

# Curso: Engenharia de Computação

**Sistemas de Comunicações Móveis**

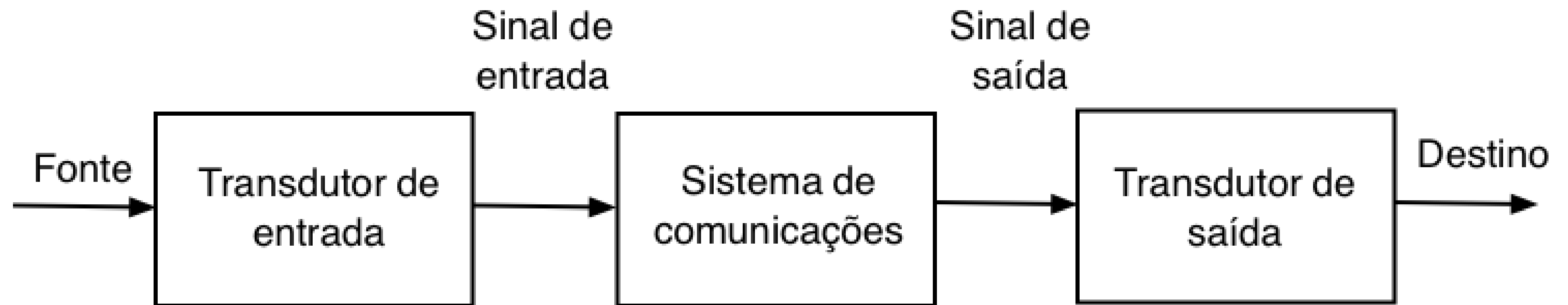
Prof. Clayton J A Silva, MSc  
clayton.silva@professores.ibmec.edu.br



# Informações e mensagens

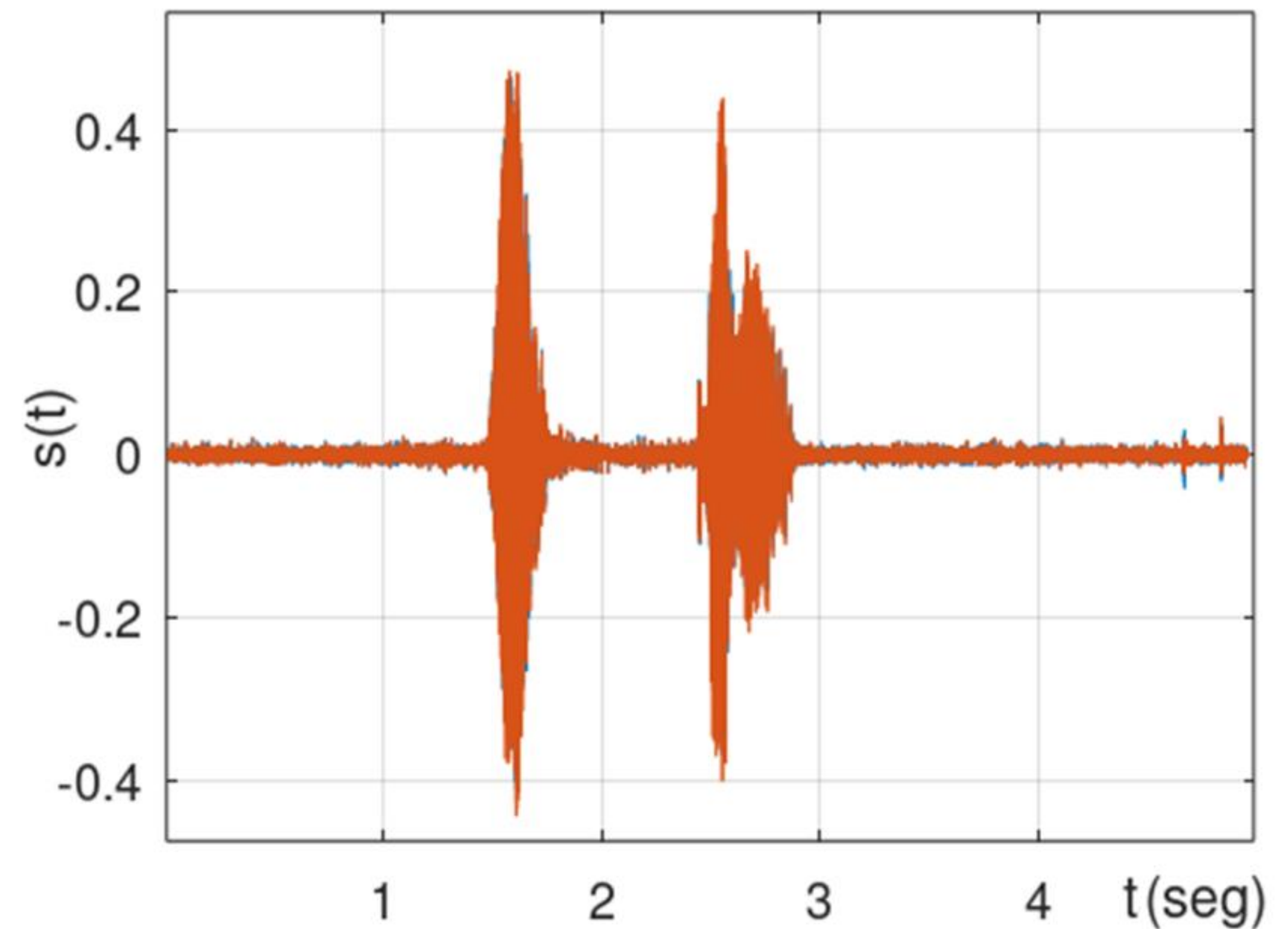
- Mensagem: manifestação física da informação, produzida por uma fonte
- **Objetivo** do sistema de comunicações: reproduzir no destino de forma aceitável uma réplica da mensagem gerada pela fonte
- Transdutores e sinais elétricos

# Transdutores e sinais elétricos



# Sinal de entrada

- A fonte gera mensagens que têm a forma de **funções contínuas de tempo** ou **fluxos de símbolos discretos**.
- Um exemplo de mensagem contínua é a forma de onda que caracteriza a **voz**. Para enviar o sinal de voz através do sistema de comunicação digital, o sinal deve ser **discretizado** no tempo e suas amostras devem ser **quantizadas**.



# Sinais de interesse para comunicações: espectro sonoro

Espectro sonoro<sup>[1]</sup>

Espectro sonoro <sup>[1]</sup>													
Espectros	Silêncio	Infrassom	Som audível						Ultrassom				Hiper-som <sup>[2]</sup>
			Subgrave	Grave	Médias baixas	Médios	Médias altas	Agudo					
Frequência	0	0.001 Hz - 20Hz	20Hz	23Hz	250Hz	640Hz	2,5KHz	20.000 Hz	30.000 Hz	10 <sup>5</sup> Hz	10 <sup>6</sup> Hz	10 <sup>8</sup> Hz	10 <sup>9</sup> Hz
Descrição	Ausência de som		faixa da <b>audição humana</b> (perspetivável ao ouvido humano)						frequência típica do <b>sonar</b>	limite da audição de morcegos e golfinhos	frequência típica de ultrassons para fins médicos		

# Sinais analógicos de interesse para comunicações: espectro do sinal de voz

- Os limites típicos do sinal de voz no domínio da frequência situam-se na **faixa entre 10 Hz e 3400 Hz**.
- O espectro não é limitado, pois existem componentes que se estendem além desses limites, porém com **menor intensidade**.
- Tipicamente, a **maior energia** do sinal de voz situa-se na **faixa entre 500 Hz e 800 Hz**.
- Para **aplicações em telefonia**, a frequência de amostragem adotada internacionalmente é de  $f_A = 8 \text{ kHz}$

# Sinais analógicos de interesse para comunicações: sinal de vídeo analógico

- O sinal de vídeo é gerado a partir da **leitura sequencial de um quadro**, da esquerda para a direita, de cima para baixo, de acordo com a **intensidade luminosa de pontos (*pixels*)**
- O sinal resultante é um sinal que varia no tempo cujas características espectrais dependem do:
  - **número de *pixels* e**
  - **da velocidade da varredura** com que se monta a matriz dos *pixels* para a formação da imagem – normalmente definida pelas linhas do quadro



# Uma revisão sobre o conceito de sinais



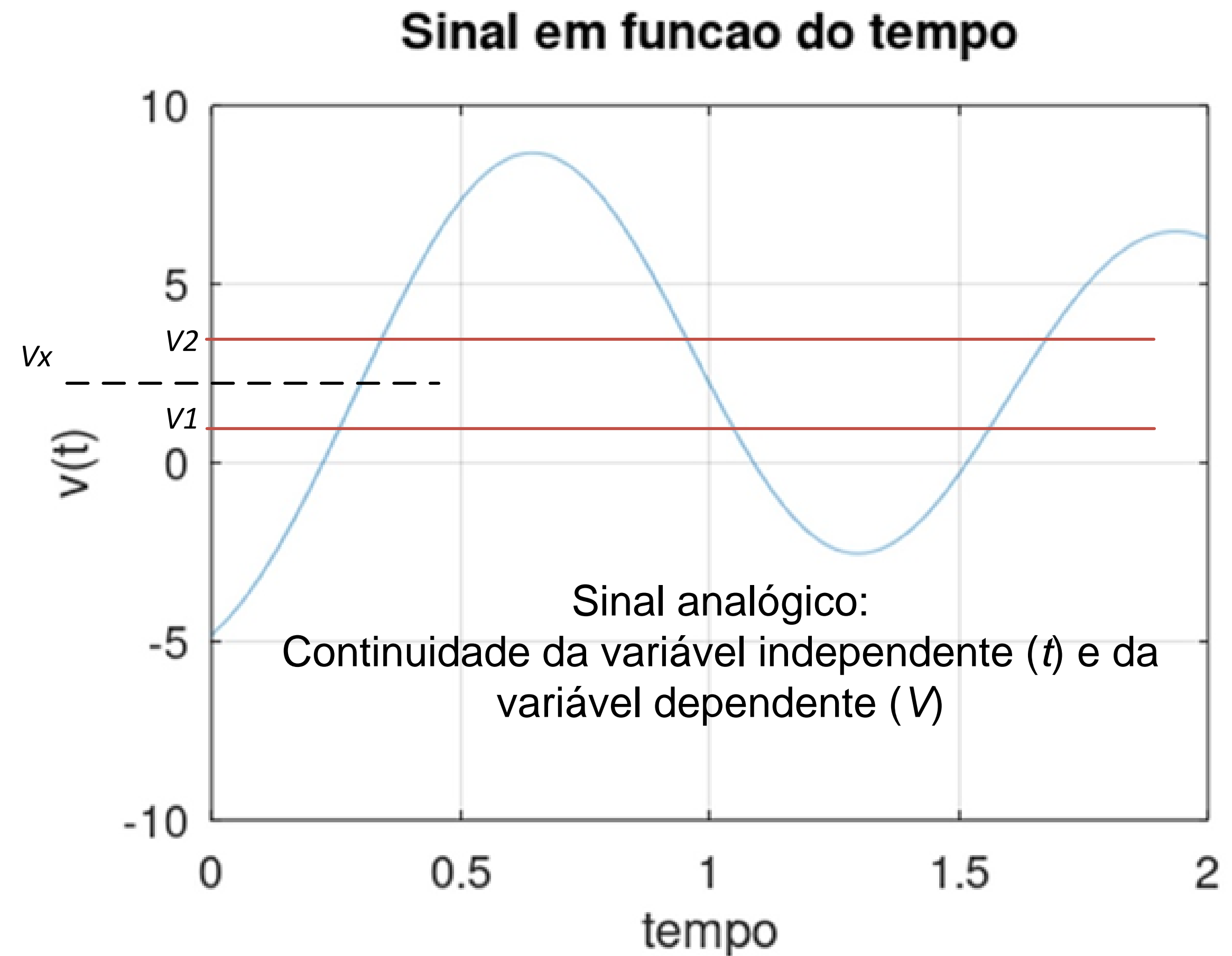
# Domínios de representação do sinal

- Domínio do **tempo** – Representa o comportamento do sinal elétrico  $x$ , que transporta a informação, em função do tempo,  $t$
- Domínio da **frequência** – Representa o comportamento do sinal elétrico  $X$  em função da sua taxa de variação com o tempo ou frequência,  $f$

# Sinais analógicos

O sinal elétrico ( $x$ ) – variável dependente – pode ser descrito em função do tempo ( $t$ ) – variável independente:

$$x = f(t)$$





# Espectro de frequências

- A velocidade ou taxa da variação do sinal no tempo, medida em **hertz (Hz)**, é chamada de **frequência**
- Todo sinal  $x(t)$  pode ser representado por uma combinação linear de componentes que representa o seu **comportamento espectral**, ou seja, das suas componentes em frequência, chamada de **Transformada de Fourier**

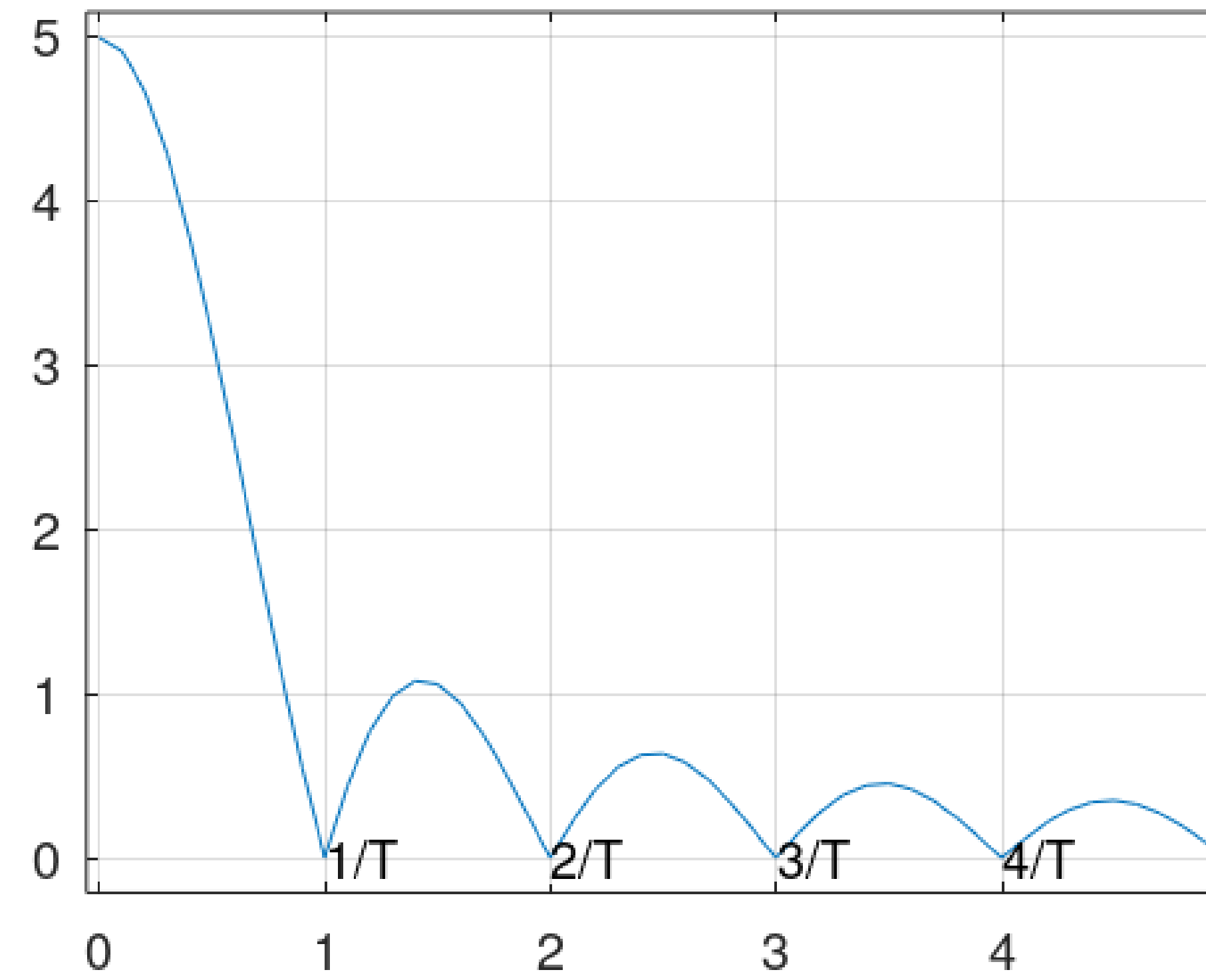
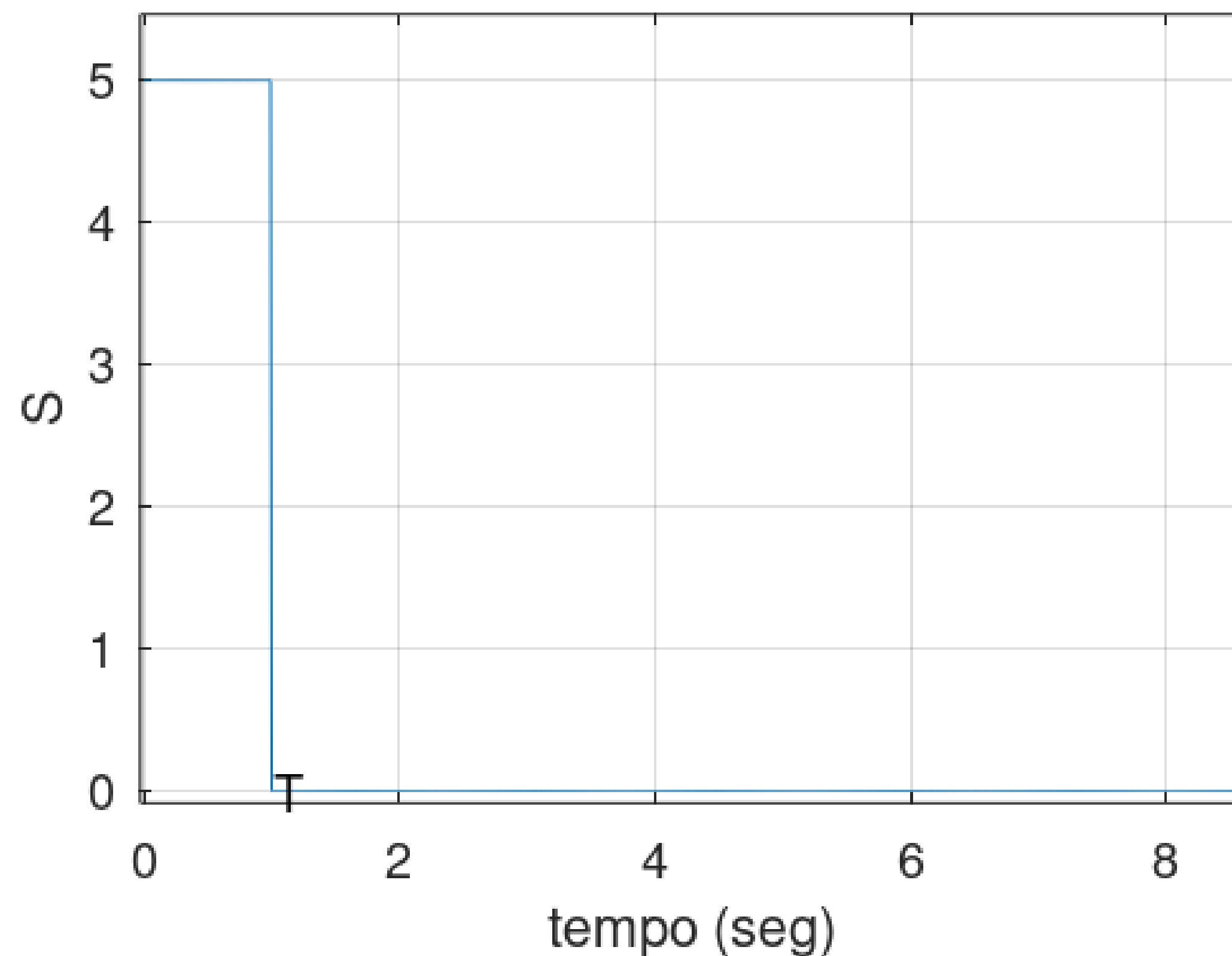
$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi f t} dt$$

, onde  $\omega = 2\pi f$  é a **frequência angular**

# Espectro de frequências

Exemplo: Transformada de Fourier de um sinal definido como pulso retangular

**Pulso retangular**





# Sistemas analógicos e digitais

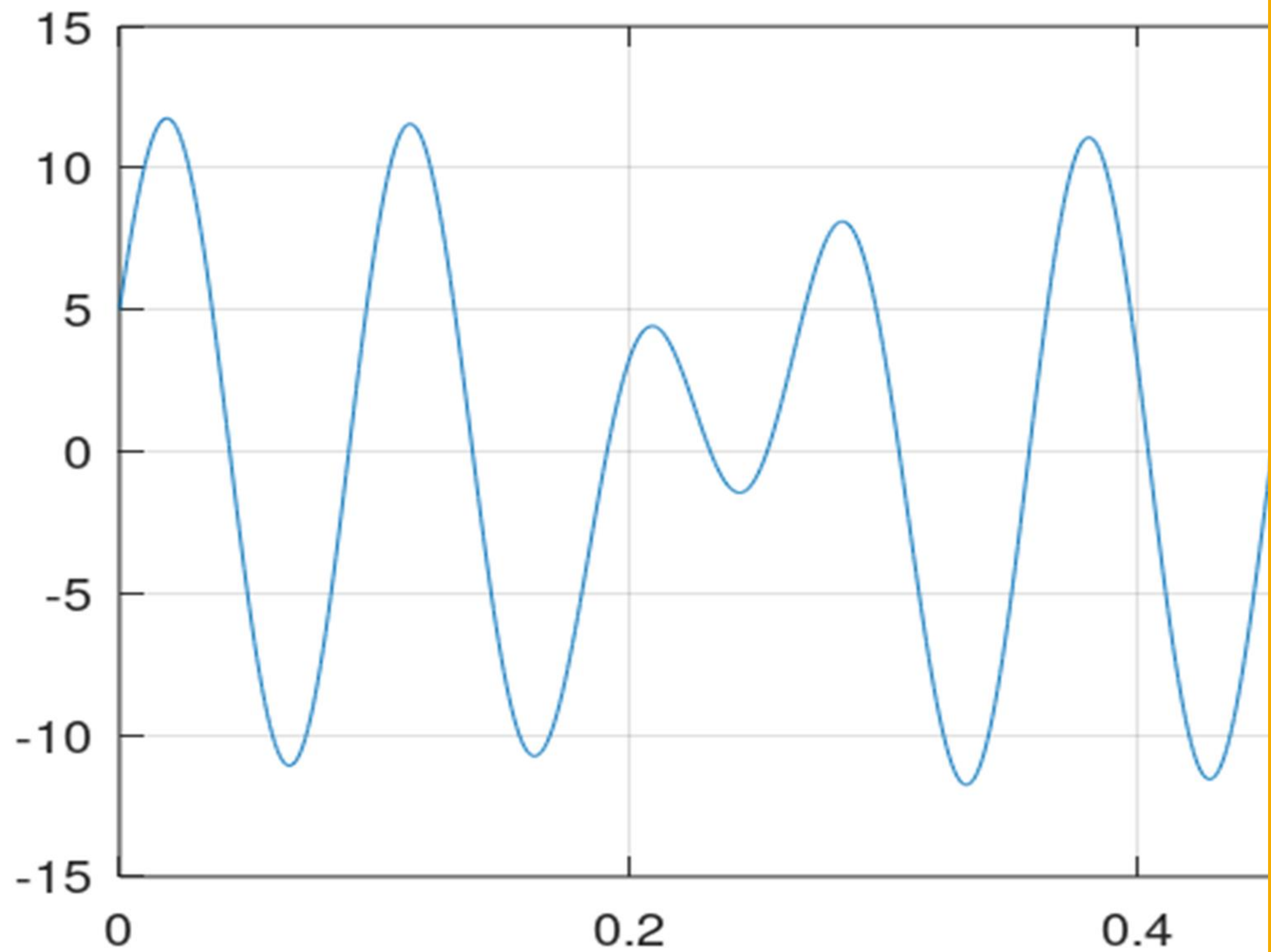
Os sistemas de comunicações podem ser **analógicos** ou **digitais** – o sinal de entrada pode ser analógico ou digital. O projeto do transmissor e do receptor depende do tipo do sinal analógico ou digital de entrada.

# Conversão analógico- digital (AD)

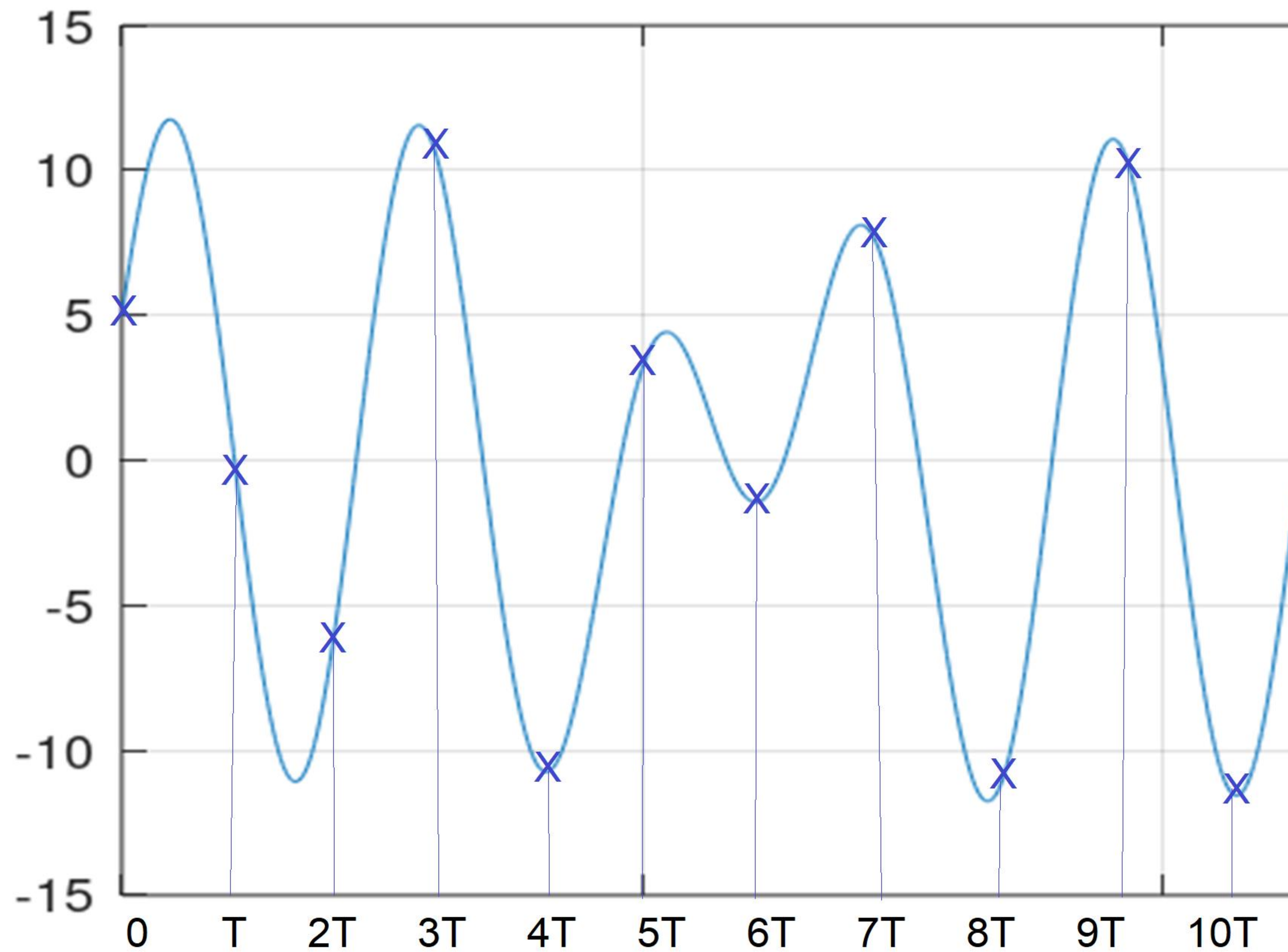
## O problema da digitalização



# Conversão analógico-digital (A/D)

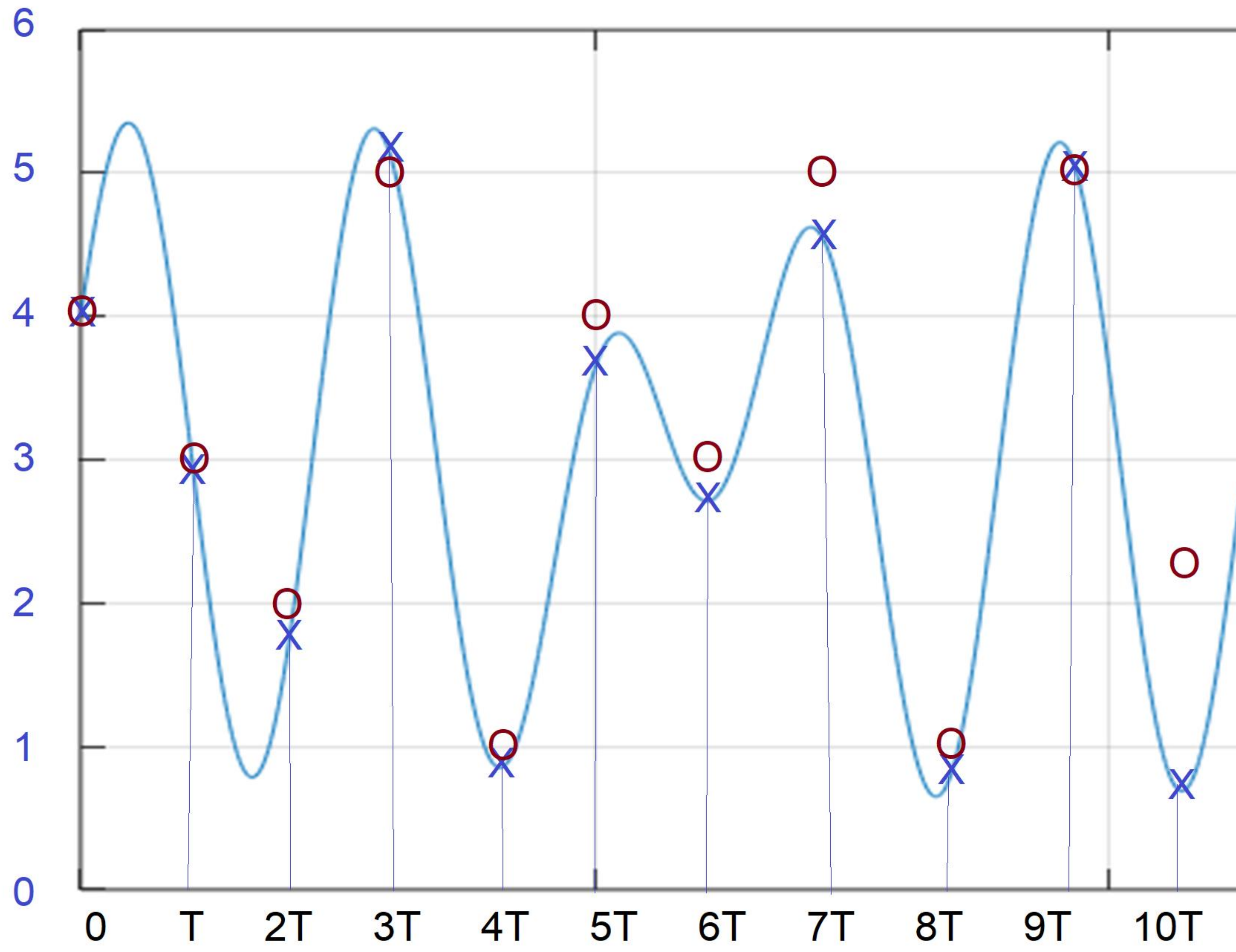


# Conversão analógico- digital (A/D)



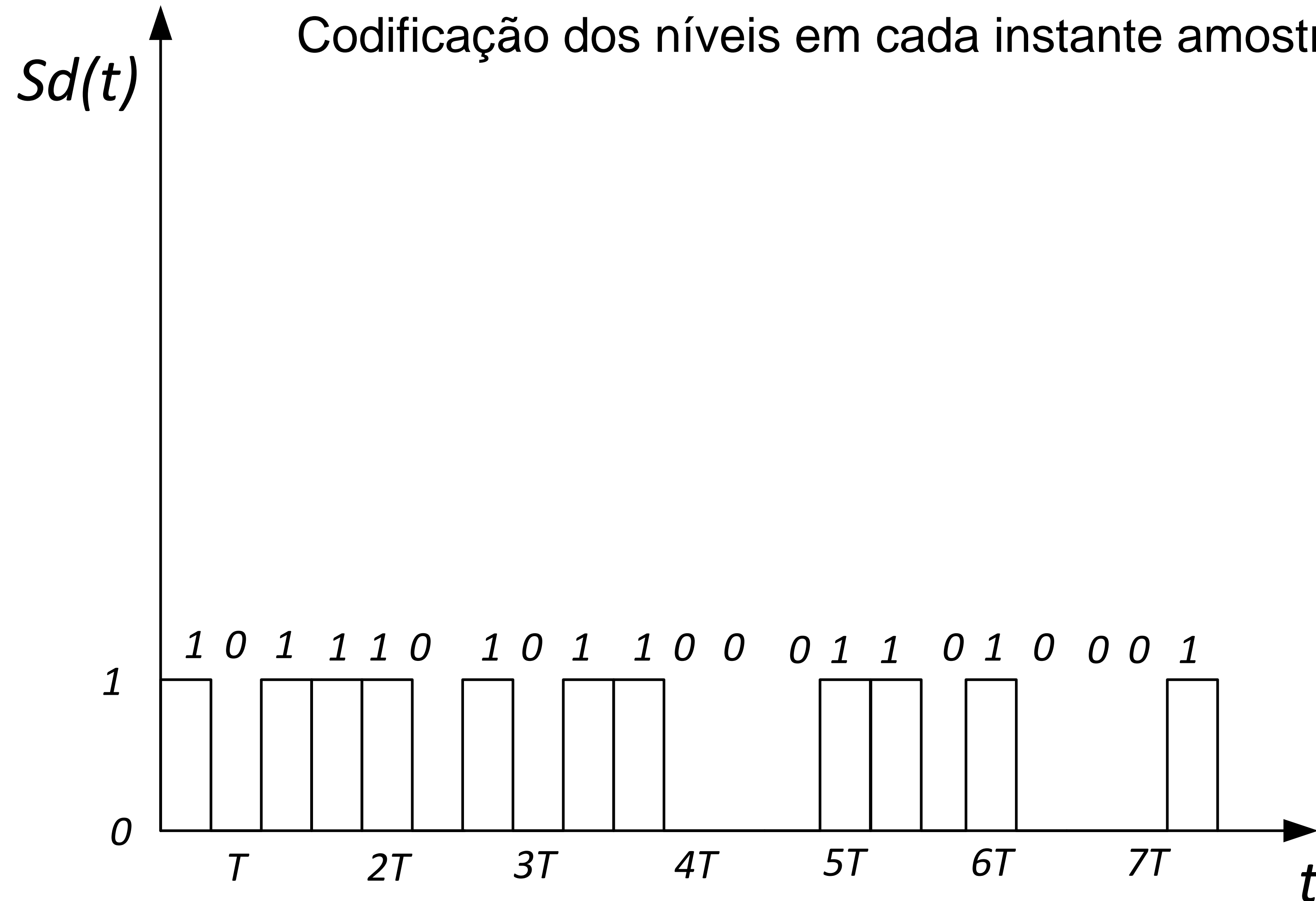


# Conversão analógico-digital (A/D)



# Sinal digital

Codificação dos níveis em cada instante amostrado



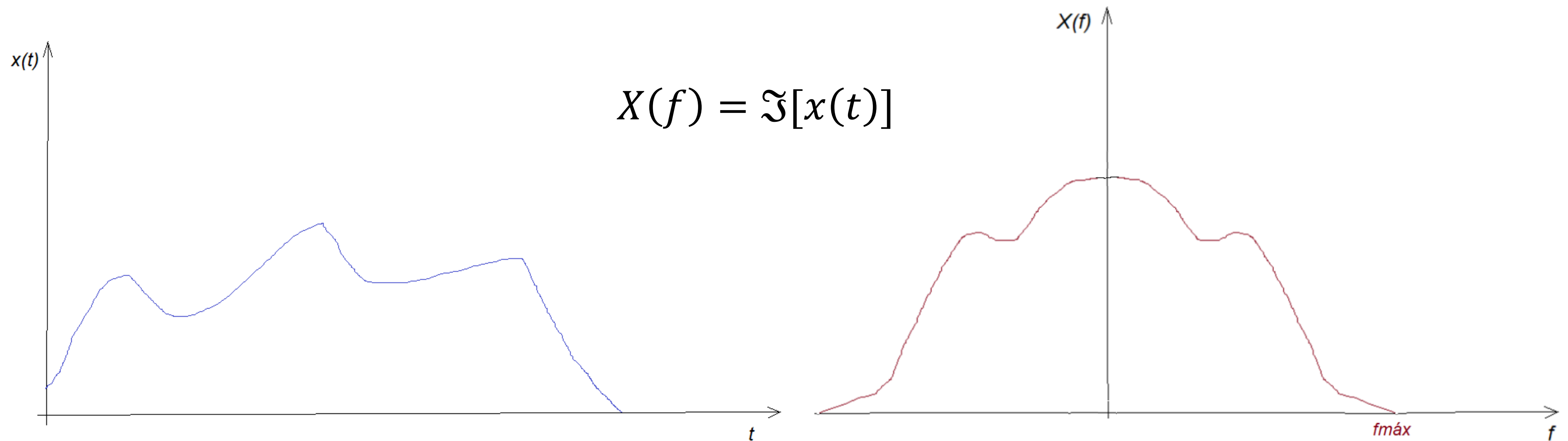
# Formalizando o teorema da amostragem

- Se o sinal for contínuo no tempo, precisará ser discretizado.
- A taxa de amostragem deve ser suficiente para que possa ser reconstruído.
- **Teorema de *Nyquist***: um sinal  $x(t)$  limitado por uma frequência  $f_{máx}$  pode ser reconstruído sem erro a partir das suas amostras se for amostrado a uma taxa  $f_A$  tal que

$$f_A > 2f_{máx}$$

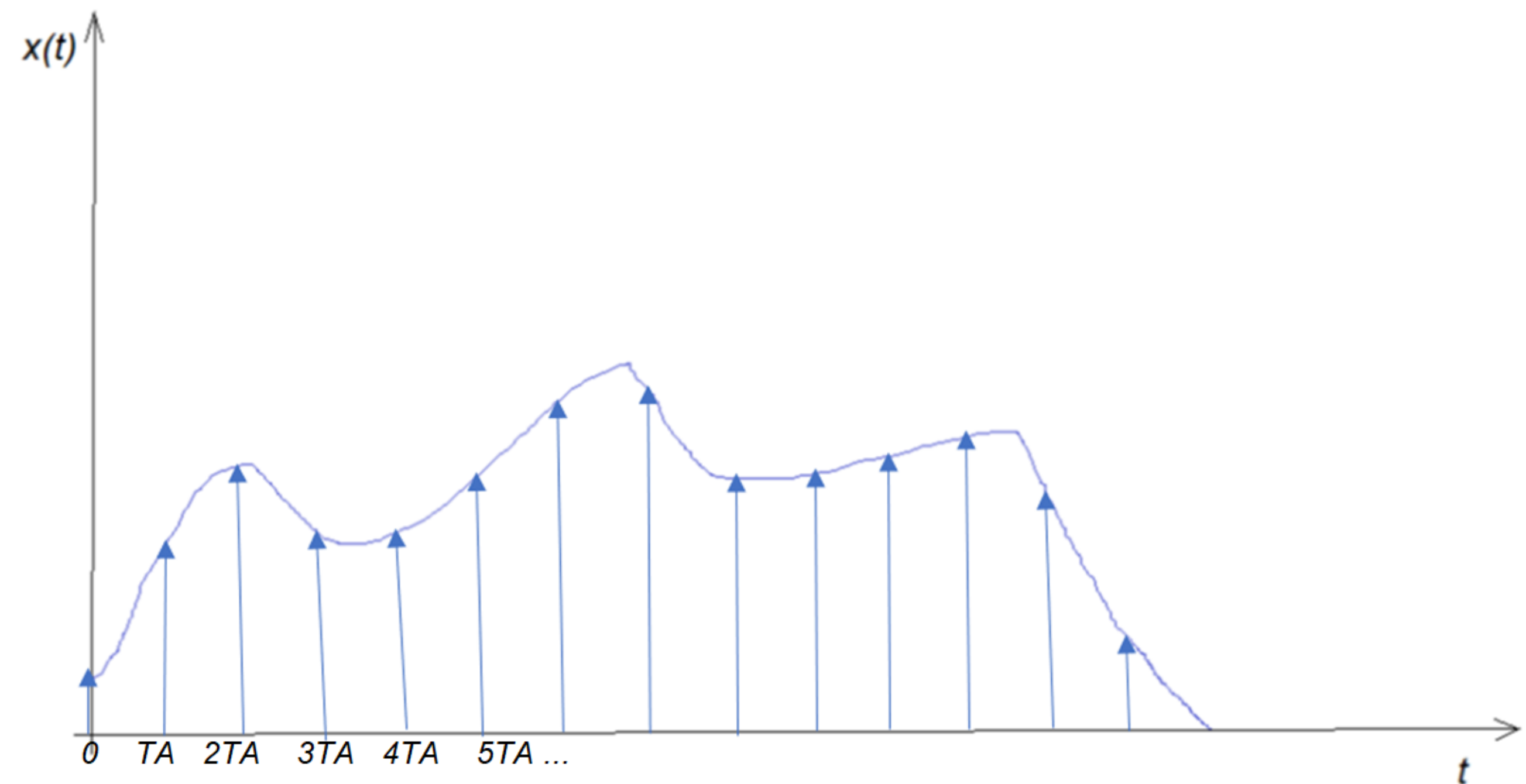
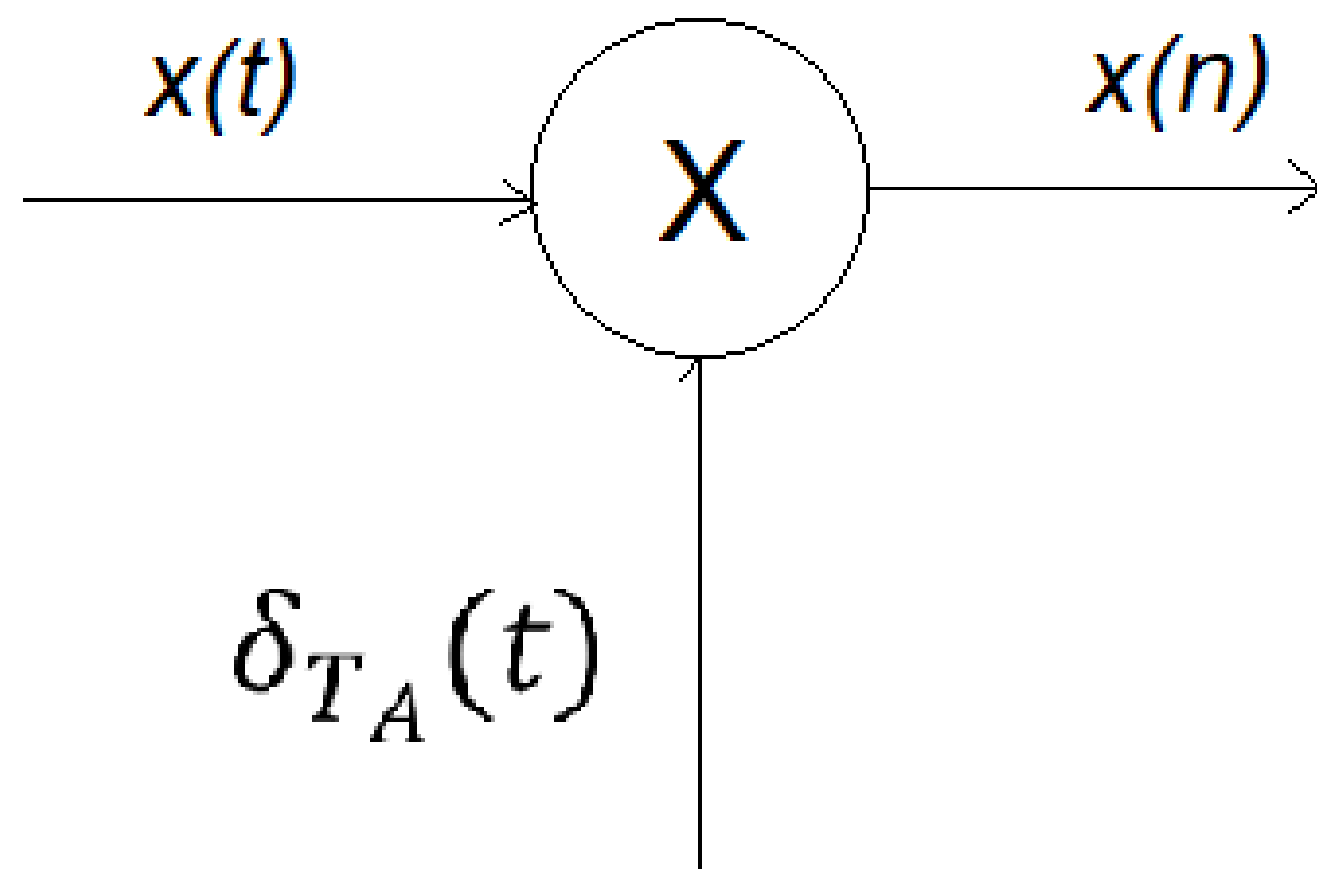


# O sinal analógico e seu comportamento espectral

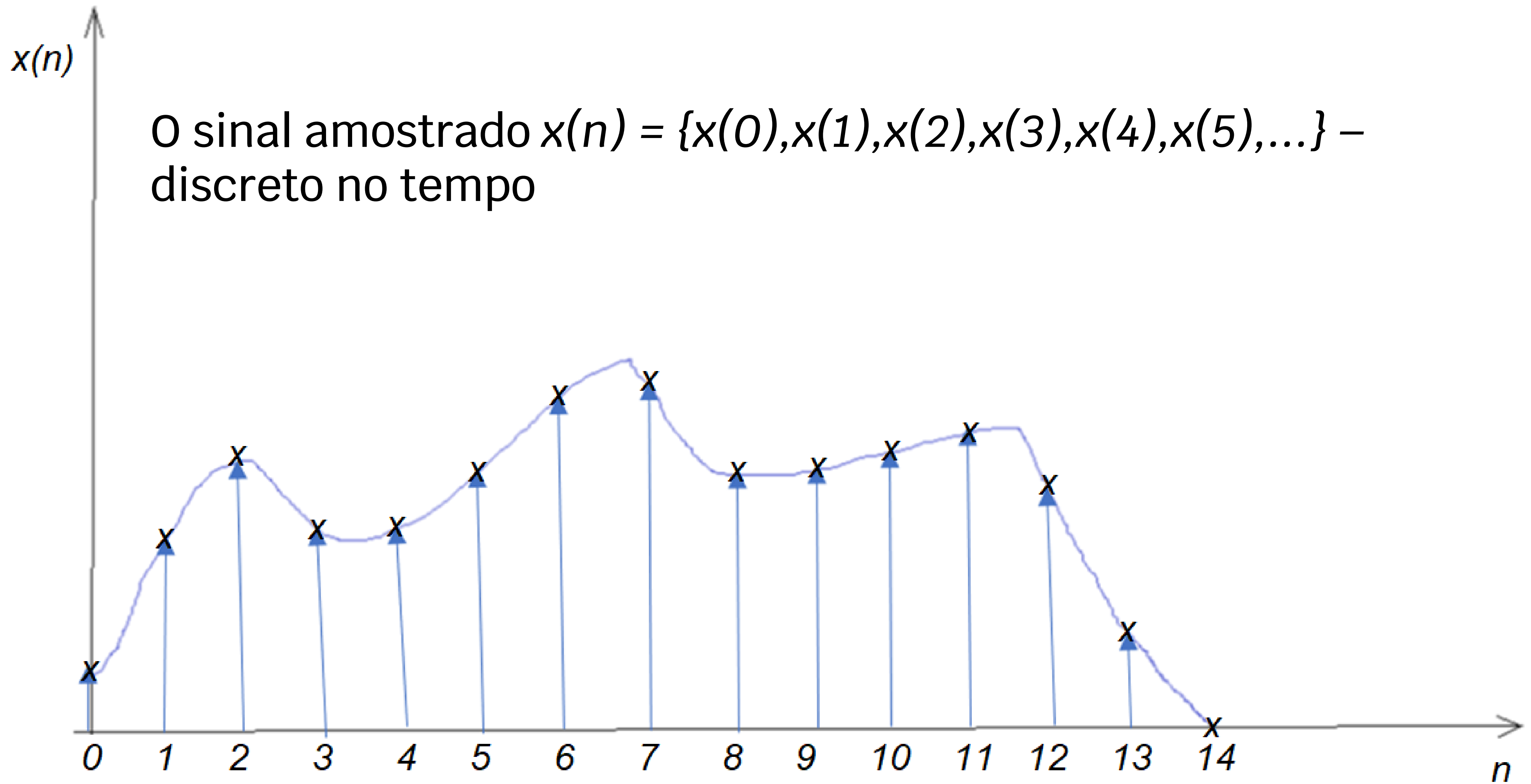


# A amostragem

Para amostrar o sinal pode-se multiplicá-lo por um sinal  $\delta_{T_A}(t)$  – onde  $\delta(t)$  representa delta de Dirac ou função impulso, ou seja, **um trem de impulsos**, o que resultaria em  $x(t) \cdot \delta_{T_A}(t)$



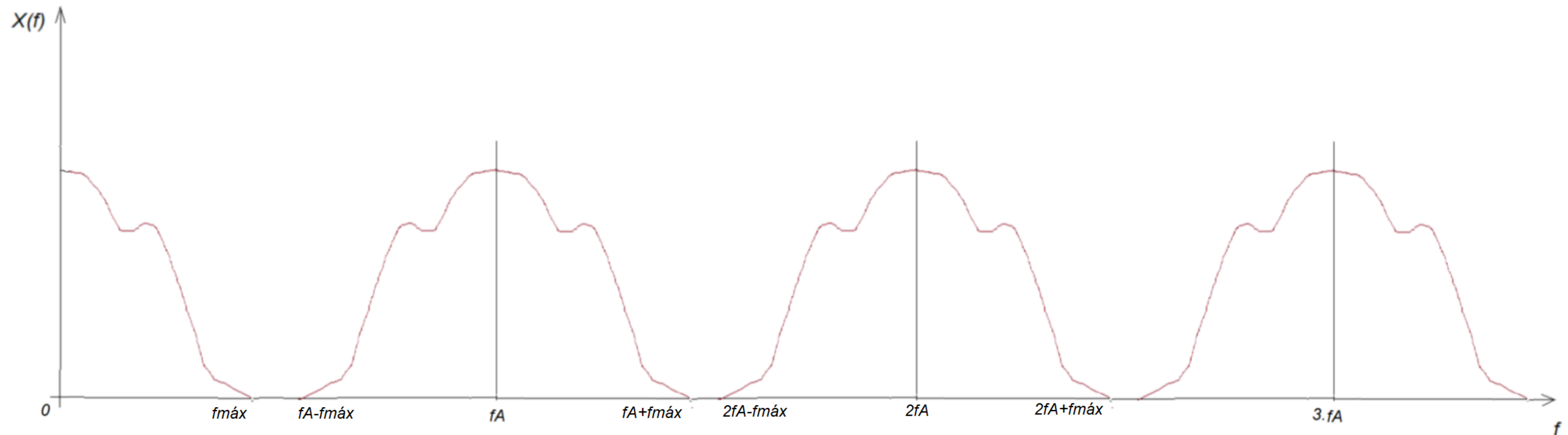
O sinal amostrado  $x(n) = \{x(0), x(1), x(2), x(3), x(4), x(5), \dots\}$  – discreto no tempo





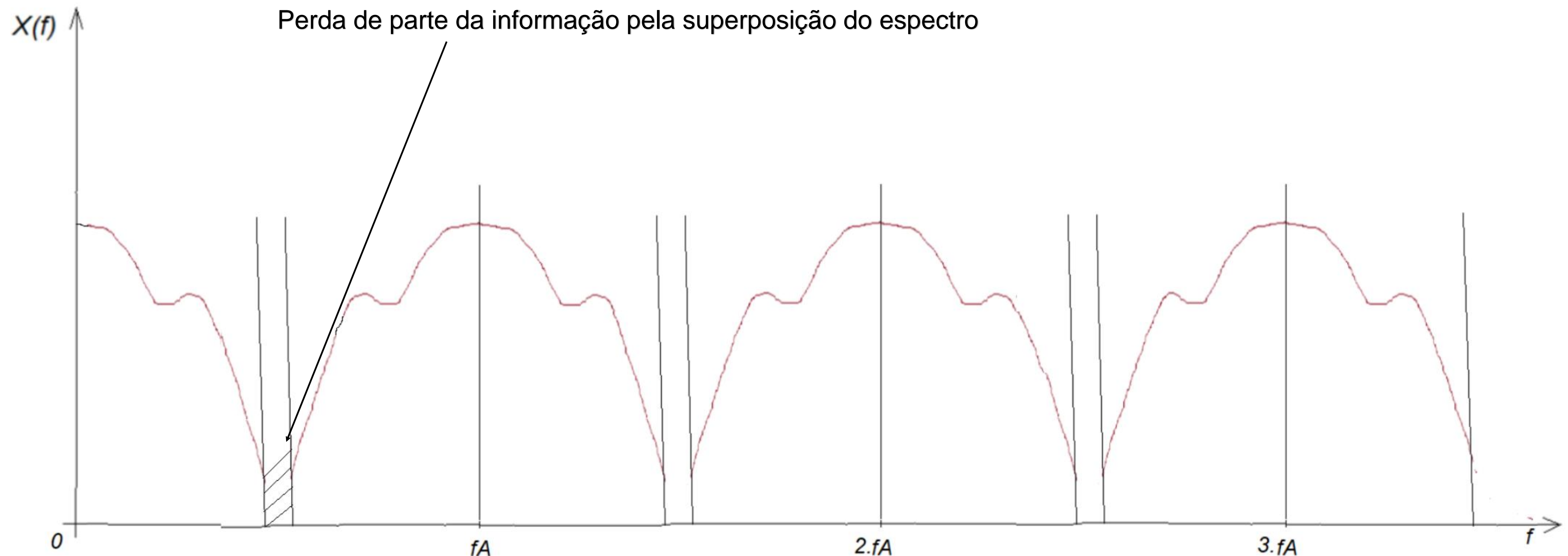
# Espectro do sinal amostrado

Pode-se demonstrar matematicamente que o sinal resultante da amostragem teria um **comportamento espectral** de

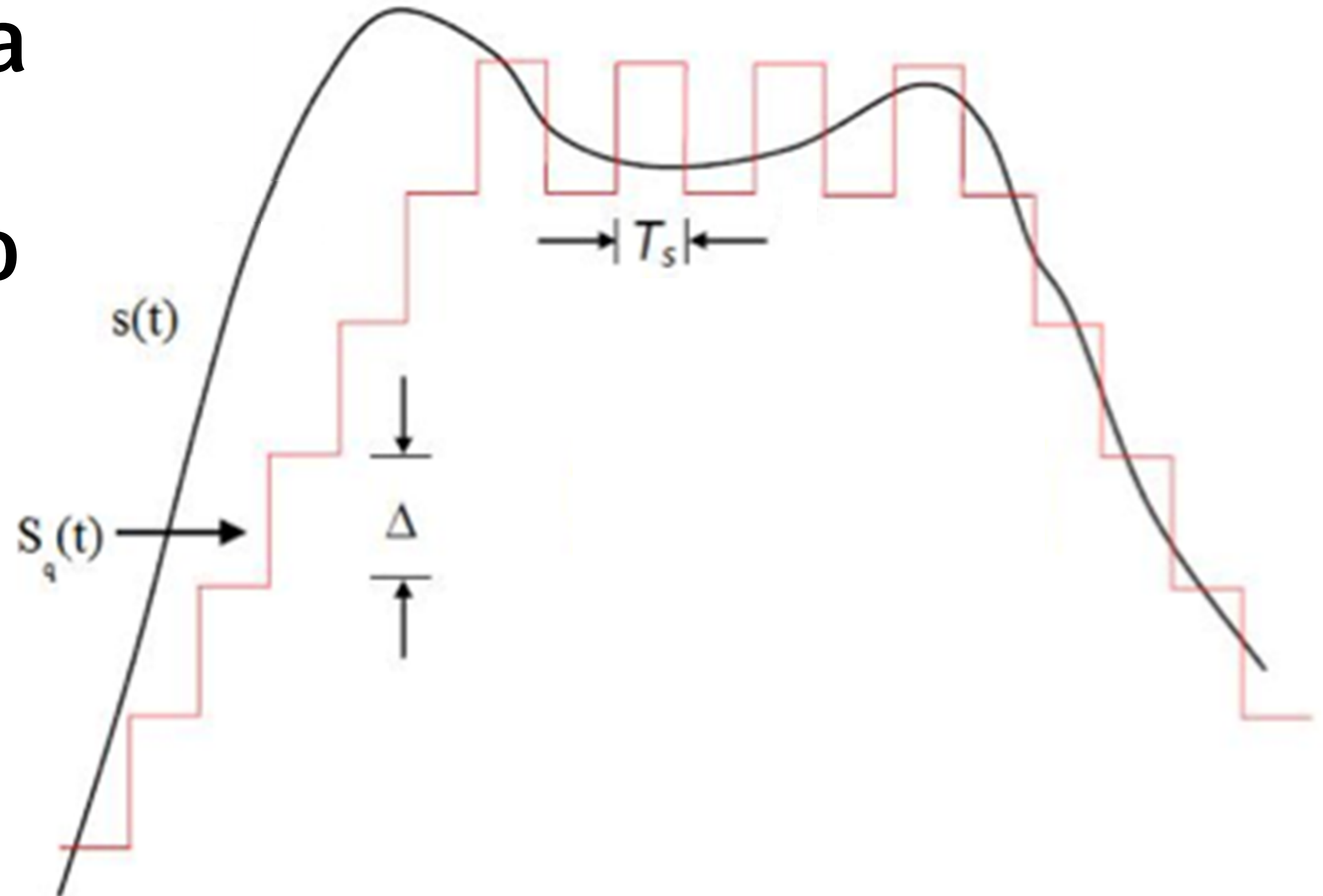


# Aliasing

Uma frequência de amostragem que não respeita a taxa de Nyquist pode levar a perda de informação do sinal amostrado



# O problema da digitalização: a quantização escalar

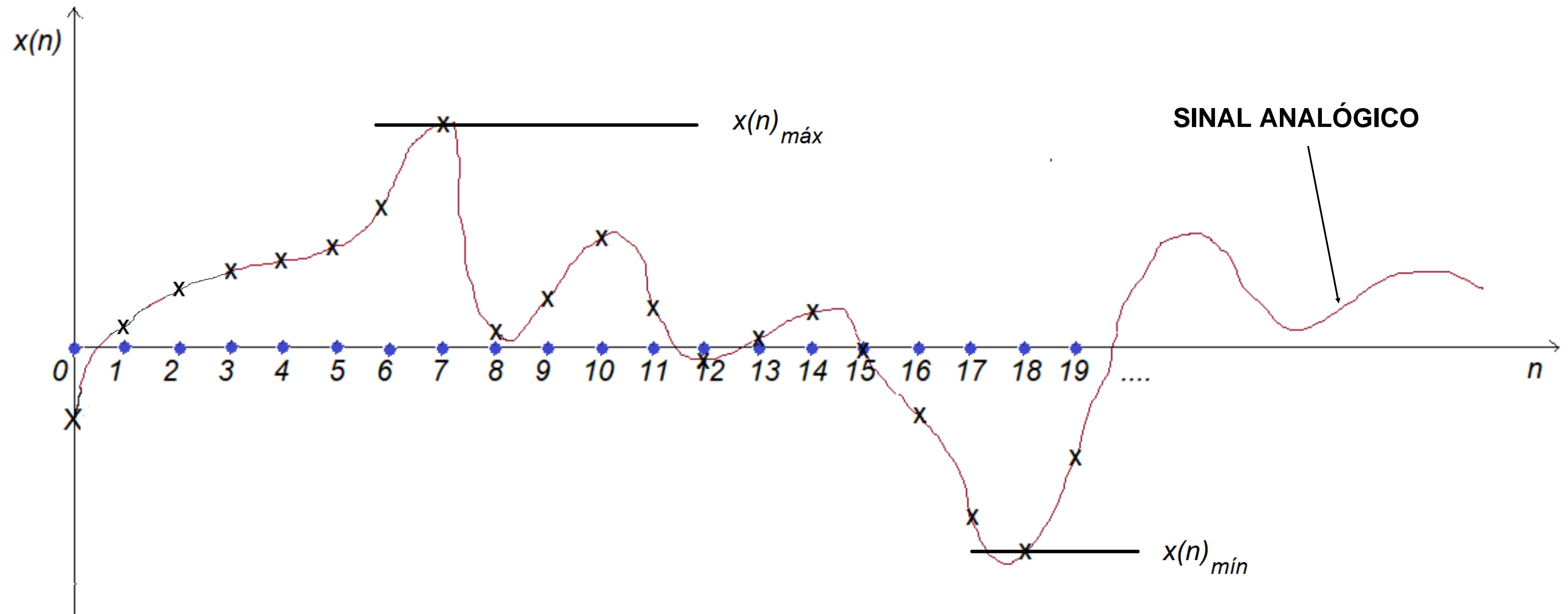




# A função de quantização

- A função de quantização,  $q(x)$ , é o valor para o qual o sinal amostrado,  $x(n)$ , será aproximado.
- O sinal amostrado  $x(n)$ , possui um valor pico-a-pico do sinal que pode ser calculado por  $x_{pp} = x(n)_{máx} - x(n)_{mín}$
- Considerando que sejam usados  $L$  níveis de quantização, o degrau de quantização ( $\Delta$ ) é definido por  $\Delta = \frac{x_{pp}}{L-1}$
- A função  $q(x)$  aproxima  $x(n)$  a um dos possíveis níveis.

# A função de quantização



# A função de quantização

- O ruído ou erro de quantização consiste na diferença entre o sinal de entrada no quantizador e o sinal na saída  $d(n) = x(n) - q[x(n)]$ , onde  $q(x)$  representa a função de quantização.
- A razão sinal/ruído de quantização, em dB, é dada por  $SQNR = 10 \log \frac{\sum_n x^2(n)}{\sum_n d^2(n)}$



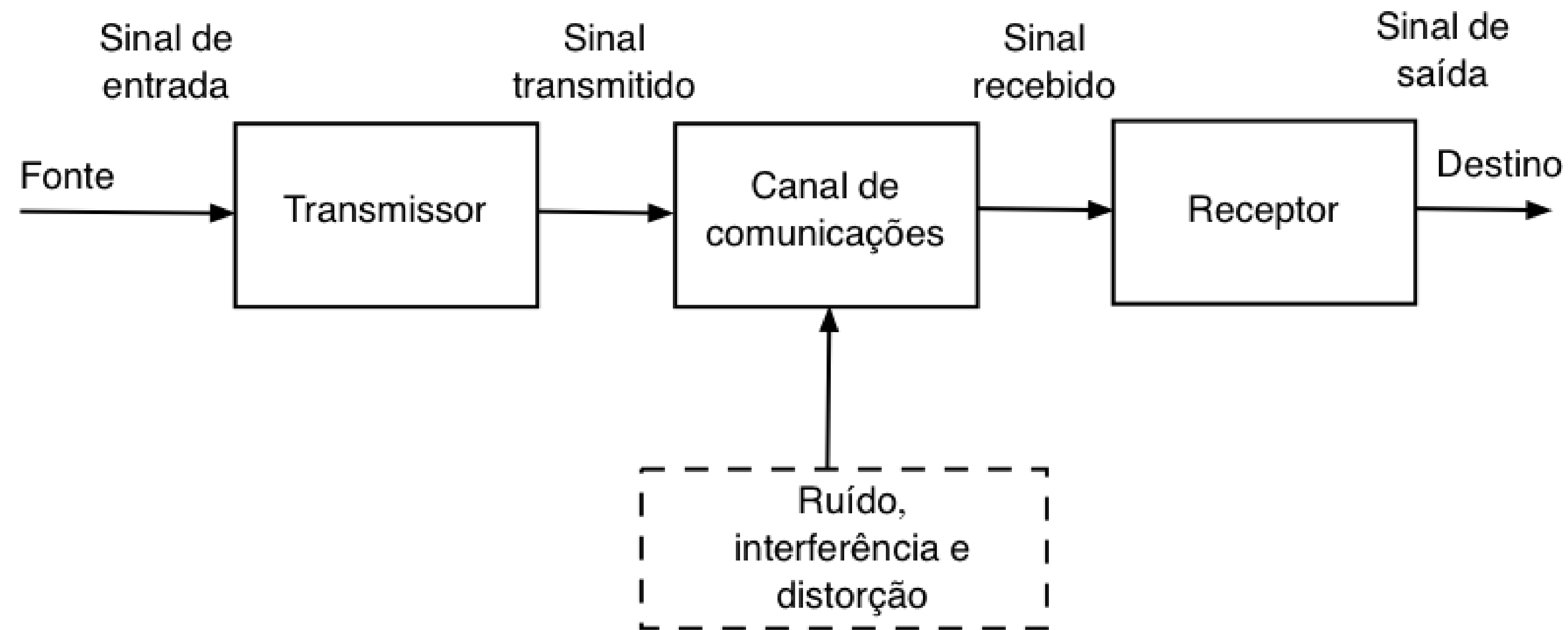
# A função de quantização

- Existem vários algoritmos para implementar a quantização buscando a eficiência do processo, considerando, por exemplo, a minimização do erro de ruído de quantização
- Alguns são recomendados pela ITU-T (União Internacional de Telecomunicações)

# Modelo do sistema de comunicações

---

# Modelo do Sistema de Comunicações





# Elementos

- **Transmissor:** processa o sinal de entrada para produzir o sinal transmitido, que deve ser **condicionado** para o canal de comunicações
- **Canal de comunicações:** meio elétrico que estabelece a ponte entre a **fonte** e o **destino**. Pode ser um par trançado, cabo coaxial ou o **espaço aéreo** – comunicações móveis
- **Efeitos indesejados** que modificam o sinal<sup>(\*)</sup>: (i) **atenuação** ; (ii) **distorção**; (iii) **interferência** e (iv) **ruído**.  
  
(\*) Embora a contaminação possa ocorrer em qualquer ponto, a convenção padrão é modelar esses efeitos no canal de comunicações.
- **Receptor:** opera sobre o sinal recebido, em preparação para entregar o sinal ao transdutor de saída.

# Efeitos indesejados sobre o sinal transmitido

- **Atenuação:** redução da potência do sinal.
- **Distorção:** perturbação causada pela **resposta imperfeita** do sistema em relação ao sinal desejado.
- **Interferência:** **contaminação** por sinais externos provocada por fontes humanas – outros transmissores, linhas de potência e maquinaria etc. Interferência quase sempre ocorre em **sistemas de radiocomunicações** – ou seja, que utilizam a transmissão pelo espaço.
- **Ruídos:** sinais elétricos **aleatórios e imprevisíveis** produzidos por processos naturais internos e externos ao sistema. O ruído constitui uma **limitação fundamental** do sistema.

# Resposta do canal

- A função de transferência ou resposta do canal,  $H(f)$ , reflete as características do canal e se relaciona com o sinal transmitido  $X(f)$  por

$$H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)}$$

, onde  $Y(f)$  representa o sinal recebido.

- No domínio do tempo,  $y(t) = x(t) * h(t)$ , onde o operador  $*$  representa a operação chamada de **convolução**,  $h(t)$  representa a resposta do canal.

# Resposta do canal

- A relação entre os sinais de transmitido e recebido  $Y(f)/X(f)$  permite interpretar a função de transferência como o **ganho** ( $G$ ) do sinal proporcionado pelo canal.
- O ganho pode ser analisado em valores absolutos em **decibéis (dB)**, dado por

$$H_{dB} = G_{dB} = 10 \log[H(f) \cdot H^*(f)]$$



# Limitações fundamentais

- As limitações fundamentais são **inerentes ao sinal** que transporta a mensagem e **ao canal** de comunicações.
- **Largura de banda:** limitação do canal para acomodar as variações do sinal transmitido com tempo, ou seja, acomodar o espectro do sinal. O canal de comunicações possui uma **largura de banda limitada  $B$** , que limita a variação do sinal.
- **Ruído:** O movimento aleatório das cargas elétricas gera uma corrente ou tensão aleatórias, chamadas de **ruído térmico**. A medida do ruído em relação à informação é definida pela **razão sinal ruído  $S/N$** . A  $S/N$  muitas vezes é estabelecida também em decibéis.

# Limitações fundamentais

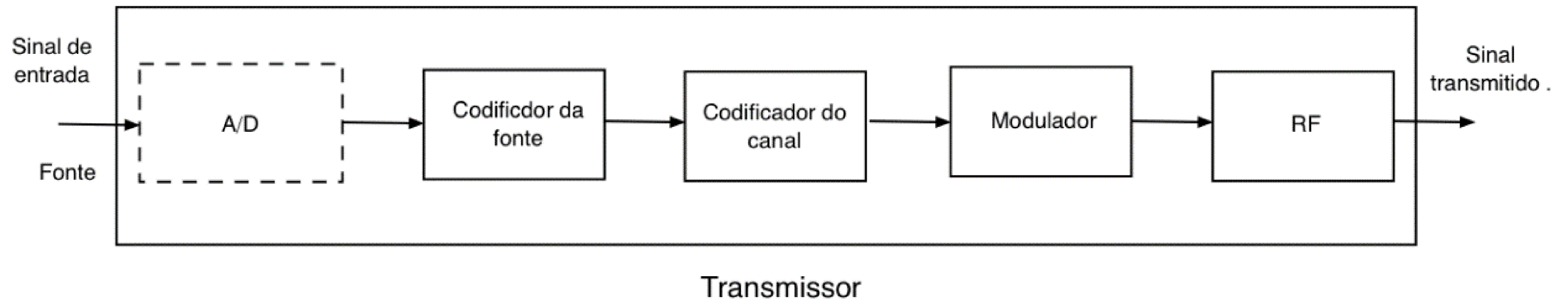
- A taxa de transmissão da informação não pode exceder a capacidade do canal,  $C$ , dada por

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

# Modelo do transmissor

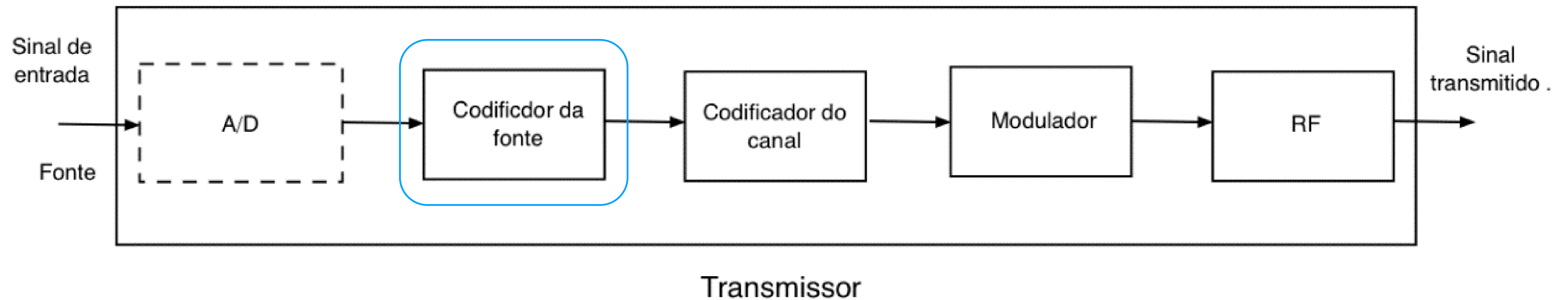
---

# Transmissor





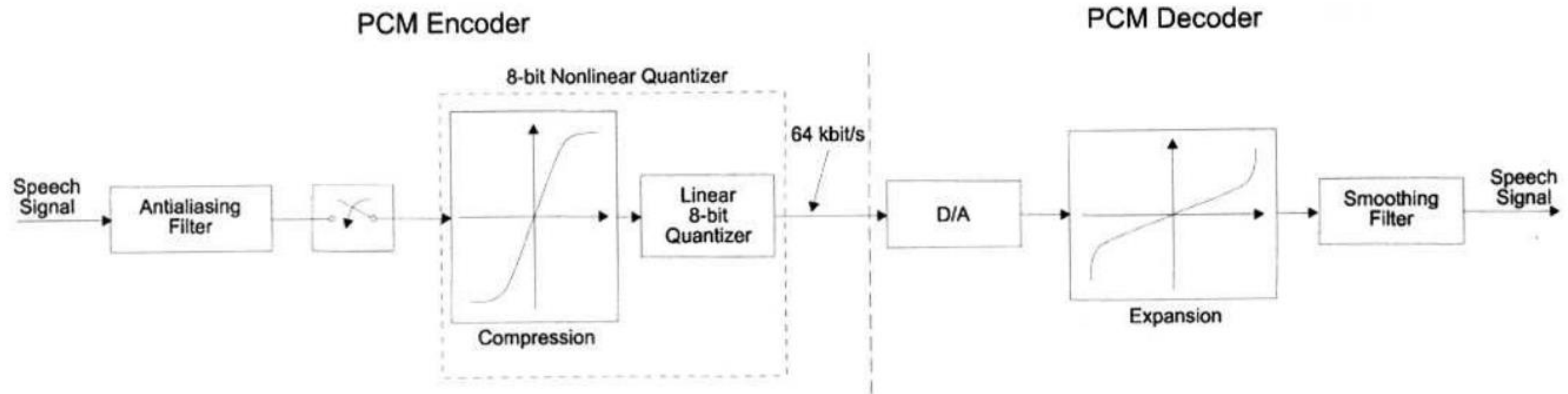
# Transmissor



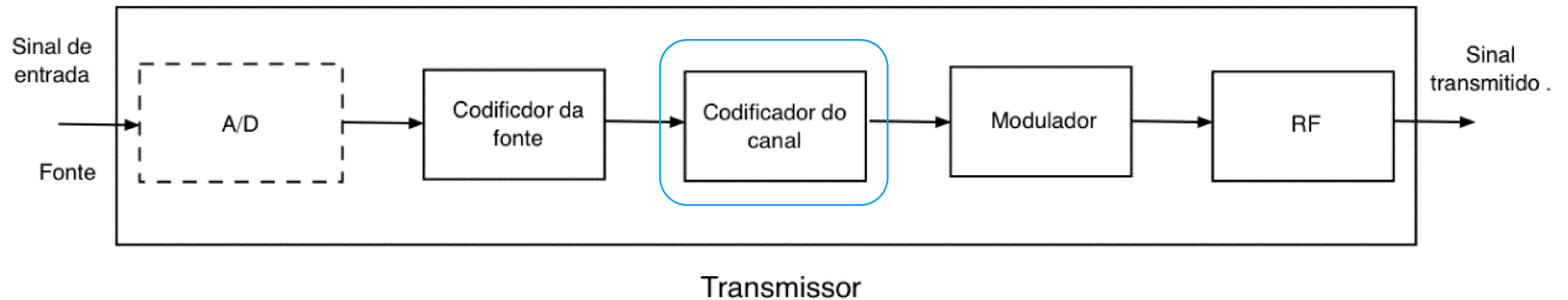
# Codificador da fonte

- Para a transmissão ser eficiente e confiável o transmissor precisa ainda realizar operações de **codificação do canal, codificador da fonte e modulação**.
- A **codificação da fonte** é uma operação de processamento de símbolos para melhorar a comunicação quando a informação é digital ou pode ser aproximada na forma de símbolos discretos. Transforma uma mensagem digital em uma nova sequência de símbolos.

# Codificador de fonte – exemplo: *PCM (Pulse Code Modulation)*



# Transmissor

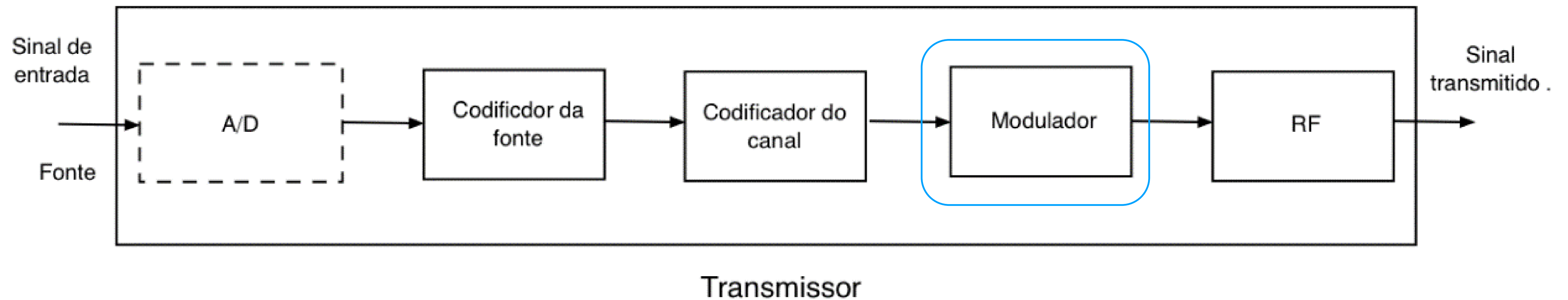




# Codificador de canal

- A codificação de canal é o processo através do qual o transmissor adiciona **redundância controlada** à informação de modo a permitir a **detecção e a correção** de erros.
- Dependendo do número de bits adicionados, os códigos de canal podem permitir a correção de erros na transmissão ou somente a detecção dos erros ocorridos.
- Existem duas grandes famílias de códigos detetores e corretores de erros: os **códigos de bloco** e os **convolucionais**.

# Transmissor



# 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.
- As características espectrais do sinal modulado devem **minimizar a distorção dos sinais transmitidos por usuários na vizinhança do espectro**. Devem também **garantir o maior número possível de usuários na faixa de frequência atribuída**.

# Modulação

- Existem vários benefícios para a comunicação quando o transmissor modula a mensagem: (1) assegurar a transmissão eficiente; (2) superar as limitações de hardware; (3) reduzir ruído e interferência; (4) definir a frequência; (5) multiplexação de sinais.
- Assegurar transmissão eficiente: a transmissão depende de antenas cujas **dimensões** precisam ter pelo menos **1/10 do comprimento de onda do sinal**. O comprimento de onda é definido pela **relação  $\lambda = c/f$** , onde  $c$  é a velocidade da luz no vácuo (300.000 km/seg) e  $f$  é a frequência de transmissão.



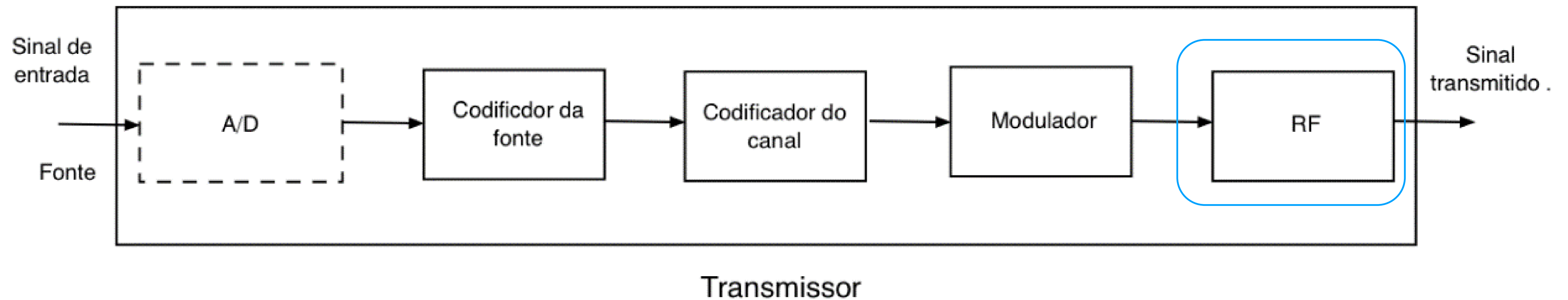
# Modulação

- Superar as limitações de hardware: a modulação permite que o projetista posicione o sinal em uma frequência que evita as limitações de hardware. Uma questão particular se refere à largura de **banda fracional**, definida como a banda absoluta do sinal dividida pelo centro da frequência,  $\Delta f = B/f_c$ .
- Os custos e as complicações de implementação são minimizados se a **banda fracional** é colocada entre 1 a 10%.

# Modulação

- Superar as limitações de hardware: a modulação permite que o projetista posicione o sinal que evita as limitações de hardware. Uma questão particular se refere à largura de **banda fracional**, definida como a banda absoluta dividida pelo centro da frequência,  $\Delta f = B/f_c$ .
- Os custos e as complicações de implementação são minimizados se a **banda fracional** é colocada entre 1 a 10%.

# Transmissor



# RF

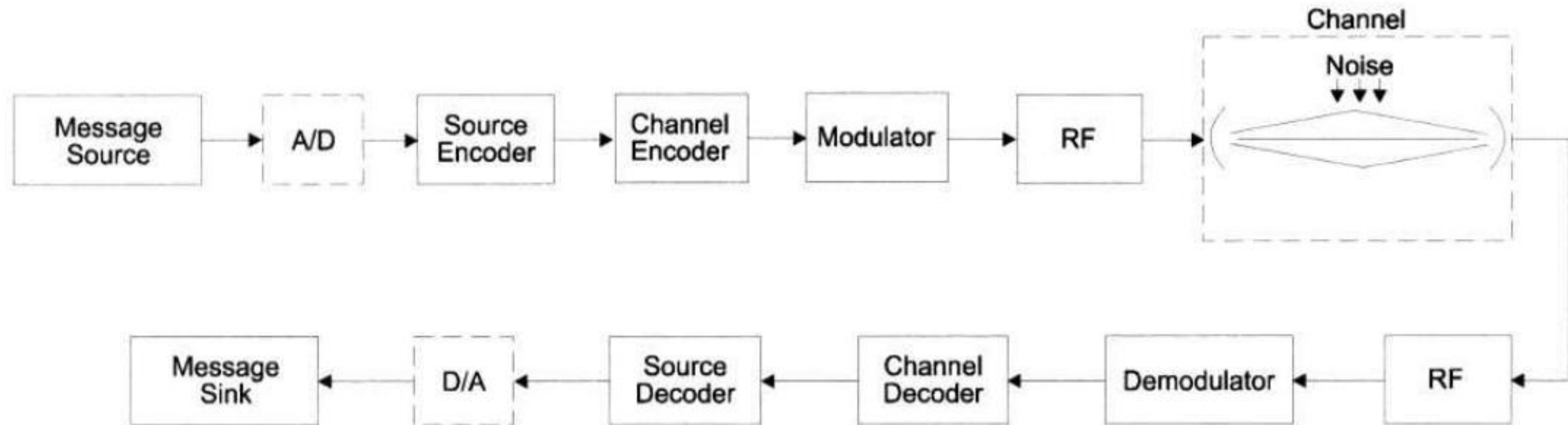
- O módulo de RF opera na faixa de frequências de radiocomunicações e **amplifica** o sinal de rádio ao nível requerido.
- A largura de banda do sinal depende da modulação selecionada e o **método de acesso múltiplo aplicado**.
- Em sistemas de comunicação móvel, o transmissor emite o sinal para o espaço usando a antena. As características da transmissão dependem fortemente das **antenas (transmissão e recepção)**, em particular de sua **diretividade e ganho**. Os parâmetros das antenas determinam o **alcance** do sistema e seu **desempenho**.



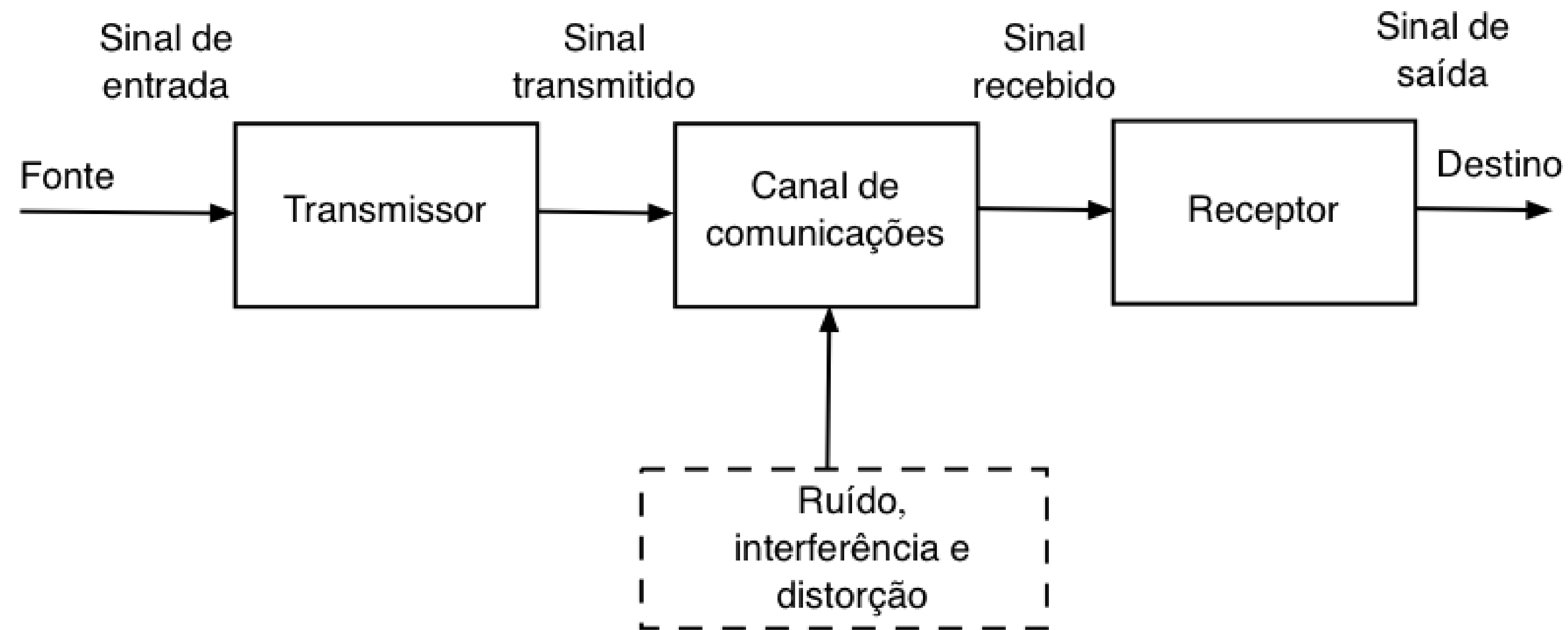
# Modelo detalhado do sistema de comunicações

---

# Modelo detalhado do Sistema de Comunicações

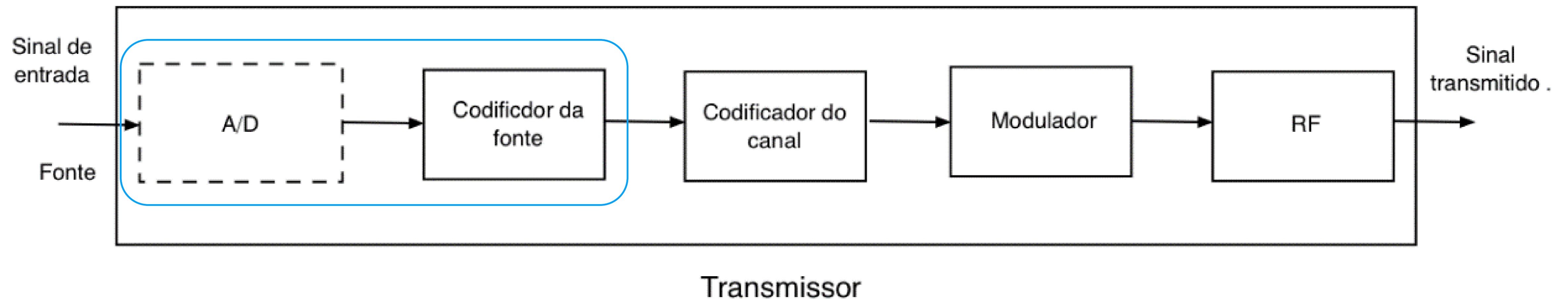


# Modelo do Sistema de Comunicações



# Modelo do transmissor

# Transmissor

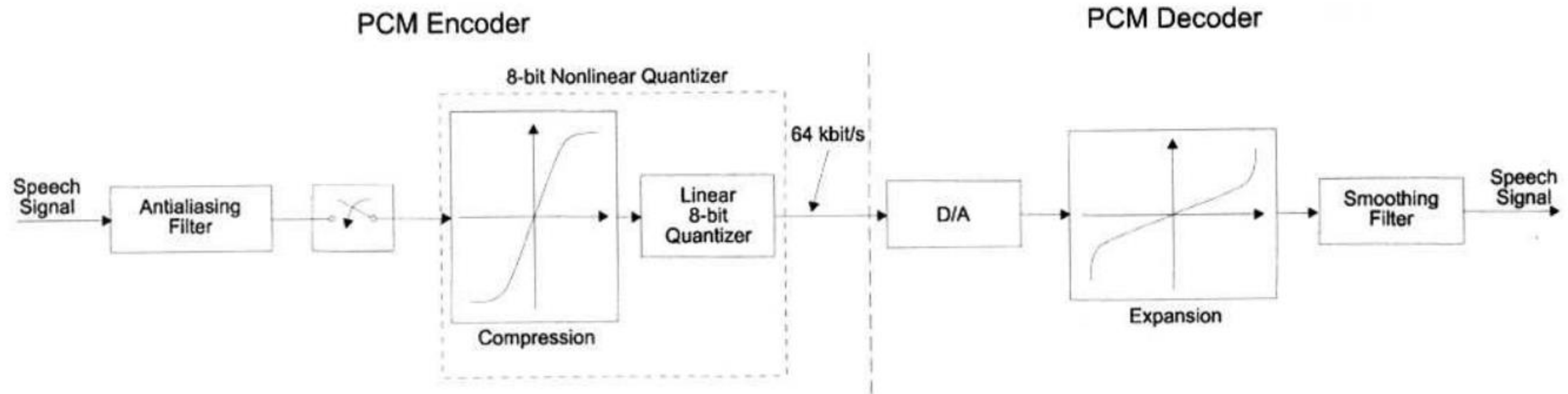




# Sinais analógicos de interesse para comunicações: espectro do sinal de voz

- Para aplicações em telefonia
  - O sinal de voz é quantizado para **256 níveis** distintos, logo exigindo um **código de 8 bits** ( $2^8 = 256$ )
  - Considerando  $f_A$  e o número de bits do código, é necessário uma **banda em aplicações de telefonia de 64 kHz para transmissão de sinal de voz**

# Codificador de fonte – exemplo: *PCM (Pulse Code Modulation)*



# Codificador da fonte

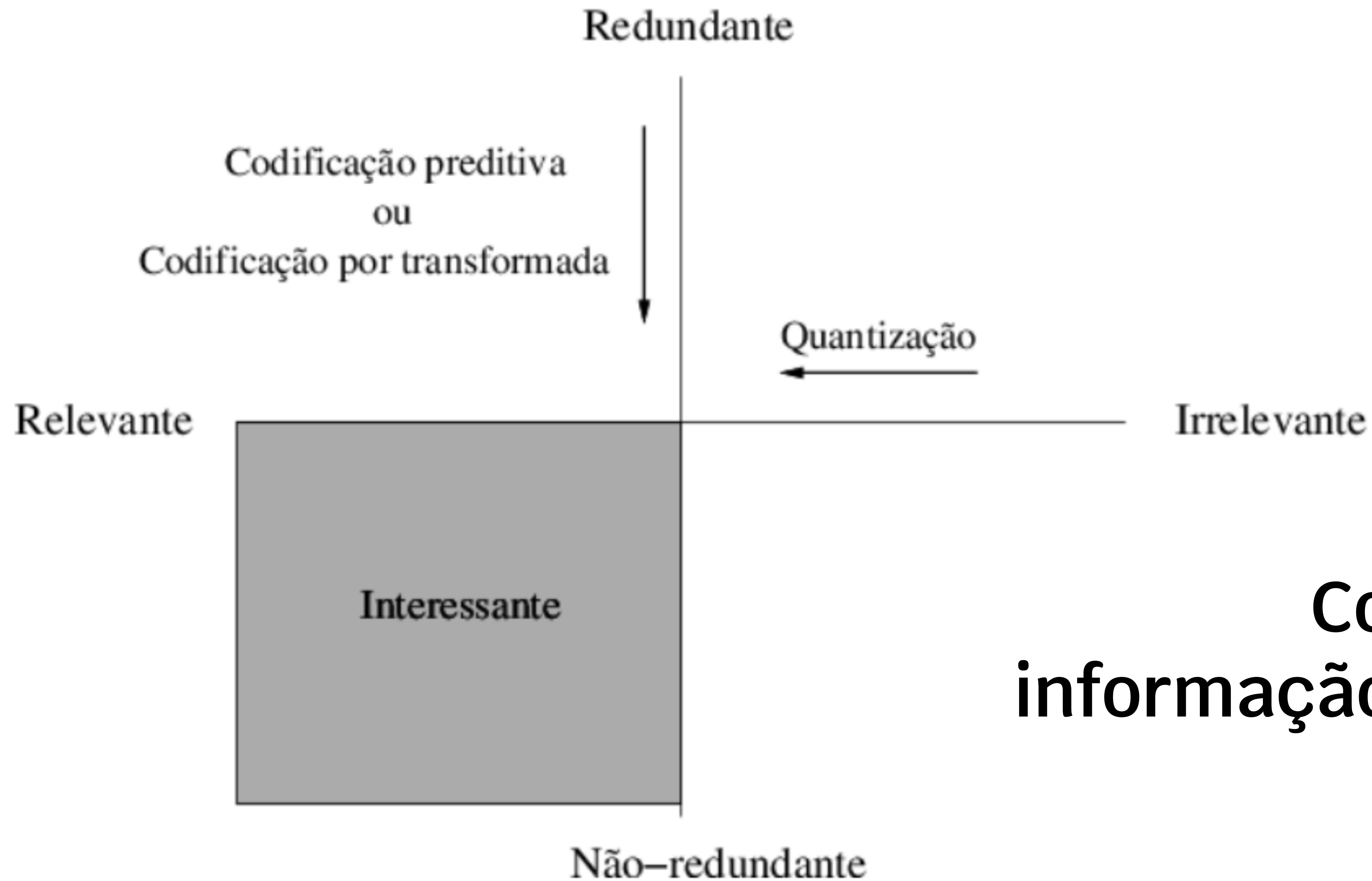
# Codificador da fonte

- **Processamento de símbolos para melhorar a comunicação quando a informação é digital ou pode ser aproximada na forma de símbolos discretos.**
- **Transforma uma mensagem digital em uma nova sequência de símbolos.**

# Compressão de sinais

Na codificação da fonte se realiza a compressão de sinais, cujo objetivo fundamental é reduzir o número de bits necessários para representar adequadamente os sinais a serem transmitidos





**Compressão:  
informação dos sinais**

# Compressão informação dos sinais

- Componente relevante – transmitida
- Componente irrelevante – reduzida por meio da **quantização**
- Componente não redundante – **transmitida**
- Componente redundante, reduzida por meio de **técnicas de predição e transformação do sinal**

# Compressão desempenho

- O problema geral da compressão é **minimizar a taxa de bits na representação digital do sinal**, mantendo os níveis requeridos de:
  1. Qualidade do sinal reconstruído
  2. Complexidade da implementação
  3. Retardo da comunicação

# Qualidade do sinal reconstruído

- Medidas de qualidade: subjetiva (qualitativas) ou objetiva (definidas matemática e estatisticamente)
- Medidas de qualidade objetiva:
  - Erro instantâneo,  $e(n)$ ;
  - Erro médio ( $ME$ );
  - Erro médio quadrático ( $MSE$ ); e
  - razão sinal-ruído de erro ( $SENR$ )

# Qualidade do sinal reconstruído

- Seja um sinal  $x(n)$  e o sinal processado  $y(n)$ , reconstruído pelo receptor, o erro em um instante  $n$  é dado por  $e(n) = x(n) - y(n)$
- O erro médio é dado por  $ME = \frac{1}{N} \sum_n x(n) - y(n)$
- O erro médio quadrático é dado por  $MSE = \frac{1}{N} \sum_n e^2(n)$
- A energia no sinal de erro é dada por  $E_e = \sum_n e^2(n) = \sum_n [x(n) - y(n)]^2$



# Qualidade do sinal reconstruído

- A razão sinal/ruído de erro, em dB, é dada por  $SENR = 10 \log \frac{\sum_n x^2(n)}{\sum_n e^2(n)}$

# Complexidade do algoritmo de codificação

- **Número de instruções na unidade de tempo**, normalmente medida em MIPS, e requisitos de **espaço de armazenamento** em memória requeridos para processamento do algoritmo.
- **Tamanho físico, custo e consumo de potência** do codificador, decodificador ou *codec* (codificador+decodificador)

# Retardo da comunicação

- O retardo ou atraso decorrente do processamento pelo *codec*
- O impacto do atraso sobre a comunicação depende da aplicação. Algumas aplicações admitem **limites** mais rigorosos de atraso.



IBMEC.BR

 /IBMEC

 IBMEC

 @IBMEC\_OFICIAL

 @IBMEC

 **ibmec**