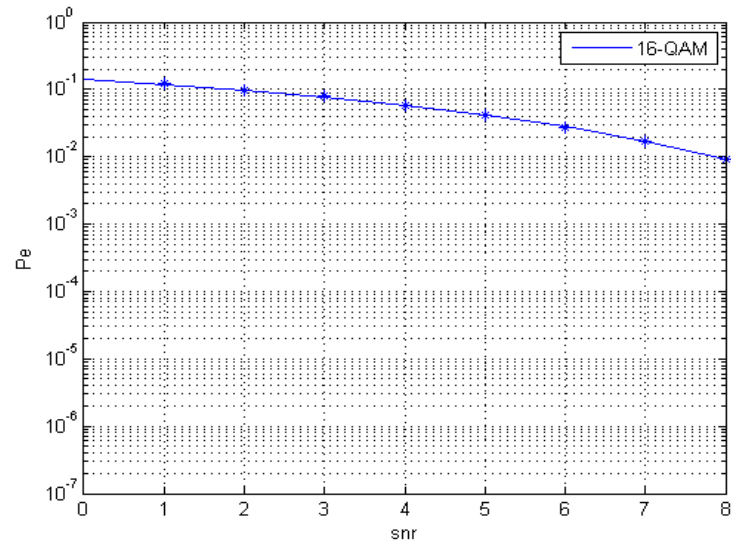


Figura 16: Curva teórica e simulada de probabilidade de erro de bit para o 4-QAM.

Simulação do 64-QAM

Neste esquema de modulação a informação é transmitida por variações na amplitude e fase. O M-QAM codifica $\log_2 M$ bits. Para o caso 64-QAM utiliza-se para cada símbolo seis bits. Na figura 17 temos a curva teórica e simulada da probabilidade de erro para o 64-QAM

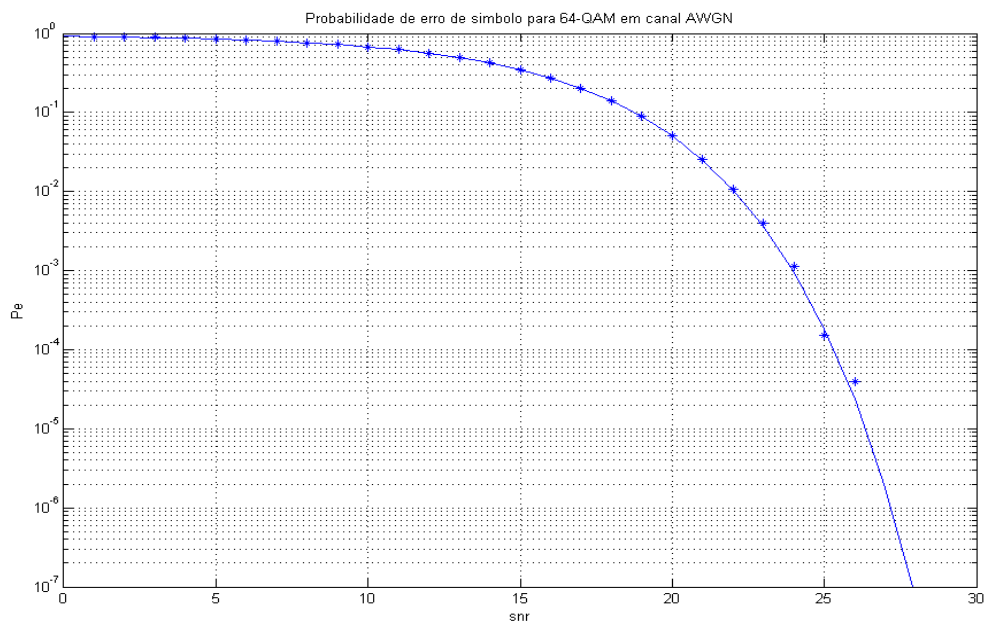


Figura 17: Curva teórica e simulada de probabilidade de erro de símbolo para o 64-QAM.

Capítulo 4

Neste capítulo, apresenta-se uma breve discussão sobre técnicas de modulação adaptativa, na qual são descritos os princípios básicos da técnica de modulação adaptativa, ressaltando suas características, vantagens e desvantagens. Para melhor entendimento e discussão da técnica é apresentado um diagrama de blocos de um sistema com modulação adaptativa.

4.1 Diagrama de blocos de um esquema de modulação adaptativa

O diagrama de blocos de um sistema de comunicação com modulação adaptativa é ilustrado na Figura 18.

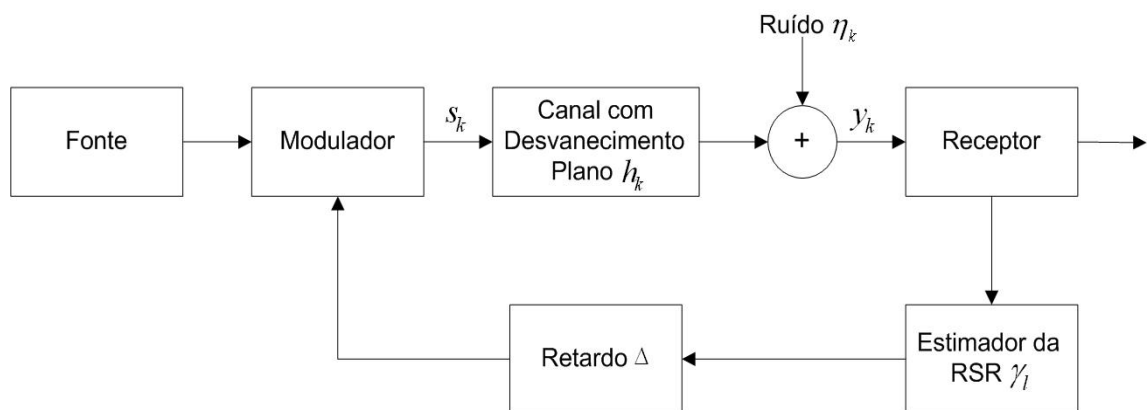


Figura 18: Diagrama básico de um sistema de comunicação com modulação adaptativa

No esquema proposto anteriormente considera-se que a fonte de informação gera dígitos binários (bits) estatisticamente independentes e equiprováveis. Os bits gerados são mapeados pelo modulador, em bloco de bits consecutivos, em símbolos s_k , de energia média, σ_s^2 , de acordo com o alfabeto do esquema de modulação a ser utilizado. Na modulação adaptativa utiliza-se preferencialmente, o esquema de modulação QAM que propicia uma otimização entre eficiência espectral e taxa de erro de bit.

Considerar-se-á um canal com desvanecimento plano variante no tempo. Sendo assim, a estimativa na entrada do receptor é dada por:

$$y_k = h_k s_k + n_k$$

onde h_k é o coeficiente aleatório do canal. A saída do canal é corrompida pela ação do ruído gaussiano aditivo branco aditivo n_k , modelado por um processo gaussiano branco complexo de média nula e variância σ_n^2 , estatisticamente independente do canal de comunicação e do sinal transmitido, gerando a seqüência de entrada no receptor.

O transmissor envia a informação em blocos de N símbolos. O receptor tem a função de receber o sinal, e então empregando um mecanismo de decisão brusca ou suave para selecionar a informação que foi transmitida e também estimar o parâmetro responsável pela escolha do esquema de modulação a ser adotado na próxima transmissão do bloco de dados. O parâmetro estimado, portanto, deve ser enviado através do canal de retorno ao transmissor, daí a importância do canal de retorno.

4.2 Modulação adaptativa em canais com desvanecimento plano

A partir do parâmetro estimado γ é preciso estabelecer limitantes que indiquem a faixa em que cada esquema de modulação deve ser utilizado. Uma possibilidade é mostrada na Tabela 1. Portanto, o desempenho da modulação adaptativa depende fortemente dos valores dos limiares de adaptação. Esses limiares devem ser escolhidos para explorar plenamente as boas expectativas de desempenho que a modulação adaptativa propicia. Os dados mostrados nas tabelas 1 e 2 foram retirados do artigo intitulado *Modulação Adaptativa: princípios e características de desempenho*, conforme indicado nas referências bibliográficas.

Tabela 1: Modulação Adaptativa com cinco estratégias de transmissão

Modulação	Regiões de Decisão
0	$\gamma_1 \leq \lambda_1$
4 - QAM	$\lambda_1 < \gamma_1 \leq \lambda_2$
16 - QAM	$\lambda_2 < \gamma_1 \leq \lambda_3$
64 - QAM	$\lambda_3 < \gamma_1 \leq \lambda_4$
256 - QAM	$\gamma_1 \geq \lambda_4$

Para uma estratégia de modulação adaptativa conforme a descrita na Tabela 1, com uma probabilidade de erro alvo de 0.01 e canal Rayleigh. Os limiares de adaptação são dados na Tabela 2.

Tabela 2: Limiares de adaptação

Limiares de Adaptação	Valores em dB
λ_1	2,0784
λ_2	5,4163
λ_3	11,4764
λ_4	25,6320

4.3 Análise comparativa entre a modulação adaptativa e convencional

Os resultados mostrados a seguir nas figuras 19 e 20 foram retirados do artigo intitulado *Modulação Adaptativa: princípios e características de desempenho*, conforme indicado nas referências bibliográficas. A Figura 20 apresenta não apenas a curva de probabilidade de erro de *bit* da modulação adaptativa, mas também curvas referentes às modulações 4-QAM, 16-QAM, 64-QAM e 256-QAM convencionais. Tais curvas foram incluídas para fins de comparação de desempenho das técnicas convencionais com a modulação adaptativa.

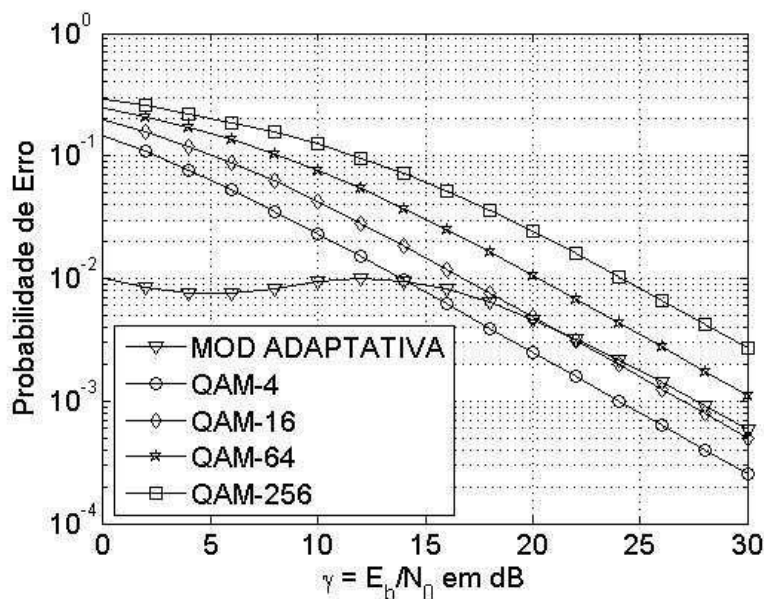


Figura 19: Probabilidade de Erro de um sistema de comunicação com modulação adaptativa.

Na Figura 20 são apresentadas curvas de eficiência espectral para o sistema que emprega modulação adaptativa. Novamente, para fins de comparação de desempenho são incluídas curvas de Eficiência Espectral para as modulações clássicas.

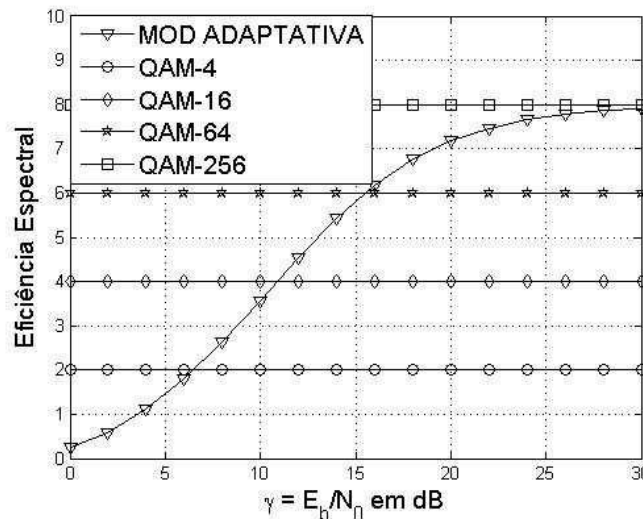


Figura 20: Eficiência Espectral de um sistema de comunicação com modulação adaptativa.

As figuras 19 e 20 mostram nítida vantagem de desempenho da modulação adaptativa em relação às modulações convencionais. Isso é fruto da possibilidade de se adotar uma modulação mais conservadora, ou até mesmo a de não realizar transmissões quando o canal excursiona pelos profundos desvanecimentos, reduzindo assim, as taxas de erro. Ao mesmo tempo em que são adotadas modulações com muitos pontos na constelação quando o canal oferece boas condições de propagação. Dessa forma, beneficiando a eficiência espectral sem comprometer sobretudo a taxa de erro.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O esquema de modulação adaptativa possibilita que um determinado tipo de esquema de modulação seja utilizado dependendo da relação sinal ruído. Esta característica possibilita uma transmissão mais robusta e adequada às condições do canal. Com a modulação adaptativa é possível variar o tamanho da constelação de acordo com as condições de propagação do canal, ou seja, para canais com boas condições de propagação a modulação adaptativa disponibiliza uma modulação com muitos pontos na constelação, otimizando a eficiência espectral do enlace, entretanto, sem prejudicar a sua taxa de erro. Caso contrário, o canal apresente profundos desvanecimentos, as técnicas de modulação adaptativa disponibilizam uma modulação com poucos pontos na constelação, beneficiando a taxa de erro exibida no enlace.

Geralmente, as técnicas de modulação adaptativa propiciam melhores características de desempenho quando comparadas às modulações clássicas. Os sistemas de comunicações baseados nestas técnicas, para uma dada potência de transmissão e largura de banda, apresentam melhores velocidades de transmissão ao mesmo tempo em que atendem requisitos de probabilidade de erro. Entretanto, a utilização das técnicas de modulação adaptativa requer uma maior complexidade computacional em relação às técnicas de modulação convencionais. Este aspecto surge da necessidade de se utilizar uma técnica para estimar o parâmetro de adaptação no receptor, e do canal de retorno enviar um parâmetro de adaptação que deve ser enviado ao transmissor.

A modulação adaptativa é indicada para aplicações em que se dispõe de canal de retorno e naquelas em que o fluxo de dados não seja constante. Isto advém do fato de que as modulações adaptativas fornecer uma taxa de transmissão variante no tempo, por causa da dinâmica do canal de comunicação.

ANEXOS

ANEXO A – Curvas Teóricas do 2-PSK, 4-PSK, 8-PSK, 16-PSK, 32- PSK.

Script File: bpsk.m

```

% UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG
% PROGRAMADOR: JOSENILDO FERREIRA GALDINO
% E-MAIL: JOSENILDOFG@GMAIL.COM
% DATA:20/09/08
% CURVA DE PROBABILIDADE DE ERRO EM FUNÇÃO DA RSR DADA EM DB.
% PARA O 2-PSK, 4-PSK, 8-PSK, 16-PSK, 32-PSK
%
% -----
% 2-PSK
% -----
clear all
clf
snr_i = 0; snr_f = 35; snr_inc = 0.25;
snr_db = snr_i:snr_inc:snr_f
k = length(snr_db);
for n = 1:k
    snr = 10.^(snr_db(n)./10);
    Pe(n) = 0.5*erfc(sqrt(snr));
end
semilogy(snr_db,Pe);
xlabel('snr');
ylabel('Pe');
axis([0 35 10e-7 1]);
grid on;
hold on;
%-----
% 4-PSK
%-----
clear all
clf
snr_i = 0; snr_f = 35; snr_inc = 0.25;
snr_db = snr_i:snr_inc:snr_f
k = length(snr_db);
for n = 1:k
    snr = 10.^(snr_db(n)./10);
    P(n) = 1 - (1 - 0.5*erfc(sqrt(snr)) )^2
end
semilogy(snr_db,P,'r');
axis([0 35 10e-7 1]);
grid on;
legend('2-PSK','4-PSK');
hold on;
% 8-PSK
%-----
snr_i = 0; snr_f = 35; snr_inc = 0.25;
snr_db = snr_i:snr_inc:snr_f
k = length(snr_db);
for n = 1:k
    snr = 10.^(snr_db(n)./10);
    P(n) = 0.5*erfc(sqrt(snr)*sin(pi/8));
end
end

```

```

semilogy(snr_db,P,'g');
axis([0 35 10e-7 1]);
grid on;
legend('2-PSK','4-PSK','8-PSK');
hold on;

% 16-PSK
%-----
snr_i = 0; snr_f = 35; snr_inc = 0.25;
snr_db = snr_i:snr_inc:snr_f
k = length(snr_db);
for n = 1:k
    snr = 10.^(snr_db(n)./10);
    P(n) = 0.5*erfc(sqrt(snr)*sin(pi/16));
end
semilogy(snr_db,P,'m');
axis([0 35 10e-7 1]);
grid on;
legend('2-PSK','4-PSK','8-PSK','16-PSK');
hold on;

% 32-PSK
%-----
snr_i = 0; snr_f = 35; snr_inc = 0.25;
snr_db = snr_i:snr_inc:snr_f
k = length(snr_db);
for n = 1:k
    snr = 10.^(snr_db(n)./10);
    P(n) = 0.5*erfc(sqrt(snr)*sin(pi/32)); ;
end
semilogy(snr_db,P,'y');
axis([0 35 10e-7 1]);
grid on;
legend('2-PSK','4-PSK','8-PSK','16-PSK','32-PSK');
hold on;

```

ANEXO B - Curvas Teóricas do QAM

Script File: qam4.m

```

% UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG
% PROGRAMADOR: JOSENILDO FERREIRA GALDINO
% E-MAIL: JOSENILDOFG@GMAIL.COM
% DATA:11/10/08
% CURVA DE PROBABILIDADE DE ERRO EM FUNÇÃO DA RSR DADA EM DB.
% Curva Teóricas Para o 4-QAM, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM
% -----

clc
clear all
clf

% Curva Teórica do 4-QAM
% -----

snr_i = 0; snr_f = 20; snr_inc = 1;
snr_db = snr_i:snr_inc:snr_f

```

```

M = 4;
Pb = zeros(1,length(snr_db));
for indice_snr = 1:length(snr_db)
    snr = 10^(0.1*snr_db(indice_snr));
    for alpha=1:log2(sqrt(M))
        for m=0:((1-2^(-alpha))*sqrt(M)-1)
            Pb(indice_snr) = Pb(indice_snr) + ...
                ((-1)^fix(m*2^(alpha-1)/sqrt(M)) * (2^(alpha-1)-
                fix(m*2^(alpha-1)/sqrt(M)+0.5))*...
                erfc((2*m+1)*sqrt(3*log2(M)*snr/(2*(M-1)))))/sqrt(M);
        end
    end

    Pb(indice_snr) = Pb(indice_snr)/log2(sqrt(M));
end
semilogy(snr_db,Pb,'b');
grid on;
hold on;

```

```

% Curva Teórica do 16-QAM

```

```

% -----
M = 16;
Pb = zeros(1,length(snr_db));
for indice_snr = 1:length(snr_db)
    snr = 10^(0.1*snr_db(indice_snr));
    for alpha=1:log2(sqrt(M))
        for m=0:((1-2^(-alpha))*sqrt(M)-1)
            Pb(indice_snr) = Pb(indice_snr) + ...
                ((-1)^fix(m*2^(alpha-1)/sqrt(M)) * (2^(alpha-1)-
                fix(m*2^(alpha-1)/sqrt(M)+0.5))*...
                erfc((2*m+1)*sqrt(3*log2(M)*snr/(2*(M-1)))))/sqrt(M);
        end
    end

    Pb(indice_snr) = Pb(indice_snr)/log2(sqrt(M));
end
semilogy(snr_db,Pb,'g');

```

```

% Curva Teórica do 64-QAM

```

```

% -----
M = 64;
Pb = zeros(1,length(snr_db));
for indice_snr = 1:length(snr_db)
    snr = 10^(0.1*snr_db(indice_snr));
    for alpha=1:log2(sqrt(M))
        for m=0:((1-2^(-alpha))*sqrt(M)-1)
            Pb(indice_snr) = Pb(indice_snr) + ...
                ((-1)^fix(m*2^(alpha-1)/sqrt(M)) * (2^(alpha-1)-
                fix(m*2^(alpha-1)/sqrt(M)+0.5))*...
                erfc((2*m+1)*sqrt(3*log2(M)*snr/(2*(M-1)))))/sqrt(M);
        end
    end

    Pb(indice_snr) = Pb(indice_snr)/log2(sqrt(M));
end
semilogy(snr_db,Pb,'r');

```

```

% Curva Teórica do 256-QAM

```

```

% -----

```

```

M = 256;
Pb = zeros(1,length(snr_db));
for indice_snr = 1:length(snr_db)
    snr = 10^(0.1*snr_db(indice_snr));
    for alpha=1:log2(sqrt(M))
        for m=0:((1-2^(-alpha))*sqrt(M)-1)
            Pb(indice_snr) = Pb(indice_snr) + ...
                ((-1)^fix(m*2^(alpha-1)/sqrt(M)) * (2^(alpha-1)-
                fix(m*2^(alpha-1)/sqrt(M)+0.5))*...
                erfc((2*m+1)*sqrt(3*log2(M)*snr/(2*(M-1)))))/sqrt(M);
        end
    end
    Pb(indice_snr) = Pb(indice_snr)/log2(sqrt(M));
end
semilogy(snr_db,Pb,'m');
% -----
axis([snr_i snr_f 1e-7 1]);
legend('4-QAM','16-QAM','64-QAM','256-QAM','Location','SouthWest');
xlabel('snr');
ylabel('Pe');

```

ANEXO C - Simulação do 2-PSK e 4-PSK

Script File: bpsksimulado.m

```

% UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG
% PROGRAMADOR: JOSENILDO FERREIRA GALDINO
% E-MAIL: JOSENILDOFG@GMAIL.COM
% DATA:25/09/08
% CURVA DE PROBABILIDADE DE ERRO EM FUNÇÃO DA RSR DADA EM DB.
% BPSK ou 2-PSK
% -----
% 2-PSK - CURVA TEORICA
%-----
clf
clear all
snr_i = 0;
snr_inc = 1;
snr_f = 8;
snr_db = snr_i:snr_inc:snr_f;
for n = 1:length(snr_db)
    snr = 10^(0.1*snr_db(n));
    Pe(n) = 0.5*erfc(sqrt(snr));
end
semilogy(snr_db,Pe, 'r');
xlabel('snr');
ylabel('Pe');
legend('2-PSK');
axis([0 8 10e-7 1]);
grid on;
hold on;
% -----
% 2-PSK - CURVA ESTIMADA
%-----
for i = 1:length(snr_db)
    probabilidade_erro(i) = prob_erro(snr_db(i))
end
semilogy(snr_db,probabilidade_erro,'*'); %Probabilidade de erro estimado.

```

Script File: bpsk4.m

```

% UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG
% PROGRAMADOR: JOSENILDO FERREIRA GALDINO
% E-MAIL: JOSENILDOFG@GMAIL.COM
% DATA:28/09/08
% CURVA DE PROBABILIDADE DE ERRO EM FUNÇÃO DA RSR DADA EM DB.
% 4-PSK
% -----
% 4-PSK - CURVA TEORICA
%-----
% 4-PSK
%-----
clc
clf
clear all
snr_i = 0;
snr_inc = 1;
snr_f = 8;
snr_db = snr_i:snr_inc:snr_f
for n = 1:length(snr_db)
    snr = 10^(0.1*snr_db(n));
    P(n) = 1 - (1 - 0.5*erfc(sqrt(snr)) )^2
end;
semilogy(snr_db,P,'r');
axis([0 8 10e-7 1]);
grid on;
xlabel('snr');
ylabel('Pe');
legend('4-PSK');
hold on;
%-----
% 4-PSK - CURVA ESTIMADA
%-----
for t = 1:length(snr_db)
    probabilidade_erro(t) = prob_error(snr_db(t))
end
semilogy(snr_db,probabilidade_erro,'*') %Probabilidade de erro estimado.

```

ANEXO D - Simulação do 4-QAM e 16-QAM para Canal AWGN

Script File: simulqam4.m

```

% UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG
% PROGRAMADOR: JOSENILDO FERREIRA GALDINO
% E-MAIL: JOSENILDOFG@GMAIL.COM
% DATA:01/10/08
% -----
clc
clear all
clf
% Curva Teórica do 4-QAM
% -----
snr_i = 0; snr_f = 8; snr_inc = 1;
snr_db = snr_i:snr_inc:snr_f

```

```

M = 4;
Pb = zeros(1,length(snr_db));

for indice_snr = 1:length(snr_db)
    snr = 10^(0.1*snr_db(indice_snr));
    for alpha=1:log2(sqrt(M))
        for m=0:((1-2^(-alpha))*sqrt(M)-1)
            Pb(indice_snr) = Pb(indice_snr) + ...
                ((-1)^fix(m*2^(alpha-1)/sqrt(M)) * (2^(alpha-1)-
                fix(m*2^(alpha-1)/sqrt(M)+0.5))*...
                erfc((2*m+1)*sqrt(3*log2(M)*snr/(2*(M-1)))))/sqrt(M);
        end
    end
    Pb(indice_snr) = Pb(indice_snr)/log2(sqrt(M));
end
semilogy(snr_db,Pb,'b');
grid on;
hold on;

% Curva Estimada do 4-QAM

for k = 1:length(snr_db)
    probabilidade_erro(k) = prob_erro3(snr_db(k))
end
semilogy(snr_db,probabilidade_erro,'*') % Probabilidade de erro estimado.
axis([snr_i snr_f 1e-7 1]);
legend('4-QAM');
xlabel('snr');
ylabel('Pe');

```

Script File: teoricas16qam.m

```

% UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG
% PROGRAMADOR: JOSENILDO FERREIRA GALDINO
% E-MAIL: JOSENILDOFG@GMAIL.COM
% DATA:18/10/08
% -----
clc
clear all
clf
% Curva Teórica do 16-QAM
% -----
snr_i = 0; snr_f = 8; snr_inc = 1;
snr_db = snr_i:snr_inc:snr_f
M = 16;
Pb = zeros(1,length(snr_db));
for indice_snr = 1:length(snr_db)
    snr = 10^(0.1*snr_db(indice_snr));
    for alpha=1:log2(sqrt(M))
        for m=0:((1-2^(-alpha))*sqrt(M)-1)
            Pb(indice_snr) = Pb(indice_snr) + ...
                ((-1)^fix(m*2^(alpha-1)/sqrt(M)) * (2^(alpha-1)-
                fix(m*2^(alpha-1)/sqrt(M)+0.5))*...
                erfc((2*m+1)*sqrt(3*log2(M)*snr/(2*(M-1)))))/sqrt(M);
        end
    end
end

```



```

Pb(indice_snr) = Pb(indice_snr)/log2(sqrt(M));
end
semilogy(snr_db,Pb,'b');
grid on;
hold on;

% Curva Estimada do 16-QAM
for k = 1:length(snr_db)
    probabilidade_erro(k) = prob_erro4(snr_db(k))
end
semilogy(snr_db,probabilidade_erro,'*') % Probabilidade de erro estimado.
axis([snr_i snr_f 1e-7 1]);
legend('16-QAM');
xlabel('snr');
ylabel('Pe');

```

Script File: teoricas16qam1.m

```

% UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG
% PROGRAMADOR: JOSENILDO FERREIRA GALDINO
% E-MAIL: JOSENILDOFG@GMAIL.COM
% DATA:06/11/08
% Curva Teórica do 16-QAM
% -----
clc
clear all
clf
% Curva Teórica do 16-QAM
% -----
snr_i = 0; snr_f = 8; snr_inc = 1;
snr_db = snr_i:snr_inc:snr_f
M = 16;
Pb = zeros(1,length(snr_db));
for indice_snr = 1:length(snr_db)
    snr = 10^(0.1*snr_db(indice_snr));
    for alpha=1:log2(sqrt(M))
        for m=0:((1-2^(-alpha))*sqrt(M)-1)
            Pb(indice_snr) = Pb(indice_snr) + ...
                ((-1)^fix(m*2^(alpha-1)/sqrt(M)) * (2^(alpha-1)-
                fix(m*2^(alpha-1)/sqrt(M)+0.5))*...
                erfc((2*m+1)*sqrt(3*log2(M)*snr/(2*(M-1)))))/sqrt(M);
        end
    end
    Pb(indice_snr) = Pb(indice_snr)/log2(sqrt(M));
end
semilogy(snr_db,Pb,'b');
grid on;
hold on;

% Curva Estimada do 16-QAM
for k = 1:length(snr_db)
    probabilidade_erro(k) = prob_erro5(snr_db(k))
end
semilogy(snr_db,probabilidade_erro,'*') % Probabilidade de erro
estimado.
axis([snr_i snr_f 1e-7 1]);
legend('16-QAM');
xlabel('snr');
ylabel('Pe');

```

ANEXO E – Funções Implementadas

Script File: prob_erro.m

```
function Pe = prob_erro(snrdb)
% PROB_ERRO - Calcula a probabilidade de erro dada uma
%              relação sinal ruído em db.

snr = 10^(snrdb/10);           % Relação Sinal-Ruído
E = 1;
variancia = E/snr;           % Variância do Ruído
N = 10000;
s = randint(N,1);
s_mod = (-1).^s;
erros = 0;
r = gera_ruído(N,variancia/2); % Ruído branco
s1 = s_mod + r;              % Sinal + ruído branco
for i = 1:N
    if( real(s1(i)) <= 0)
        s_est = 1;
    else
        s_est = 0;
    end
    if(s_est~=s(i))
        erros = erros + 1;
    end
end
Pe = erros/N;                % Probabilidade de erro
```

Script File: prob_erro1.m

```
function Pe = prob_erro1(snrdb)
% PROB_ERRO - Calcula a probabilidade de erro dada uma
%              relação sinal ruído em db, para 4-PSK
M = 4;
snr = 10^(0.1*snrdb);       % Relação Sinal-Ruído
E = 1;
variancia = E/snr;         % Variância do Ruído
N = 10000;
s = randint(N,2);
erros = 0;
%-----
for k = 1:N
    a0 = s(k,2);
    a1 = s(k,1);
    a(k) = s(k,1)*2 + s(k,2)*1;
    if (a(k) == 0)
        s_mod(k) = 1 + 0*i;
    elseif (a(k) == 1)
        s_mod(k) = 0 + i;
    elseif (a(k) == 3)
        s_mod(k) = -1 + 0*i;
    else
        s_mod(k) = 0 -i;
    end
end
%-----
r = gera_ruído(N,variancia/4); % Ruído branco
```

```

s1 = s_mod + r'; % Sinal + ruído branco
s2 = angle(s1);
%-----
for k = 1:N
    if(s2(k) < 0 )
        s2(k) = s2(k) + 2*pi ;
    end
end
%-----
for n = 1:N
    if( s2(n) < (pi/4) | s2(n) > (7*pi/4))
        s_est = 0;
    elseif( s2(n) <= (3*pi/4))
        s_est = 1;
    elseif( s2(n) <= (5*pi/4))
        s_est = 3;
    else
        s_est = 2;
    end
    if(real(s_est) ~= real(a(n)))
        erros = erros + 1;
    end
end
Pe = erros/N; % Probabilidade de erro
%-----

```

Script File: prob_erro3.m

```

function Pe = prob_erro3(snrdb)
% PROB_ERRO - Calcula a probabilidade de erro dada uma
% relação sinal ruído em db, para 4-QAM

M = 4;
Es = 1;
No = Es*10^(-0.1*snrdb)/log2(M);
variancia = No/2; % Duas dimensões

N =10000;

%-----
s = randint(N,2); %Bits da fonte.
erros = 0;
%-----
%MODULACAO

for k = 1:N
    a0 = s(k,2);
    a1 = s(k,1);
    a(k) = s(k,1)*2 + s(k,2);
    if (a(k) == 0)
        s_mod(k) = (1+i);
    elseif (a(k) == 1)
        s_mod(k) = (-1+i);
    elseif (a(k) == 2)
        s_mod(k) = (1-i);
    else
        s_mod(k) = (-1-i);
    end
end
end
%-----

```

```

%Ajuste de Energia

s_mod = s_mod*(sqrt(2)/2);

%-----
% Canal AWGN
r = gera_ruido(N,variancia);           % Ruído branco
x = s_mod + r';                       % Sinal + ruído branco

%-----
%Ajuste de Energia

x = x/sqrt(2)/2;

for n = 1:N
    if( real(x(n)) >= 0 )
        if ( imag(x(n)) >= 0)
            s_est(n,1) = 0; s_est(n,2) = 0;%s_est = 0;
        else
            s_est(n,1) = 1; s_est(n,2) = 0;%s_est = 2;
        end
    else
        if imag(x(n)) > 0
            s_est(n,1) = 0; s_est(n,2) = 1;%s_est = 1;
        else
            s_est(n,1) = 1; s_est(n,2) = 1;%s_est = 3;
        end
    end
end

for n = 1:N
    for k=1:2
        if(s_est(n,k)~=s(n,k)) erros = erros + 1;
        end
    end
end
Pe = erros/(N*log2(M));

```

Script File: prob_erro4.m

```

function Pe = prob_erro4(snrdb)
% PROB_ERRO - Calcula a probabilidade de erro dada uma
%             relação sinal ruído em db, para 16-QAM

M = 16;
Es = 1;
No = Es*10^(-0.1*snrdb)/log2(M);
variancia = No/2;           % Duas dimensões
N =10000;

%-----
s = randint(N,4);         %Bits da fonte.
erros = 0;

%-----

```

```

%Constelação 16-QAM Mapeada com Código Gray.

for k = 1:N
    a(k) = s(k,1)*8 + s(k,2)*4 + s(k,3)*2 + s(k,4)*1;
    if (a(k) == 15)
        s_mod(k) = (1+i);
    elseif (a(k) == 14)
        s_mod(k) = (3+i);
    elseif (a(k) == 13)
        s_mod(k) = (-1+i);
    elseif (a(k) == 12)
        s_mod(k) = (-3+i);
    elseif (a(k) == 11)
        s_mod(k) = (1+3*i);
    elseif (a(k) == 10)
        s_mod(k) = (3+3*i);
    elseif (a(k) == 9)
        s_mod(k) = (-1+3*i);
    elseif (a(k) == 8)
        s_mod(k) = (-3+3*i);
    elseif (a(k) == 6)
        s_mod(k) = (3-i);
    elseif (a(k) == 5)
        s_mod(k) = (-1-i);
    elseif (a(k) == 4)
        s_mod(k) = (-3-i);
    elseif (a(k) == 3)
        s_mod(k) = (1-3*i);
    elseif (a(k) == 2)
        s_mod(k) = (3-3*i);
    elseif (a(k) == 1)
        s_mod(k) = (-1-3*i);
    elseif (a(k) == 0)
        s_mod(k) = (-3-3*i);
    else
        s_mod(k) = (1-i);
    end
end

%-----
%Ajuste de Energia

s_mod = s_mod*(sqrt(2/5)/2);

%-----
% Canal AWGN

    r = gera_ruido(N,variancia);           % Ruído branco
    x = s_mod + r';                       % Sinal + ruído branco

%-----
%Ajuste de Energia

x = x/(sqrt(2/5)/2);

% Decisão
for n = 1:N
    a = real(x(n));
    b = imag(x(n));

```

```

    % 1° Quadrante
    if( a >= 0 & b >= 0 & a <= 2 & b <= 2 )
        s_est(n,1) = 1; s_est(n,2) = 1; s_est(n,3) = 1; s_est(n,4) = 1;
    %s_est = 15;
    end
    if( a >= 0 & b >= 0 & a > 2 & b <= 2 )
        s_est(n,1) = 1; s_est(n,2) = 1; s_est(n,3) = 1; s_est(n,4) = 0;
    %s_est = 14;
    end
    if( a >= 0 & b >= 0 & a < 2 & b > 2 )
        s_est(n,1) = 1; s_est(n,2) = 0; s_est(n,3) = 1; s_est(n,4) = 1;
    %s_est = 11;
    end
    if( a >= 0 & b >= 0 & a > 2 & b > 2 )
        s_est(n,1) = 1; s_est(n,2) = 0; s_est(n,3) = 1; s_est(n,4) = 0;
    %s_est = 10;
    end
    % -----
    -----

    % 2° Quadrante
    if( a <= 0 & b >= 0 & a > -2 & b < 2 )
        s_est(n,1) = 1; s_est(n,2) = 1; s_est(n,3) = 0; s_est(n,4) = 1;
    %s_est = 13;
    end
    if( a <= 0 & b >= 0 & a < -2 & b < 2 )
        s_est(n,1) = 1; s_est(n,2) = 1; s_est(n,3) = 0; s_est(n,4) = 0;
    %s_est = 12;
    end
    if( a <= 0 & b >= 0 & a > -2 & b > 2 )
        s_est(n,1) = 1; s_est(n,2) = 0; s_est(n,3) = 0; s_est(n,4) = 1;
    %s_est = 9;
    end
    if( a <= 0 & b >= 0 & a < -2 & b > 2 )
        s_est(n,1) = 1; s_est(n,2) = 0; s_est(n,3) = 0; s_est(n,4) = 0;
    %s_est = 8;
    end

    % 3° Quadrante
    if( a <= 0 & b <= 0 & a > -2 & b >= -2 )
        s_est(n,1) = 0; s_est(n,2) = 1; s_est(n,3) = 0; s_est(n,4) = 1;
    %s_est = 5;
    end
    if( a <= 0 & b <= 0 & a < -2 & b > -2 )
        s_est(n,1) = 0; s_est(n,2) = 1; s_est(n,3) = 0; s_est(n,4) = 0;
    %s_est = 4;
    end
    if( a <= 0 & b <= 0 & a < -2 & b < -2 )
        s_est(n,1) = 0; s_est(n,2) = 0; s_est(n,3) = 0; s_est(n,4) = 0;
    %s_est = 0;
    end
    if( a <= 0 & b <= 0 & a > -2 & b < -2 )
        s_est(n,1) = 0; s_est(n,2) = 0; s_est(n,3) = 0; s_est(n,4) = 1;
    %s_est = 1;
    end

    % 4° Quadrante
    if( a >= 0 & b <= 0 & a <= 2 & b >= -2 )
        s_est(n,1) = 0; s_est(n,2) = 1; s_est(n,3) = 1; s_est(n,4) = 1;
    %s_est = 7;
    end

```

```

    if( a >= 0 & b <= 0 & a > 2 & b >= -2 )
        s_est(n,1) = 0; s_est(n,2) = 1; s_est(n,3) = 1; s_est(n,4) = 0;
    %s_est = 6;
    end
    if( a >= 0 & b <= 0 & a < 2 & b < -2 )
        s_est(n,1) = 0; s_est(n,2) = 0; s_est(n,3) = 1; s_est(n,4) = 1;
    %s_est = 3;
    end
    if( a >= 0 & b <= 0 & a > 2 & b < -2 )
        s_est(n,1) = 0; s_est(n,2) = 0; s_est(n,3) = 1; s_est(n,4) = 0;
    %s_est = 2;
    end

    for k=1:4
        if(s_est(n,k)~=s(n,k)) erros = erros + 1;
        end
    end
end
Pe = erros/(N*log2(M));

```

Script File: prob_erro5.m

```

function Pe = prob_erro5(snrdb)
% PROB_ERRO - Calcula a probabilidade de erro dada uma
%              relação sinal ruído em db, para 16-QAM em
%              um canal AWGN + Rayleigh.

M = 16;
Es = 1;
No = Es*10^(-0.1*snrdb)/log2(M);
variancia = No/2; % Duas dimensões
N = 1000;
%-----
s = randint(N,4); %Bits da fonte.
erros = 0;
%-----
%Constelação 16-QAM Mapeada com Código Gray.
for k = 1:N
    a(k) = s(k,1)*8 + s(k,2)*4 + s(k,3)*2 + s(k,4)*1;
    if (a(k) == 15)
        s_mod(k) = (1+i);
    elseif (a(k) == 14)
        s_mod(k) = (3+i);
    elseif (a(k) == 13)
        s_mod(k) = (-1+i);
    elseif (a(k) == 12)
        s_mod(k) = (-3+i);
    elseif (a(k) == 11)
        s_mod(k) = (1+3*i);
    elseif (a(k) == 10)
        s_mod(k) = (3+3*i);
    elseif (a(k) == 9)
        s_mod(k) = (-1+3*i);
    elseif (a(k) == 8)
        s_mod(k) = (-3+3*i);
    elseif (a(k) == 6)
        s_mod(k) = (3-i);
    elseif (a(k) == 5)
        s_mod(k) = (-1-i);

```

```

elseif (a(k) == 4)
    s_mod(k) = (-3-i);
elseif (a(k) == 3)
    s_mod(k) = (1-3*i);
elseif (a(k) == 2)
    s_mod(k) = (3-3*i);
elseif (a(k) == 1)
    s_mod(k) = (-1-3*i);
elseif (a(k) == 0)
    s_mod(k) = (-3-3*i);
else
    s_mod(k) = (1-i);
end
end

%-----
%Ajuste de Energia
s_mod = s_mod*(sqrt(2/5)/2);

%-----
% Canal AWGN + Rayleigh

    r = rayleigh(N,variancia);           % Rayleigh + ruido branco
    x = s_mod + r';                       % Sinal + ruido branco
%-----
%Ajuste de Energia

x = x/(sqrt(2/5)/2);

% Decisão
for n = 1:N
    a = real(x(n));
    b = imag(x(n));

    % 1° Quadrante
    if( a >= 0 & b >= 0 & a <= 2 & b <= 2 )
        s_est(n,1) = 1; s_est(n,2) = 1; s_est(n,3) = 1; s_est(n,4) = 1;
    %s_est = 15;
    end
    if( a >= 0 & b >= 0 & a > 2 & b <= 2 )
        s_est(n,1) = 1; s_est(n,2) = 1; s_est(n,3) = 1; s_est(n,4) = 0;
    %s_est = 14;
    end
    if( a >= 0 & b >= 0 & a < 2 & b > 2 )
        s_est(n,1) = 1; s_est(n,2) = 0; s_est(n,3) = 1; s_est(n,4) = 1;
    %s_est = 11;
    end
    if( a >= 0 & b >= 0 & a > 2 & b > 2 )
        s_est(n,1) = 1; s_est(n,2) = 0; s_est(n,3) = 1; s_est(n,4) = 0;
    %s_est = 10;
    end
    % -----
    -----

    % 2° Quadrante
    if( a <= 0 & b >= 0 & a > -2 & b < 2 )
        s_est(n,1) = 1; s_est(n,2) = 1; s_est(n,3) = 0; s_est(n,4) = 1;
    %s_est = 13;
    end
    if( a <= 0 & b >= 0 & a < -2 & b < 2 )

```



```

        s_est(n,1) = 1; s_est(n,2) = 1; s_est(n,3) = 0; s_est(n,4) = 0;
%s_est = 12;
    end
    if( a <= 0 & b >= 0 & a > -2 & b > 2 )
        s_est(n,1) = 1; s_est(n,2) = 0; s_est(n,3) = 0; s_est(n,4) = 1;
%s_est = 9;
    end
    if( a <= 0 & b >= 0 & a < -2 & b > 2 )
        s_est(n,1) = 1; s_est(n,2) = 0; s_est(n,3) = 0; s_est(n,4) = 0;
%s_est = 8;
    end

    % 3° Quadrante
    if( a <= 0 & b <= 0 & a > -2 & b >= -2 )
        s_est(n,1) = 0; s_est(n,2) = 1; s_est(n,3) = 0; s_est(n,4) = 1;
%s_est = 5;
    end
    if( a <= 0 & b <= 0 & a < -2 & b > -2 )
        s_est(n,1) = 0; s_est(n,2) = 1; s_est(n,3) = 0; s_est(n,4) = 0;
%s_est = 4;
    end
    if( a <= 0 & b <= 0 & a < -2 & b < -2 )
        s_est(n,1) = 0; s_est(n,2) = 0; s_est(n,3) = 0; s_est(n,4) = 0;
%s_est = 0;
    end
    if( a <= 0 & b <= 0 & a > -2 & b < -2 )
        s_est(n,1) = 0; s_est(n,2) = 0; s_est(n,3) = 0; s_est(n,4) = 1;
%s_est = 1;
    end

    % 4° Quadrante
    if( a >= 0 & b <= 0 & a <= 2 & b >= -2 )
        s_est(n,1) = 0; s_est(n,2) = 1; s_est(n,3) = 1; s_est(n,4) = 1;
%s_est = 7;
    end
    if( a >= 0 & b <= 0 & a > 2 & b >= -2 )
        s_est(n,1) = 0; s_est(n,2) = 1; s_est(n,3) = 1; s_est(n,4) = 0;
%s_est = 6;
    end
    if( a >= 0 & b <= 0 & a < 2 & b < -2 )
        s_est(n,1) = 0; s_est(n,2) = 0; s_est(n,3) = 1; s_est(n,4) = 1;
%s_est = 3;
    end
    if( a >= 0 & b <= 0 & a > 2 & b < -2 )
        s_est(n,1) = 0; s_est(n,2) = 0; s_est(n,3) = 1; s_est(n,4) = 0;
%s_est = 2;
    end

    for k=1:4
        if(s_est(n,k)~=s(n,k)) erros = erros + 1;
        end
    end
end
Pe = erros/(N*log2(M));

```

Script File: gera_ruido.m

```
function ruido = gera_ruido(TAM_BLOCO,variancia)
```

```

r1      = sqrt(variancia)*(randn(TAM_BLOCO,1)); % Ruido Real Gerado
r2      = sqrt(variancia)*(randn(TAM_BLOCO,1)); % Ruido Imaginario Gerado

ruído   = r1 + i*r2;

```

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Modern Digital and Analog Communications Systems. B. P. Lathi, Oxford Press, 1999.
- [2] Otimização de Limiares Para Adaptação de Modulação Diante de Erros no Canal de Retorno. E. C. Gurjão e J. F. Galdino, Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, 2008.
- [3] Modulação Adaptativa: princípios e características de desempenho, J. F. Galdino, Revista Militar de Ciência e Tecnologia 2008.
- [4] Feedback Constraints for Adaptive Transmission. Antony E. Ekpenyong and Yih-Fang Huang., IEEE Signal Proc. Mag., pp 69-78, May 2007.
- [5] Digital Communications, John G Proakis. McGraw-Hill, 4a Ed., 2000.
- [6] MEDEIROS, J.C.O. **Princípios de telecomunicações: teoria e prática**. São Paulo: Érica, 2004.
- [7] MOHAMMAD, M. e BUHRER, R. M. **On the impact of snr estimation error on adaptive modulation**. In: IEEE Communications Letters, 9(6):490-492, June 2005.
- [8] Cho, K.; Yoon, D., "On the General BER Expression of One and two dimensional Amplitude Modulation, IEEE Trans. Comm, Vol. 50, No 7, July 2002.
- [9] DUARTE, O.C.M.B WiMAX X WIFI, UFRJ. Disponível em http://www.gta.ufrj.br/grad/04_2/wimax/introducao.htm. Acesso em maio 2007

- [10] MOHAMMAD, M. e BUEHRER, R. M. **On the impact of SNR estimation error on adaptive modulation.** In: *IEEE Communications Letters*, 9(6):490–492, June 2005.
- [11] CONTI, A., M. Z. W. e CHIARI, M. **Invertible bounds for M-QAM in Rayleigh fading.** In: *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 4(5):1994–2000, Sept 2005.
- [12] EKPENYONG, A. E. e HUANG, Y.-F. **Feedback-detection strategies for adaptive modulation systems.** In: *IEEE Transactions on Communications*, 54(10):1735–1740, Oct 2006.
- [13] Stefan C. B. J. Modulação Adaptativa Baseada na Predição da Métrica de Adaptação para Canais com Desvanecimento Plano. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Instituto Militar de Engenharia.