

João Baptista Bayão Ribeiro

# **TELECOMUNICAÇÕES**

## **5º Volume**

1ª Edição

Rio de Janeiro

J. B. Bayão

2013

## Curriculum do Autor

João Baptista Bayão Ribeiro é formado em Engenharia de Telecomunicações pela UFF (Universidade Federal Fluminense) em 1971. Trabalhou na Philips do Brasil como Engenheiro Instalador, na Divisão de Equipamentos Científicos e Industriais e simultaneamente como professor da UFF em tempo parcial. Depois ingressou no Laboratório de Desenvolvimento da antiga Telerj, onde trabalhou em Normas Técnica de Operação e de Sistemas. É pós-graduado em Engenharia Elétrica pelo COPPE-UFRJ, onde obteve o título de MsC em 1979. Na década de 80 trabalhou no CpqD em Campinas, na especificação do projeto Trópico, como Engenheiro da Telecom, de S. Paulo. De volta à Telerj, trabalhou no Planejamento de Redes Telefônicas e de Dados. Fez inúmeros trabalhos para a antiga Telebrás, tendo participado ativamente do processo de digitalização do Sistema Telefônico no Brasil. Participou de vários Congressos e foi Professor em várias turmas de técnicos e engenheiros do SBT no Centro Nacional de Treinamento da Telebrás, em Brasília. Aposentou-se como professor em DE pela Escola de Engenharia da UFF, onde lecionou por vários anos após a privatização do Sistema Telebrás e extinção da antiga Telerj. Foi também Professor Substituto no IME, e Professor do curso à distância “Tecnologias Modernas de Telecomunicações”, promovido pelo Centro de Estudos de Pessoal (CEP) do Exército Brasileiro em convênio com a UFF.

## Sumário

No Volume 5 apresentamos ao estudante de engenharia de Telecomunicações, alguns aspectos adicionais relativos a Modulação Digital de Sinais.

## Palavras Chave

Modulação Digital, ASK, FSK, PSK, QPSK, OQPSK, MSK

## Direitos Autorais

Este documento é protegido por Copyright © 2010 por seu autor listado abaixo. Você pode distribuir e/ou modificar este trabalho, tanto sob os termos da Licença Pública Geral GNU (<http://www.gnu.org/licenses/gpl.html>), versão 3 ou posterior, ou da Licença de Atribuição Creative Commons (<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>), versão 3.0 ou posterior.

Autor: João Baptista Bayão Ribeiro

Feedback: [jribeiro@telecom.uff.br](mailto:jribeiro@telecom.uff.br)



## Índice

|   |    |
|---|----|
| INTRODUÇÃO.....   | 6  |
| DIAGRAMA.....   | 7  |
| EXEMPLO DE UM SINAL MODULADO .....                                  | 9  |
| TIPOS BÁSICOS DE MODULAÇÃO DIGITAL .....                            | 10 |
| APLICAÇÕES.....   | 12 |
| PARÂMETROS TÍPICOS.....   | 13 |
| EFICIÊNCIA ESPECTRAL DE ALGUNS TIPOS DE MODULAÇÃO.....              | 15 |
| SISTEMAS COERENTES E INCOERENTES.....                               | 16 |
| SINAIS E FUNÇÕES ORTOGONAIS – ANALOGIA ENTRE VETORES E FUNÇÕES..... | 19 |
| O CONCEITO DE CANAIS I E Q .....                                    | 20 |
| DIAGRAMA DE CONSTELAÇÃO.....  | 21 |
| MODULAÇÃO DIGITAL BPSK.....   | 22 |
| GERAÇÃO DO SINAL BPSK.....  | 24 |
| LARGURA DE FAIXA DO SINAL BPSK.....                                 | 26 |
| MODULAÇÃO DIGITAL QPSK .....  | 29 |
| LARGURA DE FAIXA DO SINAL QPSK.....                                 | 32 |
| REDUÇÃO DA LARGURA DE BANDA DE TRANSMISSÃO .....                    | 33 |
| .....   | 33 |
| CIRCUITO DO MODULADOR .....   | 35 |
| MODULAÇÃO DE ENVOLTÓRIA CONSTANTE .....                             | 36 |
| OFFSET QPSK (OQPSK) .....   | 37 |
| MODULAÇÃO FSK BINÁRIA (BFSK).....                                   | 39 |
| LARGURA DE FAIXA DO SINAL BFSK.....                                 | 41 |
| MODULAÇÃO MSK.....  | 45 |
| SUMÁRIO.....  | 54 |
| EXERCÍCIOS PROPOSTOS.....   | 55 |
| SOLUÇÃO DOS EXERCÍCIOS.....   | 61 |

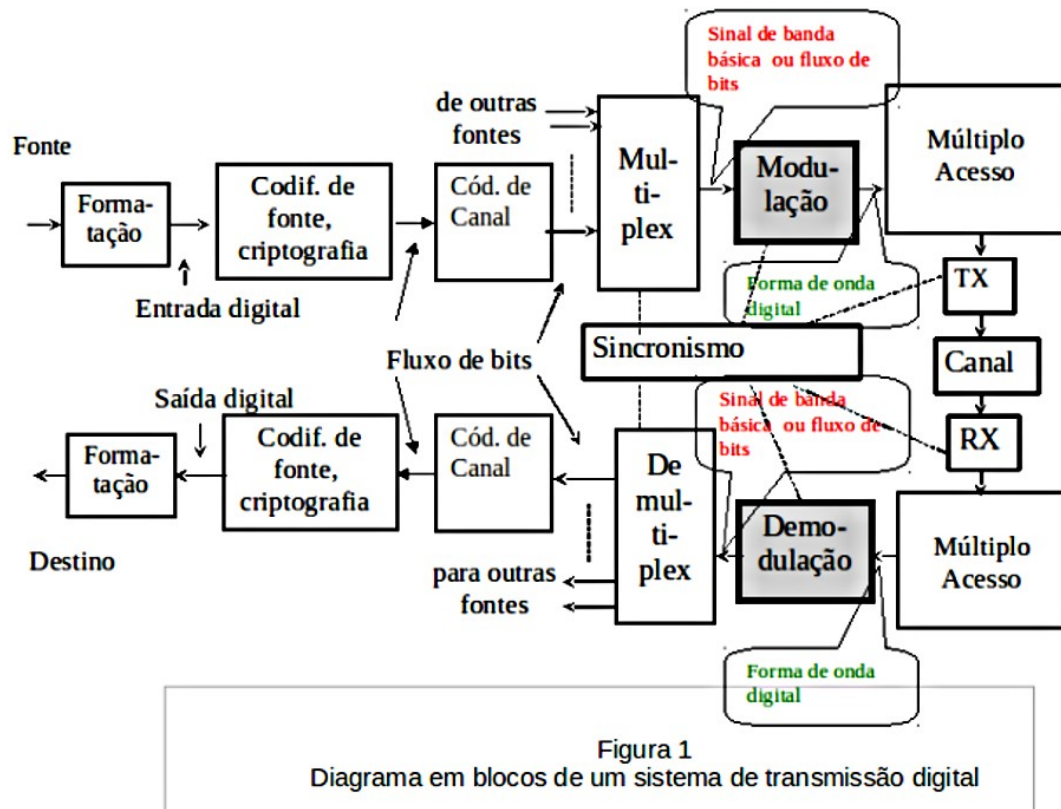
## **INTRODUÇÃO**

Este volume apresenta uma introdução ao conceito de modulação digital, citando alguns dos principais formatos de modulação digital, suas aplicações principais, eficiências espectrais relativas, e algumas variações dos principais tipos de modulação usados em sistemas práticos. Como são muitas as formas de modulação digital, e este é um texto introdutório, adotou-se descrever, de uma forma mais intuitiva, alguns tipos mais comuns.

Nem todos estarão contemplados, mas espera-se que com a descrição apresentada a base para o entendimento de outros formatos esteja lançada. Espera-se que o aluno tenha a curiosidade necessária para pesquisar a respeito. O material é vasto, e pode ser obtido praticamente sem gastos significativos, pela Internet.

## DIAGRAMA

A Figura 1 apresenta um diagrama em blocos simplificado de um sistema de



transmissão digital. Nesta figura, destaca-se o bloco modulação e o bloco demodulação, como uma etapa entre a multiplexação/demultiplexação e as técnicas de múltiplo acesso.

O fluxo de processamento de sinais apresentado no diagrama da Figura 1 representa um exemplo típico. Pode ser que os blocos mostrados sejam implementados em uma ordem diferente,

A Figura 1 mostra que desde a fonte até o modulador, uma mensagem, chamada um sinal em banda básica ou fluxo de bits, é caracterizada por uma sequência de símbolos digitais.

Após a modulação, a mensagem toma a forma de forma de onda codificada digitalmente, ou forma de onda digital.

Da mesma forma, na direção contrária, uma mensagem recebida aparece como uma

forma de onda digital até que ela seja demodulada. Daí por diante ela toma a forma de um fluxo de bits para todos os passos de processamento subsequentes.



## EXEMPLO DE UM SINAL MODULADO

A Figura 2 ilustra, de forma simplificada, um sinal modulante digital, que representa eletricamente um fluxo de bits, ou de mensagens, e um sinal da forma senoidal que é utilizado como portadora. Em a), tem-se uma possível representação de um sinal digital binário (2 níveis). Em b), representa-se um possível sinal multiníveis. Em c) tem-se a forma de onda senoidal, utilizada como portadora.

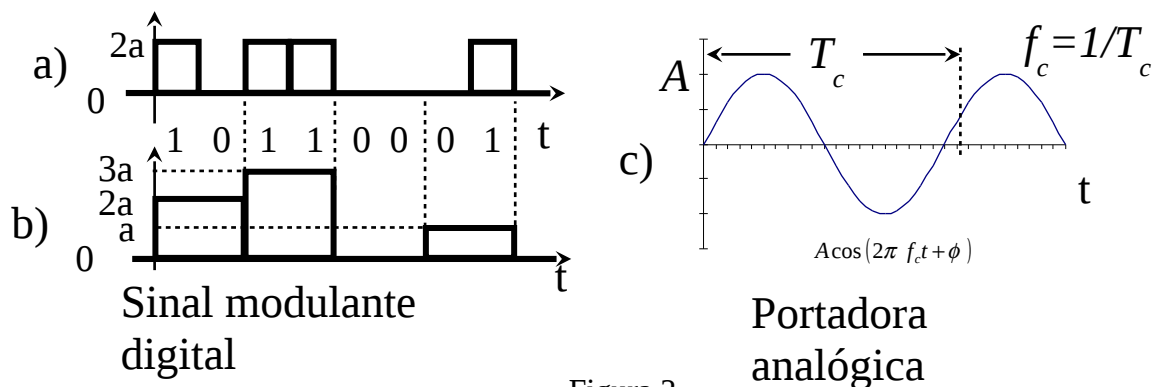


Figura 2  
Sinais modulantes e portadora

## TIPOS BÁSICOS DE MODULAÇÃO DIGITAL

Basicamente podemos classificar os sistemas de modulação digital em sistemas ASK (Amplitude Shift Keying), FSK (Frequency Shift Keying) e PSK (Phase Shift Keying), conforme utilizem, respectivamente, a amplitude, a frequência ou a fase da portadora como parâmetro de transmissão da informação. A Figura 3 ilustra as formas de onda do sinal modulado para os três tipos básicos acima mencionados.

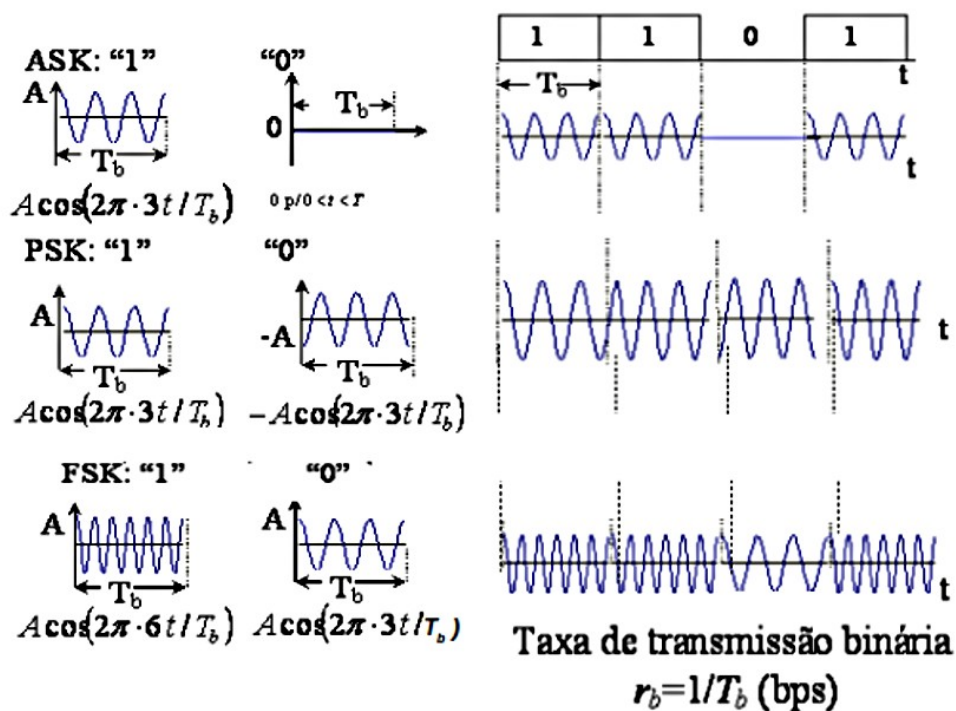


Figura 3

Tipos básicos de  
modulação digital binária

Pode ocorrer que a fonte do sinal modulante não seja binária, utilizando mais de dois símbolos para representar a informação. Nesse caso, recebe a denominação de M-ária,  $M=2^k$ ,  $k=1,2,3, \dots$ . Para uma fonte binária,  $k=1$ . Uma fonte M-ária possui  $2^k$  símbolos.  $k$  representa, por assim dizer, o número de bits que constitui uma

mensagem gerada pela fonte<sup>1</sup>.

Portanto, genericamente, temos MPSK, MFSK...etc. Alguns tipos recebem uma denominação particular.

Por exemplo, o QPSK, que é uma modulação PSK onde  $k=2$ , dando origem a 4 símbolos possíveis para as mensagens da fonte, 00, 01, 10 e 11, é uma modulação MPSK,  $M=4$ .. O prefixo Q significa Quadratura, indicando que existirão 2 portadoras em quadratura de fase (defasagem de  $90^\circ$  entre elas). Para  $k=3$ , teríamos o 8PSK, para  $k=4$  teríamos o 16PSK e assim por diante.

É também muito comum a utilização de tipos mistos de modulação como por exemplo, sistemas do tipo APK (Amplitude Phase Keying), ou seja, chaveamento da amplitude e da fase. Os sistemas APK constituem uma família de sistemas, dos quais o mais utilizado é o MQAM, o primeiro M da sigla indicando a quantidade de símbolos possíveis.

Por exemplo, se  $M=64$ , temos o 64QAM, que é um sistema M-ário, com 64 símbolos possíveis, significando que cada símbolo utiliza 6 bits. Cada símbolo significa, no sinal modulado, uma determinada combinação de amplitude e fase da portadora. No 64QAM existem, portanto, 64 combinações possíveis.

Neste volume, serão estudados, de uma forma introdutória, os tipos básicos BPSK, QPSK, OQPSK, BFSK e MSK.

---

<sup>1</sup> No caso binário,  $k=1$ . A fonte, utiliza dois símbolos possíveis ( $M=2$ ), e gera palavras de apenas 1 bit de comprimento.

## APLICAÇÕES

A tabela abaixo apresenta aplicações para diferentes formatos de modulação.

| FORMATO DA MODULAÇÃO | APLICAÇÃO  |
|----------------------|--|
| MSK,GMSK             | GSM,CDPD   |
| BPSK                 | Telemetria no espaço, cable modems                                     |
| QPSK, $\pi/4$ DQPSK  | Satélite, CDMA, NADC, TETRA, PHS, PDC, LMDS, DVB-S, cable modems, TFTS |
| DQPSK                | CDMA, Satellite  |
| FSK, GFSK            | DECT, paging, AMPS, CT2, ERMES, segurança pública terrestre móvel.     |
| 8PSK, OQPSK          | Satélite, aviação  |
| 16QAM                | Radio digital microondas, modems, DVB-C, DVB-T                         |
| 32QAM                | Microondas terrestre, DVB-T  |
| 64QAM                | DVB-C, modems, MMDS  |
| 256QAM               | Modems, DVB-C (Europa), Vídeo Digital (US)                             |

### Significado das Siglas:

CDPD – Celular Digital Packet Data  
 GSM - Groupe Spécial Mobile  
 CDMA - Code Division Multiple Access  
 NADC – North American Digital Cellular  
 TETRA – Terrestrial Trunked Radio  
 PHS – Personal HandyPhone System

PDC – Pacific Data Communications (Japão)  
 LMDS – Local Multipoint Distribution System  
 DVB-S – Digital Video Broadcasting-Satellite  
 DVB-T – Digital Video Broadcasting-Terrestrial

DVB-C – Digital Video Broadcasting-Cable  
 TFTS – Terrestrial Flight Telecommunication System  
 DECT – Digital Enhanced Cordless Telecommunications  
 AMPS – Advanced Mobile Phone System  
 CT2 – Cordless Telecommunications 2  
 ERMES – European Radio Message Services  
 MMDS – Multi-point Multi-channel Distribution System

QAM – Quadrature Amplitude Modulation  
 PSK – Phase Shift Keying  
 FSK – Frequency Shift Keying  
 GFSK – Gaussian Frequency Shift Keying  
 QPSK – Quadrature Phase Shift Keying  
 DQPSK – Differential Quadrature Phase Shift Keying  
 BPSK – Binary Phase Shift Keying  
 MSK – Minimum Shift Keying  
 GMFSK – Gaussian Minimum Shift Keying  
 OQPSK – Off-set Quadrature Phase Shift Keying

## PARÂMETROS TÍPICOS

Taxa de transmissão, a qual representa a velocidade com que a informação é enviada. A taxa de transmissão pode se referir a taxa de bits ou a taxa de símbolos. Para entender e comparar diferentes formatos de modulação, é importante primeiramente entender a diferença entre taxa de bits e taxa de símbolos. A largura de banda exigida em um canal de comunicações depende da taxa de símbolos, não da taxa de bits. A taxa de transmissão de símbolos em um sistema de comunicação é chamada baud (1 baud = 1 símbolo por segundo).

$$\text{taxa de símbolos} = \frac{\text{taxa de bits}}{\text{numero de bits transmitidos em cada símbolo}}$$

Se apenas um (1) bit é transmitido por símbolo, como no BPSK, então a taxa de bits é igual a taxa de símbolos. Se dois bits são transmitidos por símbolo, como no QPSK, então a taxa de símbolos é metade da taxa de bits.

Por exemplo, supondo uma taxa de bits de 80 kbit/s, para o BPSK a taxa de símbolos é de 80 kbauds, enquanto para o QPSK é 40 kbauds. Em ambos os casos, a taxa de bits é 80 kbit/s.

Se mais bits podem ser enviados em cada símbolo, então a mesma quantidade de dados podem ser enviados na mesma largura espectral. Esta é a razão pela qual formatos de modulação mais complexos e utilizando maior número de estados podem enviar a mesma informação utilizando uma fatia menor do espectro de RF.

Eficiência espectral, que pode ser definida como a relação entre a taxa R de bits (não a taxa de símbolos) do sistema e a largura de banda W ocupada para a transmissão.

$$\text{Eficiencia espectral} = \frac{R}{W} = \frac{\text{taxa de bits}}{\text{largura de banda}}$$

A eficiência espectral mede a habilidade do sistema em acomodar dados em uma

banda limitada.

Eficiência em potência, que se traduz como a diminuição, em dB, da relação sinal ruído<sup>2</sup> na entrada do receptor para que não se altere a taxa de erro<sup>3</sup>. É um parâmetro relativo, comparando o desempenho de dois ou mais sistemas.

Exemplo: para o sistema 1, necessita-se uma relação sinal ruído de 30 dB para uma BER de  $10^{-5}$ . Para o sistema 2, nas mesmas condições que o sistema 1, necessita-se apenas 20 dB. Portanto, o sistema 2 tem uma eficiência em potência de 10 dB em relação ao sistema 1.

A eficiência em potência mede a habilidade de uma técnica de modulação em preservar a fidelidade da mensagem digital em baixos níveis de potência.

A eficiência em potência pode ser encarada também como uma medida de quanto a potência do sinal deve ser aumentada para atingir um valor particular de BER, para um dado esquema de modulação.

- 
- 2 Em sistemas digitais, costuma-se caracterizar a relação sinal ruído pela relação entre a energia por bit do sinal e a densidade espectral de potência do ruído ( $E_b/N_0$ )
- 3 Taxa de erro, em um sistema digital, é o principal parâmetro para avaliação da qualidade do sistema. A taxa de erro de símbolos pode ser definida como a relação entre a quantidade de símbolos erradamente identificados no receptor pela quantidade total de símbolos enviados, para um dado intervalo de tempo de observação. Em relação ao fluxo binário, um símbolo equivale a um bit, e falamos então em taxa de erro de bits, em inglês BER (Bit Error Rate).

**EFICIÊNCIA ESPECTRAL DE ALGUNS TIPOS DE MODULAÇÃO**

| FORMATO | EFICIÊNCIA ESPECTRAL TEÓRICA <sup>4</sup> |
|---------|---|
| MSK     | 1 bit/s/Hz                                |
| BPSK    | 1 bit/s/Hz                                |
| QPSK    | 2 bit/s/Hz                                |
| 8PSK    | 3 bit/s/Hz                                |
| 16QAM   | 4 bit/s/Hz                                |
| 32QAM   | 5 bit/s/Hz                                |
| 64QAM   | 6 bit/s/Hz                                |
| 256QAM  | 8 bit/s/Hz                                |
|         |   |

---

<sup>4</sup> A eficiência espectral teórica seria alcançada com a utilização da largura de banda de Nyquist, que para sistema modulados com banda lateral dupla pode ser considerada igual a  $W=R_b/\log_2 M$ , onde  $R_b$  é a taxa de bits do fluxo de dados de entrada e  $M$  qualifica a quantidade total de símbolos utilizados.

## SISTEMAS COERENTES E INCOERENTES

Quando referido ao processo de demodulação<sup>5</sup>, o uso do termo coerência, ou demodulação coerente significa a habilidade do sistema realizar uma decisão de demodulação<sup>6</sup> em que a fase do sinal recebido é importante no processo. A informação “adicional” que a fase proporciona resulta em um melhor desempenho em relação a taxa de erro de bit ou de símbolo.

Para realizar a demodulação coerente, é necessário informação precisa da fase da portadora sendo recebida.

Num sistema coerente, o receptor é capaz de reconstituir com precisão uma base de temporização que define instantes significativos do processo, como por exemplo o instante preciso em que se inicia um símbolo modulado.

Considere, por exemplo, o sinal modulado representado na Figura 4. Este sinal representa uma portadora senoidal modulada em fase por um sinal binário. Conforme se verifica, a cada instante de transição do sinal binário, ocorre uma mudança de fase da portadora. No caso, essa mudança vale  $180^\circ$ . O instante de transição da fase da portadora, sendo determinável pelo receptor, define uma demodulação coerente. Podemos dizer que o receptor consegue identificar uma referência de fase (por exemplo, fase  $0^\circ$ ), e desta forma, no instante significativo, ele consegue identificar se houve ou não mudança de fase na portadora sendo recebida nesse instante. Essa informação é importante, pois ela permite a implementação de esquemas de demodulação mais acurados, no sentido de se conseguir uma menor taxa de erro na identificação do símbolo emitido.

---

5 O processo de demodulação corresponde ao procedimento empregado para recuperar a sequência de símbolos que foi enviada pelo transmissor, através da modulação.

6 Decisão de demodulação é o processo através do qual o receptor decide, ou tenta identificar, qual símbolo foi enviado em um certo instante, a partir do sinal recebido e empregando um determinado processo de demodulação. Nessa decisão existe sempre uma probabilidade de erro associada.



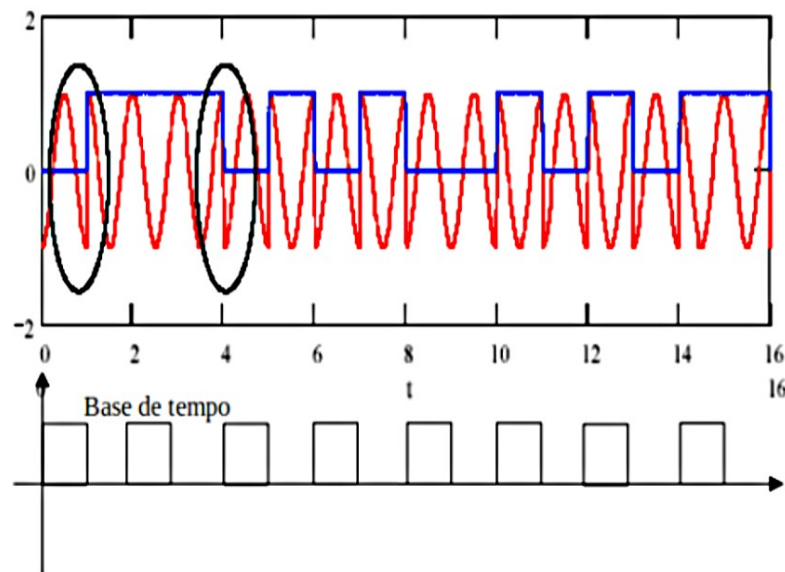


Figura 4

Exemplo de base de tempo gerada na recepção coerente

Doravante, ao nos referirmos à demodulação *coerente*, estaremos nos referindo à capacidade do receptor em gerar uma base de tempo em fase com uma referência. O esquema coerente de demodulação é, de um modo geral, mais complexo que um esquema não-coerente, mas tem a vantagem de permitir um melhor desempenho do sistema em relação à taxa de erro. Isto é importante quando se deseja obter melhores rendimentos do sistema.

A não-coerência, ou incoerência, significa que a informação da fase da portadora não é fundamental ao processo de modulação/demodulação.

Por exemplo, numa modulação BFSK não-coerente, pode ocorrer que a frequência de portadora  $f_1$  seja usada para transmitir a informação relativa ao bit “1”, e a frequência de portadora  $f_2$  seja utilizada para transmitir a informação do bit “0”. O transmissor fica alternando entre as frequências  $f_1$  e  $f_2$ , conforme a sequência de bits a ser enviada. Um possível esquema de recepção não-coerente implicaria na utilização de dois filtros passa faixa em paralelo, um sintonizado em  $f_1$ , e o outro em  $f_2$ . Quando fosse emitido bit “1” o filtro em  $f_1$  daria uma resposta maior que o filtro em  $f_2$ , e vice versa. Desta forma, estaria

implementado um esquema de recepção que prescindiria do conhecimento da fase da portadora sendo recebida, e seria portanto não-coerente.

Uma outra forma de implementação de um esquema não-coerente é a utilização da técnica diferencial, para uma modulação em fase digital (PSK), dando origem ao DPSK. No transmissor, cada símbolo é modulado relativo ao símbolo prévio. Assim no DBPSK (PSK binário diferencial):

Diferença de fase  $0^\circ$  = sem mudança;

Diferença de fase  $180^\circ$  = bit muda de valor.

No receptor, o símbolo atual é demodulado usando o símbolo prévio como referência.

A eficiência de potência da recepção diferencial é teoricamente pior em 3 dB do que a recepção coerente. Isto ocorre porque o sistema diferencial tem *duas* fontes de erro: o próprio símbolo, que pode estar errado, ou a referência (o símbolo prévio).

De um modo geral, a recepção não-coerente é mais simples de ser implementada que a recepção coerente.

## **SINAIS E FUNÇÕES ORTOGONAIS – ANALOGIA ENTRE VETORES E FUNÇÕES**

Quando descrevemos um vetor pelas suas coordenadas, o sistema de coordenadas utilizado é caracterizado por um conjunto de vetores unitários, que constituem a base do sistema de coordenadas. No sistema cartesiano (coordenadas retangulares) esses vetores básicos são mutuamente perpendiculares, ou seja, não existe componente de um sobre o outro.

Da mesma forma que para vetores, define-se a perpendicularidade entre duas funções, dizendo que elas são ortogonais quando não existe componente de uma sobre a outra. Faz-se assim uma analogia entre vetores e funções. E da mesma forma, pode-se definir um sistema de funções perpendiculares entre si, que constituem as funções base do sistema, e sobre as quais podemos decompor quaisquer outras funções do espaço de funções.

Nos esquemas de modulação em fase costuma-se empregar duas funções ortogonais que são utilizadas como funções base. Essas funções são o seno e cosseno de mesma frequência. Por analogia a um sistema vetorial, ao cosseno costuma-se relacionar o eixo x, e ao seno o eixo y, indicando graficamente a ortogonalidade entre elas, ou a diferença de fase de 90 graus. Por convenção, denominamos ao eixo x a letra I (In-fase), e ao eixo y a letra Q (Quadratura)

## O CONCEITO DE CANAIS I E Q

Em uma analogia vetor-sinal, os sinais relativos a modulações em fase podem ser escritos como um vetor soma de dois sinais, ocorrendo em dois canais, chamados I e Q. Podemos pensar em I e Q como as projeções do sinal nos eixos x e y (horizontal e vertical).

Na Figura 5(a) os eixos  $\phi_1$  e  $\phi_2$  representam os canais I e Q respectivamente. Quantitativamente  $s_{11}$  e  $s_{12}$  são as projeções do sinal sobre  $\phi_1$  e  $\phi_2$ . A Figura 5 (b) mostra o mesmo sinal destacando sua amplitude, que graficamente é igual ao seu comprimento, e a fase, que é igual a seu ângulo.

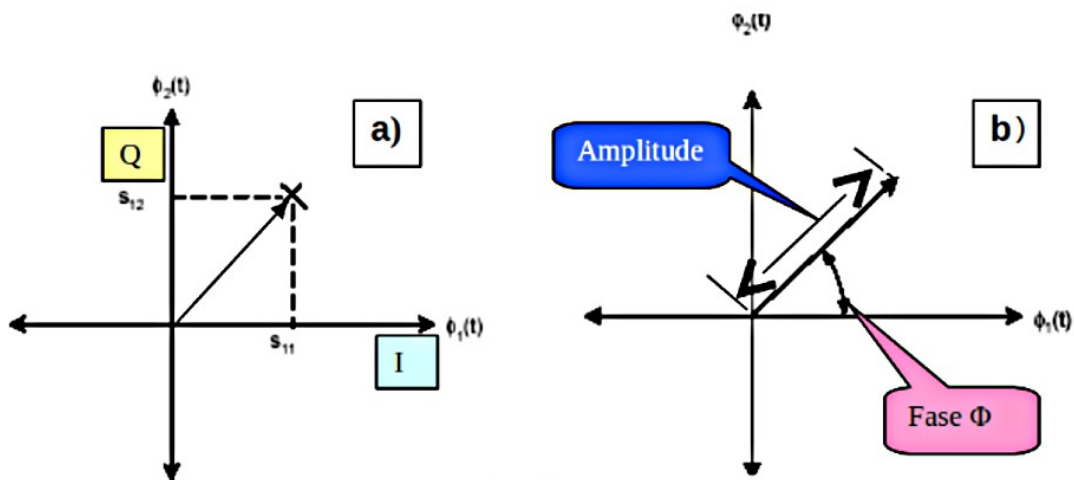


Figura 5  
Representação vetorial de sinais

Em relação às componentes do sinal sobre os eixos I e Q temos que:

$$\text{Amplitude do sinal } A = \sqrt{s_{11}^2 + s_{12}^2}$$

$$\text{Fase do sinal } \Phi = \text{atn} \left( \frac{s_{12}}{s_{11}} \right)$$

## DIAGRAMA DE CONSTELAÇÃO

Um diagrama de constelação pode ser encarado como uma figura geométrica indicando o Lugar Geométrico das extremidades dos vetores e suas transições de fase que caracterizam uma modulação.

Podemos obter o diagrama de constelação pela amostragem dos canais I e Q no mesmo instante de tempo relativo e plotando seus valores em um diagrama x-y. A extremidade do vetor do sinal é chamado ponto de constelação. O diagrama de constelação é uma figura geométrica indicando as possíveis fases assumidas pelo sinal modulado e os possíveis caminhos de transição entre esses pontos.

A Figura 6 ilustra um possível diagrama de constelação para uma modulação QPSK (Figura formada pelos pontos assinalados em vermelho, que são as extremidades dos vetores de sinal que podem ser gerados no processo de modulação), e as retas ligando esses pontos, indicando que qualquer transição de fase é possível, nesse caso.

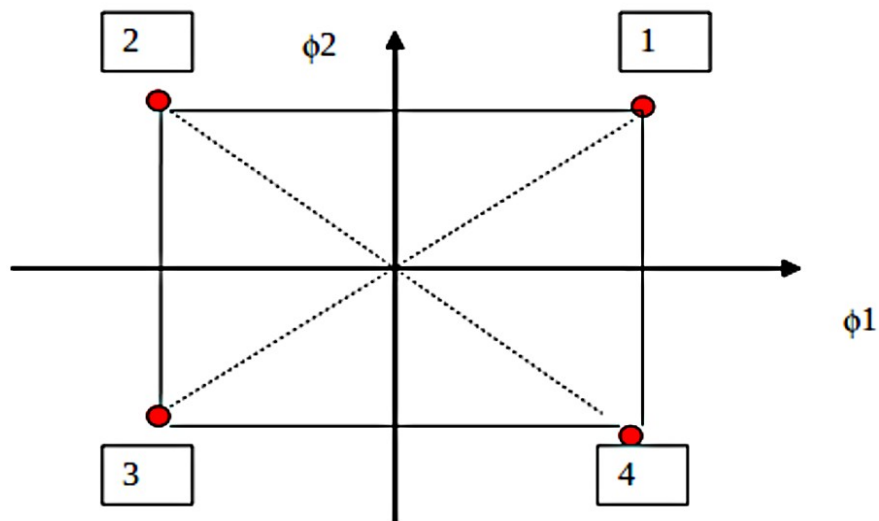


Figura 6

Diagrama de constelação para QPSK

## MODULAÇÃO DIGITAL BPSK

Na modulação PSK Binária (BPSK), cada símbolo é representado por apenas um bit. Utiliza-se somente um sinal senoidal como função base e varia-se a fase desse sinal para transmitir informação, ou seja, o sistema possui apenas uma dimensão (eixo x). Portanto são dois símbolos, 0 e 1. A fase  $0^\circ$  da portadora é associada a um deles, e a fase  $180^\circ$  a outro. Podemos visualizar a forma de onda da portadora modulada imaginando uma sequência de sinais compostos por dois sinais básicos, um para cada símbolo.

A Figura .7 mostra dois símbolos e sinais usados para representá-los.

Nessa figura, foi ilustrado a representação de uma portadora com frequência igual a taxa R de símbolos, mas genericamente a frequência da portadora pode ser maior, havendo mais períodos da portadora durante o tempo de um símbolo do que o representado na Figura 7.

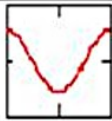
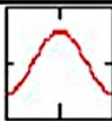
| Símbolo | Bit | Expressão                                    | Portadora  | I  | Q |
|---------|-----|--|--|----|---|
| S1      | 0   | $\sqrt{\frac{2E_s}{T}} \cos(\omega t)$       |  | 1  | 0 |
| S2      | 1   | $\sqrt{\frac{2E_s}{T}} \cos(\omega t + \pi)$ |  | -1 | 0 |

Figura 7

Exemplo de Composição de um sinal BPSK

A energia média de um bit, ou de um dos sinais que representam um símbolo é:

$E = \frac{A^2 T}{2}$ , sendo E a energia de um bit, A a amplitude do sinal senoidal e T a

duração ou tempo de bit.

Assim, sua amplitude  $A = \sqrt{2E/T}$ . Quando nos referimos a amplitude máxima do sinal é comum explicitar a energia de bit.

Na Figura 7, a energia E está referida como  $E_s$ , significando a energia de um símbolo. Como se trata de uma modulação binária,  $E_s=E$ .

## GERAÇÃO DO SINAL BPSK

A Figura 8 apresenta a ideia geral para construção de um modulador PSK. O sinal modulante controla um comutador (eletrônico, naturalmente) que seleciona a fase da portadora, em função da sequência de símbolos de entrada.

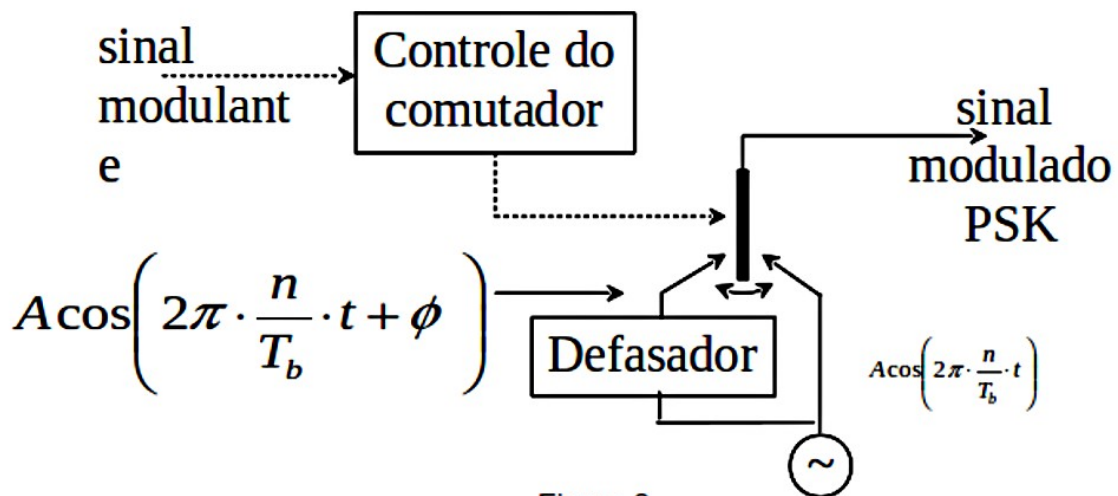
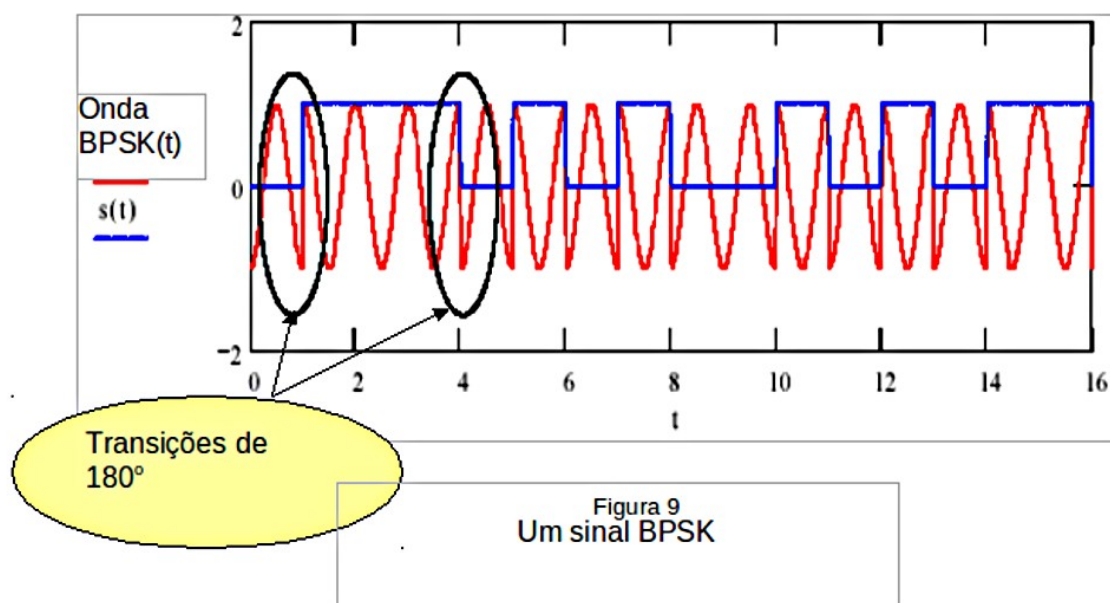


Figura 8  
Idéia básico do modulador PSK

No caso binário, temos apenas duas formas de onda, correspondendo uma ao bit 1 e outra ao bit 0.

Como exemplo, podemos construir o gráfico da Figura 9, que ilustra a portadora modulada. Desta figura, podemos observar as transições de fase de  $180^\circ$  que ocorrem quando o sinal modulante muda de valor. Essas transições são responsáveis por causar a geração de frequência em torno da frequência da portadora, o que contribui para o aumento da largura de banda do espectro do sinal modulado.





## LARGURA DE FAIXA DO SINAL BPSK

O sinal BPSK pode ser escrito como:

$s_{BPSK} = A_c \cos(2\pi f_c t) \times d_b(k)$ , onde  $d_b(k)$  representa um sinal bipolar que representa a sequência digital de entrada, de modo que:

$d_b(k) = \begin{cases} +1 & \text{bit 1} \\ -1 & \text{bit 0} \end{cases}$ . Assim, por exemplo, temos a seguinte correspondência:

|                    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|--------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| d(k)               | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  | 0  | 0  | 1  | 0  |
| d <sub>b</sub> (k) | +1 | -1 | +1 | +1 | +1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 |

Assim temos um pulso de RF com a duração T e fase  $0^\circ$  se o bit=1, e um pulso de RF com a duração T e fase  $180^\circ$  se o bit=0. Isto é exatamente um sinal modulado BPSK.

T é tempo de duração de um bit. A taxa de bits,  $R=1/T_b$  bit/s.

Da teoria de sinais podemos determinar que uma sequência digital aleatória como a estabelecida pela sequência de pulsos  $d_b(k)$  possui um espectro de densidade de potência<sup>7</sup> definido pela seguinte equação:

$$G(f) = T_b \left( \frac{\sin \pi f T_b}{\pi f T_b} \right)^2$$

A Figura 10 ilustra esta função<sup>8</sup>. Ela é válida para qualquer sequência aleatória  $d_b(k)$ , de comprimento infinito e média zero.

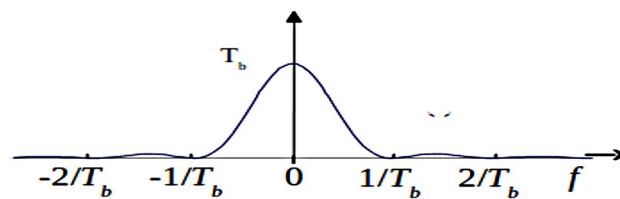


Figura 10

Espectro de densidade de potência  
de uma sequência bipolar aleatória

<sup>7</sup> O espectro de densidade de potência é uma função da frequência que mostra a distribuição da potência do sinal ao longo do espectro. Na prática, é a forma matemática para representação do espectro de frequências de uma sequência digital aleatória. A integral dessa função, de  $f_1$  a  $f_2$  fornece a potência gerada pelo sinal nessa faixa de frequências.

<sup>8</sup> A função de densidade espectral de potência  $G(f)$  representada na **Figura IV.1.10** utiliza uma convenção matemática que inclui o uso de frequências negativa. Essa convenção é puramente matemática, e os fenômenos físicos, como a largura de banda do sinal, são observados utilizando-se apenas a parte positiva do eixo das frequências.

Da Figura 10 observa-se que a maior parte da potência da sequência  $d_b(k)$  está concentrada no intervalo de 0 a  $1/T_b$  (frequências positivas – vide nota de rodapé número 8 na página anterior).

Este sinal modula a portadora segundo a equação  $s_{BPSK} = A_c \cos(2\pi f_c t) \times d_b(k)$  já citada. Esta operação matemática, no domínio do tempo, tem o efeito de deslocar o espectro de densidade de potência da sequência  $d_b(k)$  para valores de frequência em torno da frequência da portadora,  $f_c$ , resultado no espectro de densidade de potência do sinal modulado BPSK mostrado na Figura 11, a qual também apresenta um exemplo de uma sequência bipolar (apenas 4 bits) e o respectivo sinal modulado BPSK.

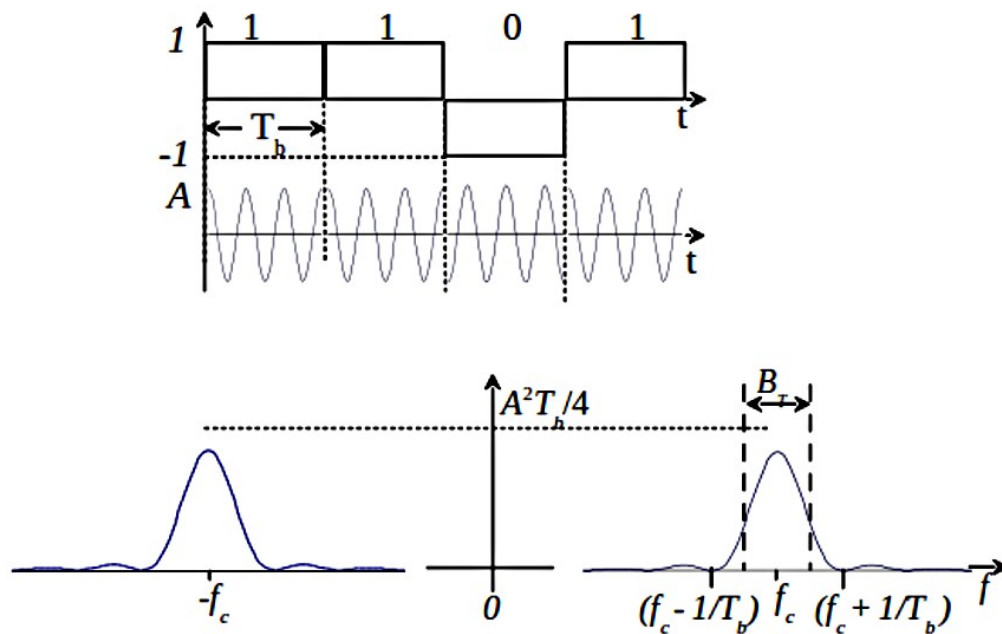


Figura 11

Sequência bipolar, sinal modulado BPSK e respectivo espectro de densidade de potência

Da Figura 11 observa-se que a largura de faixa do sinal modulado é, teoricamente, infinita. Entretanto, para efeitos práticos, é limitada<sup>9</sup> a um valor  $W=B_t$ . Este valor  $B_t$  está situado, normalmente, entre  $1/T_b$  e  $2/T_b$ .

Se  $W=1/T_b$ , a eficiência espectral do BFSK seria 1bit/s/Hz. Se  $W=2/T_b$ , a eficiência espectral seria de 0,5 bit/s/Hz.

Em sistemas práticos, pode-se ter valores intermediários. Naturalmente, quanto menor a largura de faixa, maior a eficiência espectral, entretanto maior a distorção causada ao sinal que será recebido, devido ao corte das componentes de maior frequência causado pelo filtro de canal.

---

<sup>9</sup> A limitação na largura de faixa do sinal transmitido é necessária por várias razões. Podemos citar, por exemplo, a redução da potência em frequências fora da faixa permitida para aquele sistema. Outra razão é a redução de frequências espúrias fora da faixa, que podem causar interferências em outros sistemas operando em frequências próximas.

## MODULAÇÃO DIGITAL QPSK

A modulação em quadratura QPSK é realizada definindo-se duas portadoras de mesma frequência, porém defasadas de  $90^\circ$  uma da outra. O fato de serem defasadas de  $90^\circ$  permite que seja possível a demodulação sem que uma interfira na outra, pois como será visto adiante elas representam sinais ortogonais. Assim, cada portadora pode ocupar toda a faixa de frequências do espectro disponível no canal, e desta forma dobra-se a taxa efetiva de transmissão.

O fluxo de dados de entrada chega ao modulador com uma taxa de  $1/T$  bit/s, e é separado em dois fluxos de dados  $d_i(t)$  e  $d_q(t)$ , contendo os bits pares e ímpares, respectivamente, conforme ilustra a Figura 12. Cada fluxo  $d_i(t)$  e  $d_q(t)$  possui a metade da taxa de transmissão do fluxo de entrada.

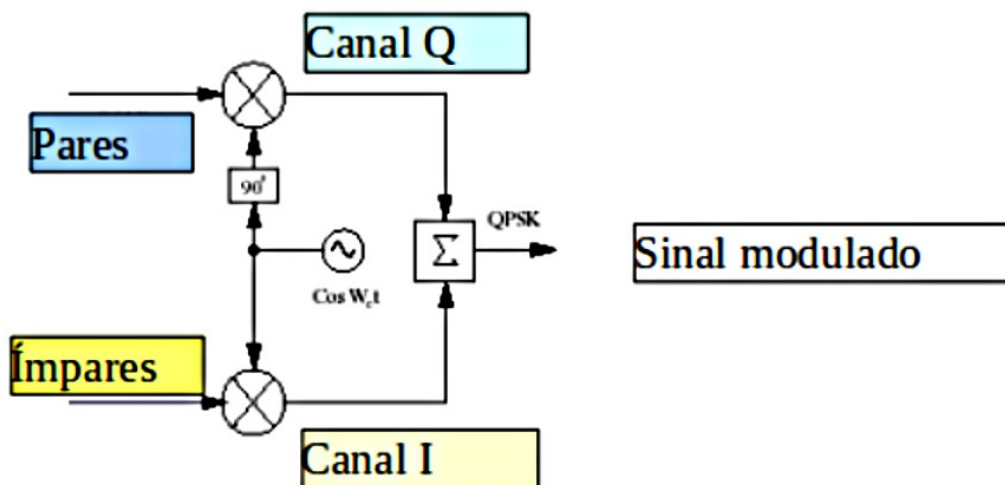


Figura 12  
Esquema para geração do sinal  
QPSK

O sinal QPSK é então gerado utilizando-se os sinais I e Q para modular funções seno e cosseno em quadratura de fase, resultando em uma portadora modulada, que pode se expressar como segue:

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} d_I(t) \cos(2\pi ft + \pi/4) + \frac{1}{\sqrt{2}} d_Q(t) \sin(2\pi ft + \pi/4)$$

Um exemplo para os sinais  $d_I(t)$  e  $d_Q(t)$  é apresentado na Figura 13. Nessa figura, verifica-se que  $d_I$  é formado dos bits pares, e  $d_Q$  dos bits ímpares.

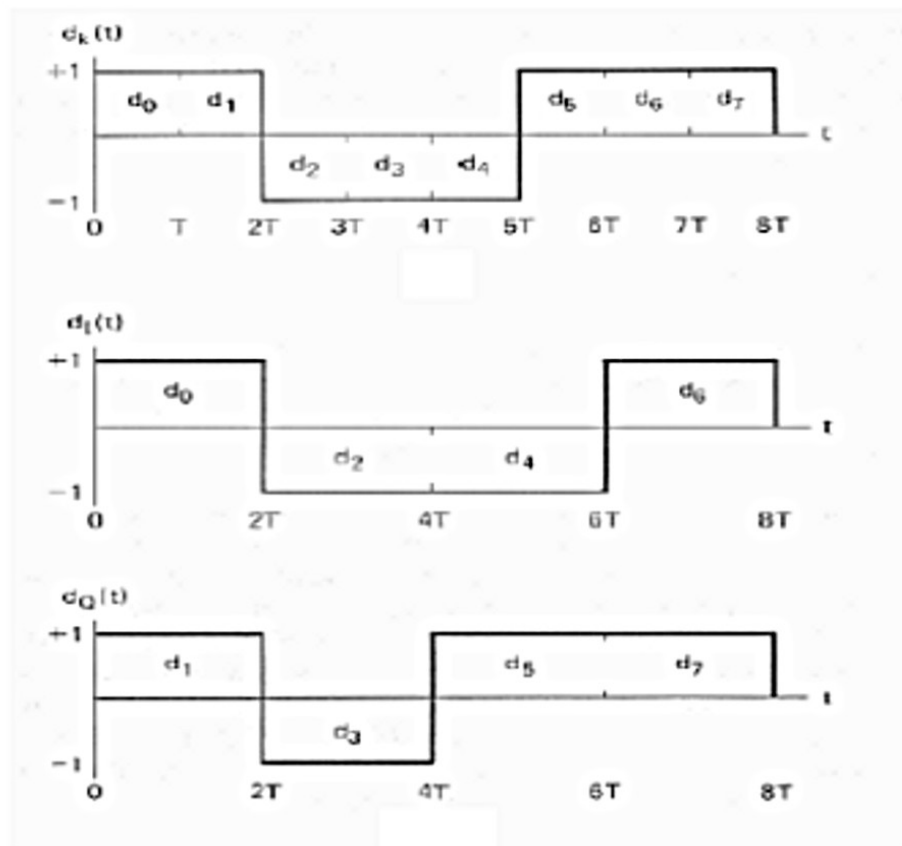


Figura 13  
Sinais de entrada e e canais I e Q para QPSK

Podemos imaginar o sinal QPSK como o resultado da soma de dois sinais BPSK, ortogonais. Um deles, é o resultado de modular o cosseno pelo feixe  $d_I(t)$ , e o outro o resultado de modular o seno pelo feixe  $d_Q(t)$ .

Cada uma das quatro possíveis fases da portadora representa dois bits de dados. Assim temos dois bits por símbolo. Uma vez que a taxa de símbolos para QPSK é a metade da taxa de bits, ele pode transmitir, durante o mesmo intervalo de tempo, o

dobro da quantidade de dados que um sistema BPSK equivalente. Isto é possível porque os sinais I e Q são ortogonais entre si, e podem ser transmitidos simultaneamente sem que um interfira com o outro.

Em QPSK a fase da portadora pode mudar de valor apenas uma vez a cada  $2T$  s. Se apenas uma das componente em fase ou em quadratura muda de sinal, uma mudança de fase de  $\pi/2$  ocorre. Porém, se ambas mudarem de sinal, ocorrerá uma variação de fase de  $\pi$ .

A Figura 14 apresenta uma visualização do sinal modulado considerando a sequência de entrada da Figura 13. Nessa figura, pode-se observar uma transição de fase de  $\pi$  (em  $2T$ ) e duas transições de  $\pi/2$  (em  $4T$  e  $6T$  respectivamente) .

Verifica-se, assim, que o sinal QPSK é um sinal com amplitude constante, variando apenas a fase.

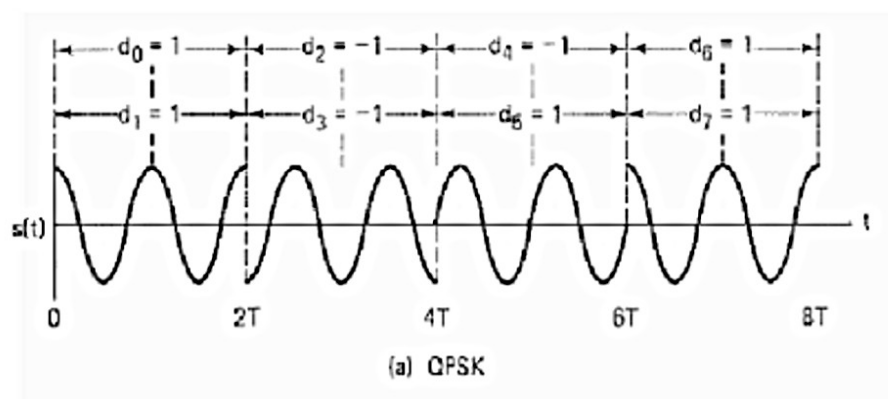


Figura 14

O sinal modulado QPSK

## LARGURA DE FAIXA DO SINAL QPSK

Conforme vimos, o sinal QPSK é formado pela adição em quadratura de duas componentes. Uma modula o cosseno, e a outra o seno. A utilização das portadoras em quadratura de fase garante a ortogonalidade entre elas, e permite que a mesma frequência seja usada para ambas. Assim, para efeito de largura de faixa, basta analisar o espectro de uma das portadoras, pois o da outra irá se sobrepor, ocupando a mesma faixa.

O sinal QPSK pode ser encarado como dois sinais BPSK em quadratura de fase, modulados cada um deles por uma sequência digital que tem a metade da taxa de transmissão que a sequência de entrada. Essa sequência, cuja duração de símbolos  $T_s=2T_b$ , é considerado o sinal de banda básica. Neste caso do QPSK, esse sinal é também binário, e também pode ser considerado bipolar.

Portanto, no caso do QPSK, cada eixo ortogonal, representando uma portadora, corresponde a uma modulação semelhante à do BPSK, com o detalhe de que o sinal modulante tem a metade da taxa de bit do sinal de entrada.

Desta forma, podemos dizer que a largura de faixa do sinal QPSK seria, no caso mais conservativo, igual a  $R_s=R_b$ , ou no outro extremo seria  $R_s=R_b/2$ . No primeiro caso, a eficiência espectral do QPSK seria de 1 bit/s/Hz, e no segundo caso de 2 bit/s/Hz. Assim como no BPSK, valores intermediários podem ser encontrados, dependendo de quanta distorção se tolera ao sinal na recepção. De qualquer forma, não resta dúvida de que o QPSK é mais eficiente, do ponto de vista de aproveitamento de espectro, do que o sinal BPSK.



## REDUÇÃO DA LARGURA DE BANDA DE TRANSMISSÃO

O sinal modulado QPSK, tal como mostrado, apresenta um espectro de transmissão com muitos lóbulos laterais, devido a transição brusca na fronteira entre pulsos (que ocorre quando se usa pulsos retangulares). A Figura 15 apresenta uma imagem do espectro de frequências de um sinal QPSK. Este espectro é provocado pelo uso de funções retangulares na banda básica.

A forma ideal de pulso para transmissão não é a retangular, mas sim a forma  $\text{sinc}(x) = \text{sen}(\pi x) / (\pi x)$ , também conhecido como pulso de Nyquist. Este pulso tem uma largura de banda de transmissão bem definida, na verdade igual a  $1/2T_b$ . Entretanto, o pulso de Nyquist não é fisicamente realizável, sendo na prática usado um processo de formatação de pulso chamado cosseno elevado, em inglês “root rised cosine” (RRC). Esta forma de pulso oferece um excelente compromisso entre distribuição espectral e interferência intersimbólica devido à filtragem de banda, e é amplamente utilizado para melhorar as características de largura de transmissão de sinais modulados em geral, inclusive no caso do QPSK.

A Figura 15 apresenta para comparação a largura de faixa ideal para a modulação QPSK (Banda de Nyquist), com a qual se pode atingir a eficiência máxima teórica de 2 bit/s/Hz.

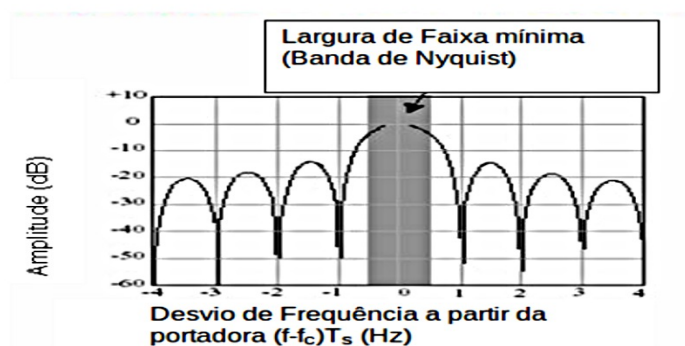


Figura 15  
Espectro do sinal QPSK

A utilização de formatação com filtro “RRC” permite a obtenção de espectro finais mais concentrados, diminuindo a distorção causada pela limitação da banda de transmissão.

Esse filtro modelador tem um parâmetro chamado roll off ( $r$ ) que controla o formato e a largura de banda do pulso.  $r=1$  fornece pulsos com a maior parte da energia concentrada entre 0 e  $1/T_s$  Hz.  $r=0$  corresponde ao pulso teórico de Nyquist, com a largura de faixa mínima de  $1/2T_s$ . Valores intermediários podem ser usados na prática.

## CIRCUITO DO MODULADOR

A Figura 16 mostra um diagrama em blocos, que ilustra como pode ser feita uma implementação prática do modulador QPSK. Observe que após o passo 2, costuma-se realizar um processo de conformação de pulso, nesse caso utilizando-se filtros RRC (Rooted Rised Cosine).

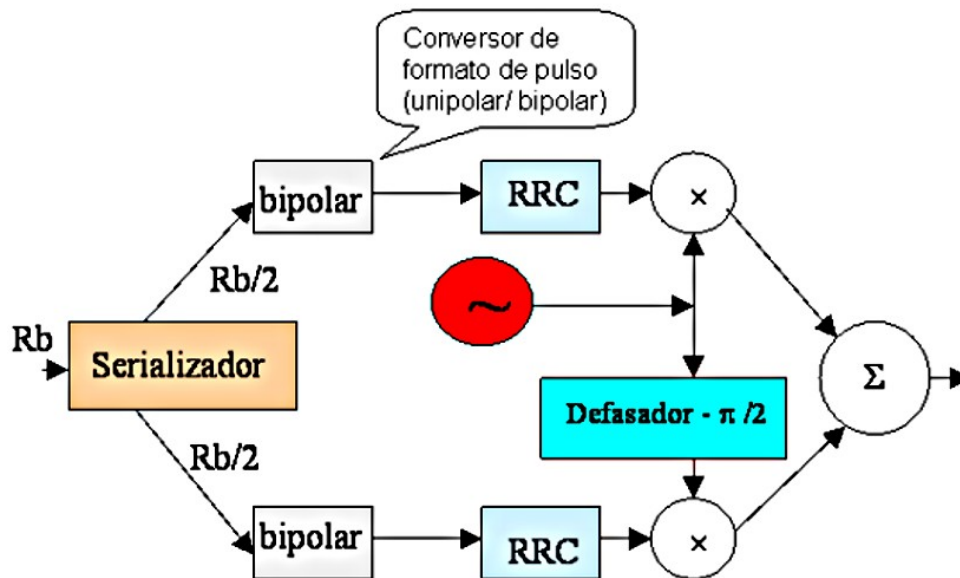


Figura 16  
Sistema para geração QPSK

## MODULAÇÃO DE ENVOLTÓRIA CONSTANTE

Um sinal, pertencente a essa classificação, admite algumas características. Assim, por exemplo, quando amostrado na taxa de símbolos, os valores de amplitude das amostras permanece constante. Também não devem existir mudanças de fase descontínuas. Além disso a amplitude máxima e mínima alcançados pelo sinal num período é constante. A onda senoidal, por exemplo, é considerada um sinal de “envoltória constante” ideal.

Sinais de “envoltória constante” sofrem menos distorção em amplificadores de potência e têm preferência para aplicações “sem fio” (transmissão via rádio, satélite por exemplo, ou celular). Nesses sistemas, procura-se a eficiência máxima de transmissão<sup>10</sup>, e isto é conseguido utilizando-se amplificadores não-lineares no estágio de saída (potência). O que acontece é que um amplificador não linear trabalha em função da amplitude instantânea do sinal. Quanto mais a amplitude do sinal varia, mais amplificação não linear ocorre e isso resulta em um sinal distorcido. QPSK não é a rigor um sinal de “envoltória constante”, em virtude de apresentar deslocamentos descontínuos de fase, mas é considerado bem próximo disso.

---

<sup>10</sup> A eficiência de transmissão, nesse caso, refere-se a eficiência em termos da energia gasta para alimentar o transmissor e a potência efetiva do sinal transmitido. É claro que maiores eficiências significarão menores gastos energético, o que é importante em sistemas alimentados com baterias, como satélites ou aparelhos móveis.

## OFFSET QPSK (OQPSK)

Offset QPSK é obtido a partir de QPSK. No Offset QPSK o canal Q é temporalmente deslocado da metade do tempo de um símbolo, de modo que os canais I e Q sempre sofrem transição em instantes diferentes. O resultado dessa mudança é que o deslocamento de fase, num dado instante, fica limitado no máximo a  $90^\circ$ . Em amplificadores de alta potência e aplicações satélite, Offset QPSK apresenta melhor desempenho. Embora em um canal linear seu comportamento em relação ao QPSK, quanto à BER<sup>11</sup>, seja o mesmo, em canais não lineares a BER do Offset QPSK é menor, quando operando próximo ao ponto de saturação do amplificador. Offset QPSK (OQPSK) é algumas vezes chamado “Staggered QPSK” (SQPSK) – QPSK escalonado.

A Figura 17 apresenta uma representação dos sinais I e Q, no OQPSK.

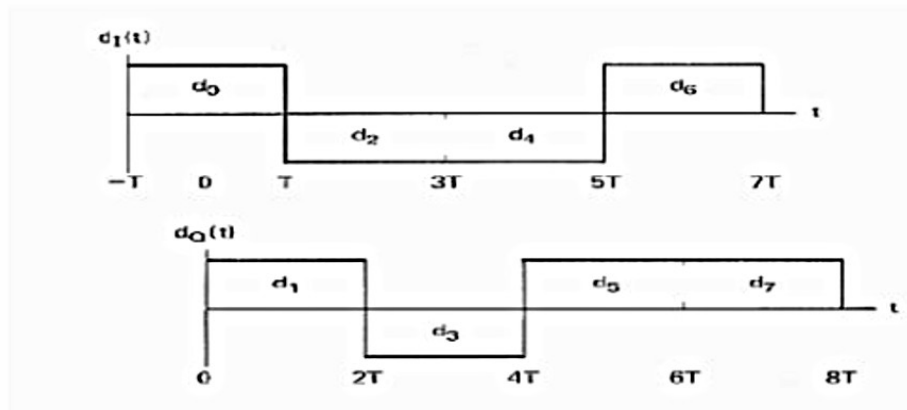


Figura 17

Canais I e Q mapeados em um sinal Off-Set QPSK

Ao contrário do QPSK, as transições em um sinal OQPSK nunca ocorrem ao mesmo tempo. Em qualquer mudança de símbolo, tanto faz para o canal I ou Q, em um certo

<sup>11</sup> BER – Taxa de erro de bits (Bit Error Rate)

instante de tempo apenas um eixo pode variar, e portanto o vetor correspondente pode variar apenas um espaço de 1 quadrante. Isto significa que as variações de fase serão sempre inferiores a  $90^\circ$ . Já no QPSK, eventualmente pode-se observar variações de até  $180^\circ$ .

Nas comunicações via satélite, OQPSK é muito utilizado, pois é fácil de construir e operar.

A Figura 18 apresenta o sinal modulado em OQPSK, para o sinal de dados da Figura 17. Conforme se observa, as transições em  $180^\circ$  foram eliminadas, pois não há possibilidade de ocorrerem. Devido ao off-set dos canais I e Q, uma variação de fase de  $180^\circ$  do QPSK foi transformada em duas etapas de  $90^\circ$ .

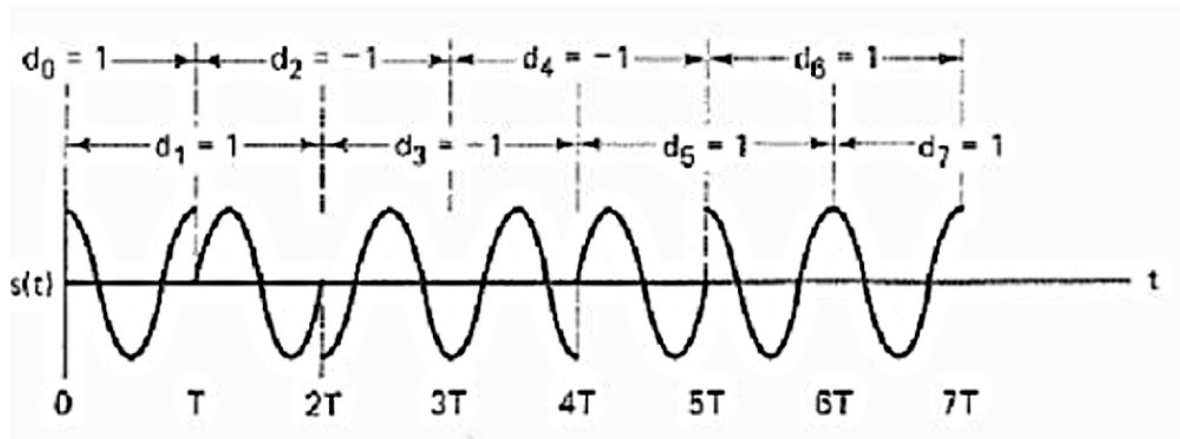


Figura 18  
Sinal modulado OQPSK

## MODULAÇÃO FSK BINÁRIA (BFSK)

No BFSK, o sinal modulado pode conter duas frequências dependendo do nível lógico da informação:

$$s_1(t) = A_c \cos(2\pi f_1 t) \quad \text{para nível lógico 1}$$

$$s_2(t) = A_c \cos(2\pi f_2 t) \quad \text{para nível lógico 0}$$

Toda vez que o nível lógico muda, a frequência é trocada. Portanto somente uma das frequências é transmitida por vez.

Portanto, um modulador BFSK pode ser construído a partir de uma chave alternando entre os dois valores de frequência  $f_h$  e  $f_l$ , conforme o nível lógico do sinal de entrada. Isto está ilustrado na Figura 19.

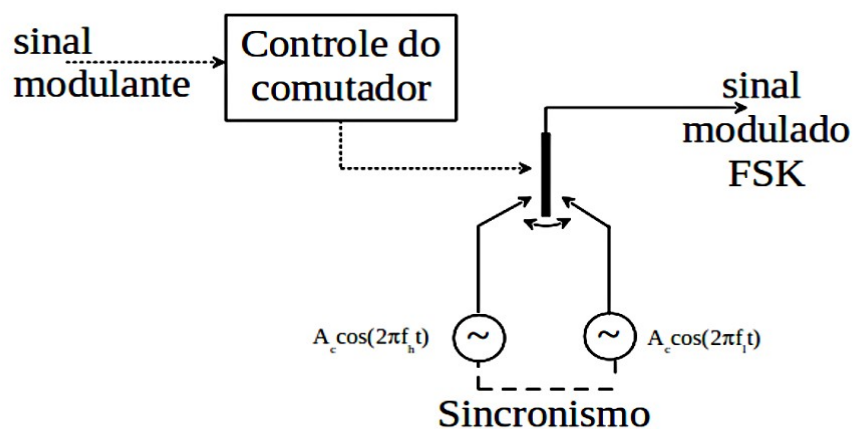


Figura 19  
Esquema básico do modulador FSK

Dada uma sequência digital de entrada, o sinal FSK pode então ser encarado como uma superposição de duas portadoras moduladas em amplitude (de frequências diferentes), por sequências digitais extraídas da sequência original de entrada. Nesta modulação, o sinal digital modifica a frequência da portadora de maneira discreta. Conforme já citado, o sinal modulado pode conter duas frequências dependendo do nível lógico da informação:

$$s_1(t) = A_c \cos(2\pi f_1 t) \quad \text{para nível lógico 1}$$

$$s_2(t) = A_c \cos(2\pi f_2 t) \quad \text{para nível lógico 0}$$

Estas frequências também podem ser escritas em termos de um desvio da frequência da portadora:

$$s_1(t) = A_c \cos(2\pi(f_c + \Delta f)t)$$

$$s_2(t) = A_c \cos(2\pi(f_c - \Delta f)t)$$

onde  $\Delta f$  é chamado desvio de frequência.

Chamamos a mais alta das frequências de  $f_h$  e a mais baixa de  $f_l$ . A expressão do sinal modulado fica então:

$s_{\text{BFSK}}(t) = A_h \cos(2\pi f_h t + \Phi_h) + A_l \cos(2\pi f_l t + \Phi_l)$  onde  $\Phi_h$  e  $\Phi_l$  são valores de fase que podem apresentar descontinuidades nos instantes de transição do sinal modulado, quando a frequência muda.

$A_h$  e  $A_l$  são dados conforme os dois valores assumidos pelo sinal modulante  $m(t) = -1$  ou  $+1$ :

| $m(t)$ | $A_h$ | $A_l$ |
|--------|-------|-------|
| -1     | 0     | 1     |
| +1     | 1     | 0     |

Assim,  $f_l$  é enviado em resposta a -1 e  $f_h$  é enviado em resposta a +1. Toda vez que o nível lógico muda, a frequência é trocada. Portanto somente uma das frequências é transmitida por vez.



## LARGURA DE FAIXA DO SINAL BFSK

Vamos agora fazer uma análise simplificada do espectro de frequências do sinal modulado BFSK.

Para simplificar, vamos fazer a seguinte mudança de variáveis, onde o objetivo é utilizar variáveis que assumem valores simétricos, -1 e +1, como  $m(t)$ .

$$A_h(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} A_h'(t)$$

$$A_l(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} A_l'(t)$$

Assim, se  $A_h'(t)=+1$ ,  $A_l'(t)= -1$  e  $A_h(t) = 1$  e  $A_l(t)=0$ . Da mesma forma, se  $A_h'(t)= -1$ ,  $A_l'(t)= +1$  e  $A_h(t) = 0$  e  $A_l(t)=1$ .

Assim, substituindo-se os valores de  $A_h$  e  $A_l$  o sinal modulado pode ser escrito como:

$$s_{\text{BFSK}}(t) = \frac{1}{2} \cos(2\pi f_h t + \phi_h) + \frac{1}{2} \cos(2\pi f_l t + \phi_l) + \\ \frac{1}{2} A_h' \cos(2\pi f_h t + \phi_h) + \frac{1}{2} A_l' \cos(2\pi f_l t + \phi_l)$$

O espectro de frequências das duas primeiras parcelas são impulsos<sup>12</sup> nas frequências  $f_h$  e  $f_l$ . As últimas duas parcelas representam portadoras moduladas em amplitude por pulsos retangulares. Conforme foi visto para o BPSK, um sinal com pulsos retangulares possui uma distribuição espectral de potência da forma

$$G_x(f) = \left( \frac{\sin(\pi fT)}{\pi fT} \right)^2 = \text{sinc}^2(fT) \text{ conforme mostrado na Figura 20.}$$

<sup>12</sup> O impulso pertence a uma classe especial de função matemática, (classe das distribuições) e tem certas propriedades que permitem sua utilização para representação de fenômenos físicos que apresentam energia ou potência concentrada em valores determinados, como o espectro de uma função senoidal pura, que concentra sua potência em uma única frequência.

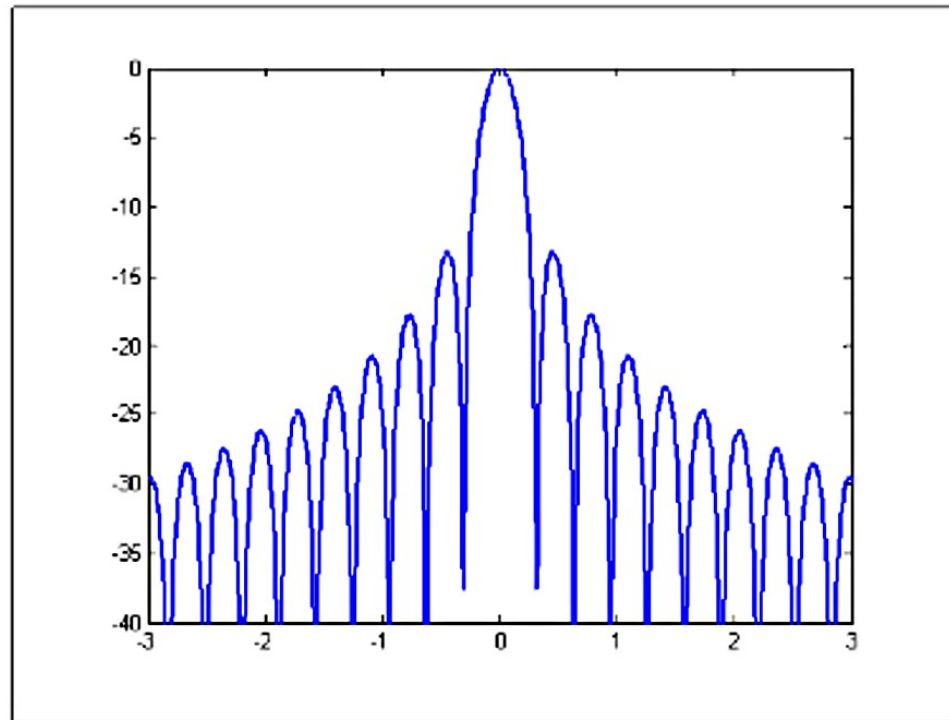


Figura 20

Espectro de potência de uma sequência de pulsos retangulares

A Figura 21 apresenta um sinal modulante digital binário aleatório, cuja frequência média de transmissão é considerada com o valor normalizado igual a 1. Este sinal modula digitalmente em FSK uma portadora de frequência 4 vezes maior ( $f_c=4$ ), com um desvio de frequência igual a 2 ( $\Delta f=2$ ), gerando o sinal modulado (apresentado ainda na Figura 21) e respectivo espectro, apresentado na Figura 22.

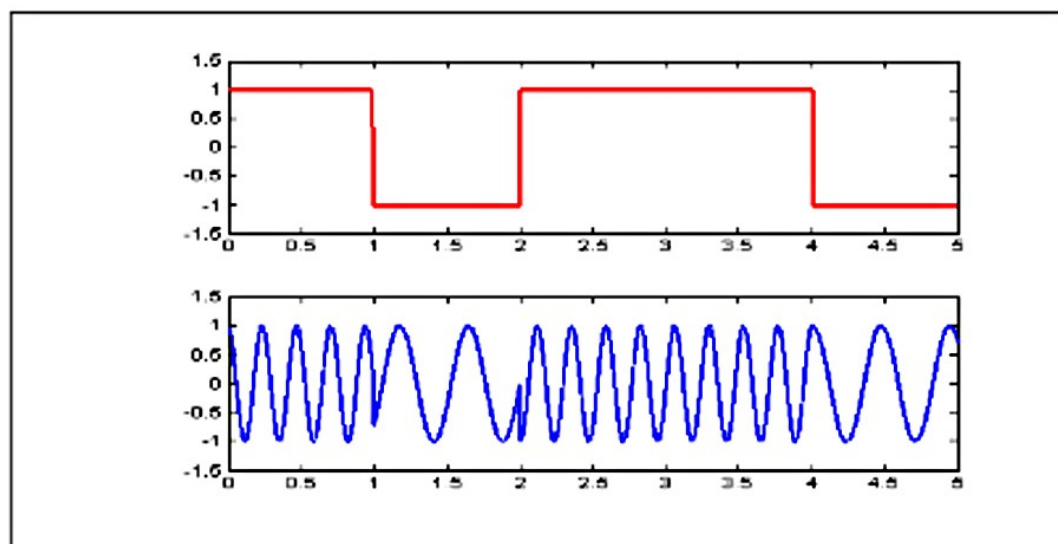
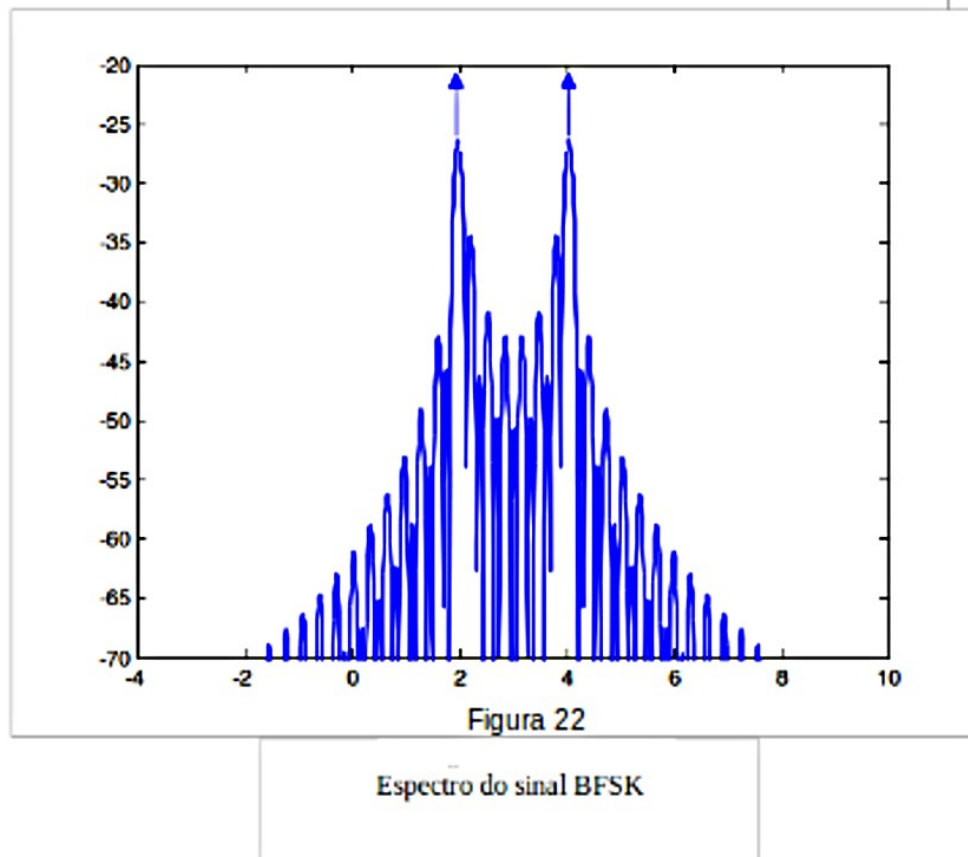


Figura 21

Sinal modulante digital binário e respectivo sinal  
modulado FM



Quanto menor o desvio de frequência, mais próximos estarão os lóbulos principais e maior será a superposição no espectro<sup>13</sup>. Alternativamente, quanto maior o desvio, mais espalhado o espectro se apresentará. A rigor, a largura de banda é infinita, mas para efeitos práticos pode ser limitada a  $2\Delta f$ . Assim a eficiência espectral dependerá do desvio de frequência empregado.

<sup>13</sup> Observe, no gráfico, as setas verticais nas frequências de 2 e 4 Hz, indicando a concentração de energia nessas frequências, matematicamente representadas por funções impulso.

## MODULAÇÃO MSK

A modulação MSK foi motivada pela construção de esquemas onde se deseja transição contínua de fase entre símbolos, de modo a diminuir a possibilidade de interferência fora da banda. Teoricamente, a transição brusca de fase é responsável por aumentos da largura espectral, o que favorece a interferência citada.

A modulação MSK é um caso especial de CPFSK (continuous-phase frequency shift keying), ou um caso especial de OQPSK com ponderação senoidal.

A denominação MSK significa Minimum Shift Keing, e o termo “minimum” está ligado ao espaçamento de frequências utilizado, que é a metade do utilizado para FSK ortogonal demodulado de forma não-coerente<sup>14</sup>.

Demonstra-se que este espaçamento corresponde à metade da taxa de transmissão de símbolos binários,  $R=1/T_s$ . Assim, se  $f_h = f_c + 1/4T_s$ , correspondendo a um nível lógico +1,  $f_l = f_c - 1/4T_s$ , correspondendo a um nível lógico 0.

Portanto, o espaçamento de frequências é  $\frac{1}{2}R_s=1/2T_s$ .

Por exemplo, para uma taxa de dados de entrada de 10 kbit/s, o espaçamento entre as frequências de um sistema MSK seria de 5 kHz (a frequência absoluta da portadora,  $f_c$ , pode ter qualquer valor).

Quando visto como um caso especial de OQPSK, o sinal MSK pode ser descrito pela seguinte equação:

$$s_{MSK}(t) = d_I(t) \cos\left(\frac{\pi t}{2T}\right) \cos(2\pi f_c t) + d_Q(t) \sin\left(\frac{\pi t}{2T}\right) \sin(2\pi f_c t)$$

onde  $d_I(t)$  e  $d_Q(t)$  tem o mesmo significado que para o OQPSK, isto é, correspondem à sequências obtidas somente com os bits pares ( $d_I(t)$ ) e às sequências obtida somente com os bits ímpares ( $d_Q(t)$ ). Cada uma destas sequências tem, portanto, metade da taxa original, ou seja,  $R/2$ .

Sendo originalmente sinalizadas por pulsos retangulares bipolares<sup>15</sup>,  $d_I(t)$  é formatado pela função  $\cos(\pi t/2T)$ , que possui um período  $4T$ , o dobro, portanto, da duração de

<sup>14</sup> A denominação ortogonal refere-se à condição de ortogonalidade entre as duas frequências  $f_l$  e  $f_h$  usadas no FSK binário. Esta condição permite que uma frequência seja detetada sem que a outra cause interferência. No item IV.2.3 – Visão Geométrica de Sinais e Ruído - o conceito de ortogonalidade é matematicamente definido.

<sup>15</sup> Uma sequência bipolar representa o nível lógico 1 por +1, e o nível lógico 0 por -1.

cada símbolo da sequência  $d_i(t)$ . Assim, cada símbolo desta sequência afetará a polaridade de um semiciclo da função  $\cos(\pi t/2T)$ .

O mesmo ocorrerá com a sequência  $d_o(t)$  e função formatadora  $\sin(\pi t/2T)$ , entretanto haverá uma defasagem de  $90^\circ$  entre as duas sequências resultantes.

A seguir, as duas sequências modulam em quadratura uma portadora, gerando o sinal MSK.

A Figura 23 apresenta um diagrama em blocos conceitual de um possível modulador MSK.

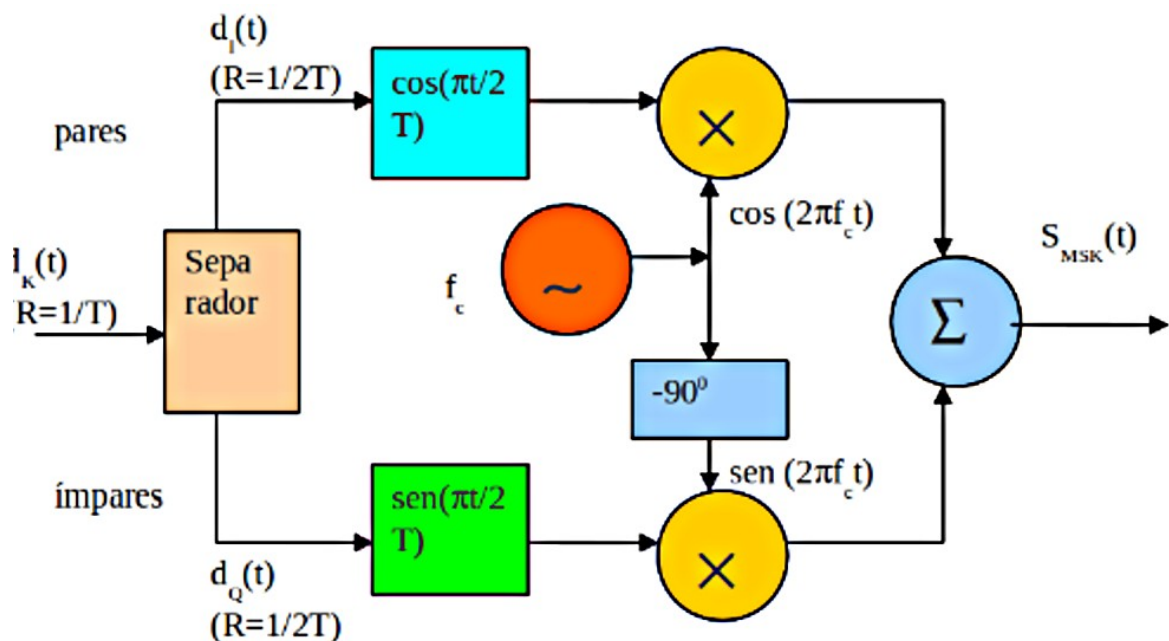


Figura 23

### Modulador MSK

Para exemplificar e esclarecer como ocorre a modulação MSK, consideremos a seguinte sequência de bits (sequência lógica) que constitui a mensagem a ser enviada:

$m = 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0$

Começando a contar da esquerda para a direita, iniciando no numeral 0 para início da contagem, temos que:

$$m_{\text{par}} = 1 \ . \ 0 \ . \ 0 \ . \ 1 \ . \ 0$$

e que

$$m_{\text{impar}} = . \ 1 \ . \ 0 \ . \ 1 \ . \ 1 \ . \ 0$$

Essas sequências lógicas correspondem a sequência de pulsos elétricos retangulares bipolares, onde o nível lógico 1 corresponde a +1 V, e o nível lógico 0 a -1 V. A sequência  $d_i(t)$  corresponde a  $m_{\text{par}}$ , e a sequência  $d_q(t)$  corresponde a  $m_{\text{impar}}$ . Após multiplicar pelas funções formatadoras  $\cos(\pi t/2T)$  e  $\sin(\pi t/2T)$ , os sinais elétricos resultantes estão representados na Figura 24 e na Figura 25 respectivamente.

Observe o defasamento de  $90^\circ$  entre os dois sinais.

Nesse exemplo, foi empregada uma taxa de dados de entrada  $R=1$  kbit/s.

A seguir, ocorre a multiplicação de cada sinal por portadoras em quadratura.

O sinal  $d_i(t)\cos(\pi t/2T)$  é multiplicado por  $\cos(2\pi f_c t)$ , e o sinal  $d_q(t)\sin(\pi t/2T)$  é multiplicado por  $\sin(2\pi f_c t)$ , gerando os sinais representados na Figura 26 e Figura 27.

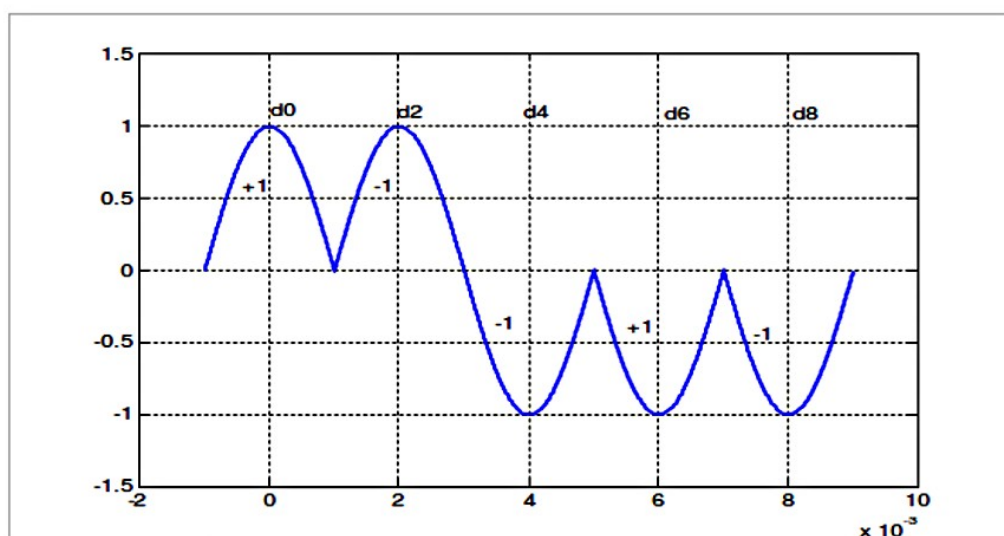


Figura 24  
Sinal elétrico  $d_i(t) \cdot \cos(\pi t/2T)$

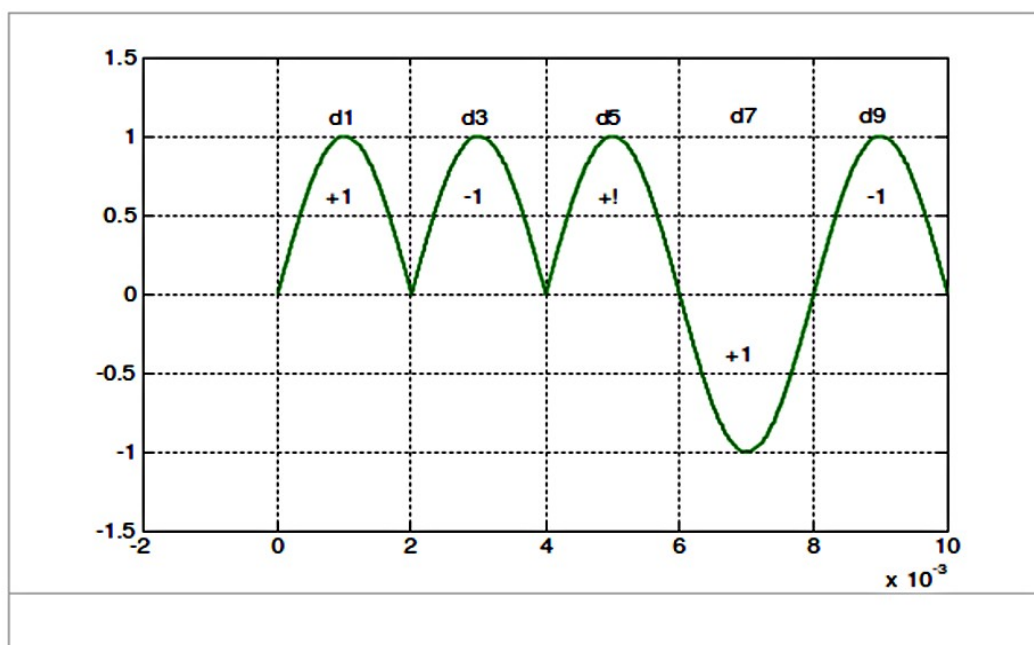


Figura 25  
Sinal elétrico de  $d_q(t) \cdot \sin(\pi t/2T)$



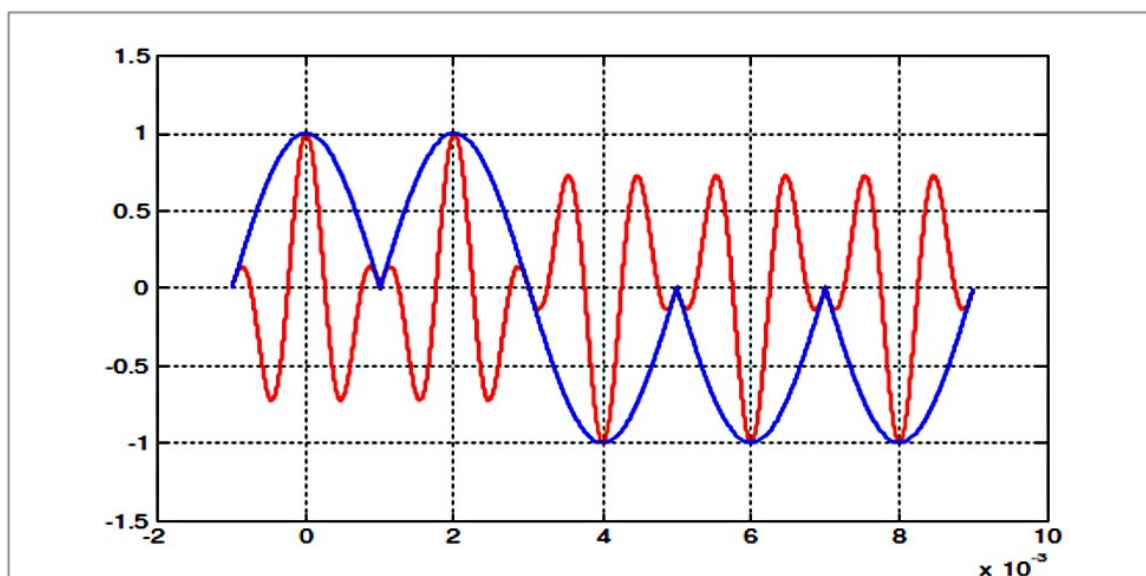


Figura 26  
Componente “em fase” do sinal modulado

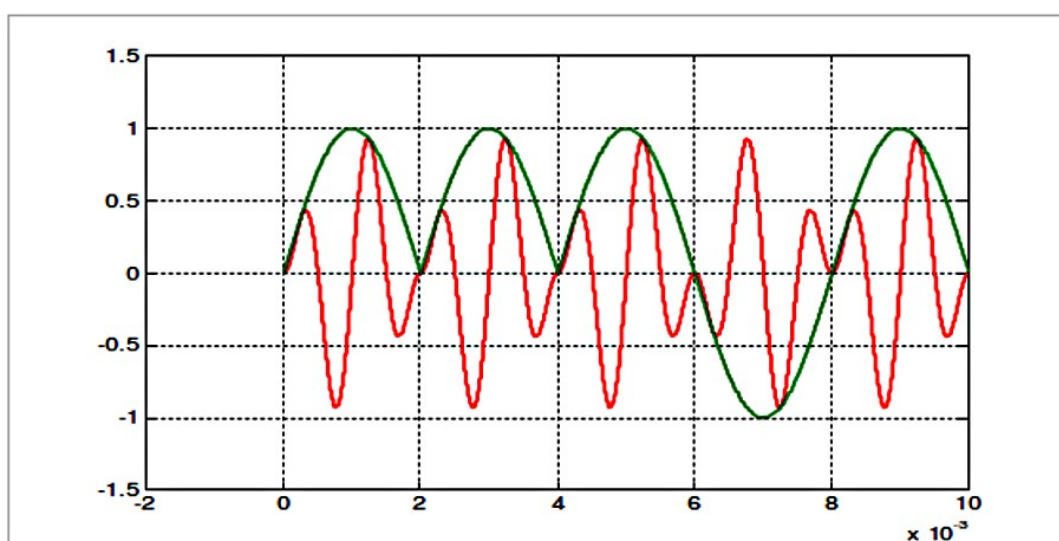


Figura 27  
Componente “em quadratura” do sinal modulado

A Figura 28 apresenta o resultado final, ou seja, a soma das duas parcelas em quadratura. Nesse exemplo, como ilustração e melhor visualização do resultado,  $f_c=R=1$  KHz. Outros valores de  $f_c$  poderiam ser utilizados, desde que guardassem relação harmônica<sup>16</sup> com a taxa de bits  $R$ .

Conforme se observa, o resultado obtido é um sinal modulado em frequência, onde não há transição brusca de fase nos instantes de mudança de frequência da portadora. O sinal obtido é um sinal de “envoltória constante”, conforme anteriormente definido.

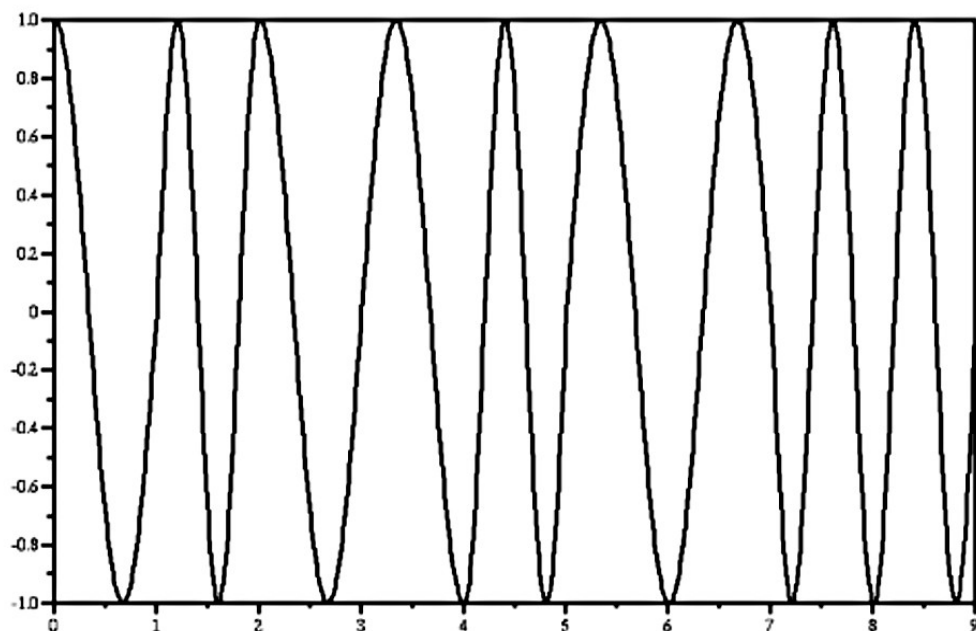


Figura 28  
Sinal MSK

Devido a forma particular como este sinal foi gerado, a frequência instantânea do sinal de saída durante um intervalo de bit depende do valor da frequência no

---

16 Múltiplo inteiro.

intervalo anterior. Por esse motivo, a correspondência entre frequência e sequência lógica de entrada não é direta, mas adquire um caráter diferencial. O sinal MSK assim gerado é também chamado de MSK pré-codificado. Para comprovar este fato, podemos observar o sinal da Figura 28. Dessa figura, identificando o bit 1 como  $f_c + 1/4T$  e o bit 0 como  $f_c - 1/4T$ , podemos escrever a seguinte sequência:

$$m_r = 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1$$

Esta sequência, evidentemente, é diferente da sequência original de entrada:

$$m = 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0$$

O fato é que a sequência recebida  $m_r$  está codificada diferencialmente. Para decodificá-la, temos que fazer a operação:

$m(k) = m(k-1) \oplus m_r(k)$ , onde  $\oplus$  significa a operação lógica “ou” exclusivo, que é definida pela seguinte tabela de verdade:

|   |   |   |
|---|---|---|
| 1 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 |

Temos que fazer uma suposição sobre o bit anterior ao 1º bit, para começar a decodificar. Seja, por hipótese, igual a 1. Portanto,

$$\text{Bit } 0 = 1$$

$$\text{Bit } 1 = 1 + 0 = 1$$

$$\text{Bit } 2 = 1 + 1 = 0$$

$$\text{Bit } 3 = 0 + 0 = 0$$

$$\text{Bit } 4 = 0 + 0 = 0$$

$$\text{Bit } 5 = 0 + 1 = 1$$

$$\text{Bit 6} = 1 + 0 = 1$$

$$\text{Bit 7} = 1 + 0 = 1$$

$$\text{Bit 8} = 1 + 1 = 0$$

$$\text{Bit 9} = 0 + 1 = 1$$

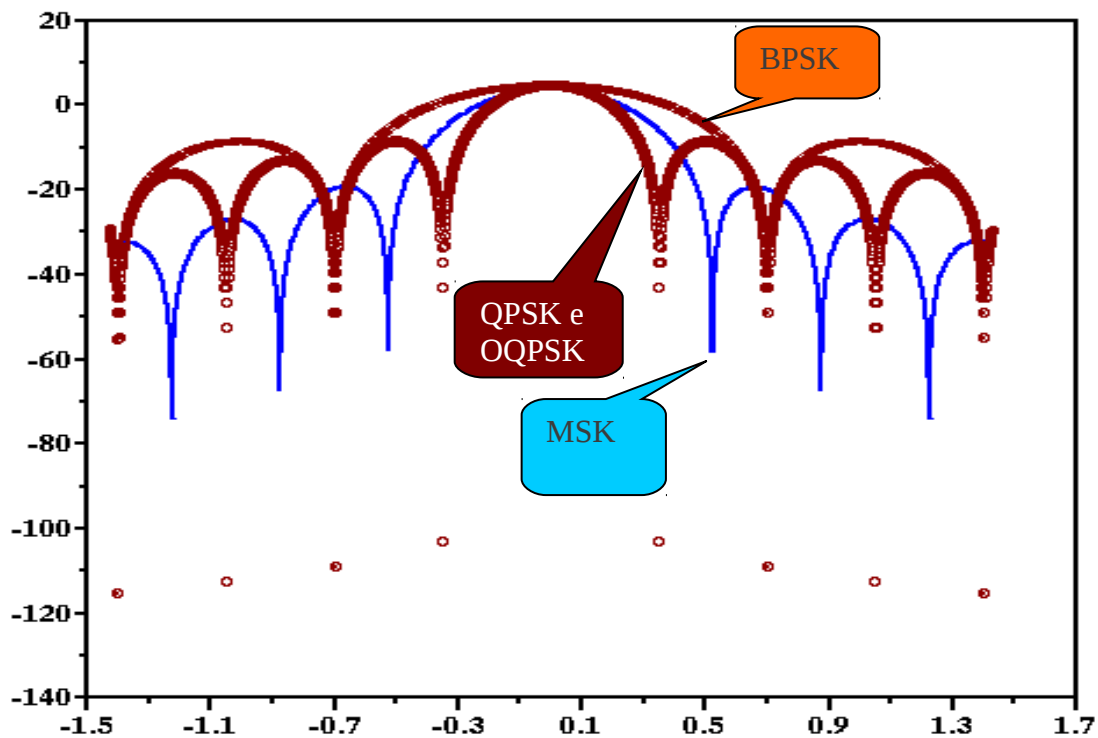
Comparando a sequência decodificada verificamos que é exatamente igual à sequência enviada, com exceção do último bit, que foi decodificado como “1” e na realidade é “0”. Isto se explica porque, na verdade, a defasagem entre os sinais em quadratura não permite o conhecimento da componente “em fase” do sinal entre os instantes 9 e 10, o que ocorreria apenas se fosse considerado mais um bit da sequência de entrada. Como neste exemplo didático o sinal foi composto a partir de apenas 10 bits, ficou faltando essa informação, o que terá gerado o referido erro.

A hipótese inicial para o Bit 0, caso fosse Bit 0=0, teria levado a um resultado complementar ao obtido, ou seja, todos os bits errados, o que equivale a todos os bits corretos, uma vez identificada a situação.

Esta forma de identificação da sequência de bits recebida explora o fato de que na verdade o MSK é um tipo de modulação FSK, e desta forma pode ser demodulada de forma não coerente, utilizando-se filtros sintonizados nas duas frequências  $f_h$  e  $f_l$ . Isto permite uma demodulação mais barata para o MSK, sempre, é claro, que o valor de  $E_b/N_0$  na recepção assim o permita.

A Figura 29 apresenta a densidade espectral de potência de forma normalizada para o espectro de frequências de um sinal MSK, comparando-o com sinal QPSK e OQPSK. A densidade espectral do BPSK foi também apresentada. O eixo horizontal está normalizado para o desvio de frequência a partir da portadora,  $(f - f_c)/R$  (Hz/bit/s).

Podemos observar do gráfico que o MSK apresenta uma largura do lóbulo principal intermediária entre o QPSK (ou OQPSK) e o BPSK. Entretanto, a concentração de energia, no MSK, é maior no lóbulo principal que para as outras modulações, permitindo trabalhar com uma eficiência espectral de 1 bit/s/Hz e baixa ISI, mesmo em situações críticas de amplificação não-linear. Isto é um reflexo da característica de amplitude constante da modulação.



**Figura IV.1.29**  
Densidades espectrais do MSK, QPSK, OQPSK e BPSK

## SUMÁRIO

Neste volume foi apresentada uma introdução ao conceito de modulação digital, sendo mostrados alguns conceitos básicos e descritos, de uma forma simplificada, os sistemas BPSK, QPSK, OQPSK, BFSK e MSK.

A título informativo, foram citados alguns tipos de sistemas de modulação digital e algumas aplicações. Esta citação, além do caráter ilustrativo, tem como objetivo despertar a curiosidade no aluno, incitando o espírito de pesquisa.

Foram apresentados os conceitos de Taxa de Transmissão, Eficiência Espectral e Eficiência em Potência. Também os conceitos de Taxa de Símbolos, Taxa de Bits e Relação Sinal/Ruído foram apresentados.

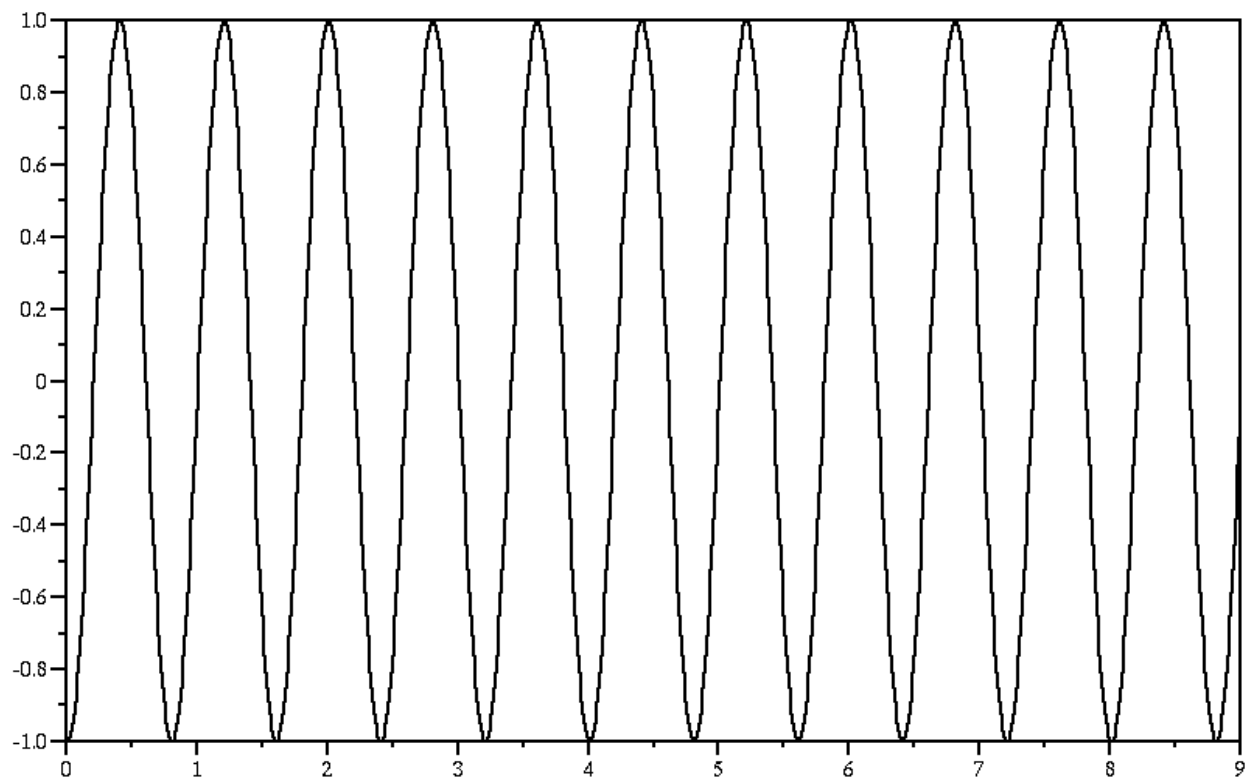
A representação vetorial de sinais, que é um conceito básico em modulação digital, bem como dos canais I e Q foi também mostrado, assim como a idéia do Diagrama de Constelação.

Foi descrita a geração dos tipos de modulação BPSK, QPSK, OQPSK, BFSK e MSK, com ênfase ao aspecto descritivo, não matemático.

Foram apresentados alguns conceitos de forma apenas superficial, como por exemplo a questão de formatação de pulso para redução de largura de banda, a questão de envoltória constante e sua influência na construção prática de moduladores, moduladores não lineares, etc. Esta forma de apresentação visa também despertar a curiosidade no aluno, estimulando-o a realização de pesquisas adicionais.

## EXERCÍCIOS PROPOSTOS

- 1) Com auxílio de pesquisa realizada sobre a bibliografia citada, ou sobre a Internet, conceitue modulação.
- 2) Com auxílio de pesquisa realizada sobre a bibliografia citada, ou sobre a Internet, conceitue “portadora de RF”.
- 3) Com auxílio de pesquisa realizada sobre a bibliografia citada, ou sobre a Internet, conceitue modulação digital.
- 4) Suponha que uma fonte envie a mensagem de texto “Como vai?”, empregando um código ASCII de 7 bits. Suponha ainda que cada mensagem a ser transmitida tenha um comprimento de 3 bits. Utilizando um sinal elétrico digital do tipo NRZ, estabeleça um esquema hardware para geração dos sinais elétricos que irão constituir a entrada de um modulador digital para transmissão da informação constituída pela mensagem acima citada.
- 5) Suponha que a forma de onda de um sinal modulado MSK apresente o formato da **Figura 1. P.1**. Escreva uma possível mensagem de entrada para geração deste sinal. Suponha que todas as frequências, em cada período  $T$ , sejam iguais a  $f_h$  (a maior delas).
- 6) Explique a frase “A Figura 19 apresenta um sinal modulante digital binário aleatório, cuja frequência média de transmissão é considerada com o valor normalizado igual a 1”.
- 7) Estabeleça uma possível correspondência entre mensagem e diagrama de constelação para o QPSK apresentado na Figura 6.
- 8) Um sinal binário retangular bipolar tem uma amplitude de 1 V e um tempo de duração de bit de .001 s. Considerando que o pulso se mantenha em nível alto durante todo o tempo de duração de símbolo, calcule a energia média de bit. Considere também  $P(1)=P(0)=0.5$ .
- 9) Escreva uma expressão matemática para o sinal BPSK.



**Figura 1. P.1**  
Sinal MSK

10) Associe a coluna da direita com a coluna da esquerda:



| FORMATO DA MODULAÇÃO |
|----------------------|
| 16QAM                |
| 256QAM               |
| 32QAM                |
| 64QAM                |
| 8PSK, OQPSK          |
| BPSK                 |
| DQPSK                |
| FSK, GFSK            |
| MSK, GMSK            |
| QPSK, $\pi/4$ DQPSK  |

| APLICAÇÃO  |
|--|
| GSM, CDPD  |
| Telemetria no espaço, cable modems                                     |
| Satélite, CDMA, NADC, TETRA, PHS, PDC, LMDS, DVB-S, cable modems, TETS |
| CDMA, Satellite  |
| DECT, paging, AMPS, CT2, ERMES, segurança pública terrestre móvel.     |
| Satélite, aviação  |
| Radio digital microondas, modems, DVB-C, DVB-T                         |
| Microondas terrestre, DVB-T  |
| DVB-C, modems, MMDS  |
| Modems, DVB-C (Europa), Vídeo Digital (US)                             |

11) Qual a taxa de transmissão de um sistema 256QAM cuja taxa de bits é de 10 Mbit/s?

12) Calcule a eficiência espectral de um sistema QPSK que transmite a uma taxa de símbolos de 100 kbaud, supondo a utilização da largura de banda mínima de Nyquist.

13) O que significa eficiência em potência?

14) Complete as lacunas

a) Quando referido ao processo de demodulação<sup>17</sup>, o uso do termo coerência, ou \_\_\_\_\_ significa a habilidade do sistema

<sup>17</sup> O processo de demodulação corresponde ao procedimento empregado para recuperar a sequência de símbolos que foi enviada pelo transmissor, através da modulação.

\_\_\_\_\_ de demodulação<sup>18</sup> em que a  
\_\_\_\_\_ é importante no processo.

b) A informação \_\_\_\_\_ que a fase proporciona resulta em  
\_\_\_\_\_ em relação à taxa de \_\_\_\_\_.

c) Para realizar a demodulação coerente,  
é \_\_\_\_\_.

d) Num sistema coerente, o receptor é capaz de \_\_\_\_\_ uma base  
de \_\_\_\_\_ que define, por  
exemplo \_\_\_\_\_.

e) A não-coerência, ou \_\_\_\_\_, significa que  
\_\_\_\_\_ não é fundamental  
ao \_\_\_\_\_.

f) De um modo geral, a recepção \_\_\_\_\_ é mais simples de ser  
implementada que a recepção \_\_\_\_\_.

15) Escolha as alternativas corretas:

a) Quando descrevemos um vetor pelas suas coordenadas, o sistema de coordenadas utilizado é caracterizado por um conjunto de vetores unitários, que constituem a base do sistema de coordenadas. No sistema cartesiano (coordenadas retangulares) esses vetores básicos são mutuamente perpendiculares, ou seja, não existe componente de um sobre o outro.

b) Da mesma forma que para vetores, define-se a perpendicularidade entre duas

<sup>18</sup> Decisão de demodulação é o processo através do qual o receptor decide, ou tenta identificar, qual símbolo foi enviado em um certo instante, a partir do sinal recebido e empregando um determinado processo de demodulação. Nessa decisão existe sempre uma probabilidade de erro associada.

funções, dizendo que elas são ortogonais quando existe componente de uma sobre a outra.

c) Nos esquemas de modulação em fase costuma-se empregar duas funções ortogonais que são utilizadas como funções base. Essas funções são o seno e cosseno de mesma frequência.

d) Em uma analogia vetor-sinal, os sinais relativos a modulações em fase podem ser escritos como um vetor soma de dois sinais, ocorrendo em dois canais, chamados I e Q. Podemos pensar em I e Q como as projeções do sinal nos eixos x e y (horizontal e vertical).

e) Em relação às componentes do sinal sobre os eixos I e Q temos que:

$$\text{Amplitude do sinal } A = \sqrt{s_{11}^2 + s_{22}^2}$$

$$\text{Fase do sinal } \Phi = \text{atn} \left( \frac{s_{11}}{s_{12}} \right)$$

16) Uma modulação BPSK pode ser representada matematicamente pela expressão

$s(t) = A \sin(2\pi f_0 t + d_k \times \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{4})$ , onde  $d_k$  é o fluxo de dados de entrada, representando as amplitude de um sinal aleatório retangular bipolar para o qual amplitude -1 significa bit 1, e amplitude 1 significa bit 0. Desenhe um diagrama de constelação para essa modulação, designando os valores dos bits a cada ponto do diagrama.

17) Discuta as diferenças entre um diagrama de constelação para o QPSK e o OQPSK.

18) Explique com mais detalhes o gráfico da **Figura IV.1.13**. Comente a eficiência espectral da modulação.

19) Escreva a expressão matemática de um sinal BFSK cuja frequência de portadora é 1 MHz e o desvio de frequência é igual à taxa de transmissão  $R=100$  kbit/s.

## SOLUÇÃO DOS EXERCÍCIOS

1) Com auxílio de pesquisa realizada sobre a bibliografia citada, ou sobre a Internet, conceitue modulação.

Solução:

Por modulação podemos entender o processo através do qual a amplitude, frequência, fase de uma portadora senoidal, ou uma combinação destes parâmetros, é variada de acordo com a informação a ser transmitida.

2) Com auxílio de pesquisa realizada sobre a bibliografia citada, ou sobre a Internet, conceitue “portadora de RF”.

Solução:

Portadora de RF pode ser definida como sendo uma portadora senoidal cuja frequência está na faixa de RF, ou seja, na faixa de frequência usada para propagação via rádio (que é qualquer frequência acima de 500 kHz, nos sistemas em uso comercial).

3) Com auxílio de pesquisa realizada sobre a bibliografia citada, ou sobre a Internet, conceitue modulação digital.

Solução:

A modulação pode ser classificada como digital quando a informação a ser transmitida é constituída por uma sequência de símbolos digitais, e o processo de modulação explora este fato para otimizar os sistemas ao sinal digital.

4) Suponha que uma fonte envie a mensagem de texto “Como vai?”, empregando um código ASCII de 7 bits. Suponha ainda que cada mensagem a ser transmitida tenha um comprimento de 3 bits. Utilizando um sinal elétrico digital do tipo NRZ, estabeleça um esquema hardware para geração dos sinais elétricos que irão constituir a entrada de um modulador digital para transmissão da informação constituída pela mensagem acima citada.

Solução:

A codificação do texto “Como vai?” empregando o código ASCII pode ser obtida consultando-se uma tabela de códigos. No caso, uma tabela para o código ASCII de

7 bits. Esta tabela pode ser facilmente encontrada na Internet, ou mesmo nas referências bibliográficas citadas. Empregando, por exemplo, a tabela apresentadas na Figura 2.3 da ref [1], temos:

```
C = 1 1 0 0 0 0 1
o = 1 1 1 1 0 1 1
m = 1 0 1 1 0 1 1
o = 1 1 1 1 0 1 1
espaço = 0 0 0 0 0 1 0
v = 0 1 1 0 1 1 1
a = 1 0 0 0 0 1 1
i = 1 0 0 1 0 1 1
? = 1 1 1 1 1 1 0
```

Desta forma, a mensagem “Como vai?” pode ser representada pela seguinte sequência de bits:

```
1 1 0 0 0 0 1 1 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 0 1 1 1 1 0 0
0 0 1 1 1 0 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0.
```

Agrupando-se a sequência acima de 3 em 3 bits, temos:

```
1 1 0 S7 0 0 0 S1 1 1 1 S8 1 1 0 S7 1 1 1 S8 0 1 1 S4 0 1 1 S4 1 1 1 S1 1 0 1
S6 1 0 0 S5 0 0 0 S1 1 0 0 S5 1 1 0 S7 1 1 1 S8 1 0 0 S5 0 0 1 S2 1 1 0 S7 0
1 0 S3 1 1 1 S8 1 1 1 S8 1 1 0 S7.
```

Cada grupo de 3 bits constitui um símbolo. A mensagem portanto utiliza um total de 21 símbolos extraídos de um alfabeto com  $M=2^3=8$  símbolos digitais possíveis, a saber:

```
S1 = 0 0 0      S5 = 1 0 0
S2 = 0 0 1      S6 = 1 0 1
S3 = 0 1 0      S7 = 1 1 0
S4 = 0 1 1      S8 = 1 1 1
```

Desta forma, a mensagem se constitui na sequência de símbolos:

```
S7 S1 S8 S7 S8 S4 S4 S1 S6 S5 S1 S5 S7 S8 S5 S2 S7 S3 S8 S8
S7.
```

Existem vários esquemas hardware que podem ser imaginados. Um possível esquema adotaria um conversor série/paralelo para converter o fluxo de bits no fluxo de símbolos. Como são 3 bits/símbolo, este conversor teria uma entrada e 3 saídas. A combinação dos 3 bits, num dado instante de tempo, das vias de saída constituiriam um símbolo. Evidentemente, a duração de um símbolo é igual a 3 vezes a duração de um bit de entrada. Assim, cada via de saída pode ser considerada uma via serial com taxa de bits igual a  $1/3$  da taxa de entrada. Eletricamente, seriam empregados sinais (pulsos) do tipo NRZ (Não Retorna a Zero) em cada via de entrada ou saída para representar cada bit.

5) Suponha que a forma de onda de um sinal modulado MSK apresente o formato da **Figura.1. P.1**. Escreva uma possível mensagem de entrada para geração deste sinal. Suponha que todas as frequências, em cada período  $T$ , sejam iguais a  $f_h$  (a maior delas).

Solução:

Se todas as frequências são iguais a  $f_h$ , a mensagem recuperada por um banco de dois filtros passa faixa seria, necessariamente,  $m_r = 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1$ . Esta sequência está codificada diferencialmente. Para decodificar, aplicamos a equação

lógica  $m(k) = m(k-1) \oplus m_r(k)$ , resultando daí que:

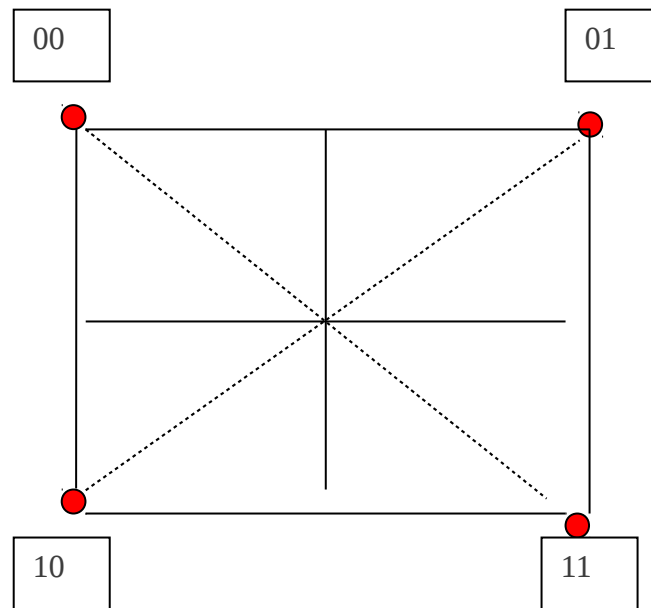
$m = 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1$ .

6) Explique a frase “A Figura 19 apresenta um sinal modulante digital binário aleatório, cuja frequência média de transmissão é considerada com o valor normalizado igual a 1”.

Solução: A frequência média de transmissão é dada pelo valor  $1/T$ , sendo  $T=1$ , conforme se observa pelo gráfico da Figura 19.  $T$  representa o tempo de um símbolo, ou o instante de transição. Como o sinal é aleatório, em  $t=kT$ ,  $k=0,1,2,\dots$ , poderá ou não haver transição. De qualquer modo, em média, há uma transição em  $t=kT$ , e assim a frequência  $1/T=1$  pode ser considerada a frequência média do sinal.

7) Estabeleça uma possível correspondência entre mensagem e diagrama de constelação para o QPSK apresentado na Figura 6.

Solução:



8) Um sinal binário retangular bipolar tem uma amplitude de 1 V e um tempo de duração de bit de .001 s. Considerando que o pulso se mantenha em nível alto durante todo o tempo de duração de símbolo, calcule a energia média de bit. Considere também  $P(1)=P(0)=0.5$ .

Solução:

Um bit pode ser 1 ou 0 com igual probabilidade. Se o bit for igual a 1, a energia do sinal é dada por  $A^2T=.001$ . Se o bit for 0, a energia do sinal é igual a 0. Portanto,

$$E_{média} = .001 \times P(1) + 0 \times P(0) = 0.5 \times .001 = .0005 \text{ J}$$

9) Escreva uma expressão matemática para o sinal BPSK.



Solução:

$$S_{BPSK} = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(2\pi f_0 t + d_k \times \pi),$$

onde

$$d_k = (0, 1)$$

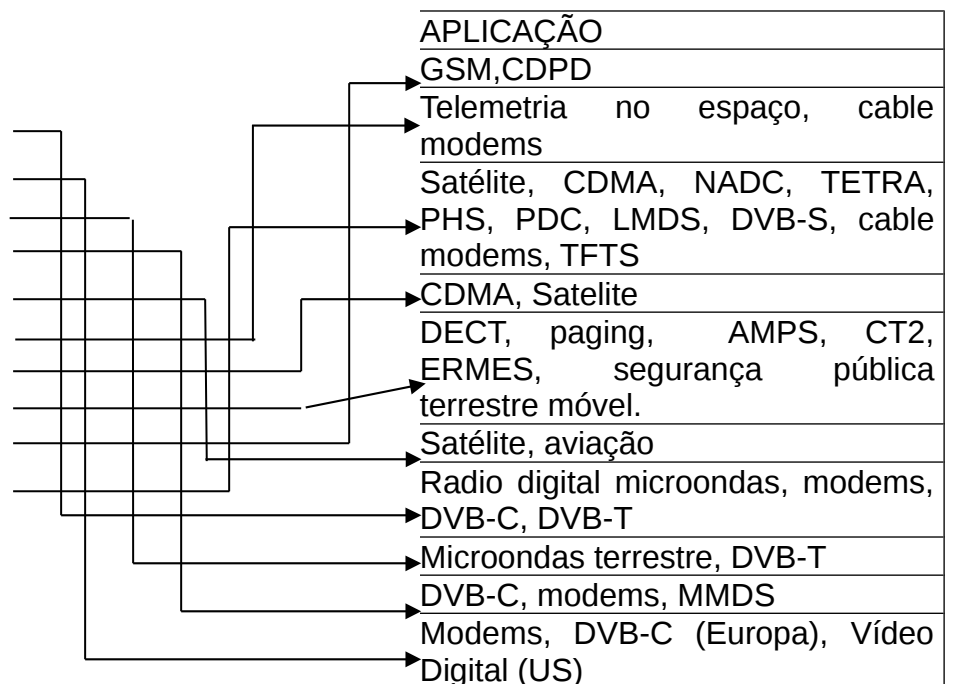
10) Associe a coluna da direita com a coluna da esquerda:

| FORMATO<br>MODULAÇÃO | DA |
|----------------------|----|
| 16QAM                |    |
| 256QAM               |    |
| 32QAM                |    |
| 64QAM                |    |
| 8PSK, OQPSK          |    |
| BPSK                 |    |
| DQPSK                |    |
| FSK, GFSK            |    |
| MSK, GMSK            |    |
| QPSK, $\pi/4$ DQPSK  |    |

| APLICAÇÃO  |
|--|
| GSM, CDPD  |
| Telemetria no espaço, cable modems                                     |
| Satélite, CDMA, NADC, TETRA, PHS, PDC, LMDS, DVB-S, cable modems, TSTS |
| CDMA, Satellite  |
| DECT, paging, AMPS, CT2, ERMES, segurança pública terrestre móvel.     |
| Satélite, aviação  |
| Radio digital microondas, modems, DVB-C, DVB-T                         |
| Microondas terrestre, DVB-T  |
| DVB-C, modems, MMDS  |
| Modems, DVB-C (Europa), Vídeo Digital (US)                             |

Solução:

| FORMATO<br>MODULAÇÃO | DA |
|----------------------|----|
| 16QAM                |    |
| 256QAM               |    |
| 32QAM                |    |
| 64QAM                |    |
| 8PSK, OQPSK          |    |
| BPSK                 |    |
| DQPSK                |    |
| FSK, GFSK            |    |
| MSK, GMSK            |    |
| QPSK, $\pi/4$ DQPSK  |    |



11) Qual a taxa de transmissão de um sistema 256QAM cuja taxa de bits é de 10 Mbit/s?

Solução:

Em 256QAM, cada símbolo usa 8 bits ( $2^8=256$ ). Logo, a taxa de transmissão é de

$$\frac{10 \times 10^6}{8} = 1,25 \text{ Mbaud.}$$

12) Calcule a eficiência espectral de um sistema QPSK que transmite a uma taxa de símbolos de 100 kbaud, supondo a utilização da largura de banda mínima de Nyquist.

Solução:

$$R = 2 \times 100 = 200 \text{ kbit/s}$$

$$W = 100 \text{ KHz}$$

$$\text{Logo, Eficiência espectral} = \frac{R}{W} = \frac{200}{100} = 2 \text{ bits/s/Hz.}$$

13) O que significa eficiência em potência?

Solução:

Se traduz como a diminuição, em dB, da relação sinal ruído<sup>19</sup> na entrada do receptor para que não se altere a taxa de erro<sup>20</sup>. É um parâmetro relativo, comparando o desempenho de dois ou mais sistemas.

A eficiência em potência mede a habilidade de uma técnica de modulação em preservar a fidelidade da mensagem digital em baixos níveis de potência.

A eficiência em potência pode ser encarada também como uma medida de quanto a potência do sinal deve ser aumentada para atingir um valor particular de BER, para um dado esquema de modulação.

14) Complete as lacunas

a) Quando referido ao processo de demodulação<sup>21</sup>, o uso do termo coerência, ou demodulação coerente significa a habilidade do sistema realizar uma decisão de

<sup>19</sup> Em sistemas digitais, costuma-se caracterizar a relação sinal ruído pela relação entre a energia por bit do sinal e a densidade espectral de potência do ruído ( $E_b/N_0$ )

<sup>20</sup> Taxa de erro, em um sistema digital, é o principal parâmetro para avaliação da qualidade do sistema. A taxa de erro de símbolos pode ser definida como a relação entre a quantidade de símbolos erradamente identificados no receptor pela quantidade total de símbolos enviados, para um dado intervalo de tempo de observação. Em relação ao fluxo binário, um símbolo equivale a um bit, e falamos então em taxa de erro de bits, em inglês BER (Bit Error Rate).

<sup>21</sup> O processo de demodulação corresponde ao procedimento empregado para recuperar a sequência de símbolos que foi enviada pelo transmissor, através da modulação.

demodulação<sup>22</sup> em que a fase do sinal recebido é importante no processo.

b) A informação “adicional” que a fase proporciona resulta em um melhor desempenho em relação à taxa de erro de bit ou de símbolo.

c) Para realizar a demodulação coerente, é necessário informação precisa da fase da portadora sendo recebida.

d) Num sistema coerente, o receptor é capaz de reconstituir com precisão uma base de temporização que define instantes significativos do processo, como por exemplo o instante preciso em que se inicia um símbolo modulado.

e) A não-coerência, ou incoerência, significa que a informação da fase da portadora não é fundamental ao processo de modulação/demodulação.

-

f) De um modo geral, a recepção não-coerente é mais simples de ser implementada que a recepção coerente.

15) Escolha as alternativas corretas:

a) **Quando descrevemos um vetor pelas suas coordenadas, o sistema de coordenadas utilizado é caracterizado por um conjunto de vetores unitários, que constituem a base do sistema de coordenadas. No sistema cartesiano (coordenadas retangulares) esses vetores básicos são mutuamente perpendiculares, ou seja, não existe componente de um sobre o outro.**

b) Da mesma forma que para vetores, define-se a perpendicularidade entre duas funções, dizendo que elas são ortogonais quando existe componente de uma sobre a outra.

c) **Nos esquemas de modulação em fase costuma-se empregar duas funções**

<sup>22</sup> Decisão de demodulação é o processo através do qual o receptor decide, ou tenta identificar, qual símbolo foi enviado em um certo instante, a partir do sinal recebido e empregando um determinado processo de demodulação. Nessa decisão existe sempre uma probabilidade de erro associada.

ortogonais que são utilizadas como funções base. Essas funções são o seno e cosseno de mesma frequência.

d) Em uma analogia vetor-sinal, os sinais relativos a modulações em fase podem ser escritos como um vetor soma de dois sinais, ocorrendo em dois canais, chamados I e Q. Podemos pensar em I e Q como as projeções do sinal nos eixos x e y (horizontal e vertical).

e) Em relação às componentes do sinal sobre os eixos I e Q temos que:

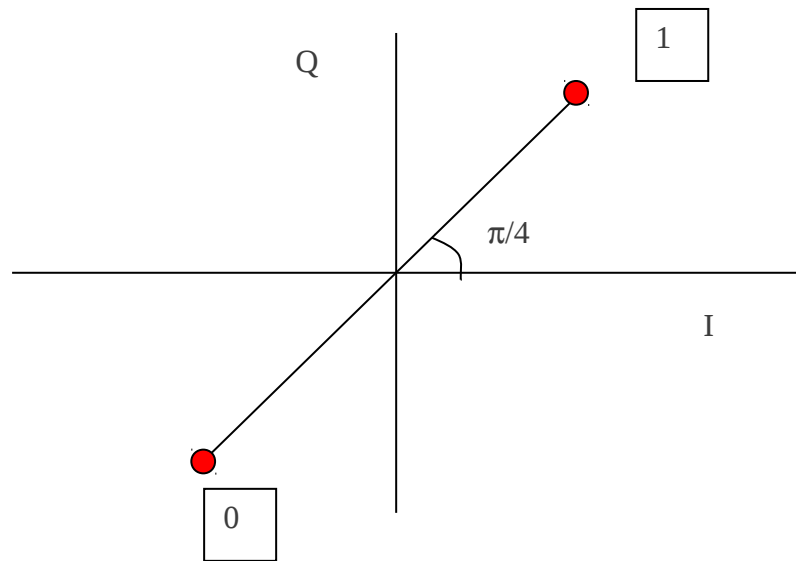
$$\text{Amplitude do sinal } A = \sqrt{s_{11}^2 + s_{22}^2}$$

$$\text{Fase do sinal } \Phi = \text{atn} \left( \frac{s_{11}}{s_{12}} \right)$$

16) Uma modulação BPSK pode ser representada matematicamente pela expressão

$s(t) = A \sin(2\pi f_0 t + d_k \times \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{4})$ , onde  $d_k$  é o fluxo de dados de entrada, representando as amplitude de um sinal aleatório retangular bipolar para o qual amplitude -1 significa bit 1, e amplitude 1 significa bit 0. Desenhe um diagrama de constelação para essa modulação, designando os valores dos bits a cada ponto do diagrama.

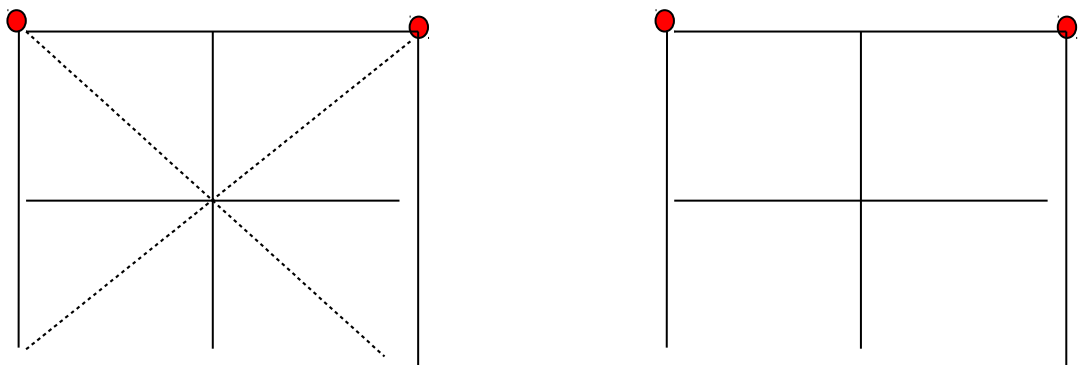
Solução:



17) Discuta as diferenças entre um diagrama de constelação para o QPSK e o OQPSK.

Solução:

No OQPSK, as transições dos canais I e Q nunca ocorrem ao mesmo tempo, pois os sinais de banda básica, isto é,  $d_I$  e  $d_Q$  estão defasados de  $\pi/4$ . Desta forma, é impossível ocorrerem transições de  $180^\circ$ , como no QPSK. Assim, para passar de  $90^\circ$  a  $-90^\circ$ , o sinal OQPSK necessita de duas transições de  $90^\circ$ . Desta forma, no diagrama de constelação, as diagonais são eliminadas, mostrando que transições de  $180^\circ$  não são permitidas no OQPSK, conforme abaixo ilustrado:





18) Explique com mais detalhes o gráfico da **Figura IV.1.13**. Comente a eficiência espectral da modulação.

Solução: O gráfico referido representa o espectro de densidade de potência de um sinal digital modulado QPSK. A escala vertical está graduada em decibéis (dB), que é uma medida logarítmica relativa, e a escala horizontal esta graduada em Hz normalizada a  $(f-f_c)T_s$ . Assim, o ponto de 0 dB corresponde ao valor máximo do espectro, na frequência de  $(f-f_c)T_s=0$ , ou seja,  $f=f_c$  (frequência da portadora). A função

que descreve o espectro tem a forma de uma função  $\text{sinc}(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}$ , daí o

aspecto em lóbulos com pontos periódicos de nulos em  $\pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ . Observe que o lóbulo principal tem uma largura de  $f_1-f_2$ , sendo  $(f_1-f_c)T_s=1$  e  $(f_2-f_c)T_s=-1$ , e portanto  $f_1-f_2=2/T_s$ .  $1/T_s$  é a taxa de símbolos, que é igual a  $R/2$ . Assim, se  $R=10$  kbit/s,  $f_1-f_2=R=10$  KHz.

Se transmitido com essa largura de banda, a eficiência espectral do QPSK seria de 1 bit/s/Hz. A utilização de pulsos adequadamente formatados, como o RRC, permite atingir eficiências até 2 bit/s/Hz, mantendo a ISI em patamares razoáveis.

19) Escreva a expressão matemática de um sinal BFSK cuja frequência de portadora é 1 MHz e o desvio de frequência é igual à taxa de transmissão  $R=100$  kbit/s.

Solução:

$$s_{\text{BFSK}}(t) = \frac{1}{2} \cos(2\pi f_h t + \phi_h) + \frac{1}{2} \cos(2\pi f_l t + \phi_l) +$$

$$\frac{1}{2} A_h' \cos(2\pi f_h t + \phi_h) + \frac{1}{2} A_l' \cos(2\pi f_l t + \phi_l) \quad \text{Assim,}$$

$$f_h = f_c + \Delta f/2 \quad \text{e} \quad f_l = f_c - \Delta f/2$$

72

$$f_h = 10^6 + 5 \times 10^4 = 1,05 \times 10^6 \text{ Hz}$$

$$f_l = 10^6 - 5 \times 10^4 = 0,95 \times 10^6 \text{ Hz}$$