

# Camada Física

Dados e Sinais

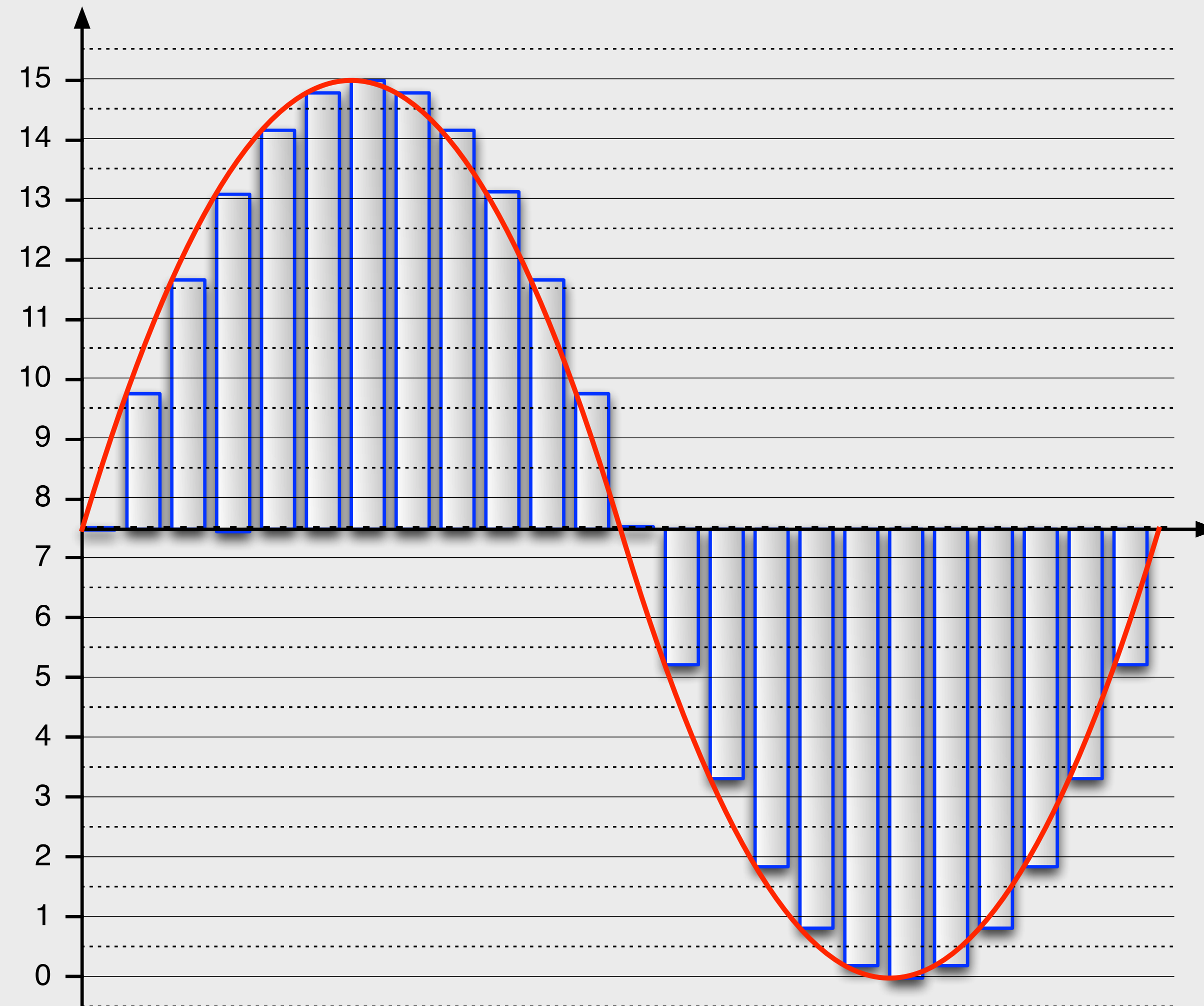
# Dados em Sinais

		Sinal	
		Analógico	Digital
Dado	Analógico	Modulação Analógica	Digitalização (conversor A/D)
	Digital	Modulação Digital	Codificação

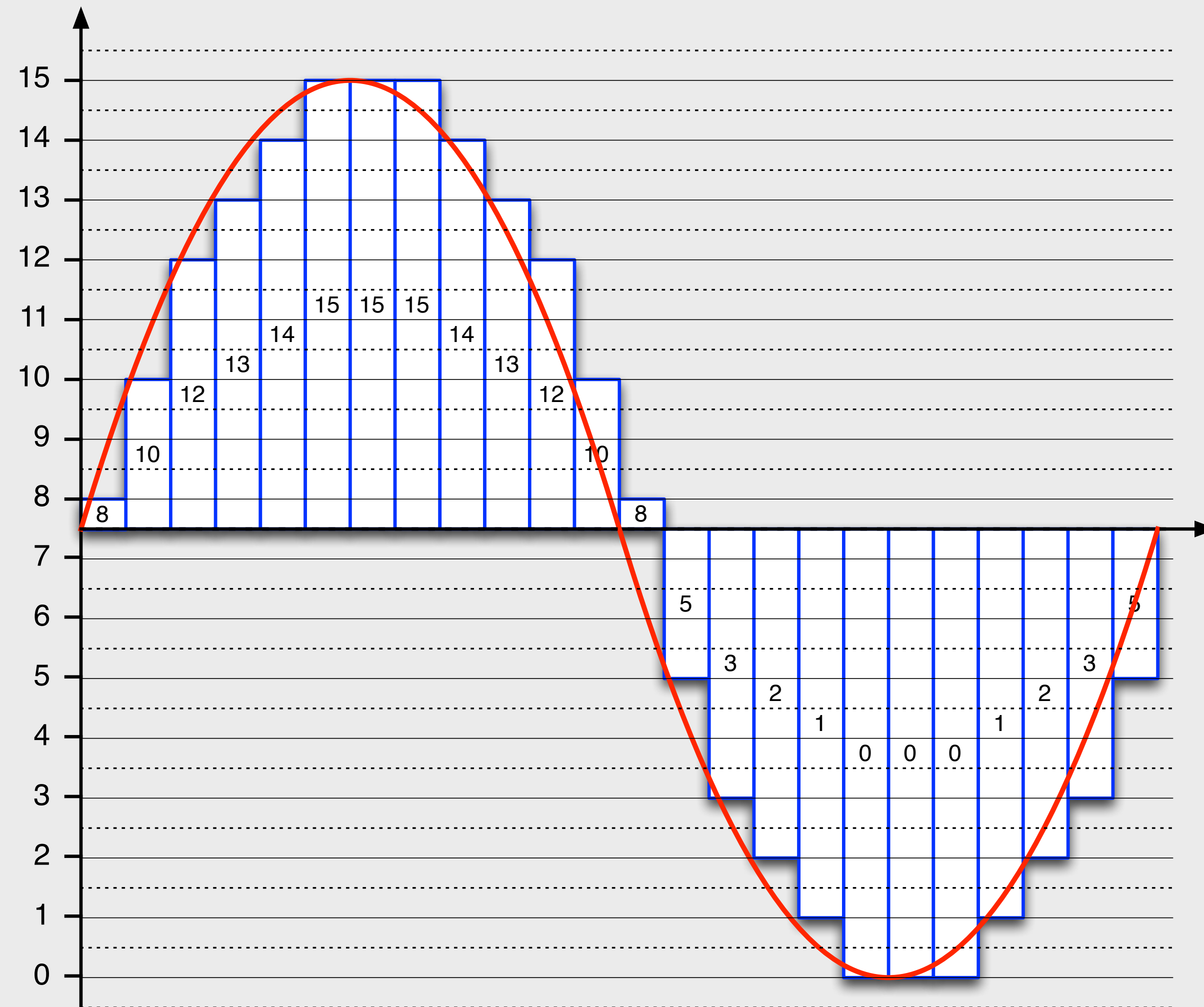
# Digitalização

- PAM (Pulse-Amplitude Modulation)
- PCM (Pulse-Code Modulation)
- PWM (Pulse-Width Modulation)
- Modulação Delta

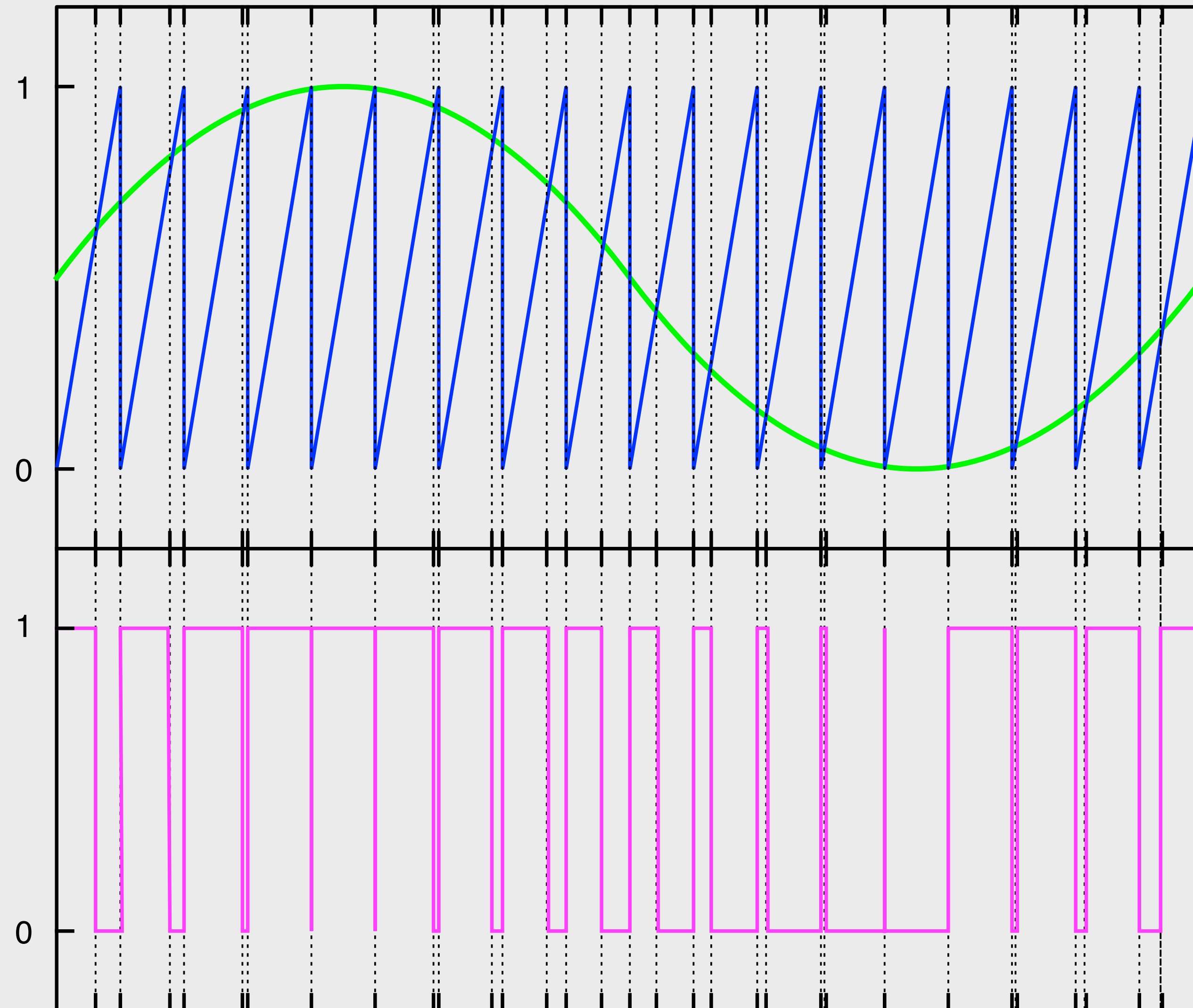
# Modulação por Amplitude de Pulso



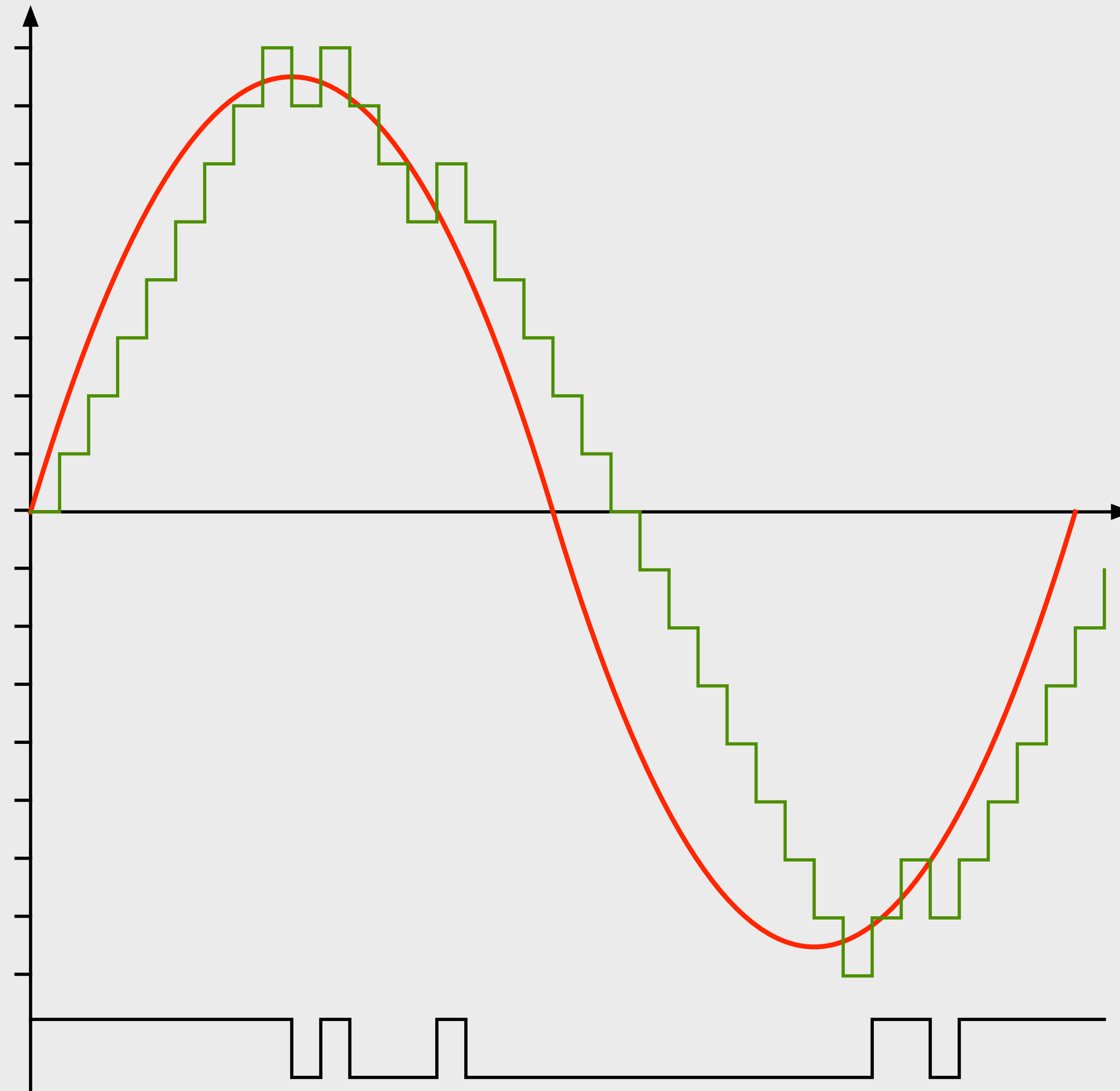
# Modulação por Código de Pulso



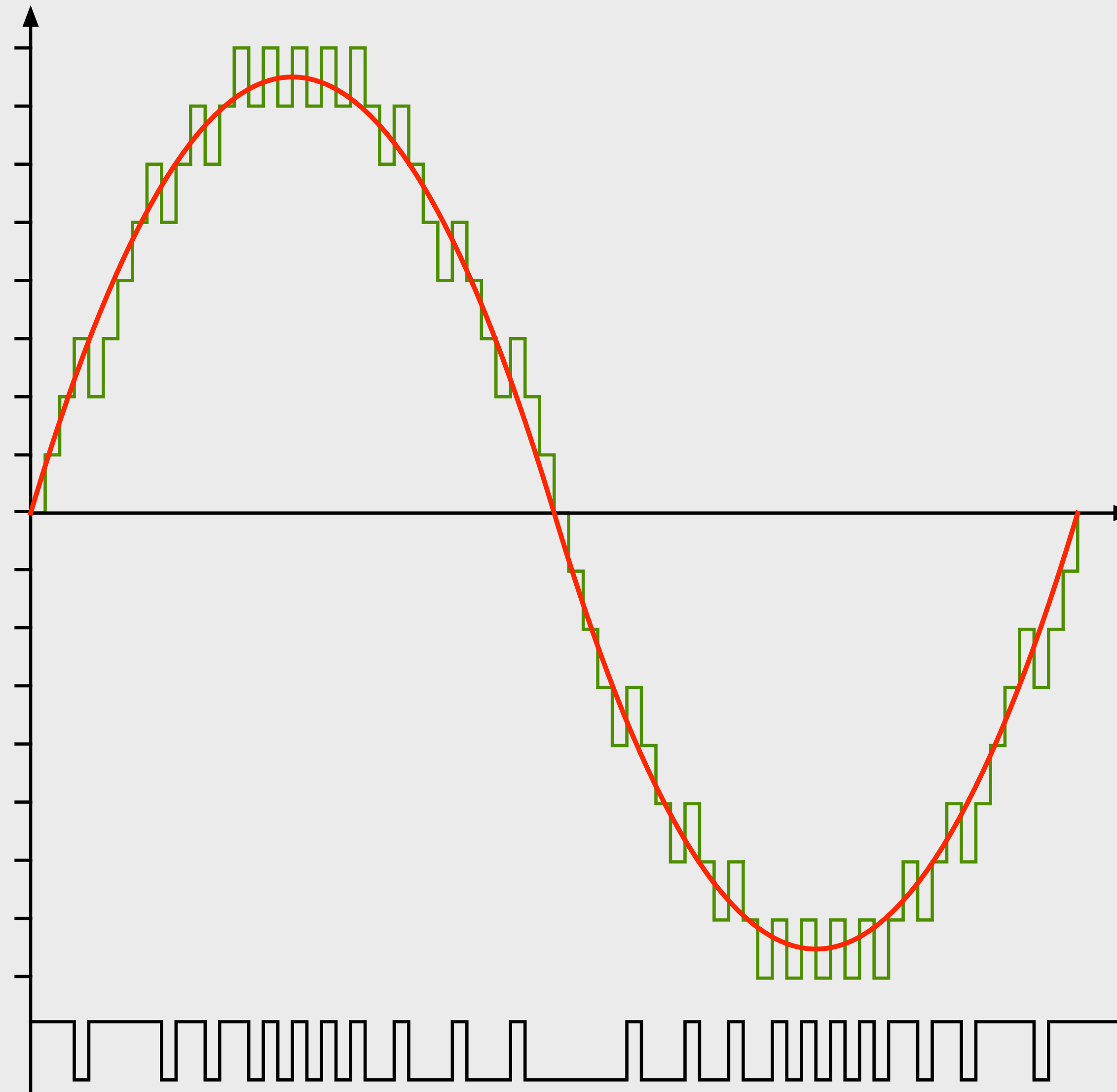
# Modulação por Largura de Pulso



# Modulação Delta



# Modulação Delta

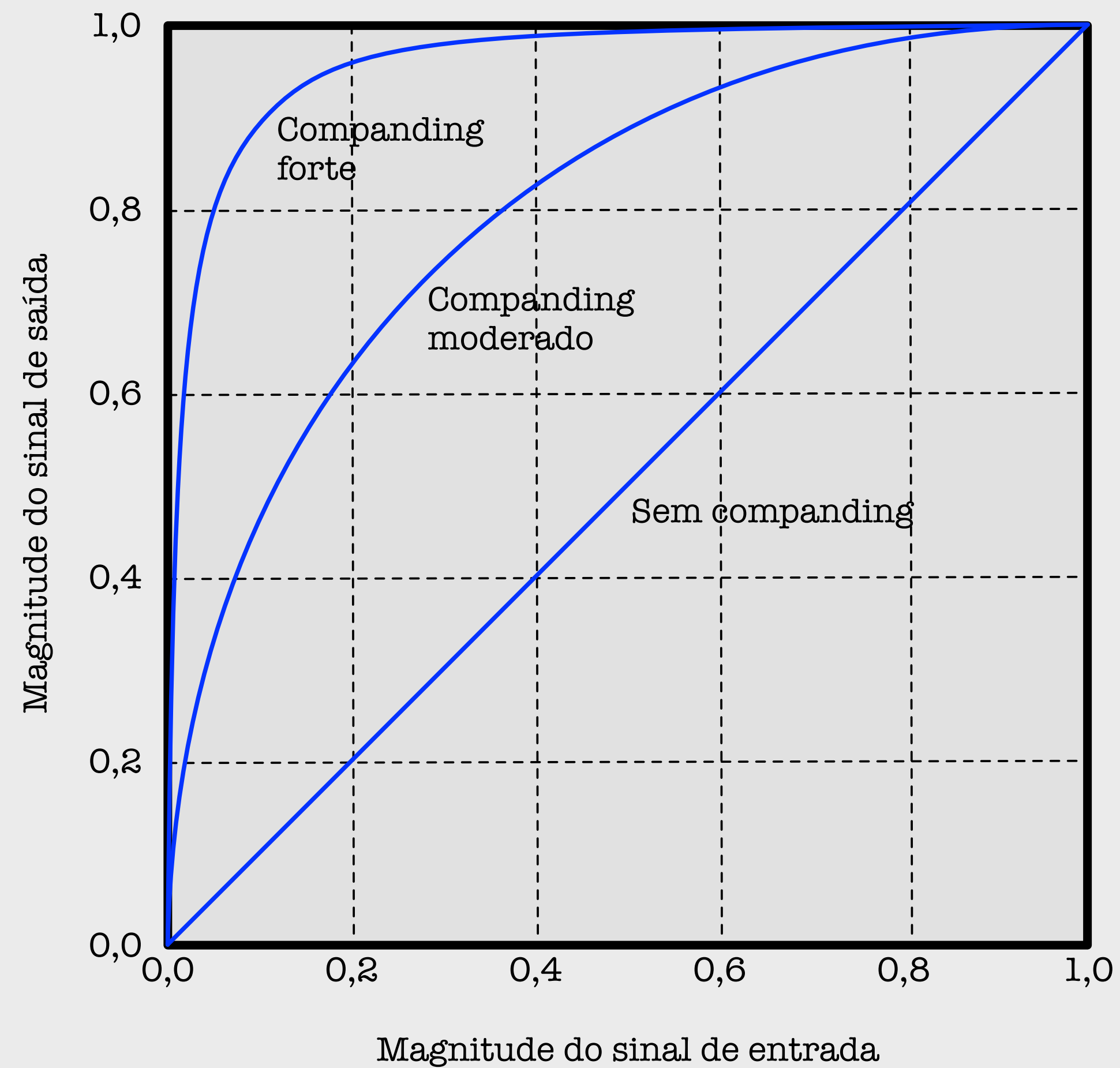




# Aspectos Relevantes

- Ruído de Quantização (amplitude)
- Conversão não-linear
- Teorema de Nyquist-Shannon (período)
- Séries de Fourier (limitação de banda)
- Jitter
- Aliasing
- Slew Rate (taxa de escorregamento)

# Funções Componding Típicas



Codificação

# Codificação

- Banda Base
- Tradução de stream de **bits** para código digital

# Propriedades Desejáveis

- Eficiência espectral: ausência de componentes de alta frequência, componente DC, potência concentrada no centro da banda
- Sincronização: transmissão do **clock** embutida na codificação
- Detecção de erros: violações do código possibilitam detecção de erros
- Imunidade a ruídos: com baixa taxa de erros - BER
- Simplicidade: códigos complexos tendem a ser caros

# Classificação de Códigos

- Polaridade
- Duty-cycle
- Níveis

# Polaridade

- Unipolar: o sinal têm uma única polaridade; em códigos binários os dois estados são representados por um tensão e pela ausência da mesma
- Polar: o sinal apresenta polaridade positiva e negativa
- Bipolar: é uma sinal polar onde um dos estados pode ser representado pela ausência do sinal

# Duty-Cycle

- NRZ (Non Return to Zero): nível do sinal se mantém constante durante todo o período nominal do símbolo, os bits ocupam um intervalo de sinalização
- RZ (Return to Zero): nível do sinal retorna a zero antes de terminar o ciclo
- O meio do ciclo corresponde ao duty-cycle de 50%



# Número de Níveis

- Deve ser uma potência de dois para sinais binários
- Códigos mais comuns apresentam os seguintes números de níveis: dois (binários), três (ternários puros e pseudo-ternários), quatro (quaternários), oito (octais) etc.
- Apresentam taxa de sinalização (**baud**) menor que a taxa de **bits**

# Classificação de Códigos

- Em fase: usam transições do sinal para transmitir **bits** (diferencial) e sincronização dos relógios
- Multiníveis binários: usam vários níveis de sinal

# Esquemas de Codificação

- Nonreturn to Zero-Level (NRZ-L)
- Nonreturn to Zero Inverted (NRZ-I)
- Bipolar-AMI
- Pseudoternário
- Manchester
- Manchester Diferencial
- B8ZS
- HDB3

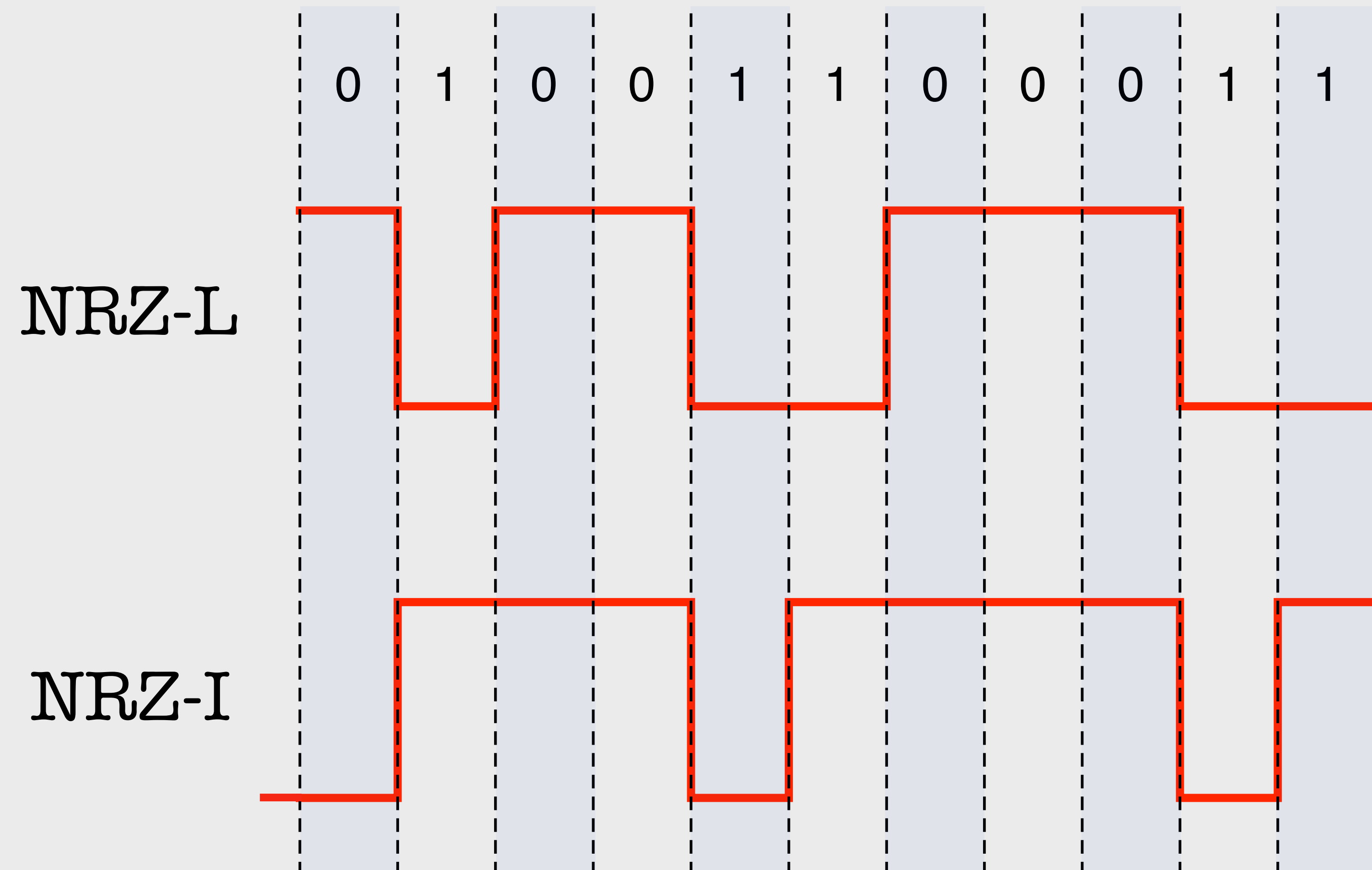
# Nonreturn to Zero-Level (NRZ-L)

- Duas tensões diferentes para bits 0 e 1
- Pulso de tensão constante durante o intervalo do bit
- Sem transição (retorno ao zero)
- Zero volts para 0, tensão positiva constante para 1, ou tensão negativa para um valor e positiva para outra

# Nonreturn to Zero-Inverted (NRZ-I)

- Sem retorno ao 0 e invertido nos 1s
- Pulso de tensão constante na duração do bit
- Dados codificados como presença ou ausência de transição de sinal no início do período do bit
- Transição (inversão) denota um 1 binário e sua ausência denota 0
- Codificação diferencial: imune à inversão de polaridade

# NRZ



# Bipolar-AMI

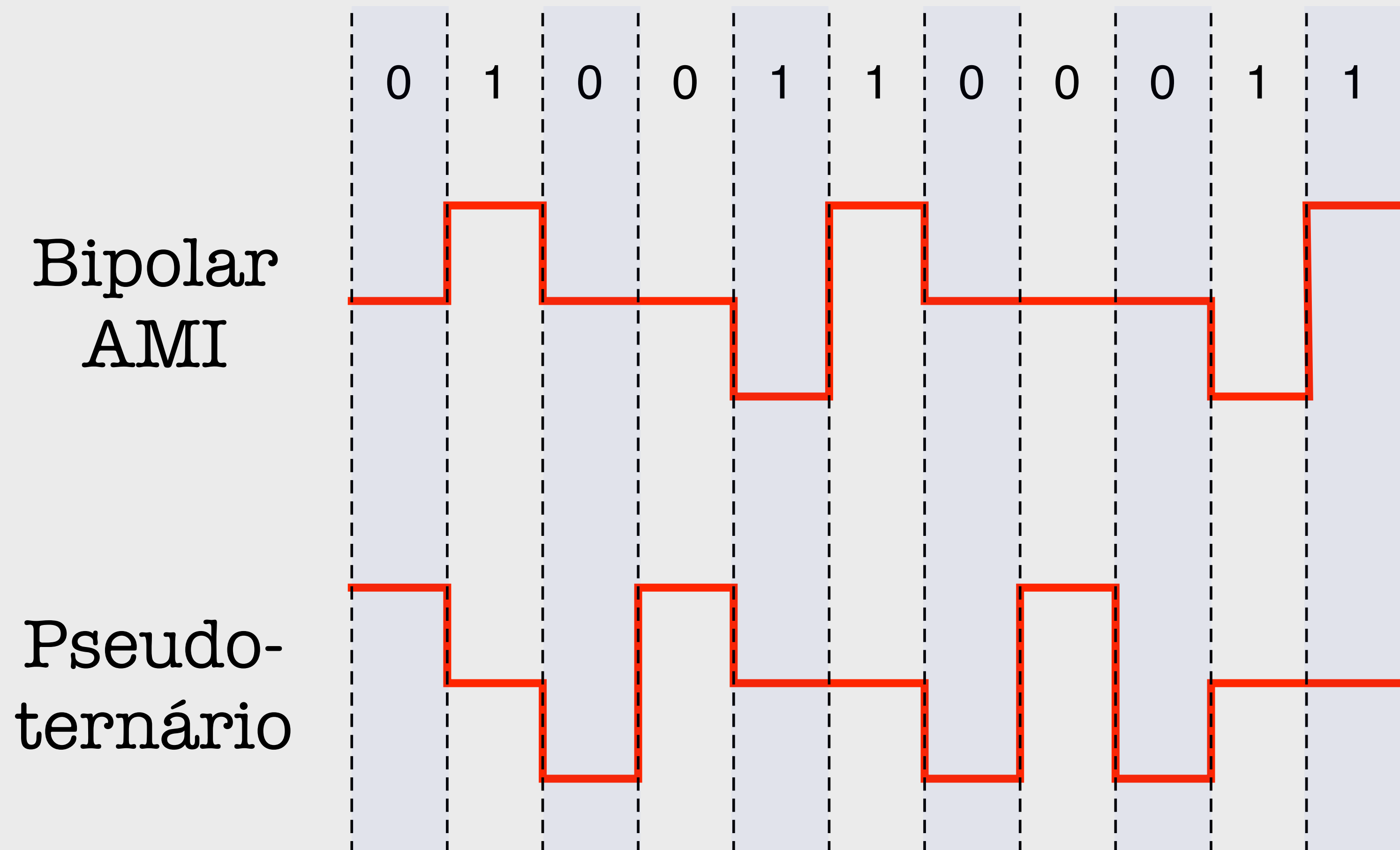
- 0 representado pelo sinal nulo e 1 representado por pulsos positivos ou negativos
- Pulsos 1 alternam sua polaridade
- Sem perda de sincronismo para longa cadeia de 1s, mas problemático para 0s
- Sem componente DC
- Pequena largura de banda
- Fácil detecção de erros

# Pseudoternário

- 1s representados pelo sinal nulo na linha
- 0s representados pela alternância entre positivo e negativo
- Nenhuma vantagem ou desvantagem sobre o bipolar-AMI
- Usado no ISDN (equipamento terminal)



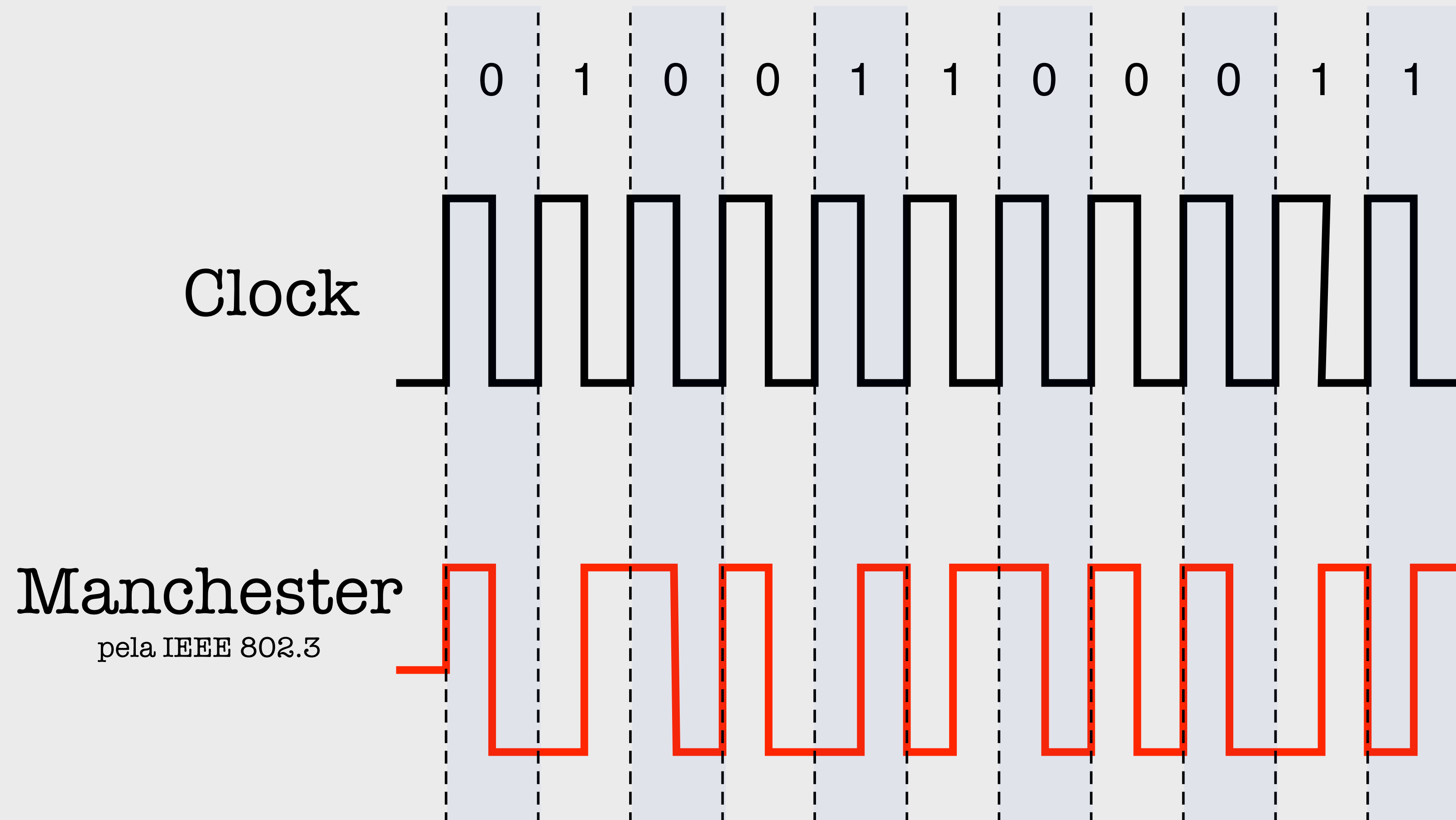
# Bipolar-AMI e Pseudoternário



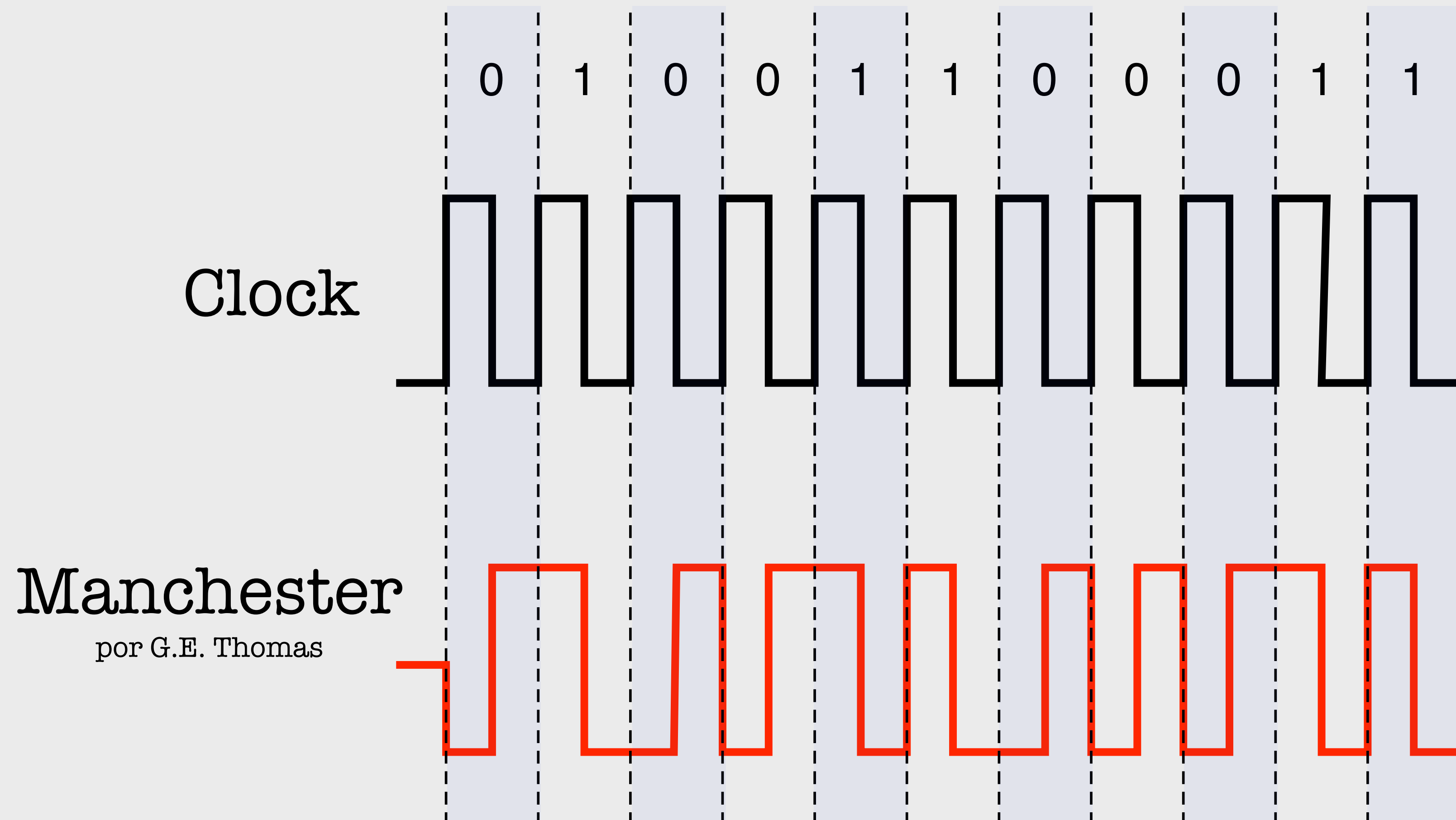
# Manchester

- Transição no meio de cada período do bit
- Transição utilizada para definir dados e **clock**
- Baixo para alto representa 1 e alto para baixo representa 0
- Usado pelo IEEE 802.3

# Manchester



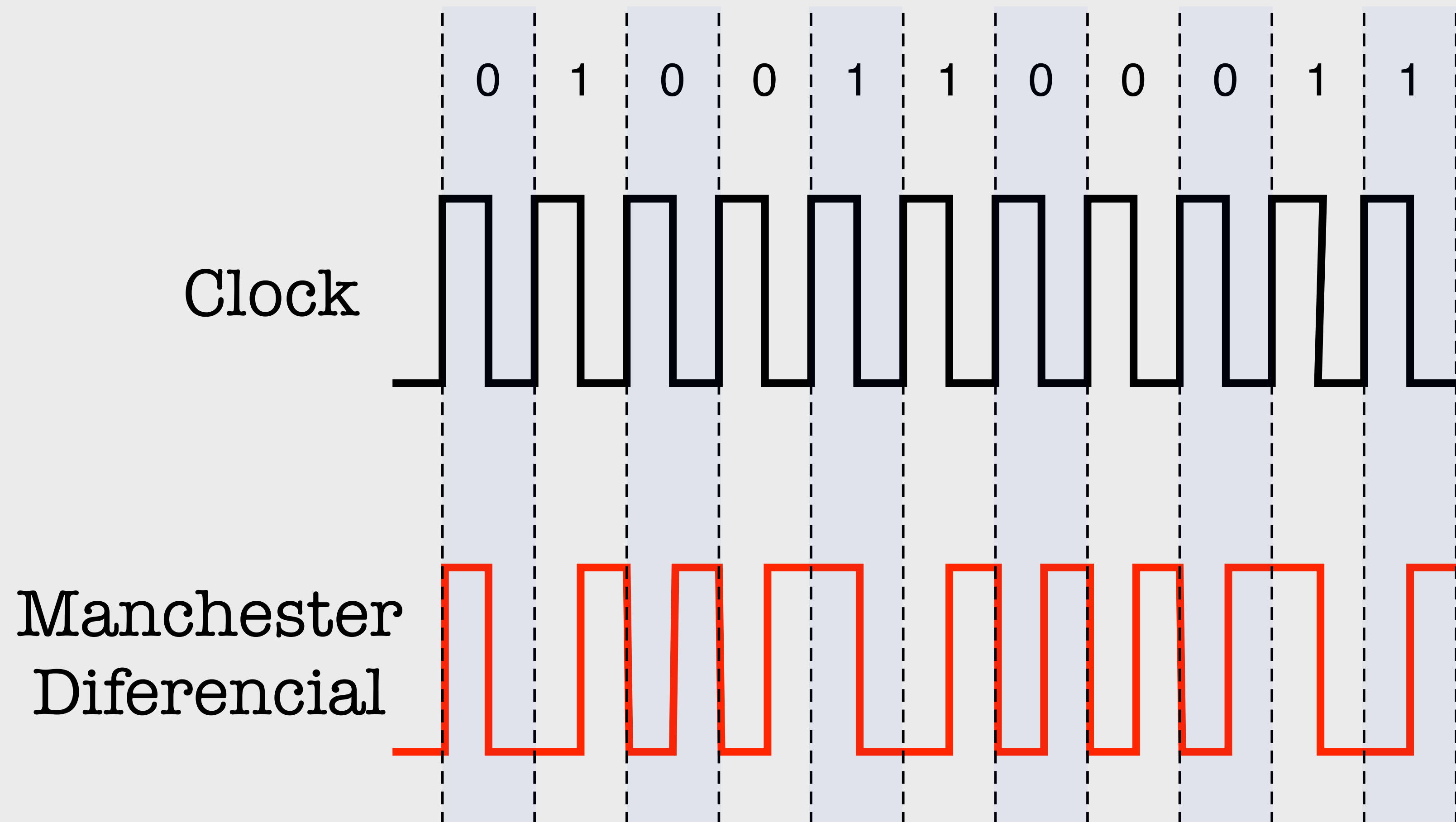
# Manchester



# Manchester Diferencial

- A transição no meio do bit é apenas para **clock**
- Transição no início do período do bit representa 0 e sua ausência representa 1
- Esquema de codificação diferencial
- Usado pela IEEE 802.5

# Manchester Diferencial



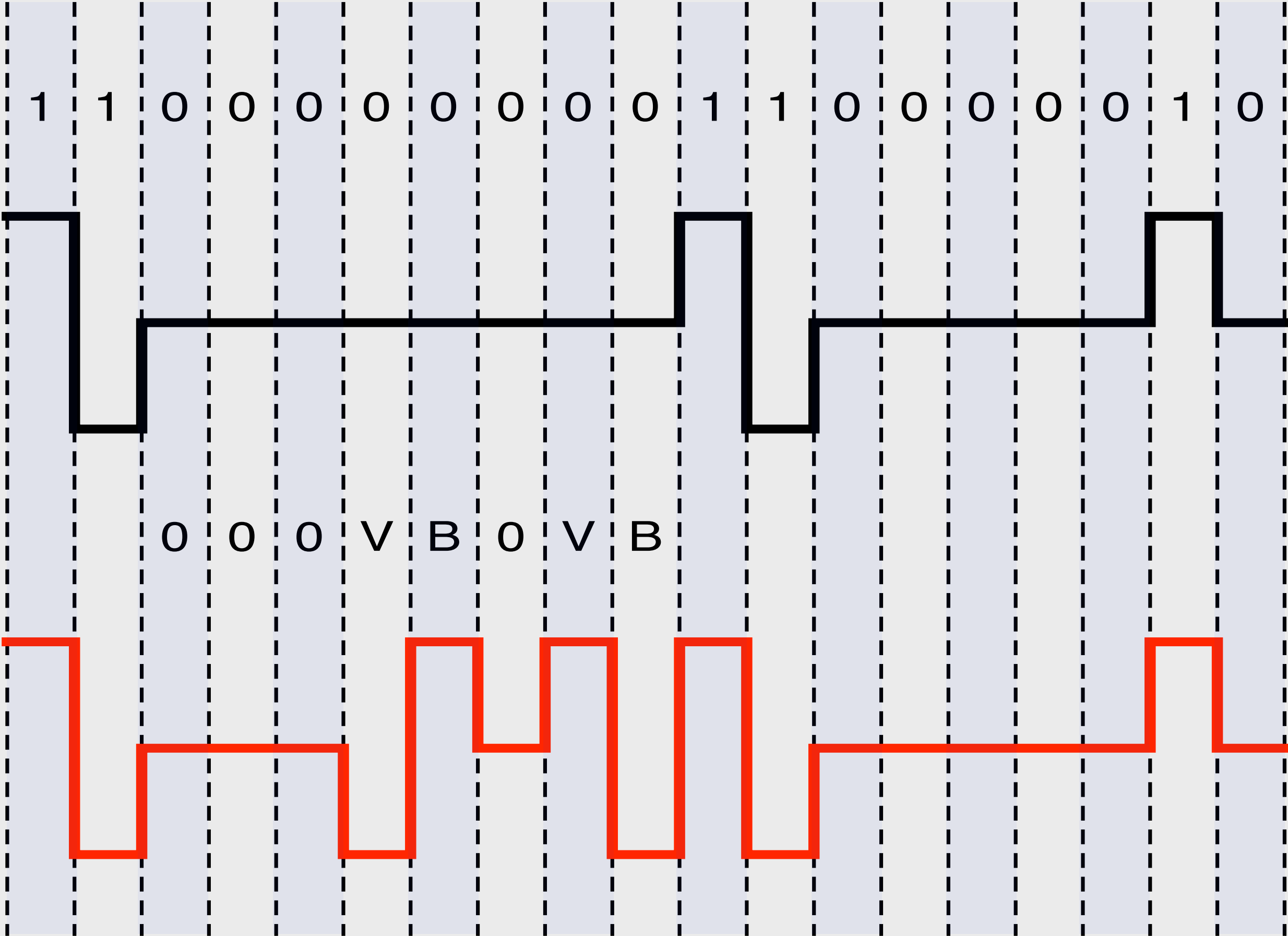
# B8ZS

- Bipolar baseado no AMI com substituição de 8 Zeros (**Bipolar 8 Zeros Substitution**)
- Se ocorrer octeto de zeros e o último pulso foi positivo, codificar como 000+-0-+, caso tenha sido negativo, codificar como 000-+0+-
- Causa duas violações do código AMI
- Diferentemente do que ocorreria com um ruído

# B8ZS

# Bipolar AMI

# B8ZS





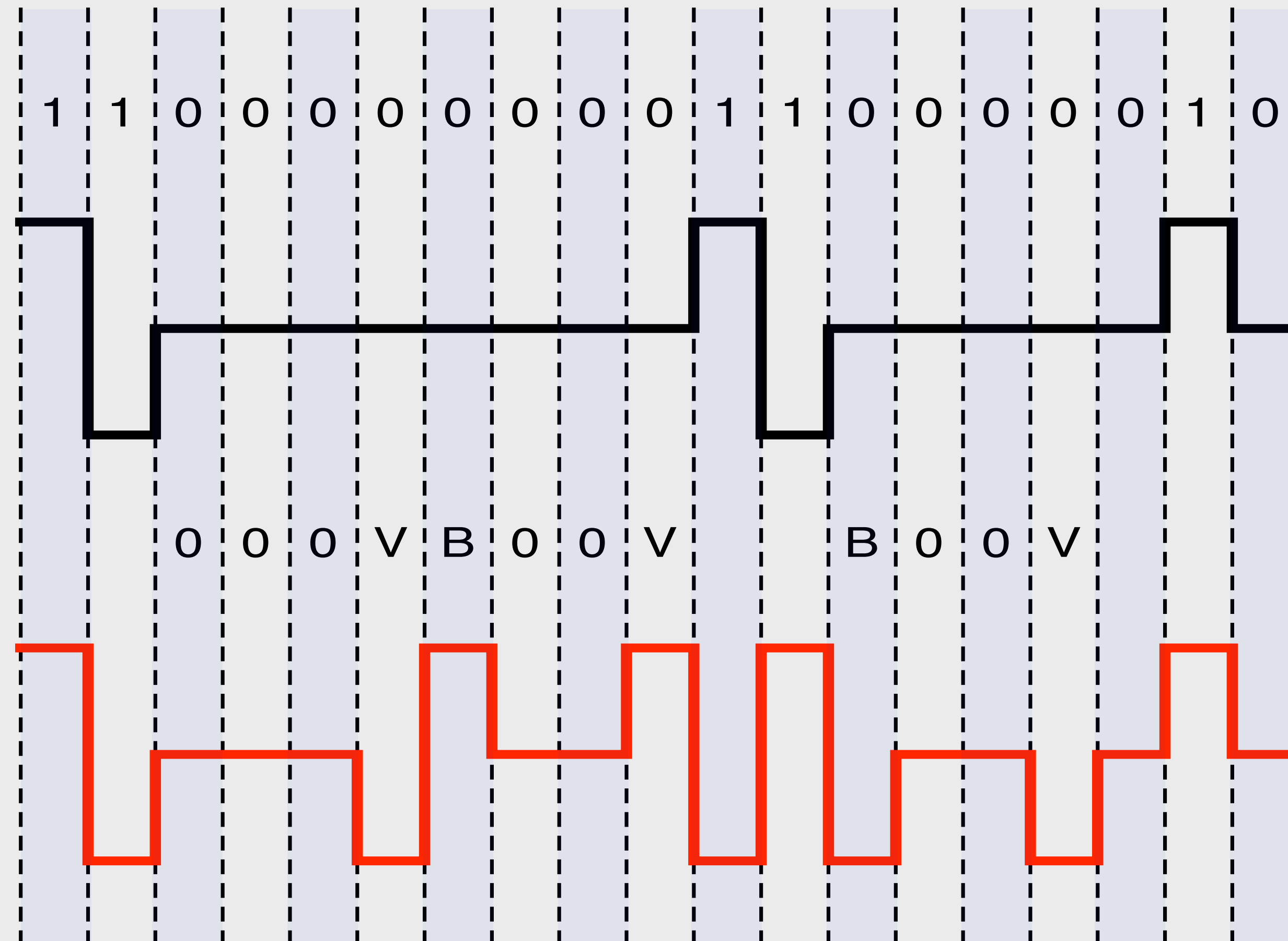
# HDB3

- Bipolar de alta densidade com 3 Zeros (**High Density Bipolar 3 Zeros**)
- Baseado no bipolar-AMI
- Cadeias de quatro zeros é trocada por um ou dois pulsos (000V ou B00V)

# HDB3

# Bipolar AMI

# HDB3



# 4B3T

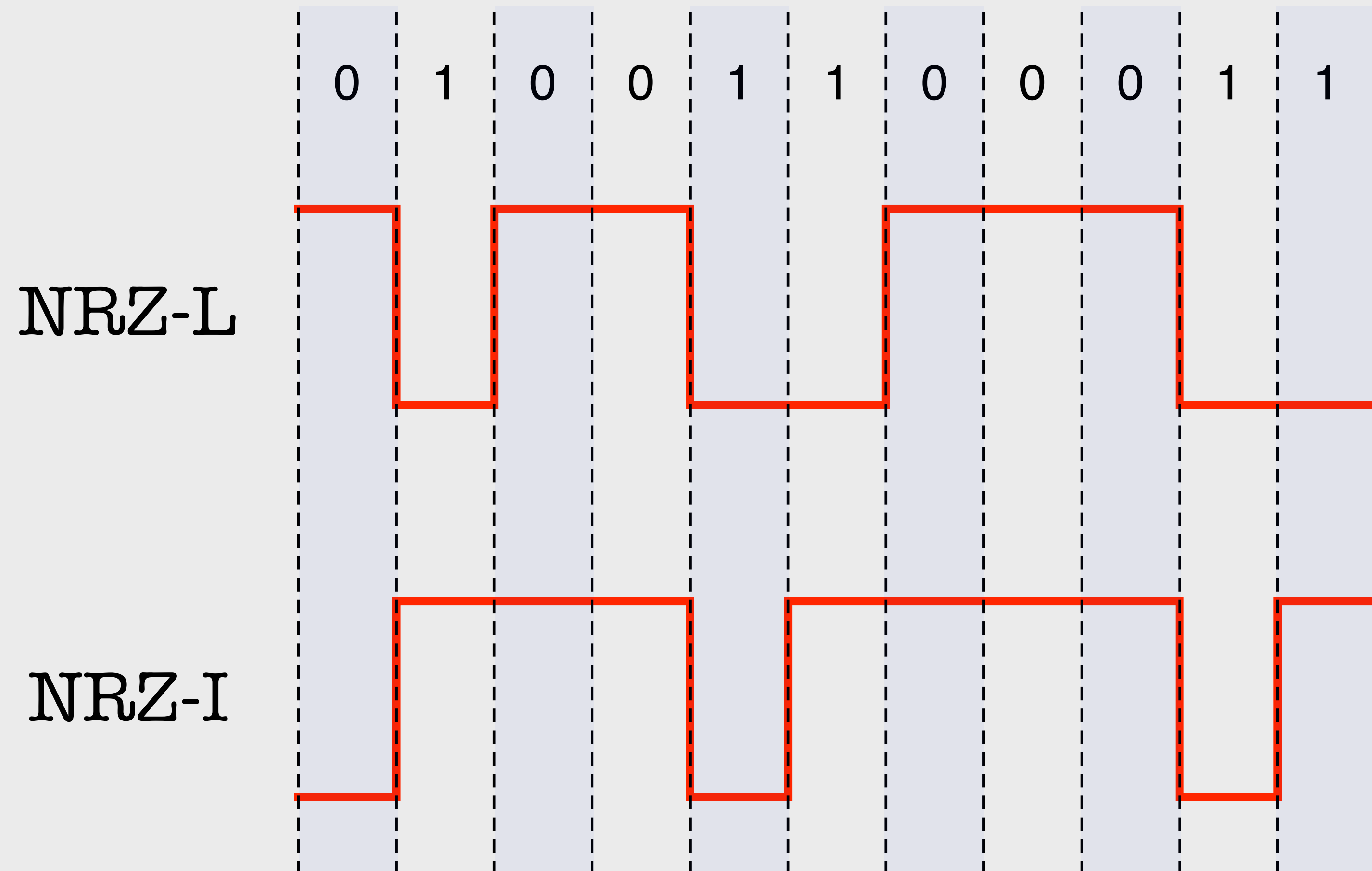
- Código ternário que representa 4 bits com 3 pulsos, gerados a partir de uma tabela (chamada MMS-43)
- Utilizado na Rede Digital de Serviços Integrados (ISDN)
- Sequência escolhida depende do offset DC acumulado (pulsos + subtraídos dos pulsos -)

Entrada	Nível DC Acumulado			
	1	2	3	4
0000	+0+ (+2)	0-0 (-1)		
0001	0-+ (+0)			
0010	+-0 (+0)			
0011	00+ (+1)			--0 (-2)
0100	-+0 (+0)			
0101	0++ (+2)	-00 (-1)		
0110	-++ (+1)		--+ (-1)	
0111	-0+ (+0)			
1000	+00 (+1)			0-- (-2)
1001	+-+ (+1)			--- (-3)
1010	++- (+1)		+-- (-1)	
1011	+0- (+0)			
1100	+++ (+3)	-+- (-1)		
1101	0+0 (+1)			-0- (-2)
1110	0+- (+0)			
1111	++0 (+2)	00- (-1)		

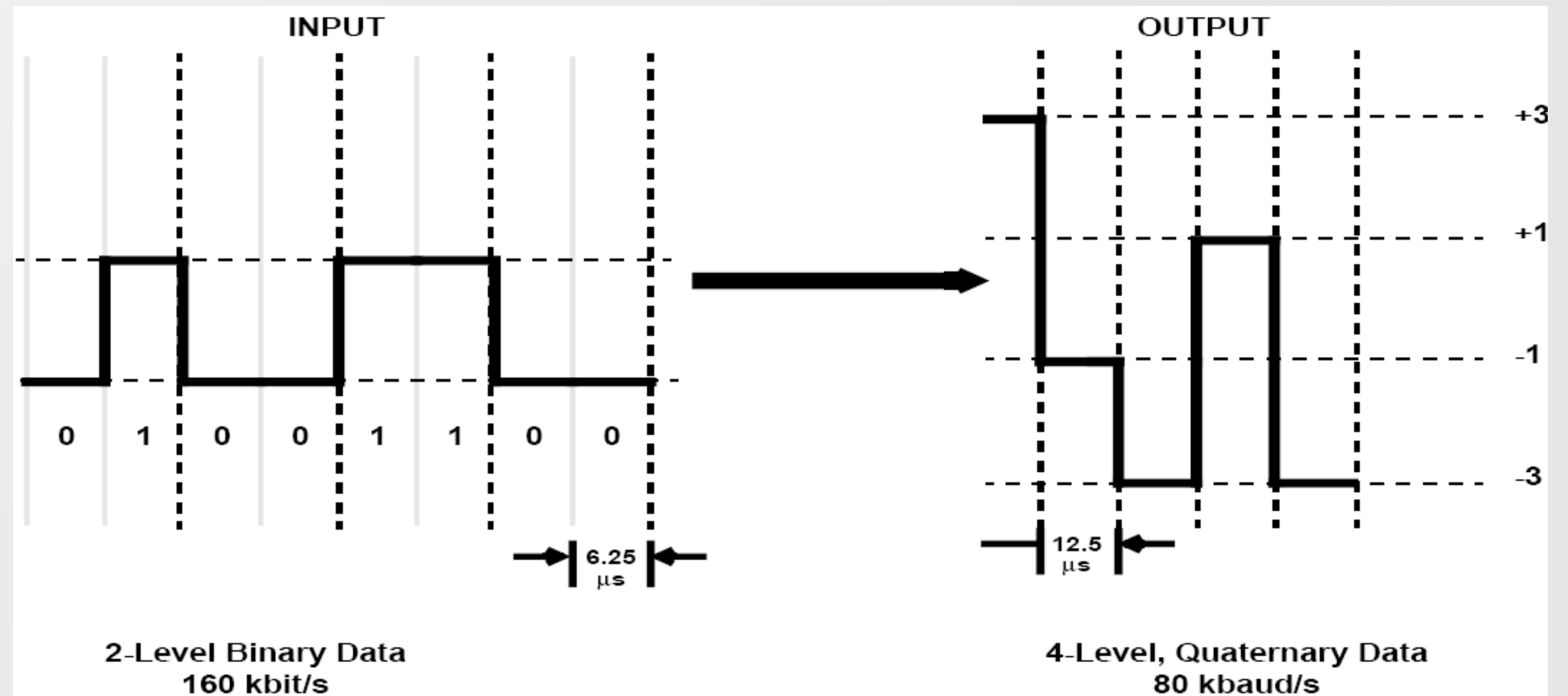
# 2B1Q

- Mapeia 2 bits (dibit) para um símbolo (sinalização)
- Usa quatro níveis de sinal: -450 mV, -150 mV, 150 mV, 450 mV
- Não balanceia o nível DC
- Usado na interface pública de acesso básico ISDN (DR = 160 Kbit/s; MR = 120 Kbaud) e no HDSL

# 2B1Q



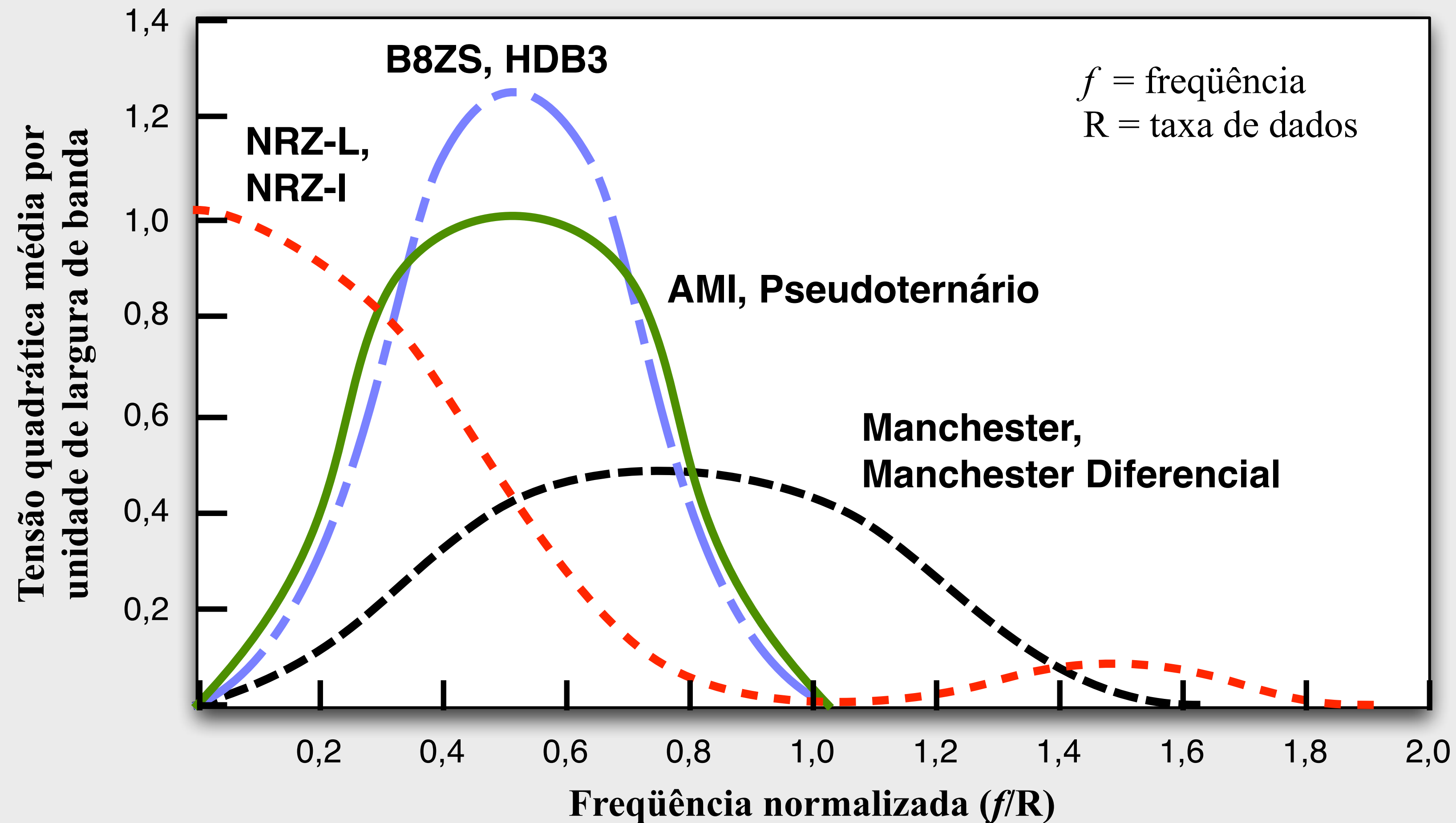
Dibit	Signal level
10	+450 mV
11	+150 mV
01	-150 mV
00	-450 mV



# Outros Códigos

- CMI (Coded Mark Inversion)
  - 0 -> 01
  - 1 -> 00/11, alternadamente
  - Propriedades: auto-sincronização e auto-igualização
  - O baud rate é dobro do bit rate
  - A “palavra” 10 pode ser usada para transportar informação de controle
  - Usado no sistema E4 europeu (4a hierarquia PDH –

# Densidade Espectral





# Taxa de Modulação

onde:

$$D = \frac{R}{L} = \frac{R}{\log_2 M}$$

- $D$  : taxa de modulação, baud
- $R$  : taxa de dados, bit
- $M$  : número de elementos diferentes de sinal =  $2^L$
- $L$  : número de bits por elemento de sinal

# Taxa Normalizada de Transição da Sinalização

	Mínimo	10101010...	Máximo
NRZ-L	0,0 (tudo 0 ou 1s)	1,0	1,0
NRZ-I	0,0 (tudo 0s)	0,5	1,0 (tudo 1s)
AMI	0,0 (tudo 0s)	1,0	1,0
Pseudoternário	0,0 (tudo 1s)	1,0	1,0
Manchester	1,0 (101010...)	1,0	2,0 (tudo 0 ou 1s)
Manchester Diferencial	1,0 (tudo 1s)	1,5	2,0 (tudo 0s)

# Modulação Analógica

- Processo de combinar um sinal de entrada  $m(t)$  e uma portadora  $c(t)$  de frequência  $f_c$  para produzir um sinal  $s(t)$  com banda centrada em  $f_c$
- A portadora se apresenta na forma:

$$c(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + \varphi_c)$$

# Modulação Analógica

- Normalmente frequências mais altas são necessária para uma transmissão efetiva
- Em mídias não-guiadas, os sinais são virtualmente impossíveis de serem transmitidos (antenas quilométricas)
  - AM (Modulação em Amplitude)
  - FM (Modulação em Frequência)
  - PM (Modulação em Fase)

# Modulação em Amplitude

- Forma mais simples de modulação expressa por:

$$s(t) = [A_c + k_a m(t)] \cos(2\pi f_c t)$$

- O parâmetro  $k_a$  é o fator característico de modulação
- Considerando:

$$m(t) = A_m \cos(2\pi f_m t)$$

$$s(t) = A_c [1 + (k_a A_m / A_c) \cos(2\pi f_m t)] \cos(2\pi f_c t)$$

# Modulação em Amplitude

- Chamamos de índice de modulação a:

$$n_a = (k_a A_m / A_c)$$

- Assim:

$$s(t) = [1 + n_a \cos(2\pi f_m t)] c(t)$$

- O número 1 utilizado é a componente DC para evitar a perda de informações
- Sinais modulados, apresentam uma envoltória com a informação

# Modulação em Amplitude

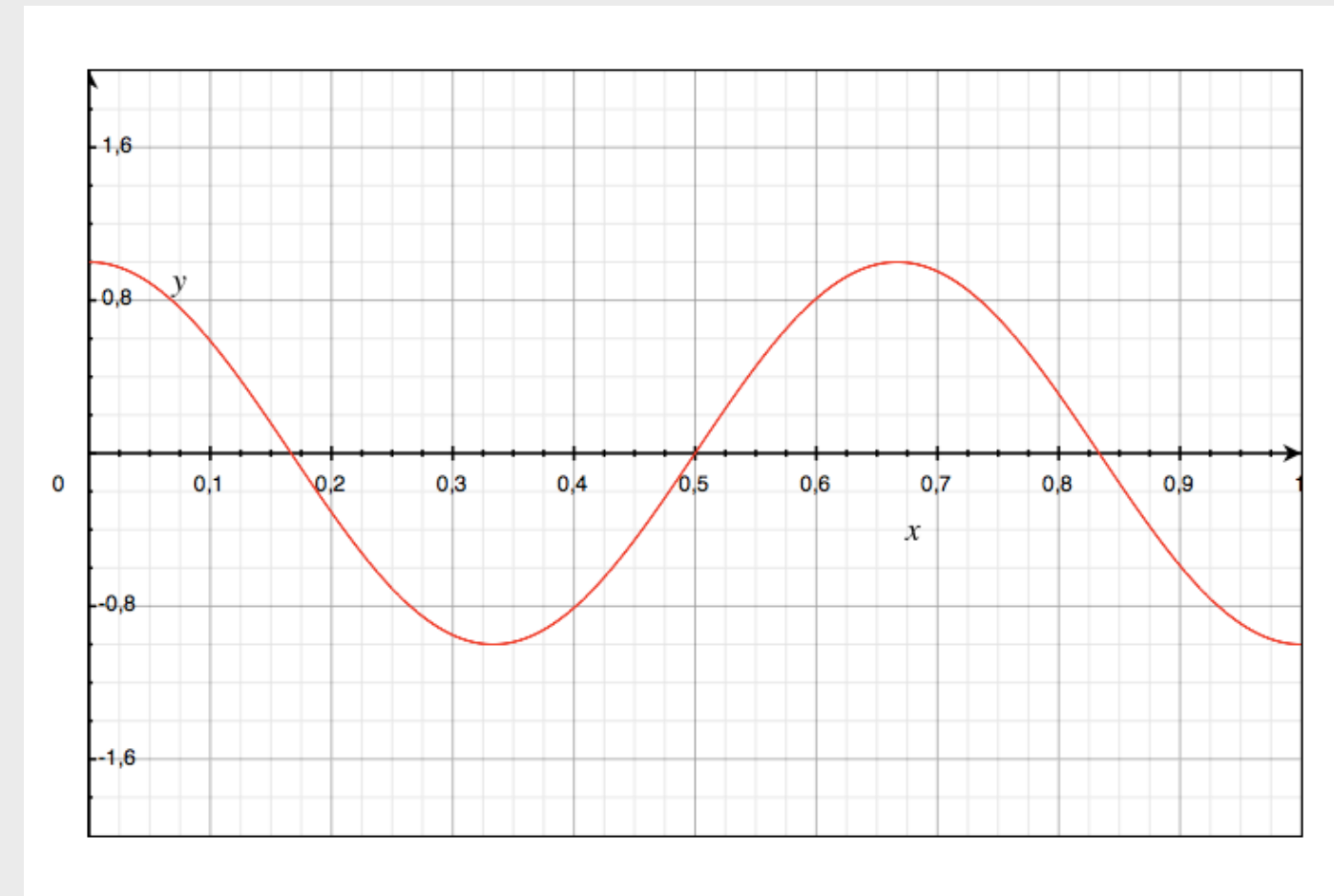
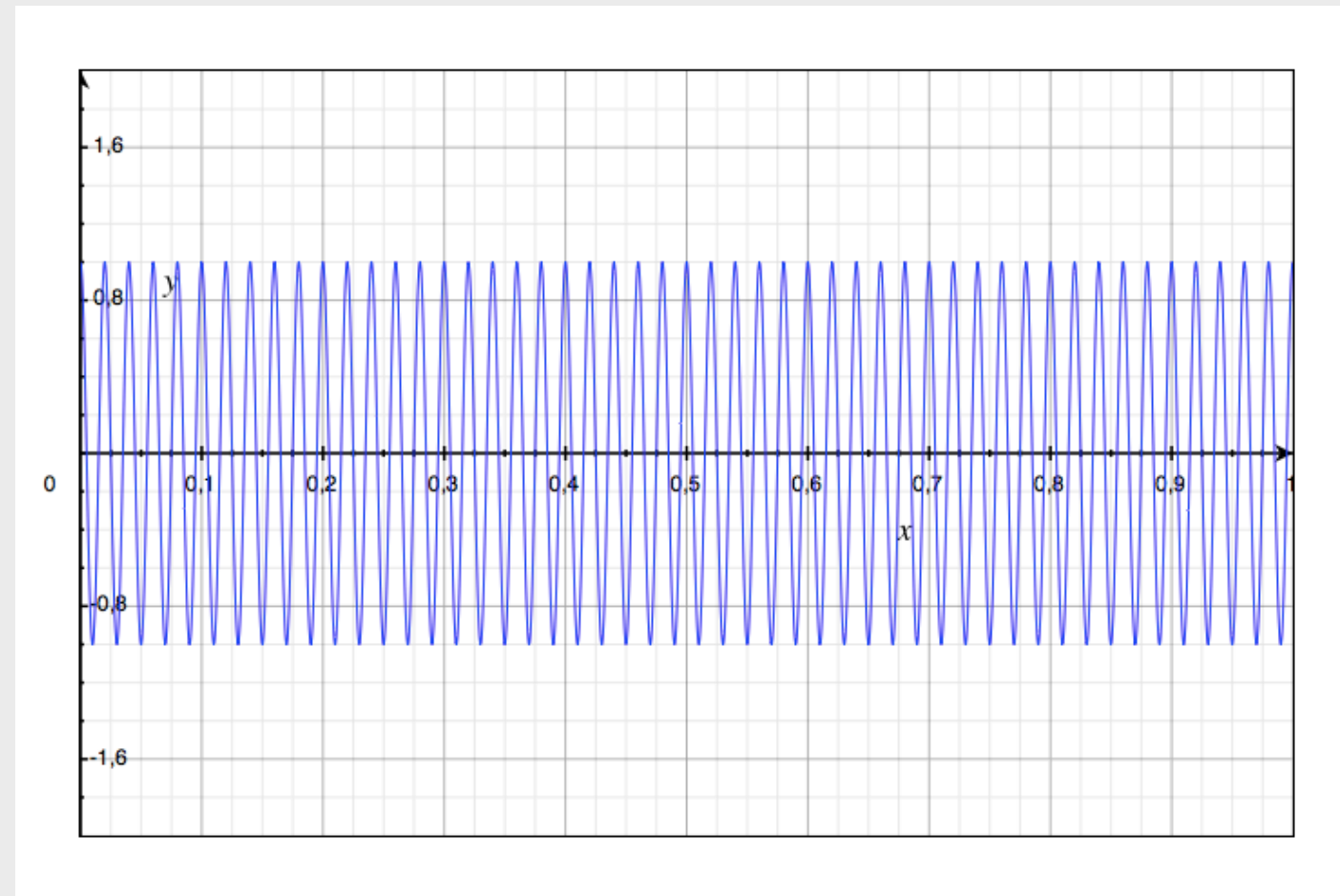
- Expandindo em série:

$$s(t) = [1 + n_a \cos(2\pi f_m t)] c(t)$$

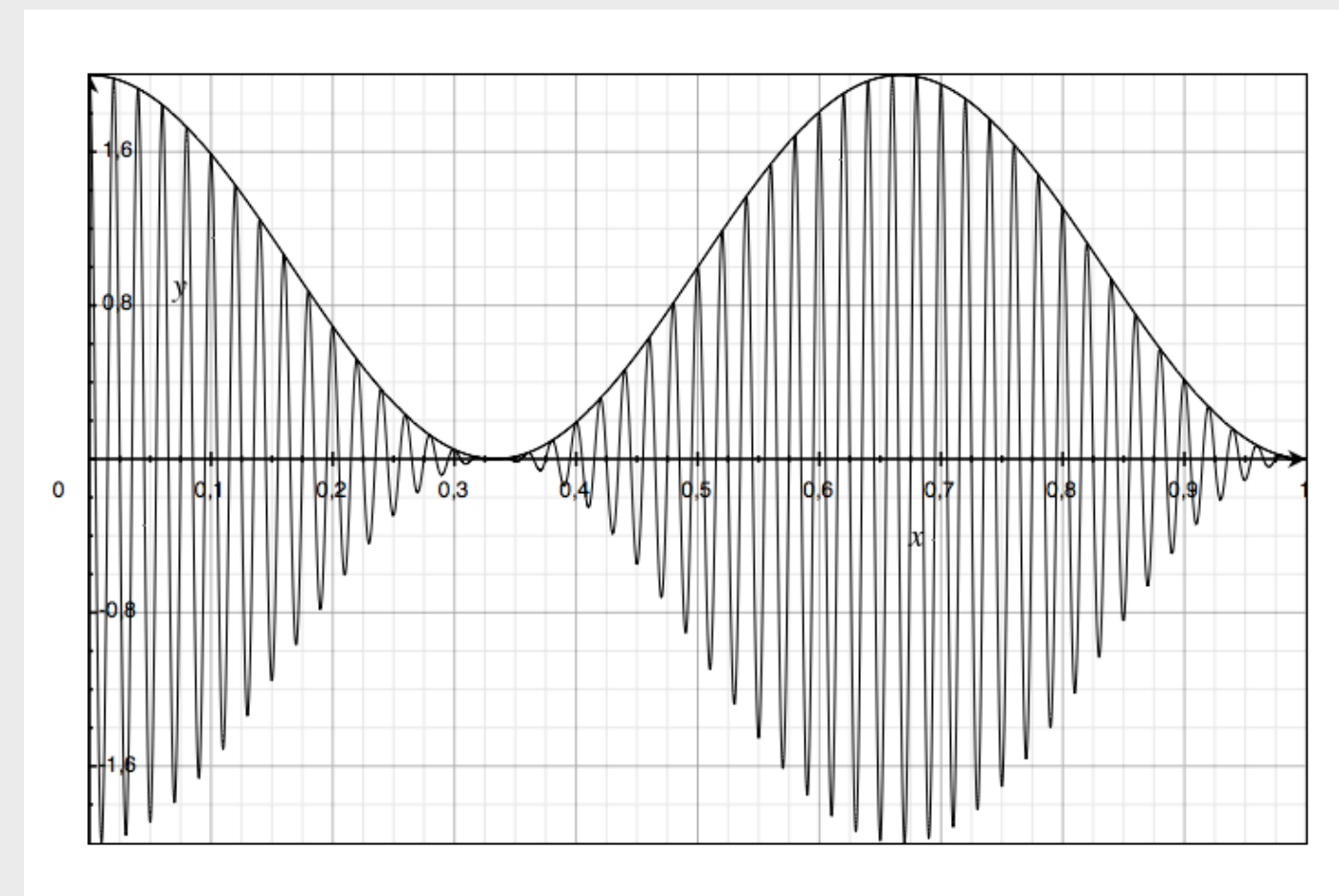
- Obtém-se:

$$s(t) = c(t) + (n_a/2) A_c \cos[2\pi (f_c + f_m) t] + (n_a/2) A_c \cos[2\pi (f_c - f_m) t]$$

# Modulação em Amplitude

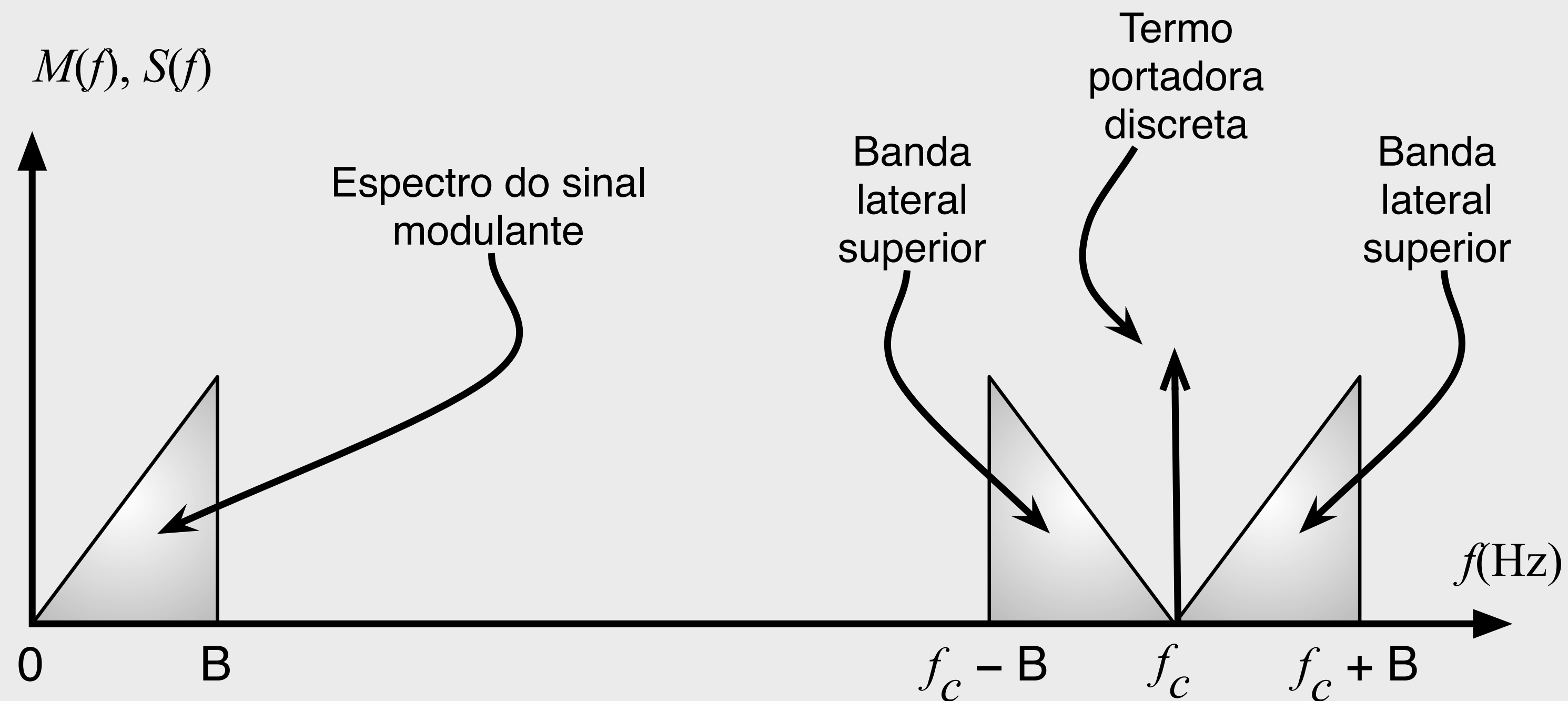


$$s(t) = [1 + n_a \cos(2\pi f_m t)] c(t)$$





# Espectro do Sinal Modulado



AM-DSB/TC  
(Double Side Band - Transmitted Carrier)

# Potência Transmitida

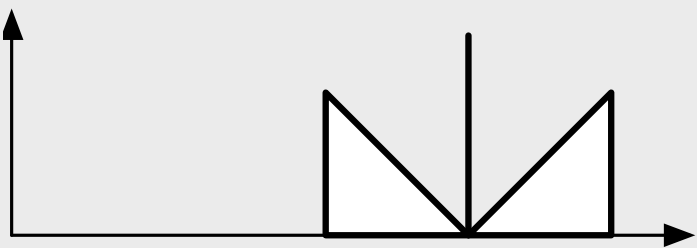
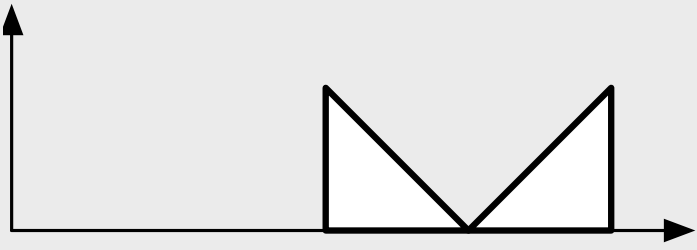
- Dada por:

$$P_t = P_c \left( 1 + \frac{n_a}{2} \right)$$

onde:

- $P_t$  = potência total transmitida
- $P_c$  = potência da portadora
- $n_a$  = índice de modulação

# Modulação AM-DSB

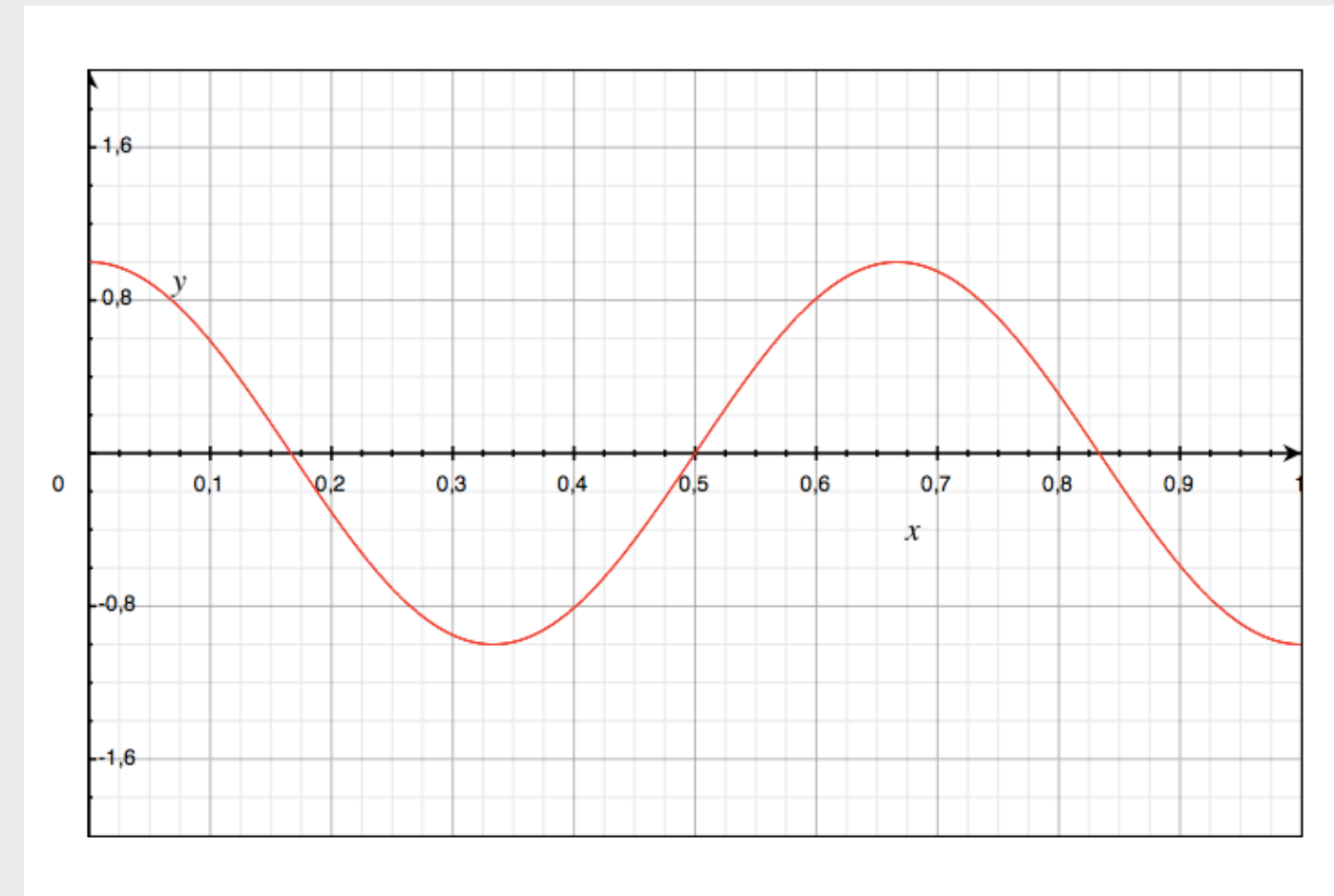
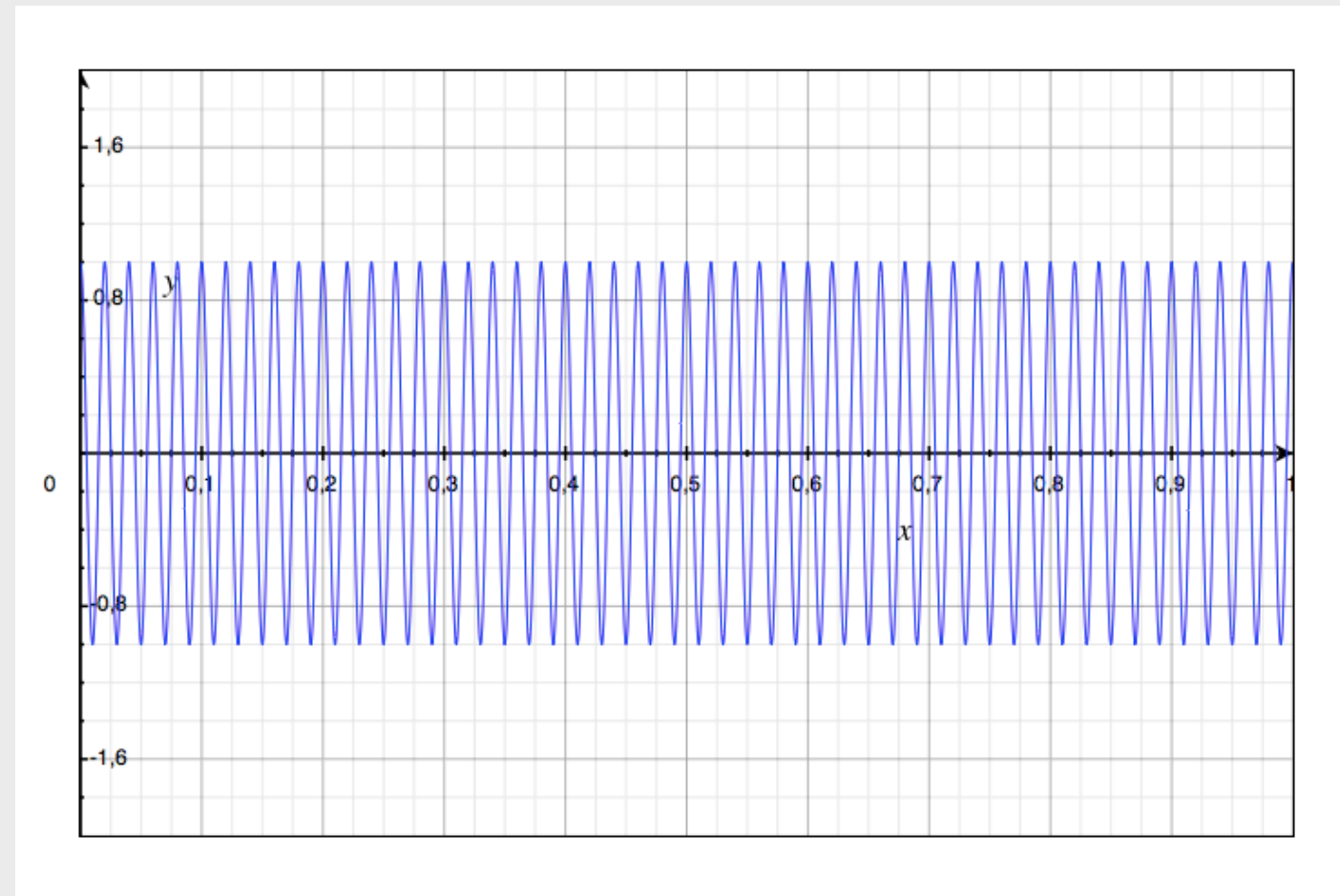
Tipo	Espectro	Características
DSB/TC (Double Side Band)		Configuração básica
DSB/SC (DSB Suppressed Carrier)		Economia de potência
DSB/RC (DSB Reduced Carrier)		Economia moderada de potência, simplifica a demodulação
SSB/SC (Single Side Band Suppressed Carrier)		Economia de potência e espectro
SSB/RC (SSB Reduced Carrier)		Economia moderada de potência e espectro, simplifica a demodulação

# Modulação DSB/SC

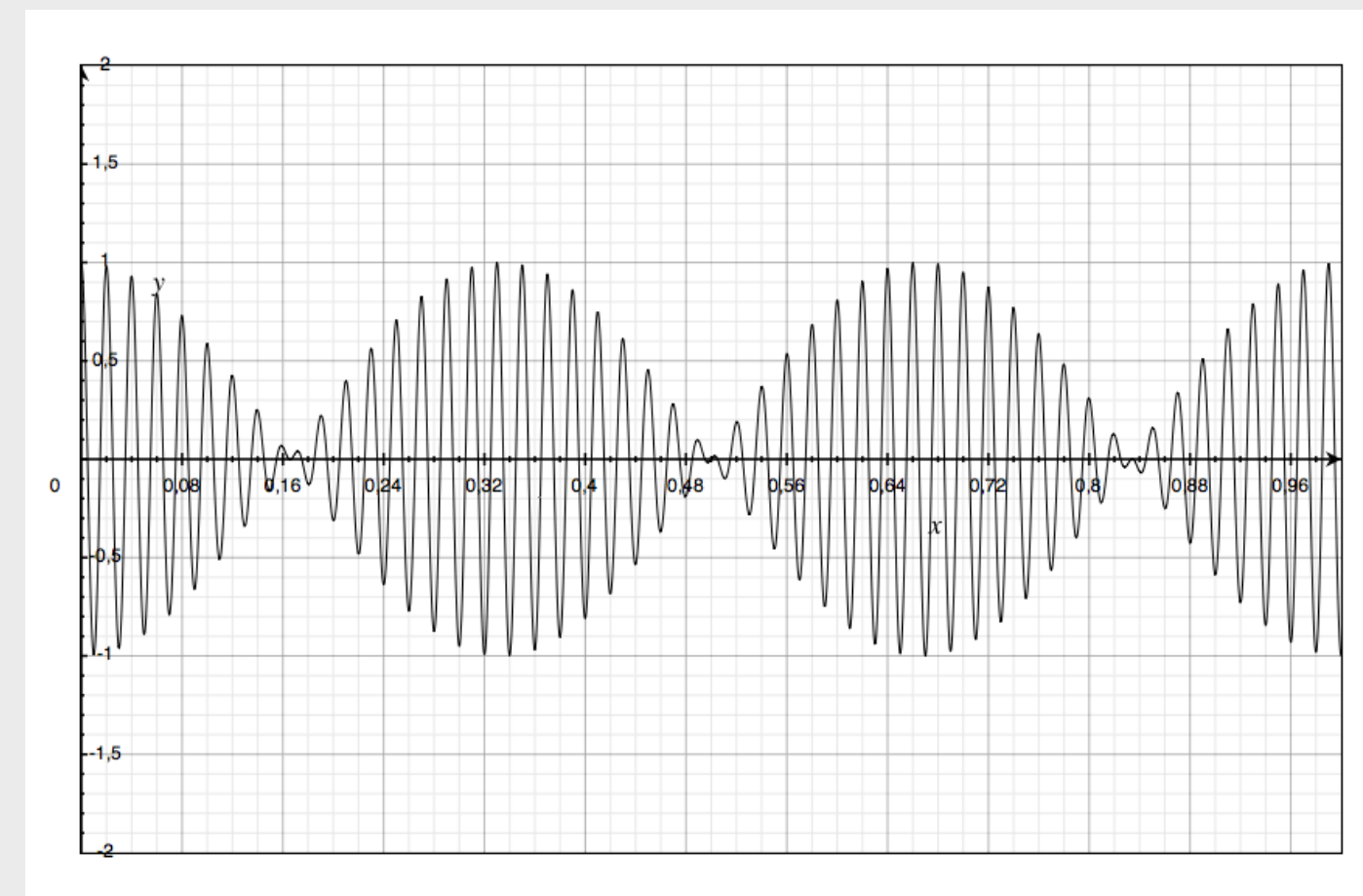
- DSB/TC:  $s(t) = [A_c + k_a m(t)] \cos(2\pi f_c t)$
- DSB/SC:  $s(t) = k_a m(t) \cos(2\pi f_c t)$
- Se:  
 $s_1(t) = [A_c + k_a m(t)/2] \cos(2\pi f_c t)$   
 $s_2(t) = [A_c - k_a m(t)/2] \cos(2\pi f_c t)$
- É fácil ver que:

$$s(t) = s_1(t) - s_2(t) = k_a m(t) \cos(2\pi f_c t)$$

# Modulação em Amplitude



$$s(t) = [n_a \cos(2\pi f_m t)] c(t)$$



# Modulação em Ângulo

- PM e FM são casos especiais de modulação em ângulo
- É expressa por:

$$s(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + \varphi(t)]$$

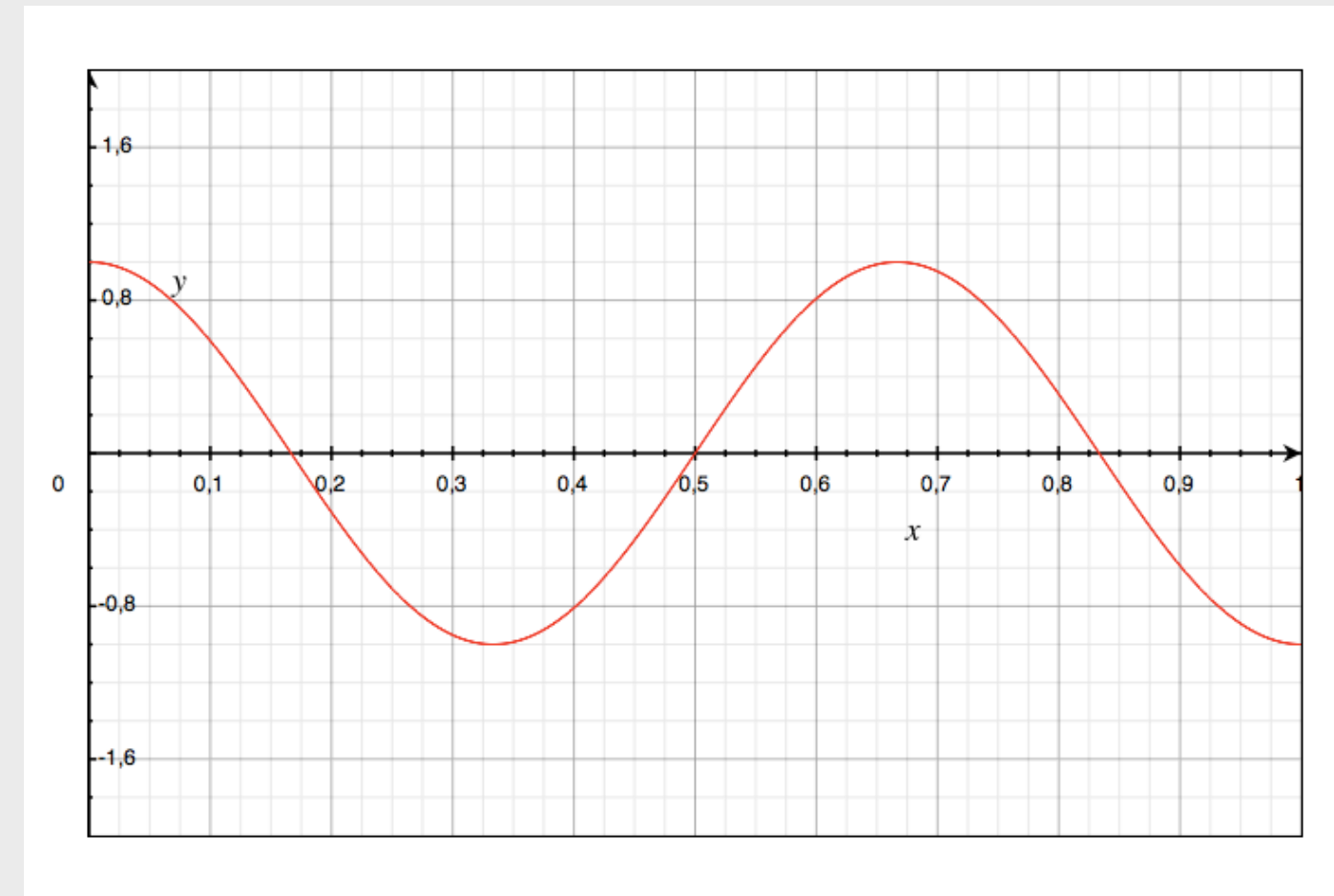
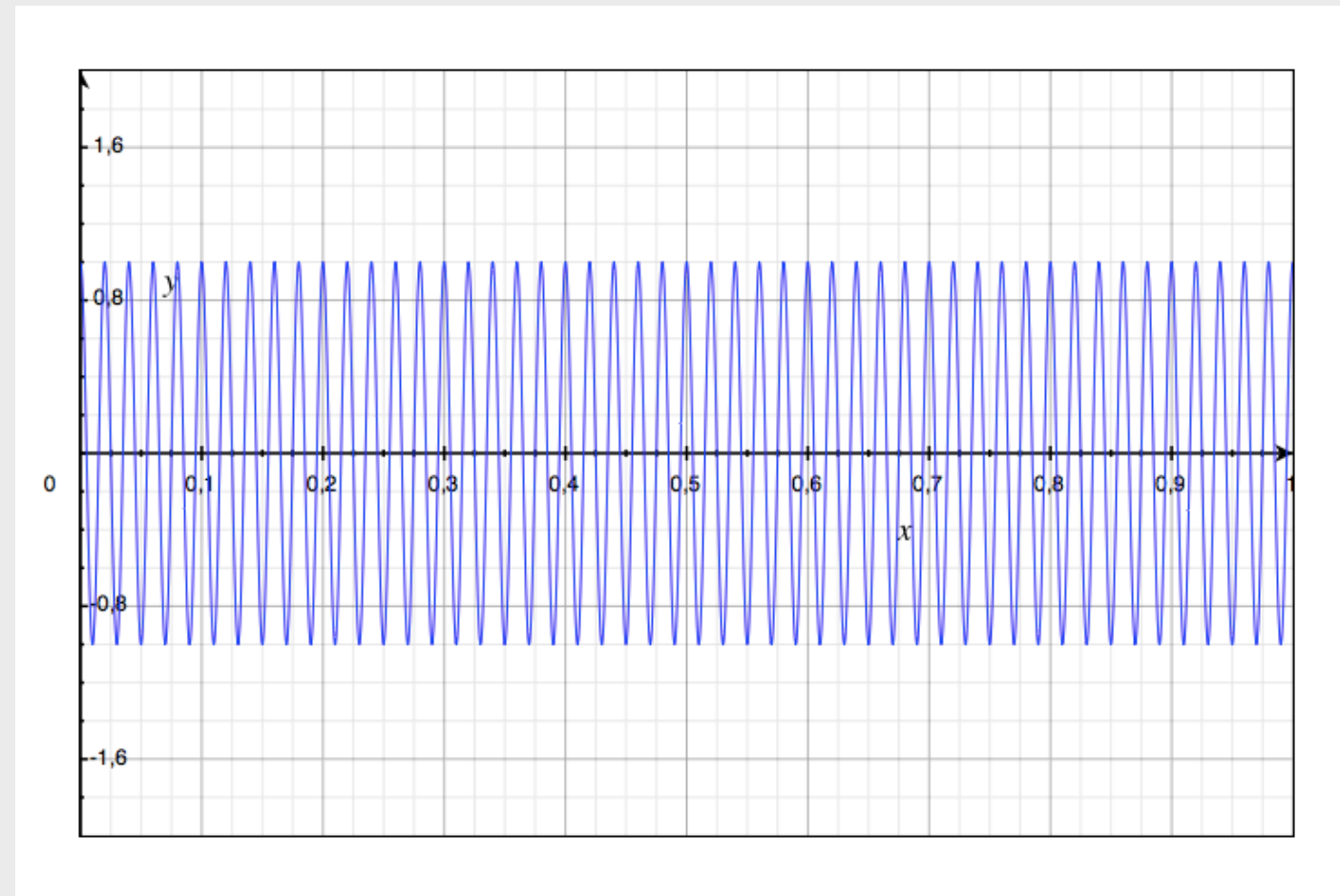
- Em PM:

$$\varphi(t) = n_p m(t)$$

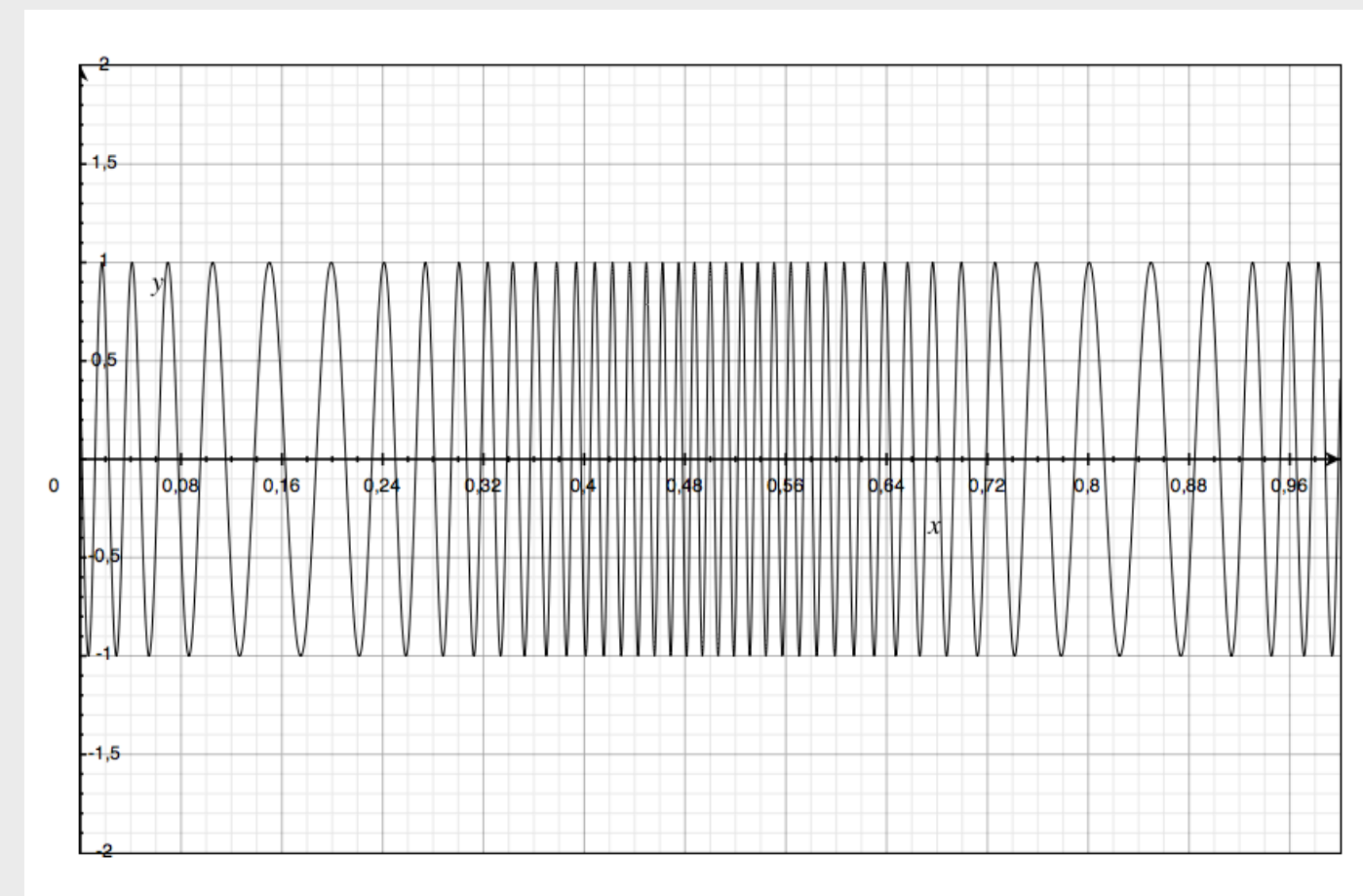
- Em FM:

$$\varphi'(t) = n_f m(t)$$

# Modulação em Fase

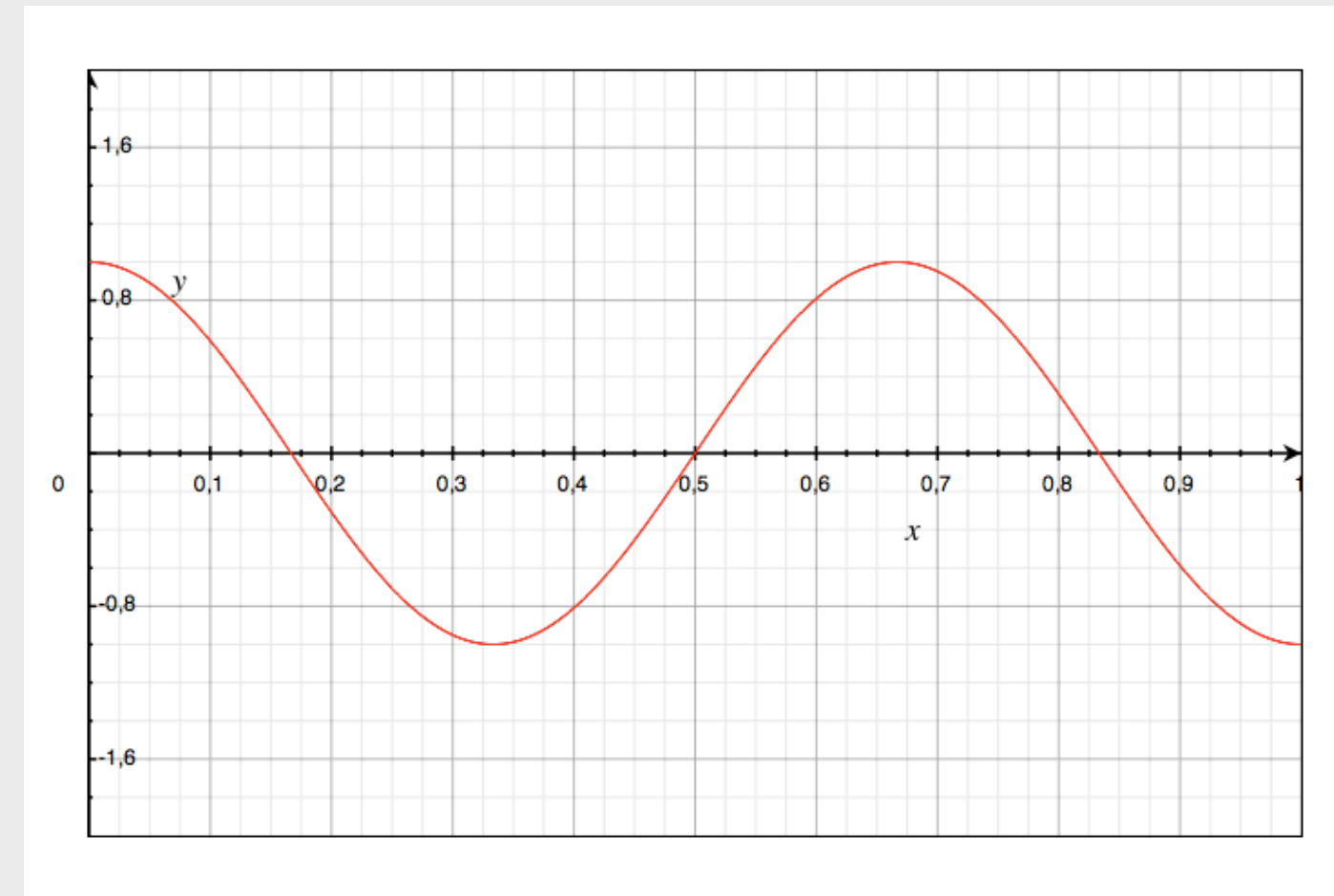
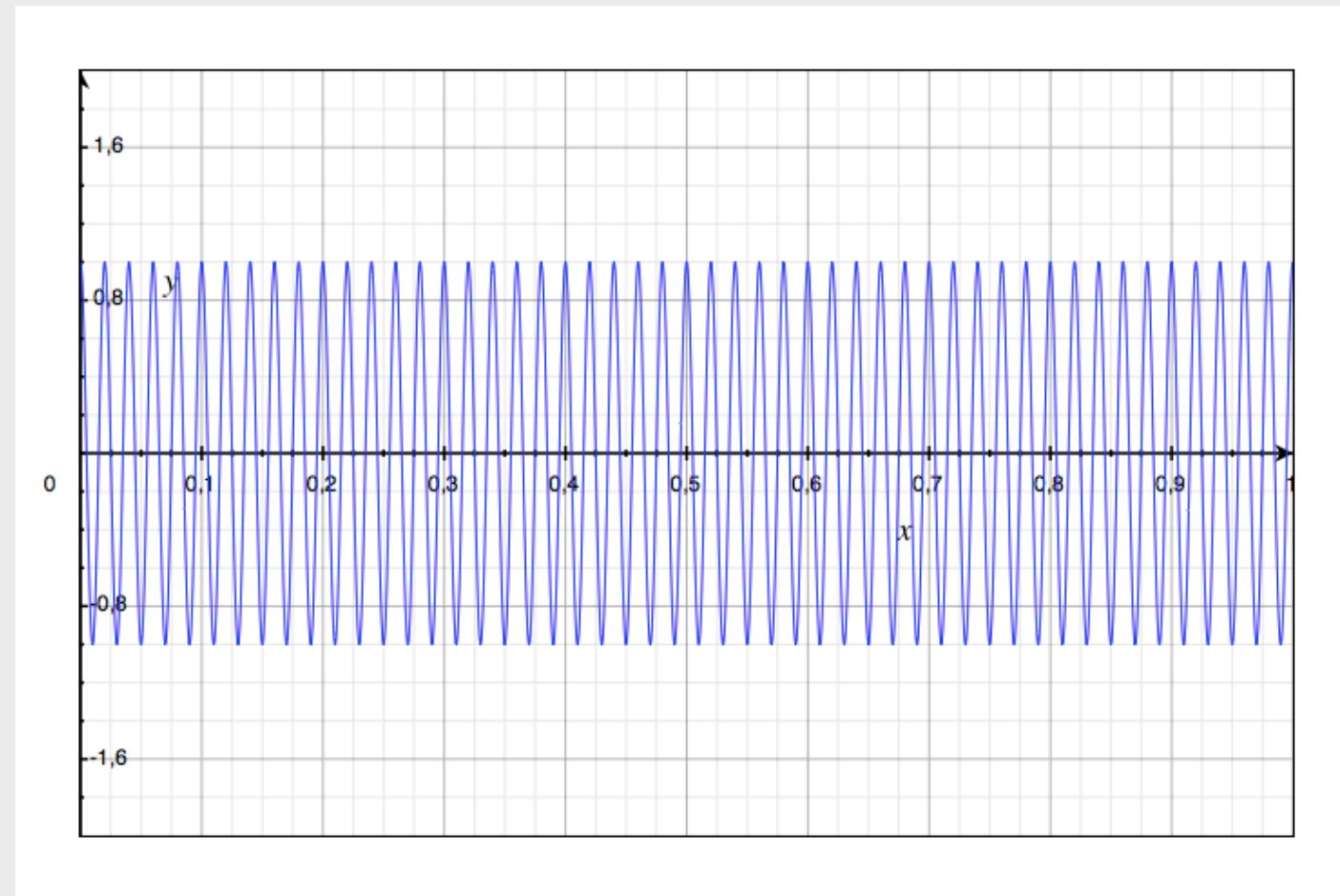


$$s(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + n_p m(t)]$$



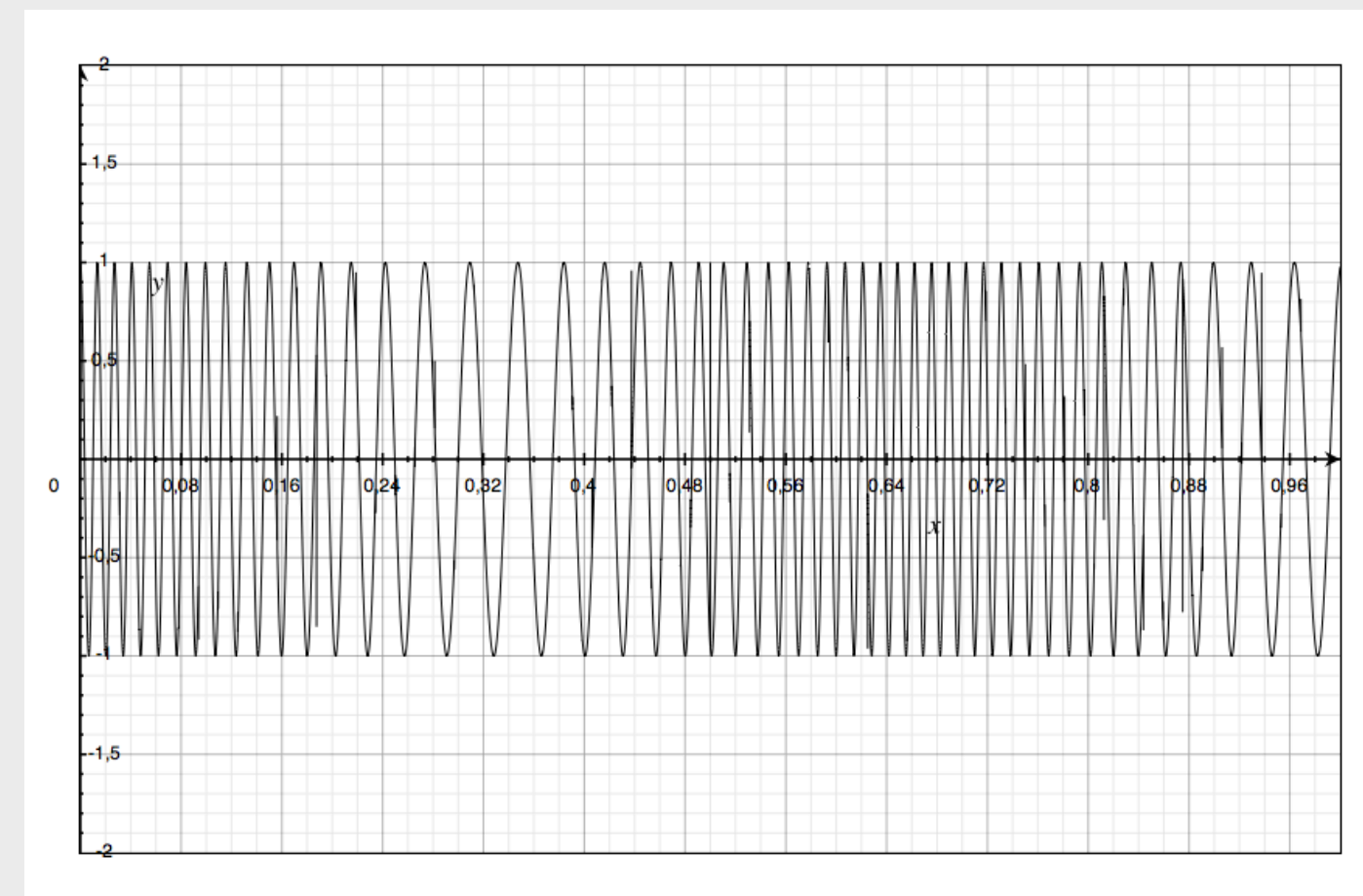


# Modulação em Frequência



$$s(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + \varphi(t)]$$

$$\varphi'(t) = n_f m(t)$$





# Modulação em Ângulo

- A fase de  $s(t)$  em qualquer instante é

$$2\pi f_c t + \varphi(t)$$

- O desvio instantâneo de fase em relação à portadora é  $\varphi(t)$
- Em PM, o desvio instantâneo de fase é proporcional a  $m(t)$

# Modulação em Ângulo

- A frequência pode ser definida como a taxa de mudança da fase do sinal
- A frequência instantânea de  $s(t)$  é dada por:

$$2\pi f_i(t) = \frac{d}{dt}[2\pi f_c t + \varphi(t)]$$
$$f_i(t) = f_c + \frac{1}{2\pi} \varphi'(t)$$

- E o desvio instantâneo da frequência portadora é  $\varphi'(t)$ , que em FM é proporcional a  $m(t)$

# Modulação em Frequência

- O pico do desvio de frequência é dado por:

$$\Delta F = \frac{1}{2\pi} n_f A_m$$

- O índice de modulação afeta a largura de banda transmitida, mas não o nível de potência médio, que é dado por:

$$P_t = (A_c)^2/2$$

# Largura de Banda

- Em AM-DSB:

$$B_t = 2B$$

- Em FM e PM existem infinitas componentes, porém, na prática, utiliza-se a regra de Carson:

$$B_t = 2(\beta + 1)B$$

onde:

- Para PM:  $\beta = n_p A_m$
- Para FM:  $\beta = \Delta F/B = (n_f A_m)/(2\pi B)$

# Modulação Digital

- Sistema de telefonia pública
  - 300 Hz a 3400 Hz, utiliza modem (modulador-demodulador)
- **Amplitude shift keying** (ASK) - Amplitude
- **Frequency shift keying** (FSK) - Frequência
- **Phase shift keying** (PSK) - Fase

# Modulação Digital

- Sinal portadora:  $A_c \cos (2\pi f_c t + \varphi_c)$
- Sinal modulante:  $m(t)$  (discreto)
- Sinal modulado:  $A_c(t) \cos (2\pi f_c(t) t + \varphi_c(t))$

Variação da  
Amplitude



Variação da  
Frequência

Variação da  
Fase

# Deslocamento de Amplitude (ASK)

- Valores são representados por amplitudes diferentes da portadora
- A amplitude da portadora é deslocada para representar o dado
- BASK (ASK Binário)

$$s(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t) & 1 \text{ binário} \\ 0 & 0 \text{ binário} \end{cases}$$

# Deslocamento de Amplitude (ASK)

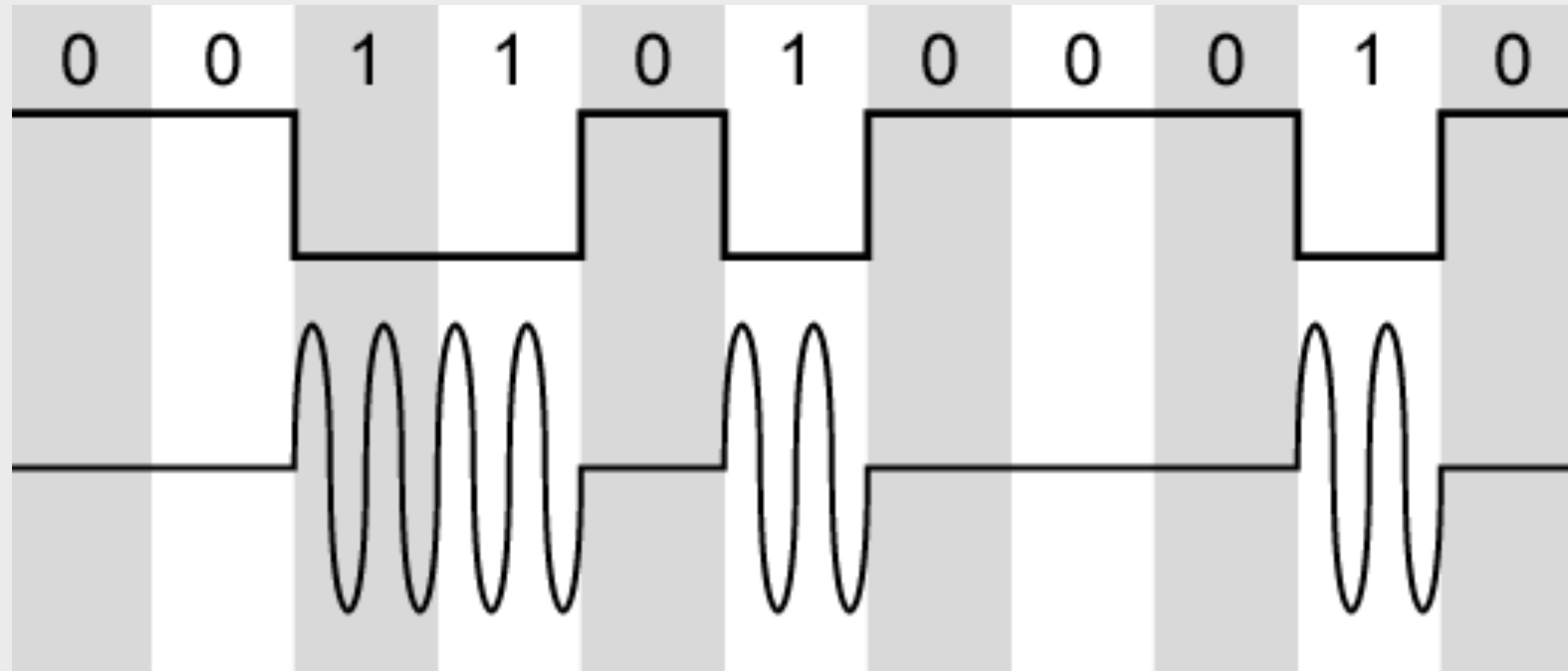
- Usualmente, uma amplitude é zero (presença ou ausência da portadora)
- Susceptível às mudança no ganho
- Ineficiente
- Até 1200 bps em linhas de voz
- Usado sobre fibras ópticas
- Cada elemento de sinalização representa apenas um **bit**



# Deslocamento de Amplitude (ASK)

- Pode apresentar mais de um nível
- Aumentando a eficiência, pois modula mais de um bit por intervalo de sinalização
- Maior susceptibilidade aos ruídos

# Deslocamento de Amplitude (ASK)



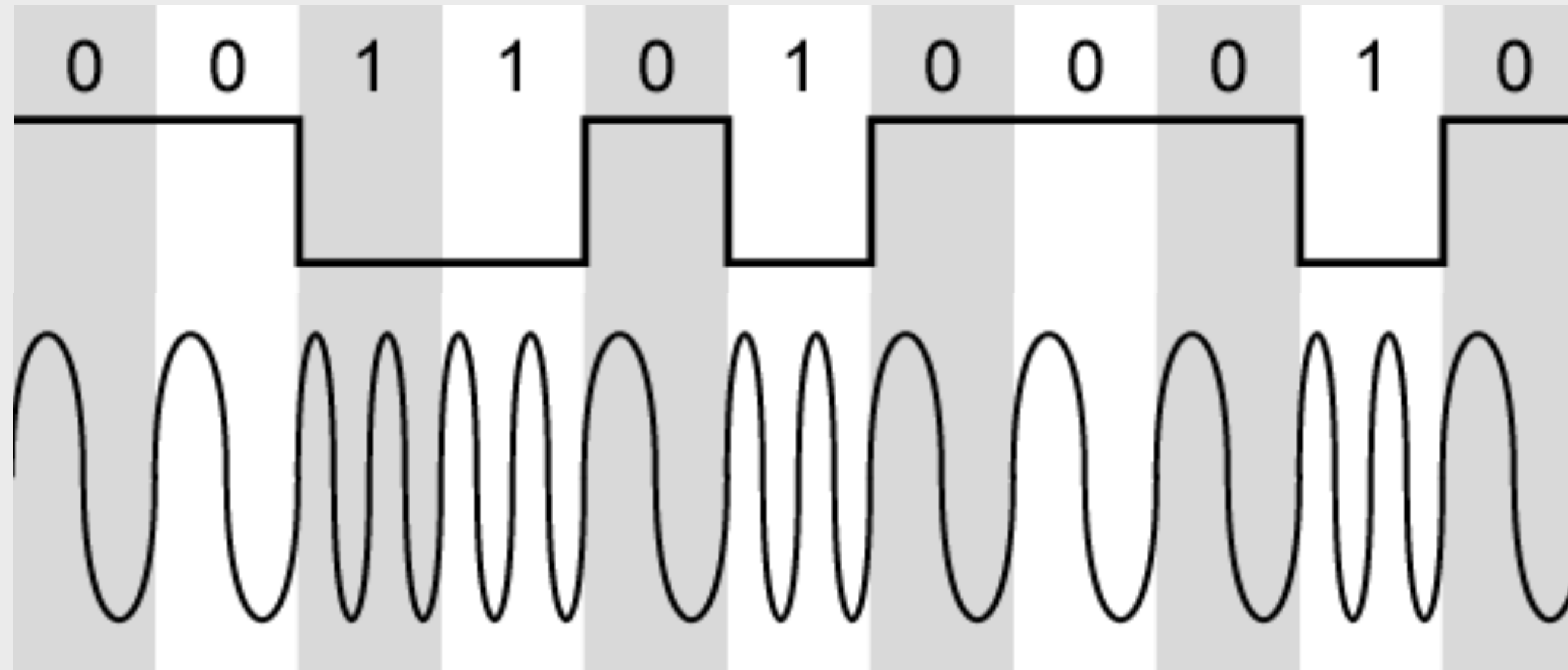
# Deslocamento de Frequência (FSK)

- Os bits de dados são codificados em frequências diferentes

$$s(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_1 t) & 1 \text{ binário} \\ A \cos(2\pi f_2 t) & 0 \text{ binário} \end{cases}$$

- Menos susceptíveis a erros que o ASK

# Deslocamento de Frequência (FSK)



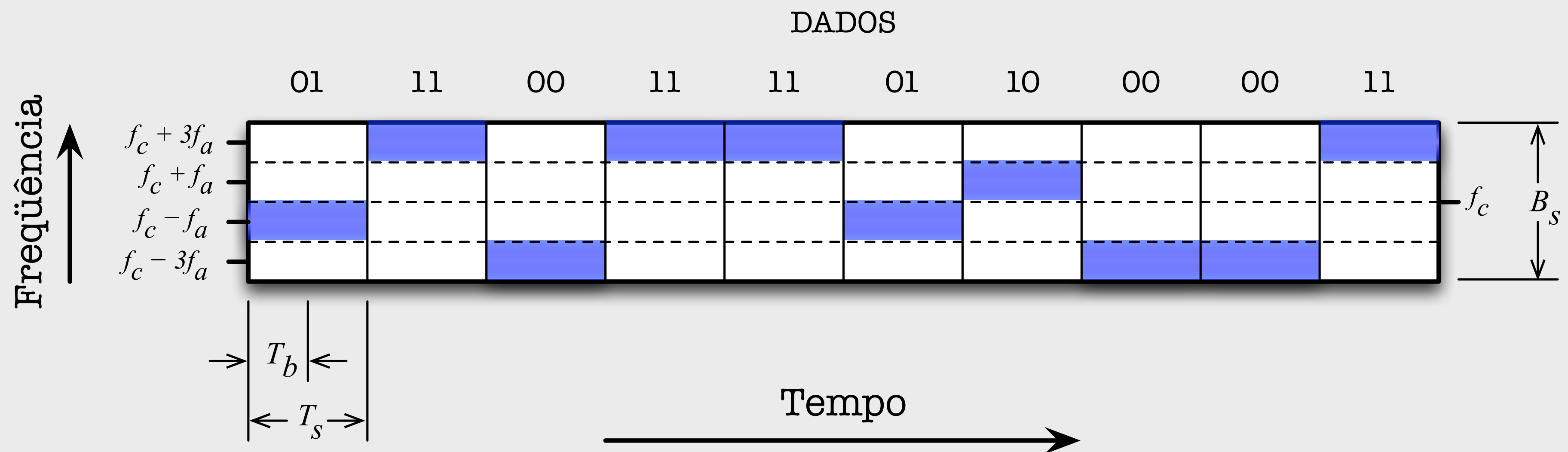
# Deslocamento Binário de Frequência

- A forma mais comum é a FSK binária (**Binary Frequency Shift Keying**), BPSK
- Codificam apenas um **bit** por elemento de sinalização
- Dois valores binários representados por duas frequências (próximas à portadora)
- Até 1200 bps em linhas de voz
- Pode operar em rádios de alta frequência
- Podem ser utilizados em LANs usando cabos coaxiais em altas frequências

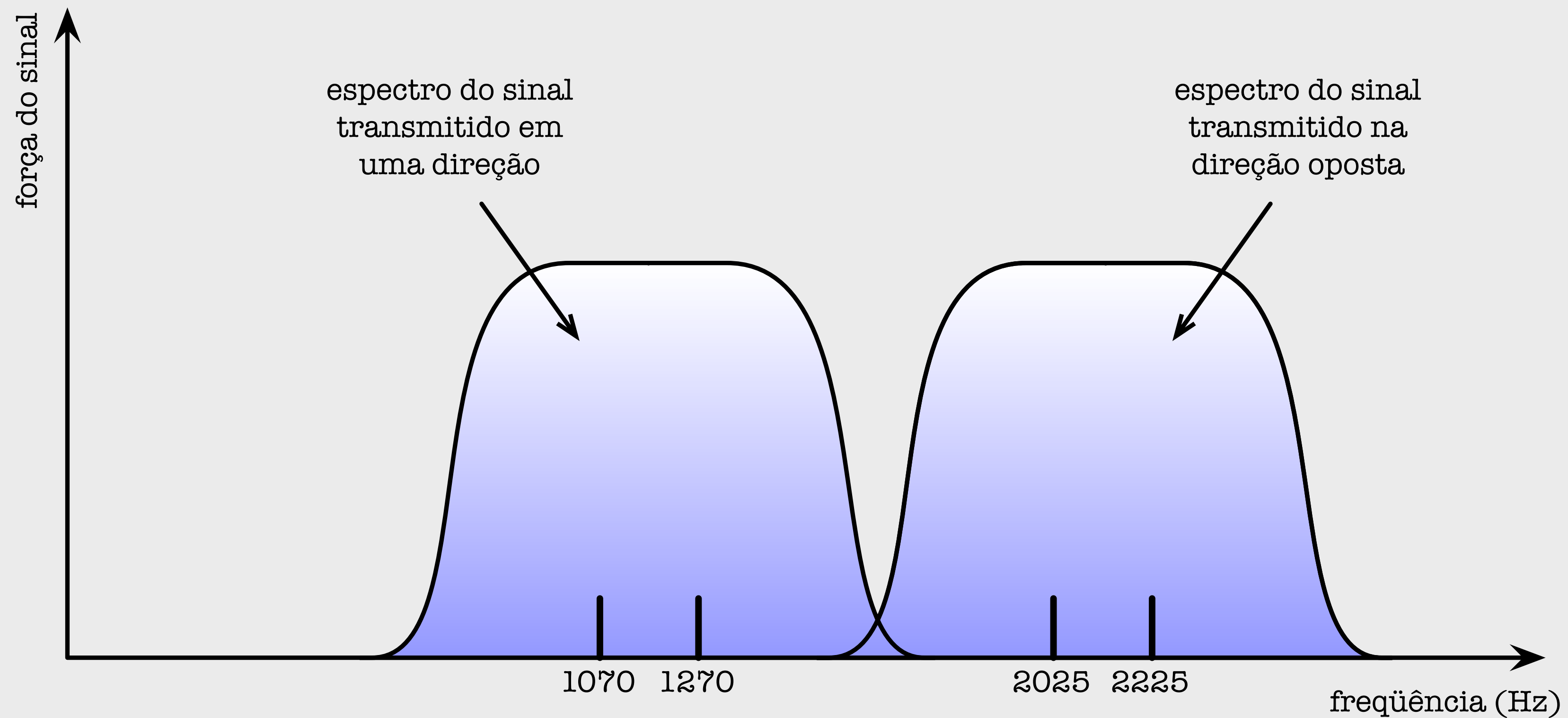
# Deslocamento Múltiplo de Frequência (MFSK)

- Multiple Frequency Shift Keying
- Utiliza mais de duas frequências
- Aumenta a eficiência da largura de banda
- Mais inclinado a erros que o BPSK
- Cada elemento de sinalização representa mais que um bit

# MFSK para M=4



# FSK em Linhas de Voz

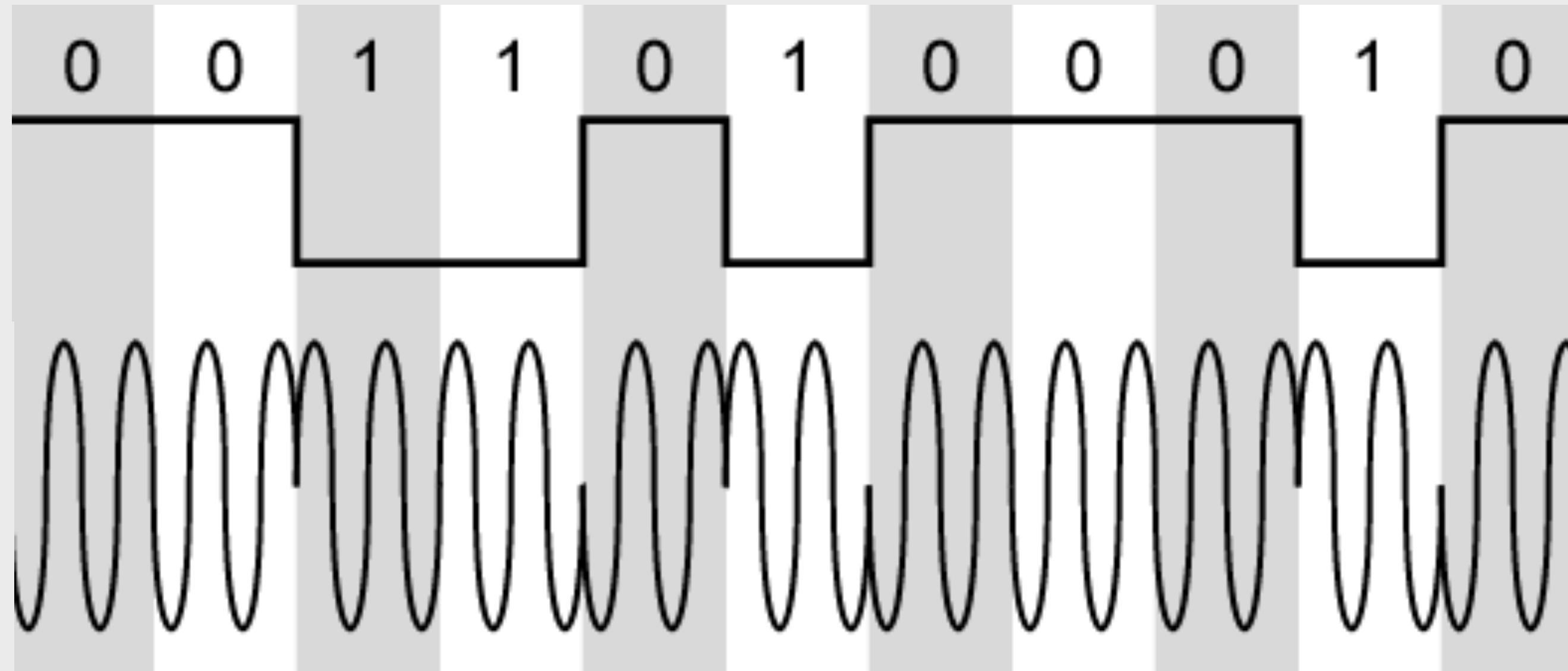




# Deslocamento de Fase (PSK)

- A fase do sinal da portadora é deslocada para representar o dado
- Pode ser construído de forma direta, onde o deslocamento de fase em relação à portadora representa o dado, ou de forma diferencial, onde a diferença de fase em relação ao período de sinalização anterior codifica o dado

# Deslocamento de Fase (PSK)



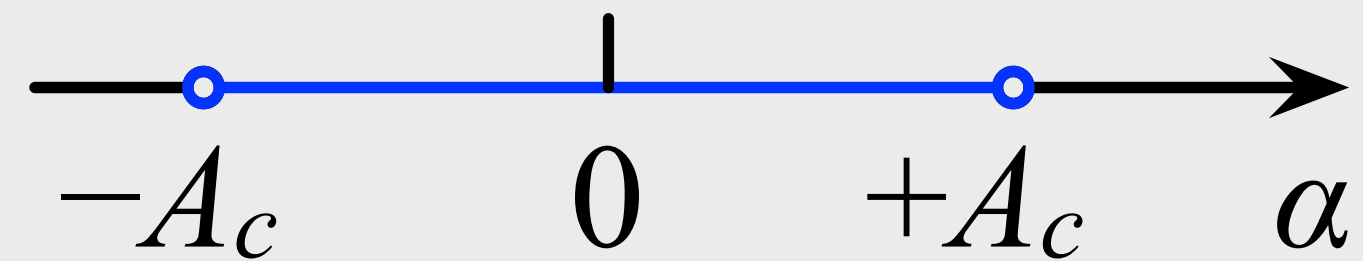
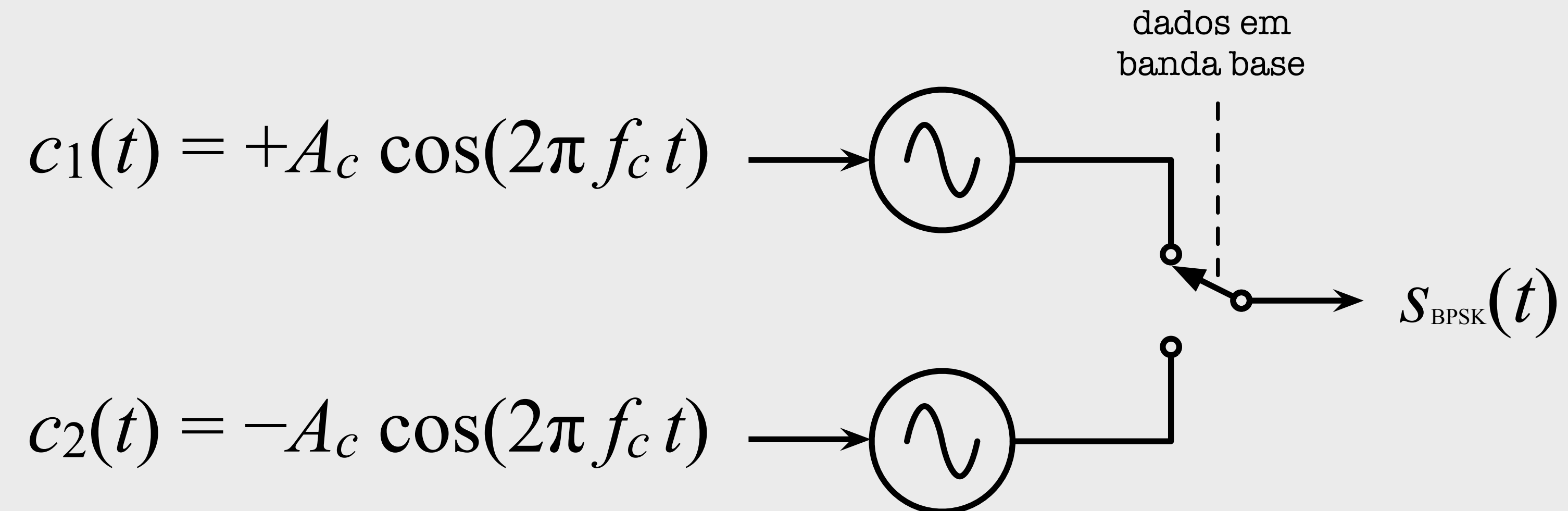
# Deslocamento de Fase (PSK)

- Deve ter referência da fase da portadora
- **Binary Phase Shift Keying** (BPSK): duas fase representando dois valores distintos (dígitos binários 1 e 0)

$$s(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t) & 1 \text{ binário} \\ A \cos(2\pi f_c t + \pi) & 0 \text{ binário} \end{cases} = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t) \\ -A \cos(2\pi f_c t) \end{cases}$$

- A cada transição de **bit** vai existir uma mudança de fase de  $180^\circ$

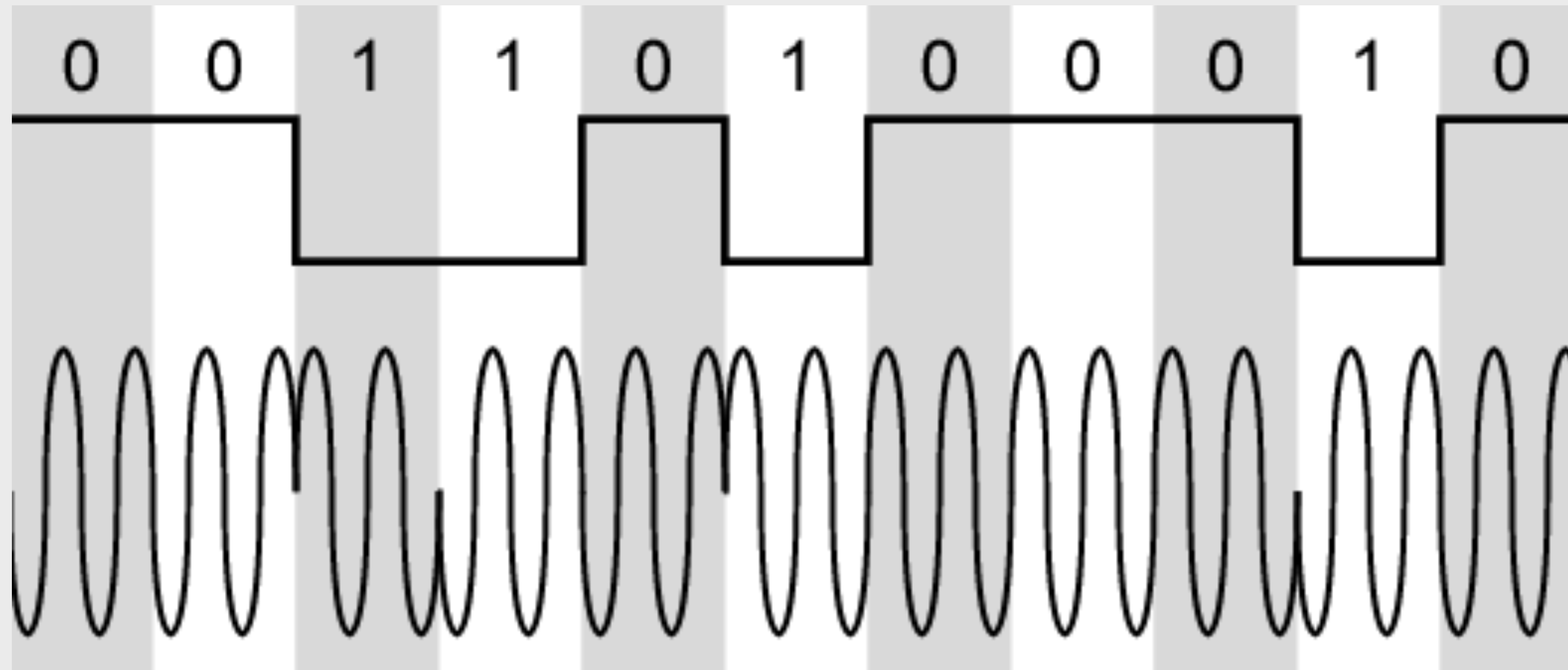
# Modulador BPSK



# Deslocamento Diferencial de Fase

- Differential Fase Shift Keying (DPSK)
- A fase é deslocada em relação ao último período de transmissão ao invés de se basear a algum sinal de referência

# Deslocamento Diferencial de Fase

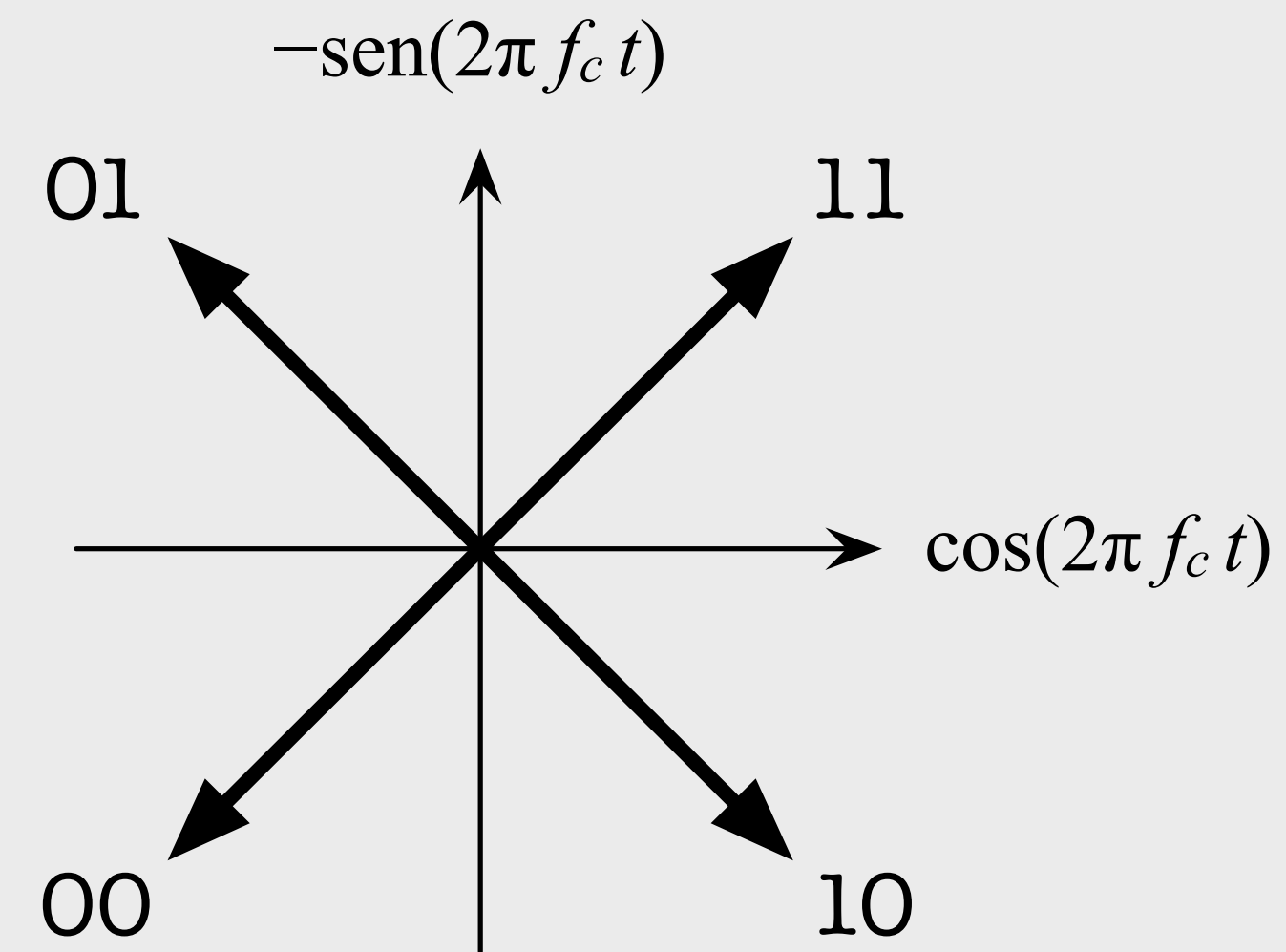


# PSK em Quadratura (QPSK)

- Uso mais eficiente da banda, pois cada elemento de sinal representa mais que um bit
  - Ex. Deslocamentos de  $\pi/2$  ( $90^\circ$ )
  - Cada elemento representa dois bits
  - Pode usar 8 ângulos de fase e apresentar mais de uma amplitude
  - Modems 9600 bps utilizam 12 ângulos, e duas amplitudes

# PSK em Quadratura (QPSK)

$$s(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t + \frac{\pi}{4}) & 11 \\ A \cos(2\pi f_c t + \frac{3\pi}{4}) & 01 \\ A \cos(2\pi f_c t - \frac{3\pi}{4}) & 00 \\ A \cos(2\pi f_c t - \frac{\pi}{4}) & 10 \end{cases}$$

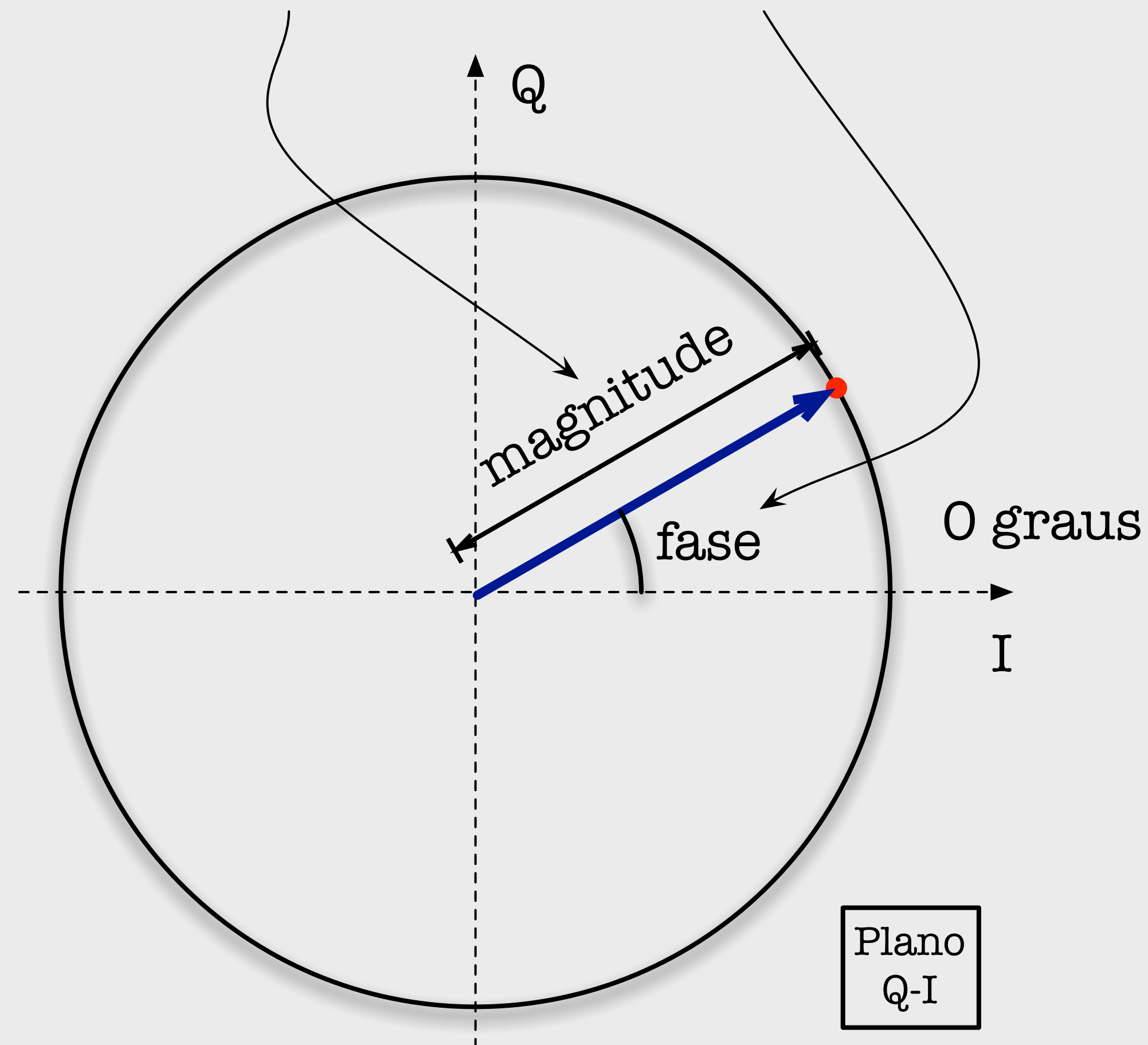


$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} I(t) \cos(2\pi f_c t) - \frac{1}{\sqrt{2}} Q(t) \sin(2\pi f_c t)$$

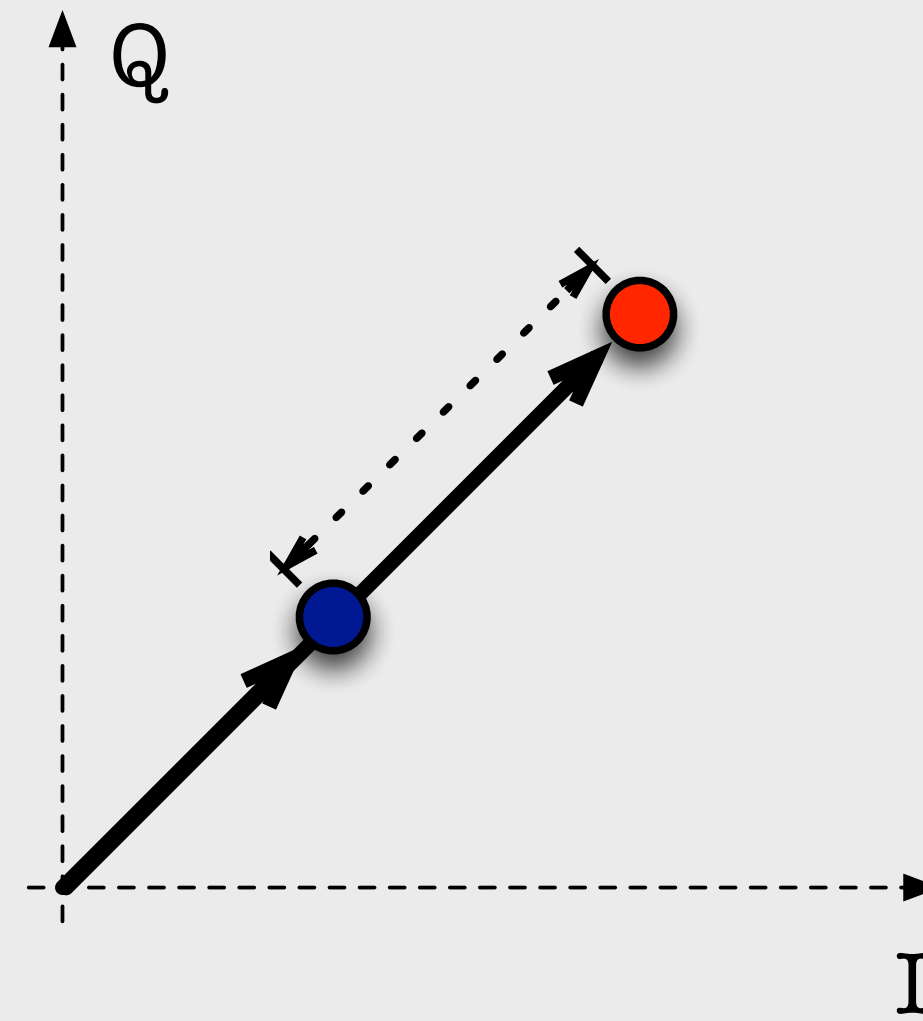


# Representação Vetorial do Sinal

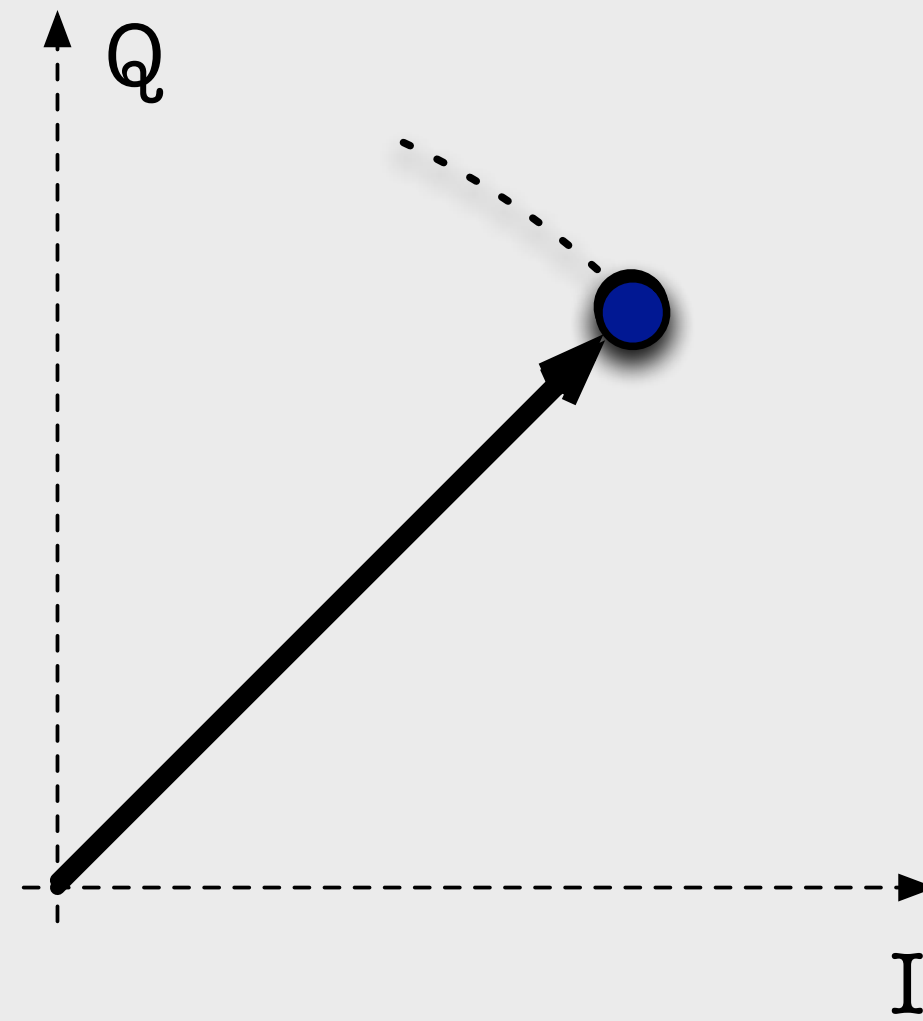
$$s(t) = A_c(t) \cos(2\pi f_c t + \varphi(t))$$



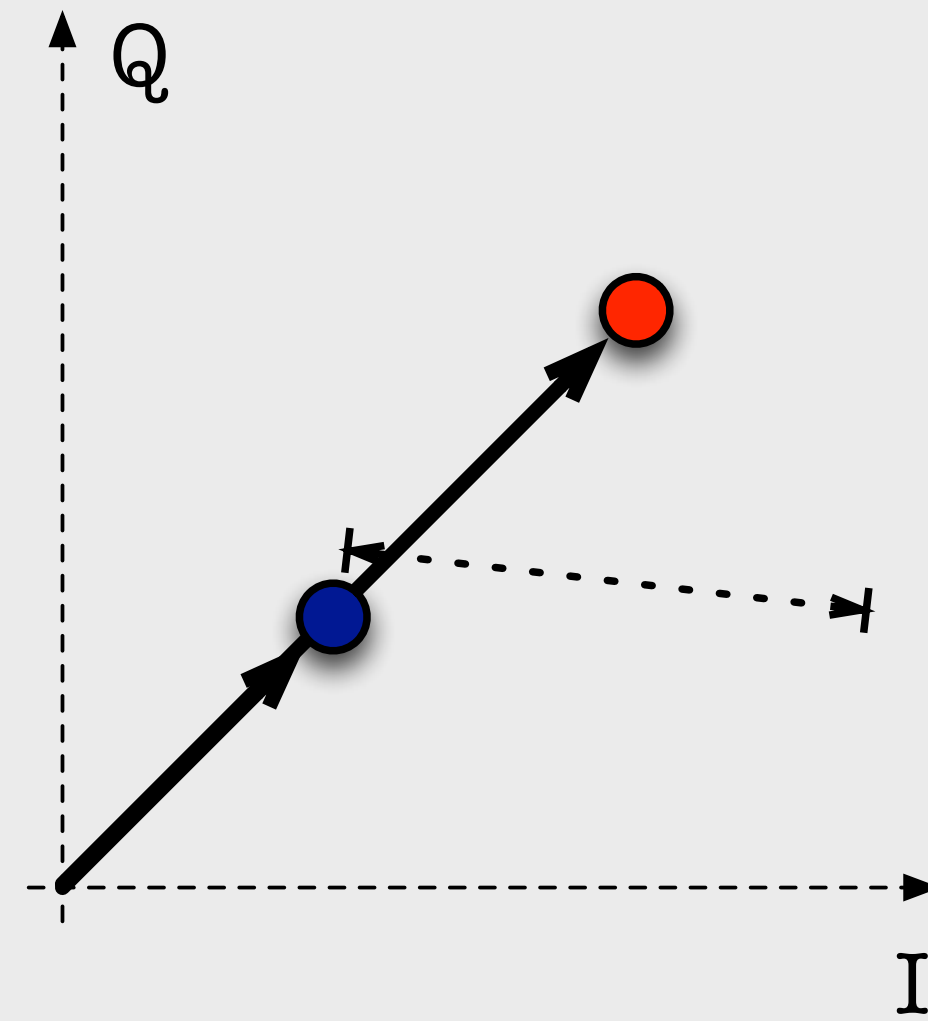
# Variação de Magnitude



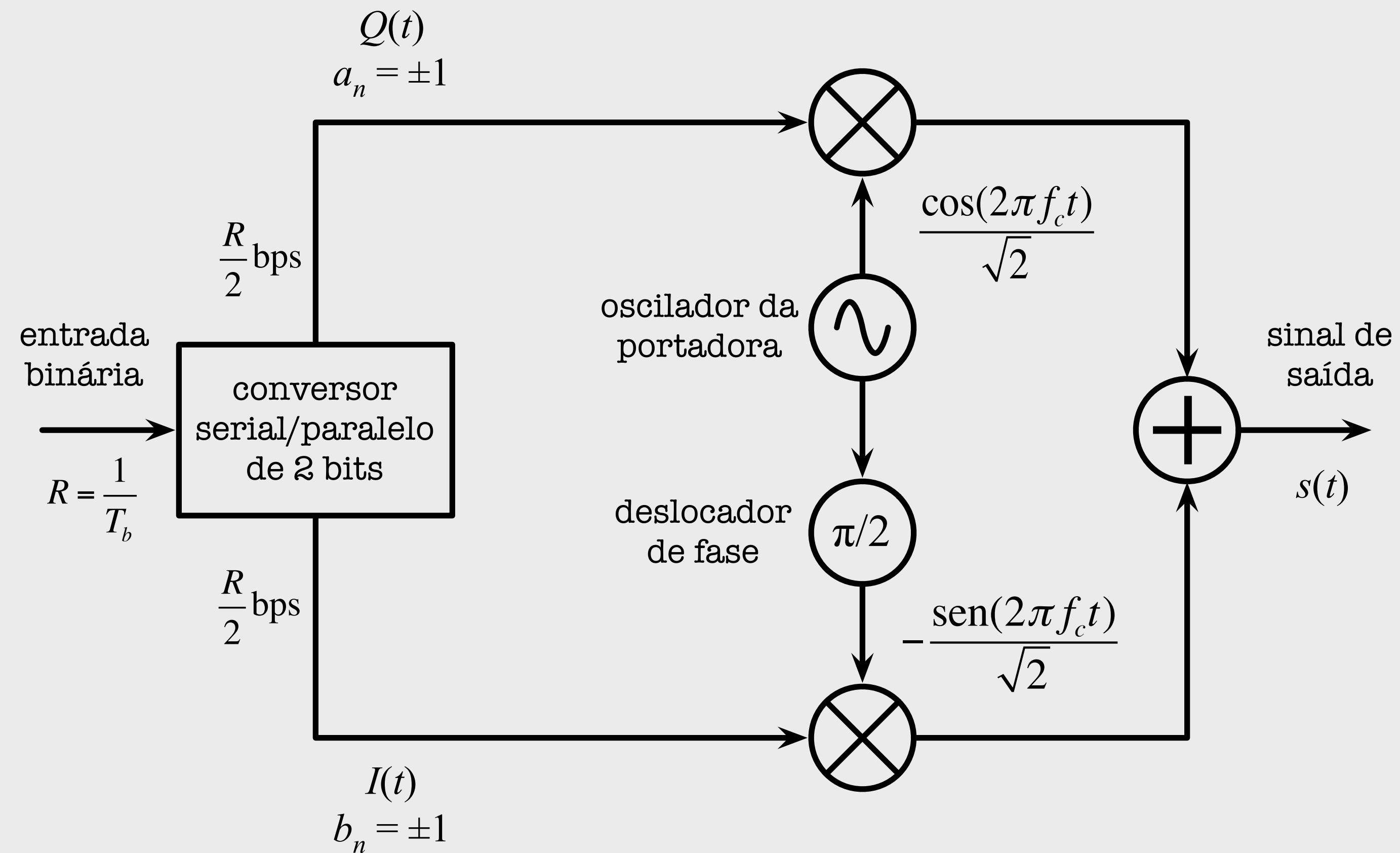
# Variação de Fase



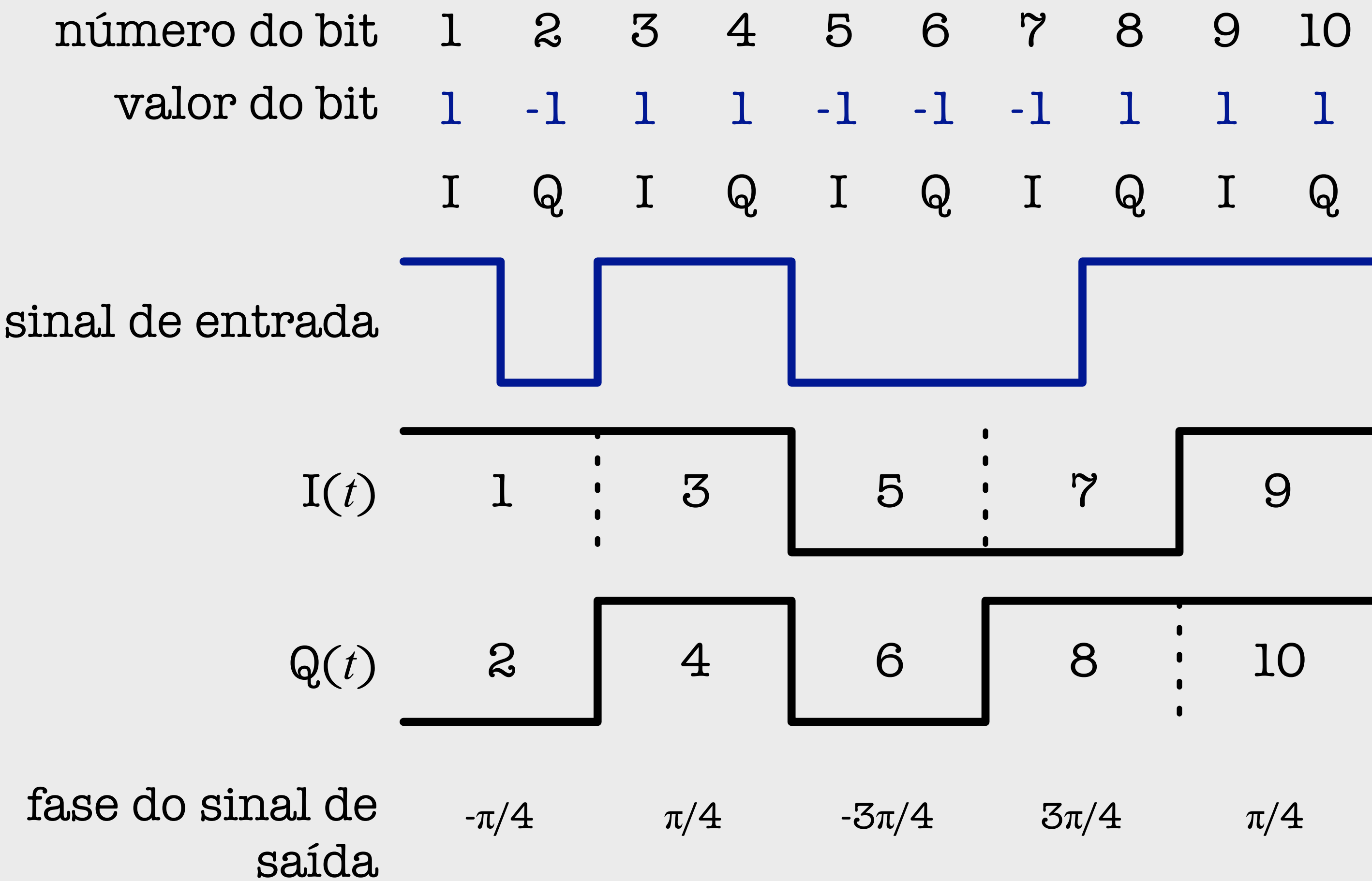
# Variação de Fase e Magnitude



# Modulador QPSK



# Sinal Modulado QPSK



# Análise QPSK

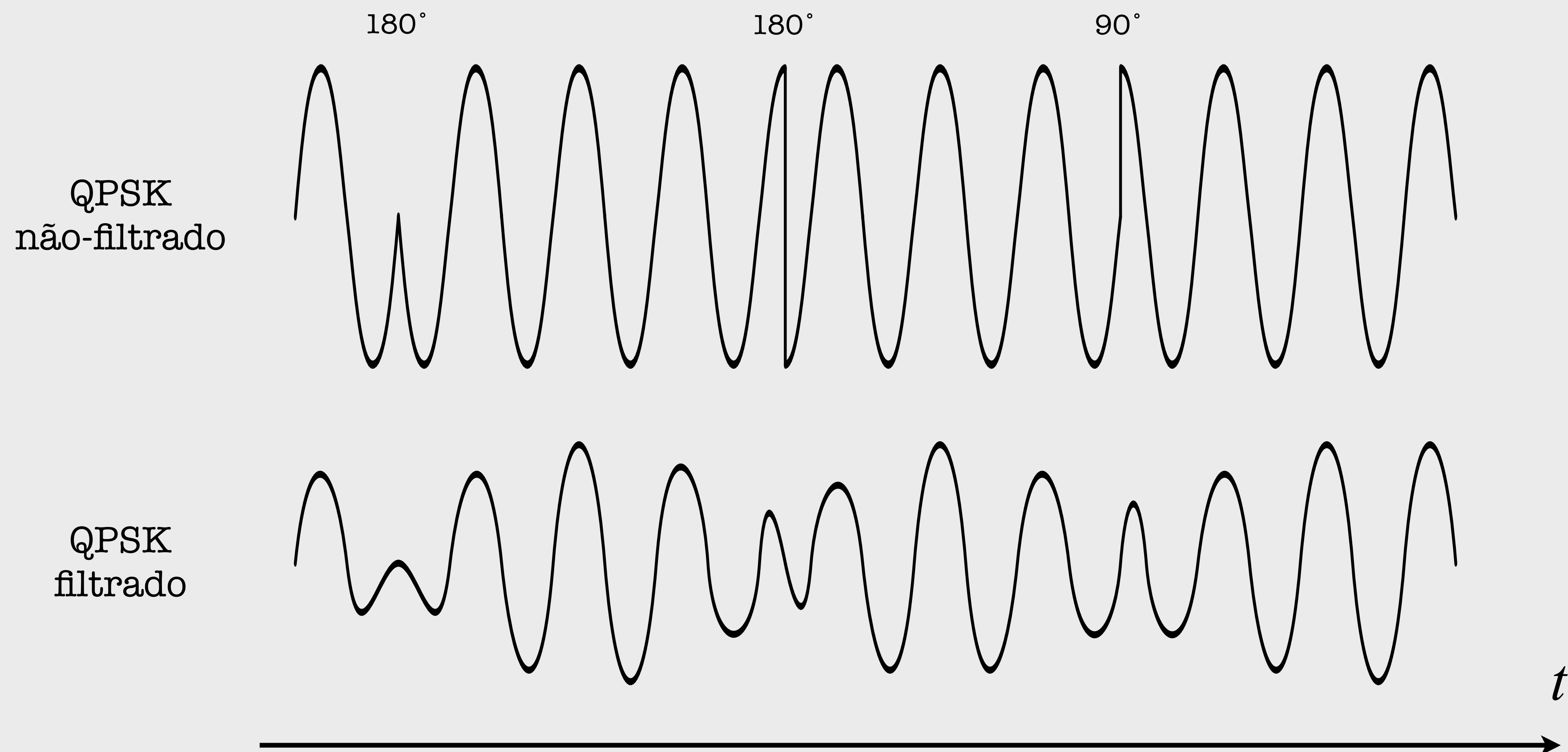
- A fase da portadora muda apenas a cada  $2T_b$  segundos
- Quando apenas um dos dois componentes em fase (I) ou em quadratura (Q), troca o seu sinal, ocorre um deslocamento de fase de  $90^\circ$  no sinal modulado
- Mudanças em ambos componentes gera um deslocamento de fase de  $180^\circ$

# Análise QPSK

- Esse deslocamento de fase, no caso ideal é instantâneo, mas no caso real produz um deslocamento em um tempo não igual a zero
- Com isso vai aparecer um envelope que se aproxima de zero, causando um efeito de filtragem



# Análise QPSK

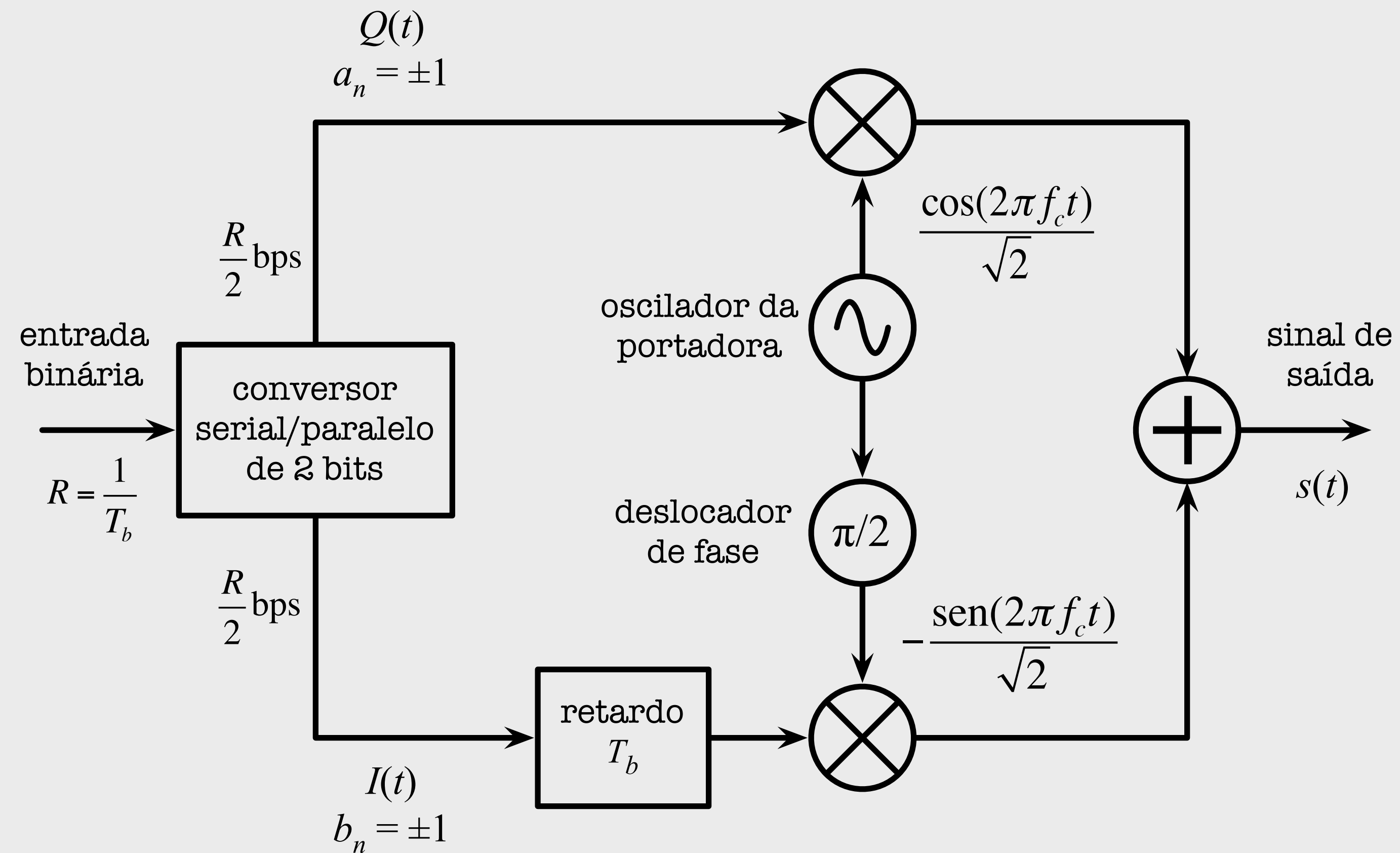


# QPSK Ortogonal

- **Orthogonal** QPSK, também conhecido como **Offset** QPSK (OQPSK)
- Atraso na cadeia de bits  $Q$
- Variações mais frequentes no sinal de saída a cada  $T_b$  segundos
- Deslocamentos menos bruscos na fase do sinal modulado

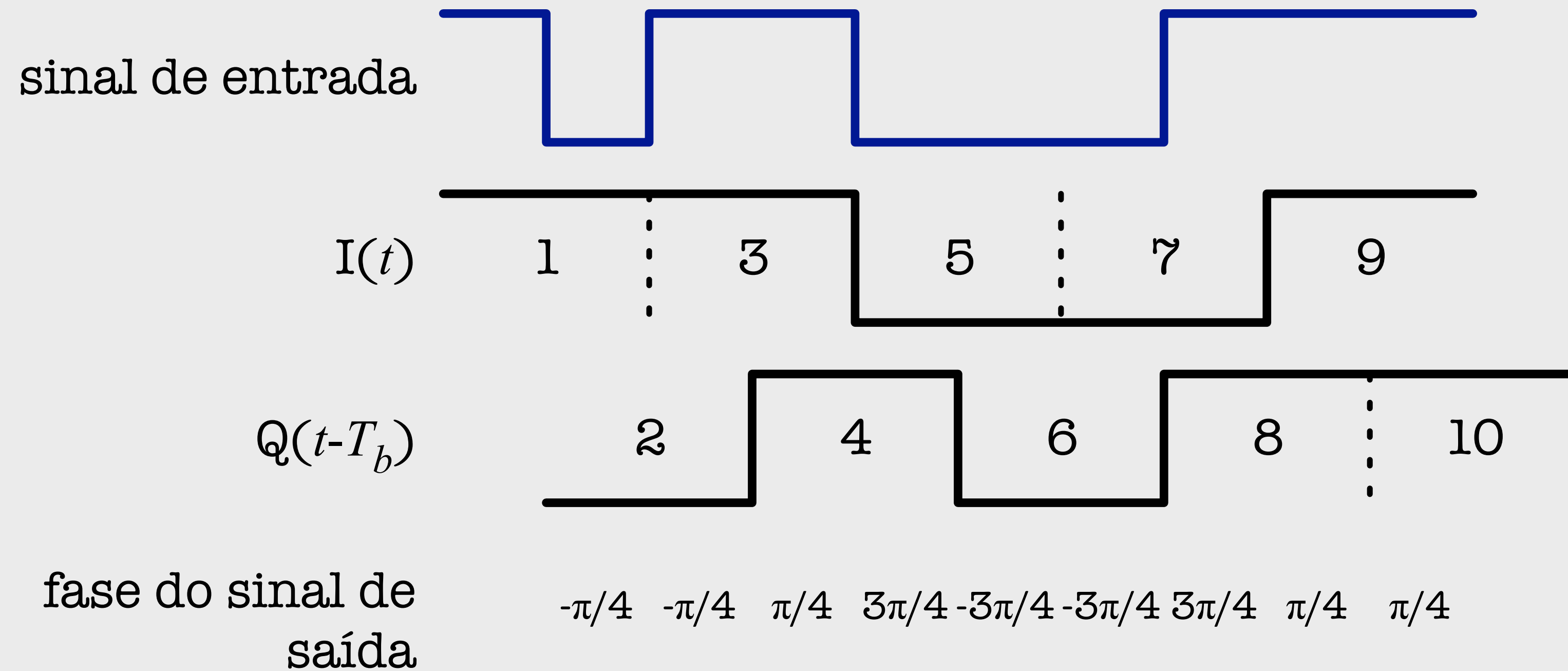
$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} I(t) \cos(2\pi f_c t) - \frac{1}{\sqrt{2}} Q(t - T_b) \sin(2\pi f_c t)$$

# Modulador OQPSK



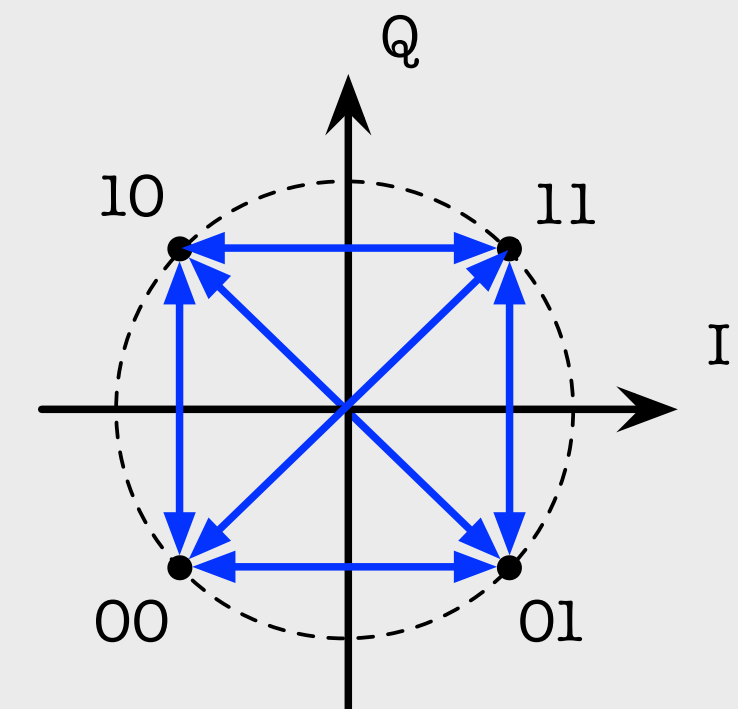
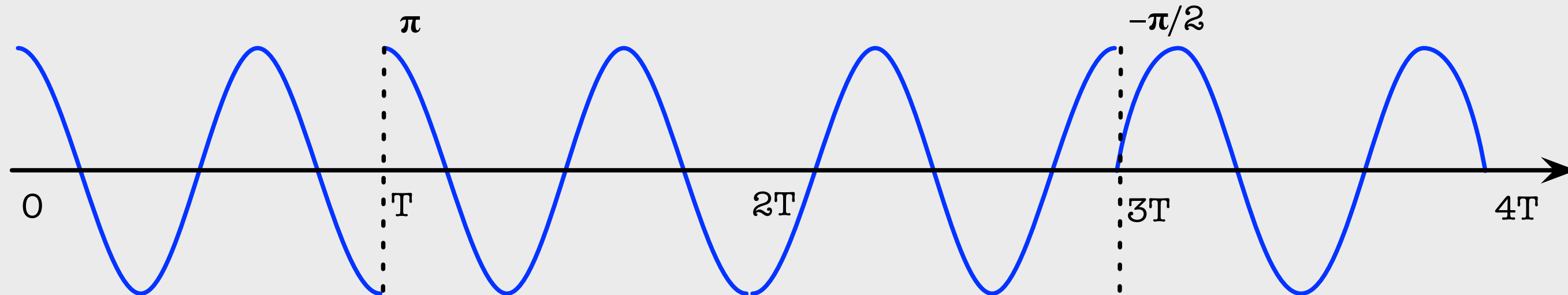
# Sinal Modulado OQPSK

número do bit	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
valor do bit	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1
	I	Q	I	Q	I	Q	I	Q	I	Q

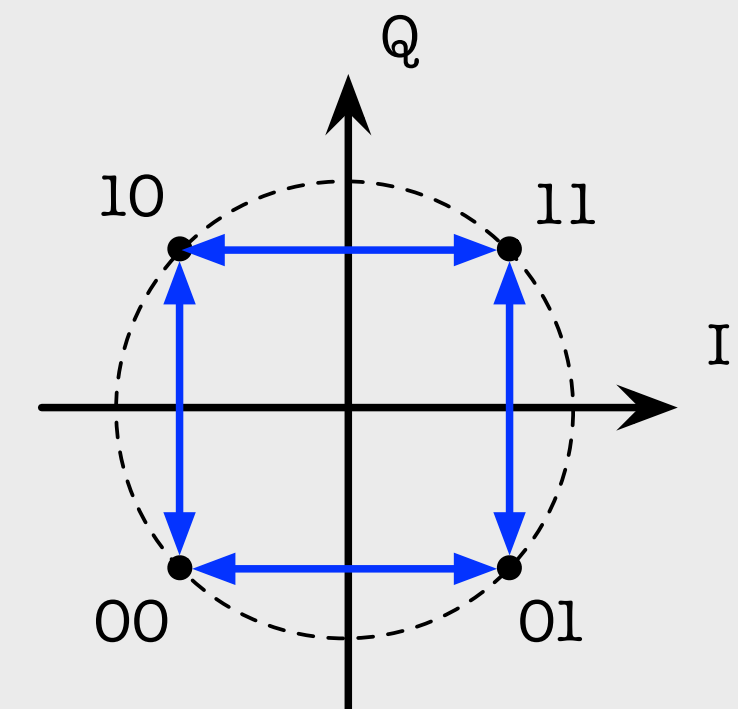
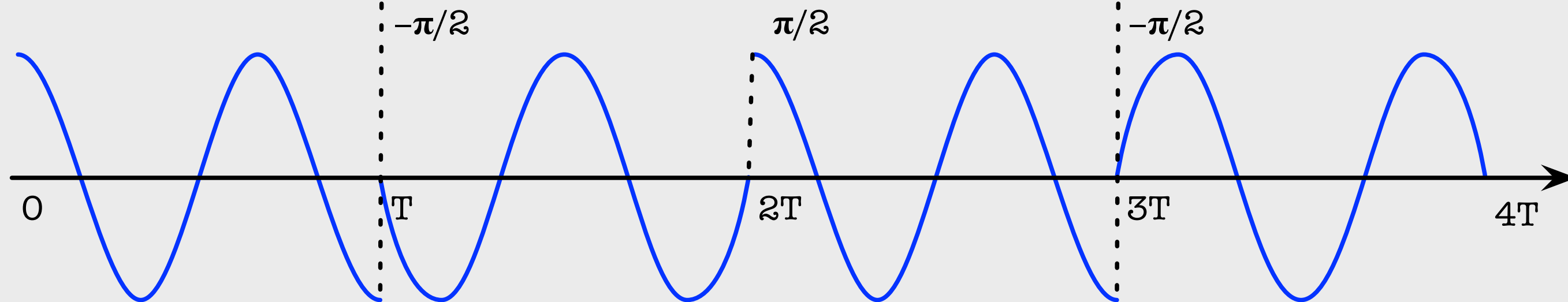


# QPSK vs OQPSK

QPSK



OQPSK



# Análise OQPSK

- O sinal do canal Q tem um **offset** do sinal do canal I
- Atraso no tempo de  $\frac{1}{2}T_s$
- Elimina a transição de fase de  $180^\circ$
- Sem transição na origem
- Variações na amplitude menores que em QPSK e muito menores que em BPSK

# Análise OQPSK

- Podem ser utilizados amplificadores de transmissão não-lineares para conferir maior durabilidade às baterias nas unidade móveis
- Mantém a mesma eficiência da largura de banda do QPSK
- Método de modulação muito popular no enlace-reverso de sistemas wireless

# Quadrature Amplitude Modulation

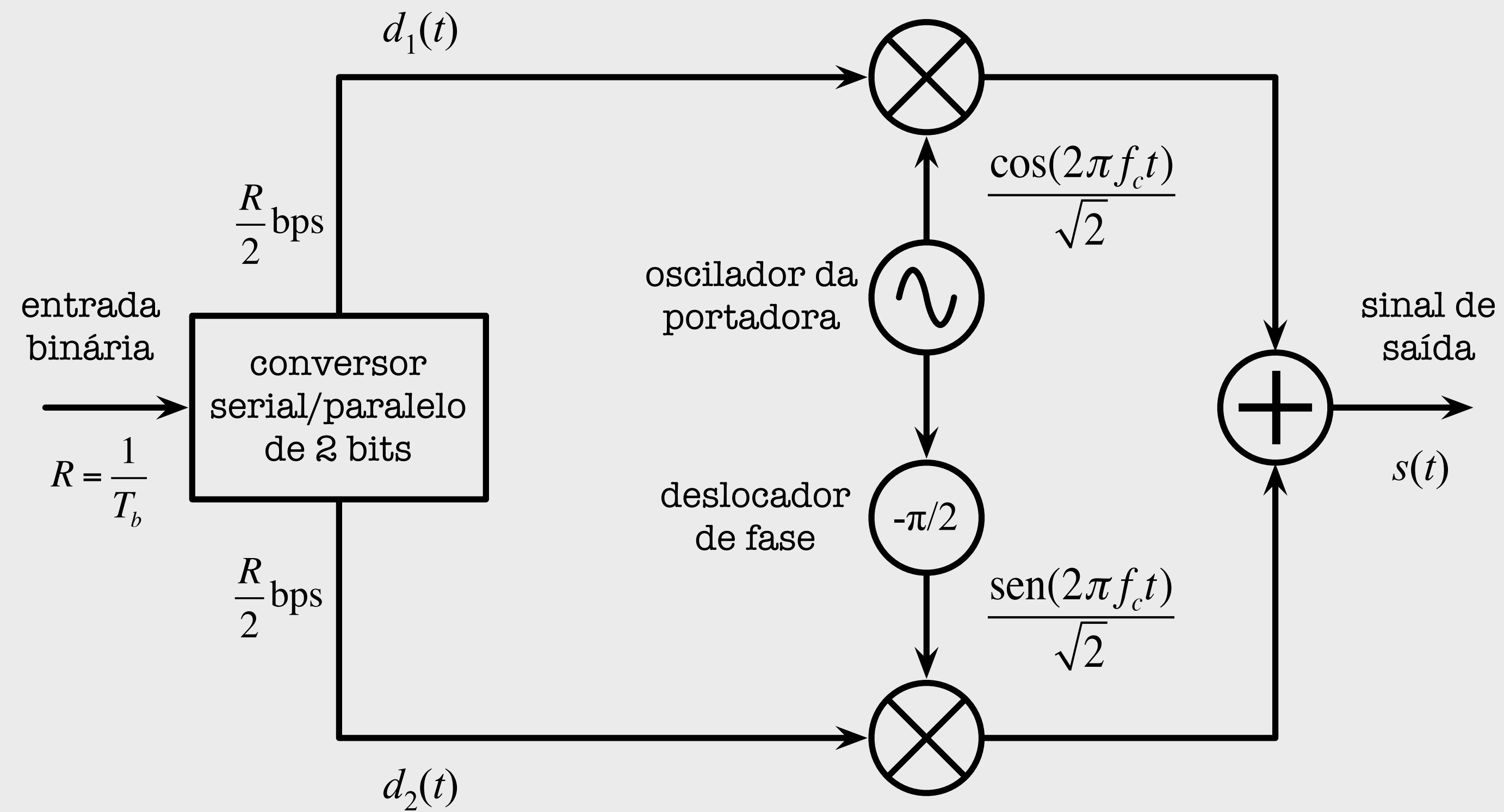
- QAM usado em ADSL (**asymmetric digital subscriber line**) e em alguns enlaces **wireless**
- Combinação de ASK e PSK
- Extensão Lógica do QPSK
- A saída original é obtida através da demodulação e combinação



# Quadrature Amplitude Modulation

- Envia dois sinais simultâneos diferentes na mesma frequência portadora
- Usa duas cópias, uma deslocada de  $90^\circ$
- Cada portadora é modulada em ASK
- Dois sinais independentes no mesmo meio

# Modulador QAM



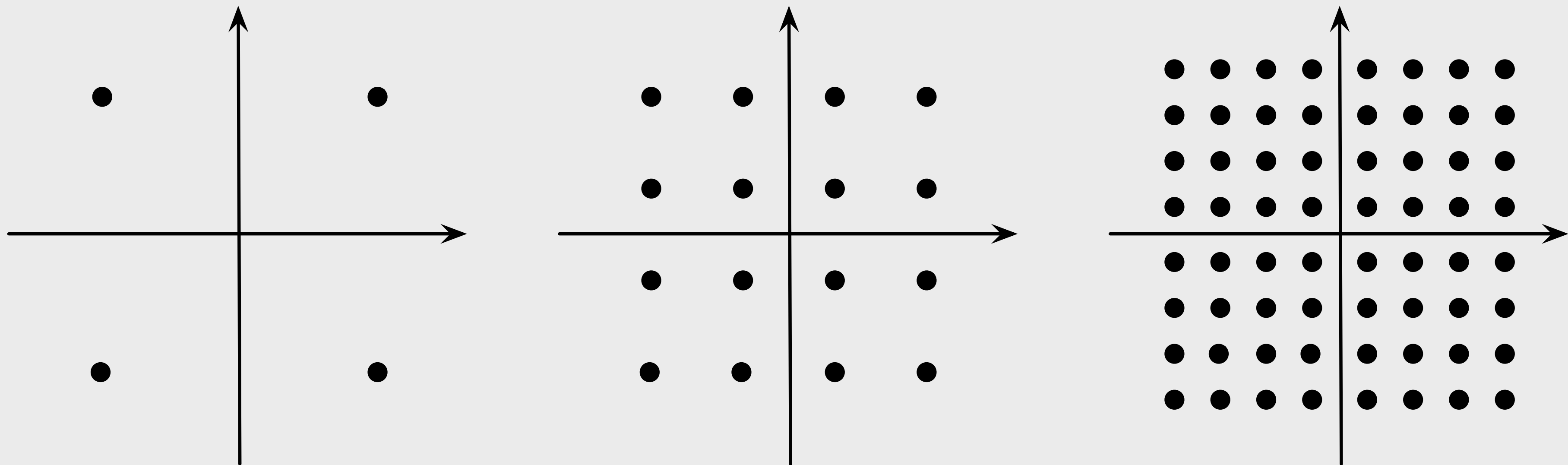
# Níveis QAM

- ASK de dois níveis
  - Cada uma das duas cadeias de bits em um dos dois estados, sistema de quatro estados
  - Essencialmente QPSK
- ASK de quatro níveis
  - Cadeias combinadas em um dos 16 estados

# Níveis QAM

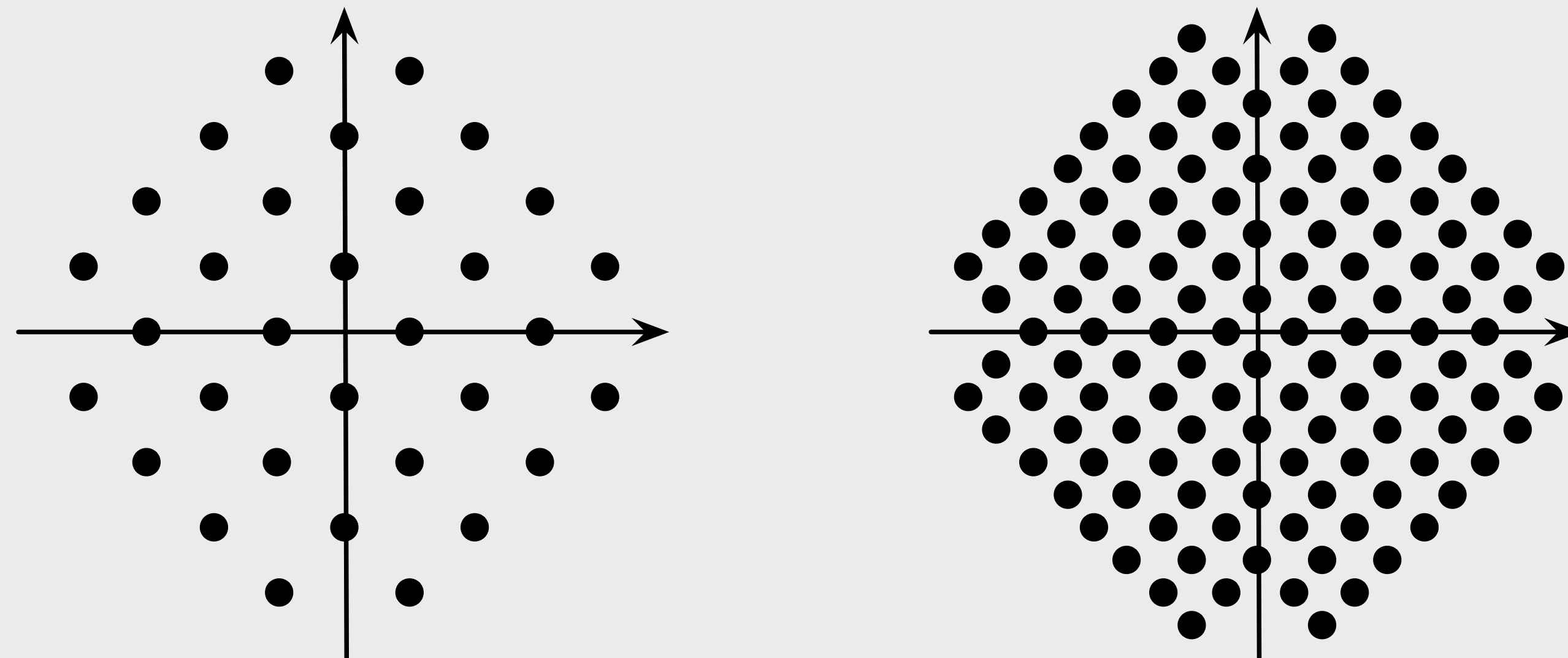
- Sistemas de 64 e 256 foram implementados
- Aumenta substancialmente a taxa de dados para uma dada largura de banda
- Incrementa a taxa de erros potencial

# QPSK, QAM16 e QAM64



QAM16 pode transmitir 9600 bps em uma linha de 2400 bauds

# V.32 e V.32 bis (QAM128)



Modems com QAM128 podem alcançar até 33.600 bps em linhas telefônicas,  
com 14 bits/sinalização

# Desempenho da Modulação Digital

- Largura de Banda
  - No ASK e PSK esta diretamente relacionada com a taxa de bits
  - No FSK está relacionada com a taxa de dados para frequências baixas, mas para altas frequências está relacionado com a diferença entre a frequência da portadora e o “offset” da frequência modulada

# Desempenho da Modulação Digital

- Em presença de ruído, a taxa de erro de bit do PSK e QPSK fica em torno de 3dB acima do ASK e FSK



# Largura de Banda

- ASK e PSK

$$B = (1 + r) R$$

- FSK

$$B = 2\Delta F + (1 + r) R$$

# Largura de Banda

- Multinível

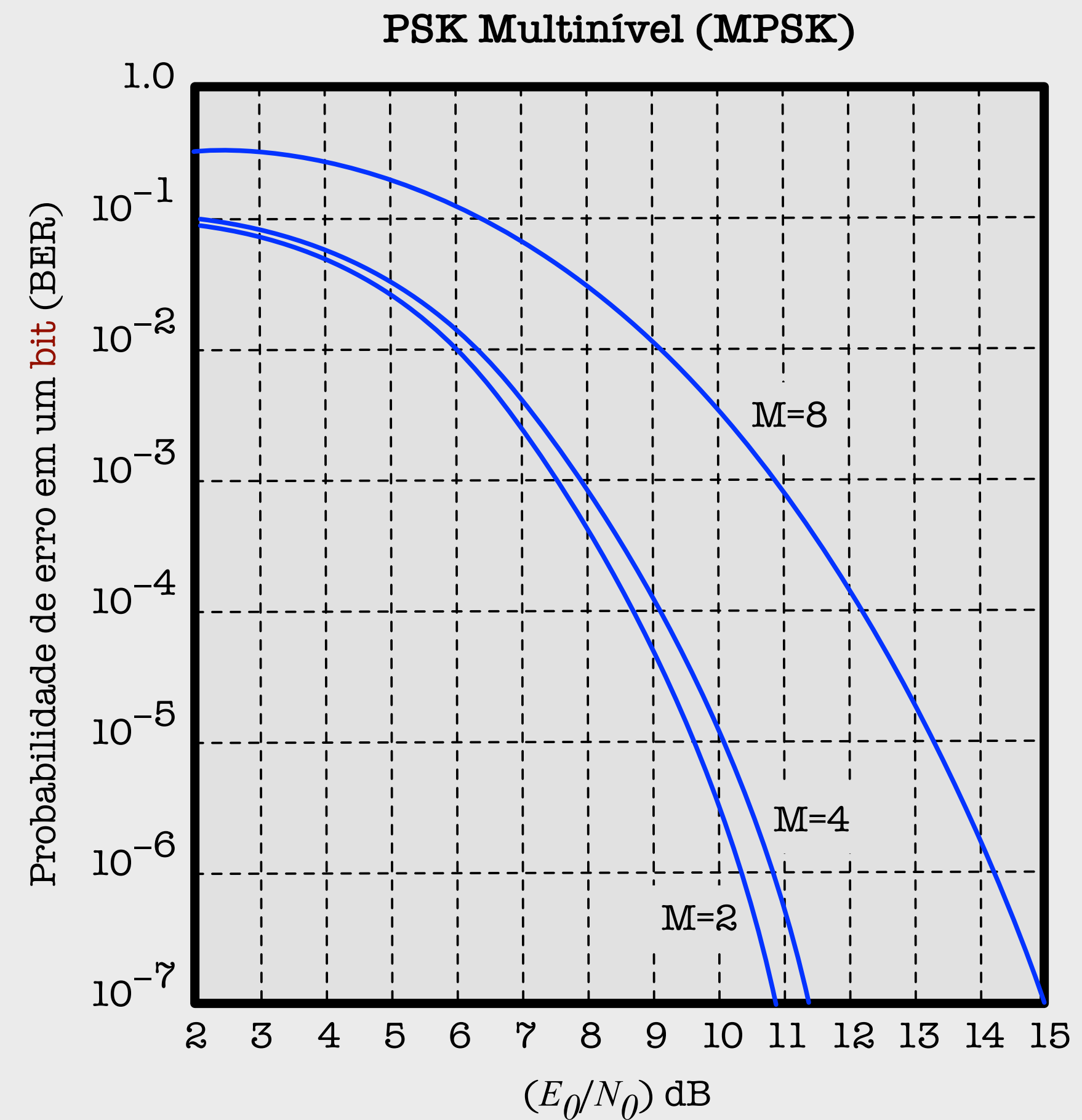
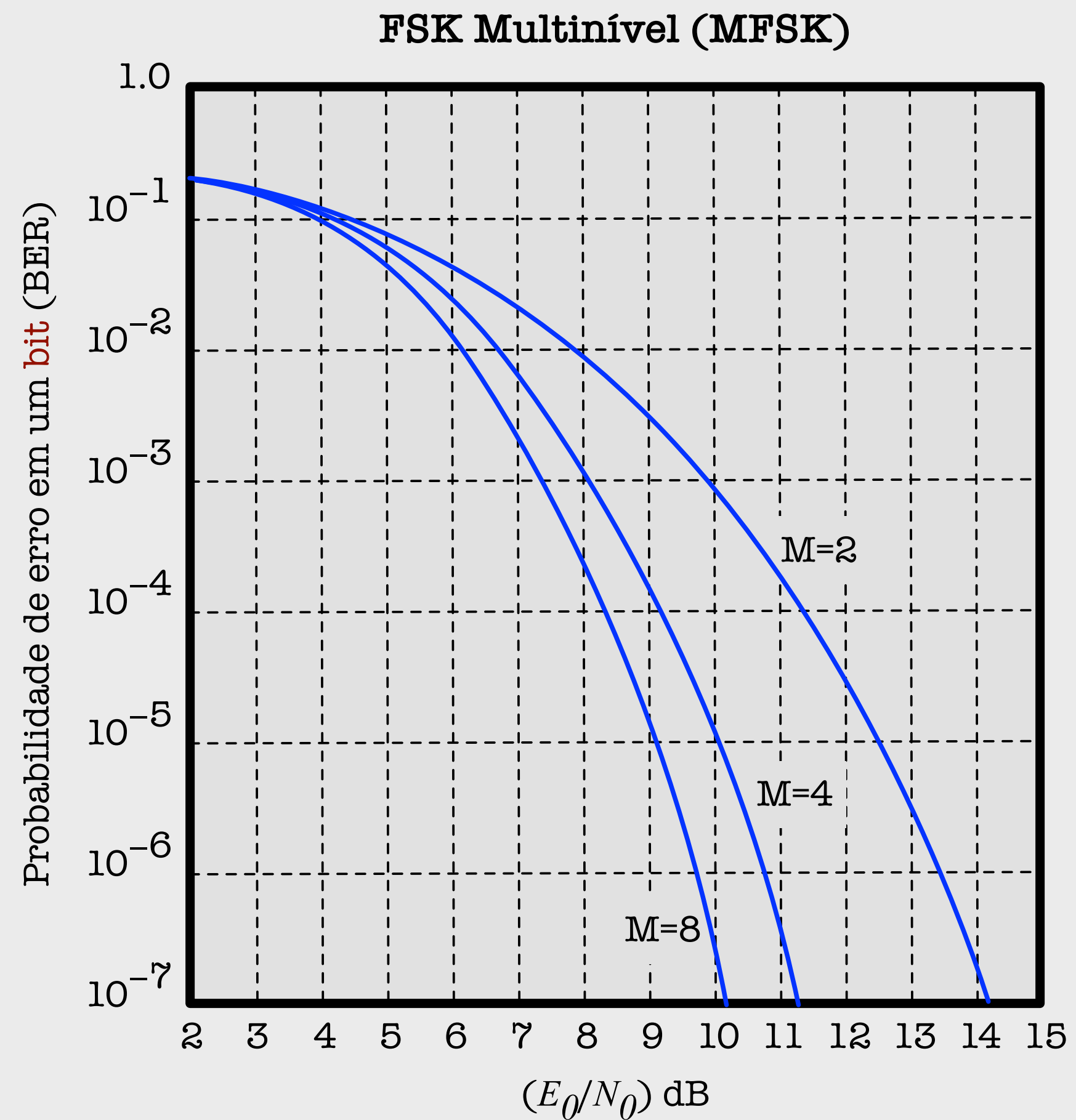
$$B = [(1 + r)/b] R = [(1 + r)/\log_2 L] R$$

- Onde:
  - $R$ : velocidade de transmissão
  - $r$ : técnica de filtragem ( $0 < r < 1$ )
  - $b$ : bits codificado por sinalização

# Relação Taxa de Dados e Largura de Banda ( $R/B$ )

	$r = 0$	$r = 0,5$	$r = 1$
ASK	1,00	0,67	0,50
FSK			
Banda larga ( $\Delta F \gg R$ )	$\approx 0$	$\approx 0$	$\approx 0$
Banda estreita ( $\Delta F \approx f_c$ )	1,00	0,67	0,50
PSK	1,00	0,67	0,50
Multinível			
L=4, b=2	2,00	1,33	1,00
L=8, b=3	3,00	2,00	1,50
L=16, b=4	4,00	2,67	2,00
L=32, b=5	5,00	3,33	2,50

# Taxa Teórica de Erro de bit



# Taxa Teórica de Erro de bit

