



SEL 360 e 616

Princípios de Comunicação

Tania Regina Tronco
trtronco@gmail.com



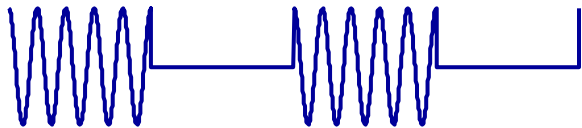


Modulação digital binária

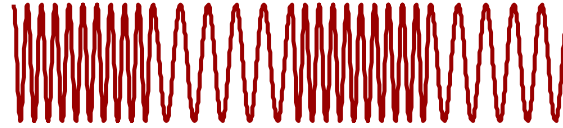
- Transmissão dos dígitos binários através de um canal passa banda
- Um trem de pulsos modula (chaveia) algum parâmetro de uma portadora senoidal.



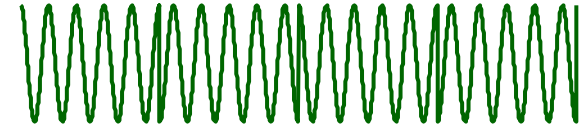
amplitude



frequência



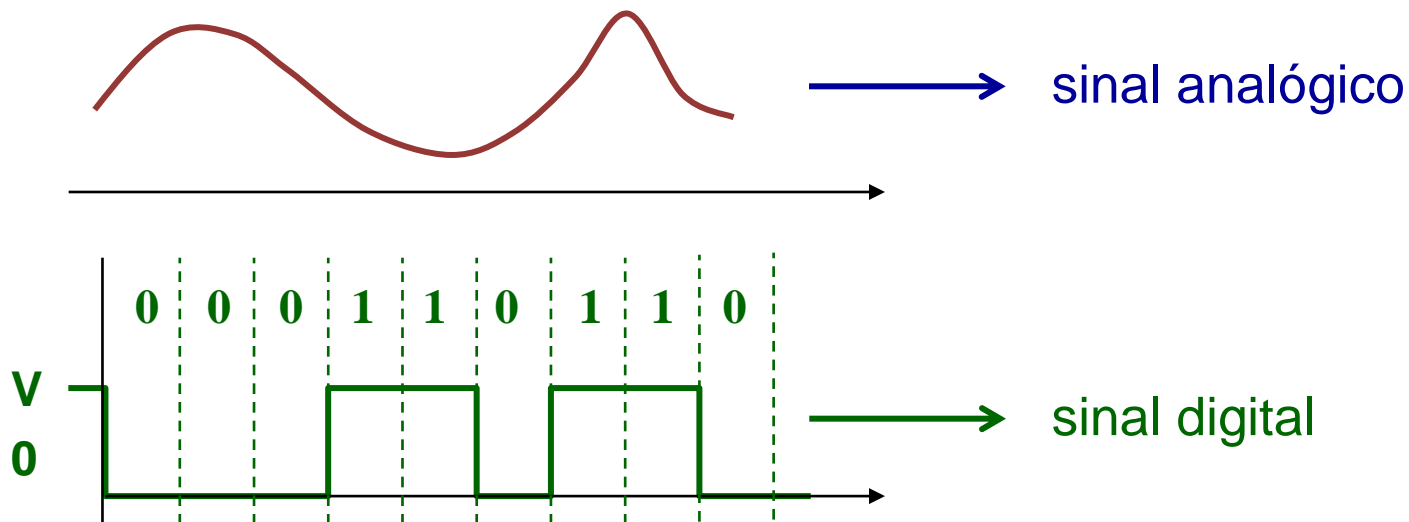
fase





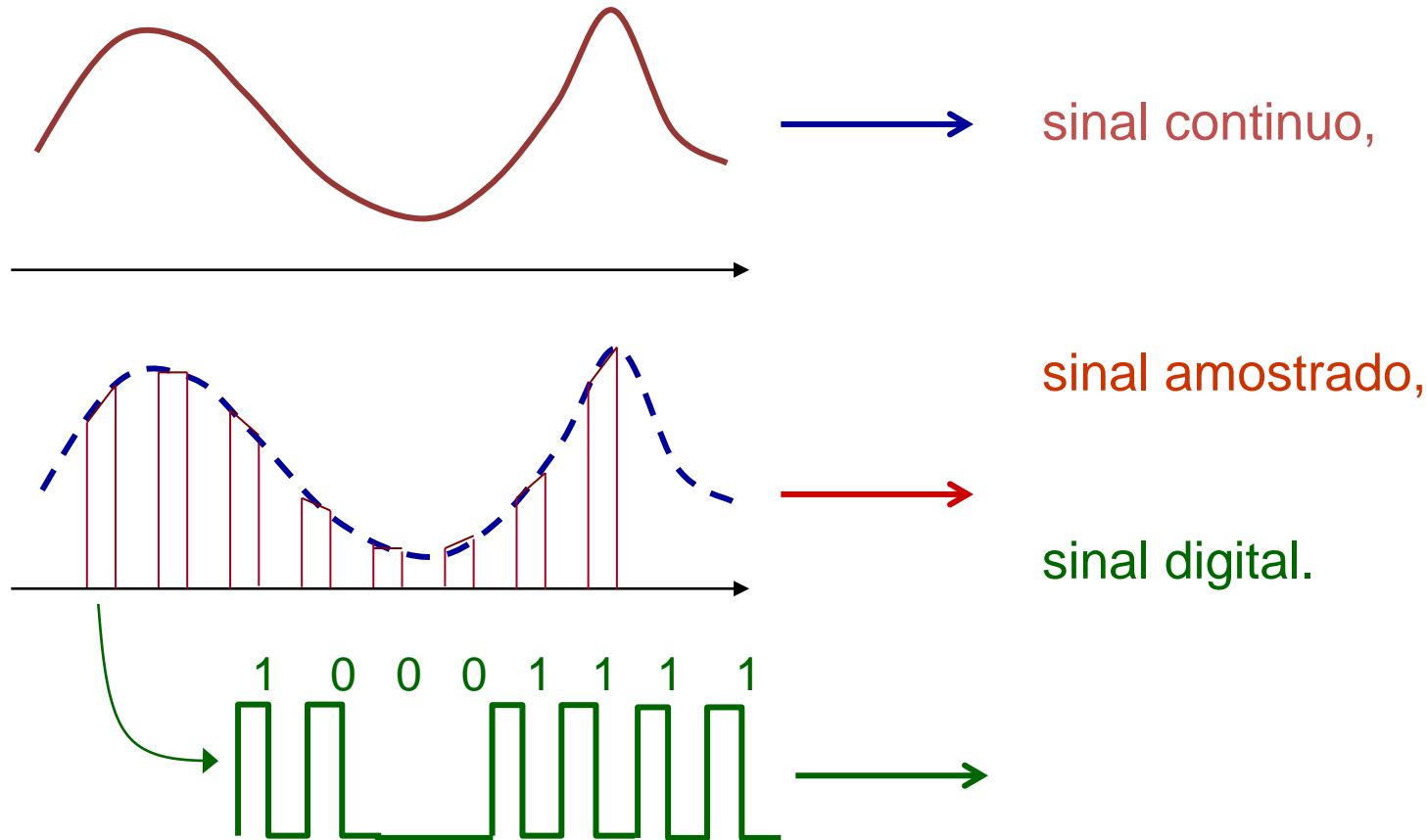
Informação na forma digital

- ❖ Em sistemas de comunicações, podemos dividir o sinal de informação em dois tipos:
 - **sinal analógico**, sinal cuja amplitude é contínua, ela é um número real,
 - **sinal digital**, a amplitude do sinal apresenta somente dois valores 1 (+V) ou 0 (0 ou -V).





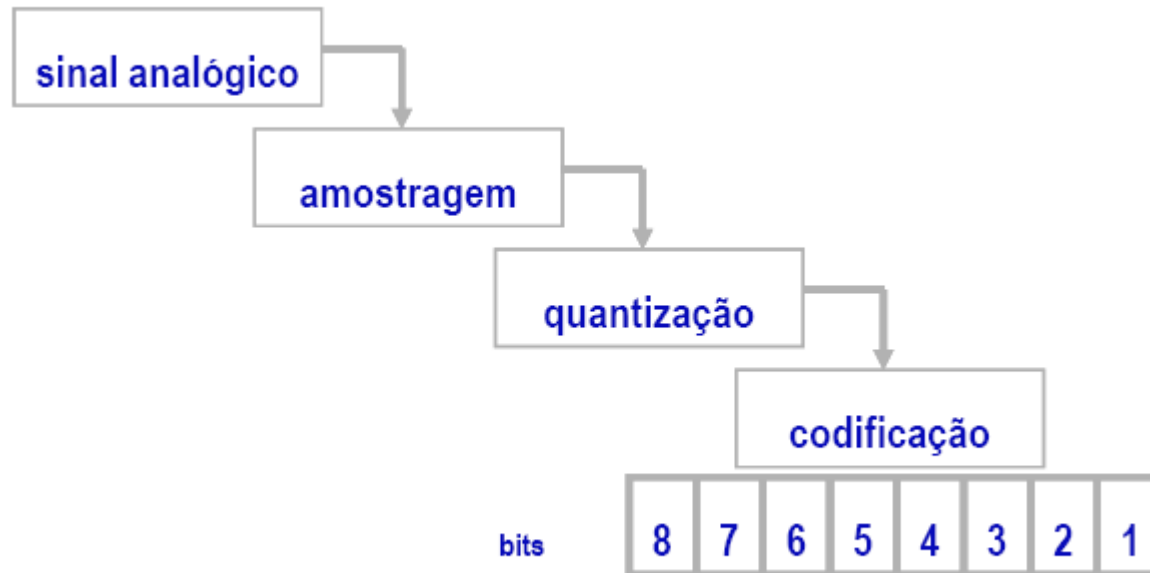
Informação na forma digital



- nos sistemas PCM cada pulso é digitalizado por uma palavra código de 8 bits,
- em áudio, palavras de 16 bits (12 + 4).

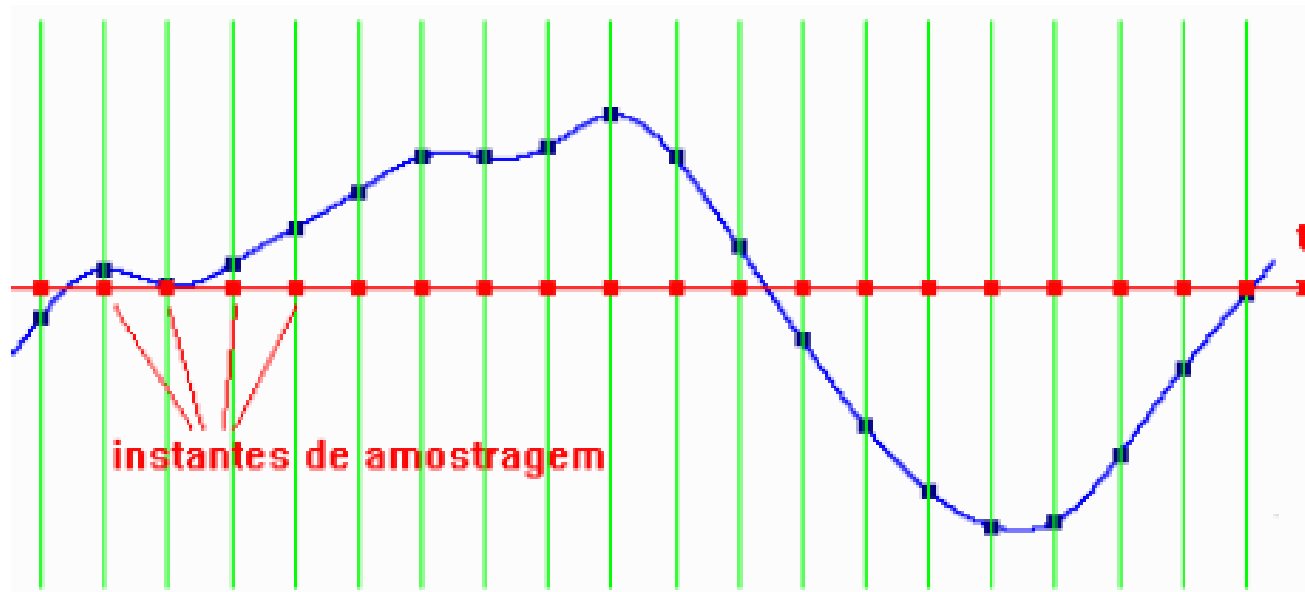


Passos da Digitalização de Sinais



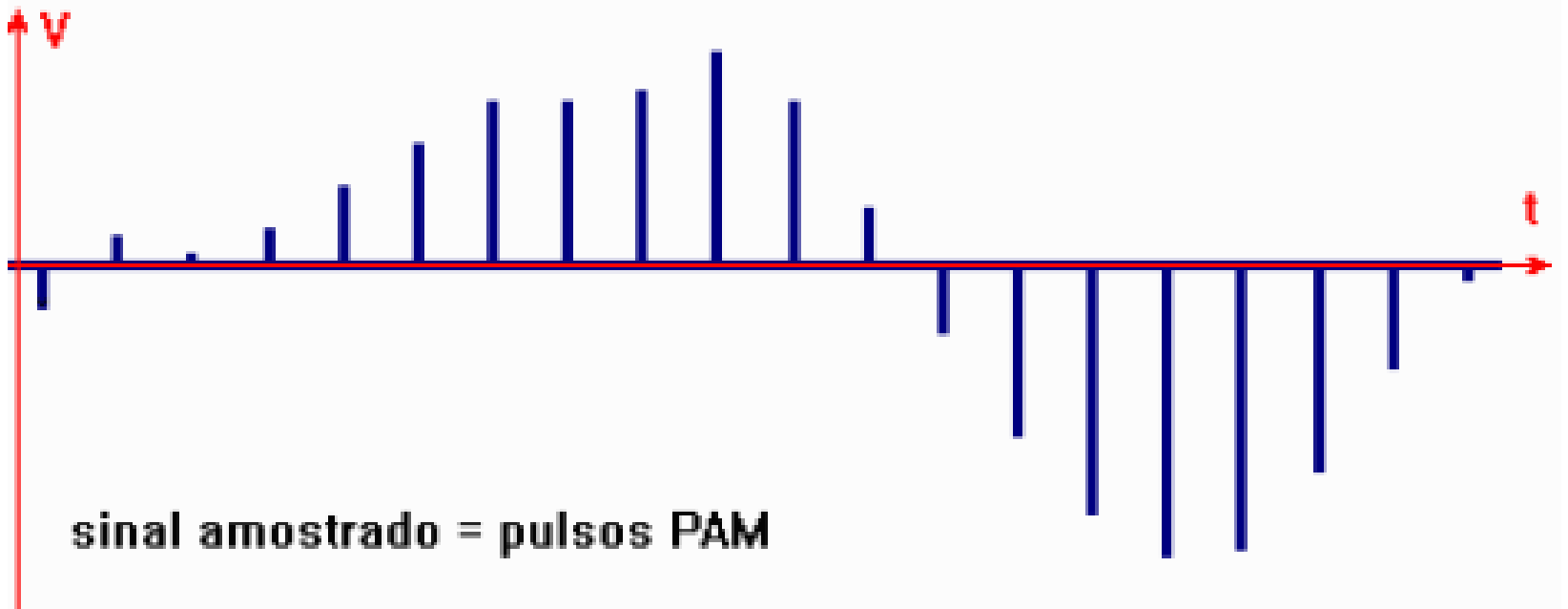


Amostragem





Amostragem



PAM: *Pulse Amplitude Modulation*



Teorema de Nyquist

- Taxa de amostragem deve ser pelo menos 2 vezes maior que a frequência que se deseja registrar.
- Caso o teorema não seja obedecido há distorção do sinal.



Exemplos

- Sinal de voz: freqüência máxima 4 kHz
 - A taxa de amostragem deve ser pelo menos 8 kHz para que todas as freqüências do sinal de voz possam ser recuperadas;
 - Tempo de amostragem = $T_a = 1 / 8000 \text{ Hz} = 125 \mu\text{s}$ ($\mu\text{s} = 10^{-6}$ segundos)
 - A chave eletrônica retira do sinal de voz uma amostra a cada 125 μs .
- CD: ouvimos sons de 20 Hz a 20 kHz
 - A taxa de amostragem deve ser pelo menos 40 kHz para que todas as freqüências sejam registradas.



Amostragem por Trem de Pulsos

$p(t)$: sampling function

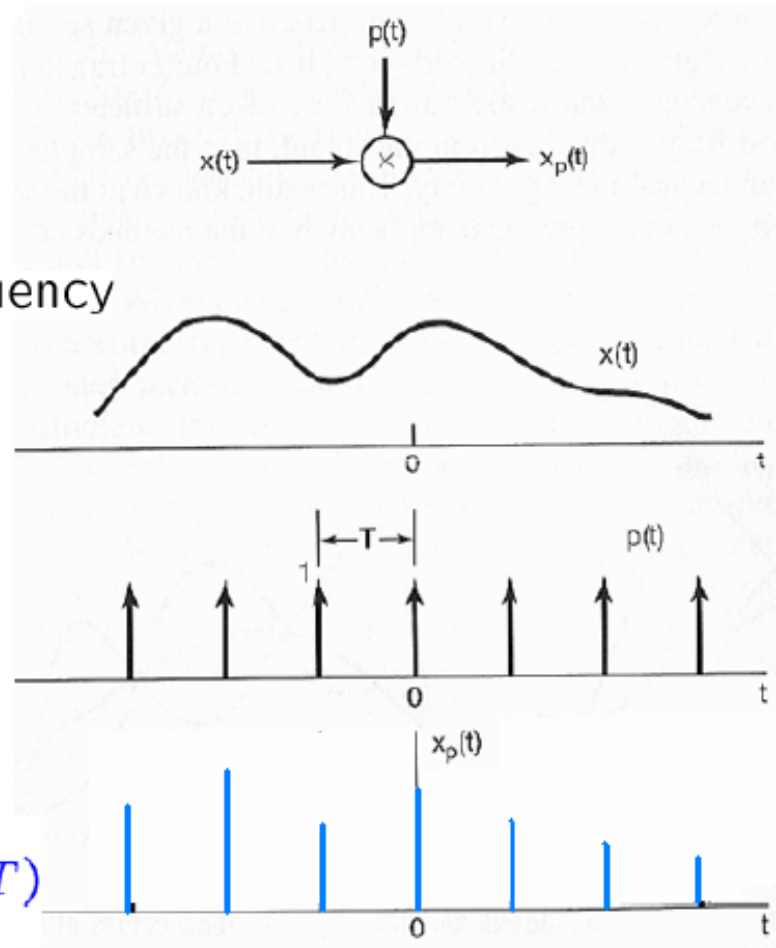
T : sampling period

$w_s = \frac{2\pi}{T}$: sampling frequency

$$\Rightarrow x_p(t) = x(t) p(t)$$

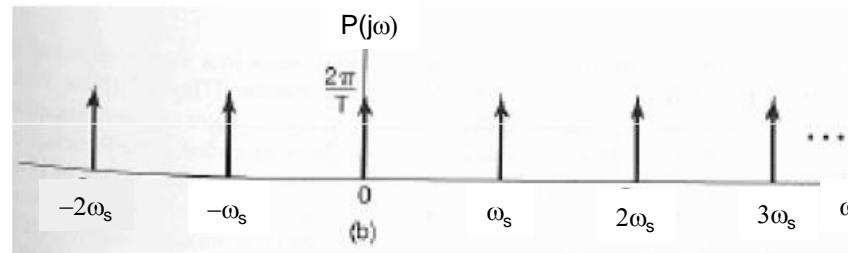
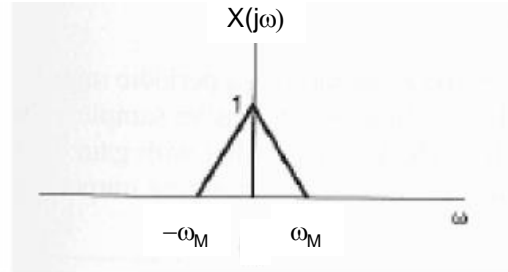
$$p(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT)$$

$$x_p(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(nT) \delta(t - nT)$$

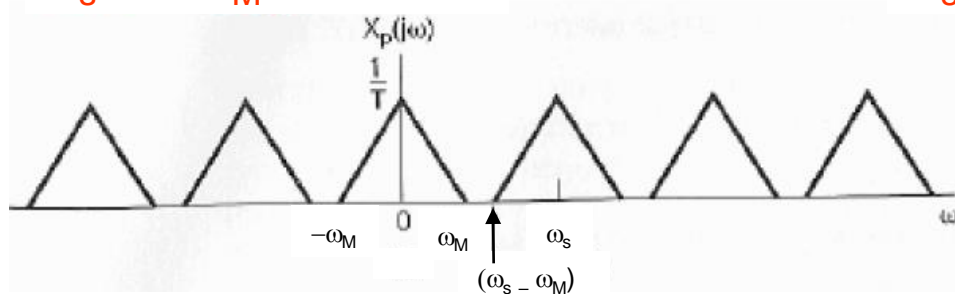




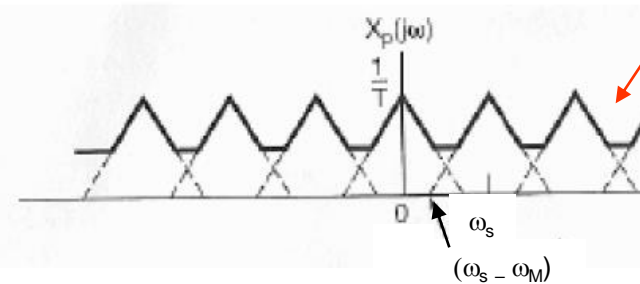
Amostragem na Freqüência



$\omega_s > 2 \omega_M$



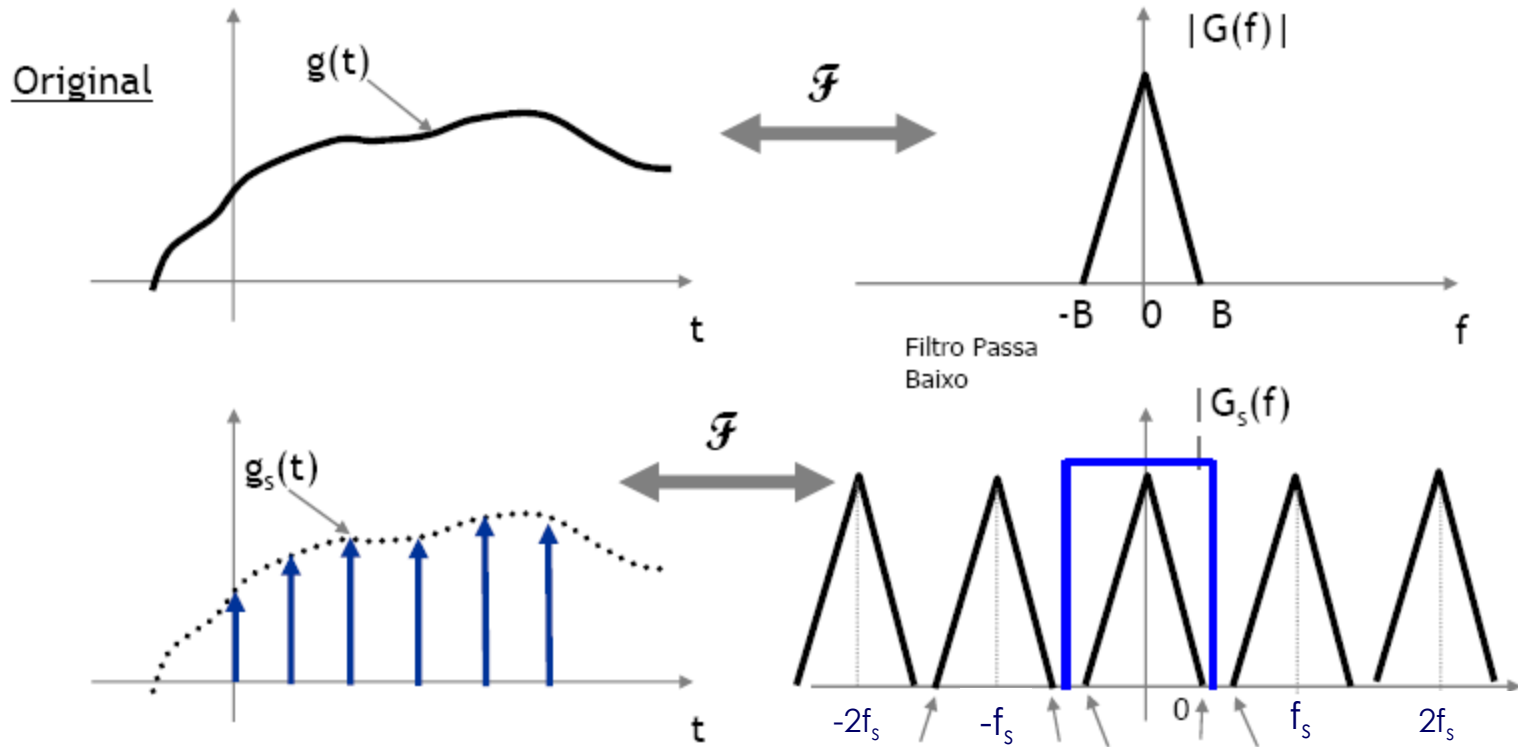
$\omega_s < 2 \omega_M$



Fenômeno de Aliasing

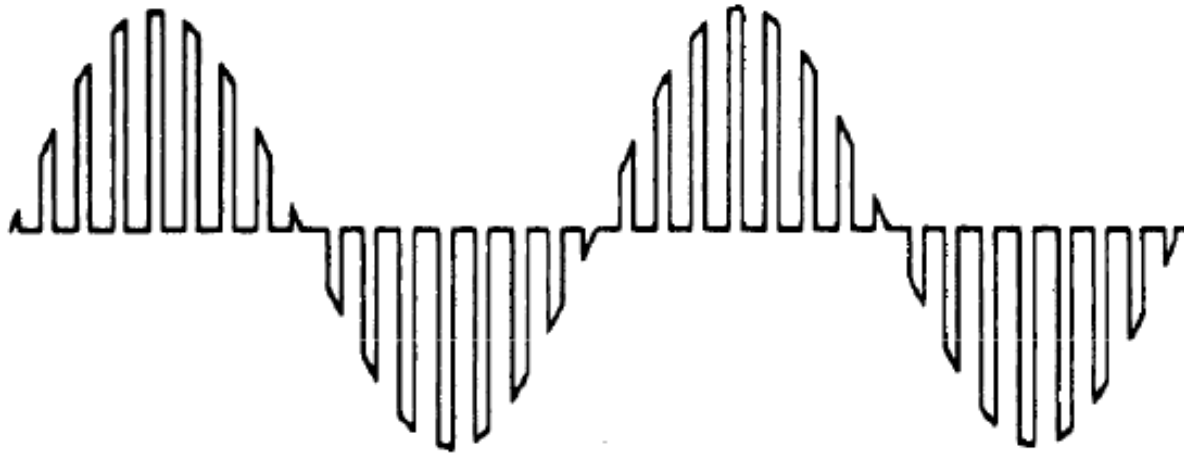


Amostragem





PAM – Pulse Amplitude Modulation



Sinal resultante da amostragem de um sinal senoidal



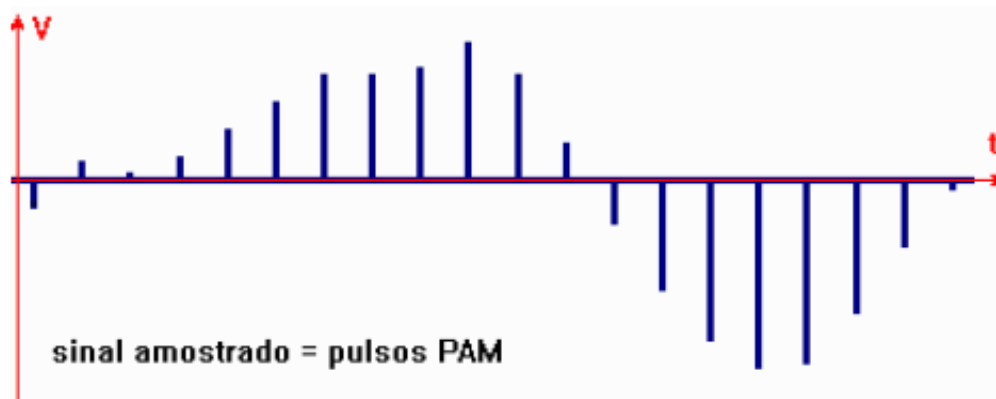
Teorema de Nyquist

- Utilizando o teorema de Nyquist pode-se escolher a melhor frequência de amostragem de forma a economizar banda pois para que o sinal possa ser reconstituído basta atender ao teorema.



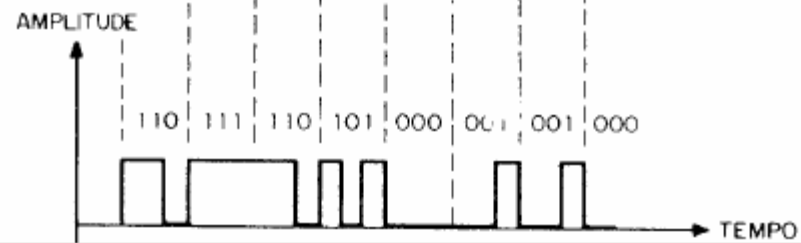
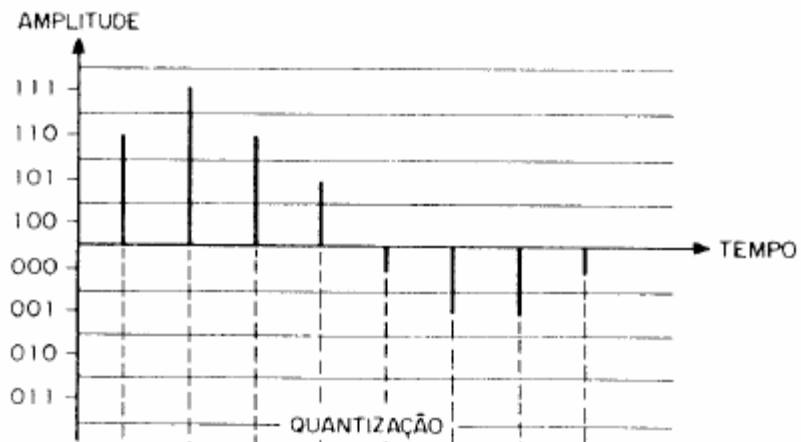
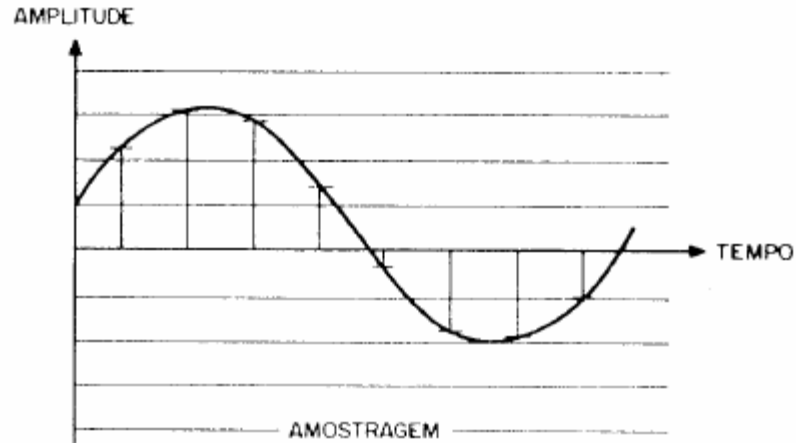
Quantização

- Representação dos valores amostrados em uma quantidade finita de bits;
- Quanto maior a quantidade de bits mais precisa a representação do sinal.



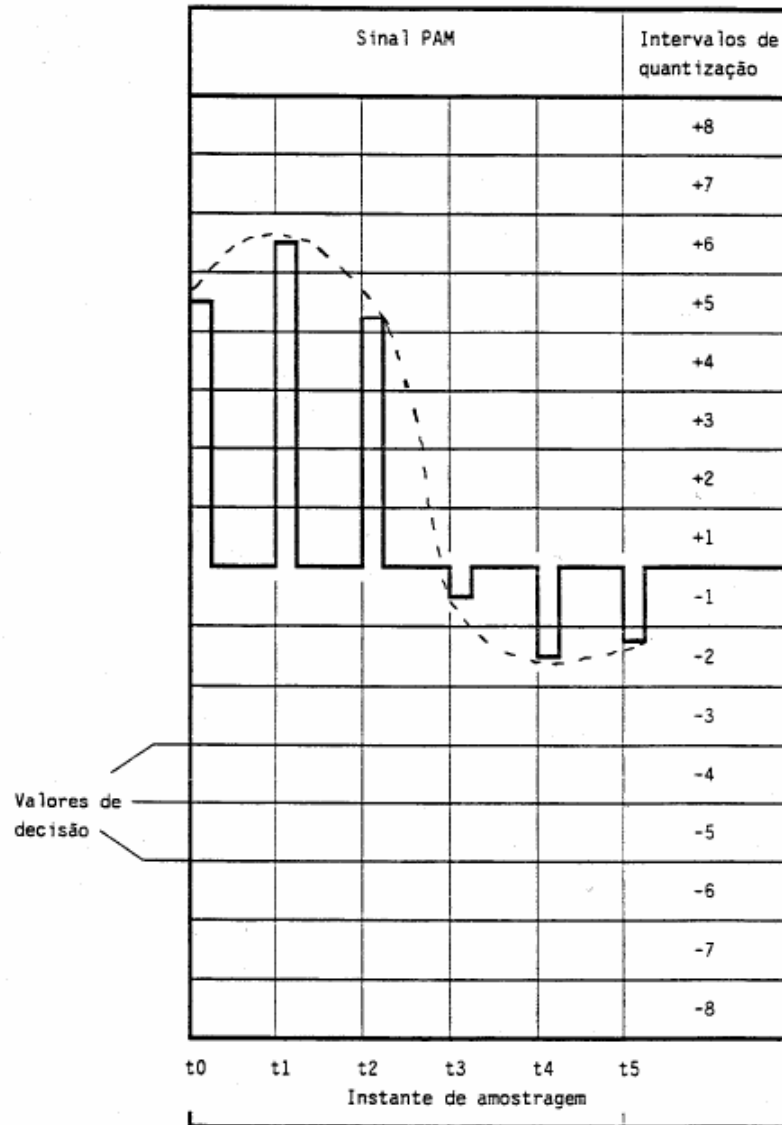


Codificação





Exemplo de Quantização Linear com 16 valores (4 bits)





Quantização

- Utilizando 8 bits é possível representar 256 valores (0-255).
- Supondo que os valores dos pulsos variem de 0 a 255V.
- Digamos que um pulso tenha valor de 147,39V.
- Ele terá de ser quantizado como 147V ou 148V pois não existe valor intermediário
 - $100100112 = 147_{10}$
 - $100101002 = 148_{10}$



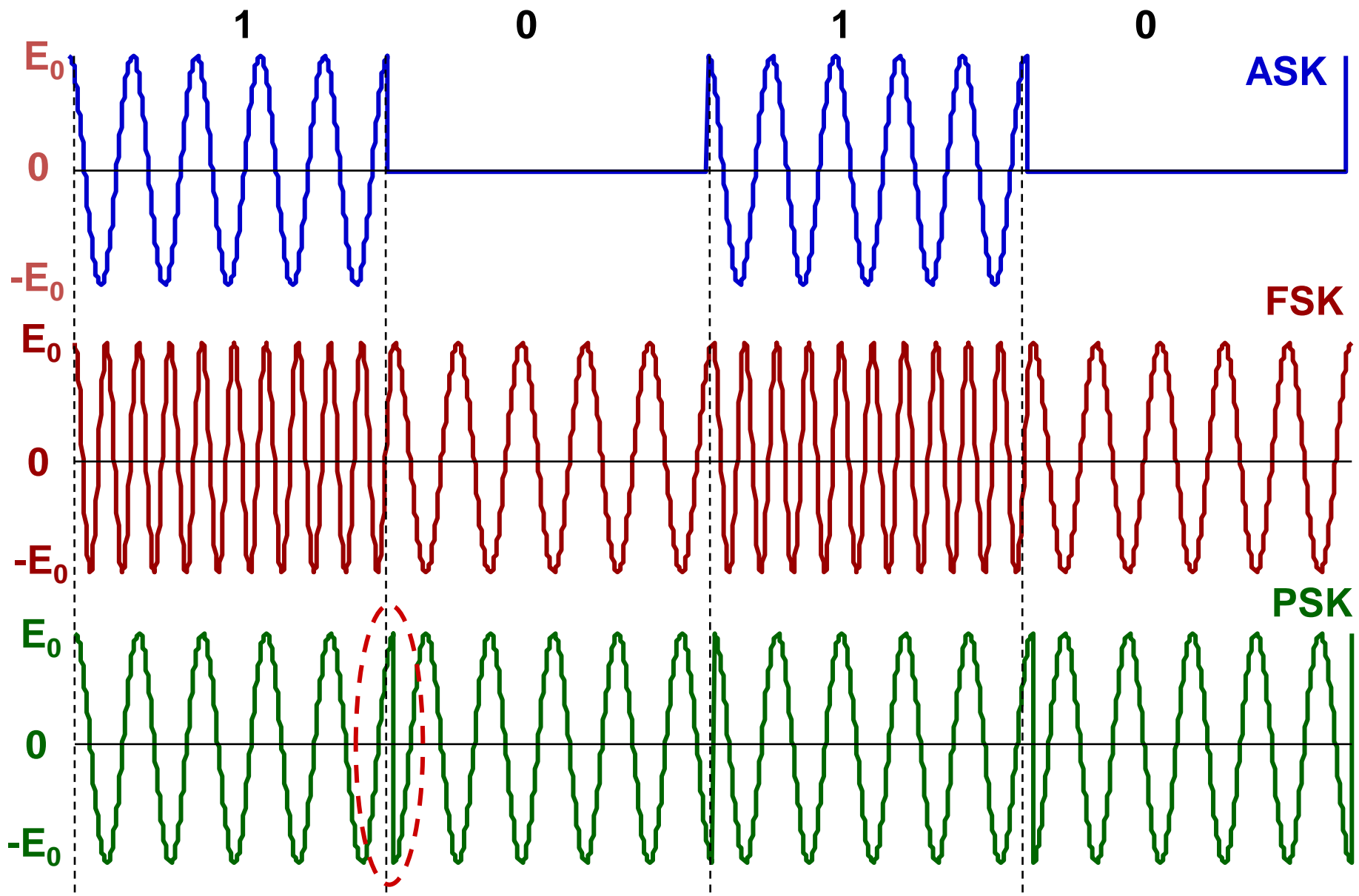
Erro de quantização

- Se um pulso tem valor de 147,39V, ele terá de ser quantizado como 147V ou 148V pois não existe valor intermediário.
- Ocorrerá então um erro de -0,39V ou +0,61V chamado erro de quantização.



Informação na forma digital

- ❖ o processo de modulação digital envolve o chaveamento de algum parâmetro de uma portadora senoidal:
 - amplitude, frequência ou fase.
- ❖ do mesmo modo que na transmissão analógica tem-se três tipos básicos de modulação digital, identificadas pelas siglas: ASK, FSK e PSK.
 - **ASK**: modulação por deslocamento (chaveamento) de amplitude,
 - **FSK**: modulação por deslocamento (chaveamento) da frequência,
 - **PSK**: modulação por deslocamento (chaveamento) da fase.
- ❖ estes tipos básicos e algumas variantes serão estudados a seguir.



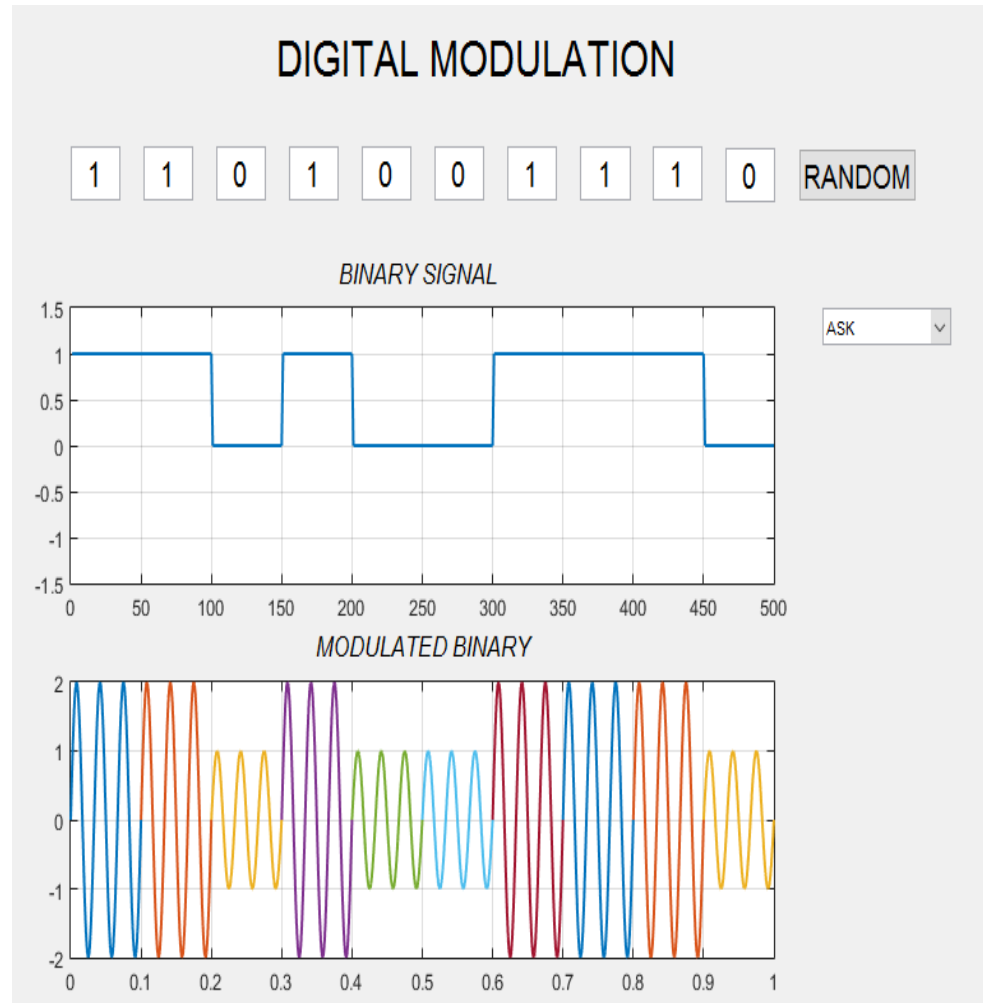


Modulação digital Amplitude-Shift Keying (ASK) (1)

- Transmissão de dados através de canais de comunicação passa-banda.
- **ASK** - modulação por deslocamento de amplitude:
 - sinal digital “1”: transmite-se a portadora senoidal
 - sinal digital “0”: tensão nula.
 - a largura de faixa do canal deve ser pelo menos igual a f_b , onde f_b é a taxa de bits do sistema.
 - desvantagem: 50% da energia do sinal é gasta para transmitir a portadora.



Amplitude-Shift Keying (ASK) (2)

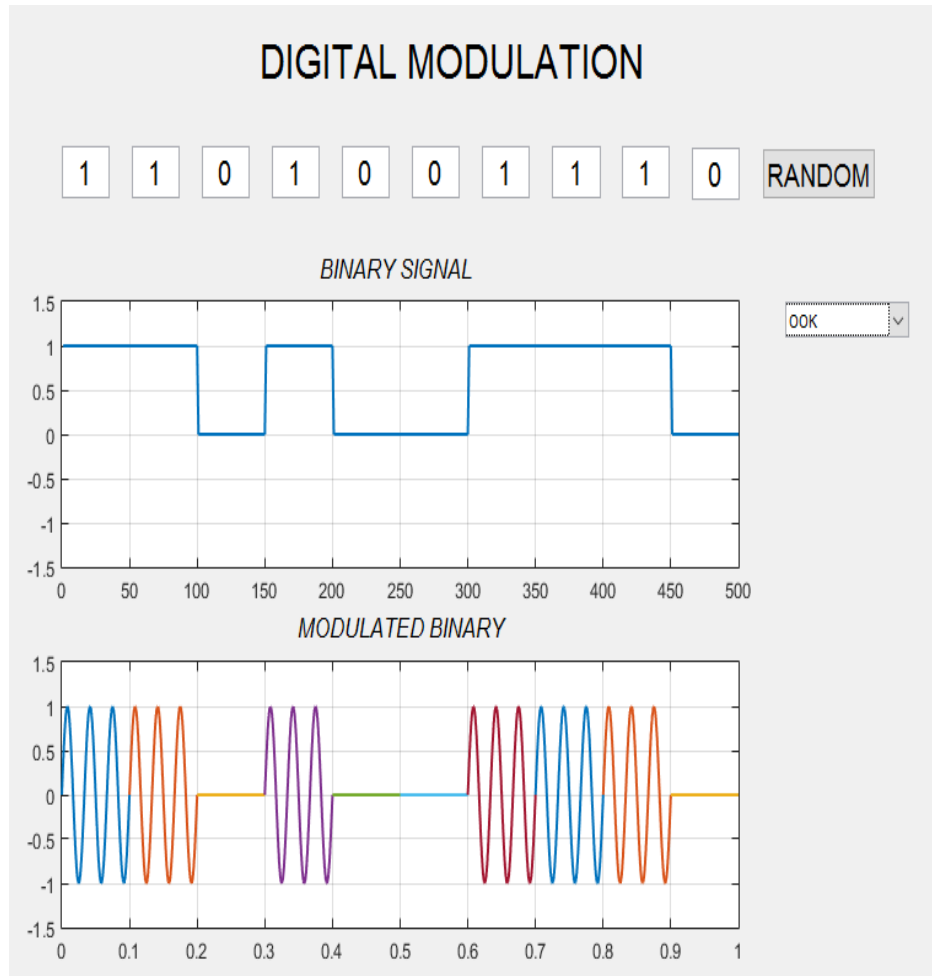


www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/14328-digital-modulation



Amplitude-Shift Keying (ASK) (3)

On-Off Keying (OOK)

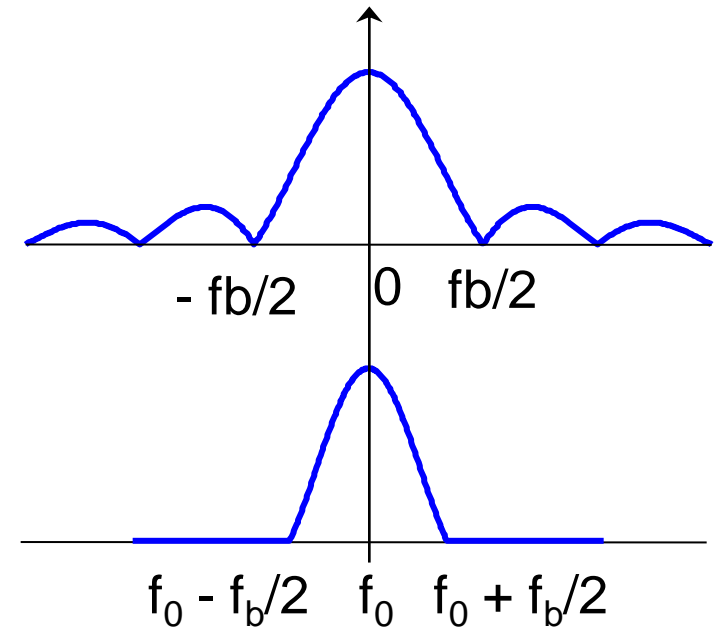
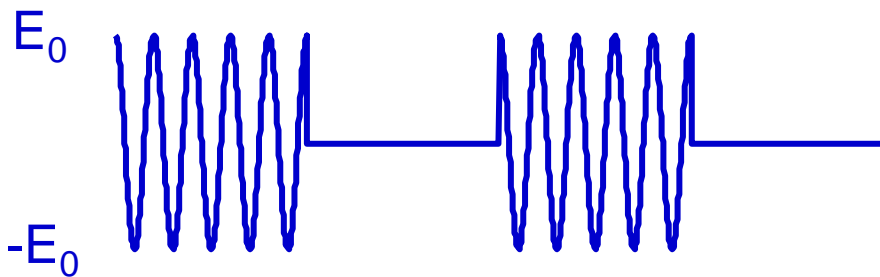


www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/14328-digital-modulation



Modulação por chaveamento de amplitude (ASK)

- ❖ modula a amplitude da portadora pelo sinal binário na banda básica:
 - amplitudes: $E_0 \rightarrow$ bit 1 - ou nula \rightarrow bit 0,
 - corresponde à modulação AM com índice de modulação 100%,
- ❖ geração: moduladores AM ou chaveamento do portadora de RF.



- ❖ largura de faixa mínima de transmissão
 - $Bw_{ASK} = 2B_{MIN} = f_b$ em que $B_{MIN} = f_b/2$



ASK

❖ Demodulação:

- detectores de envoltória ou demodulação coerente.

❖ Transmissor:

- similar aos usados em AMDSB.

❖ Nomenclatura:

- ASK → transmissão binária,
- OOK → *on-off keying*,
- MASK → transmissão de M símbolos



ASK

❖ Inconvenientes da modulação ASK:

- 50% da energia do sinal é gasta na transmissão da portadora,
- o detector de envoltória apresenta baixa relação sinal-ruído,
- modulação mais sensível aos efeitos de dispositivos não lineares e ao ruído.

❖ Tem-se sistemas mais eficientes:

- AMDSB-SC onde não há desperdício da portadora (semelhante ao PSK),
- a detecção coerente melhora a SNR.

❖ Aplicação:

- apesar dos inconvenientes ela é utilizada em sistemas **QAM** nos quais amplitude e fase são combinadas para transmitir a informação.



Espectro do sinal modulado

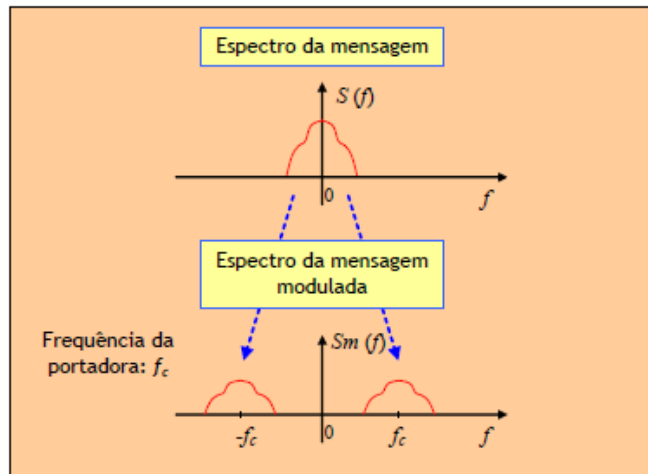
É sabido que se tivermos uma sinusóide $\cos \omega_m t$ e a multiplicarmos por outra, $\cos \omega_c t$, obtemos

$$\cos \omega_m t \cos \omega_c t = \frac{1}{2} \cos(\omega_c + \omega_m)t + \frac{1}{2} \cos(\omega_c - \omega_m)t$$

Banda lateral superior

Banda lateral inferior

Assim, ao multiplicarmos qualquer forma de onda (uma mensagem, por exemplo) por uma sinusóide (uma portadora), a forma de onda resultante tem um espectro que é igual ao espectro bilateral da mensagem mas centrado na frequência da portadora e com uma cópia centrada na frequência negativa dessa portadora:



Note-se a diminuição da amplitude do espectro da modulação.

ASK (Amplitude Shift-Keying), é a técnica de modulação mais simples entre as utilizadas para modular sinais discretos (digitais). Consiste na alteração da amplitude da onda portadora em função do sinal digital a ser transmitido.

A modulação em amplitude translada o espectro de frequência baixa do sinal binário, para uma frequência alta como é a da onda portadora.

A amplitude da portadora é comutada entre dois valores, usualmente ligado e desligado (na modulação em amplitude multinível podem ser utilizados mais valores).

A onda resultante consiste então em pulsos de rádio frequência (RF), que representam o sinal binário "1" e espaços representando o dígito binário "0" (supressão da portadora).

Esta técnica é equivalente à modulação AM para sinais contínuos com um sinal modulante na forma de um pulso retangular. O preço desta simplicidade é a excessiva largura de faixa da transmissão.

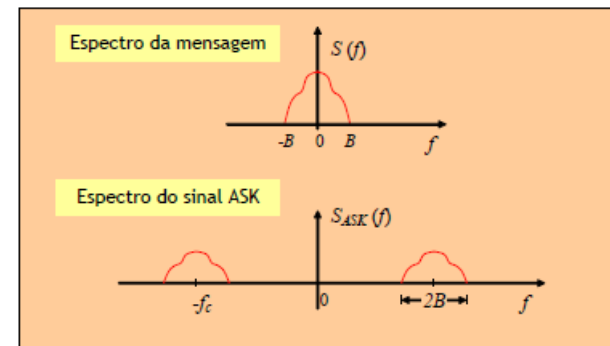
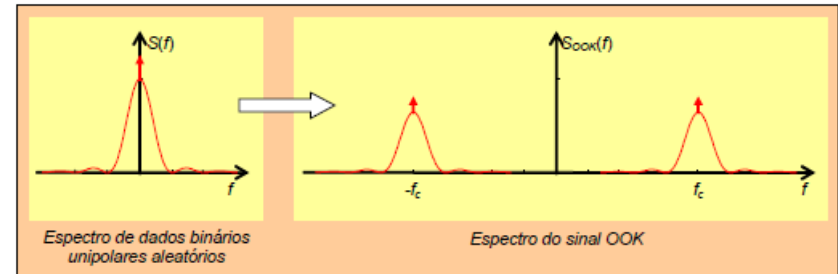
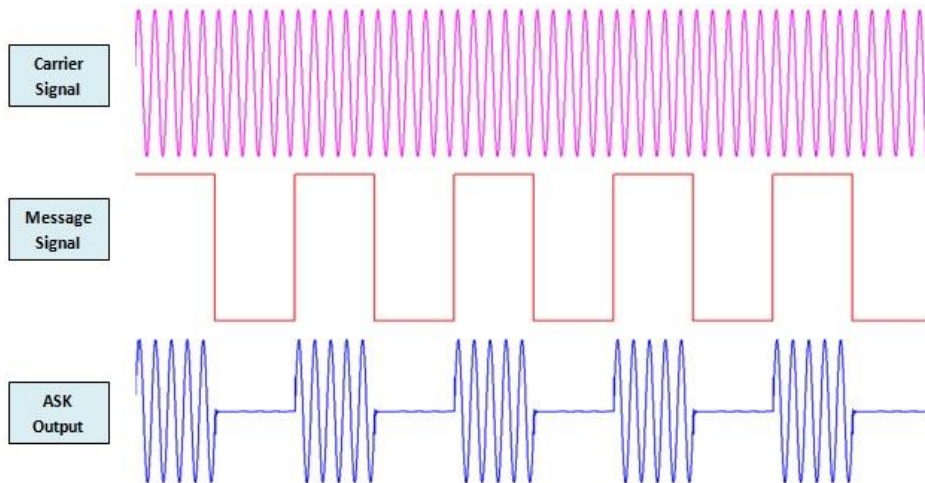
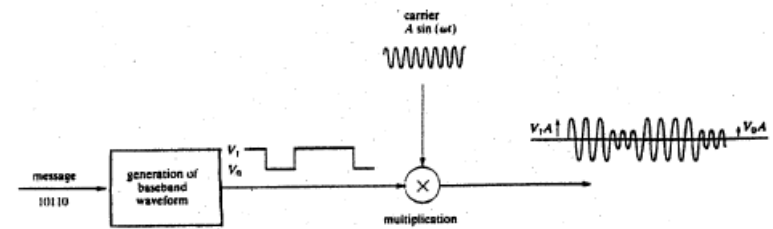
A técnica de modulação ASK também representa perda de potência relativa a onda portadora.

A largura de faixa da transmissão pode ser reduzida se os pulsos empregados forem formatados (limitados em banda) antes da modulação.



Espectro de ASK

Geração de ASK: multiplicação de uma portadora por uma forma de onda em banda-base.



A largura de banda de sinais ASK é o dobro da largura de banda do sinal em banda-base.



Exercício 1

- **Determine a largura de banda de um sinal ASK que foi amostrado (taxa de amostragem=Nyquist) à taxa de 4KHz .**
- **Desenhe o espectro do sinal modulado se a portadora tem frequência de 2 GHz.**

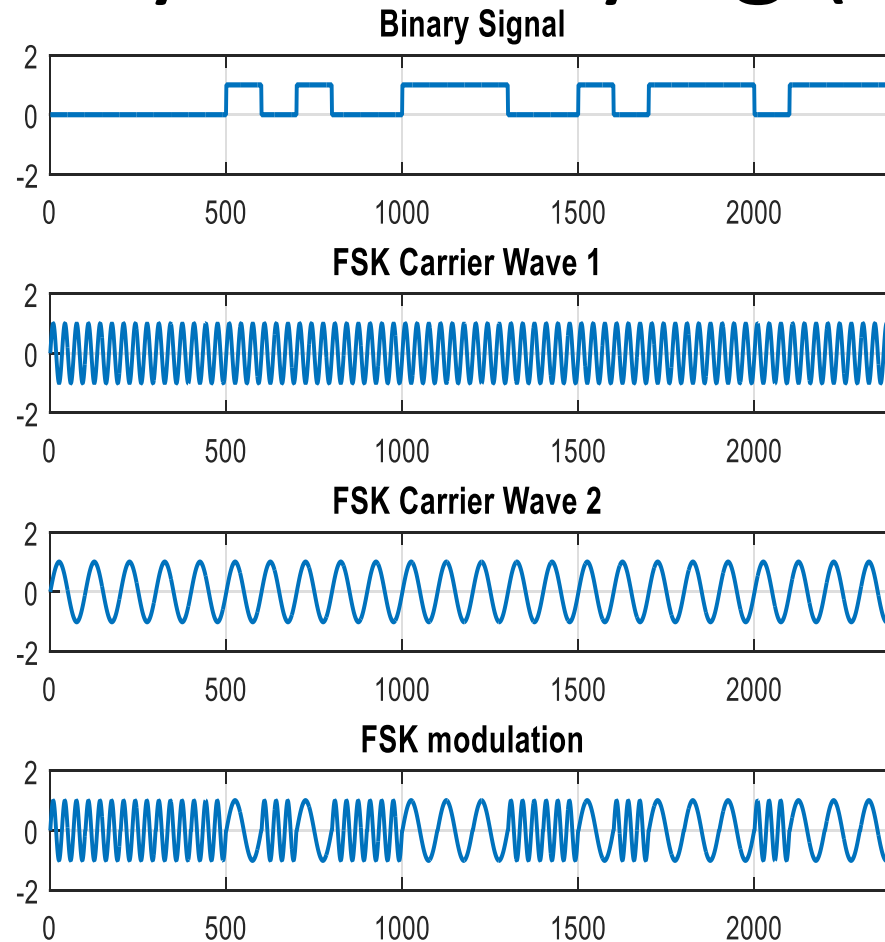


Modulação digital Frequency-Shift Keying (FSK) (1)

- **FSK** - modulação por deslocamento de frequência:
 - Os bits “1” e “0” são representados por 2 sinais senoidais de mesma amplitude e frequências (f_1 e f_2) diferentes.
 - A largura de faixa do canal deve ser igual a $(f_b + f_1 - f_2)$.
 - Desvantagem: a largura de faixa é, no mínimo, igual a 2 vezes a do ASK.
 - Vantagem: as propriedades de modulação angular garantem menor sensibilidade a interferências e ruídos.



Frequency-Shift Keying (FSK) (2)

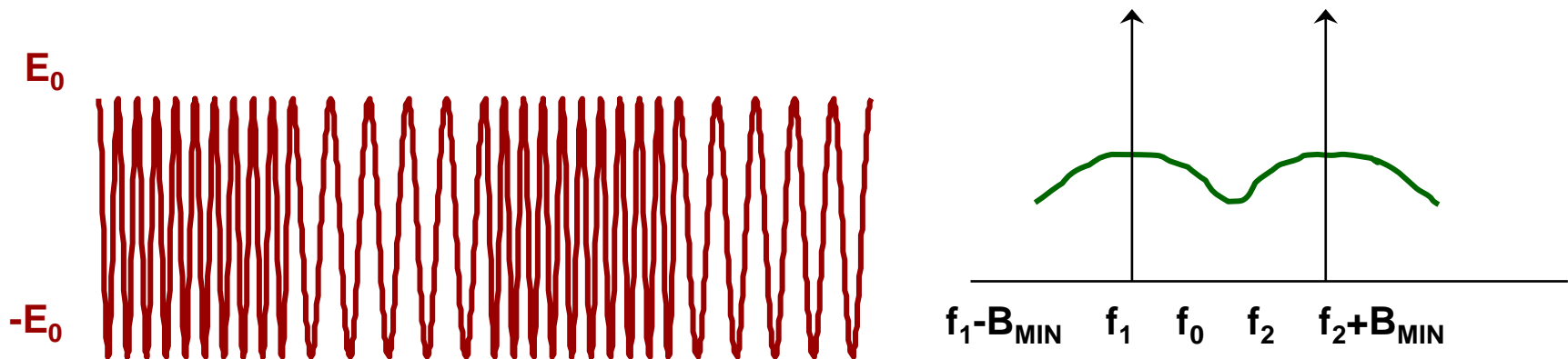


www.mathworks.co.jp/matlabcentral/fileexchange/30770-digital---analog-modulation/content//SignalModulations/qam&sys.m



Modulação por chaveamento de frequência (FSK)

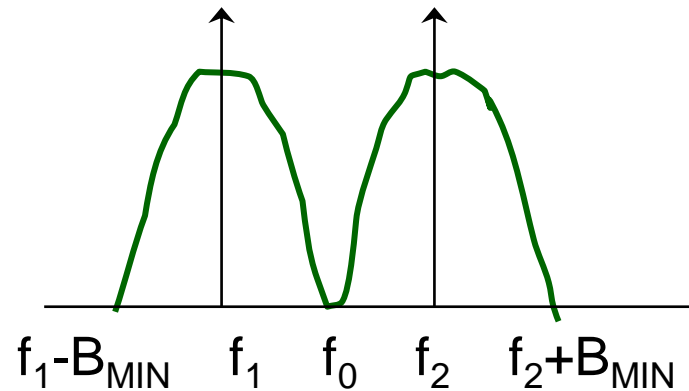
- ❖ Duas senóides de mesma amplitude e frequências diferentes transmitem os bits “0” e “1”.
- ❖ corresponde a dois sistemas ASK tais que:
 - $ASK_1 \rightarrow f_1 \rightarrow$ para o sinal digital.
 - $ASK_2 \rightarrow f_2 \rightarrow$ para o complemento do sinal digital.
 - o sistema FSK é encarado como a soma de dois sistemas ASK complementares.



$$e(t) = \begin{cases} \cos(2\pi f_1 t) & \text{para o bit 1} \\ \cos(2\pi f_2 t) & \text{para o bit 0} \end{cases}$$



FSK



parâmetros

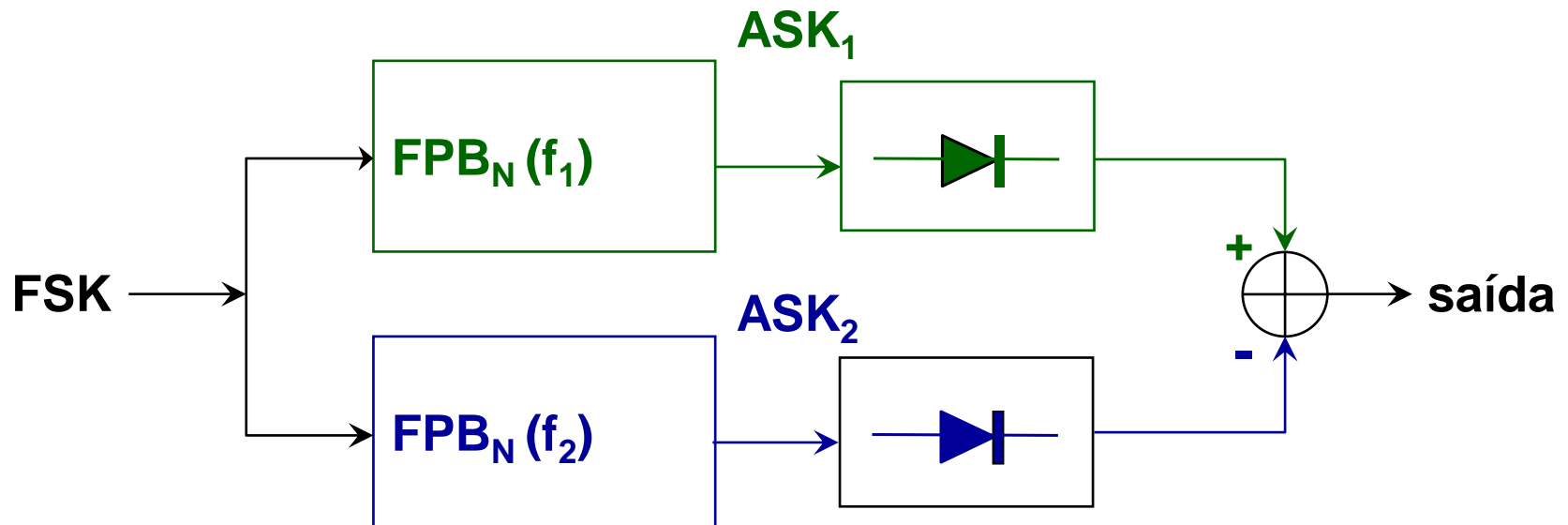
- ❖ $BW_{FSK} = (f_2 + B_{MIN}) - (f_1 - B_{MIN}) = 2 B_{MIN} + f_2 - f_1$
 - Considerando $\Delta f = (f_2 - f_1)/2 \rightarrow BW_{FSK} = 2B_{MIN} + 2\Delta f$
- ❖ O desvio de fase é definido por:
 - $\Delta\phi = \Delta f / B_{MIN}$
- ❖ A frequência central é dada por:
 - $f_0 = (f_1 + f_2)/2$



FSK

❖ Demodulação:

- pode ser feita utilizando dois detectores de envoltória.



❖ Problemas no processo de detecção:

- os mesmos da modulação AM.
 - ruído no processo de detecção, distorções.



FSK

- O processo de modulação FSK (Frequency shift-keying), consiste em variar a frequência da onda portadora em função do sinal modulante, no presente caso, o sinal digital a ser transmitido.
- Este tipo de modulação pode ser considerado equivalente a modulação em FM para sinais analógicos.
- A amplitude da onda portadora modulada é mantida constante durante todo o processo da modulação; quando ocorrer a presença de um nível lógico "1" no sinal digital, a frequência da portadora é modificada para poder ser depois compreendida no processo de demodulação. A frequência resultante transmitida será a frequência da onda portadora f_p diminuída de uma frequência de desvio f_d . Matematicamente a onda resultante modulada será:

$$f_r = f_p - f_d .$$

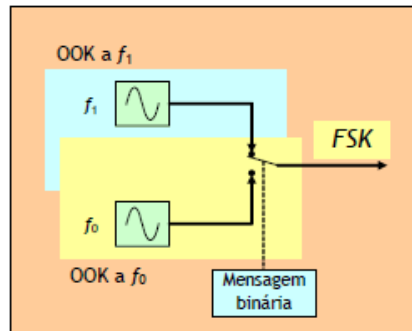
- Se registrada a ocorrência de um nível lógico "0" no sinal digital, a frequência resultante aplicada será a frequência da onda portadora acrescida da frequência de desvio:

$$f_r = f_p + f_d .$$

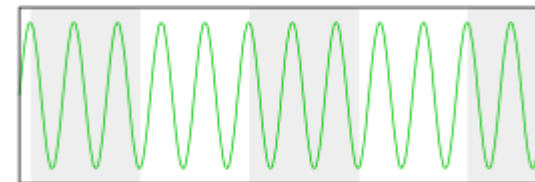


Espectro de FSK

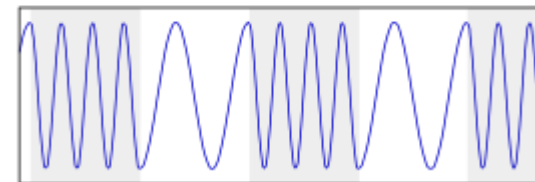
FSK pode ser visto como OOK "entrelaçado":



Data

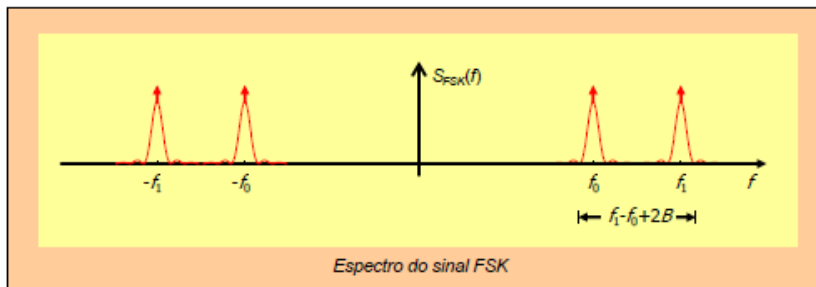


Carrier



Modulated Signal

Espectro



f_0 e f_1 — frequências associadas a cada bit

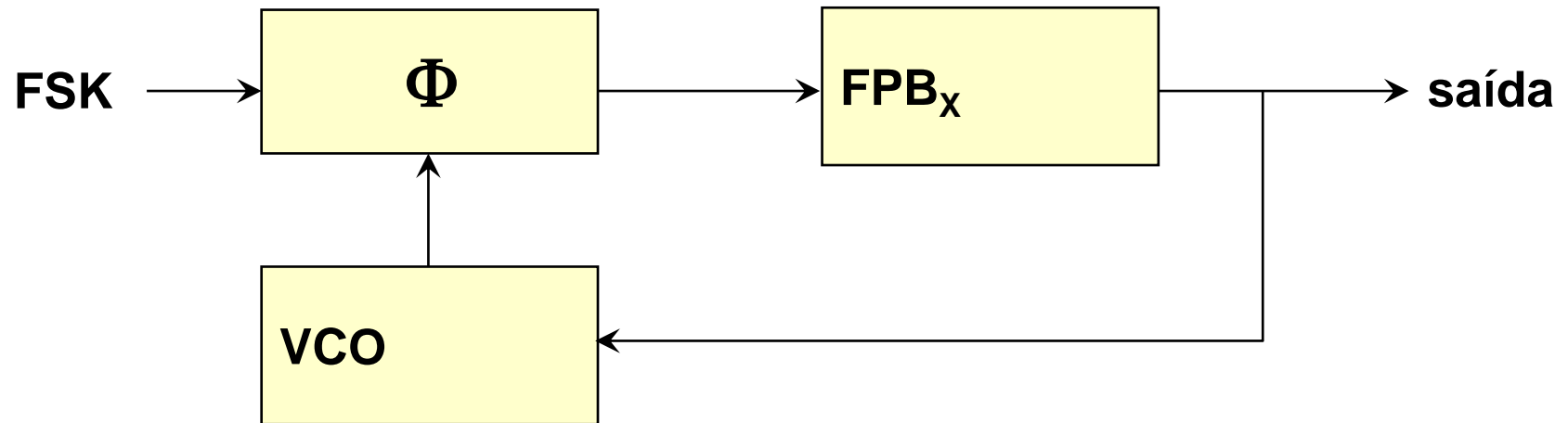
B — largura de banda do sinal em banda-base

Se f_0 e f_1 estiverem suficientemente afastados:

A largura de banda em FSK binário vale $f_1 - f_0 + 2B$



Demodulação com PLL



❖ Vantagens da modulação FSK:

- propriedades da modulação angular (menor sensibilidade ao ruído).

❖ Desvantagens:

- largura de faixa (Bw) é duas vezes a do sistema ASK,
- transmissão das portadoras.



Exercício 2

- Determine a largura de banda de um sinal PSK que está sendo transmitido que foi amostrado à taxa de 4 KHz. Assuma que a transmissão ocorre no modo que as portadoras estão separadas por 3 KHz.
- Desenhe o espectro do sinal modulado.

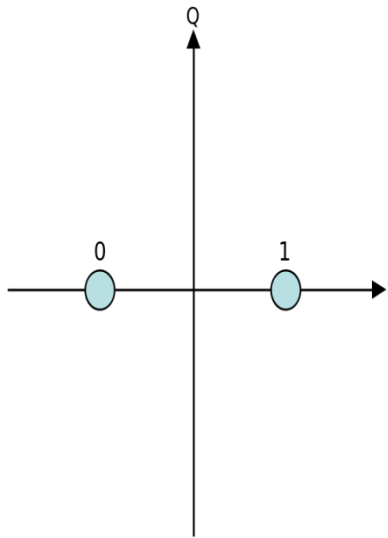


Modulação digital Phase-Shift Keying (PSK) (1)

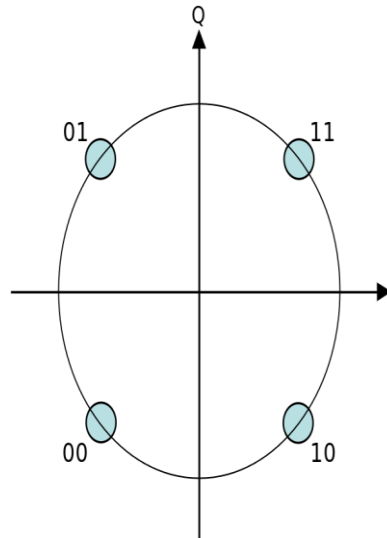
- **PSK** - modulação por deslocamento de fase:
 - 2 ângulos de fase distintos (0 e 180^0) são utilizados para representar os 2 estados binários.
 - Vantagens: mesmas propriedades da modulação angular, mas com largura de faixa menor.
 - A portadora é suprimida, economizando-se 50% da energia transmitida.
- **QPSK** - modulação PSK com 4 níveis.
- **MQPSK** - PSK com vários níveis.



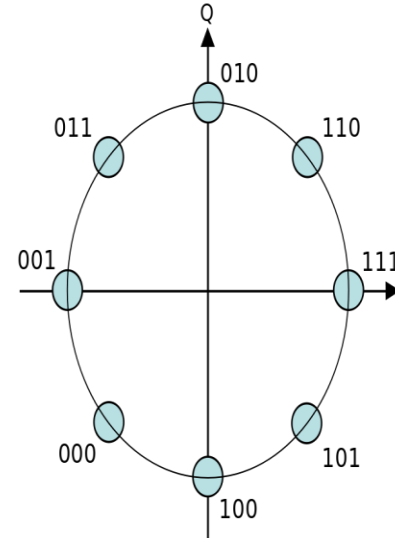
M-PSK



BPSK (2-PSK)
binary



QPSK (4-PSK)
quadrature



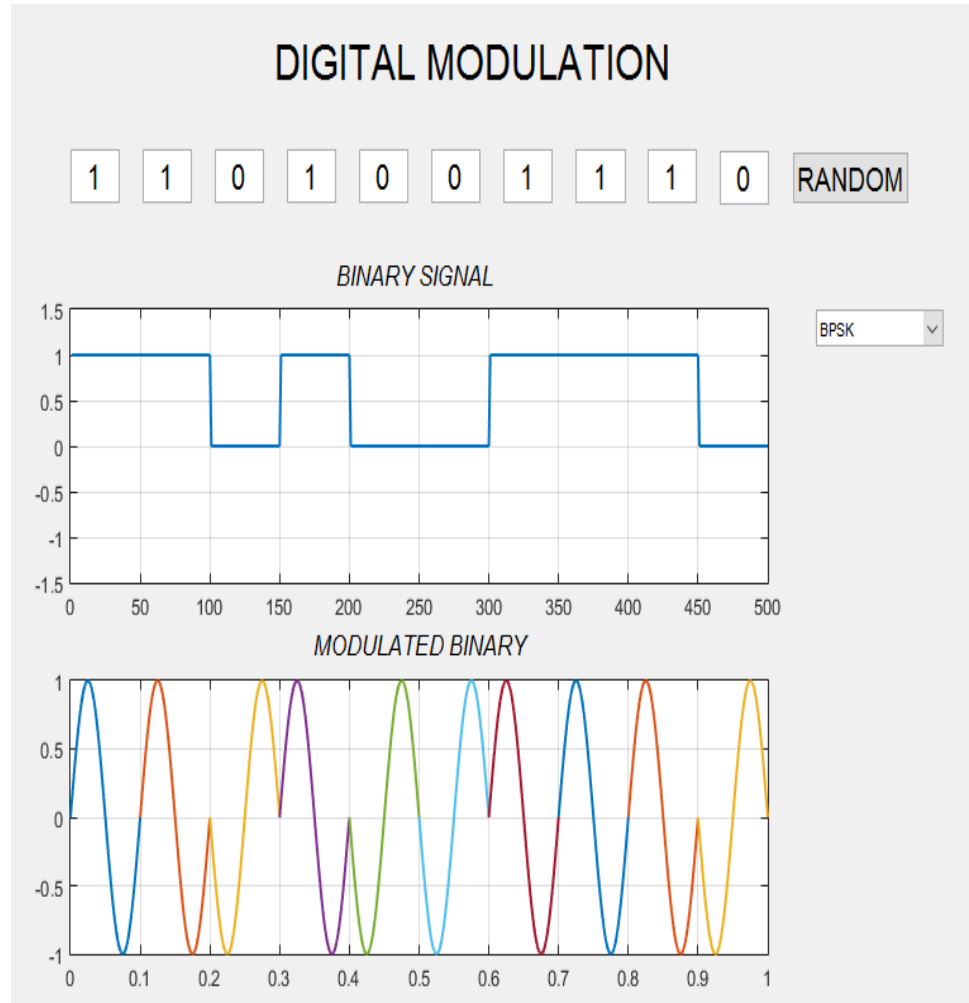
8-PSK

$$M = 2^N \text{ símbolos}$$

$$N = \log_2 M \text{ bits por símbolo}$$



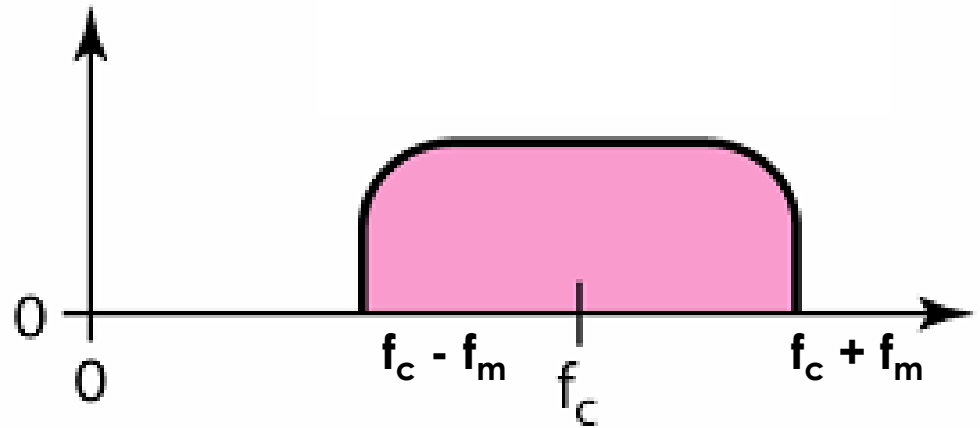
Phase-Shift Keying (BPSK)



www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/14328-digital-modulation

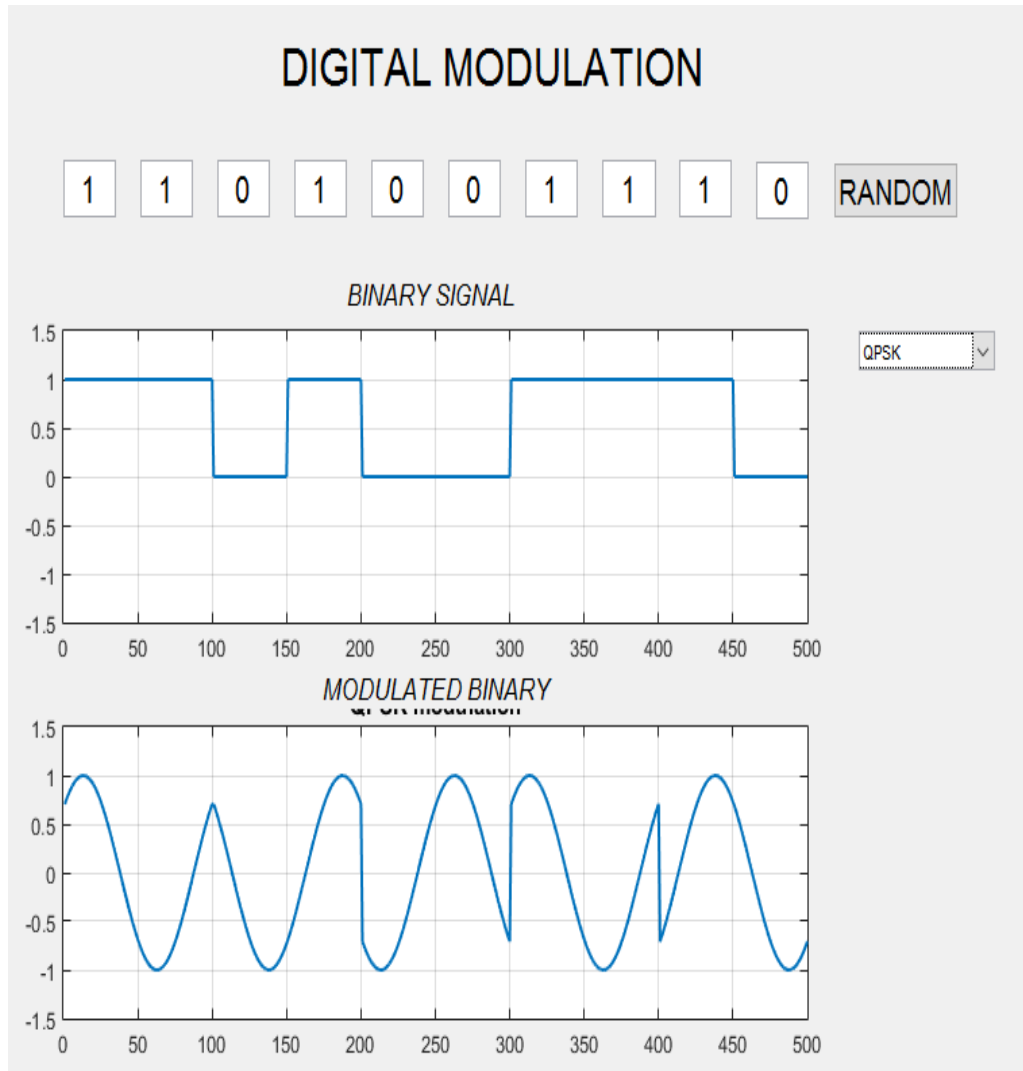
Largura do Espectro do BPSK

- Ocupa a mesma faixa que o ASK e uma faixa menor que o FSK
- Como a componente da portadora é eliminada, economiza-se 50% da potência de transmissão





Quadrature phase keying (QPSK)



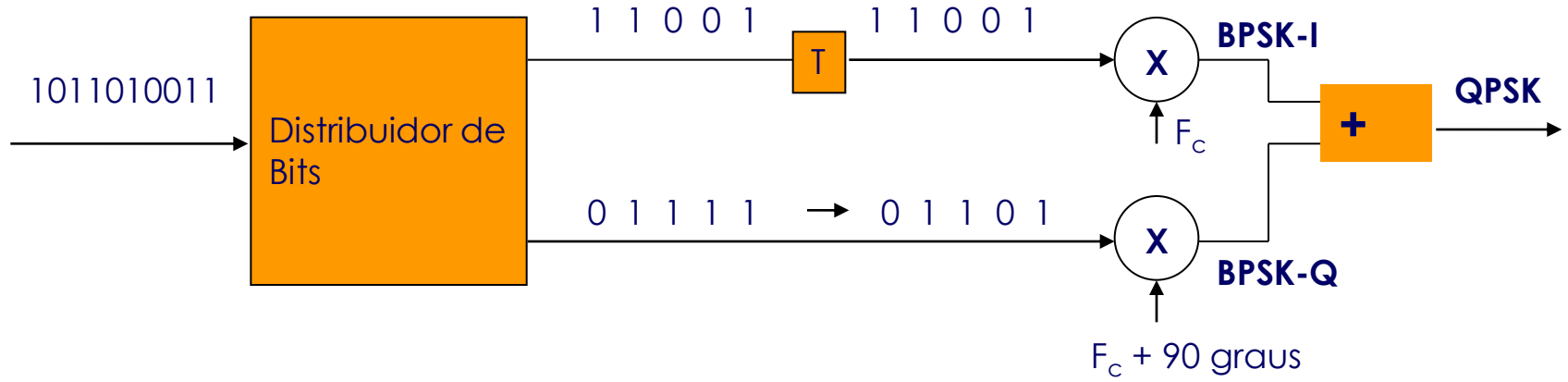
Modulação QPSK (*Quadrature Shifting Keying*)

- É um sistema que chaveia quatro fases na portadora transmitida. Estas fases são 45, 135, -135 e -45 graus. Cada um destes quatro estados da portadora é associado a um par de bits de informação.

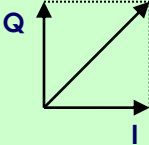
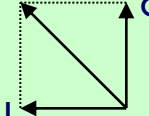
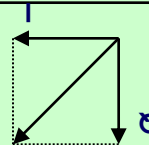
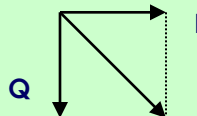
Fase (graus)	Bit
45	00
135	01
-135	11
-45	10



QPSK



QPSK

Bit I	Fase BPSK-1	Bit Q	Fase do BPSK-Q	Composição	Fase resultante
0	0°	0	90°		45°
1	180°	0	90°		135°
1	180°	1	-90°		-135°
0	0°	1	-90°		-45°



Espectro QPSK

- Como o QPSK é a sobreposição dos dois espectros BPSK-I e BPSK-Q, sua largura de faixa é $2 f_m$
- O QPSK transmite uma taxa duas vezes maior que o BPSK, apesar de ocupar o mesmo espectro de transmissão.

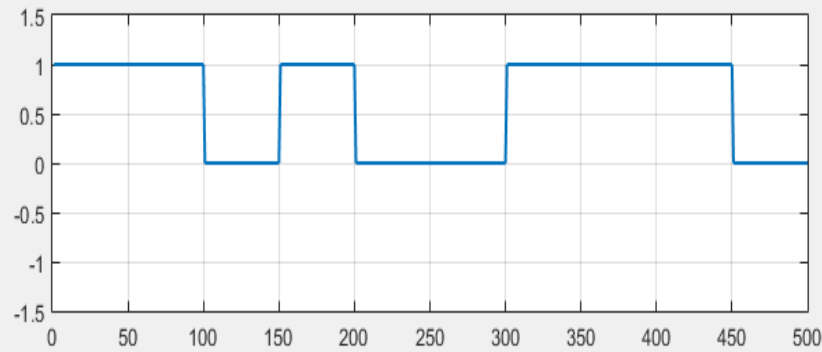


8-PSK

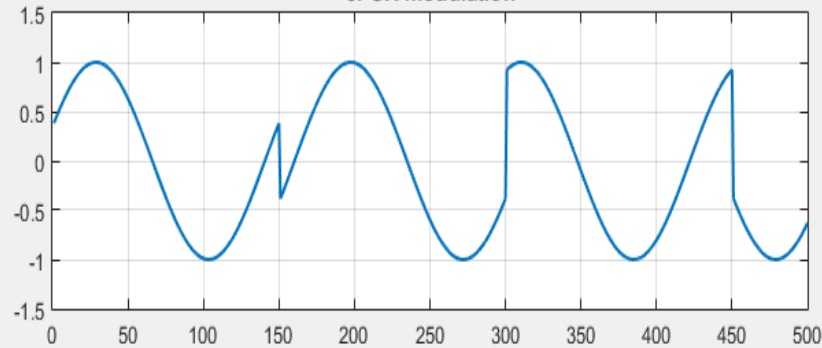
DIGITAL MODULATION

1 1 0 1 0 0 1 1 1 0

BINARY SIGNAL



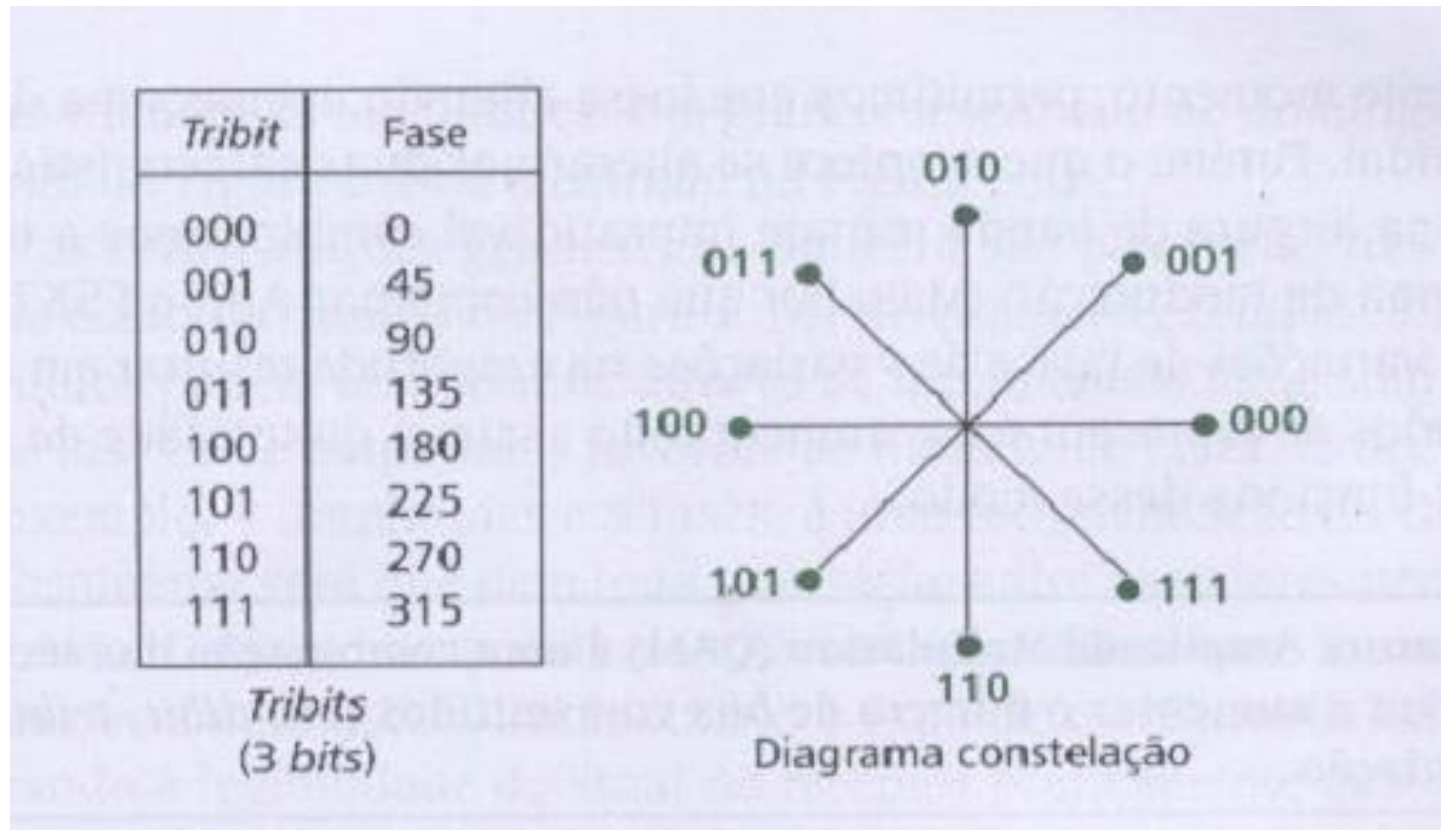
MODULATED BINARY
or QAM modulation



$$N = \begin{cases} \log_2 8 \\ \log_2 2^3 \\ 3 \log_2 2 \\ 3 \end{cases}$$



Modulação 8-PSK





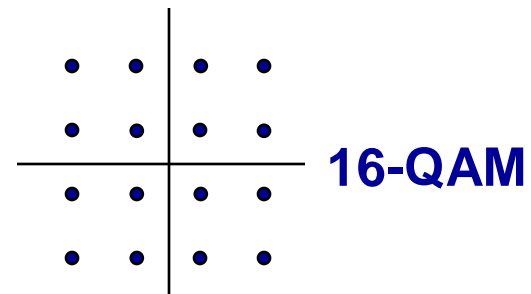
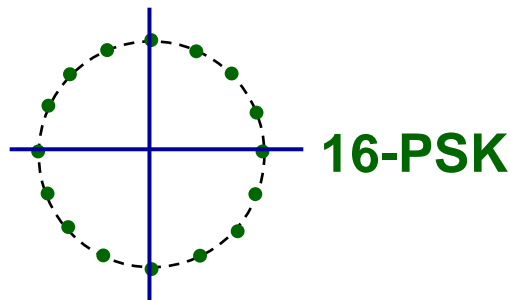
Exercício 3

- Dado que a taxa em banda base de um sinal é de 6 Kbit/s, qual é taxa de transmissão deste sinal quando modulado em 8-PSK?



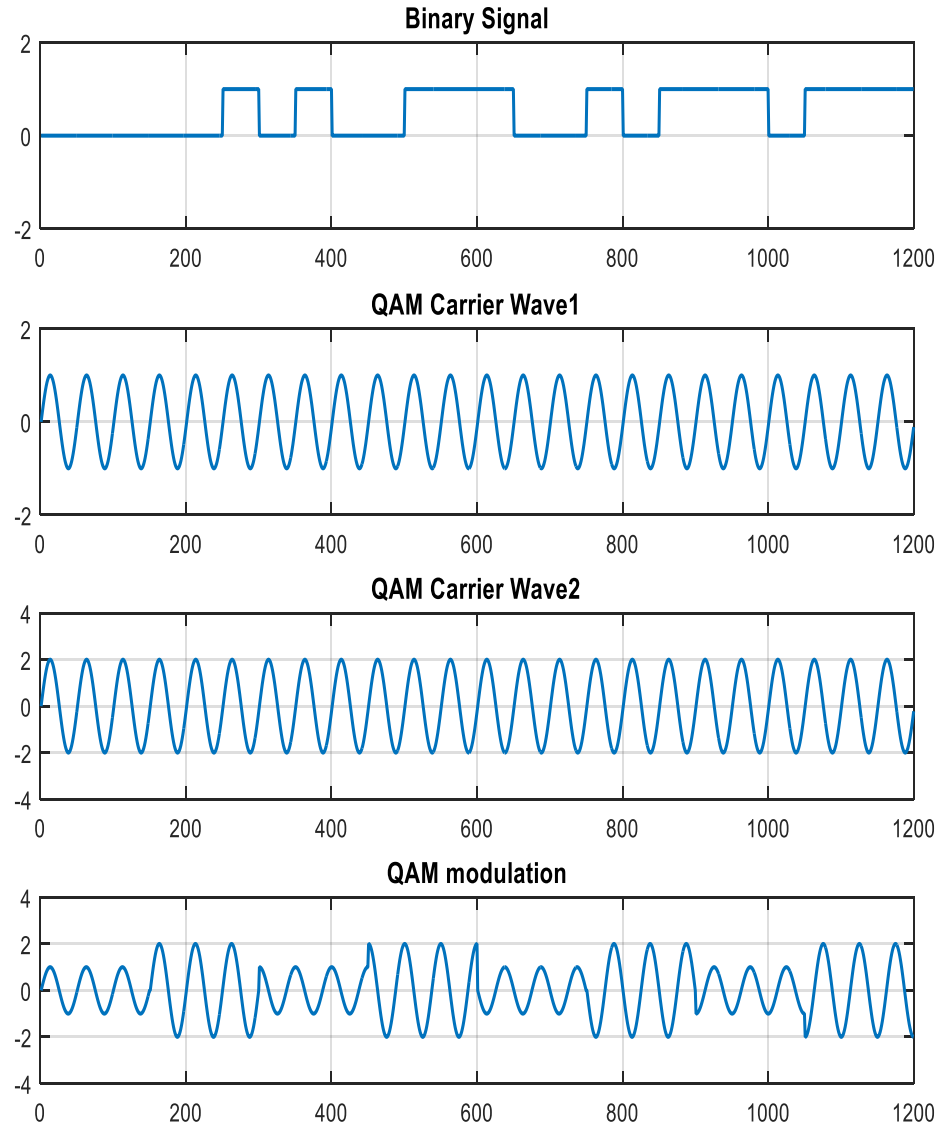
Modulação QAM

- QAM → modulação em amplitude e em quadratura.
 - é uma extensão do sistema M-PSK (fases múltiplas),
 - combina deslocamentos amplitude (ASK) e de fase (PSK),
 - representação: M-QAM.
 - em que: $M = 2^v \quad : \quad v = 2, \dots, 8$
- resultando nos sistemas 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM, ... 256-QAM.
- para $v = 2$ tem-se o sistema QPSK.
- ❖ cada estado está relacionado com v bits o que permite uma redução na largura de faixa para $1/v$ em relação ao sistema BPSK.
- ❖ constelação para os sistemas 16-PSK e 16-QAM

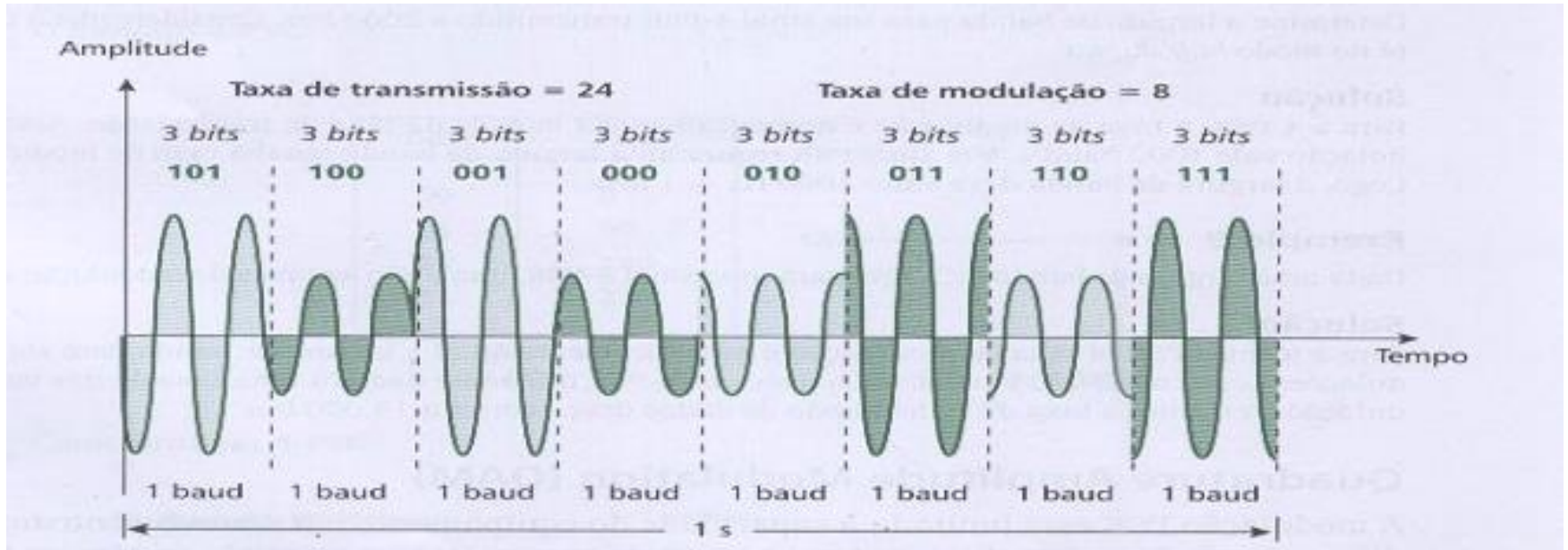




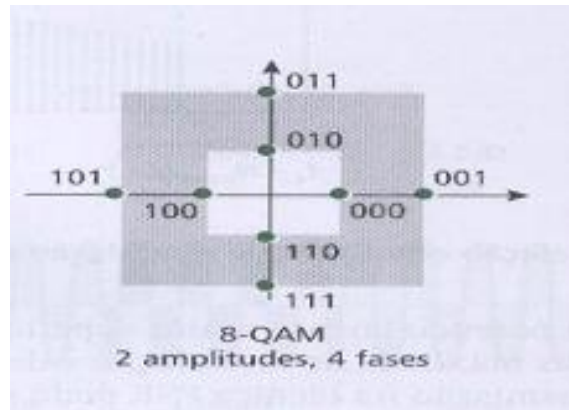
Quadrature amplitude modulation (QAM)



8-QAM



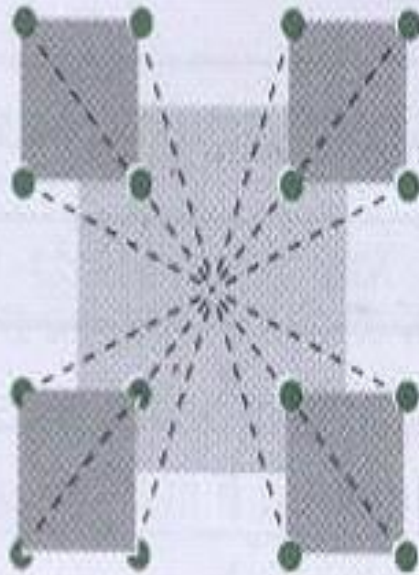
Constelação 8-QAM →





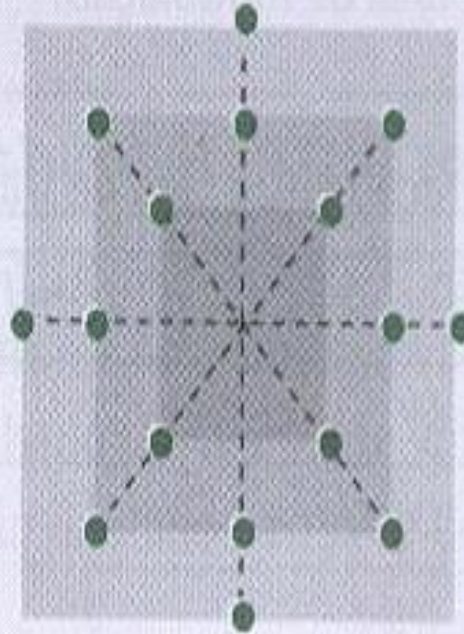
Constelação 16 QAM

3 amplitudes, 12 fases



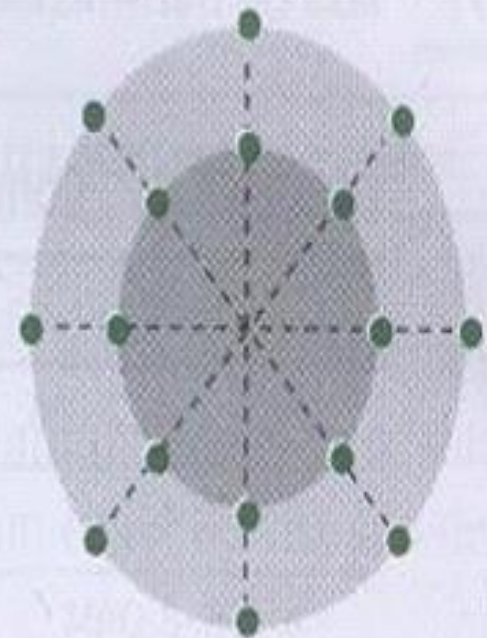
16-QAM

4 amplitudes, 8 fases

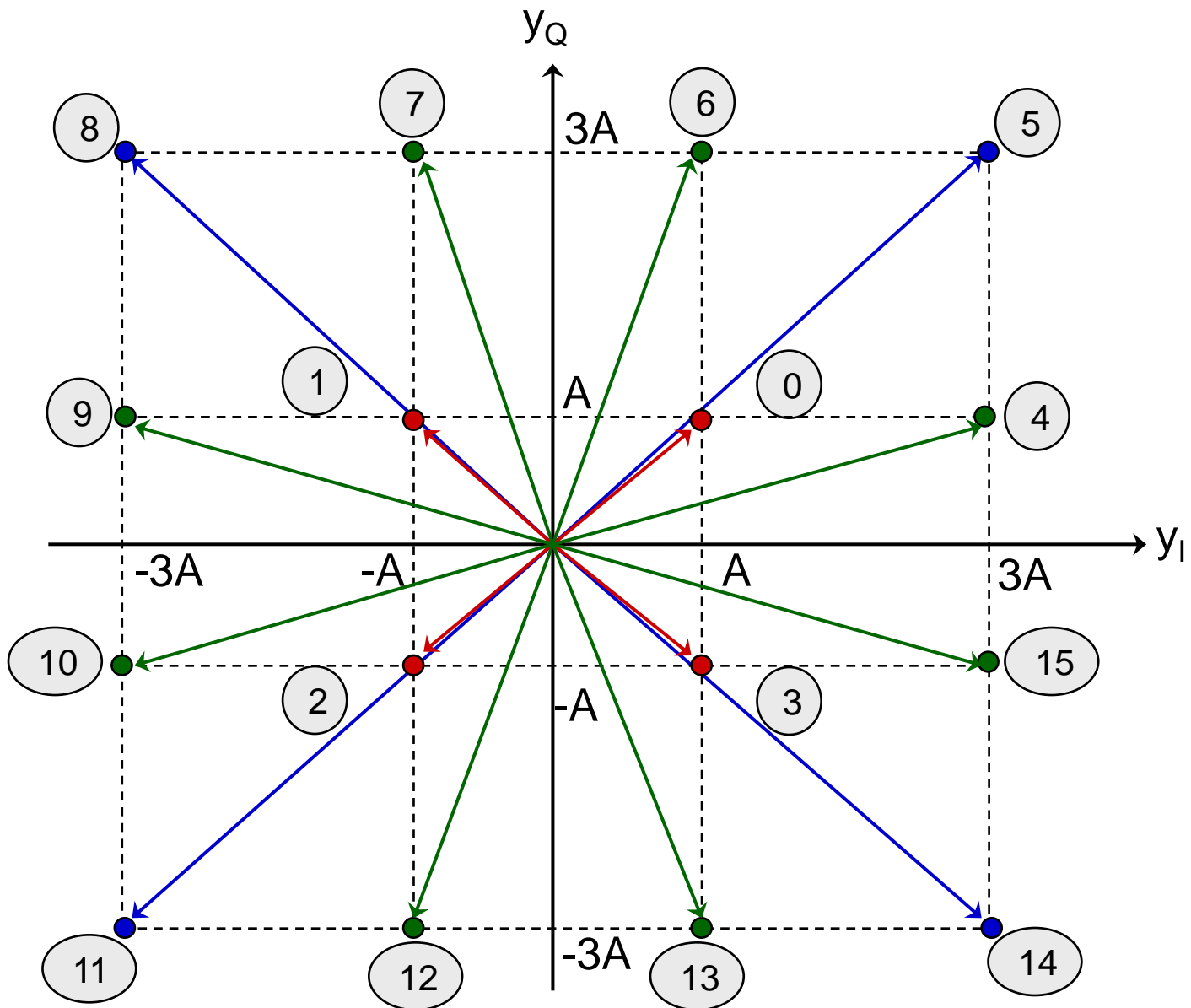


16-QAM

2 amplitudes, 8 fases



16-QAM



$$Y_I = V_I \cos \omega_0 t \quad - \quad Y_Q = V_Q \sin \omega_0 t \quad - \quad V_I \text{ e } V_Q \rightarrow A, -A, 3A, -3A$$

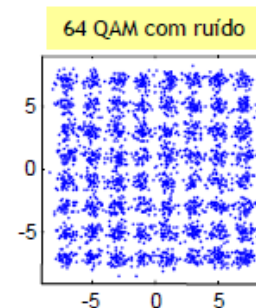
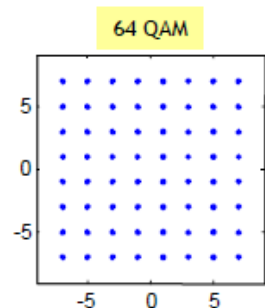
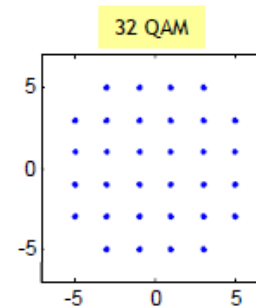
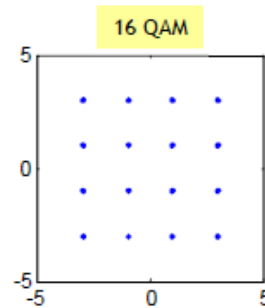
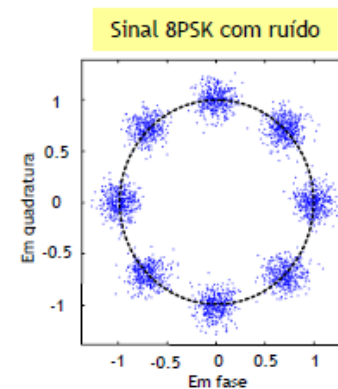
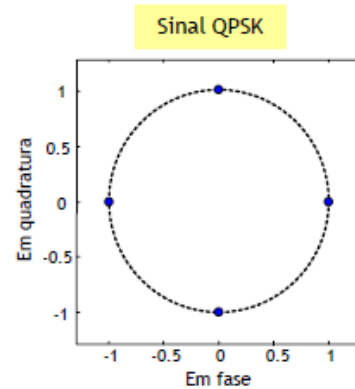


Exercício

- **Um sistema de comunicação digital transmite um sinal de vídeo que ocupa uma banda entre 0Hz e 4MHz. Este sinal é amostrado a 8 MHz por um conversor A/D de 16 bits. O sinal é transmitido usando-se modulação 16-QAM.**
 - **Qual a taxa de transmissão do modulador 16-QAM?**



Constelações no espaço de sinal



Comparação entre taxa de modulação e taxa de transmissão

Modulação	Unidades	Bits	Taxa de Modulação	Taxa de Transmissão
ASK, FSK, BPSK	Bit	1	N	N
4-PSK, 4-QAM	Dibit	2	N	2N
8-PSK, 8-QAM	Tribit	3	N	3N
16-QAM	Tetrabit	4	N	4N
32-QAM	Pentabit	5	N	5N
64-QAM	Hexabit	6	N	6N
128-QAM	Septabit	7	N	7N
256-QAM	Octabit	8	N	8N



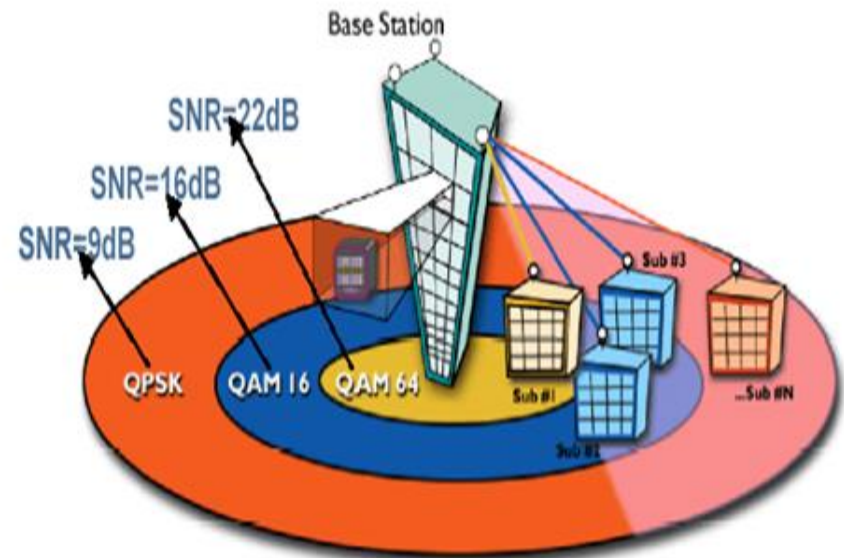
Modulação Adaptativa

- Altera dinamicamente o esquema de modulação.
- A modulação a ser utilizada é definida, basicamente, pela relação sinal ruído (SNR) do enlace e pela taxa de transferência do usuário.



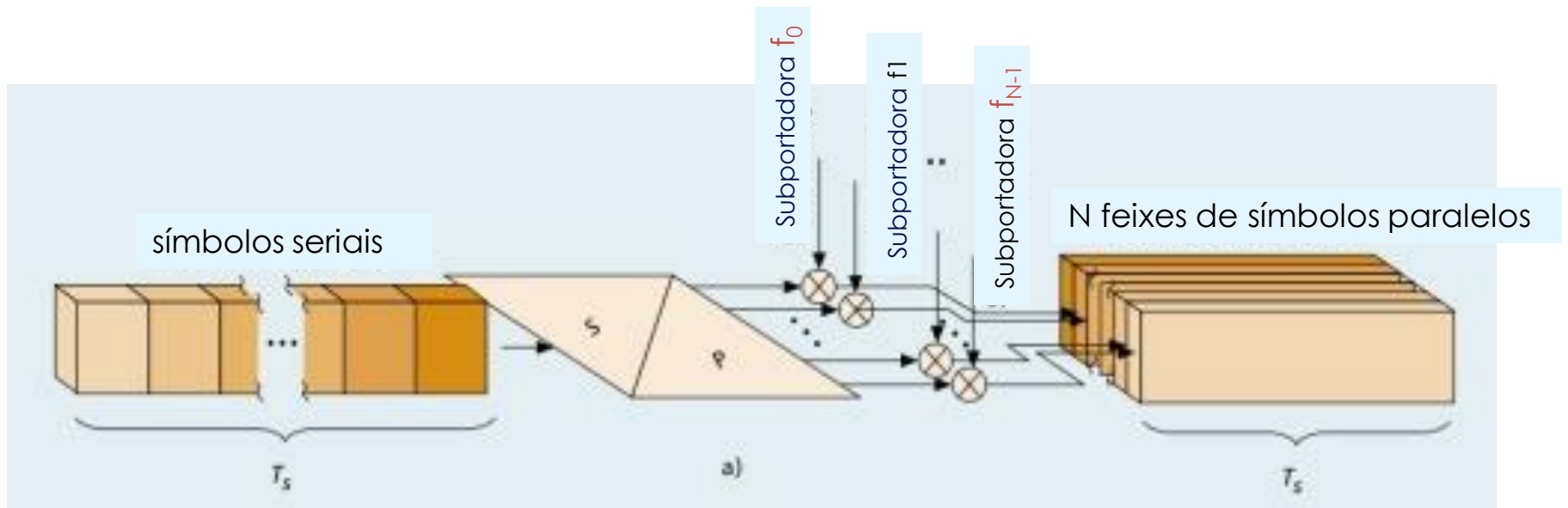
Modulação Adaptativa

- Em condições severas de propagação e a longas distâncias é empregada uma modulação mais robusta e com menores taxas de transmissão (QPSK).
- Já em enlaces de curta e média distâncias esquemas de modulação de alta eficiência espectral são empregados, conseguindo-se assim elevadas taxas de transmissão (16-QAM e 64-QAM).





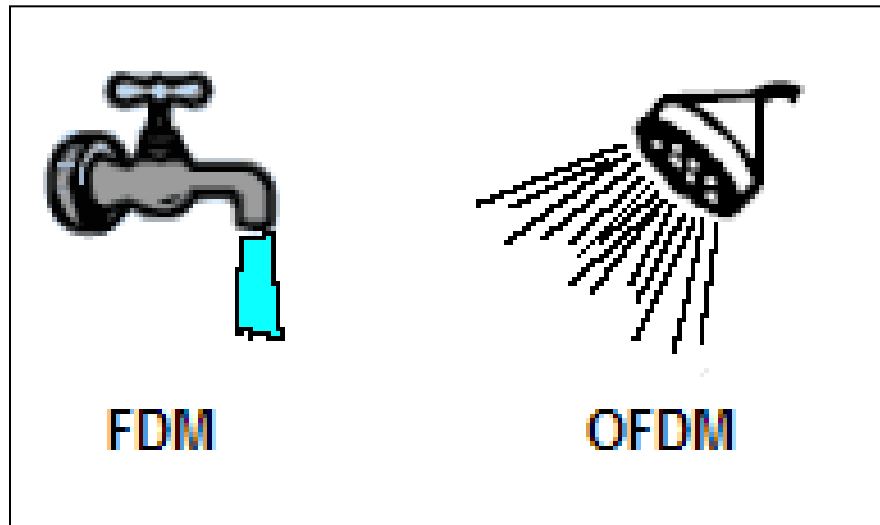
Modulação OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)





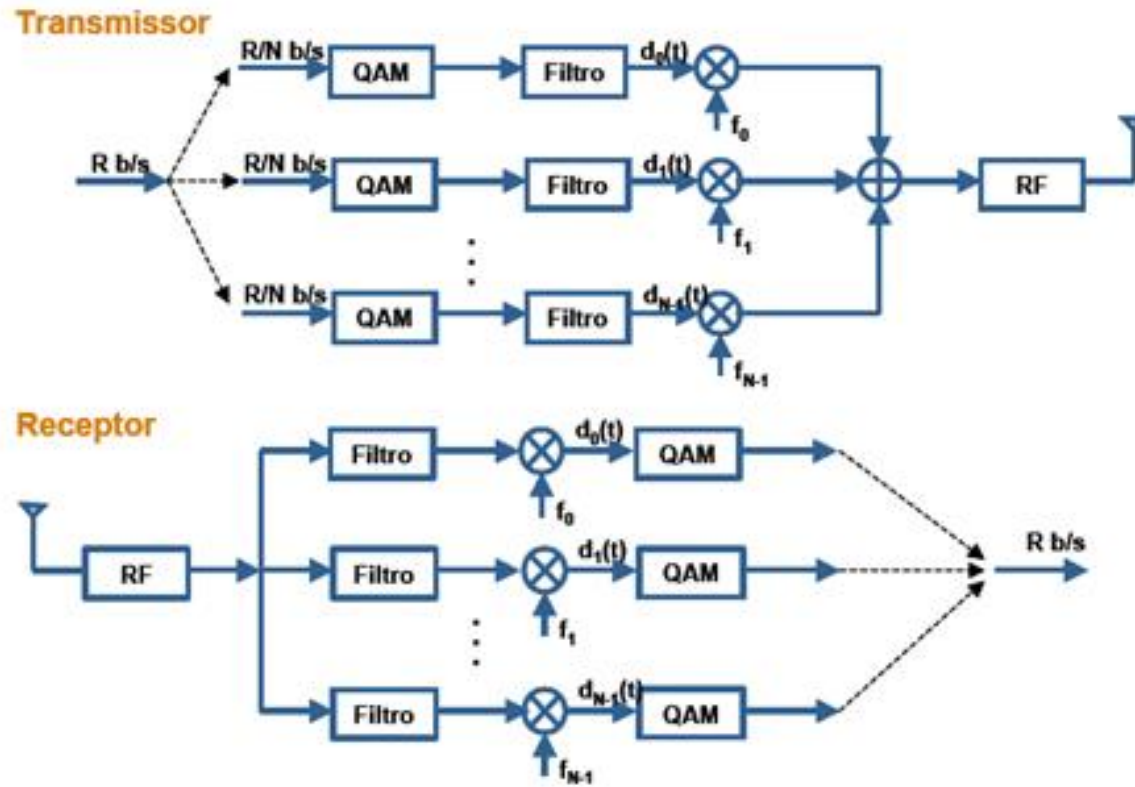
OFDM

“OFDM é uma técnica de modulação onde múltiplas portadoras de baixa taxa são combinadas para transmitir numa forma paralela resultando em altas taxas de transmissão”





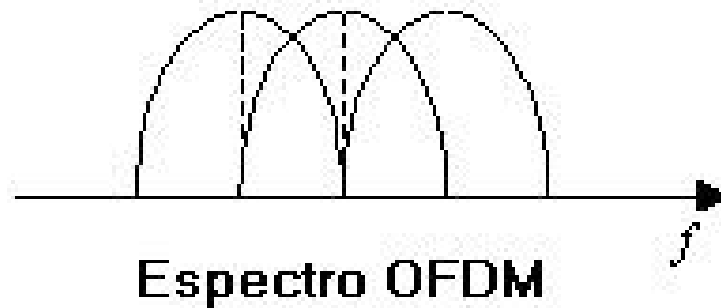
Modulação OFDM





OFDM

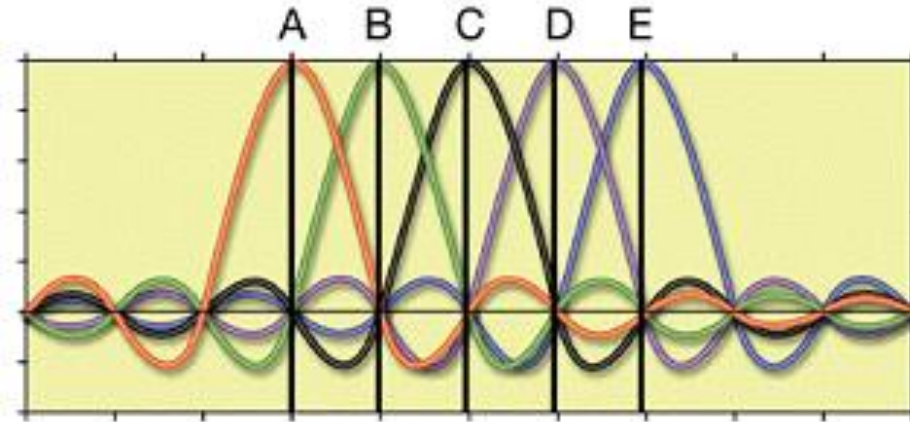
- Na OFDM, emprega-se uma sobreposição das mesmas, resultando em um ganho espectral de até de 50% em relação à técnica FDM.





OFDM

- Técnica que permite superposição de canais consecutivos sem interferência.
- Para isso, as portadoras devem ser matematicamente ortogonais

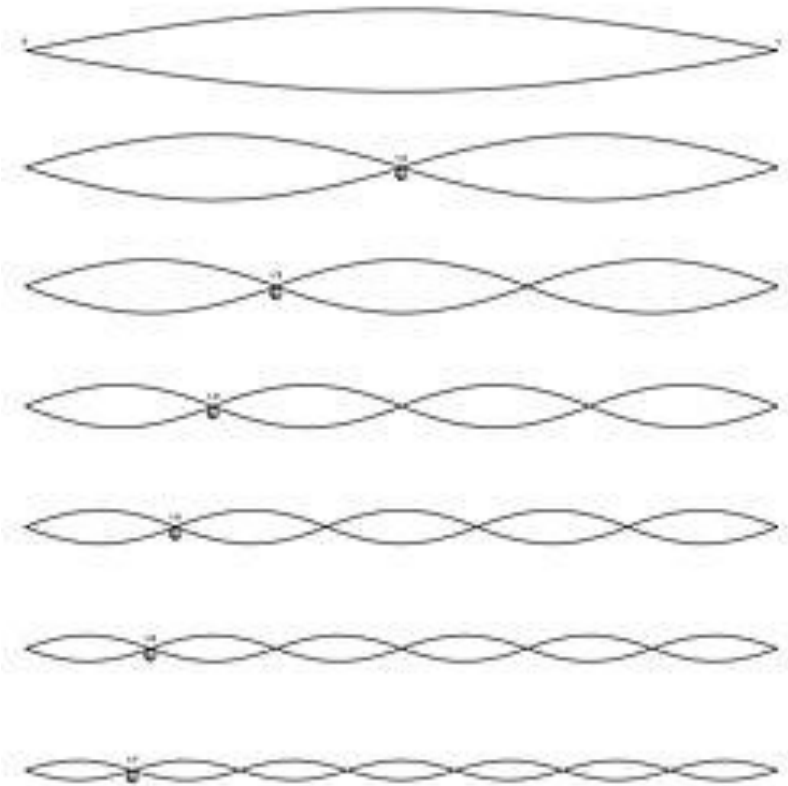


OFDM - Ortogonalidade

- Num sistema OFDM, cada portadora é uma senóide com frequência igual a um múltiplo de uma frequência senoidal fundamental (harmônica)
 - Esta condição permite a ortogonalidade
 - Espectros não se interferem

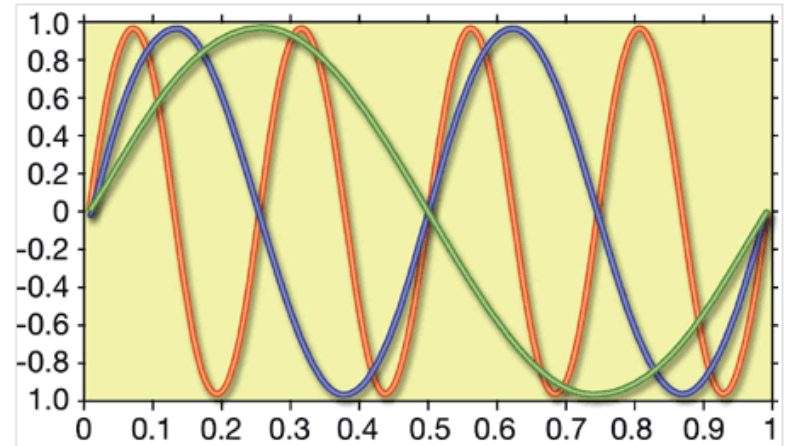


Freqüências Harmônicas



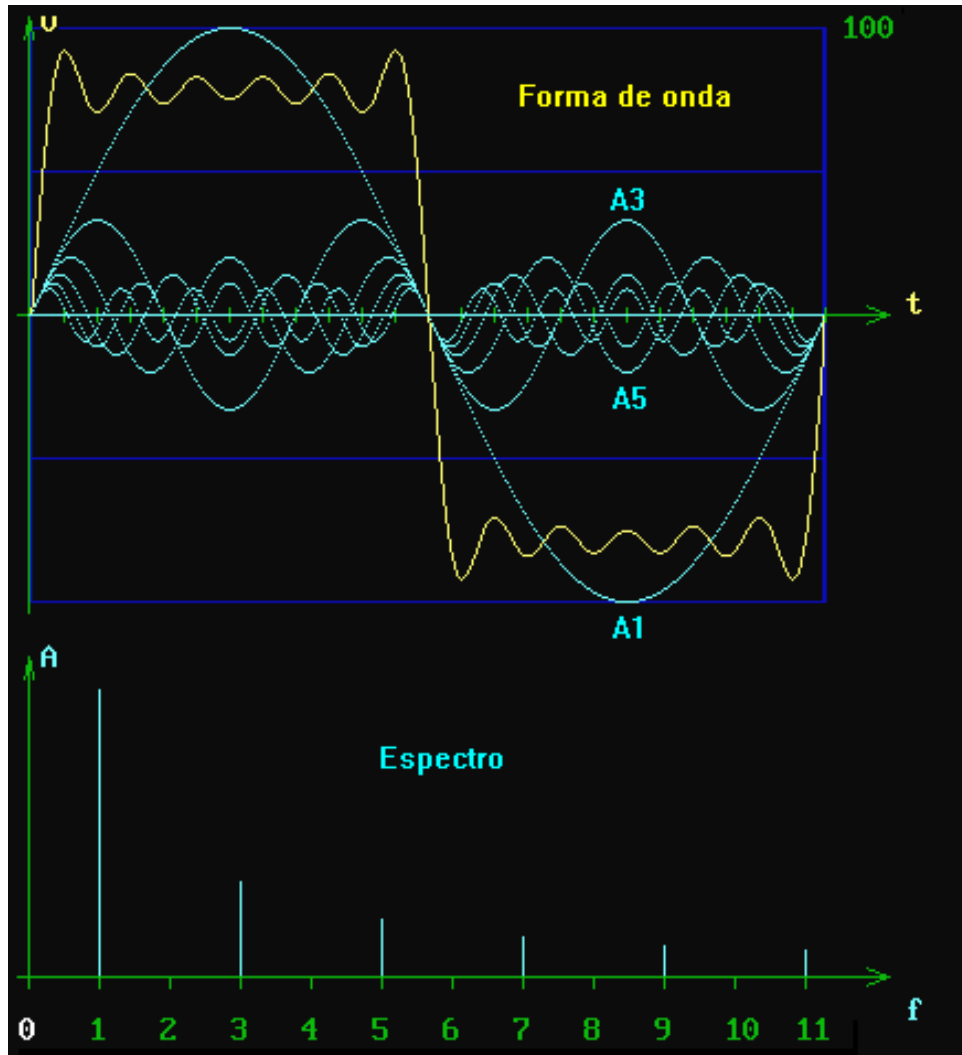
Harmônicas

- Um sinal periódico qualquer é composto de (ou pode ser decomposto em) uma série de ondas senoidais com frequência múltiplas inteiras da frequência fundamental
- As ondas senoidais múltiplas inteiras da fundamental são chamadas harmônicas.





Onda Periódica Quadrada

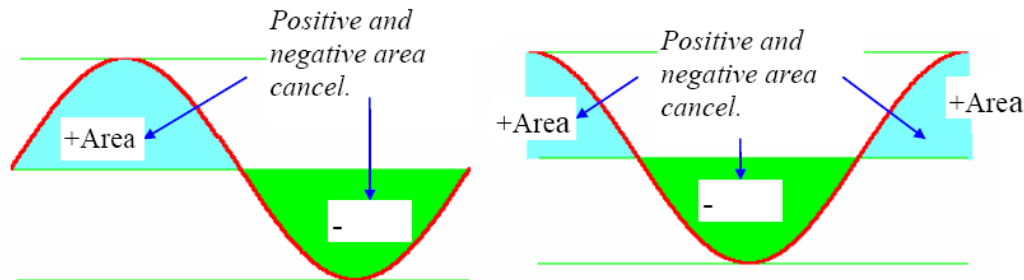


Propriedades das Senóides Harmônicas

$$f(t) = \sin m\omega t \times \sin n\omega t = \frac{1}{2} \cos(m - n)\omega t - \frac{1}{2} \cos(m + n)\omega t$$

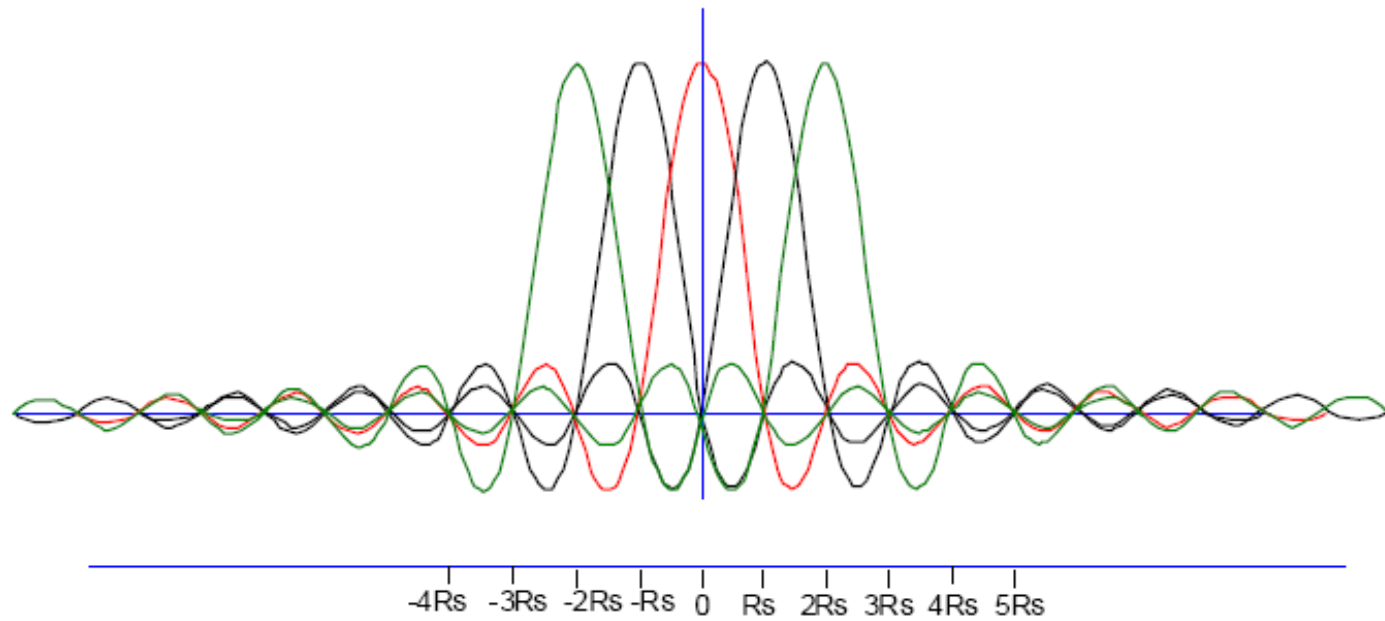
A multiplicação de duas senóides harmônicas resulta numa área nula num determinado período:

$$\begin{aligned} &= \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} \cos(m - n)\omega t - \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} \cos(m + n)\omega t \\ &= 0 - 0 \end{aligned}$$





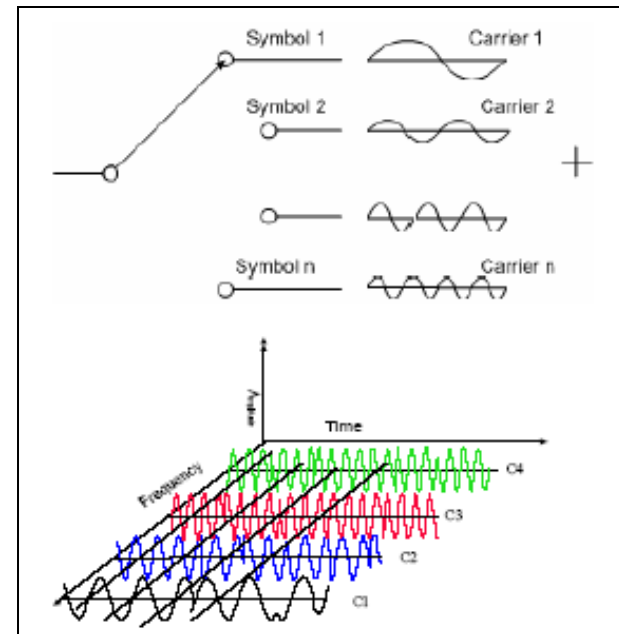
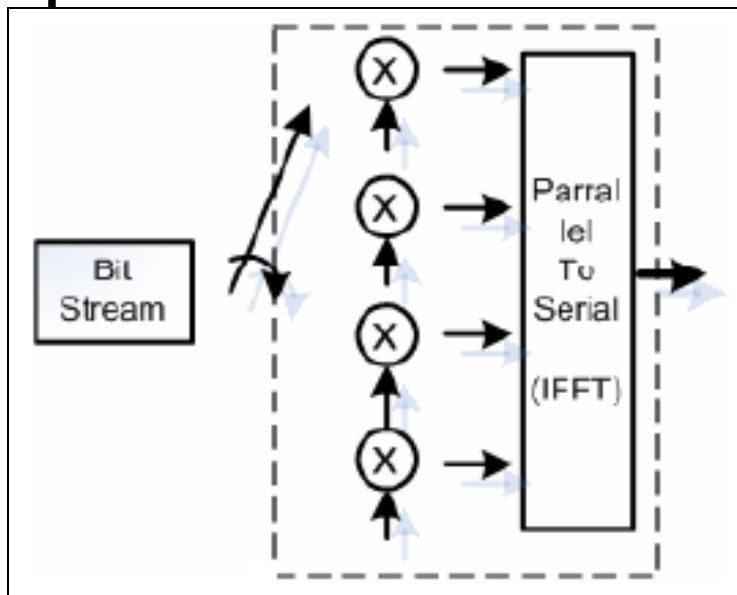
Espectro de um sinal OFDM





OFDM

- Os dados são multiplexados em múltiplos canais usados para modular cada portadora





Multiplexação

- Multiplexar é enviar um certo número de canais através do mesmo meio de transmissão.
- Objetivo básico do uso desta técnica é a economia, pois utilizando-se o mesmo meio de transmissão para diversos canais economiza-se em linhas, manutenção, ...



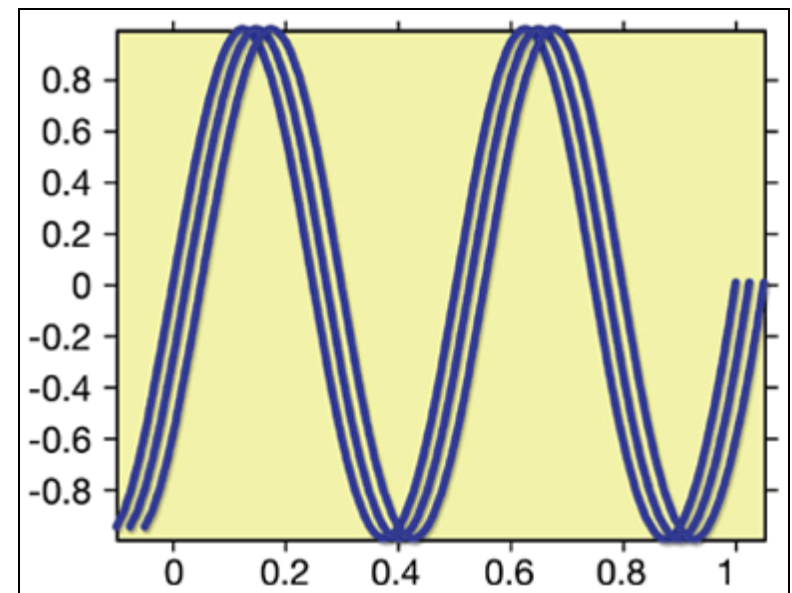
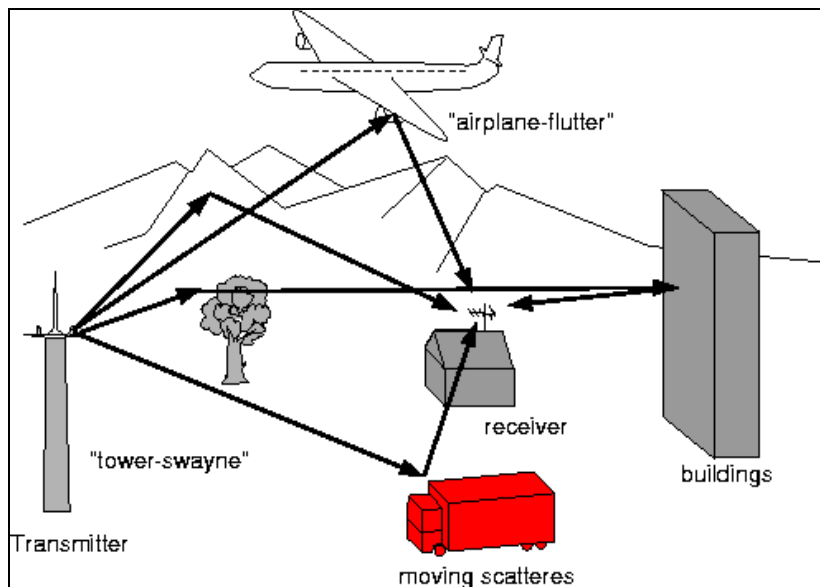
OFDM

- OFDM pode reduzir interferências entre símbolos como mostra o seguinte exemplo:
 - Usando 100 canais (portadoras), um sinal de 1 Mbit/s pode ser convertido em 100 sinais de 10 kbit/s.
 - Neste caso, a banda do sinal modulado é efetivamente diminuída por 100.
 - De maneira equivalente, o período de duração de cada bit é aumentado por 100, ficando mais imune a ruídos.



Os problemas de interferências

- Num ambiente multi-percurso, uma duração curta de bits aumenta a probabilidade de interferência inter-símbolo (ISI)





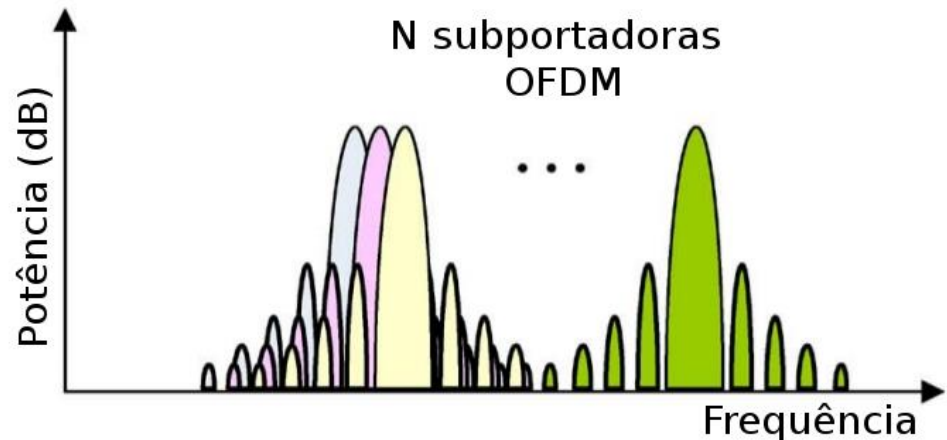
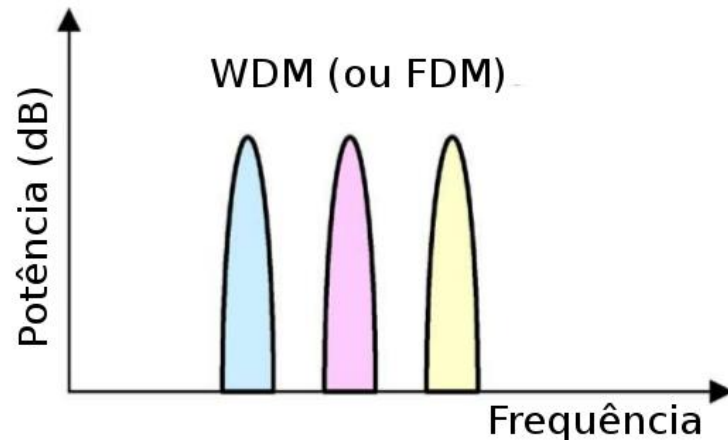
OFDM

- Permite a sobreposição de bandas diferentes sem interferência.
- Oferece uma alta taxa de transmissão de dados com uma duração maior de símbolos e eficiência espectral.



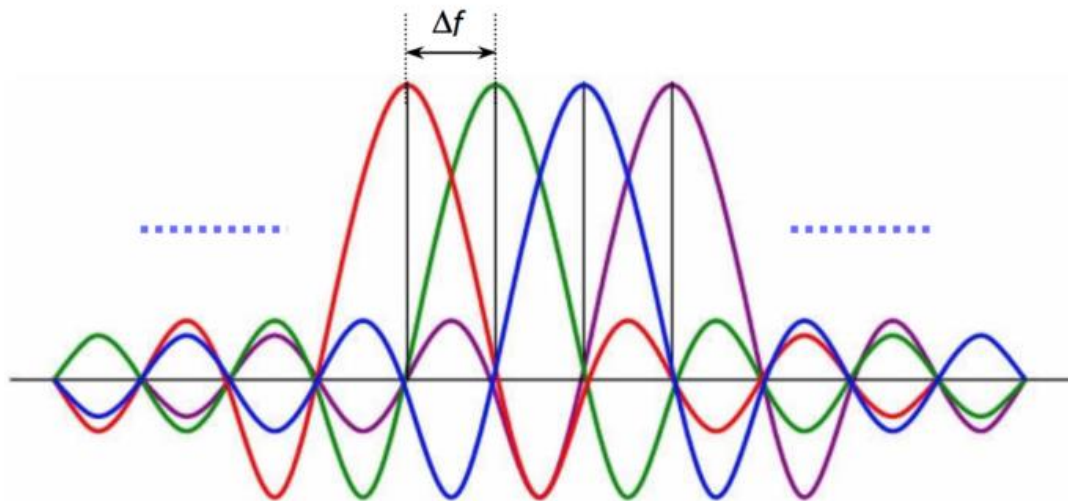
OFDM

- OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)
 - É um tipo de multiplexação por divisão de frequências (FDM) na qual múltiplas portadoras se sobrepõem sem interferência.
 - É um tipo de modulação que divide um dado canal em muitas portadoras tal que múltiplos símbolos são transmitidos em paralelo.
 - O período do símbolo é muito maior do que num sistema serial com a mesma taxa de dados total
 - Frequências das portadoras escolhidas de tal maneira que os sinais são matematicamente ortogonais sobre um período de símbolo OFDM



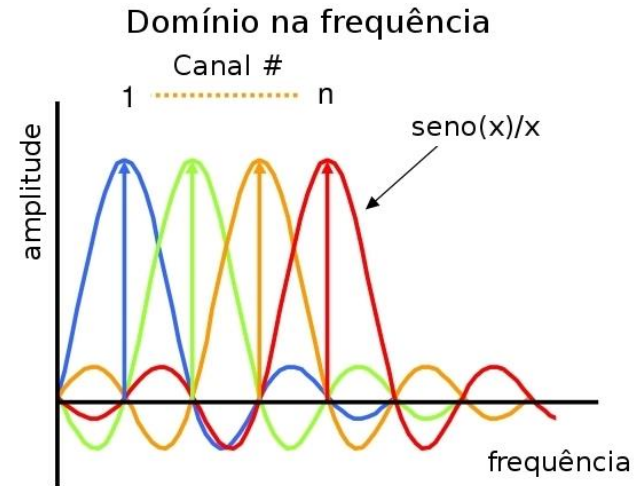
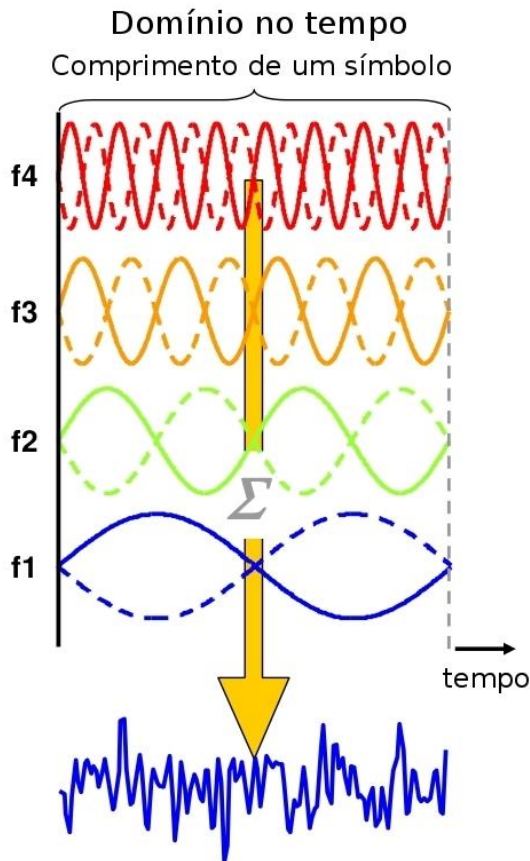


OFDM





OFDM



Representação OFDM no domínio digital

amostra k-th complexa no domínio no tempo

representação discreta no tempo

$$x_{l,k} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N c_{l,n} \exp j \frac{2\pi nk}{N}$$

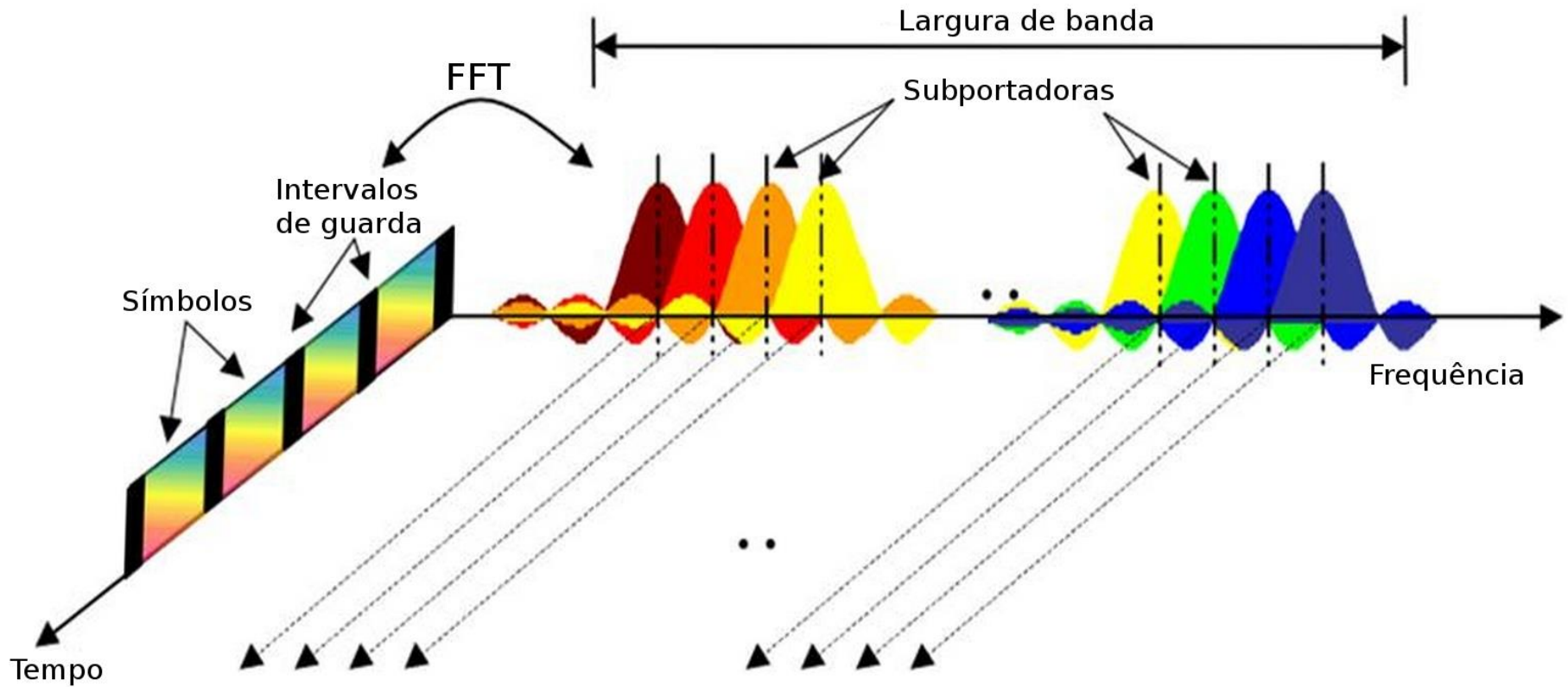
tamanho da FFT

número da subportadora

modulação



OFDM





OFDM

- Vantagens
 - Aumento da eficiência espectral
 - Redução do espaçamento entre portadoras
 - Robustez
 - Solução efetiva para a interferência intersimbólica (ISI) provocada por um canal dispersivo
 - Se torna importante no caso do aumento da taxa de dados transmitida porque a complexidade da equalização no domínio no tempo aumenta rapidamente
 - Na maioria das implementações OFDM qualquer ISI residual é removida pela utilização de uma forma de intervalo de guarda conhecido como prefixo cíclico
 - Flexibilidade
 - Transfere a complexidade dos transmissores e receptores do domínio analógico para o digital

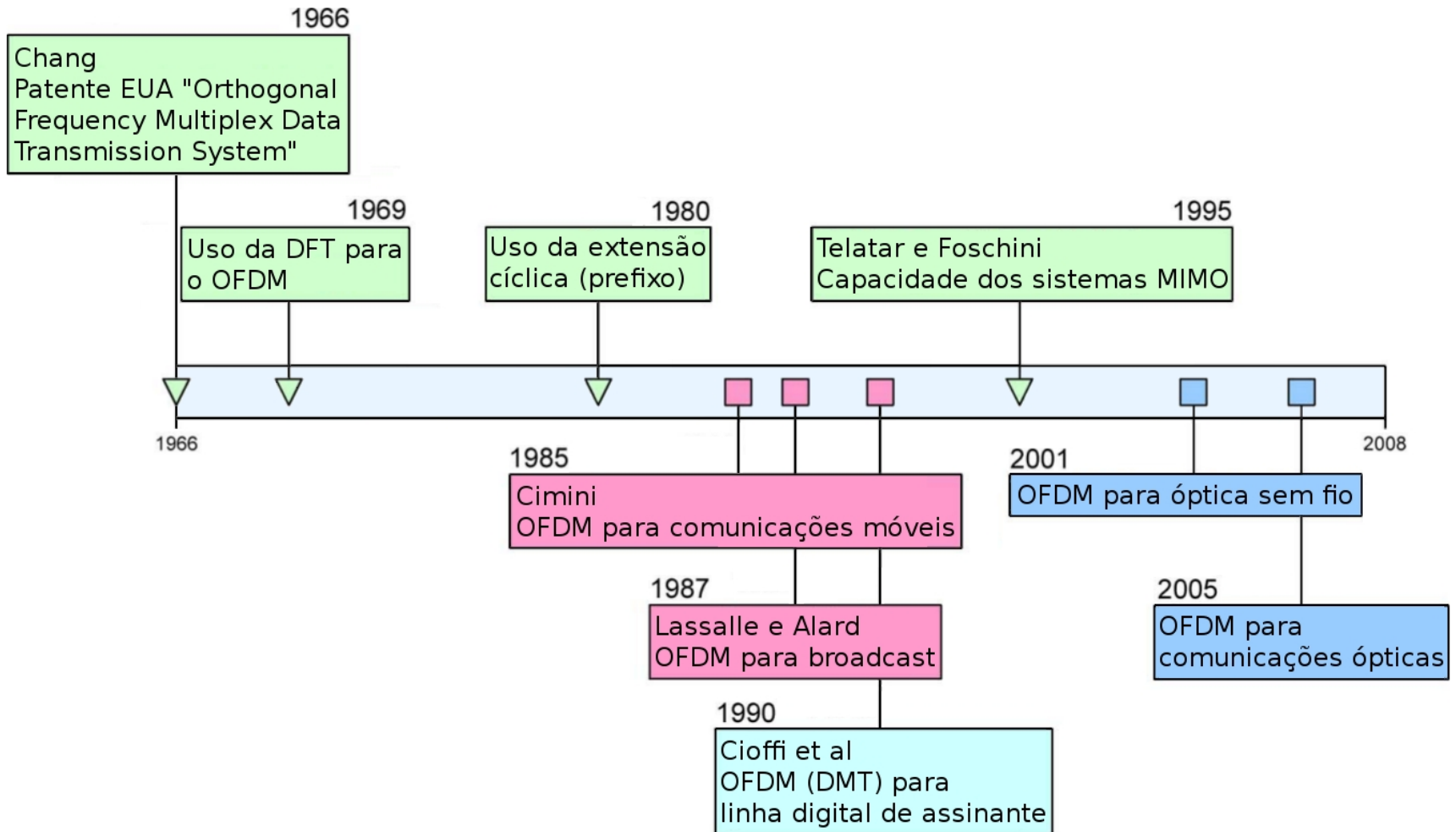


OFDM

- Desvantagens
 - Alta razão potência de pico / potência média (PAPR)
 - Demanda dispositivos com grande faixa dinâmica e alta linearidade (amplificadores, moduladores)
 - Sensibilidade ao deslocamento de frequência e ruído de fase
 - Pode destruir a ortogonalidade das portadoras provocando interferência entre elas e degradação do desempenho do sistema.
 - Necessidade de fontes laser de largura de linha estreita



OFDM – Linha do tempo



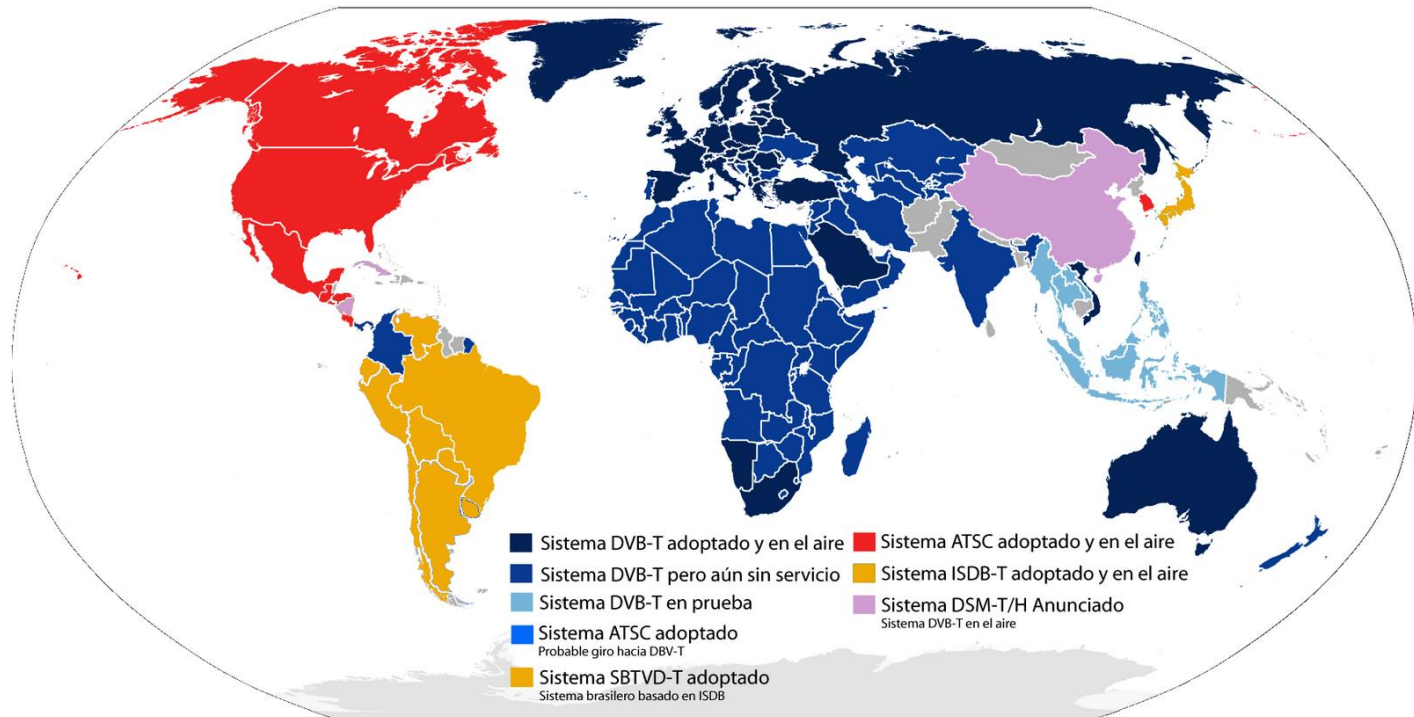


OFDM - Aplicações

- Aplicações

- Televisão Digital

- ISDB-T (Integrated Services Digital Broadcasting Terrestrial)
 - DVB-T (Digital Video Broadcasting Terrestrial)



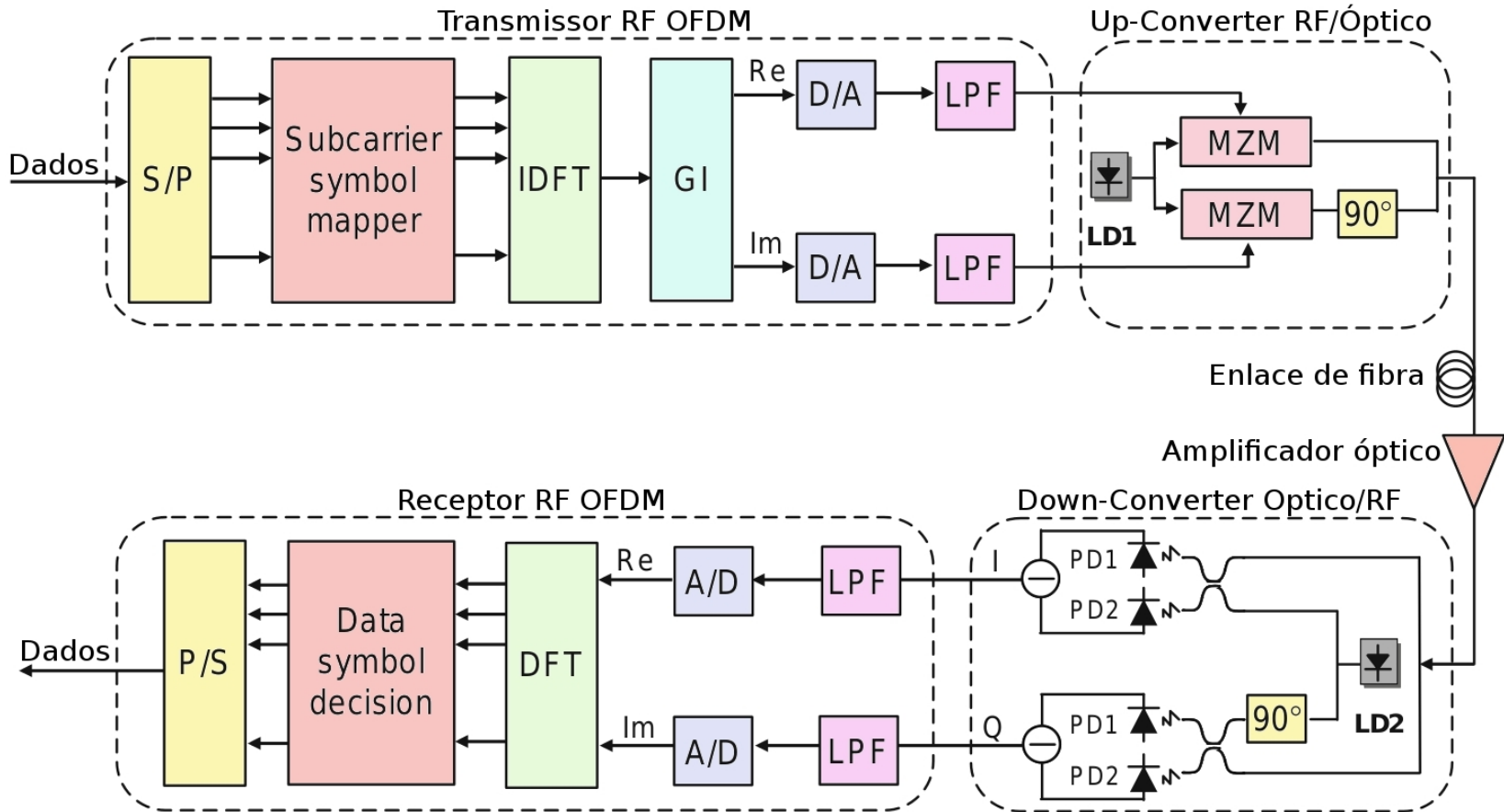


OFDM - Aplicações

- Aplicações
 - Rádio Digital
 - DAB (Digital Audio Broadcasting)
 - Telefonia Móvel
 - LTE (Long Term Evolution) - 4G
 - Redes sem fio
 - Redes LAN
 - IEEE 802.11a - WiFi
 - IEEE 802.11g - WiFi
 - Redes de acesso de banda larga
 - IEEE 802.16 – WiMax
 - Redes com fio
 - ADSL (asymmetric digital subscriber loop)



OFDM elétrico modulando portadora óptica



S/P Serial/Paralelo
 D/A Digital/Analógico
 LD Diodo Laser

GI Inserção do Tempo de Guarda
 LPF Filtro Passa Baixa
 PD Fotodiodo

DFT Transformada de Fourier Discreta
 IDFT Transformada de Fourier Discreta Inversa
 MZM Modulador Mach-Zehnder



Rádio OFDM – diagrama básico

