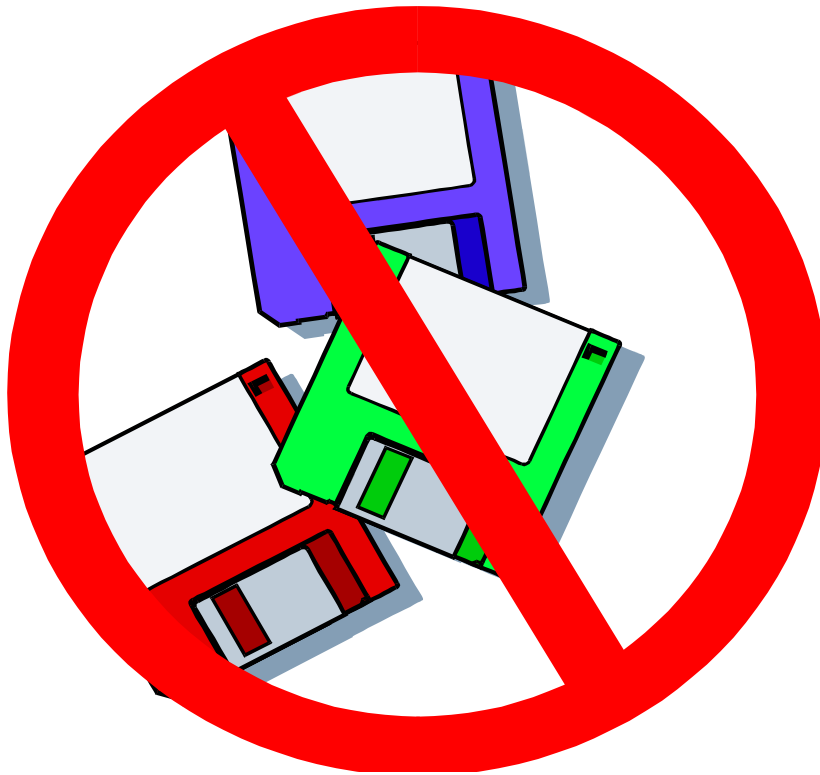


Modulação Digital e analógica

SEL 413 Telecomunicações

Amílcar Careli César
Departamento de Engenharia Elétrica da EESC-USP

Atenção!



- ✓ Este material didático é planejado para servir de apoio às aulas de **SEL 413 Telecomunicações**, oferecida aos alunos regularmente matriculados no curso de engenharia elétrica e engenharia de computação.
- ✓ Não são permitidas a reprodução e/ou comercialização do material.
- ✓ solicitar autorização ao docente para qualquer tipo de uso distinto daquele para o qual foi planejado.

Quantidades em bytes

Nome		Número de bytes		Quantidade de texto
quilobyte	kB	2^{10}	1.024	½ página
megabyte	MB	2^{20}	1.024 ²	500 páginas ou 1 livro ⁽¹⁾
gigabyte	GB	2^{30}	1.024 ³	500 mil pg ou 1.000 livros
terabyte	TB	2^{40}	1.024 ⁴	1 milhão de livros
petabyte	PB	2^{50}	1.024 ⁵	180 × Biblioteca do Congresso ⁽²⁾
exabyte	EB	2^{60}	1.024 ⁶	180 mil × Biblioteca do Congresso
zettabyte	ZB	2^{70}	1.024 ⁷	180 milhões × Biblioteca do Congresso
yottabyte	YB	2^{80}	1.024 ⁸	180 bilhões × Biblioteca do Congresso

⁽¹⁾1 livro grosso (~200 pg); ⁽²⁾ Biblioteca do Congresso dos EUA, Washington D.C.

28 milhões de volumes; 200 páginas em média por volume;

28 TB para armazenar tudo.

1 byte corresponde a 8 bits.

Ref.: www.wisegeek.org/how-much-text-is-in-a-kilobyte-or-megabyte.htm

<http://en.wikipedia.org/wiki/Byte>

Largura de faixa: áudio e vídeo

Audio Bit Rate (bps)	Qualidade/comentário
0,8 k	Mínimo necessário para reconhecimento de fala
8 k	Telefonia de qualidade (uso de codec)
224-320 k	Variable Bit Rate to highest MP3 quality
Video Bit Rate (bps)	Qualidade/comentário
1374 k	VCD (Vídeo CD) áudio e vídeo (multiplexados)
1,5-2 M 1.5 Mbps (typical)	SDTV de boa qualidade (compressão MPEG-4)
5-10 M 8 Mbps (typical)	HDTV - High Definition TV (compressão MPEG-4)
40 M	Blu-ray

- ✓ Super HD 2160i formato (8 megapixels): 32 to 60 Mbps por stream
- ✓ Ultra high definition (HD) 4320i formato (32 megapixels): 256 to 480 Mbps por stream

Ref.: http://en.wikipedia.org/wiki/Bit_rate#Bitrates_in_multimedia

The International Cablemakers Federation (ICF); www.icf.at/en/6000/how_much_bandwidth.html

Cenário de banda de alguns serviços

Serviço	Downstream (bps)	Upstream (bps)
HDTV (vários canais)	30 M	50 k
SDTV (vários canais)	8 M	50 k
Jogo on line	10 M	10 M
Videoconferência / aprendizado	3 M	3 M
VoIP	110 k	110 k
HSI	5 M	2 M
Navegação multimídia	8 M	2 M
Trabalho em casa	4 M	2 M
Total (estatística)	68 M	19 M

Padrão	MPEG-2 (Mbps)	Típico (Mbps)	MPEG-4 (Mbps)	Típico (Mbps)
SDTV	2 - 5	3	1,5 - 2	1,5
HDTV	15 - 20	16	5 - 10	8

k: 10³; M: 10⁶

HDTV: High-definition television;

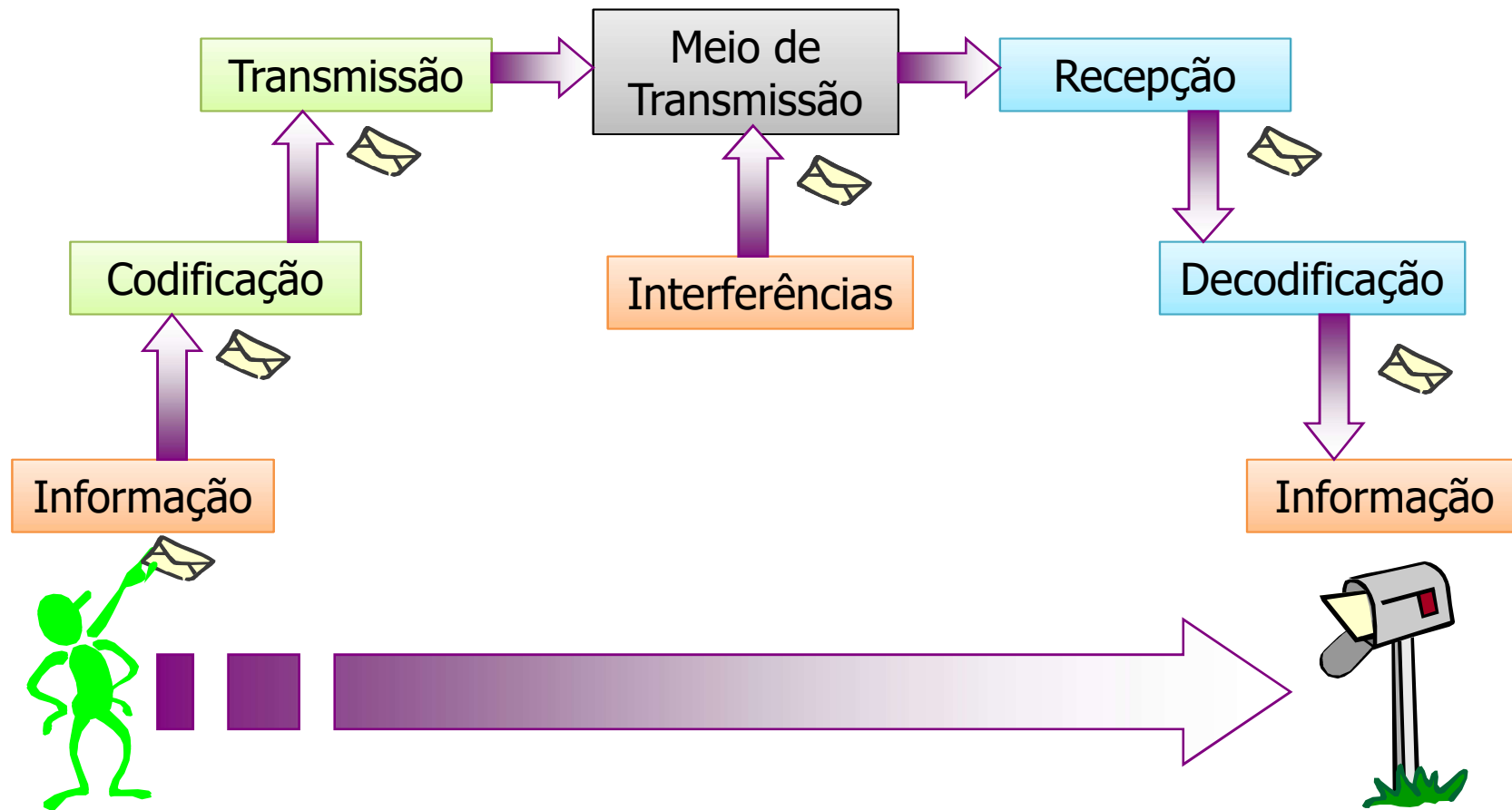
SDTV: Standard-definition television

HSI: High speed interface; **VoIP:** Voice over Internet Protocol

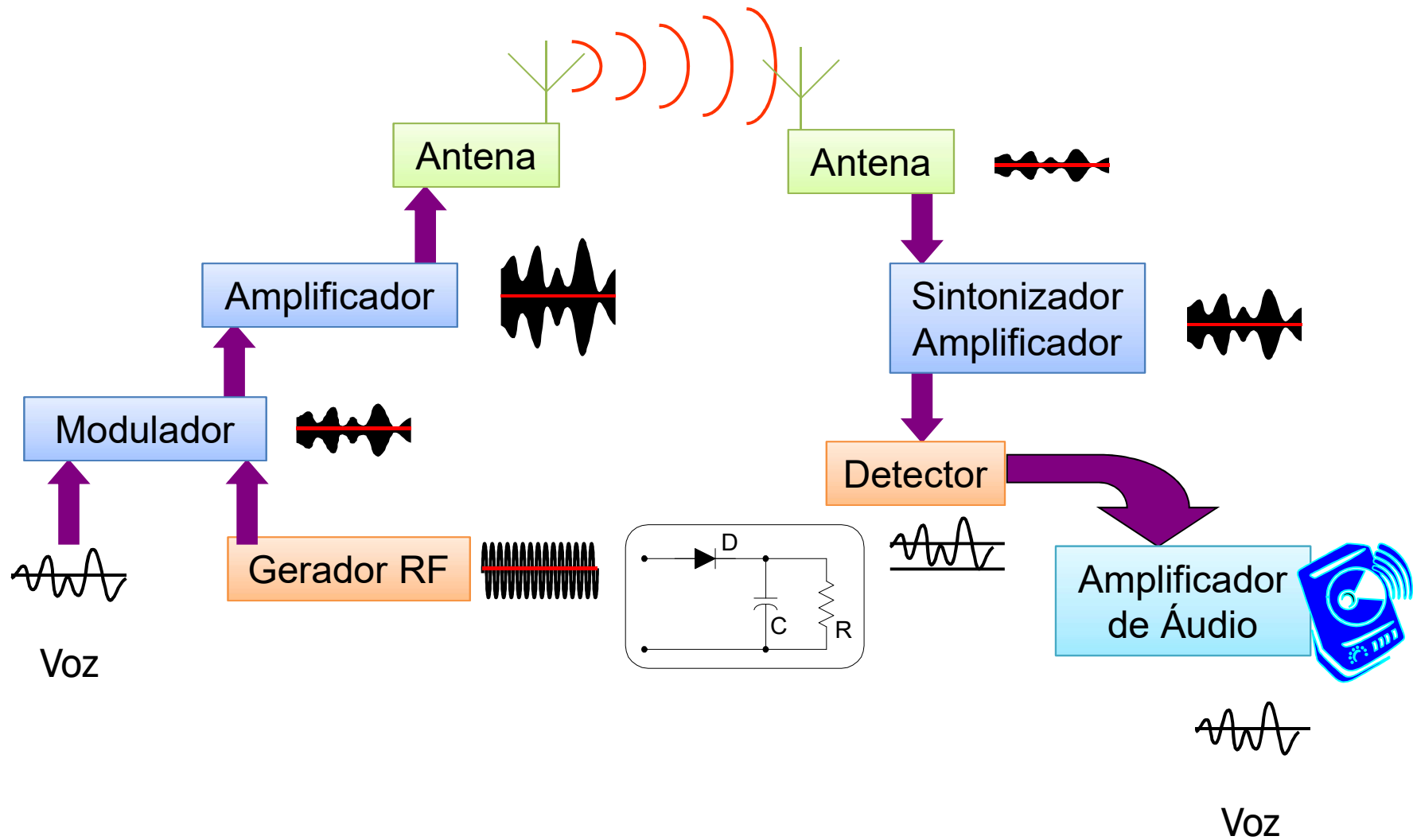
Ref.: R. W. Heron *et al.*, "Technology Innovations and Architecture Solutions for the Next-Generation Optical Access Network", Bell Labs Technical Journal 13(1), 163–182 (2008)

Ref.: The International Cablemakers Federation (ICF) http://www.icf.at/en/6000/how_much_bandwidth.html

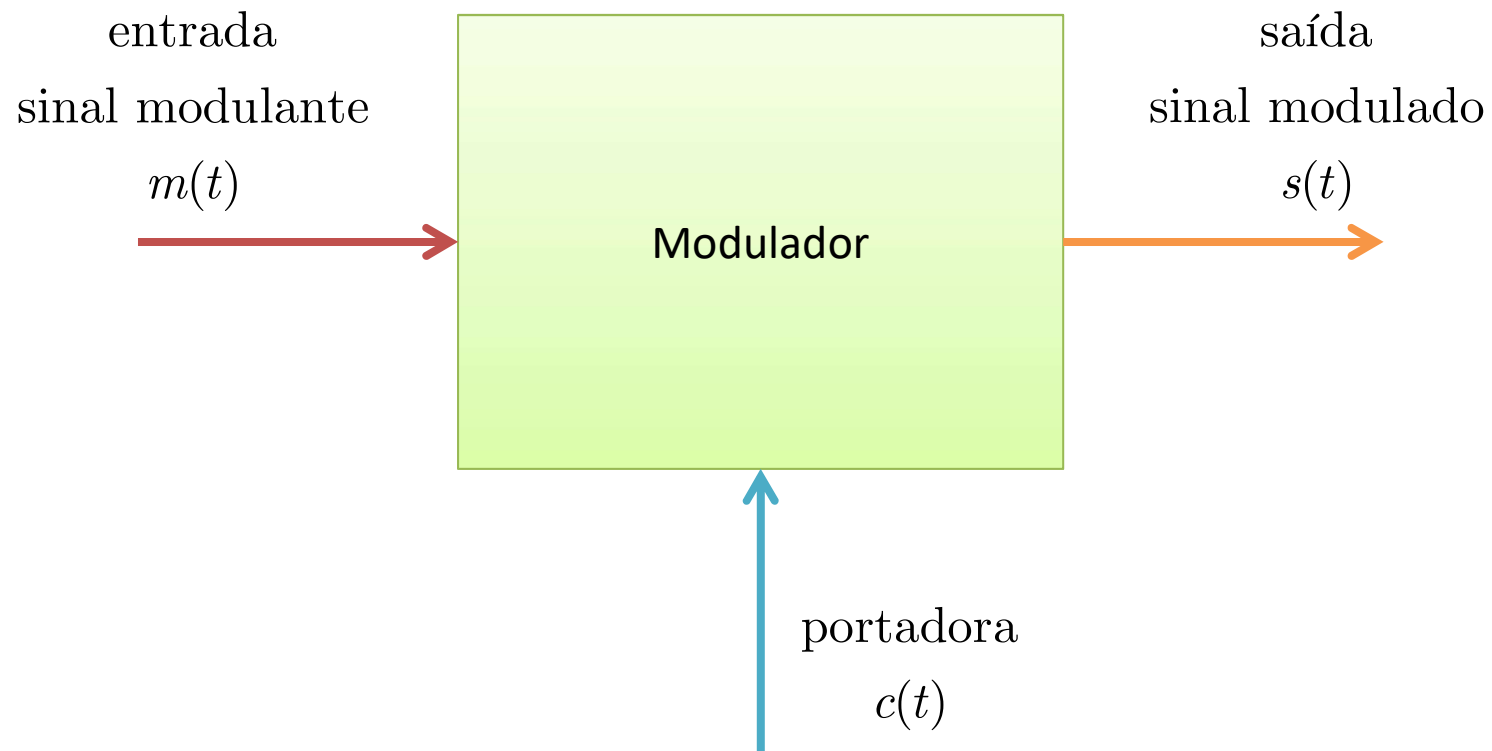
Sistemas de Comunicações



Modulação

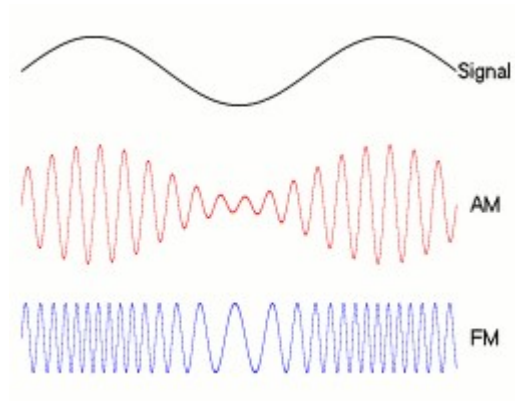


Modulação



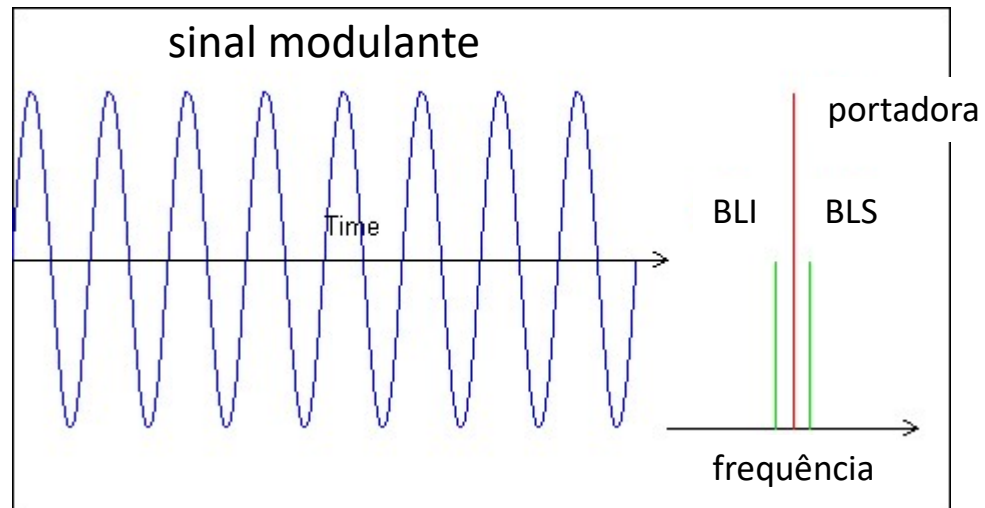
MODULAÇÃO ANALÓGICA

Modulação AM e FM



<http://en.wikipedia.org/wiki/Modulation>

Modulação em amplitude (1)



BLI: banda lateral inferior

BLS: banda lateral superior

http://en.wikipedia.org/wiki/Amplitude_modulation

<http://demonstrations.wolfram.com/AmplitudeModulation/>

Modulação em amplitude (2)

sinal modulante, banda base

$$m(t) = M_b \cos(2\pi f_b t)$$

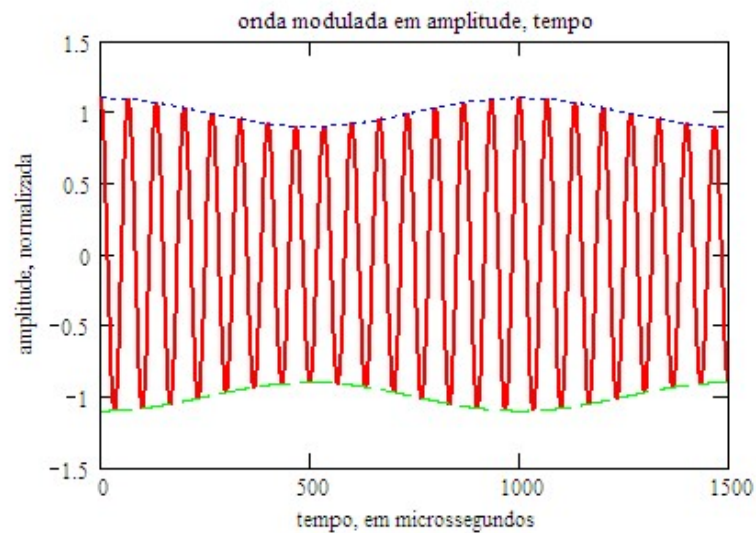
portadora

$$p(t) = A_p \cos(2\pi f_c t + \theta)$$

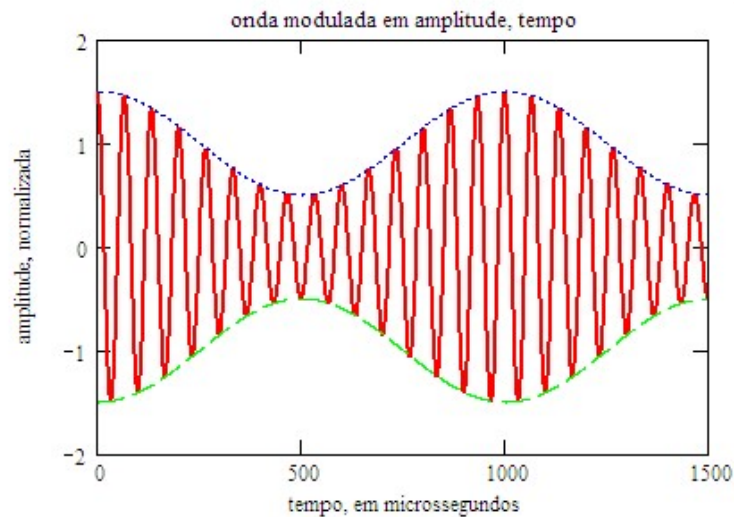
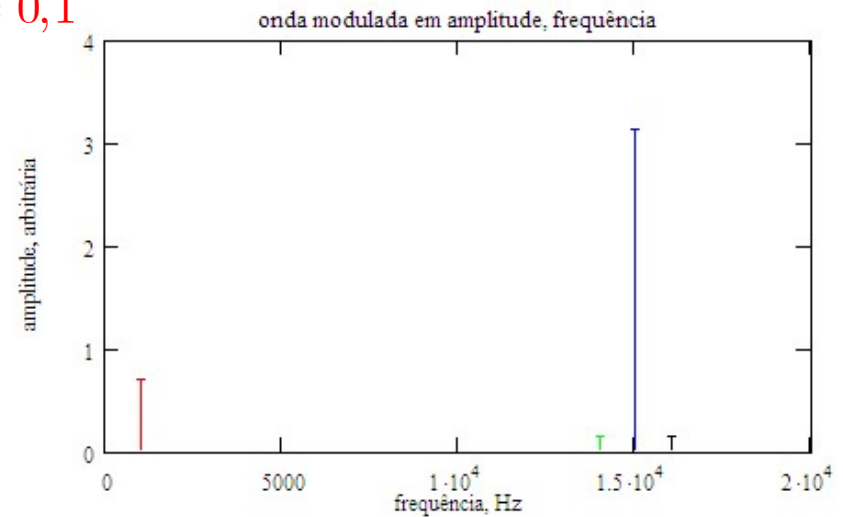
$$f(t) = \begin{cases} [1 + m(t)]p(t) \\ [1 + M_b \cos(2\pi f_b t)] A_p \cos(2\pi f_c t + \theta) \\ A_p \cos(2\pi f_c t) + \frac{M_b A_p}{2} \cos[2\pi (f_p - f_b)t - \theta] + \frac{M_b A_p}{2} \cos[2\pi (f_p + f_b)t + \theta] \end{cases}$$

$h = M_b/A_p$: índice de modulação

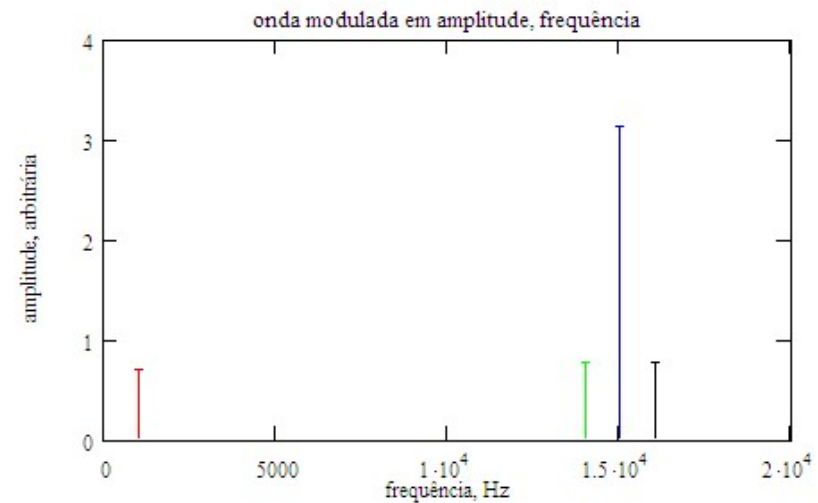
Modulação em amplitude (3)



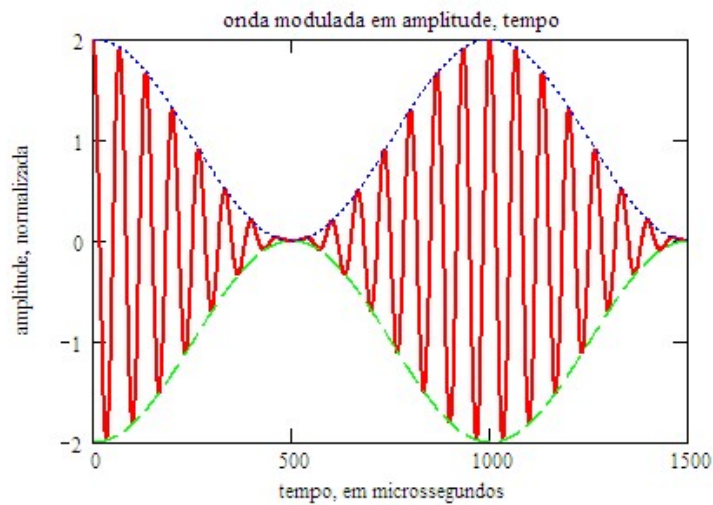
$h = 0,1$



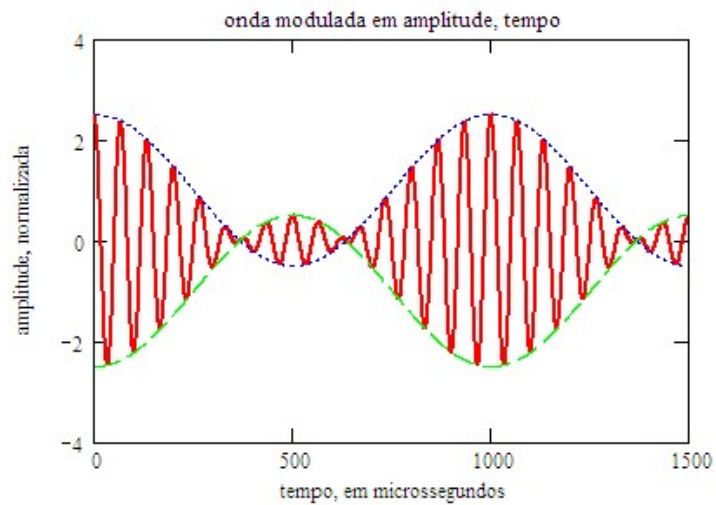
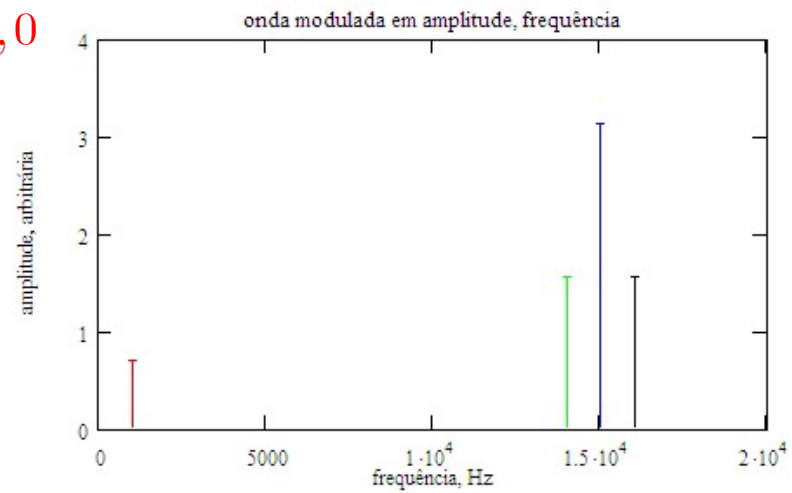
$h = 0,5$



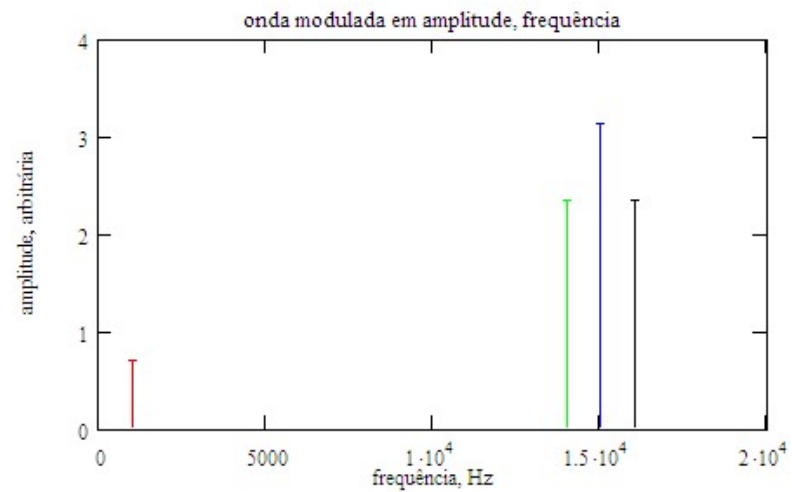
Modulação em amplitude (4)



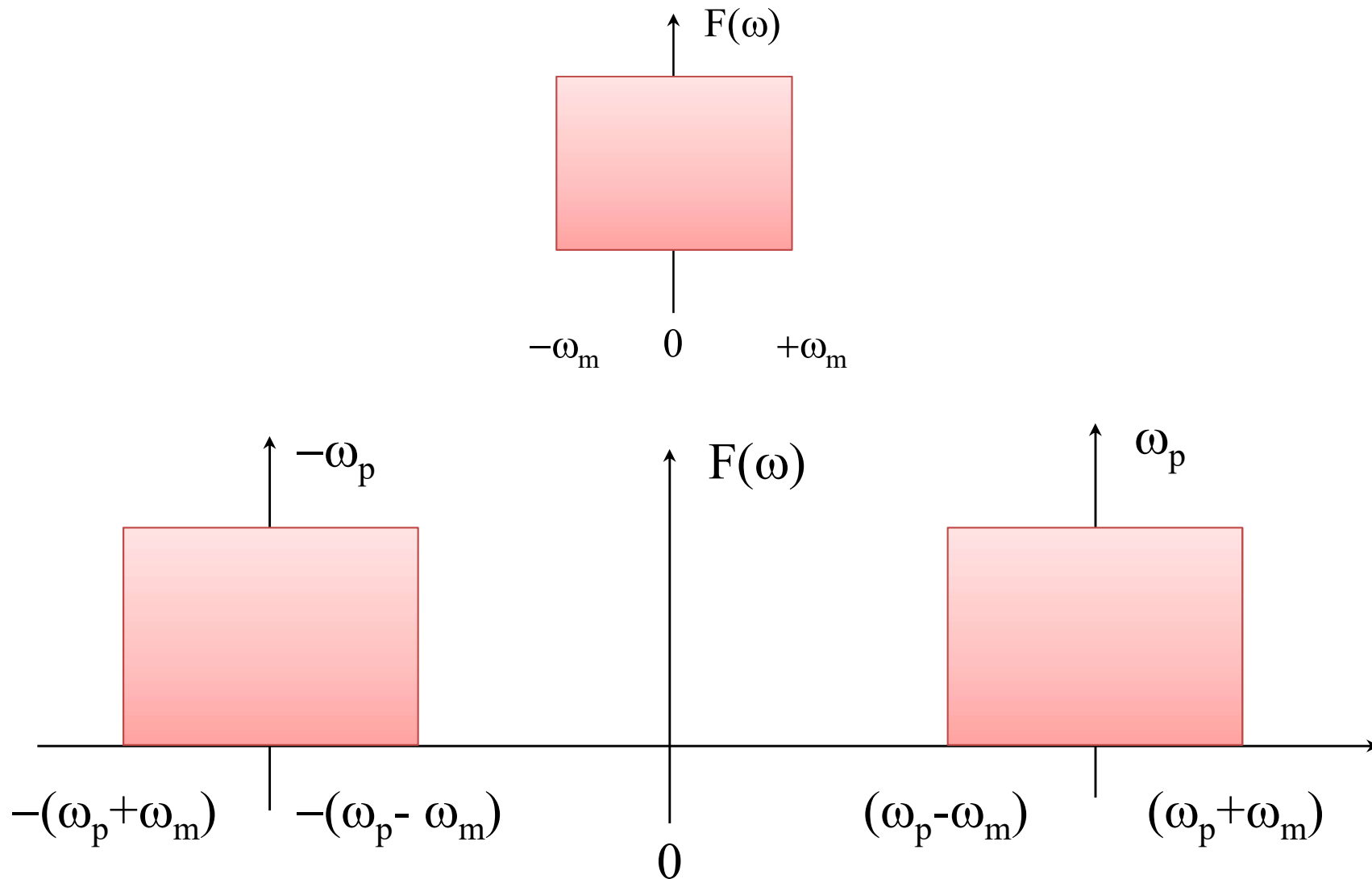
$h = 1,0$



$h = 1,5$



Modulação em amplitude (5)



Potência média

$$P_{\text{média, total}} = P_{\text{média, portadora}} + P_{\text{média, BLI}} + P_{\text{média, BLS}}$$

$$P_{\text{média, total}} = \frac{V_p^2}{2R} + \frac{h^2 V_p^2}{8R} + \frac{h^2 V_p^2}{8R} \quad \text{W}$$

R : resistor

h : índice de modulação

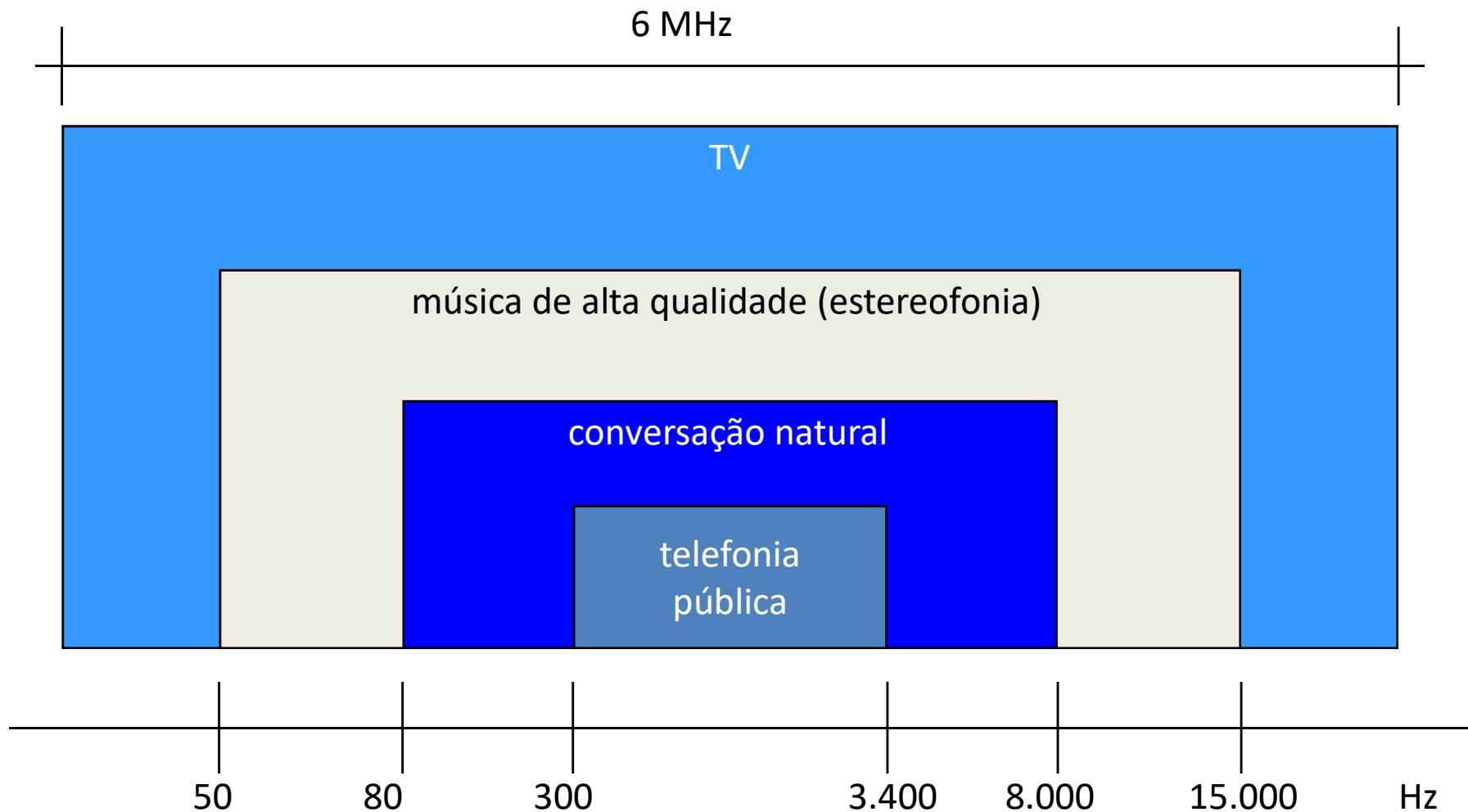
BLS: banda lateral superior

BLI: banda lateral inferior

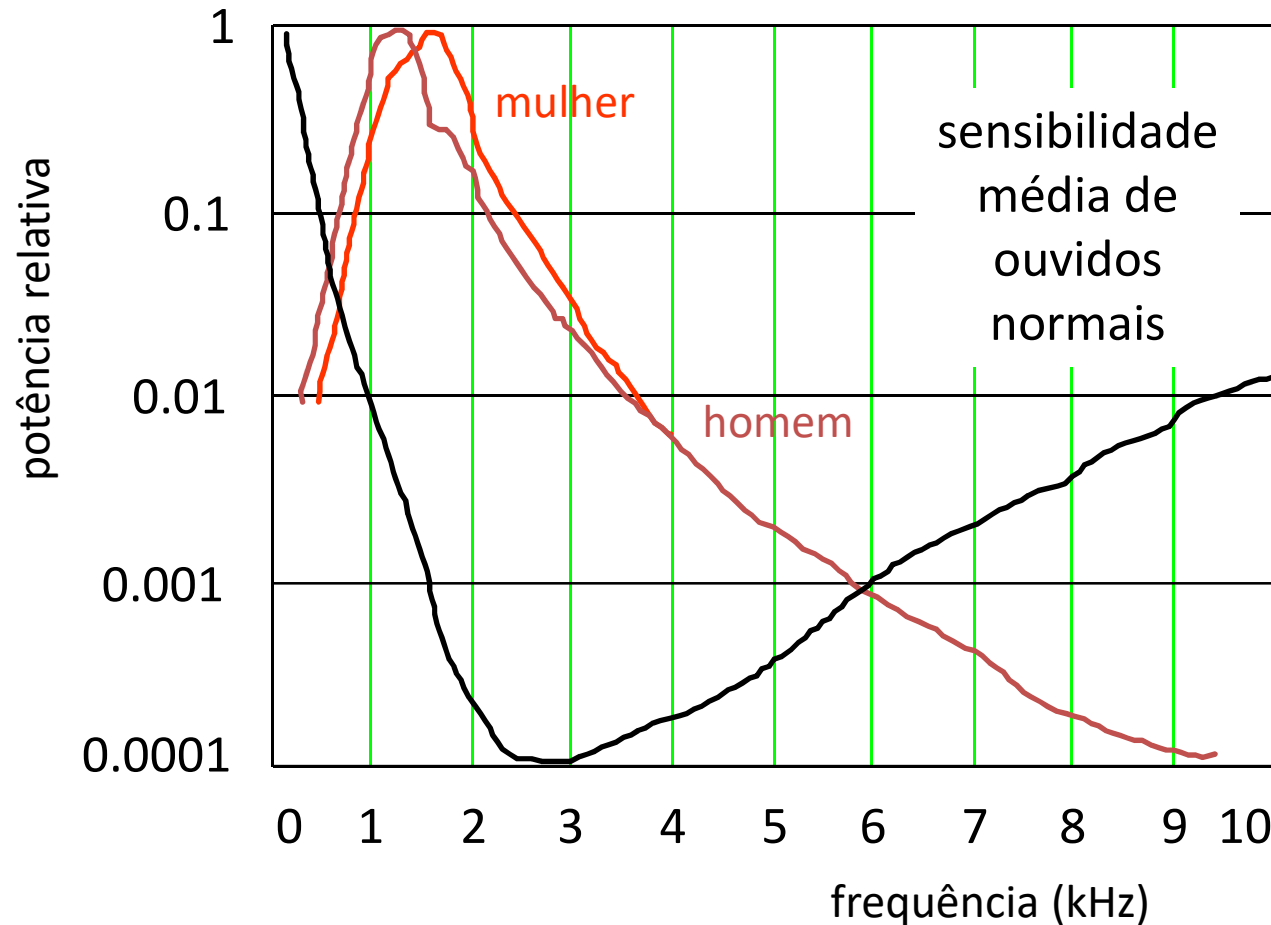
A potência média associada à portadora não depende do índice de modulação, M

DIGITALIZAÇÃO DE SINAIS

Faixa de freqüências para alguns serviços



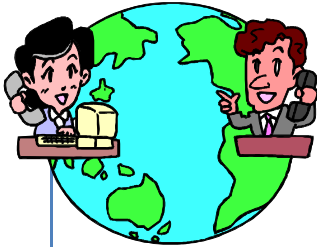
Distribuição da energia vocal



frequência fundamental:
homem: 125 Hz
mulher: 250 Hz

faixa de 300 a 3.400 Hz garante 60 % de transmissão de energia vocal, 87 % de inteligibilidade de sílabas, e praticamente 100 % de inteligibilidade de frases completas.

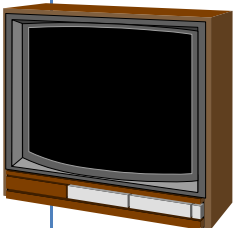
Vantagens da digitalização



Canal de voz

signal analógico: 4 kHz

signal digital: 64 kb/s



Sinal de vídeo

signal analógico: 6 MHz

signal digital: 81 Mb/s

Largura de faixa necessária:

canal telefônico de voz

analógica: 4 kHz

digital (RZ): 64 kHz

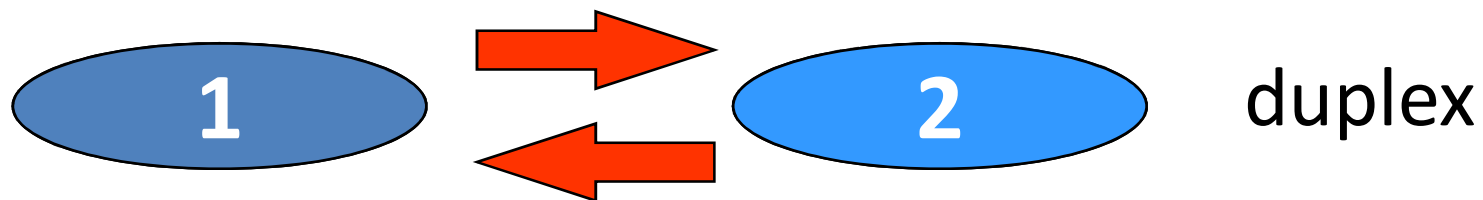
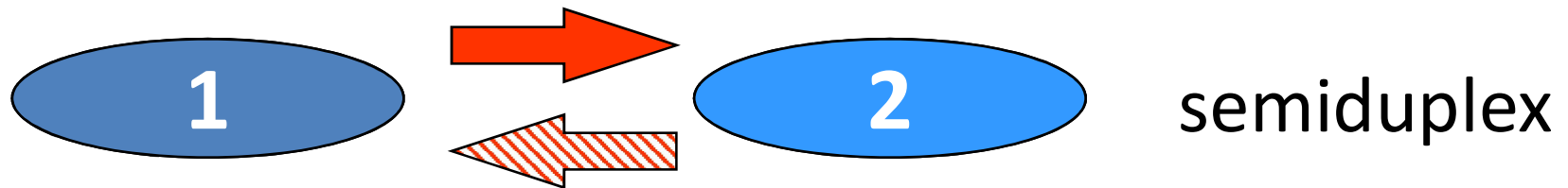
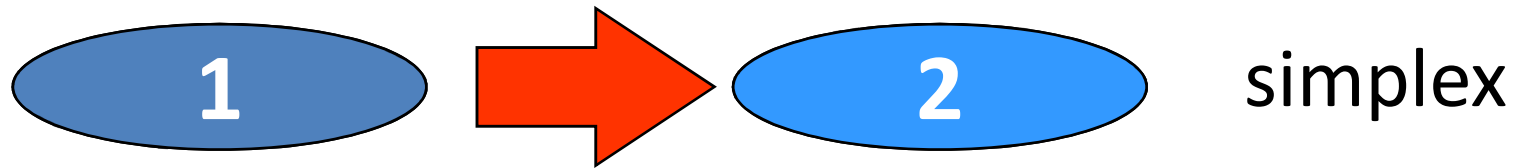
signal de vídeo

analógica: 6 MHz

digital (RZ): 81 MHz

- ✓ Sistemas ópticos são de faixa larga
- ✓ sinais digitais são menos afetados por não-linearidades em fontes ópticas.
- ✓ verificação de erros e informações redundantes minimizam erros.
- ✓ Enlaces ópticos são compatíveis com conexões digitais (computadores).
- ✓ Sinais digitais são melhor recuperados que os analógicos.

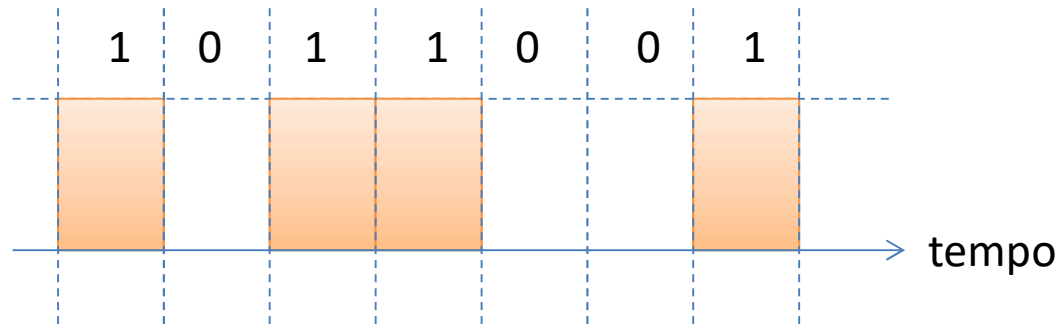
Operação de um meio de transmissão



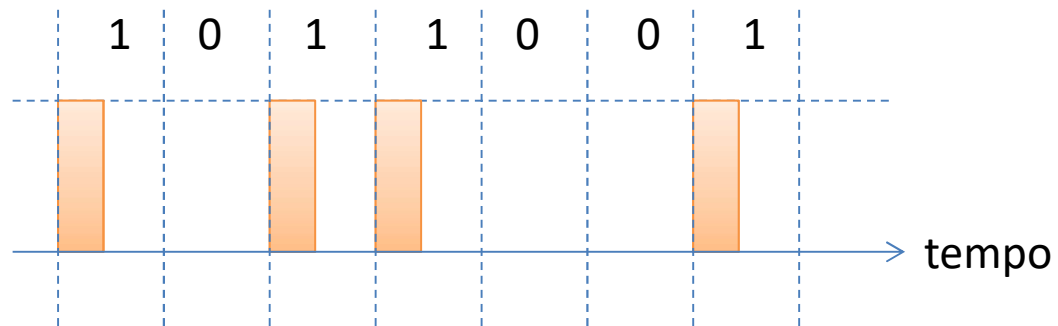
MODULAÇÃO DIGITAL

NRZ e RZ

NRZ
não retorna
Ao zero



RZ
retorna
Ao zero



Conceitos (1)

✓ Taxa de bit (bit rate; bitrate)

- Nº de bits transmitidos ou processados por unidade de tempo
- b/s; bps; bits por segundo
- $R_b = 1/T_b$ bps, na qual T_b é o tempo, intervalo de bit

✓ Taxa de bit bruta (gross bit rate; raw bit rate)

- Nº total de bits transmitidos por unidade de tempo incluindo bits de dados (carga) e cabeçalho (overhead)

Conceitos (2)

- ✓ **Taxa de símbolo** (em baud)
 - Pulso formado por n° inteiro de bits
 - Formato NRZ tem 2 símbolos: '1' e '0'
 - Neste caso, a taxa de símbolos é igual à taxa de bits
 - Homenagem a Emile Baudot, inventor do código de 5 bits do teletipo

Conceito (3)

$M = 2^N$ símbolos

N : n° de bits por símbolo

$R_s = 1 / T_s$,

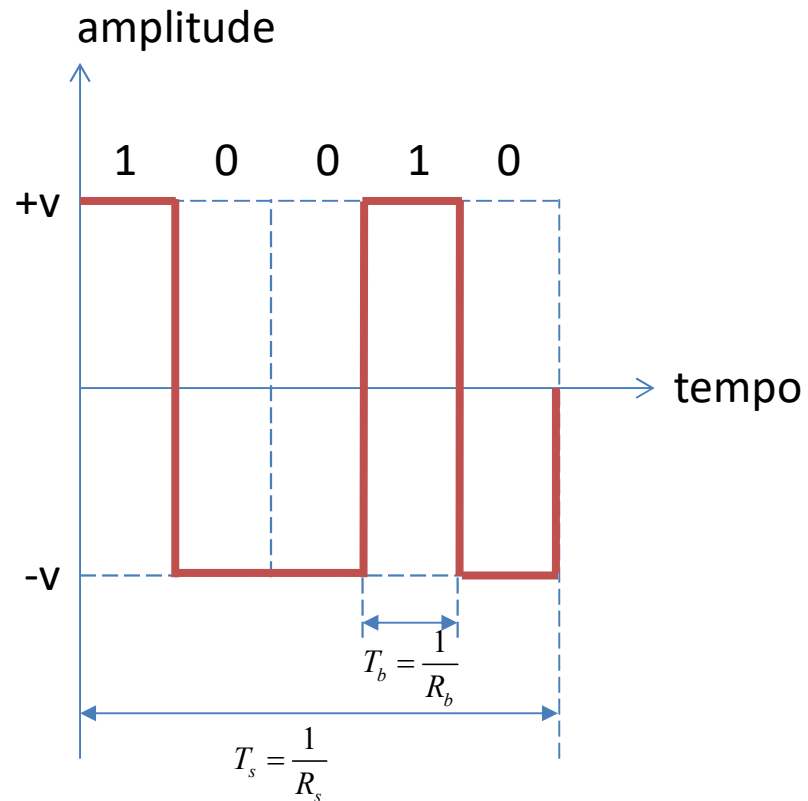
R_s : taxa de símbolos

T_s : intervalo de símbolo

$\log_2 M = \log_2 2^N = N \log_2 2$

$N = \log_2 M$ bits por símbolo

Modulação digital M-ária



$$M = 2^N$$

M : número de símbolos

n : número de bits

Taxa de símbolos

$$R_s = \frac{1}{T_s} \text{ Bd (símbolos por segundo, s}^{-1}\text{)}$$

T_s : intervalo (tempo) de símbolo, s

$$R_b = \frac{1}{T_b} \text{ bps (bit} \cdot \text{s}^{-1}\text{, bit} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$$

T_b : intervalo (tempo) de bit, s

$$T_s = NT_b \text{ s}$$

No exemplo,

$$N = 5 \rightarrow M = 2^5 = 32 \text{ símbolos}$$

Taxa de símbolos e taxa de bits

Tempo de símbolo e tempo de bit

$$R_s = \frac{1}{T_s} = \frac{1}{NT_b} = \frac{1}{N} \frac{1}{T_b} = \frac{1}{N} R_b \text{ bps}$$

$$R_b = NR_s \text{ bps}$$

Número de bits e de símbolos

$$M = 2^N \rightarrow \log_2 M = \log_2 2^N = N \log_2 2$$

$$N = \log_2 M$$

$$R_b = NR_s = R_s \log_2 M \text{ bps}$$

Em função de \log_{10}

$$\log_2 M = \frac{\log_{10} M}{\log_{10} 2} = \frac{\log_{10} M}{0,301} = 3,32 \log_{10} M$$

$$R_b = 3,32 \times R_s \times \log_{10} M \text{ bps}$$

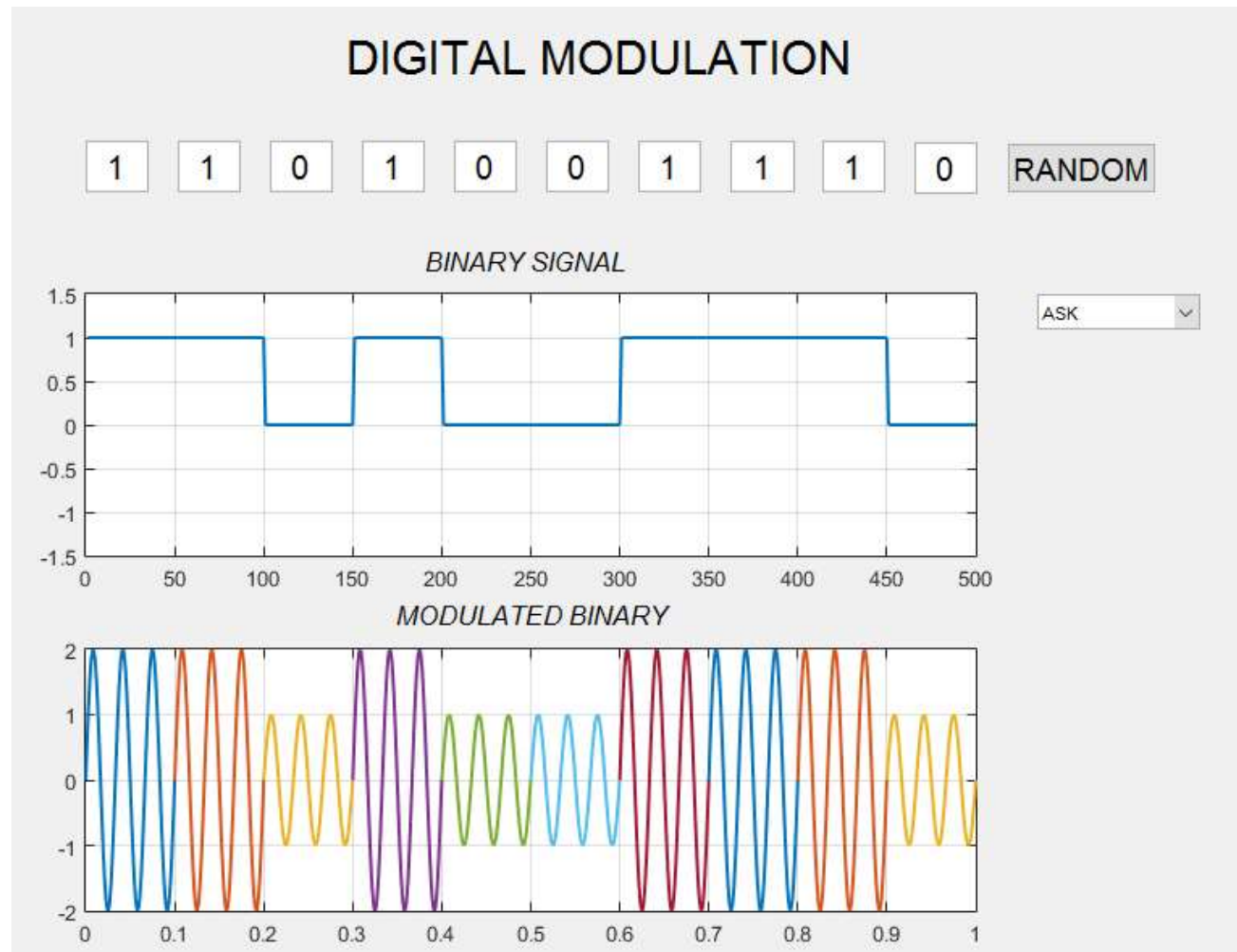
Modulação digital

- ✓ Baseadas em chaveamento (keying)
- ✓ **PSK** (phase-shift keying): utiliza um n° finito de fases
- ✓ **FSK** (frequency-shift keying): utiliza um n° finito de frequências
- ✓ **ASK** (amplitude-shift keying): utiliza um n° finito de amplitudes
- ✓ **QAM** (quadrature amplitude modulation): utiliza um n° finito de pelo menos duas fases e pelo menos duas amplitudes

Modulação digital - 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.

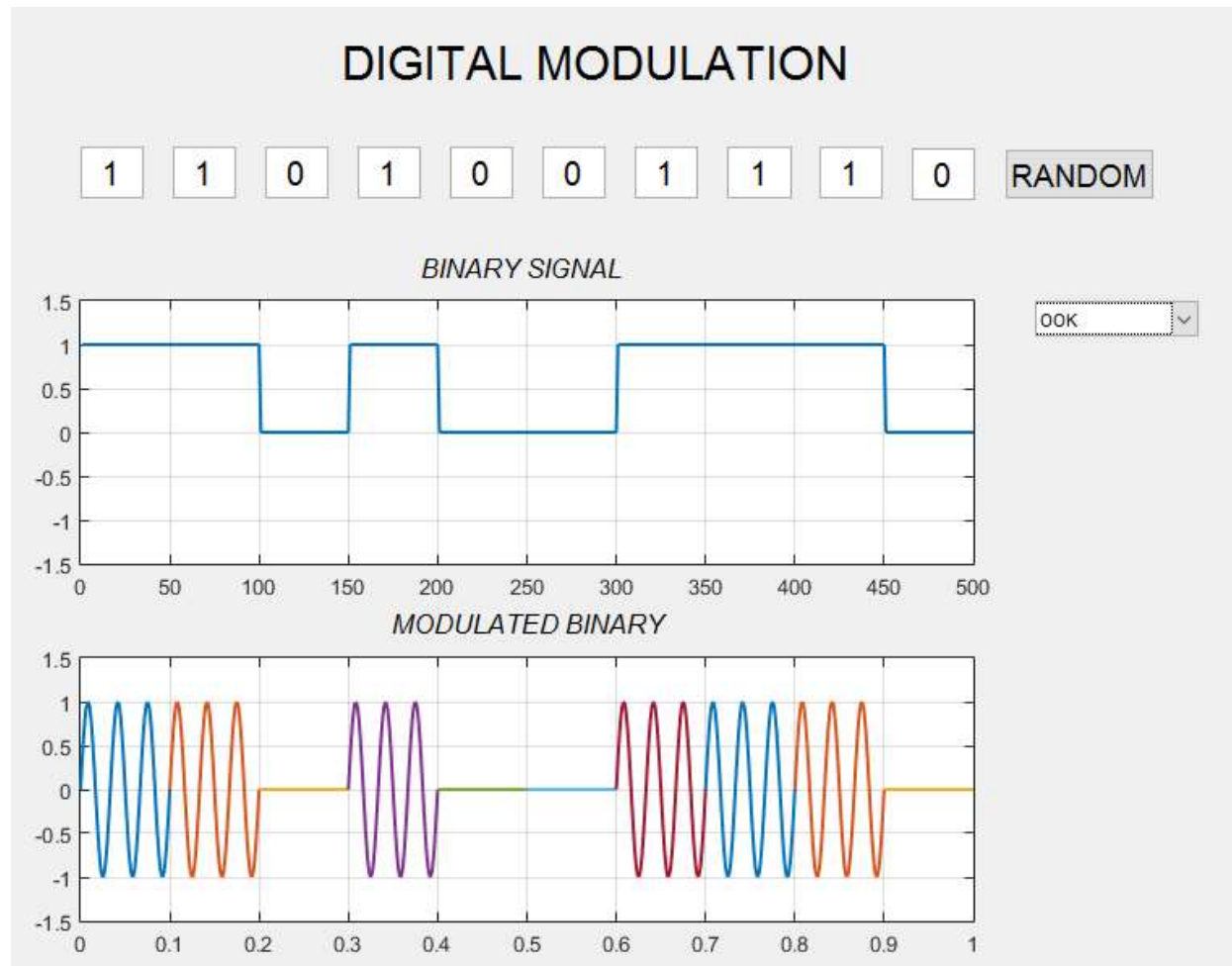
Amplitude-Shift Keying (ASK) (1)



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

Amplitude-Shift Keying (ASK) (2)

On-Off Keying (OOK)



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

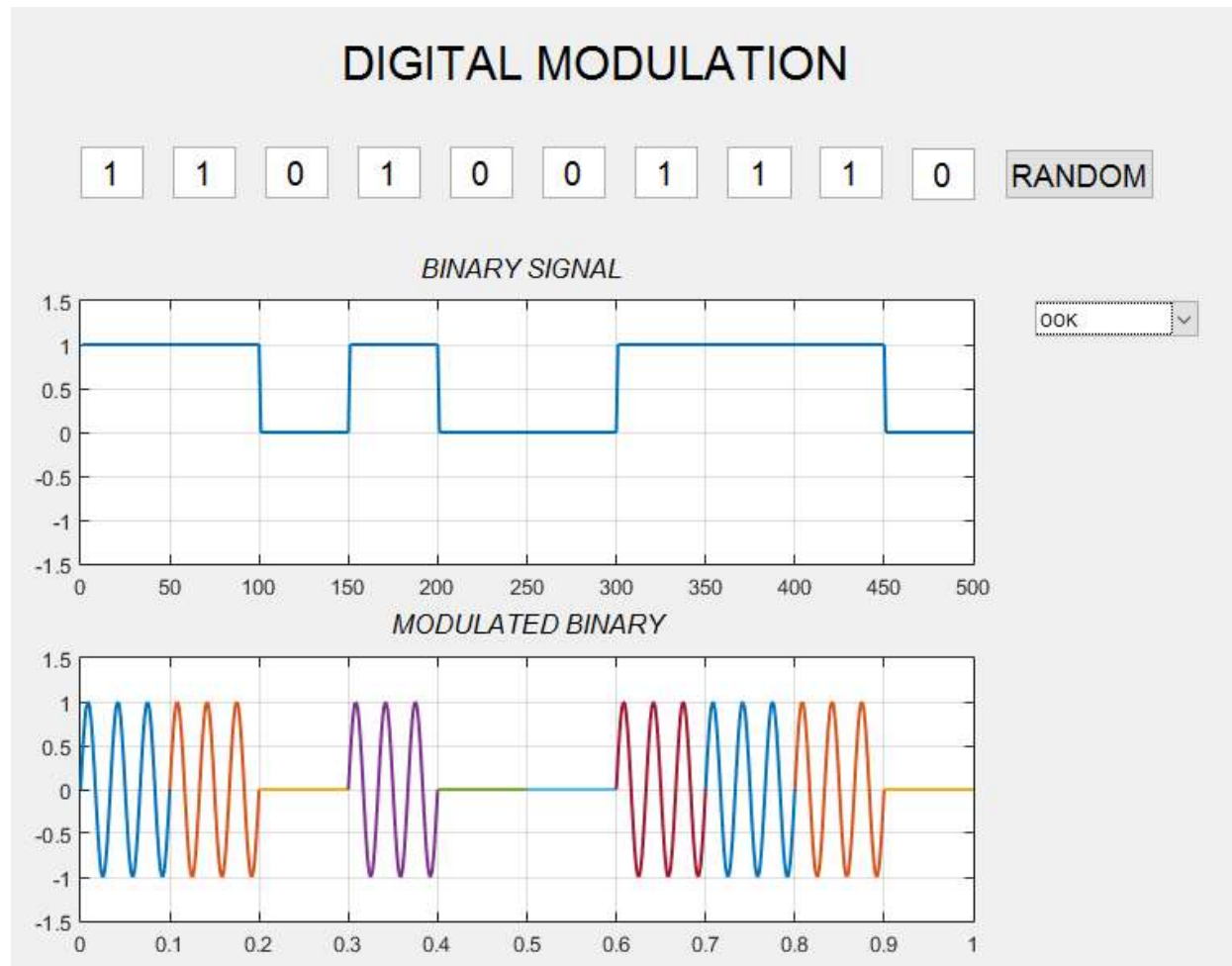
Modulação digital - 2

✓ **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.

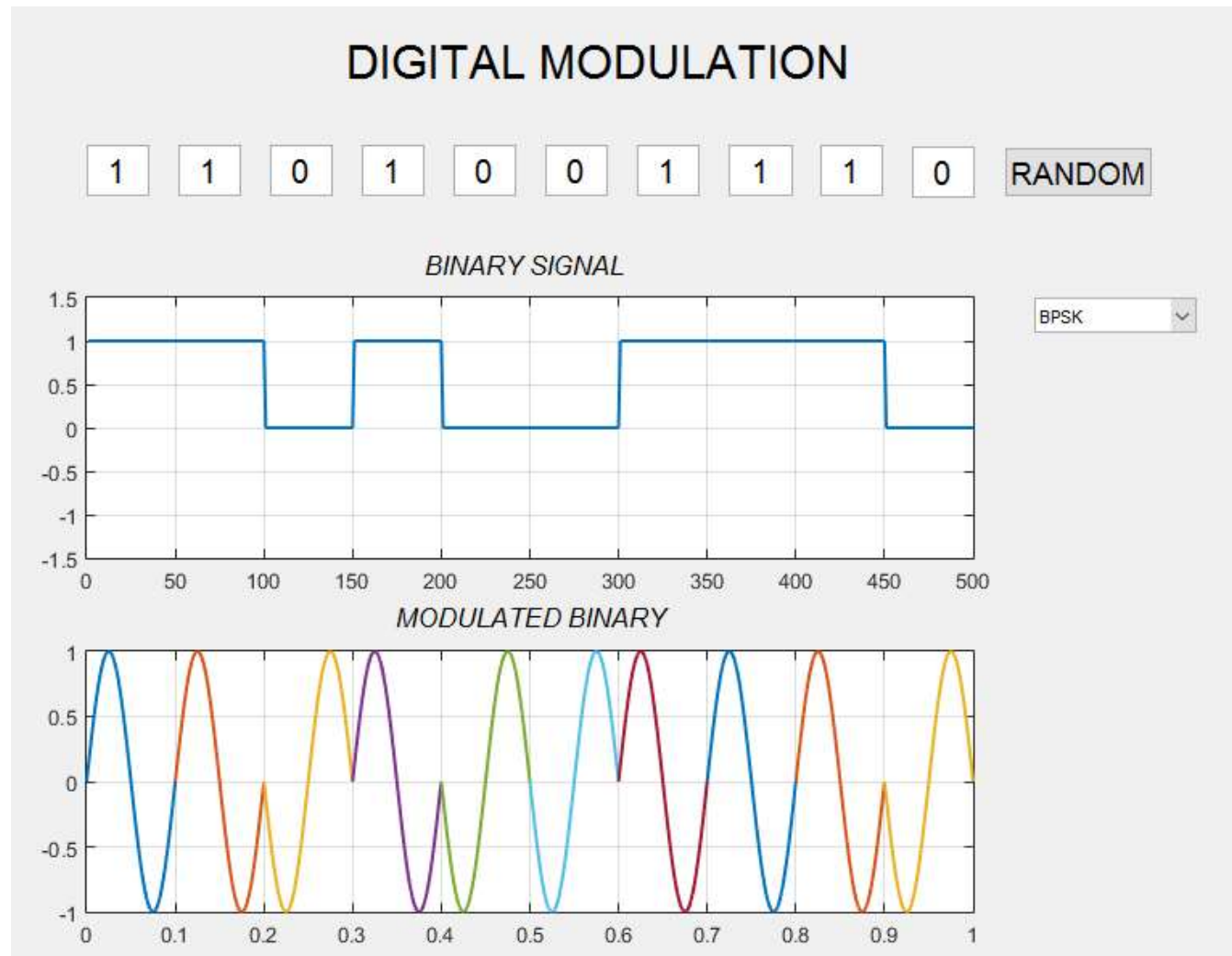
Amplitude-Shift Keying (ASK)

On-Off Keying (OOK)



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

Phase-Shift Keying (BPSK)



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

CAPACIDADE DE CANAL

Additive white Gaussian noise (AWGN)

✓ Aditivo

- adiciona-se a ruídos intrínsecos ao sistema de informação

✓ Branco

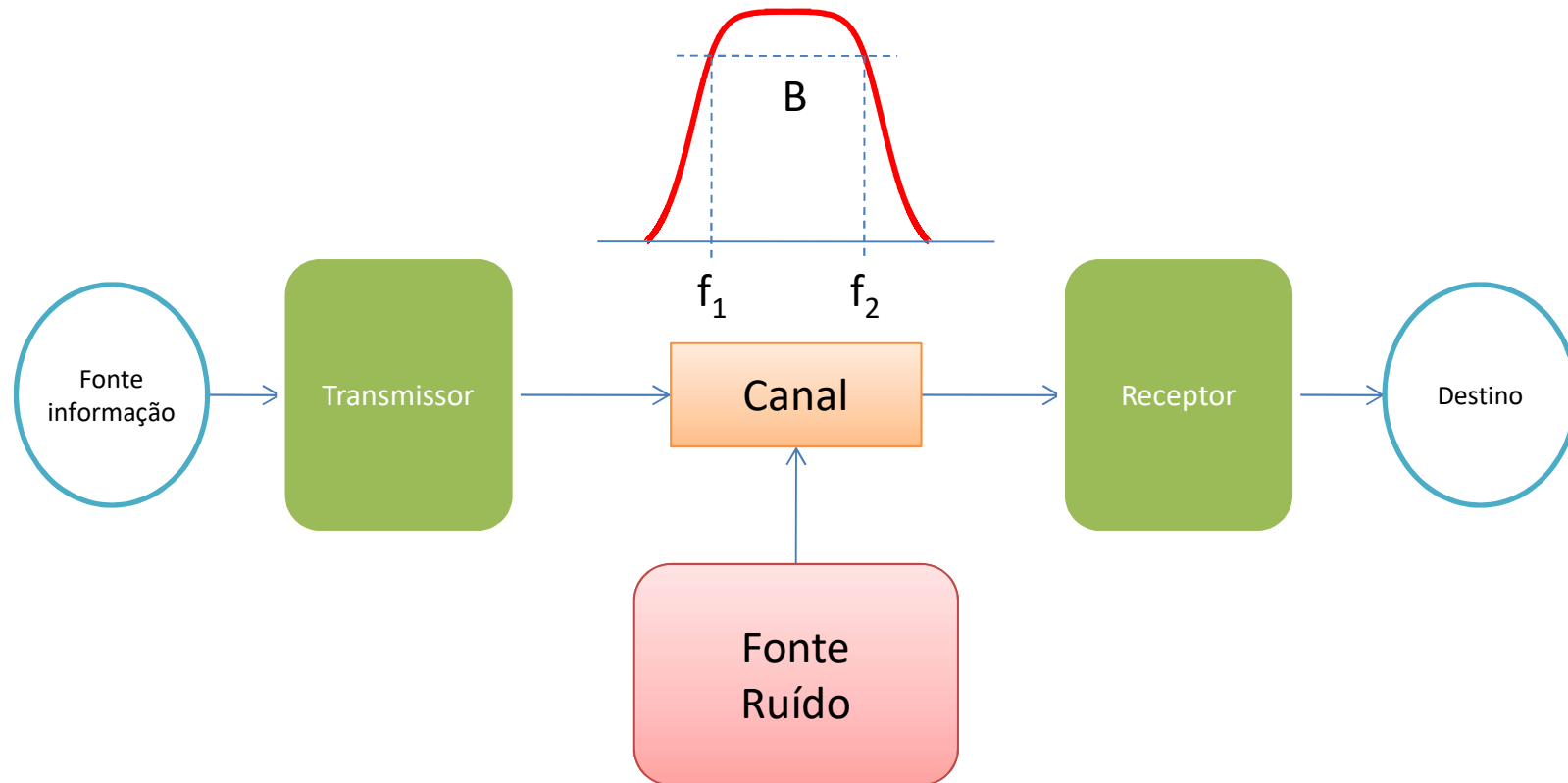
- potência uniformemente distribuída na faixa de frequências (analogia com luz branca)

✓ Gaussiano

- distribuição normal no domínio do tempo com média temporal zero

✓ Modelo de canal: adição linear; degradação do desempenho

Capacidade de canal de RF-1



Claude E. Shannon, "A mathematical theory of communication",
Bell System Technical Journal, 27:379–423 and 623–656, Julho e Outubro, 1948
<http://cm.bell-labs.com/cm/ms/what/shannonday/shannon1948.pdf>

Capacidade de canal de RF-2

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

C : capacidade do canal em bits por segundo, bps

B : largura de faixa do canal em hertz, Hz

S : potência total do sinal medida na largura de faixa B , W

N : potência total do ruído medida na largura de faixa B , W

S / N : relação sinal ruído (não em decibel)

Teorema Shannon–Hartley

Capacidade de canal de RF-3

Canal telefônico convencional

Faixa: 300 a 3400 Hz

Considerando $B=4$ kHz

Relação sinal-ruído: 20 dB ou $S/N= 100$

$$C = 4 \times 10^3 \log_2 (1 + 100) = 26,63 \text{ kbps}$$

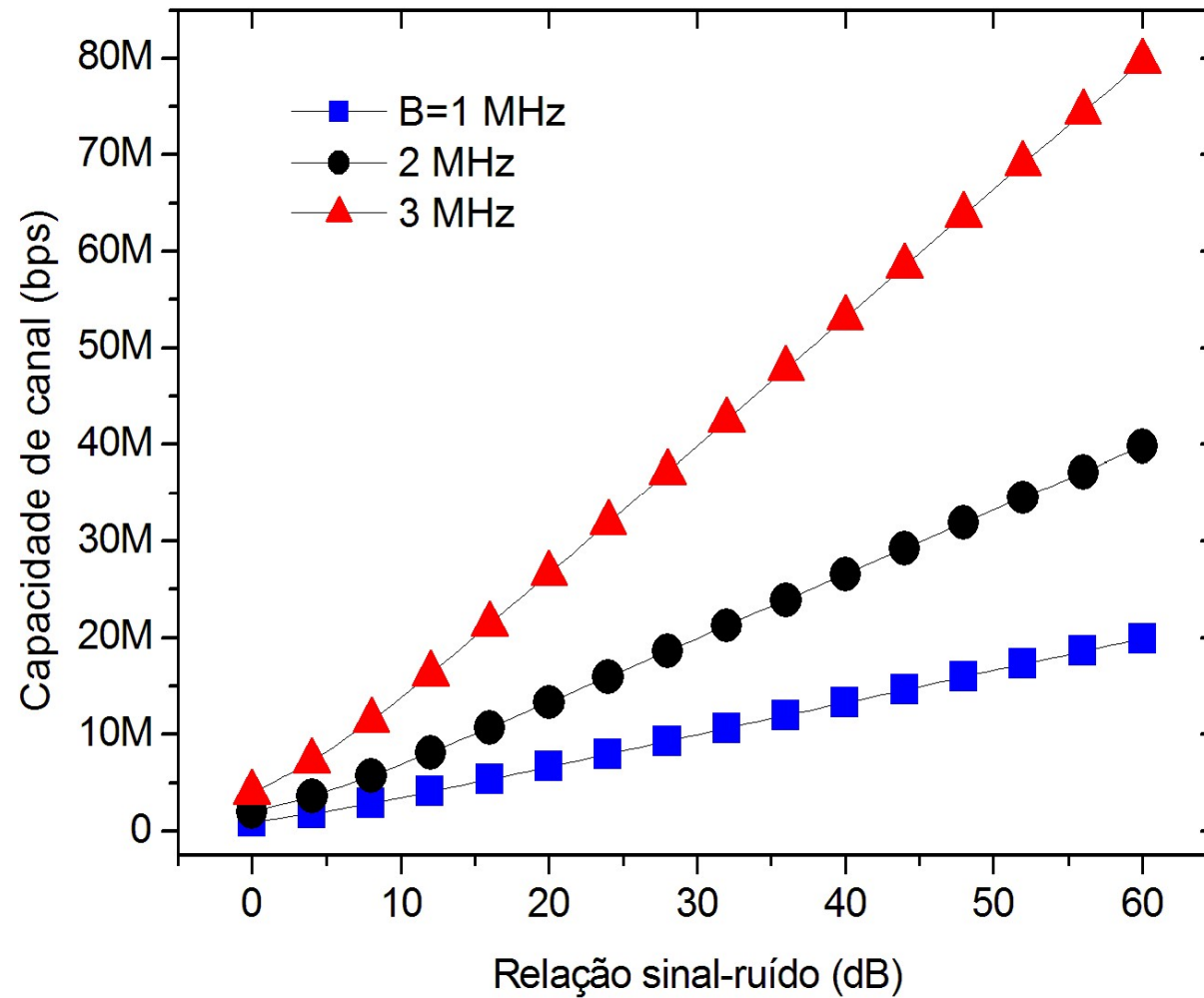
Canal DSL (digital subscriber line)

Faixa: $B=1$ MHz

Relação sinal-ruído: 20 dB ou $S/N= 100$

$$C = 1 \times 10^6 \log_2 (1 + 100) = 6,66 \text{ Mbps}$$

Capacidade de canal versus SNR



BER versus SNR

