

Curso: Engenharia de Computação

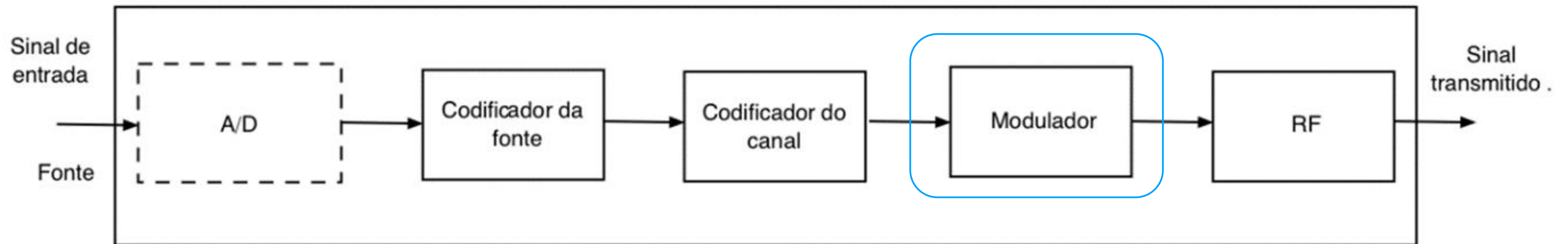
Sistemas de Comunicações Móveis

Prof. Clayton J A Silva, MSc
clayton.silva@professores.ibmec.edu.br

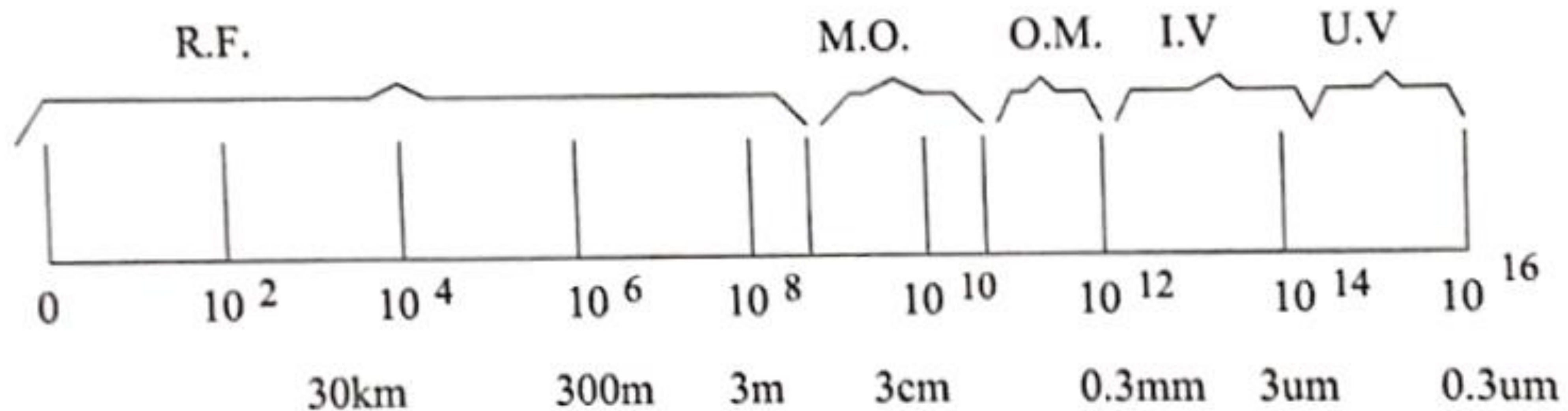


Modulação

Transmissor



O espectro eletromagnético



Modulação

- O **modulador** é um bloco que gera um sinal para o módulo de RF, em que um dos parâmetros, como **frequência**, **amplitude** e/ou **fase**, de um sinal chamado de **portadora** é alterado em função do sinal da saída do codificador da fonte, chamado de **sinal modulante**.
- Portanto, a modulação envolve **duas formas de onda**: o **sinal modulante**, que representa a mensagem; e a **portadora** que se ajusta ao sinal modulante para ser transmitido.
- O sinal modulado transporta a informação, que é colocada na parte apropriada do **espectro**, com propriedades espectrais adequadas para ser encaminhada pelo canal de comunicações.

Benefícios da modulação

- (1) assegurar a transmissão eficiente
- (2) superar as limitações de hardware
- (3) reduzir ruído e interferência
- (4) definir a frequência
- (5) multiplexação de sinais

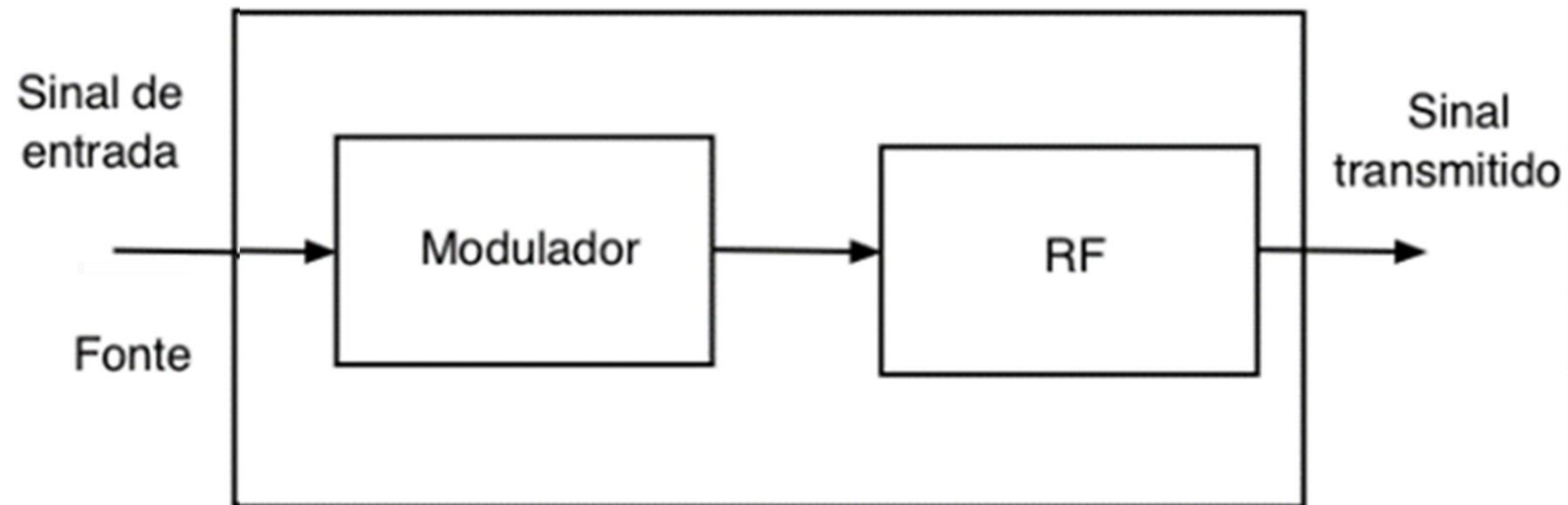
Tipos de modulação

- Analógica
- Digital

Tipos de modulação

- Analógica
- Digital

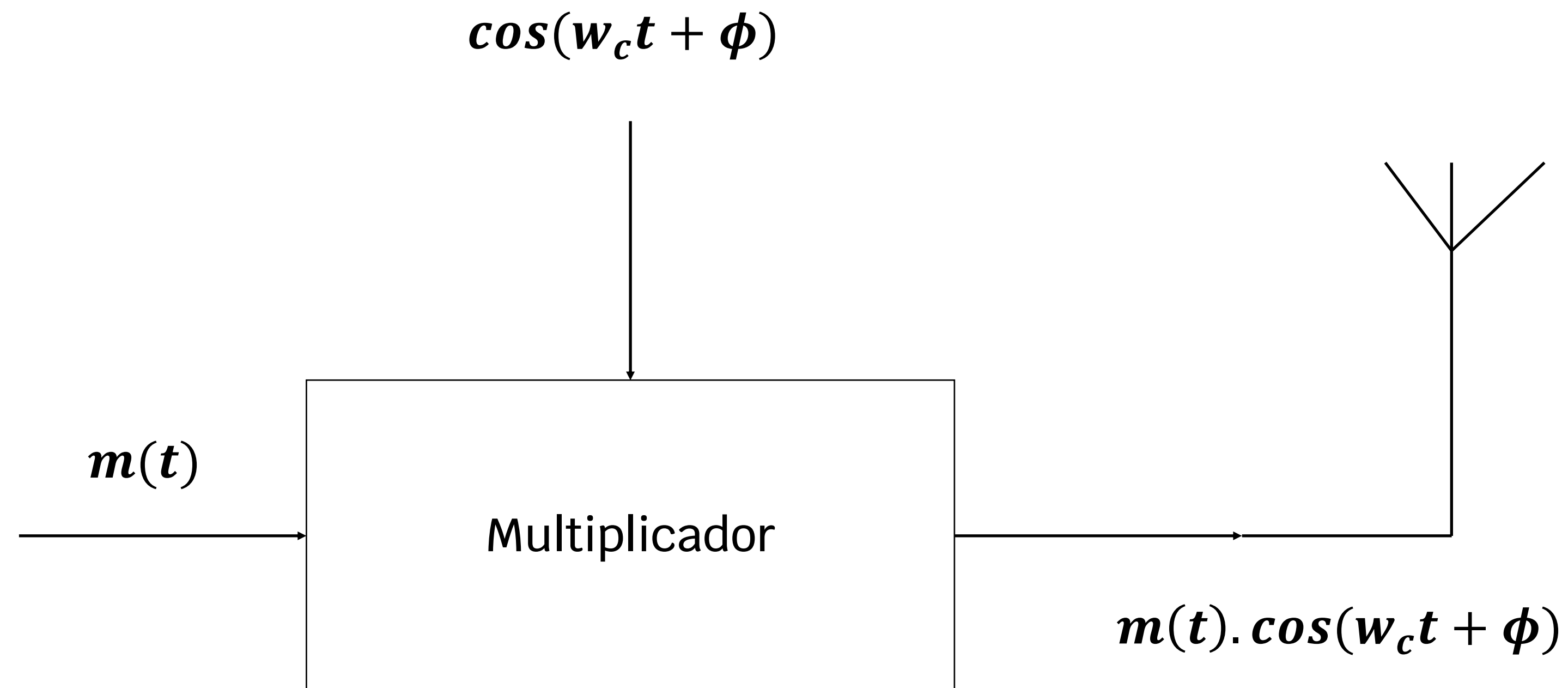
Sistema analógico



Tipo de modulação analógica

- Modulação em Amplitude (AM), quando o parâmetro da portadora a ser variado é a amplitude;
- Modulação em Frequência (FM), quando o parâmetro da portadora a ser variado é a frequência;
- Modulação em Quadratura (QUAM), quando são variados os parâmetros de amplitude e fase ao mesmo tempo.

Modulação em Amplitude (AM)



Modulação em Amplitude (AM)

- A portadora tem a forma $c(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + \phi)$, em que

A_c é a amplitude,

f_c é a frequência da portadora e

ϕ é a fase do sinal.

Modulação em Amplitude (AM)

- O sinal modulante deve possuir a máxima frequência do espectro muito menor do que a frequência da portadora f_c

$$f_{\text{máx}}[m(t)] \ll f_c$$

Normalmente, $f_{\text{máx}}[m(t)] \sim \frac{f_c}{1000}$ a $\frac{f_c}{100}$, por força das restrições do projeto do transmissor.

Modulação em Amplitude (AM)

- No sistema com modulação AM a amplitude da portadora varia proporcionalmente com a variação do sinal modulante $m(t)$
- Variando a amplitude da portadora proporcionalmente a $m(t)$ tem-se que a amplitude instantânea do sinal modulante dada por

$$a(t) = A_c + B \cdot m(t)$$

- O sinal modulado é

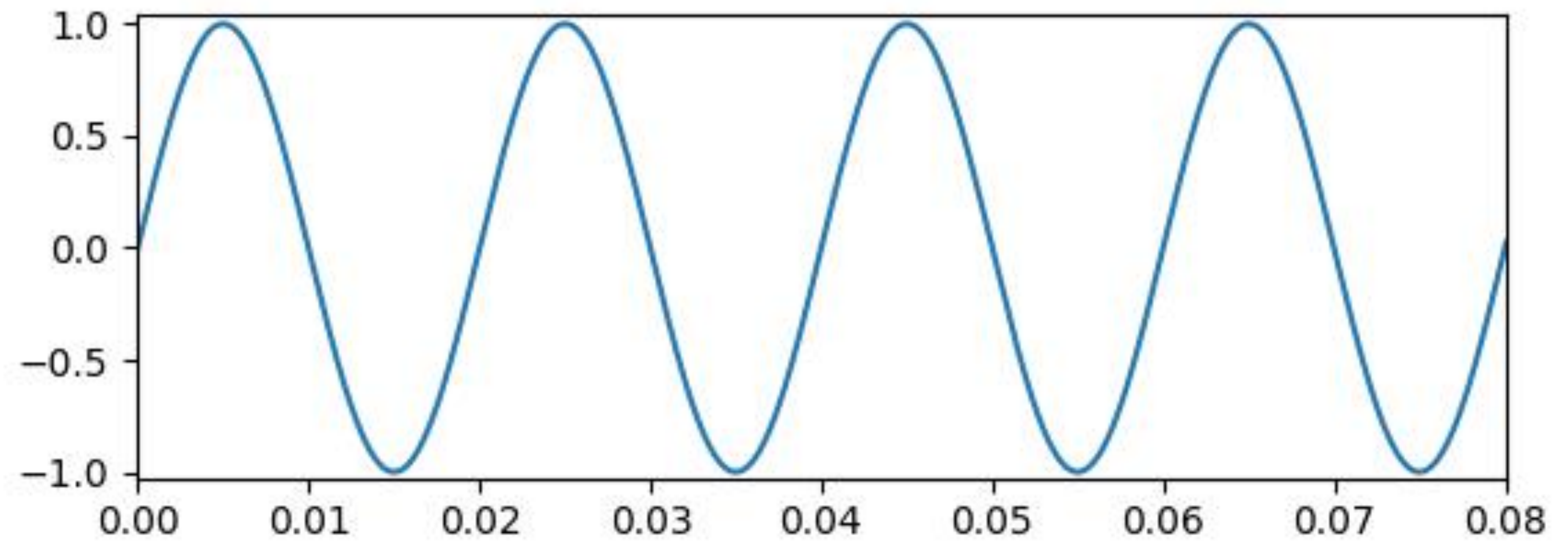
$$s(t) = a(t) \cdot \cos(2\pi f_c t + \phi)$$

Modulação em Amplitude (AM)

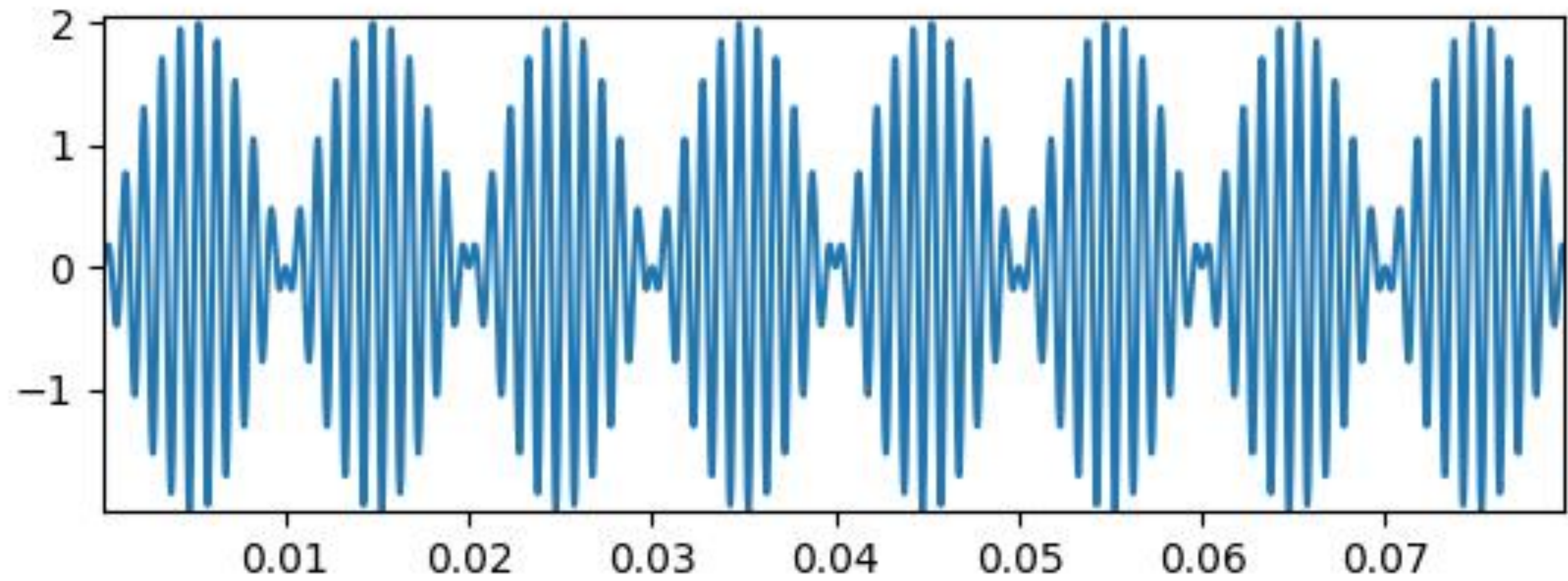
- Observa-se que a onda modulada tem a **envoltória** com o mesmo comportamento do sinal modulante
- **Índice de modulação**: define-se como índice de modulação AM a relação dada por $\Delta_{AM} = B/A_c$, que define

$$a(t) = A_c \cdot [1 + \Delta_{AM} m(t)]$$

Sinal modulante



Onda modulada



Modulação em Amplitude (AM)

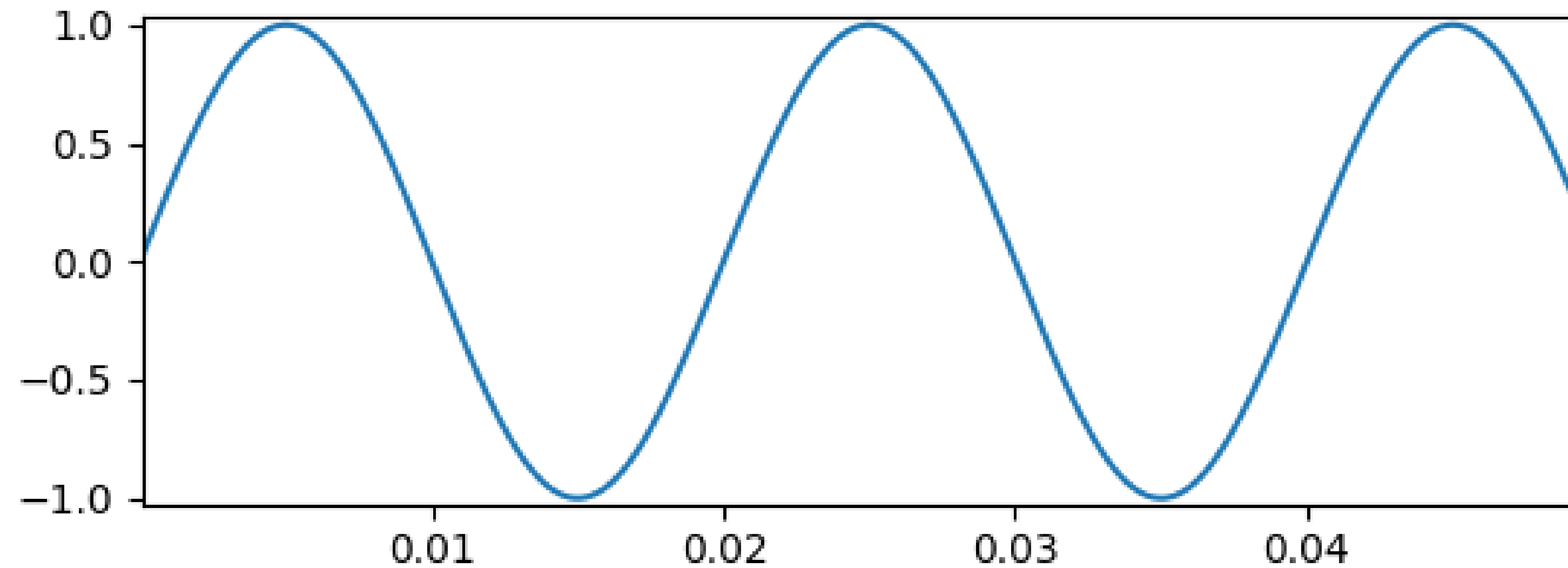
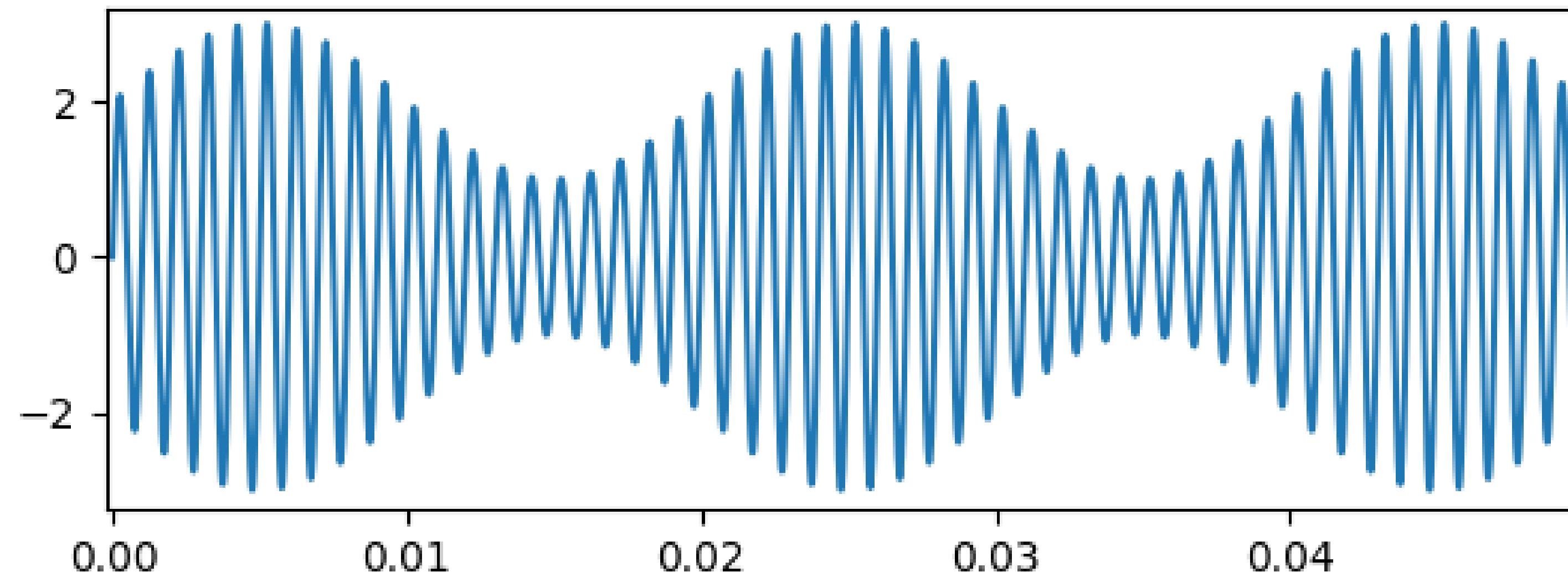
- O índice de modulação é um parâmetro usado para verificar a qualidade do processo:

$\Delta_{AM} = 1$, 100% de modulação

$\Delta_{AM} > 1$, sobremodulação – indica rotação de fase – implica distorção na recepção

$\Delta_{AM} < 1$, submodulação – indica desperdício de potência

Sinal modulante

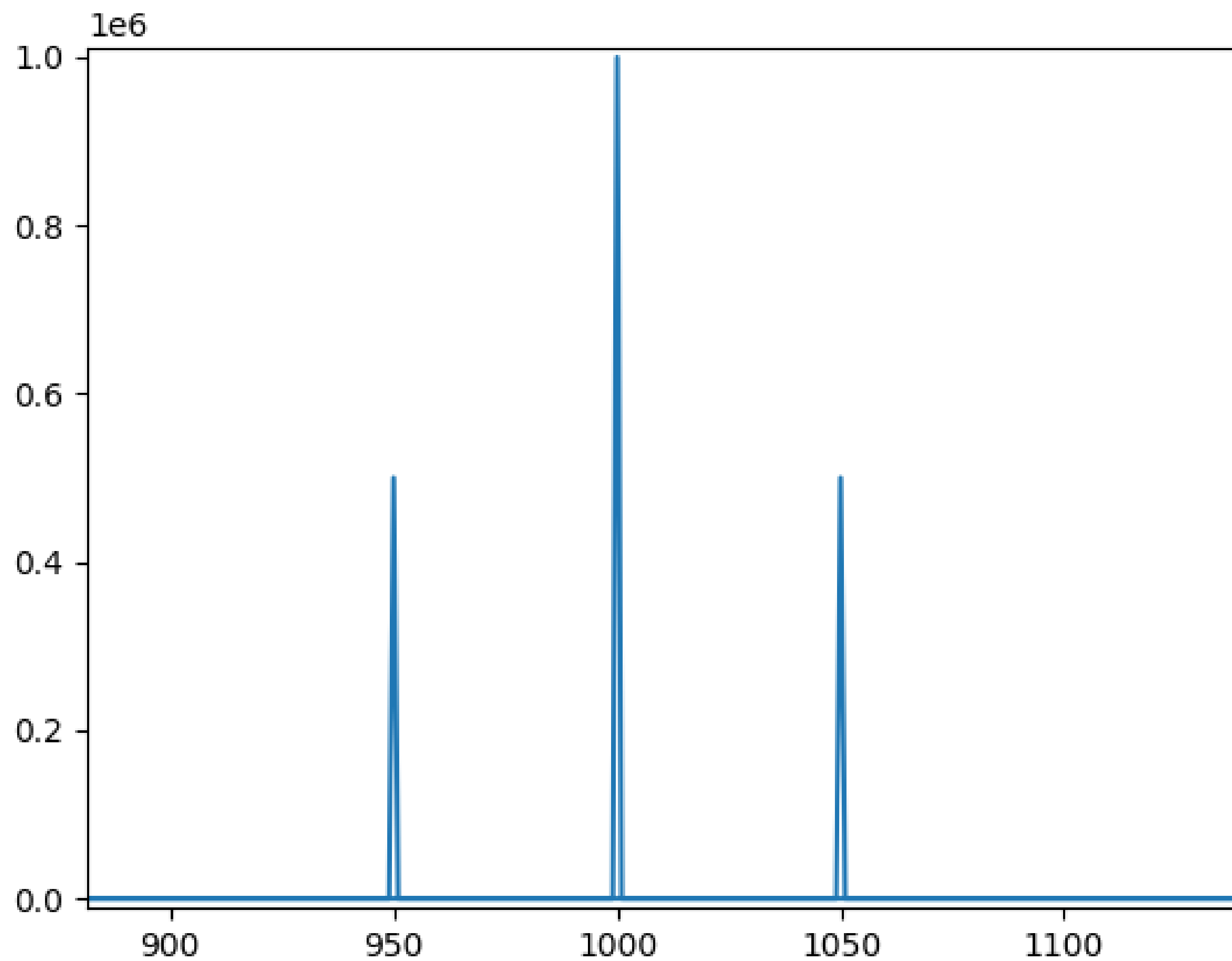
Onda modulada
Índice de
modulação = 0,5

Modulação em Amplitude (AM)

- No domínio da frequência, o processo de modulação AM é aproximadamente a convolução do espectro do sinal modulante com $\delta(f_c)$ na frequência da portadora, pois $f_{m\acute{a}x}[m(t)] \ll f_c$

$$\mathfrak{F}[m(t) \cdot \cos(\omega_c t + \phi)] \sim M(f) * \delta(f_c)$$

- Assim, o espectro do sinal modulado ocupa duas vezes mais largura de banda que o mesmo sinal em banda base.



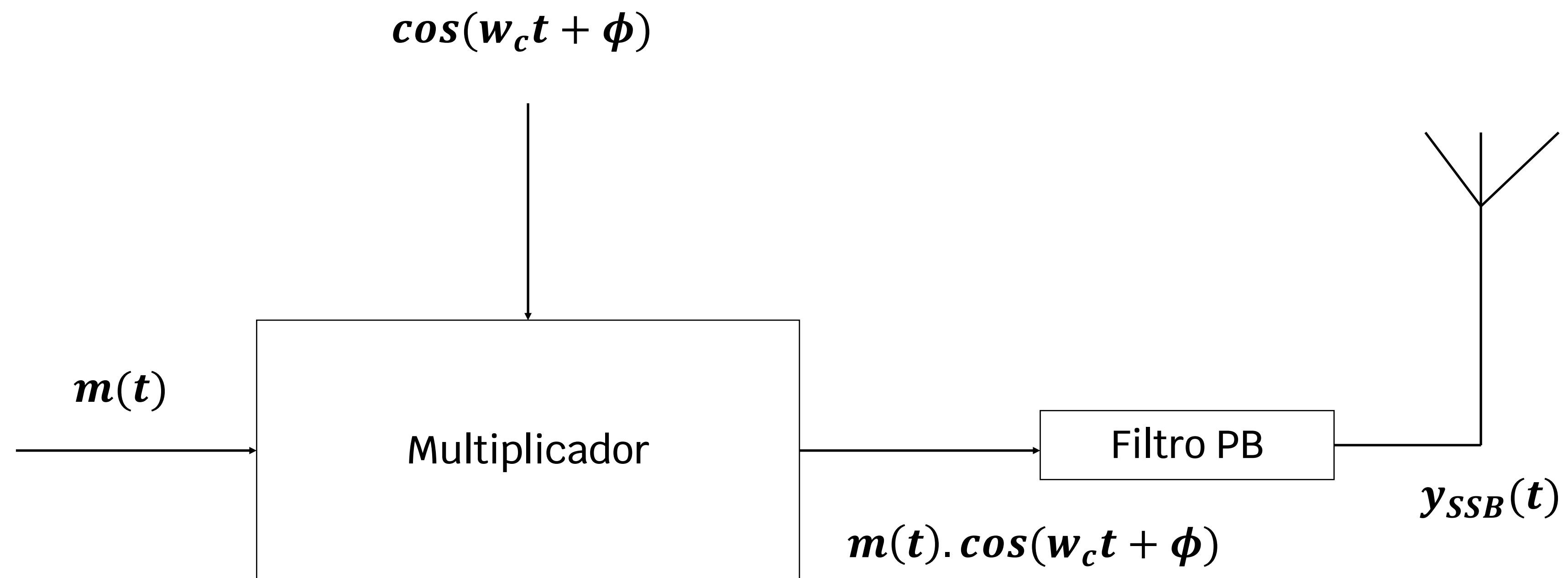
Modulação em Amplitude (AM)

- Uma vez que o espectro é simétrico relativamente à frequência da portadora, é possível **aumentar a eficiência espectral através da eliminação de um dos lobos do espectro** antes de se proceder à transmissão do sinal.

Modulação AM/SSB

- Uma vez que o espectro é simétrico relativamente à frequência da portadora, é possível **aumentar a eficiência espectral através da eliminação de um dos lobos do espectro** antes de se proceder à transmissão do sinal.

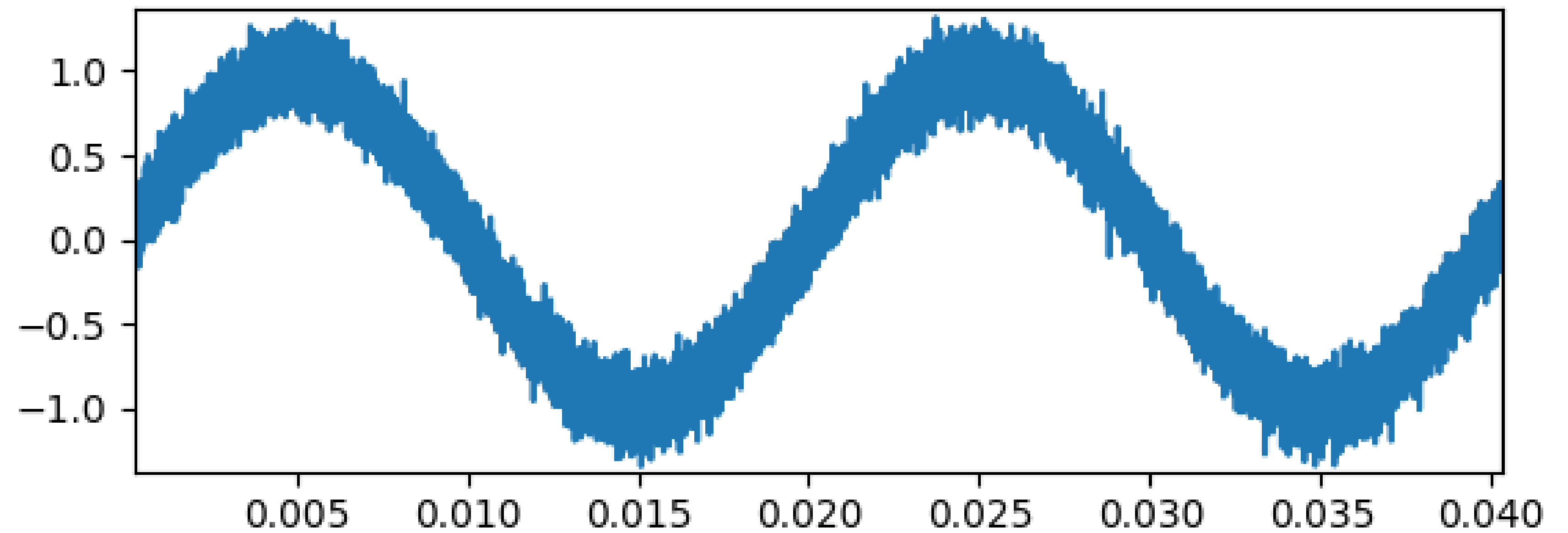
Modulação AM/SSB



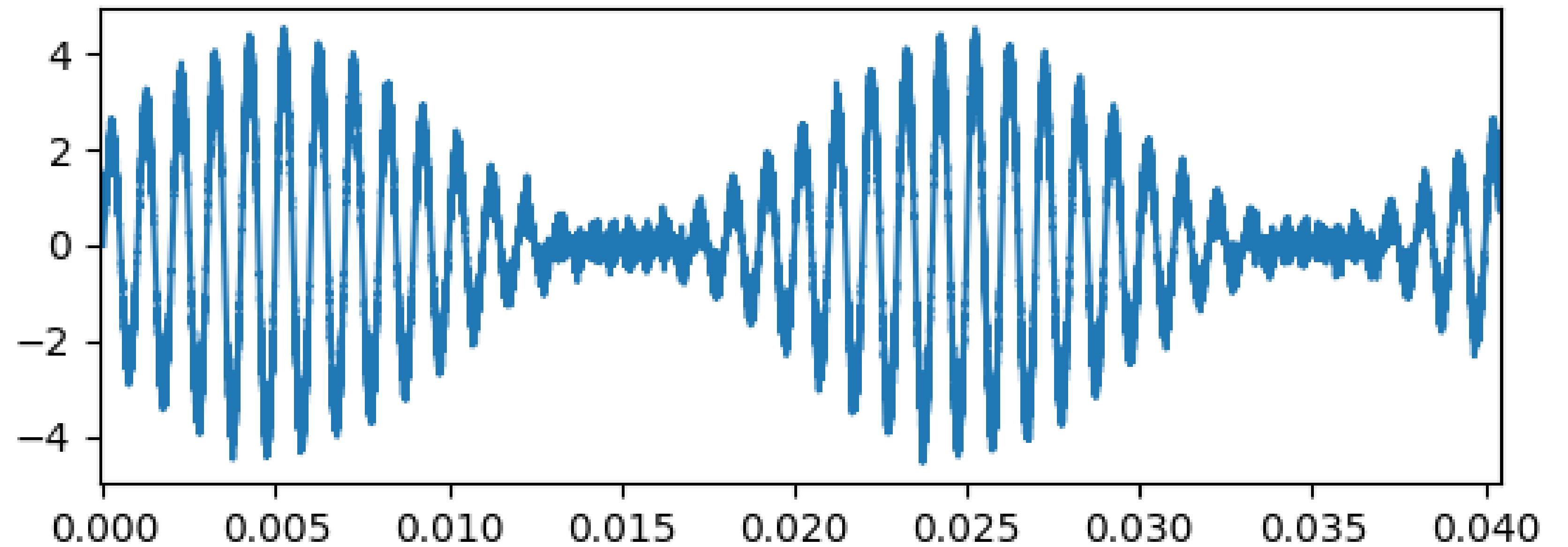
Modulações AM, AM/SSB

- Os sinais modulados em AM são muito sensíveis ao ruído e interferência aditivos, uma vez que a informação é transportada pela amplitude da portadora.

Sinal modulante
SNR = 20 dB



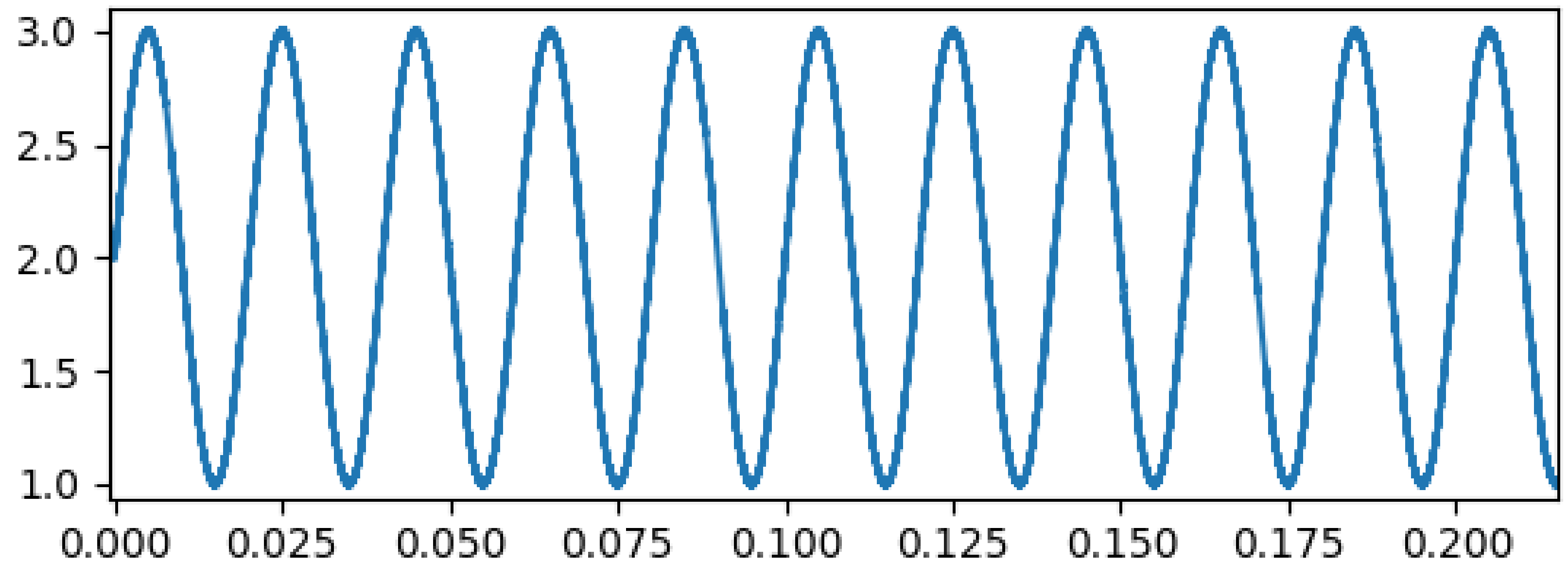
Onda modulada



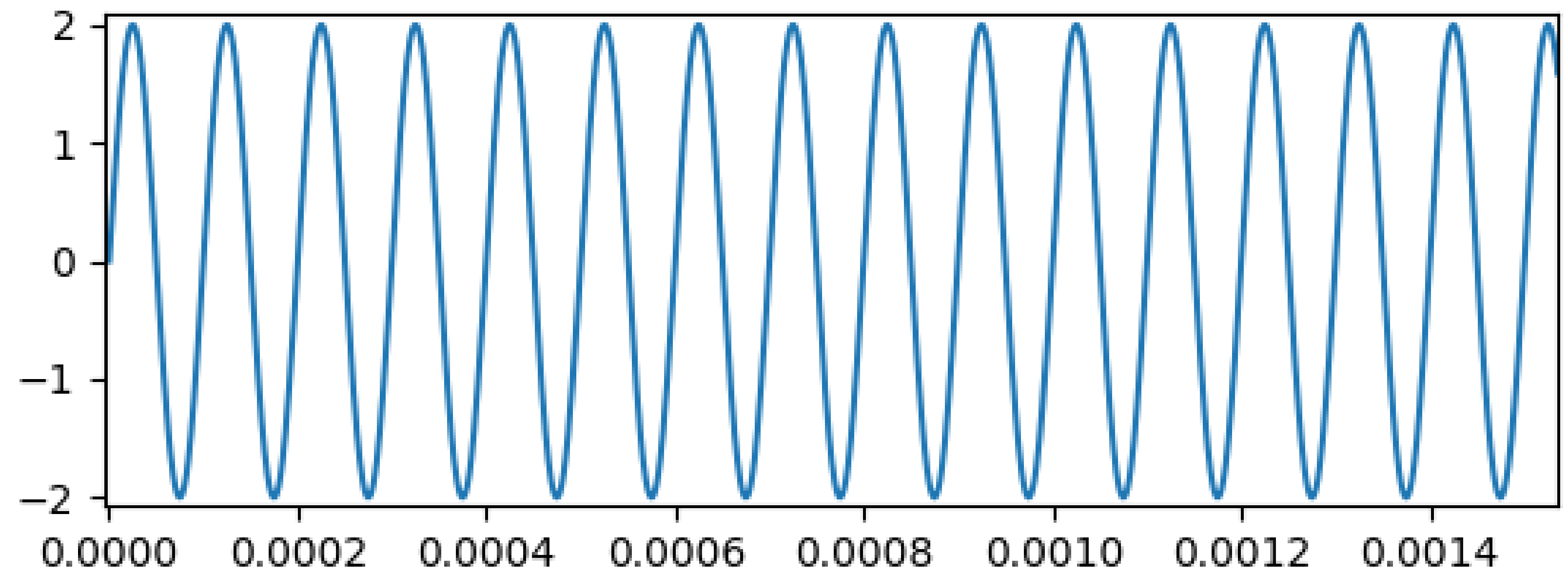
Modulação em Frequência (FM)

- No sistema com modulação FM a frequência da portadora varia proporcionalmente com a variação do sinal modulante $m(t)$
- A onda modulada tem a forma $c(t) = A \cos\{2\pi[f_c + \Delta_{FM}m(t)]t + \phi\}$
 , em que A é a amplitude, f_c é a frequência da portadora e Δ_{FM} é o índice de modulação.

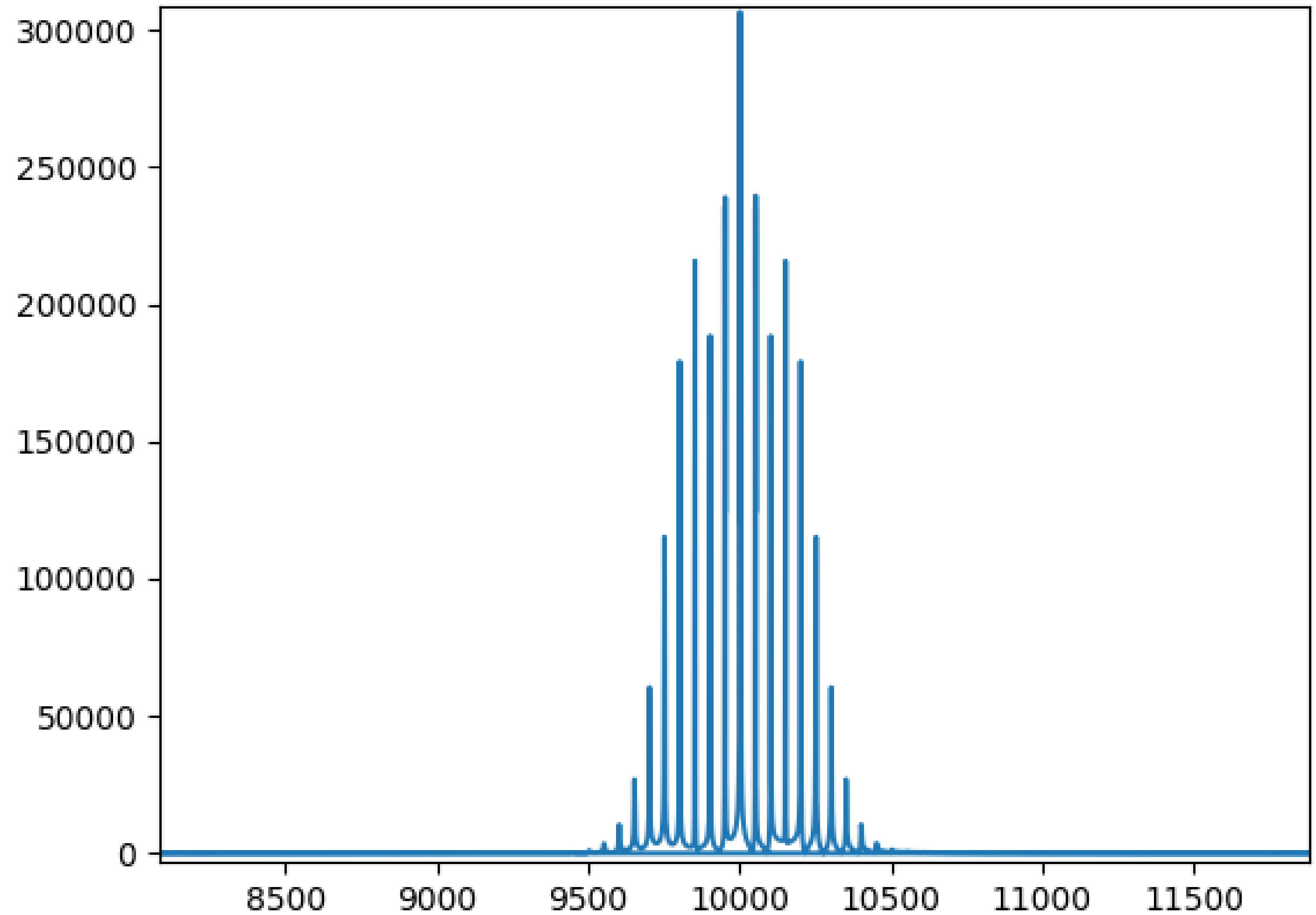
Sinal modulante
SNR = 50 dB



Onda modulada



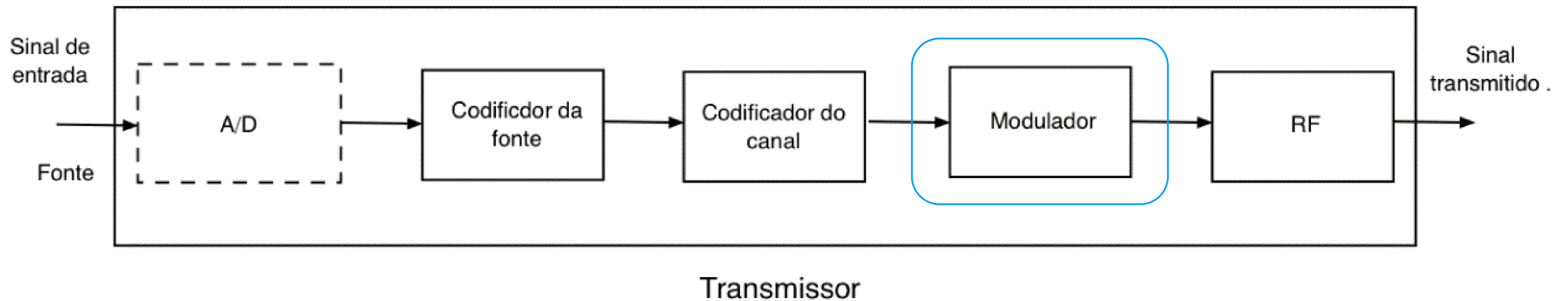
Espectro Onda modulada



Modulação em Frequência (FM)

- O índice de modulação determina a amplitude da variação da frequência do sinal modulado. Quanto maior for o índice de modulação, maior será a variação de frequência para o mesmo sinal a transmitir e mais largo será o espectro do sinal modulado.
- Os sinais modulados em FM são **mais imunes ao ruído e à interferência** aditivos que os sinais AM, uma vez que a informação é transportada pela frequência instantânea do sinal modulado e não pela amplitude da portadora.
- Assim, os sistemas de transmissão em que é necessária uma maior qualidade do sinal (relação sinal-ruído) é utilizada normalmente a modulação em frequência.

Transmissor digital



Vantagens da modulação digital

- Suporta maiores **taxas** de dados
- Possibilita poderosas **técnicas** de **correção** de erros
- Maior **resiliência** às imperfeições do canal
- Possibilita estratégias de **múltiplo acesso** ao canal mais eficientes
- **Menor susceptibilidade** ao ruído e desvanecimento

Tipos de modulação digital

- Modulação por Amplitude de Pulsos (M-PAM, do inglês Pulse Amplitude Modulation): a informação modula somente a amplitude da portadora;
- Modulação com Chaveamento por Deslocamento de Fase (M-PSK, do inglês Phase Shift Keying): a informação modula somente a fase da portadora;
- Modulação em Quadratura (M-QAM, do inglês Quadrature Amplitude Modulation): a informação modula tanto a amplitude quanto a fase da portadora.

Tipos de modulação digital

- O valor de M define o número de símbolos ou formas de onda do espaço de sinais. Por exemplo, a modulação 4-PAM implica 4 símbolos no esquema de modulação PAM.
- A PSK pode ser mais robusta em ambientes ruidosos ou para aplicações onde a eficiência energética é crítica; a QAM é superior quando o objetivo é maximizar a quantidade de dados transmitidos em uma faixa de frequência limitada, sendo assim mais eficiente espectralmente.
- A eficiência espectral refere-se à capacidade de uma técnica de modulação transmitir a maior quantidade possível de dados em uma banda de frequência limitada

O espaço de sinais

1. Decompõe cada sequência X de comprimento finito N bits em um conjunto de blocos de k bits
2. Os blocos de K bits são codificados em um conjunto de 2^k símbolos
3. Os blocos a transmitir são mapeados nas respectivas formas de onda ou símbolos para transmissão por um dado canal

O espaço de sinais

Seja uma sequência de N bits a transmitir

$\{011010001000001 \dots 111\}$

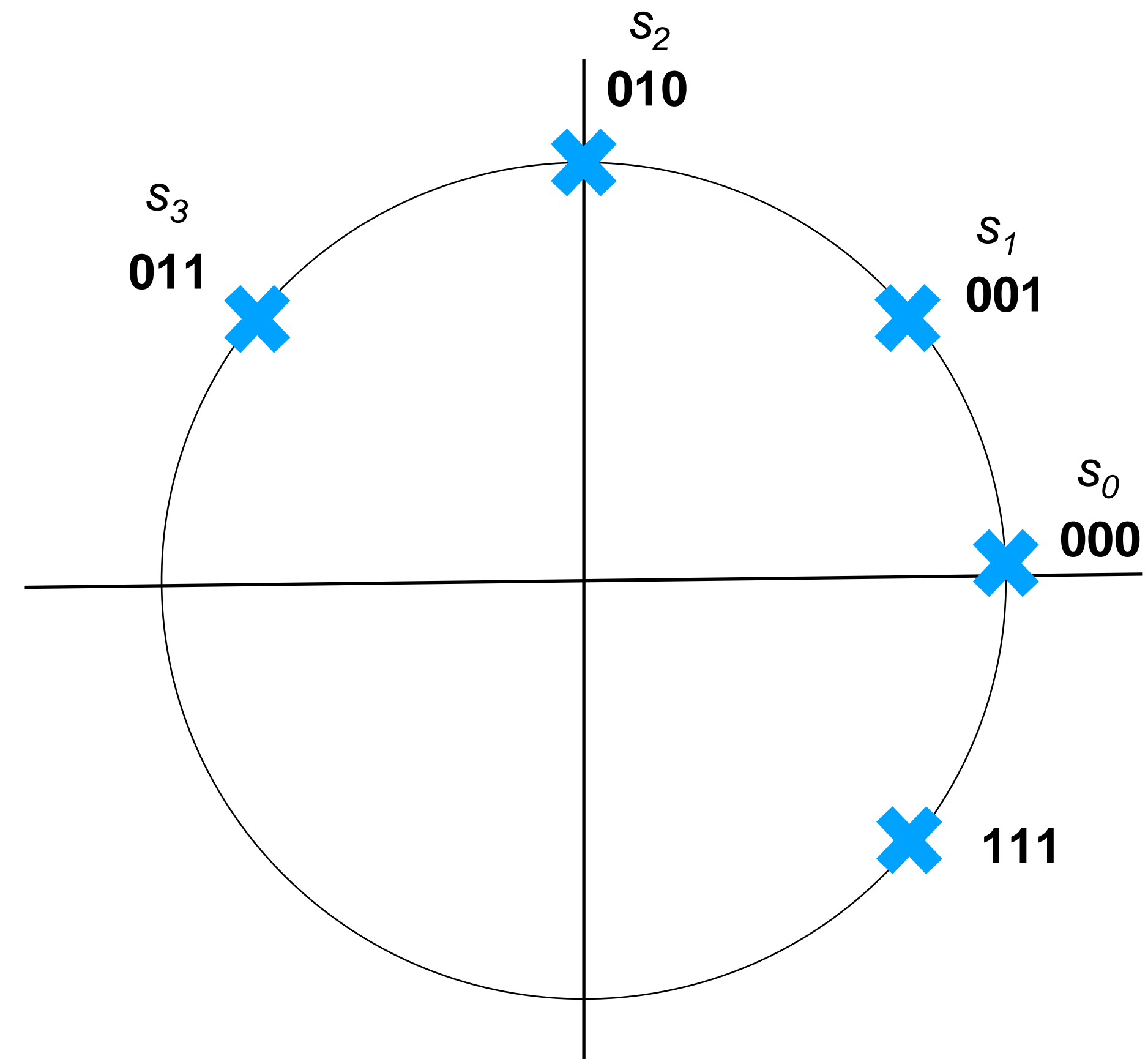
Decompоста em blocos de 3 bits

$\{011\}\{010\}\dots\{111\}$

Codificados em uma sequência

$\{s_3, s_2, \dots, s_7\}$

formada por símbolos



O espaço de sinais

X mapeada em **formas de onda**

$$s_3(t) = A \sin(2\pi f_c t + \frac{3\pi}{4})$$

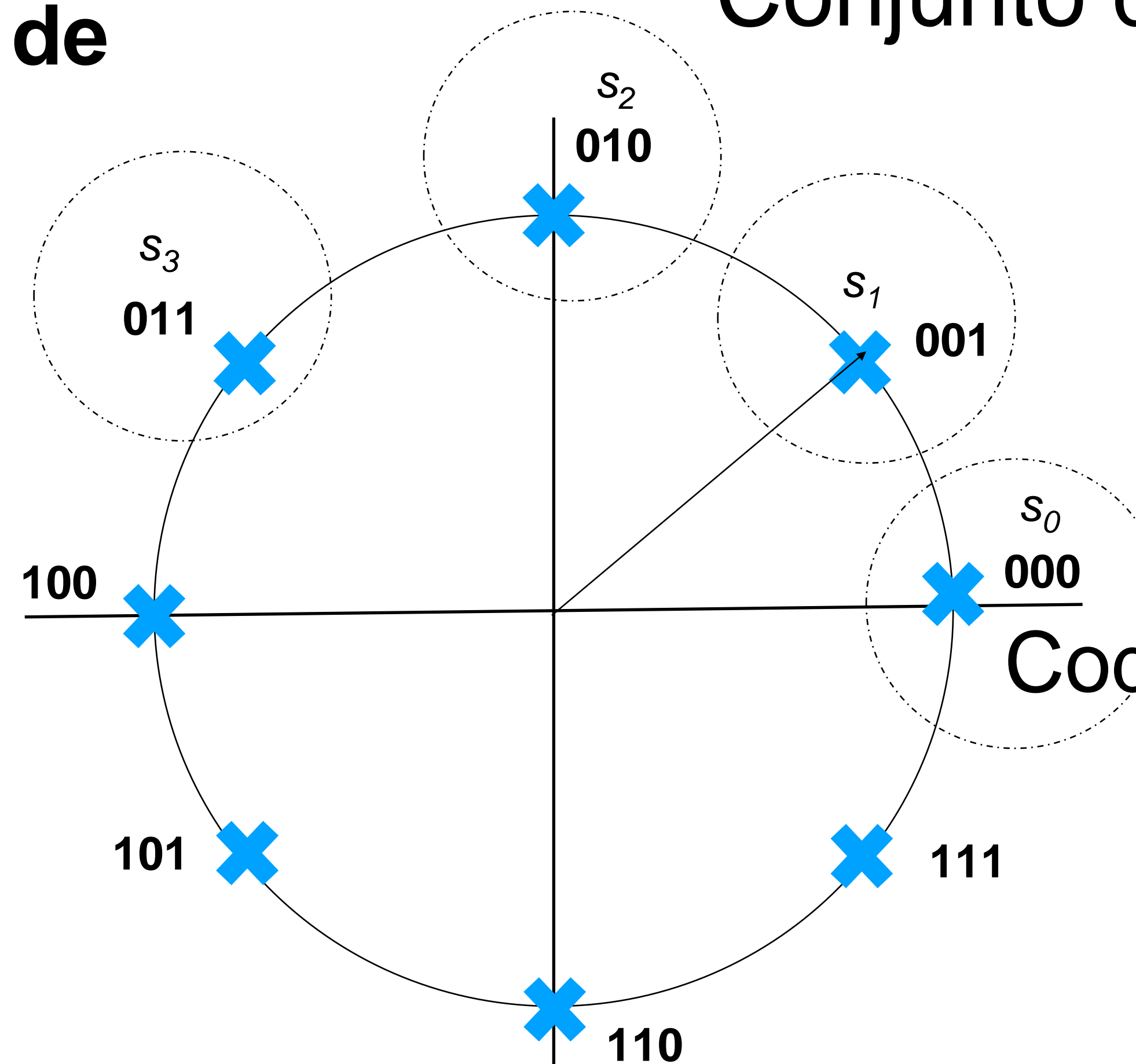
$$s_2(t) = A \sin(2\pi f_c t + \frac{\pi}{2})$$

$$s_1(t) = A \sin(2\pi f_c t + \frac{\pi}{4})$$

$$s_0(t) = A \sin(2\pi f_c t)$$

$$s_1(t) = A \sin(2\pi f_c t + \frac{\pi}{4})$$

Conjunto de símbolos

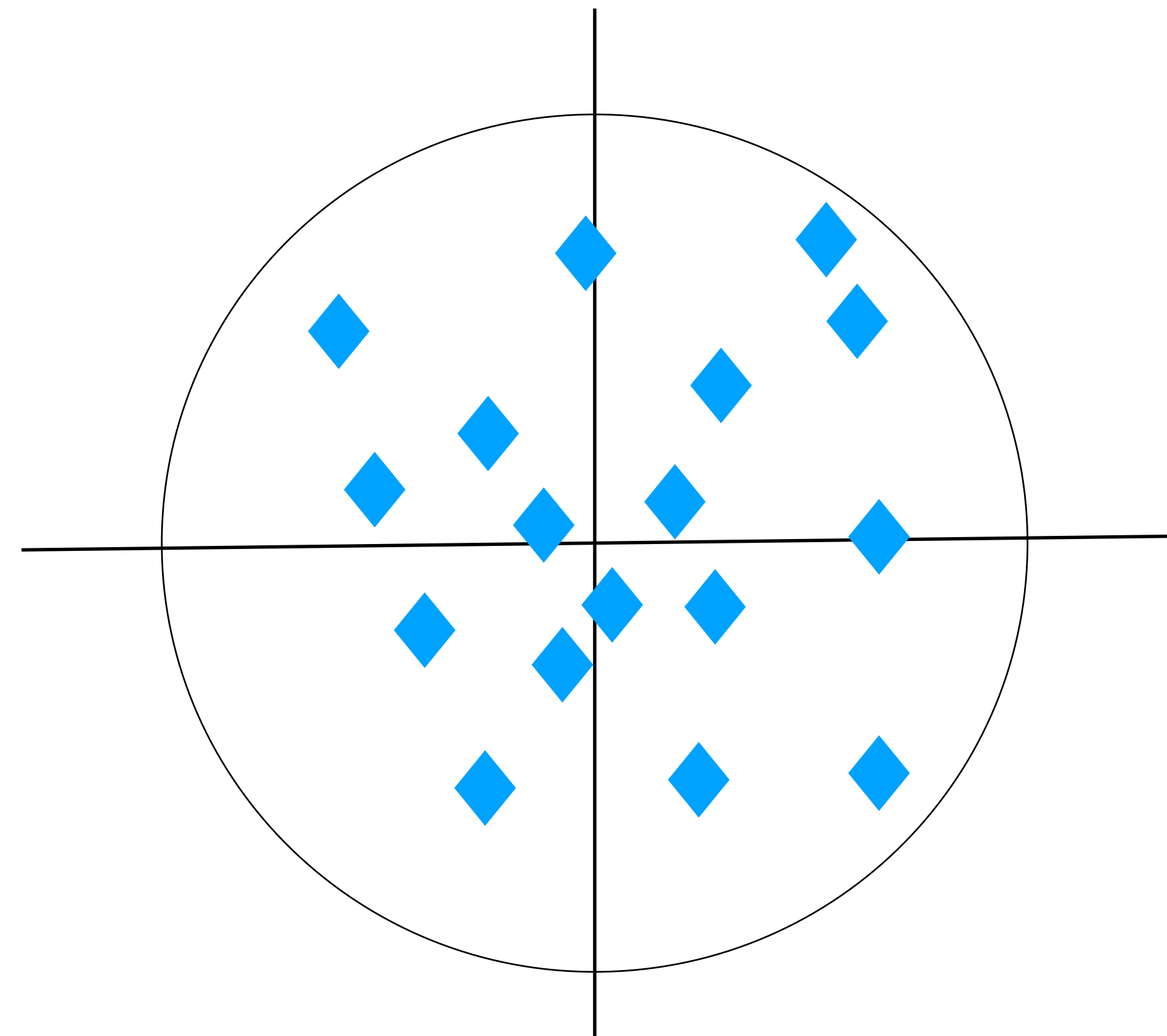


Codificação de bits

O espaço de sinais

que implica recebimento de formas de onda afetadas pelo canal em **amplitude e fase**.

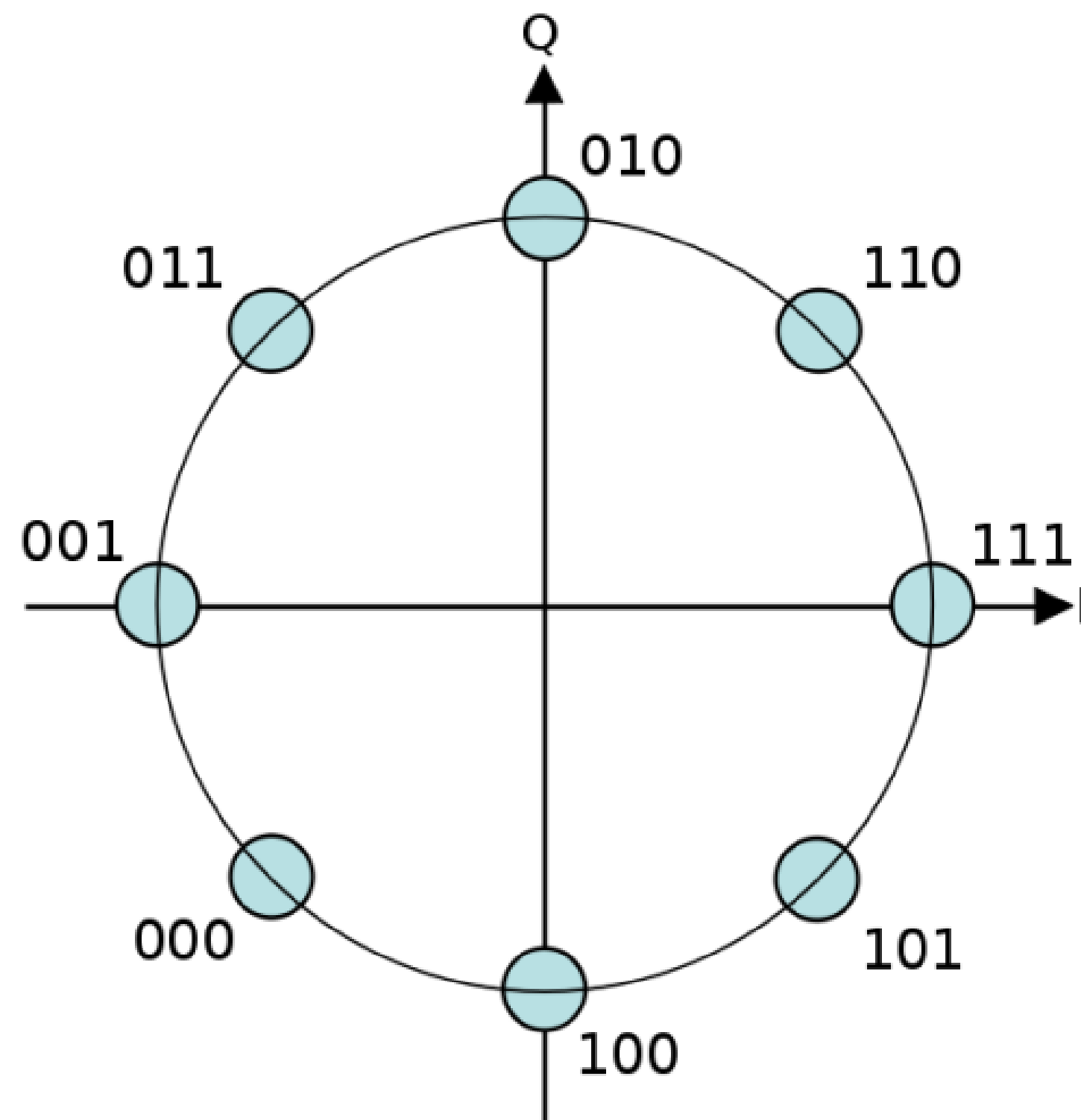
Quais são os símbolos da mensagem? Decidir pela menor probabilidade de erro.



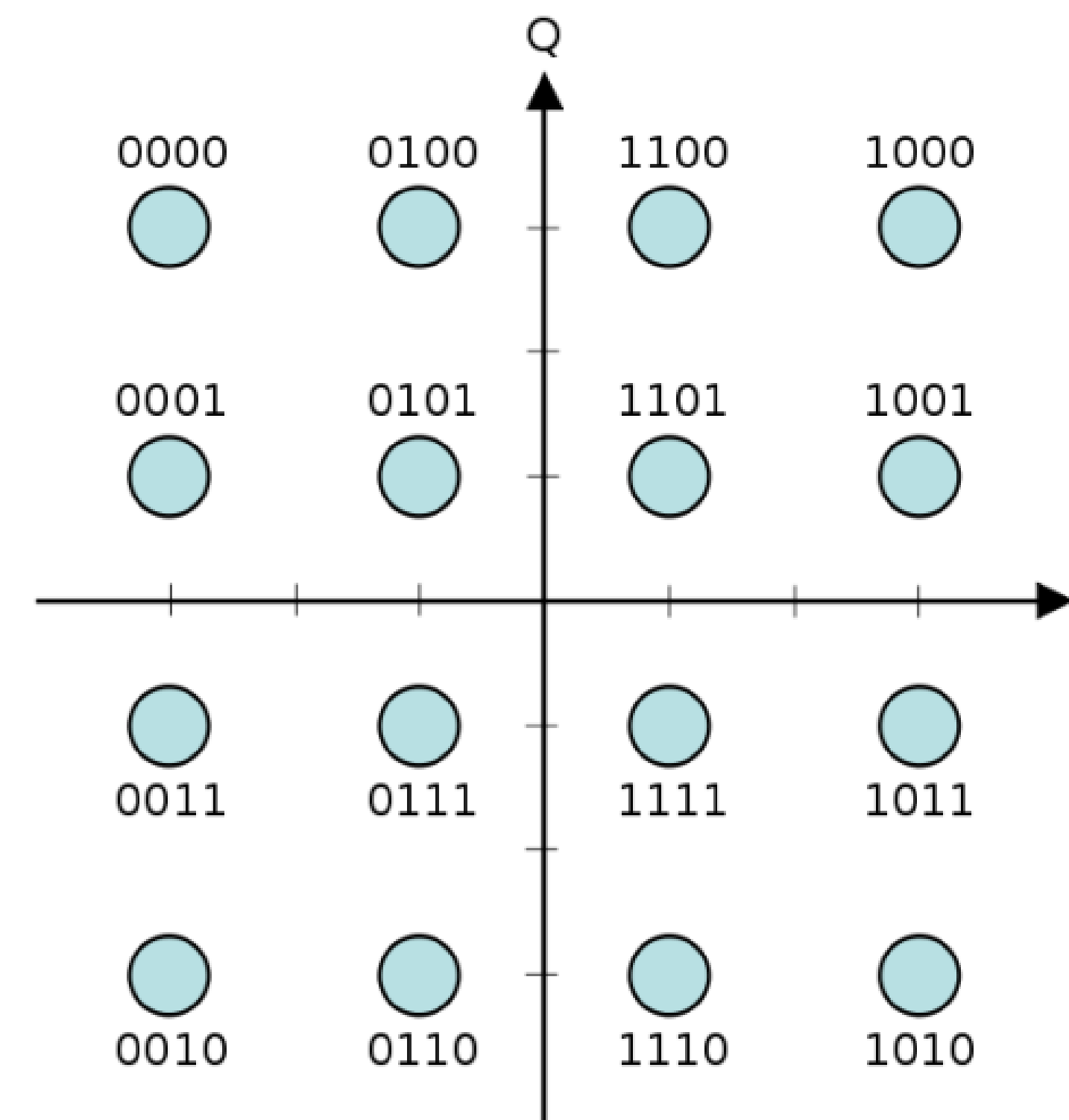
Diagramas de constelação

- Possibilita a representação genérica da forma de onda de um esquema de modulação digital.
- Apresenta em um plano as variações de amplitude e fase de cada símbolo do esquema de modulação.

Diagramas de constelação



8-QPSK



16-QAM

Receptor: o papel do decisor

- Na modulação digital, para cada mensagem m_i (sequência de bits de comprimento finito), o transmissor envia uma sequência de símbolos mapeados na forma de onda do sinal s_i
- Para cada forma de onda do sinal transmitido o receptor deve determinar a melhor estimativa de s_i , logo de m_i , dado que o sinal recebido foi $x(t)$.



Receptor: o papel do decisor

- As mensagens pertencem a um conjunto $M = \{m_1, m_2, \dots, m_M\}$ e cada mensagem possui uma probabilidade de ser transmitida p_i
- Matematicamente, o receptor deve minimizar a probabilidade de erro, dada por

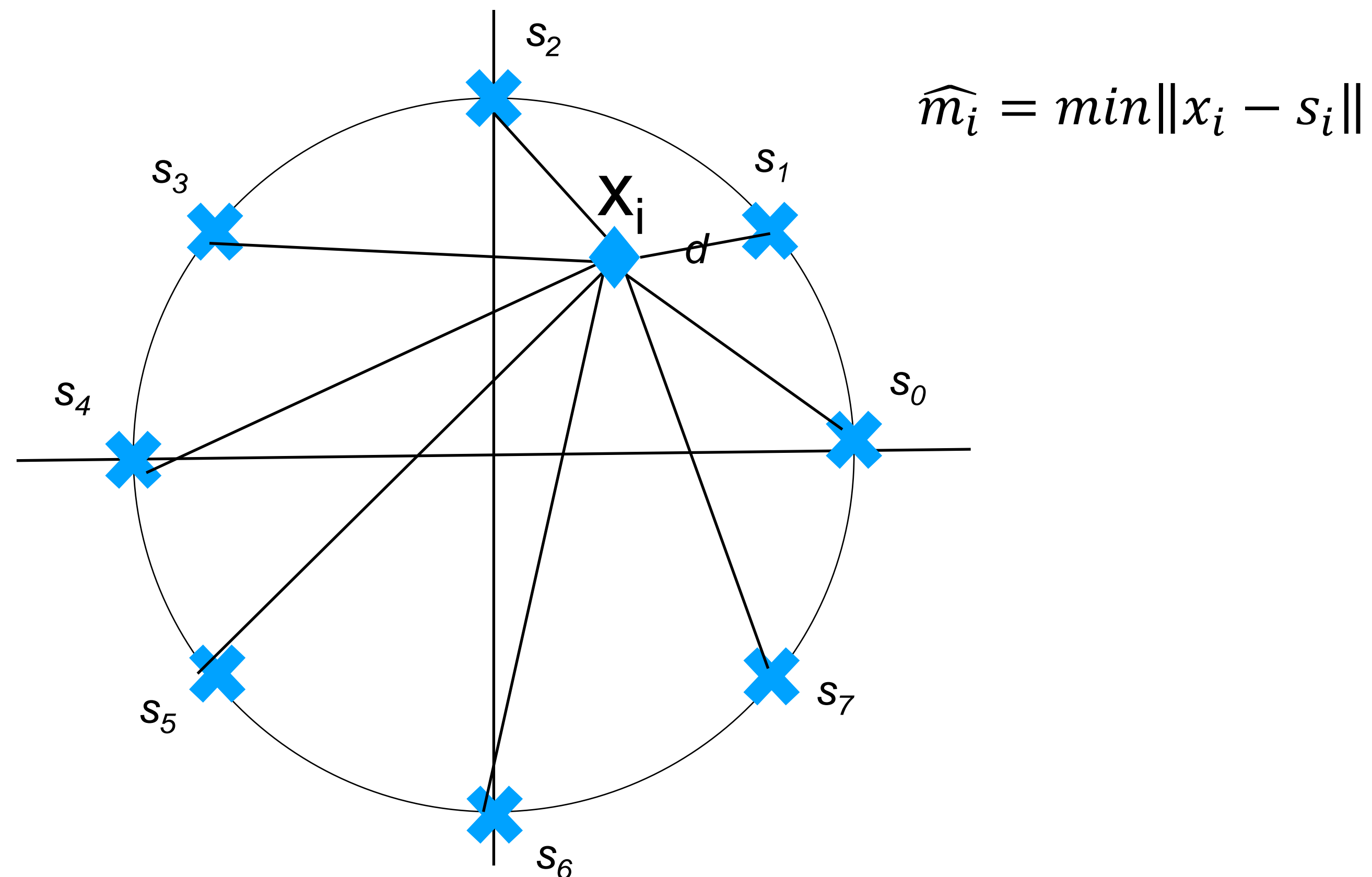
$$P_e = \sum_{i=1}^M p_i \cdot P(\hat{m} \neq m_i | m_i \text{ enviado})$$

, onde \hat{m} é a mensagem selecionada, m_i é a mensagem enviada e p_i sua probabilidade no conjunto de mensagens.

- O problema do receptor é identificar a **solução ótima** do problema de **minimização do erro**.

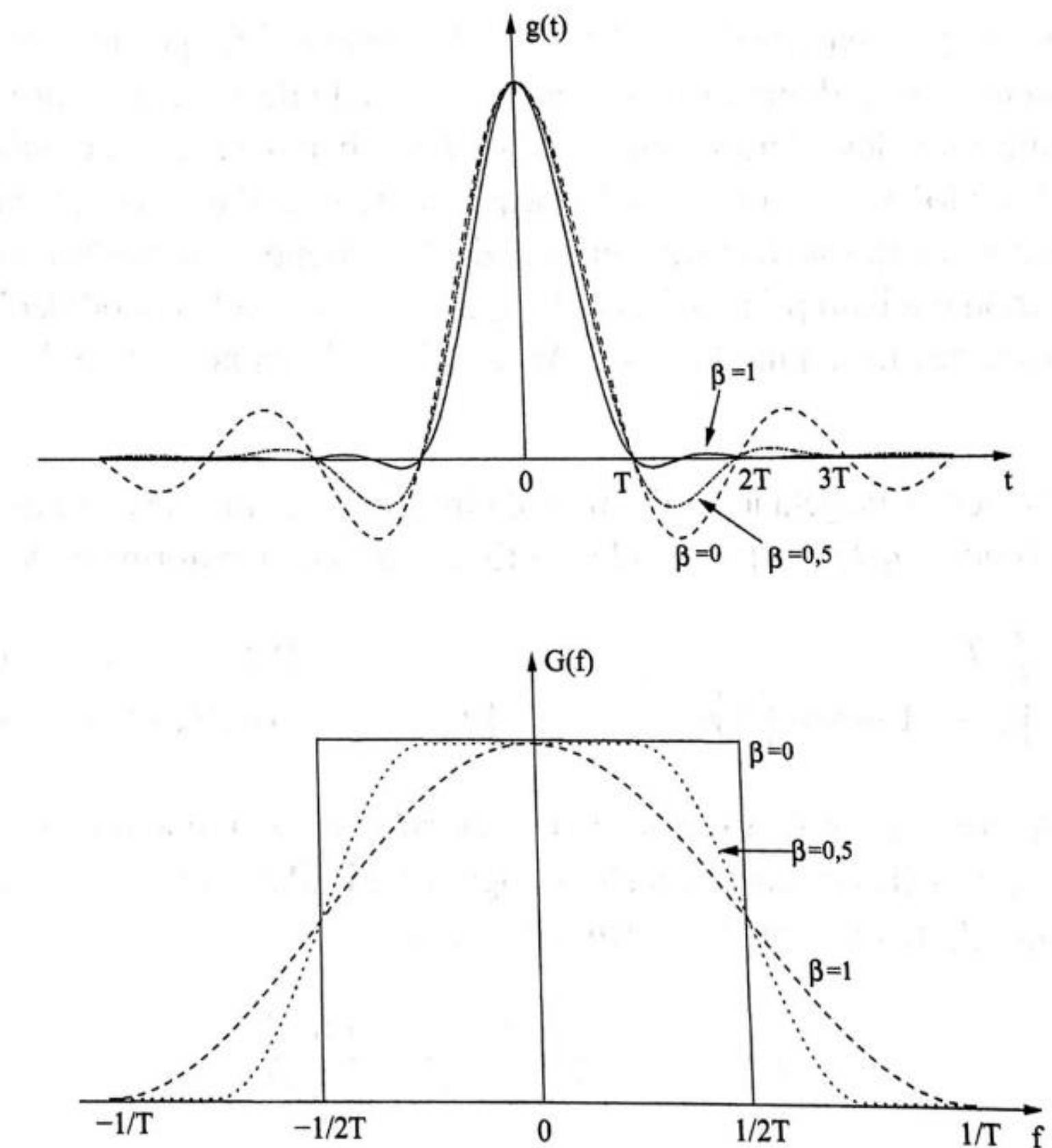
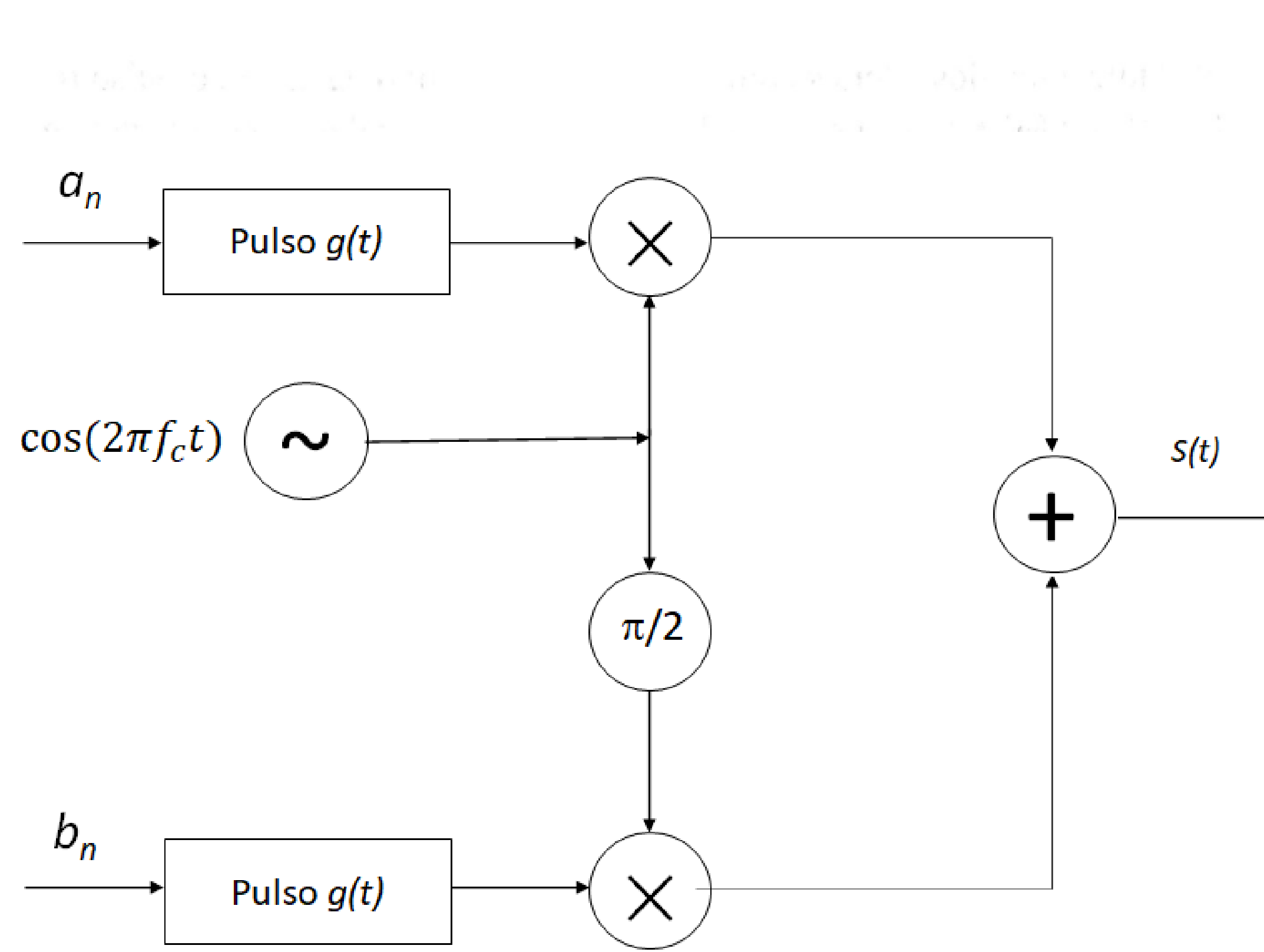
Receptor: o papel do decisor

- Admitindo que os símbolos recebidos definem um vetor \mathbf{x} , pode-se escolher a mensagem $\hat{\mathbf{m}}$ cujos símbolos \hat{m}_i estão mais próximos do sinal recebido.



Modulador digital

O **formato do pulso** deve ser convenientemente escolhido para o modulador, pois em virtude do seu comportamento no domínio da frequência, a sucessão de bits pode favorecer uma **interferência intersimbólica** (ISI, *Inter Symbol Interference*).



Tipos de modulação digital

- Modulação por Amplitude de Pulsos (M-PAM, do inglês Pulse Amplitude Modulation): a informação modula somente a amplitude da portadora;
- Modulação com Chaveamento por Deslocamento de Fase (M-PSK, do inglês Phase Shift Keying): a informação modula somente a fase da portadora;
- Modulação em Quadratura (M-QAM, do inglês Quadrature Amplitude Modulation): a informação modula tanto a amplitude quanto a fase da portadora.

PAM

- Na modulação PAM, para k bits por intervalo de sinalização T_s são definidos M símbolos, tal que $2^k = M$.
- A forma de onda tem amplitude da portadora definida por

$$s_m(t) = A_m g(t) \cos(2\pi f_c t)$$

, onde $A_m = (2m - 1 - M) \cdot d$, $m = 1, \dots, M$, e d é a distância entre símbolos.

PAM

- Simplificando, a forma de onda tem amplitude da portadora definida por

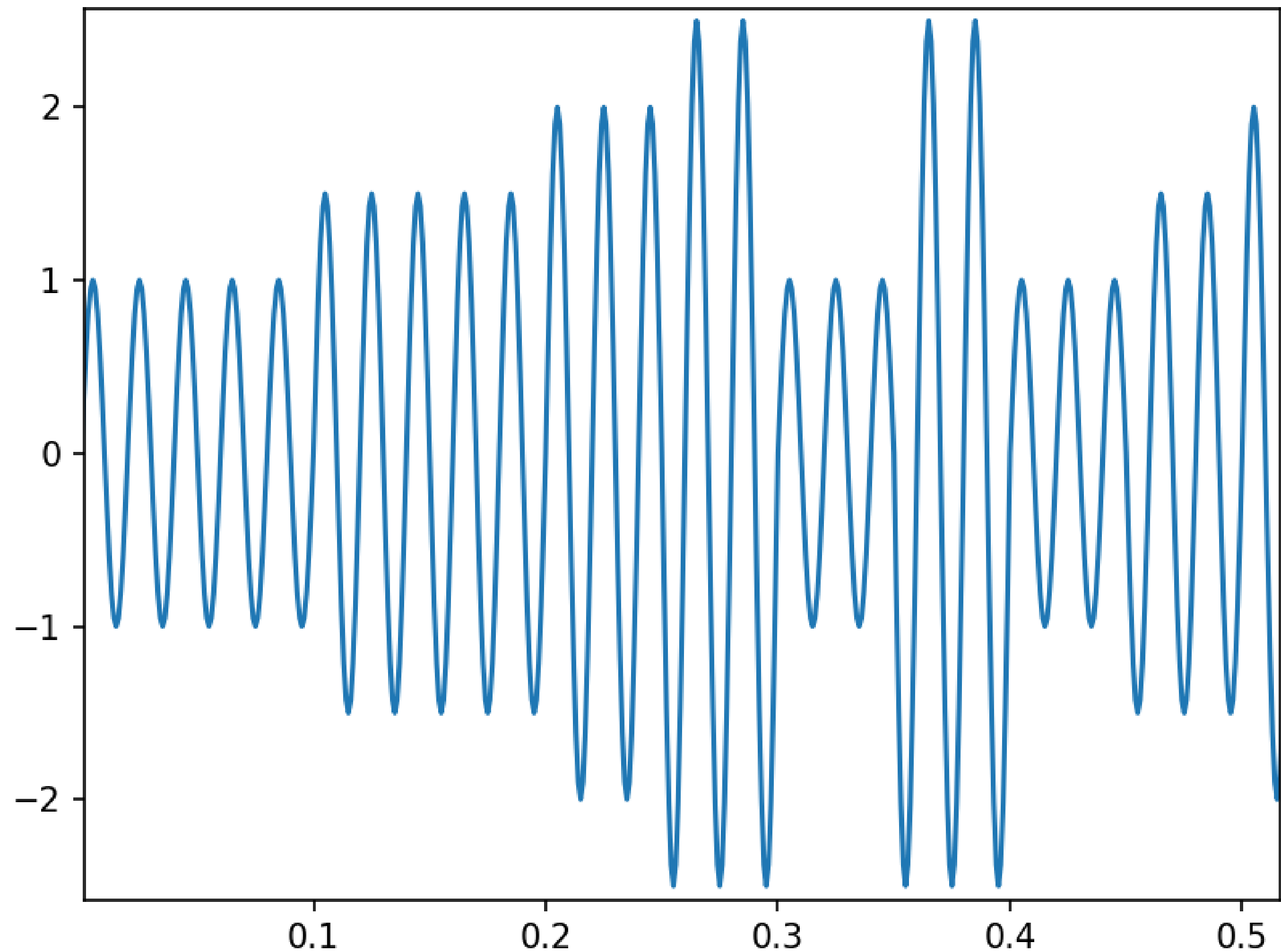
$$s_m(t) = A_m \cos(2\pi f_c t)$$

, onde $A_m = (2m - 1 - M)$, $m = 1, \dots, M$, e d é a distância entre símbolos.

- A amplitude do sinal transmitido pode assumir M valores possíveis, o que faz com que cada pulso corresponda a $\log_2 M = K$ bits por intervalo de sinalização T_s .

4-PAM

- Na modulação 4-PAM, para 2 bits por intervalo de sinalização T_s são definidos 4 símbolos: 00 – s_0 ; 01 – s_1 ; 10 – s_2 ; 11 – s_3



PSK

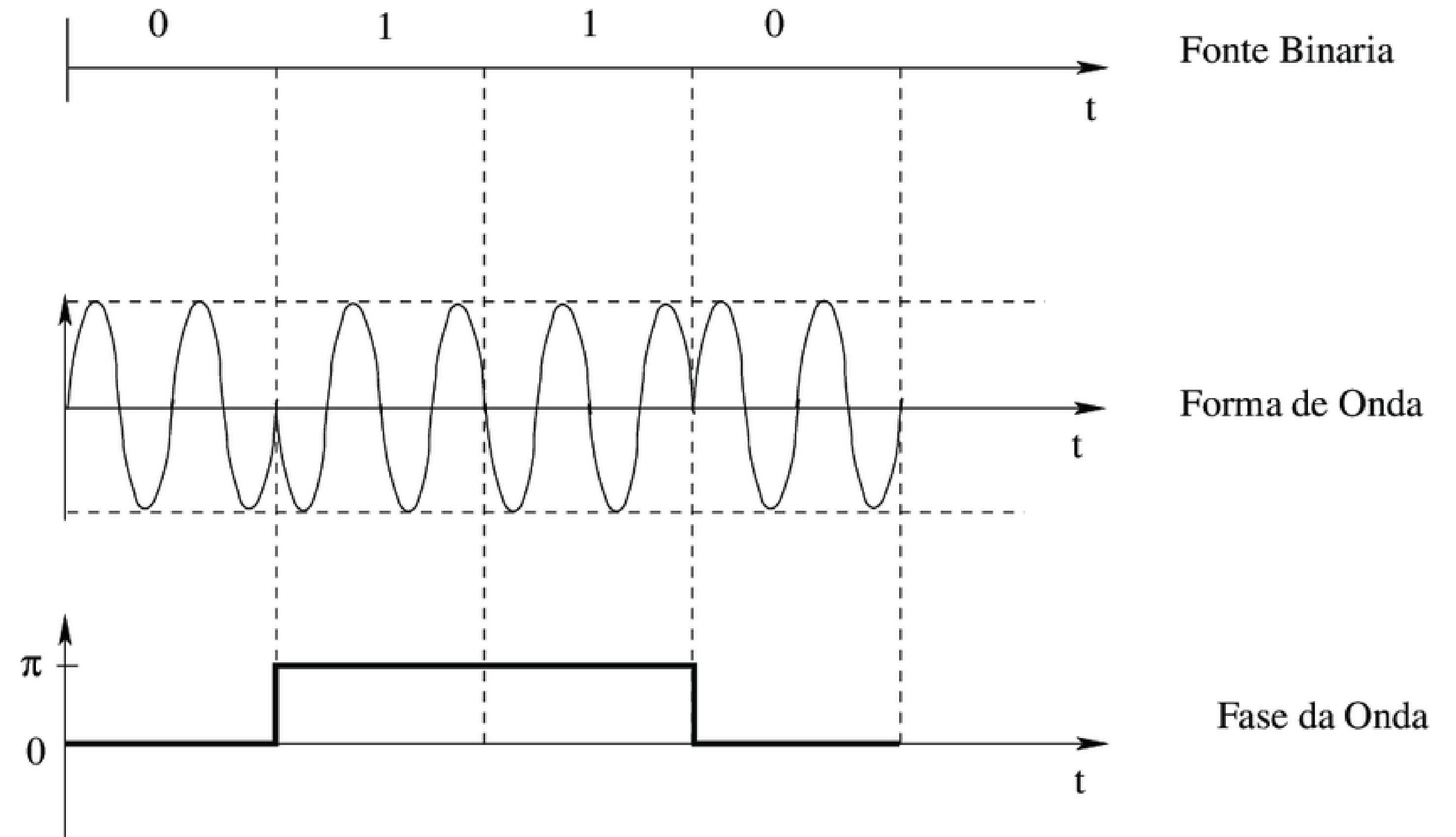
- Na modulação PSK, M símbolos são definidos para k bits por intervalo de sinalização T_s , tal que $2^k = M$.
- A forma de onda tem a fase da portadora definida por

$$s_m(t) = g(t)\cos[2\pi f_c t + \frac{2\pi}{M}(m - 1)].$$

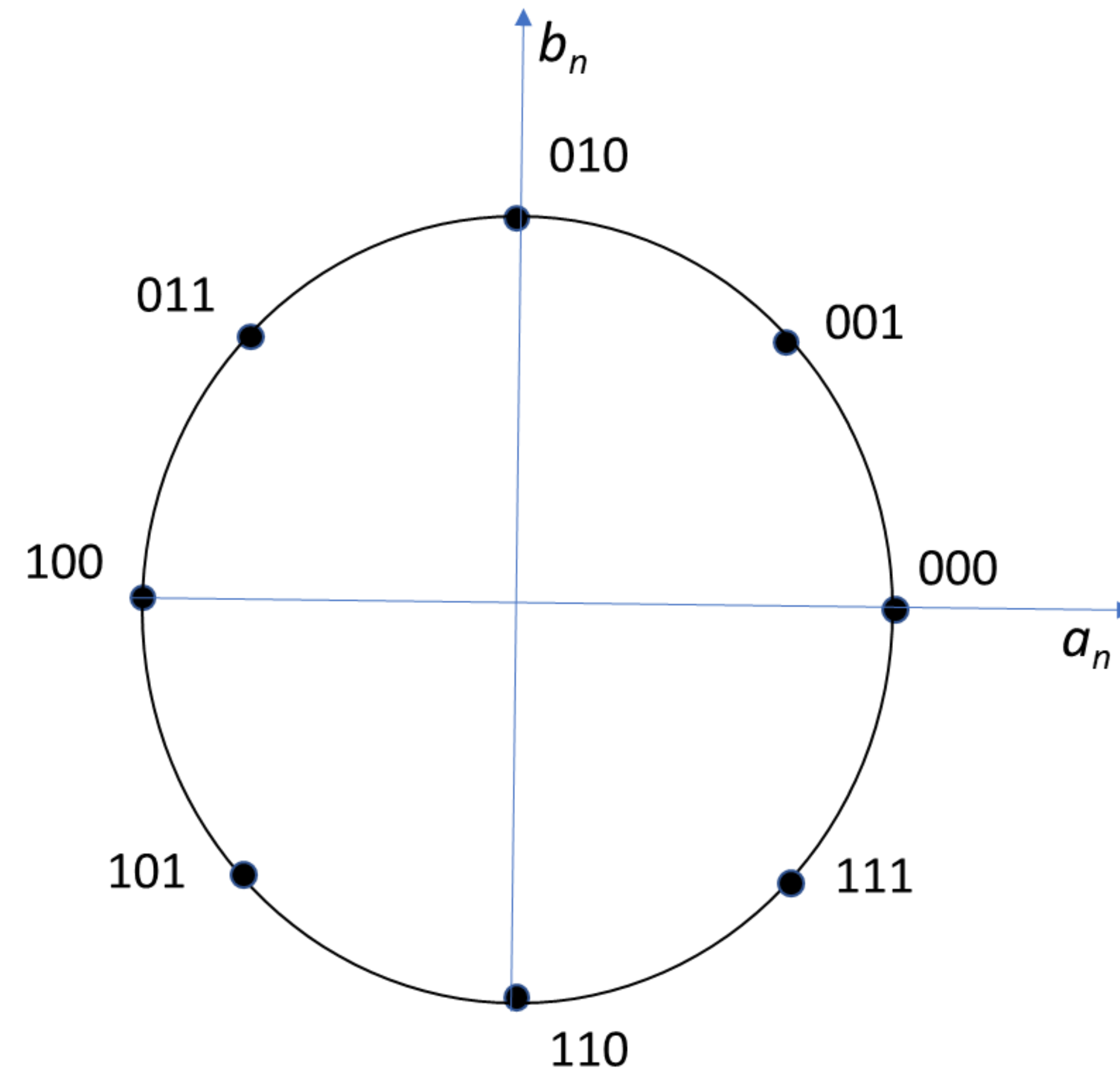
, onde $m = 1, \dots, M$. Ou seja, a fase do sinal transmitido pode assumir M valores possíveis.

2-PSK

- Na modulação 2-PSK, 2 símbolos são definidos para 1 bit por intervalo de sinalização T_s :
 $0 - s_0$; $1 - s_1$



8-PSK



$M=8, k=3$

QAM

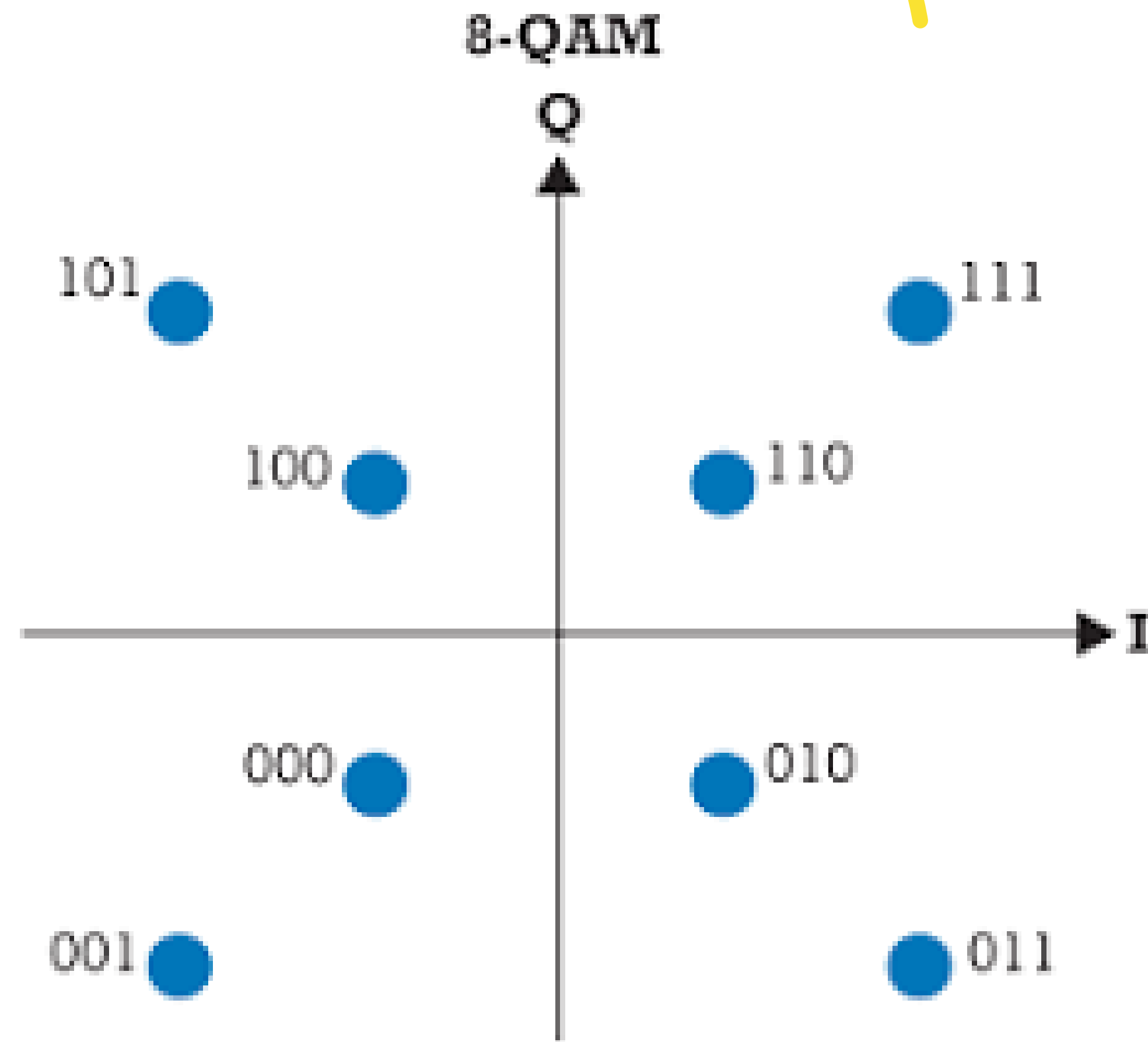
- No esquema de modulação QAM, os bits são utilizados para modular a **fase** e a **amplitude**. Ou seja, o esquema M-QAM tem dois graus de liberdade.
- Para k bits por intervalo de sinalização T_s são definidos M símbolos, tal que $2^k = M$. A forma de onda tem a amplitude e a fase da portadora definida por

$$s_m(t) = A_m g(t) \cos(2\pi f_c t + \phi_m)$$

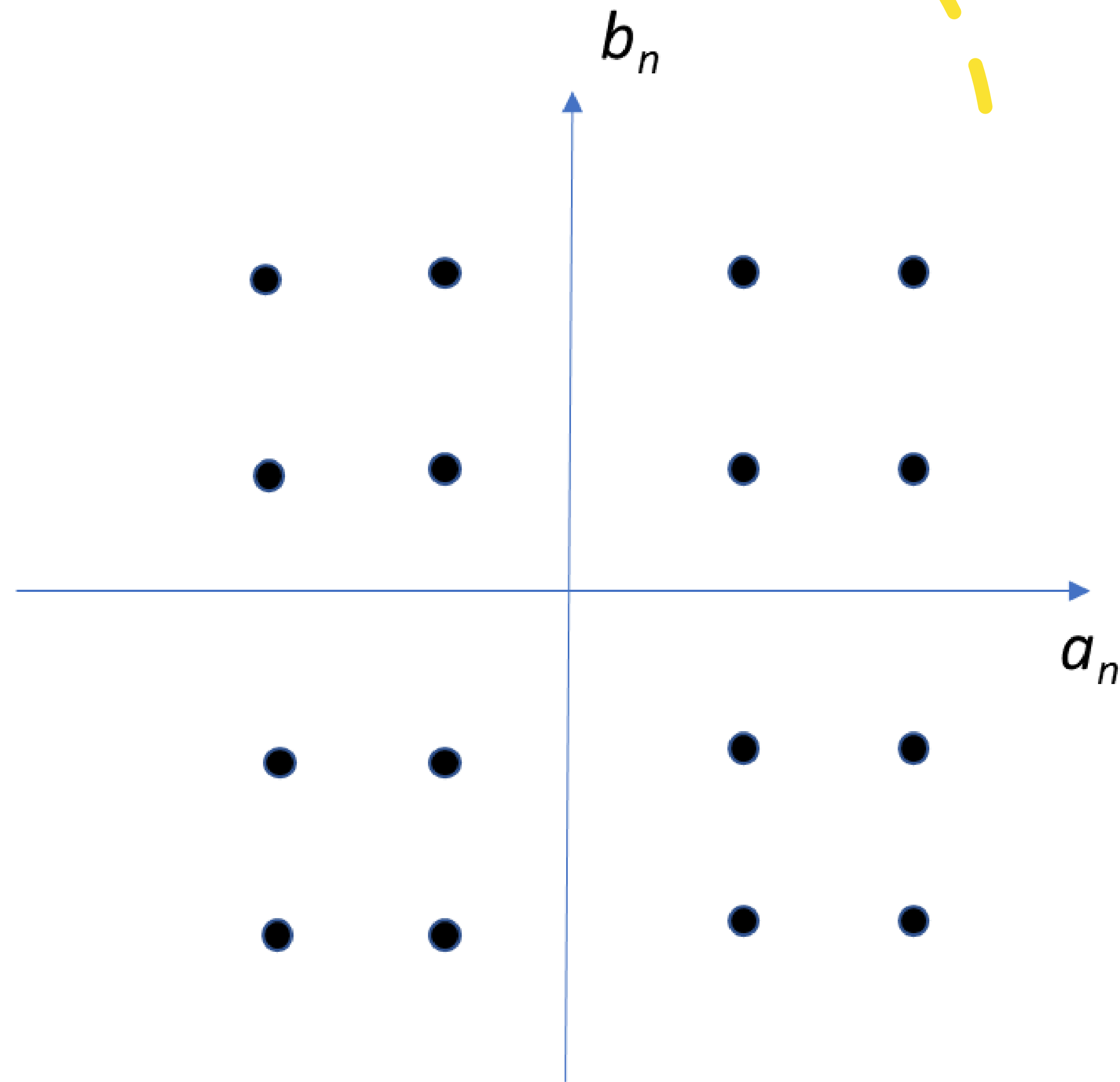
, onde $A_m = (2m - 1 - M)d$, $m = 1, \dots, M$; d é a distância entre símbolos; e

$$\phi_m = \frac{2\pi}{M} (m - 1), m = 1, \dots, M.$$

8-QAM



16-QAM



$M=16, k=4$

Referências

[1] Alencar, Marcelo S.; Telefonía Celular Digital; Capítulo 4; érica Saraiva;



IBMEC.BR

 /IBMEC

 IBMEC

 @IBMEC_OFICIAL

 @IBMEC

 **ibmec**