

Aula prática nº 1

1- Calcule os espectros dos seguintes sinais e represente-os graficamente:

a) $\cos(2\pi f_c t)$.

b) $\sin(2\pi f_c t)$.

c) $\text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right)$.

d) Trem de impulsos rectangulares: $\sum_{k=-\infty}^{+\infty} \text{rect}\left(\frac{t - k\tau_2}{\tau_1}\right)$.

Explique o efeito que a variação de τ_1 e τ_2 têm sobre o espectro deste sinal.

2- O espectro do sinal de televisão analógica pode ser aproximado pelo espectro do trem de impulsos rectangulares quando modulado numa portadora. Indique a expressão desse sinal resultante e represente esse espectro graficamente.

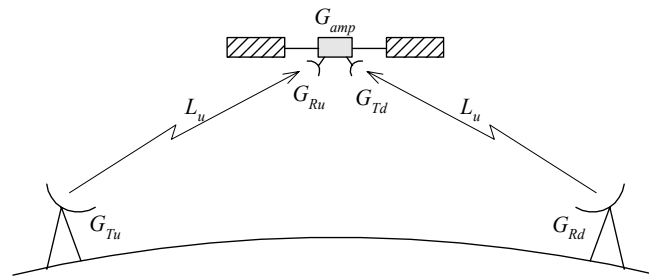
3-

a) Exprima em unidades logarítmicas as grandezas: 2, 5, 10, 100 e 1000.

b) Determine a relação entre as unidades de potência em dBW e em dBm.

4- Uma ligação de satélite é caracterizada pelos seguintes parâmetros:

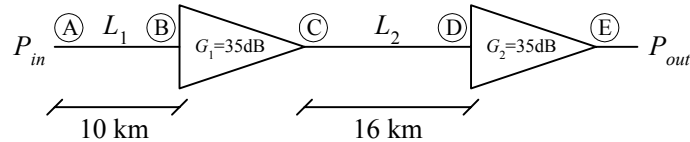
- Ganho da antena de emissão na ligação ascendente: $G_{Tu}=50$ dB;
- Ganho da antena de recepção na ligação ascendente: $G_{Ru}=50$ dB;
- Ganho da antena de emissão na ligação descendente: $G_{Td}=50$ dB;
- Ganho da antena de recepção na ligação descendente: $G_{Rd}=50$ dB;
- Atenuação do percurso ascendente: 150 dB;
- Atenuação do percurso descendente: 150 dB.



Sendo a potência de emissão $p_m=1$ kW, qual deverá ser o ganho do amplificador do satélite, G_{amp} , de forma a se garantir uma potência de recepção $p_o=15$ dBm?

Aula prática n.º 2

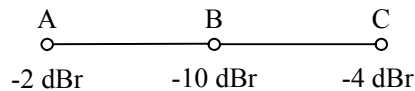
1- Considere o sistema de transmissão abaixo representado.



A atenuação da linha de transmissão é de 3dB/km e o ganho dos amplificadores é de 35dB. Represente num diagrama de níveis o nível absoluto e o relativo (dBr, relativos ao ponto de entrada) em todos os pontos do sistema, admitindo que o nível absoluto na entrada é -10 dBm.

2- Com base na figura calcule:

- A potência do sinal medida no ponto B admitindo que no ponto de nível zero se injecta uma potência de 1mW.
- O valor do ganho (perdas) que o sinal sofre quando se propaga de A a C.
- O valor da potência de ruído medida no ponto de nível zero e em C, admitindo que o nível absoluto da potência em B é de -60 dBm.



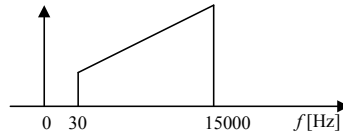
3- O sinal $x_m(t)$ modula a portadora $x_p(t)=\cos(2\pi f_c t)$ numa modulação de amplitude convencional (AM). Sendo $t_0=15$ s, $f_c=250$ Hz, o índice de modulação $\mu=0,85$ e o sinal da mensagem definido por

$$x_m(t) = \begin{cases} 1 \text{ V} & 0 \leq t \leq \frac{t_0}{3} \\ -\frac{1}{2} \text{ V} & \frac{t_0}{3} \leq t \leq \frac{2}{3} t_0 \\ 0 & t \geq \frac{2}{3} t_0 \end{cases}$$

- Obtenha uma expressão para o sinal modulado, $x_c(t)$, e represente-a graficamente no tempo;
- Obtenha o espectro da mensagem $x_m(t)$ e do sinal modulado $x_c(t)$ e represente-os graficamente;
- Admitindo que o sinal $x_m(t)$ é periódico com período $T=t_0$, determine a potência do sinal modulado e a eficiência de potência da modulação.
- Sendo a relação sinal-ruído na saída do desmodulador de 10 dB, qual é a potência do ruído na saída do desmodulador (em dBm), admitindo uma impedância de 50Ω , e qual a relação sinal-ruído na entrada? Indique qual o tipo de desmodulador que considerou.

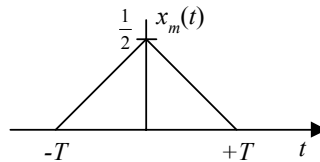
Aula prática nº 3

1- Um sinal de áudio ocupa a banda entre 30Hz e 15 kHz. Este sinal é modulado em banda lateral dupla (DSB - *double side band*) e transmitido num canal selectivo na frequência, sendo a banda passante delimitada por 90 kHz e 120 kHz. Determine a frequência da portadora apropriada para a transmissão descrita.



2- Sendo o sinal modulante $x_m(t)=\cos(2\pi f_m t)$, verifique que um erro de fase ϕ no oscilador local (O.L.) tem consequências menos graves em SSB (*single side band*) do que num sinal modulado em DSB (*double side band*).

3- A mensagem $x_m(t)$ corresponde a um sinal triangular, conforme a figura, em que $T=1\mu s$. Esse sinal modula em AM uma portadora $x_p(t)=A_c \cos(2\pi f_c t)$, com um índice de modulação $\mu=0,5$. A largura de banda do filtro passa-banda do desmodulador síncrono é $B_T=2,5\text{MHz}$ e a largura do filtro passa-baixo do mesmo desmodulador é igual a 1,25 MHz.



- Obtenha a expressão analítica do espectro do sinal $x_m(t)$ e do espectro do sinal modulado $x_c(t)$ e represente-os graficamente.
- Considere uma densidade espectral de potência na entrada no receptor dada por $G_n(f)=\eta=2\times 10^{-13} \text{ A}^2/\text{Hz}$. Sendo $x_m(t)$ periódico, com período $2T$, impondo uma relação sinal-ruído na saída do desmodulador de $S_0/N_0=40\text{dB}$, qual o valor da amplitude da portadora, A_c , que garante essa relação?

Aula prática n.º 4

Considere um sistema de telefonia múltipla por divisão na frequência com 600 canais de 4 kHz de largura de banda que vai modular em frequência uma portadora de 2 GHz.

- Calcule a potência do sinal sinusoidal a injectar no ponto de nível zero do sistema tal que provoque o mesmo desvio eficaz de frequência que o sinal de telefonia múltipla na hora de ponta.
- Calcule a largura de banda em radiofrequência se o desvio de frequência por canal for o recomendado pela ITU.
- Calcule o limiar teórico de sensibilidade para um factor de ruído do receptor de 8 dB. Exprima esse valor em dBm e em V se a entrada se fizer por um cabo coaxial de 75 Ω.
- Calcule a relação sinal-ruído psfométrica, com e sem pré-ênfase no canal superior, para um sinal à entrada com potência de recepção, C , igual ao limiar teórico de sensibilidade.

Formulário:

Largura de banda de Carson: $B_{Carson} = 2 \times (\Delta f_{\max} + f_{\max})$.

Relação sinal-ruído após desmodulação FM: $\frac{s}{n} = \frac{c}{n} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{\Delta f_{\max}^2}{f_M^2} \cdot \frac{B_{RF}}{B_{BB}}$.

Recomendações da ITU para FDM:

$$\bar{P}_{[dBm0]} = \begin{cases} -1 + 4 \log_{10}(n), & 12 < n < 140 \\ -15 + 10 \log_{10}(n), & n \geq 140 \\ 2,6 + 2 \log_{10}(n), & 12 \leq n < 60 \end{cases}, \text{ dependendo da estatística dos sinais.}$$

Potência máxima do canal de multiplex: $P_{maz} = \bar{P} + \Delta c$.

Factor de pico multicanal: $\Delta c_{[dB]} = 10,5 + \frac{40\sigma}{n\tau_L + 5\sqrt{2}\sigma}$.

Desvio padrão da voz: 5,8 dB.

Factor de utilização do canal na hora de ponta: 25%.

- Tabela de características preferidas para os sinais de telefonia múltipla por divisão na frequência.

Número de canais telefónicos (n)	Frequências limites da banda ocupada por canais telefónicos [kHz]	Frequências limites da banda de base [kHz]	Impedância nominal nos pontos de ligação [Ω]
12	12-60 60-108	12-60 60-108	– –
24	12-108	12-108	150 assim.
60	12-252 60-300	12-252 60-300	150 assim. 75 assim.
120	12-552 60-552	12-552 60-552	150 assim. 75 assim.
300	60-1300 60-1296	60-1364 60-1364	75 assim.
600	60-2540 64-2660	60-2792 60-2792	75 assim.
960	60-4028	60-4287	75 assim.
1260	60-5636 60-5564 316-5564	60-5680	75 assim.
1800	312-8204 326-8204 312-8120	300-8248	75 assim.
2700	312-12388 316-12388 312-12336	300-12435	75 assim.

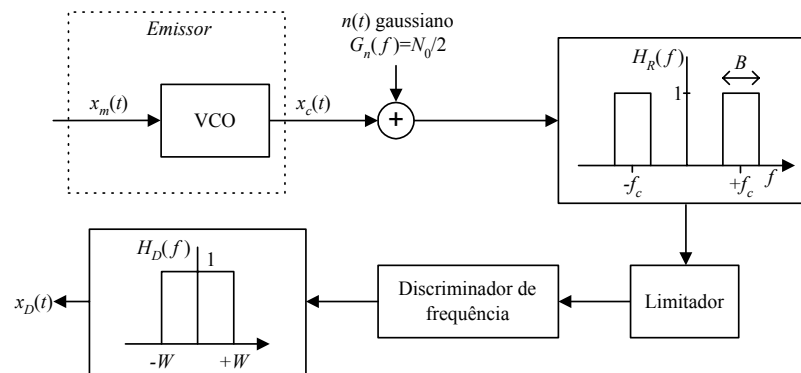
- Tabela do desvio eficaz de frequência por canal em função do número de canais telefónicos do sinal de telefonia múltipla por divisão na frequência.

Número de canais telefónicos (n)	Desvio eficaz de frequências por canal [kHz]
12	35
24	35
60	50, 100, 200
120	50, 100, 200
300	200
600	200
960	200
1260	140, 200
1800	140
2700	140

Aula prática n° 5

1- Verifique que um discriminador para desmodular um sinal FM pode ser realizado por um circuito diferenciador seguido de um circuito detector de envolvente com bloqueio DC (*direct current*), tal como o utilizado para desmodular um sinal AM.

2- Considere um sistema de transmissão em FM em que o desmodulador possui a estrutura que está figura.



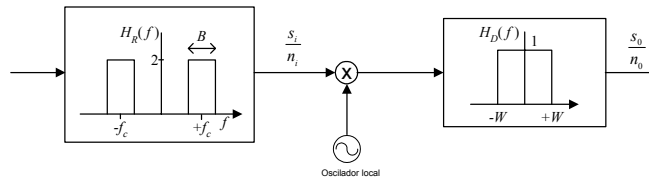
- Obtenha uma expressão para a relação sinal-ruído na saída do desmodulador e compare-a com a obtida num sistema AM.
- Admitindo que este receptor está a desmodular um sinal com largura de banda $W=15$ kHz, desvio de frequência $\Delta f=75$ kHz, e potência $P_x=0$ dBm, compare a relação sinal ruído à saída deste desmodulador de FM com a obtida no caso da transmissão em AM.
- Nas condições da alínea anterior, compare a largura de banda utilizada (de Carson) com a largura necessária para a mesma transmissão em AM.

Aula prática nº 6

Uma mensagem $x_m(t)$ é descrita pelo sinal $\text{rect}\left(\frac{t+T/2}{T}\right) - \text{rect}\left(\frac{t-T/2}{T}\right)$, sendo $T=0,1$ ms e

$$\text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) = \begin{cases} 1, & |t| \leq T/2 \\ 0, & |t| > T/2 \end{cases}$$

Esta mensagem vai modular em banda lateral dupla com supressão de portadora (DSB) uma portadora $x_c(t)=A_c \cos(2\pi f_c t)$, originando o sinal $x_{\text{DSB}}(t)$. A frequência da portadora é $f_c=2$ MHz. O sinal DSB é desmodulado por um desmodulador síncrono, com a seguinte estrutura:



O filtro passa-banda é um filtro com uma função de transferência rectangular, uma largura de banda de 50 kHz e uma amplitude igual a 2. A densidade espectral de potência (unilateral) de ruído na entrada do desmodulador é igual a $G_n(f)=5 \times 10^{-12} \text{ V}^2/\text{Hz}$.

- Represente a variação de $x_{\text{DSB}}(t)$ no domínio do tempo.
- Obtenha uma expressão para o espectro de $x_m(t)$ e represente-o graficamente.
- Calcule o espectro do sinal modulado $x_{\text{DSB}}(t)$ e represente-o graficamente.
- Exprima analiticamente a função de transferência do filtro passa-banda.
- Fazendo as hipóteses que lhe parecerem mais apropriadas, calcule a largura de banda mínima do filtro passa-baixa e represente a sua função de transferência.
- Calcule a potência de ruído na saída do filtro passa-banda (n_i) e exprima o resultado em dBm e dBW sendo a impedância de saída do filtro igual a 50Ω .
- Admitindo que o sinal gerado pelo oscilador local é dado por $x_1(t)=0,5 \cdot \cos(2\pi f_c t)$, deduza uma expressão para a relação sinal-ruído na saída (s_o/n_o) em função da relação sinal-ruído na entrada (s_i/n_i).
- Determine o valor da amplitude da portadora modulante (A_c) de modo a garantir uma relação sinal-ruído na saída de 40 dB, exprimindo o resultado em Volt.
- Admitindo que no seu receptor não disponha de um gerador local de portadora sinusoidal mas apenas de um gerador de onda quadrada com a mesma amplitude 0,5 V e frequência f_c , mostre que poderia efectuar a desmodulação do sinal e indique o esquema de blocos correspondente. Justifique a sua resposta indicando em cada ponto qual a expressão do sinal nos domínios do tempo e da frequência desenhando também as respectivas forma de onda e o espectro.

Aula prática nº 7

1-

- a) “A comunicação por impulsos é uma comunicação intermédia entre a comunicação analógica e a digital”. Comente esta afirmação.
- b) Descreva os vários tipos de comunicação por impulsos que conhece e aponte vantagens e desvantagens inerentes a cada uma delas.
- c) A largura de banda exigida numa comunicação por impulsos é maior ou menor que na comunicação em banda de base? Porquê? (Justifique obtendo o espectro analítico.)
- d) Qual a principal vantagem que se pode extrair da comunicação por impulsos?

2-

Considere 6 sinais que pretende multiplexar por divisão no tempo. Estes sinais têm como frequências máximas $W_1=4200$ Hz, $W_2=2100$ Hz, $W_3=1010$ Hz, $W_4=550$ Hz, $W_5=280$ Hz, e $W_6=110$ Hz. Construa uma solução com um número máximo de 18 impulsos por trama. Pretende-se uma solução com um ritmo máximo de símbolos de 20000 símbolos por segundo ($R_s \leq 20000$ baud). Não preveja a inclusão do símbolo “marker”.

- a) Quais os cuidados a ter quando se projecta a amostragem?
- b) Fixe a frequência de trama e desenhe uma trama respectiva.
- c) Trace o esquema de multiplexagem.
- d) Considerando agora que $W_5=262,5$ Hz e que todas as outras larguras de banda se mantêm, resolva o problema de forma a incluir um *marker* nas tramas com as mesmas 18 posições.

Aula prática nº 8

1- Considere um computador interligado através duma interface do tipo RS-232, transmitindo em banda de base a 19200 bps.

- a) Desenhe as formas de onda para a sequência de bits “1 0 0 1 1 0 1 0 1 1 1 0 0 0” no caso do código de linha usado ser
- i) unipolar NRZ;
 - ii) polar RZ;
 - iii) polar NRZ;
 - iv) Manchester;
 - v) quaternário ($M=4$), com seguinte mapeamento linear.

Tensão	Símbolo
+12 V	1 1
+5 V	1 0
-5 V	0 1
-12 V	0 0

- b) Represente os espectros associados a cada tipo de código de linha.
- c) Determine o ritmo de símbolo no canal para cada um dos códigos referidos.
- d) Aponte vantagens e desvantagens associadas a cada esquema de codificação de linha.

2-

- a) Admita que para limitar o ruído numa cadeia de transmissão digital em banda de base se usam dois filtros passa-baixo (um no emissor e outro no receptor), de acordo com o primeiro critério de Nyquist, em que se o factor e excesso de banda $\alpha=0,2$, calcule a largura de banda equivalente de ruído. Esse valor depende de α ?
- b) Sendo $\sigma=0,2326$, calcule a probabilidade de erro de símbolo, P_e , e a probabilidade de erro de bit, P_b , considerando que os bits são equiprováveis e que $a_k \in \{-1, +1\}$ [V].

3- Considere uma cadeia de 5 computadores em série (4 troços). Sendo os sinais regenerados em cada computador e sendo a probabilidade de erro em cada troço a calculada no problema 2b), qual é a probabilidade de erro no fim da cadeia?

Aula prática n.º 9

1-

a) Construa a forma de onda após o filtro adaptado à transmissão de um sinal digital com impulsos suporte $r(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_b}\right)$ usando os códigos de linha

i) polar NRZ;

ii) unipolar NRZ;

iii) Manchester.

b) Construa os padrões de olho respectivos.

2- Pretende-se efectuar uma transmissão em banda de base com $P_b \leq 10^{-5}$ usando um código polar NRZ, sendo $\frac{P}{N_0} = 7,1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$.

a) Qual o ritmo binário máximo possível para fazer a transmissão no caso de a largura de banda disponível em banda de base ser:

i) $B = 100 \text{ kHz}$;

ii) $B = 500 \text{ kHz}$.

b) Que soluções se poderiam adoptar para aumentar o ritmo binário de transmissão em cada um dos casos?

Aula prática nº 10

1-

- a) Relacione a distância euclidiana com a energia de bit numa constelação BPSK.
- b) Faça o mesmo para a constelação QPSK.
- c) Verifique que a comunicação binária antipodal sobre portadora sinusoidal tem o mesmo desempenho que a comunicação binária polar NRZ, em banda de base.
- d) Verifique que o desempenho também se mantém o mesmo na transmissão em QPSK.

2-

- a) Qual a largura e banda necessária para transmitir um sinal digital a 50 kbps com as seguintes modulações:
 - i) BPSK;
 - ii) QPSK;
 - iii) 8-PSK;
 - iv) 2-FSK (com $f_d = R_b/4$).
- b) Verifique que o desempenho da modulação 8-PSK com codificação de Gray é uma caso particular da expressão geral do desempenho da M -PSK:

$$P_b = \frac{2}{\log_2(M)} Q\left(\sqrt{2 \log_2(M) \operatorname{sen}^2\left(\frac{\pi}{M}\right) \frac{E_b}{N_0}}\right).$$

- c) Sendo $E_b/N_0 = 8$ dB, qual a probabilidade de erro da comunicação 8-PSK?

3-

Apresentação dum simulador de transmissões digitais.

Demonstrações de transmissão digital simulada.

Aula prática nº 11

1- Considere uma fonte discreta sem memória constituída por 3 mensagens de probabilidade 0,15 cada uma, 5 mensagens de probabilidade 0,1 cada e uma mensagem de probabilidade 0,05.

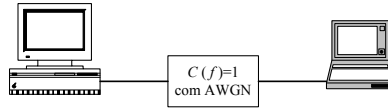
- a) Calcule a entropia da fonte.
- b) Se não tivesse feito o cálculo da entropia qual seria o valor máximo possível do seu valor? A que fonte corresponderia essa entropia?
- c) Obtenha o melhor código binário uniforme para a fonte para a qual se fornecem as probabilidades das mensagens. Qual o número médio de símbolos por mensagem deste código?
- d) Sem efectuar extensão de fonte, escreva as duas formas possíveis de código respeitando as regras de construção de códigos de Shannon-Fano e compare as respectivas eficiências, sem necessidade de as calcular.
- e) Obtenha um código de Huffman para esta fonte. Existem dois códigos de Huffman, tal como existiam dois códigos de Shannon-Fano?
- f) Parece-lhe que seria fácil obter um código de fonte com uma eficiência muito superior à dos códigos que construiu?

2- Considere uma fonte discreta sem memória que gera uma mensagem de um conjunto de 5, em cada segundo. As mensagens são equiprováveis. A informação deve ser transmitida através de um canal binário simétrico sem ruído.

- a) Calcule o ritmo de transmissão de informação da fonte em bps.
- b) Assumindo que cada mensagem é individualmente codificada com igual número de símbolos binários, calcule a taxa de símbolos binários por segundo que o canal deve processar para que seja possível a comunicação.
- c) Calcule a capacidade do canal determinado em b).
- d) Obtenha um código de Huffman que lhe permita enviar a informação por um canal com capacidade inferior a essa e calcule a sua eficiência.

Aula prática nº 12

Pretende-se projectar uma ligação para transmissão digital entre dois computadores com um ritmo binário $R_b = 4800$ bps. O canal é uma linha bifilar que não introduz distorção nem de amplitude nem de fase, i.e., $C(f)=1$. Porém existe ruído branco aditivo gaussiano.



- a) Se a linha bifilar tivesse uma largura de banda infinita, qual o código de linha que escolheria de forma a que

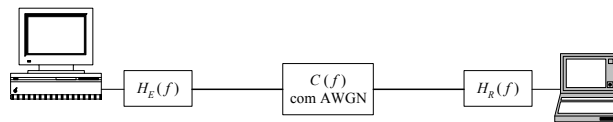
$$h(t) = \text{rect}\left(\frac{t - T_b / 2}{T_b}\right)$$

fosse um filtro adaptado?

- b) Se a linha bifilar tiver uma característica de frequência

$$C(f) = \text{rect}\left(\frac{f - 1850 \text{ Hz}}{3100 \text{ Hz}}\right), \text{ para } f > 0,$$

qual a melhor codificação de linha para transmitir os dados? Represente o sinal para a sequência binária “1001110” e esboce o espectro do sinal.



- c) Agora considere que

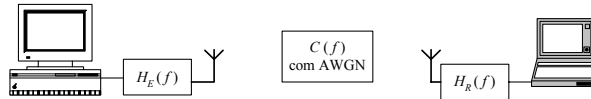
$$C(f) = \text{rect}\left(\frac{f}{3100 \text{ Hz}}\right), \forall f.$$

Sabendo que à saída do computador emissor o sinal é polar NRZ, i.e.

$$x_e(t) = \sum_k \text{rect}\left(\frac{t - kT_s}{T_s}\right),$$

se quisermos minimizar a interferência inter-simbólica (ISI) no receptor, quais as funções de transferência que utilizaria no filtro de emissão, $H_E(f)$, e no filtro de recepção, $H_R(f)$? (Factores de excesso de banda disponíveis: $\alpha \in [0,2 \ 1]$.) Defina o código de linha que escolheu (M -aridade e formatação).

- d) Para a formatação de linha escolhida em c), sendo a relação sinal-ruído à entrada do receptor, $S/N=10$ dB, qual a probabilidade de erro, P_b , após o filtro de recepção?
- e) Continue a considerar que o sinal à saída do computador é o mesmo polar NRZ. Se, em vez da linha bifilar, for utilizada uma ligação sem fios com largura de banda $B = 4$ kHz, qual a modulação que considera mais apropriada?



- f) Para a modulação escolhida em e), projecte os filtros de emissão e de recepção de forma a minimizar a ISI e a eliminar a distorção do canal, i.e., que haja igualação do canal. (Factores de excesso de banda disponíveis: $\alpha \in [0,2 \ 1]$.)
- g) Determine a probabilidade de erro, P_b , sabendo que no andar de RF a relação entre a potência da portadora e a potência de ruído equivalente à entrada, C/N , é de 9 dB.

Formulário:

$$\text{Transmissão } M\text{-ária em banda de base: } P_b \cong 2 \frac{M-1}{M \log_2(M)} Q \left(\sqrt{\frac{6 \log_2(M) E_b}{M^2 - 1 N_0}} \right);$$

$$\text{BPSK, QPSK: } P_b = Q \left(\sqrt{2 \frac{E_b}{N_0}} \right)$$

$$M\text{-PSK } (M \geq 8): P_b = \frac{2}{\log_2(M)} Q \left(\sqrt{2 \log_2(M) \text{sen}^2 \left(\frac{\pi}{M} \right) \frac{E_b}{N_0}} \right)$$

$$M\text{-QAM: } P_b = \frac{4}{\log_2(M)} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) Q \left(\sqrt{\frac{3 \log_2(M) E_b}{M-1 N_0}} \right)$$

Aula prática nº 13

Demonstrações com *hardware*:

- Modulação de ultra-sons;
- Modulação de luz visível;
- Transmissão em fibra-óptica;
- Modulação de amplitude com transmissão via rádio;
- Modulação por impulsos codificados;
- Transmissão digital em banda de base (códigos de linha).