

*UNIOESTE*  
*Ciência da Computação*

*Sistemas Digitais*  
*Circuitos Sequenciais*

*Prof. Jorge Habib El Khouri*  
*Prof. Antonio Marcos Hachisuca*

2020/2021

# Referências Bibliográficas

1. *Digital Fundamentals*, Thomas L. Floyd; Editora: Pearson; Edição: 11; Ano: 2015;
2. *Sistemas Digitais Princípios e Aplicações*, Ronald J. Tocci; Editora: Pearson; Edição: 11; Ano: 2011;
3. *Computer Organization and Design*, David A. Patterson; Editora: Elsevier; Edição: 1; Ano: 2017
4. *Digital Design: Principles and Practices*, John F. Wakerly; Editora: Pearson; Edição: 5; Ano: 2018;
5. *Guide to Assembly Language Programming in Linux*, Sivarama P. Dandamudi; Editora: Springer; Edição: 1; Ano: 2005.
6. *Fundamentals of Logic Design*, Roth Jr, Charles H; Kinney, Larry L; Seventh Edition. Editora: Cengage Learning, Ano: 2013.

1. Revisão – Sistemas de Numeração
2. Revisão – Representação de Dados
3. Revisão – Operações com Binários
4. Álgebra Booleana
5. Simplificação de Expressões
6. Mapa de Karnaugh
7. Elementos Lógicos Universais
8. Circuitos Combinacionais
9. Circuitos Sequenciais

1. Latches
2. Flip-Flop
3. Registradores
4. Contadores
5. Máquina de Estados
6. Conversão de Sinais

# Circuitos Sequenciais

## Conversão de Sinais

- Introdução;
- Conversão Analógico-Digital;
- Conversão Digital-Analógico;
- Processamento Digital de Sinais;

# Circuitos Sequenciais

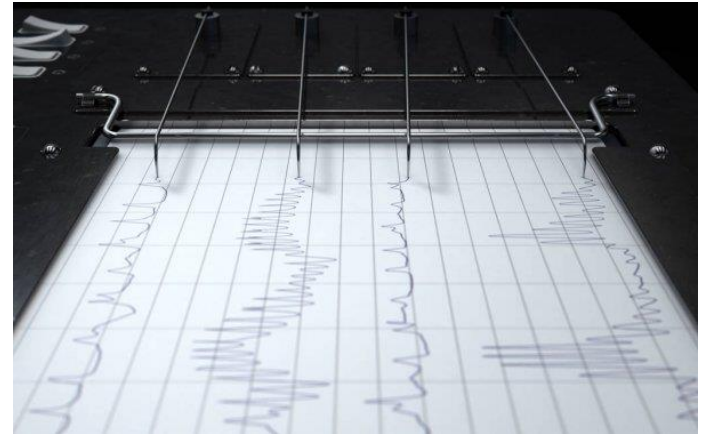
## Conversão de Sinais

- O processamento digital de sinais está presente em diversas aplicações;
- O que era restrito a equipamentos industriais e setores estratégicos, foi popularizando até alcançar dispositivos domésticos e pessoais;
- A Internet das Coisas (*IoT*) veio apenas confirmar o que já era uma tendência;
- A redução persistente do custo e do tamanho dos dispositivos tecnológicos ajudou a acelerar este processo;
- Para usufruir da flexibilidade e das indiscutíveis vantagens proporcionadas pela computação é mandatório que as informações e grandezas do mundo real, também denominadas grandezas analógicas, sejam convertidas para o padrão digital;

# Circuitos Sequenciais

## Conversão de Sinais

- Alguns exemplos de grandezas analógicas são: temperatura, tempo, pressão, distância, som, tensão elétrica e outros;
- Por muito tempo estas informações eram processadas analogicamente;
- As grandezas analógicas possuem natureza contínua, uma vez que os valores variam de forma ininterrupta no tempo;
- Cada aplicação demandava um equipamento específico para tratamento;



# Circuitos Sequenciais

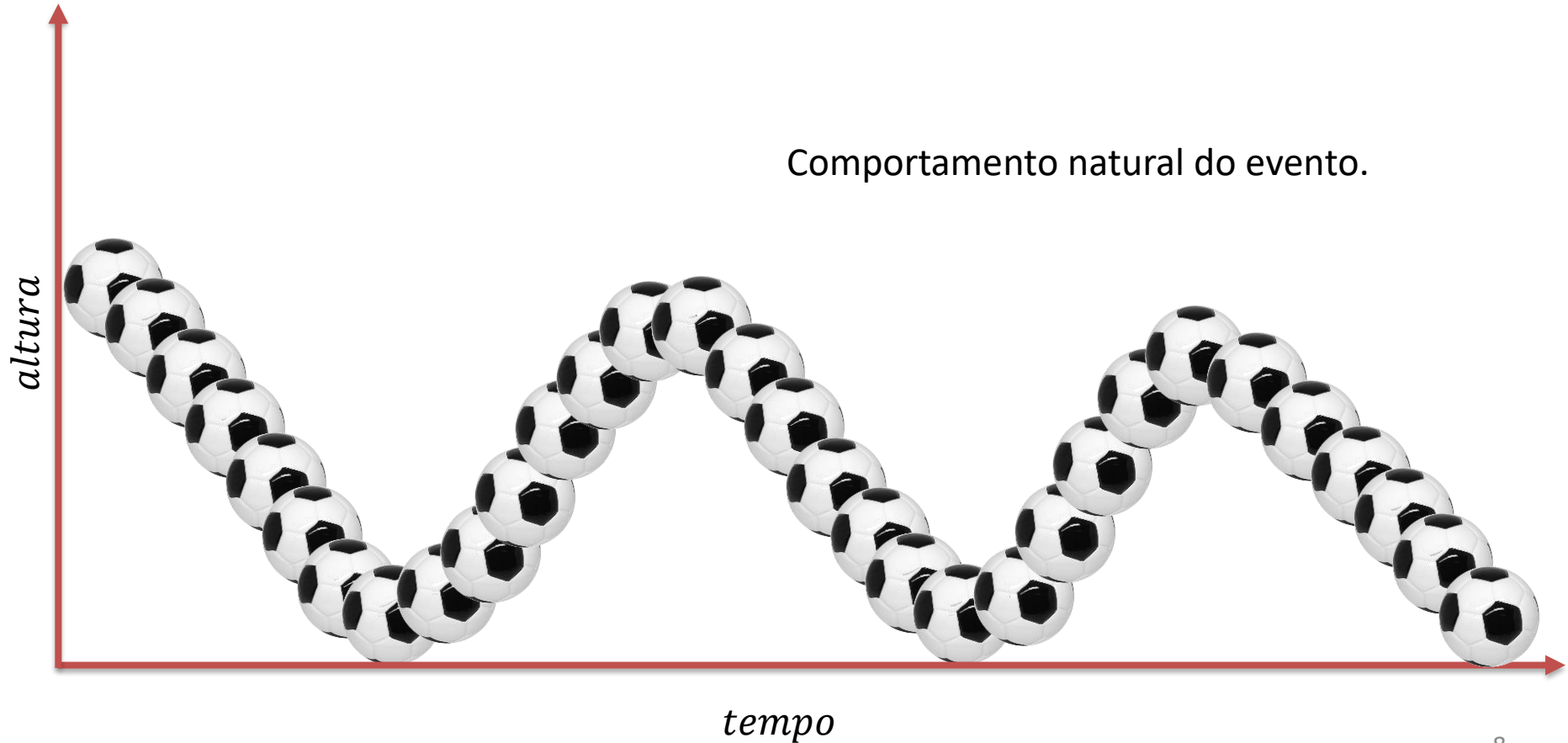
## Conversão de Sinais

- Para usufruir das vantagens do processamento computacional é necessário capturar a informação do mundo real (natureza analógica) e transformá-la em valor binário (digital);
- O exemplo que segue ilustra uma bola quicando e a respectiva captura da posição da bola ao longo do tempo;

# Circuitos Sequenciais

## Conversão de Sinais

Comportamento natural do evento.

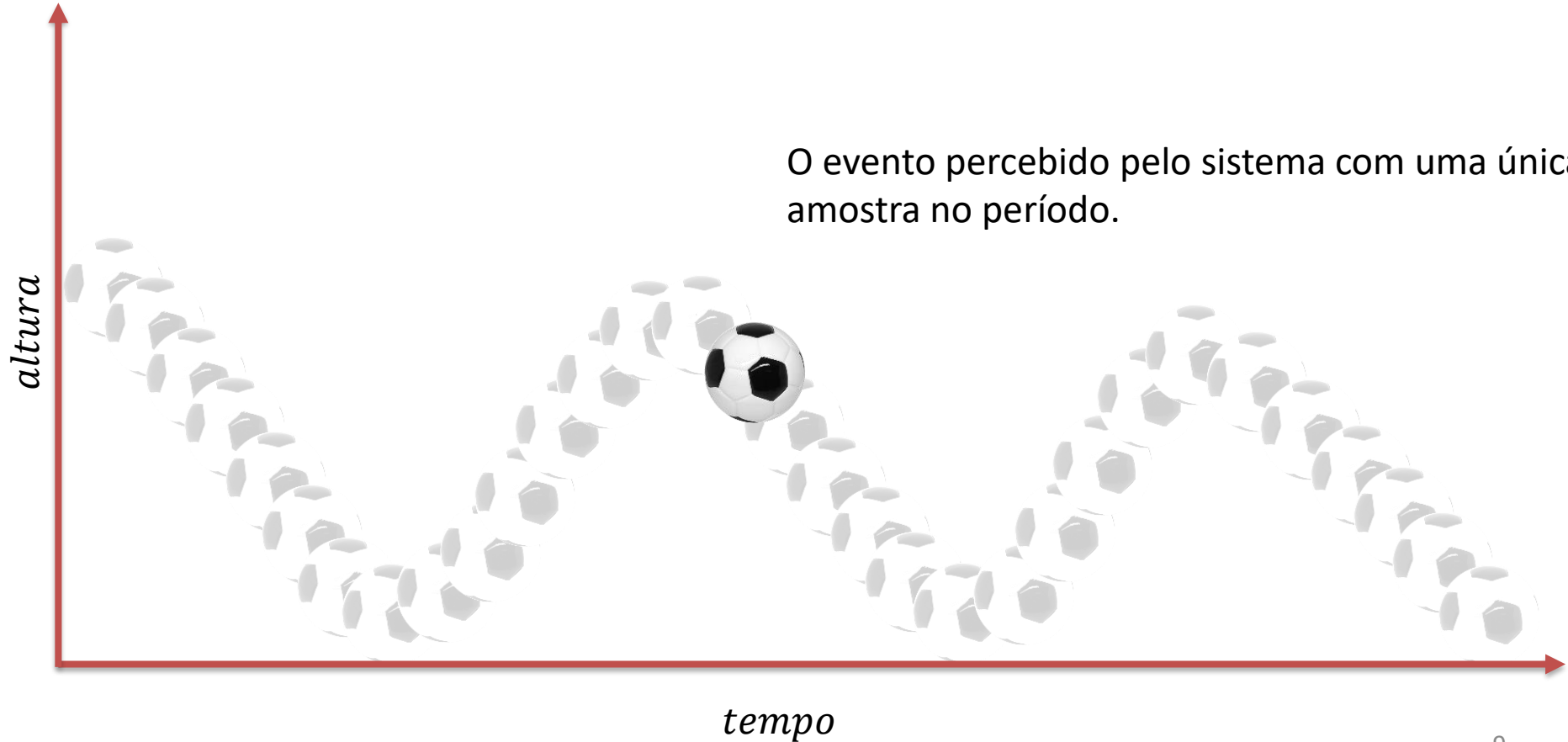




# Circuitos Sequenciais

## Conversão de Sinais

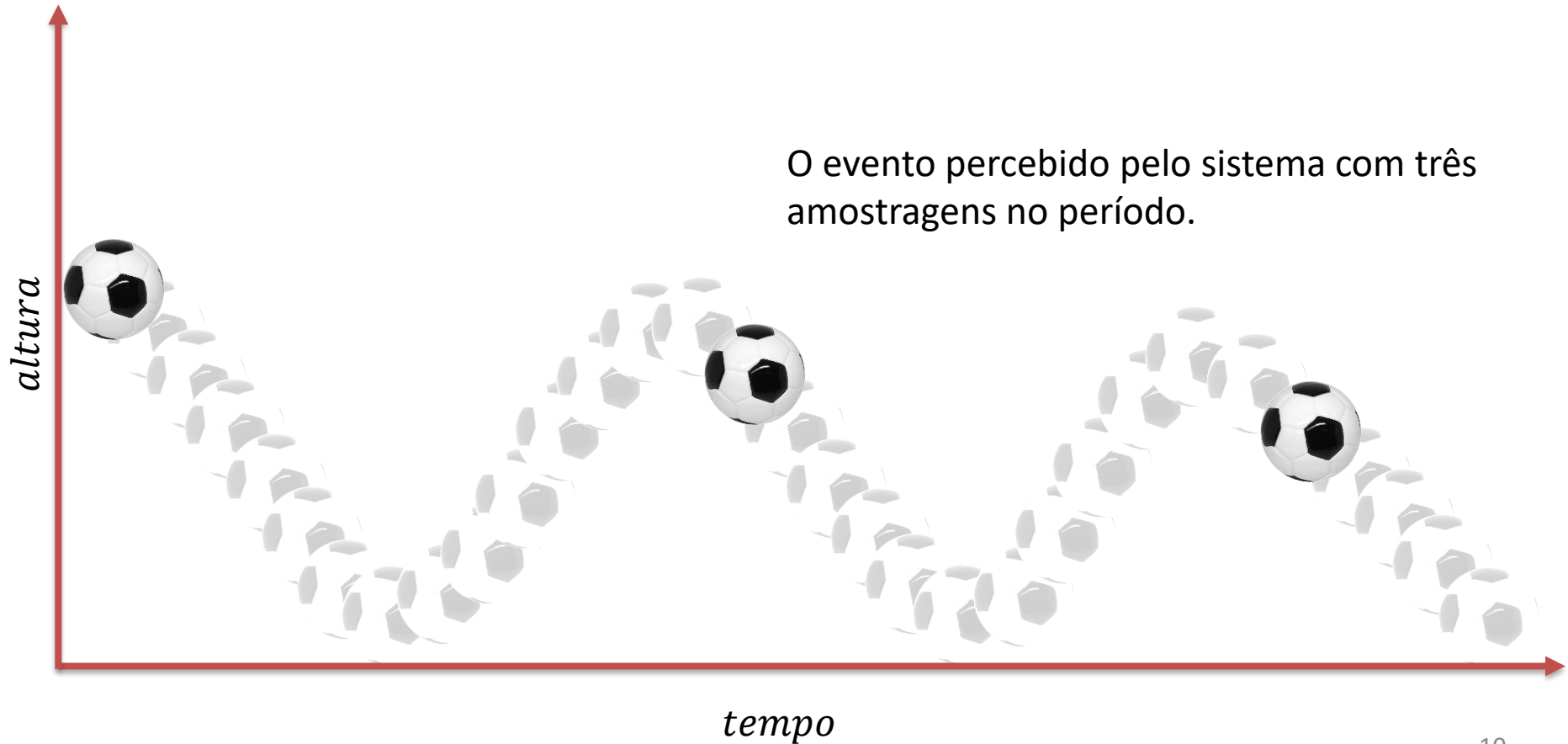
O evento percebido pelo sistema com uma única amostra no período.



# Circuitos Sequenciais

## Conversão de Sinais

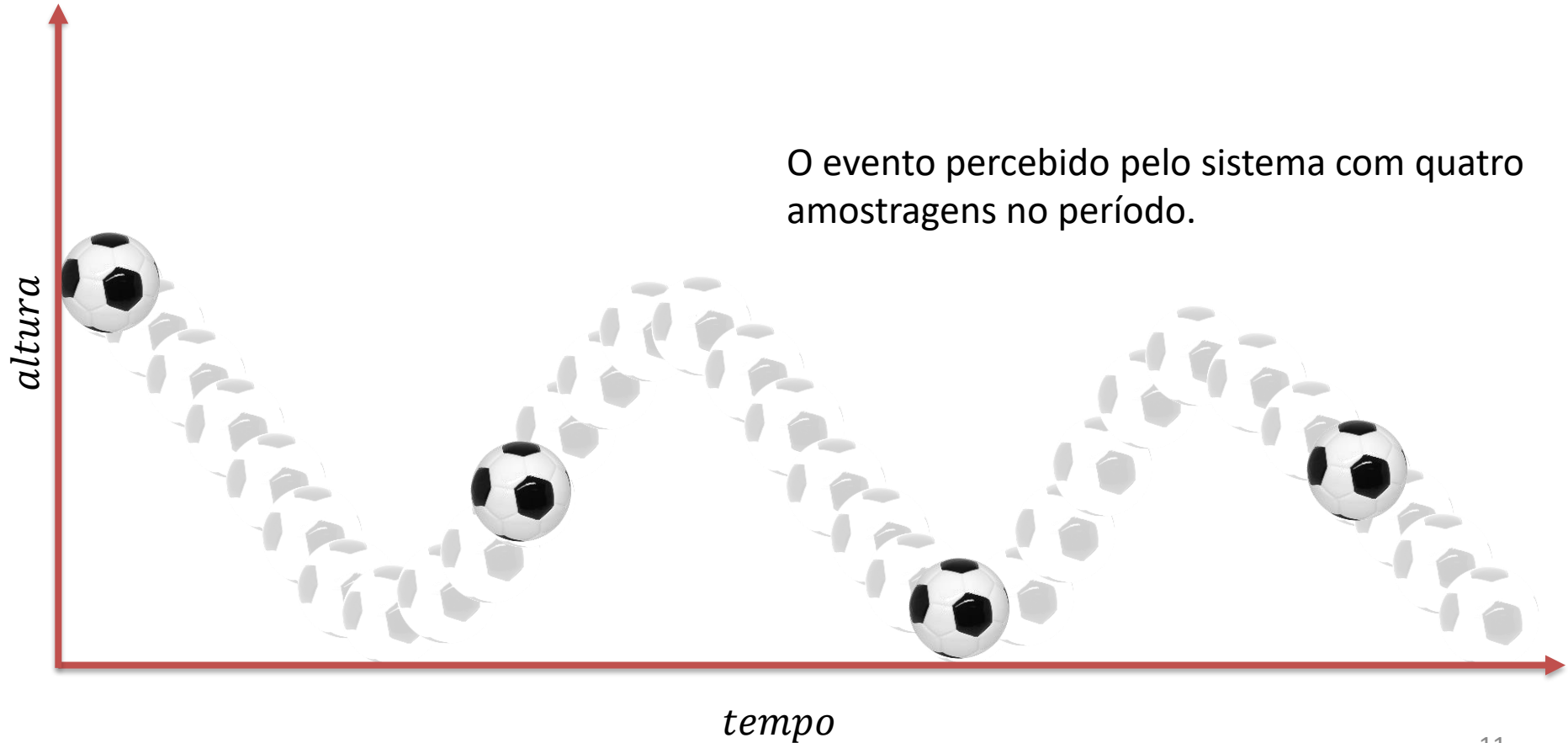
O evento percebido pelo sistema com três amostragens no período.



# Circuitos Sequenciais

## Conversão de Sinais

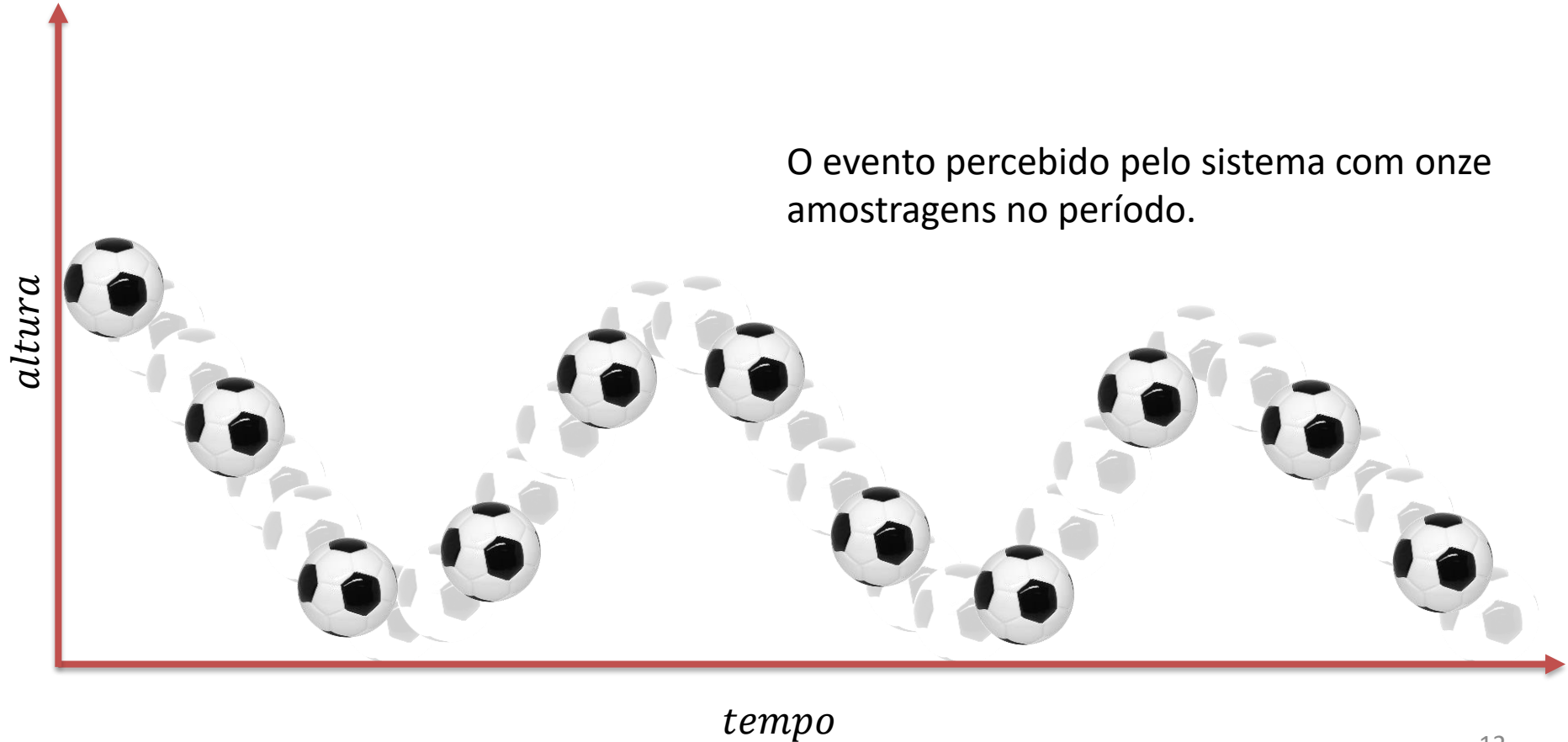
O evento percebido pelo sistema com quatro amostragens no período.



# Circuitos Sequenciais

## Conversão de Sinais

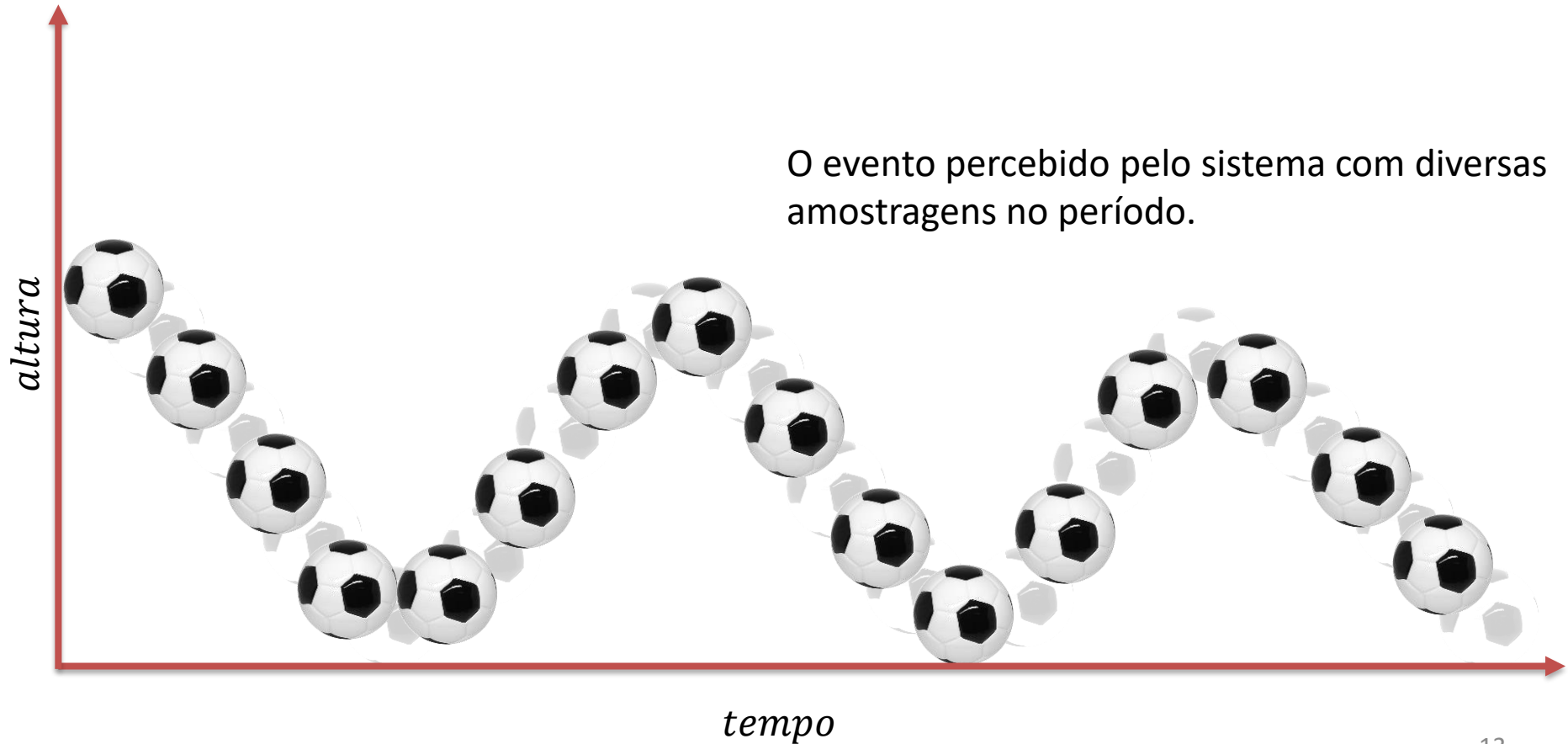
O evento percebido pelo sistema com onze amostragens no período.



# Circuitos Sequenciais

## Conversão de Sinais

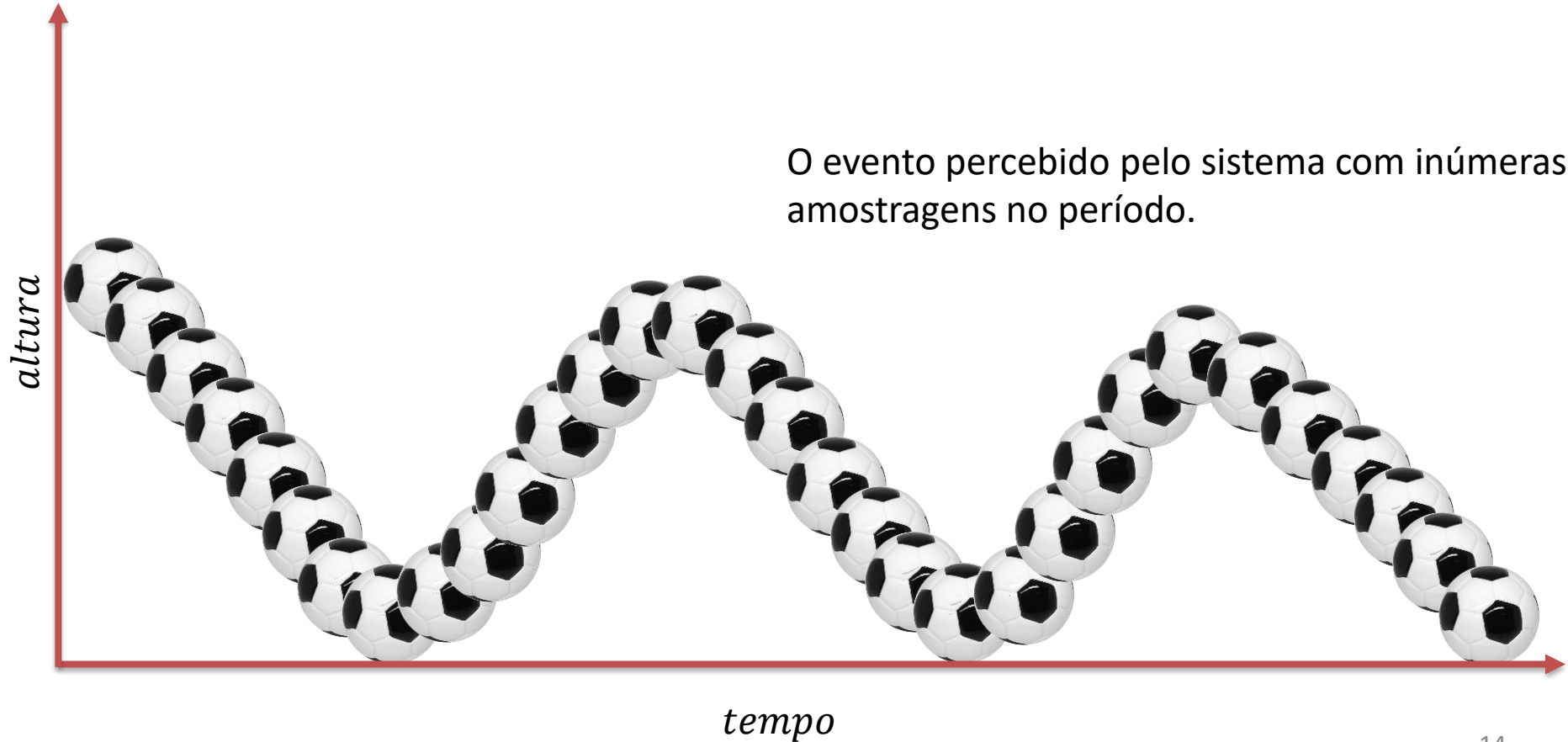
O evento percebido pelo sistema com diversas amostragens no período.



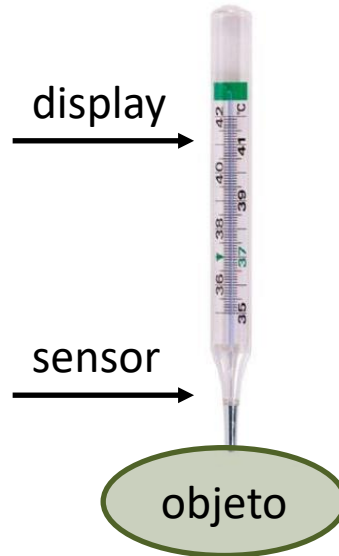
# Circuitos Sequenciais

## Conversão de Sinais

O evento percebido pelo sistema com inúmeras amostragens no período.



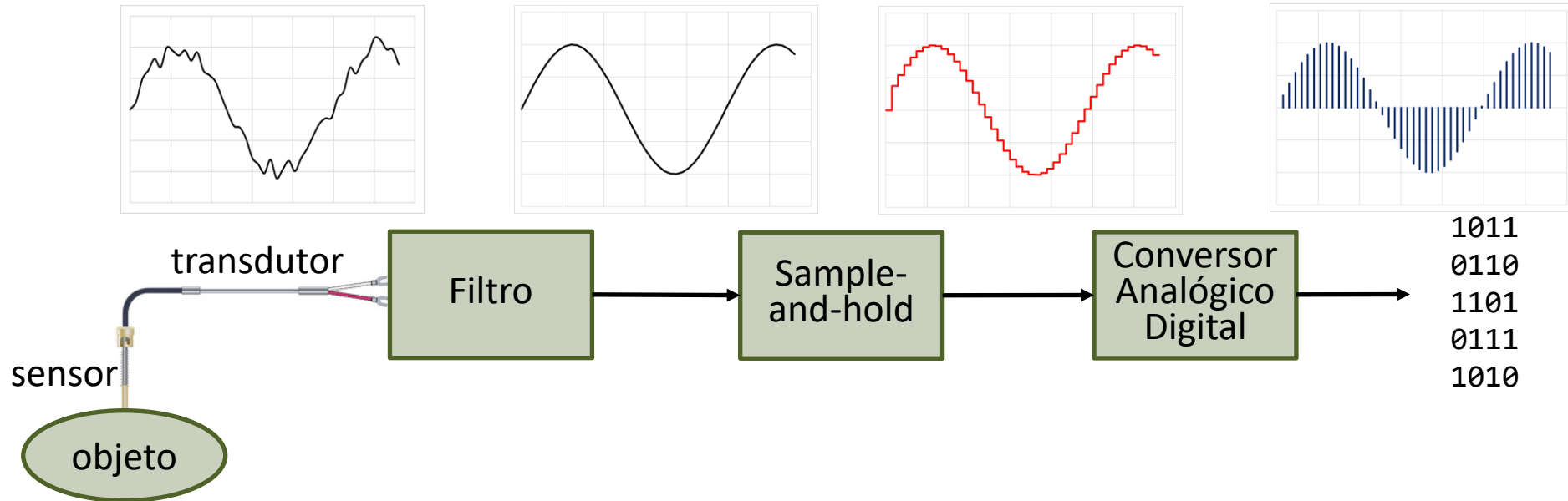
- Medição analógica simplificada versus o processo de conversão analógico digital:



# Circuitos Sequenciais

## Conversão de Sinais

- Medição analógica simplificada versus o processo de conversão analógico digital:





# Circuitos Sequenciais

## Conversão de Sinais



# Circuitos Sequenciais

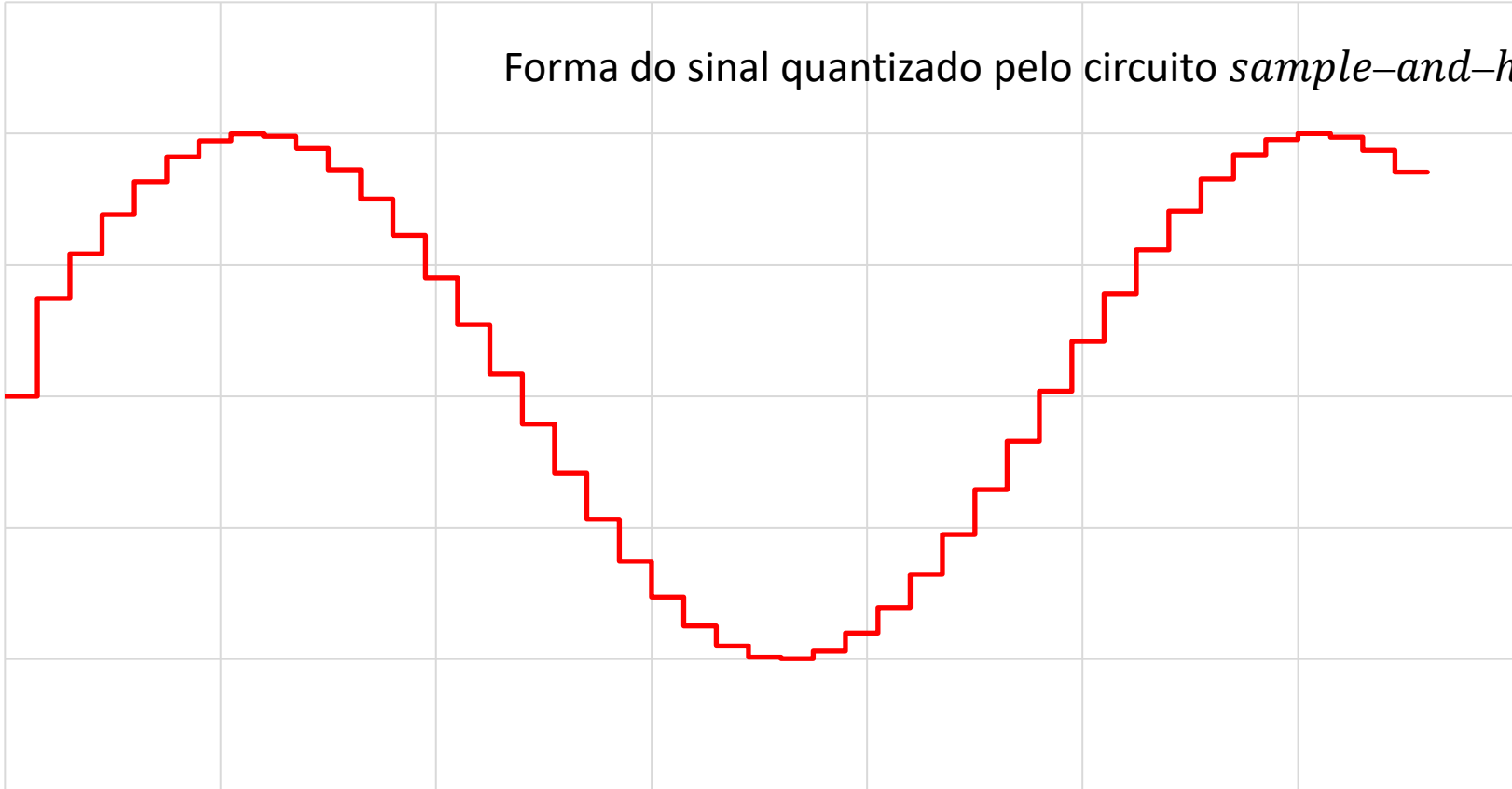
## Conversão de Sinais



# Circuitos Sequenciais

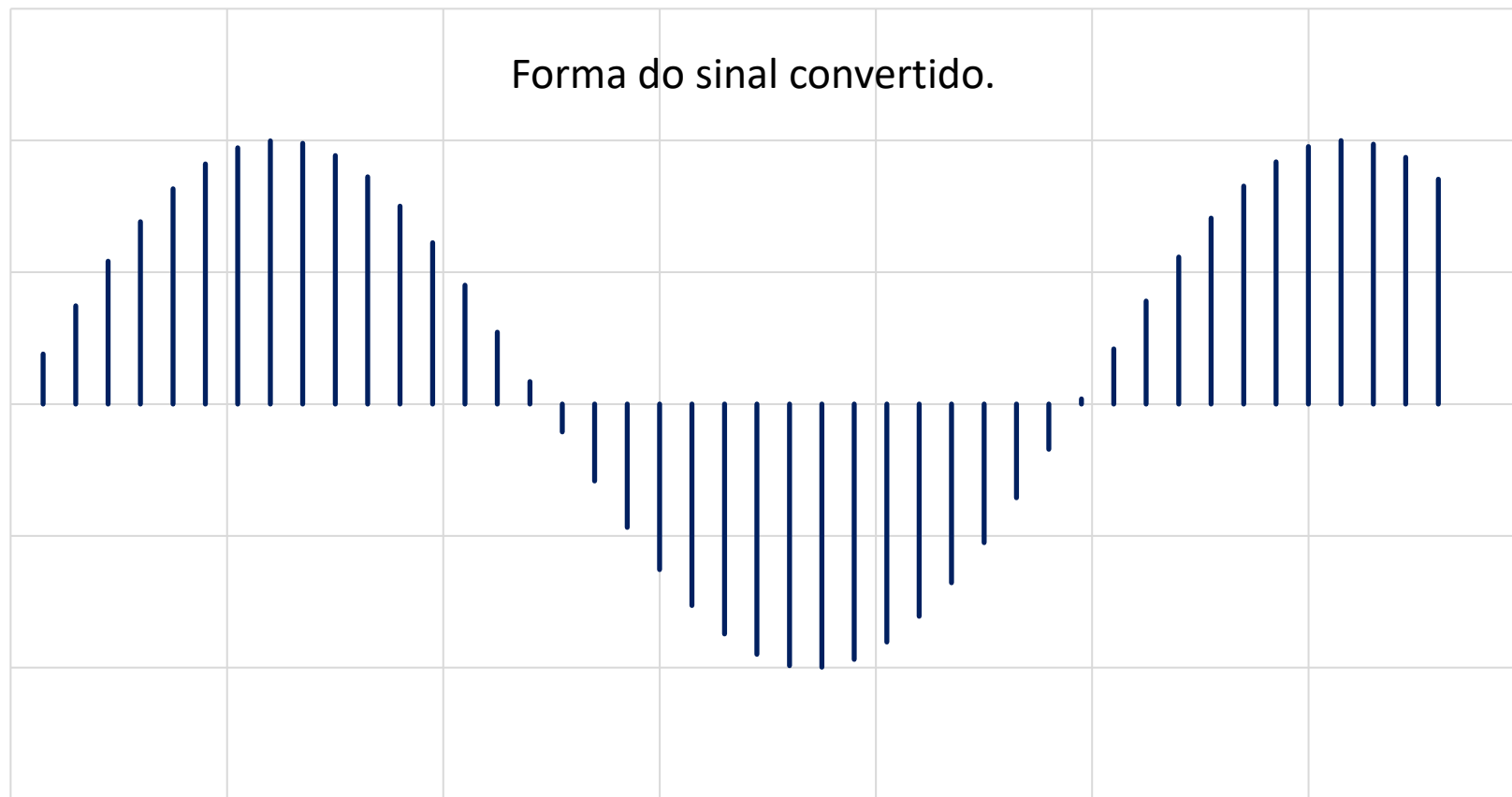
## Conversão de Sinais

Forma do sinal quantizado pelo circuito *sample-and-hold*.



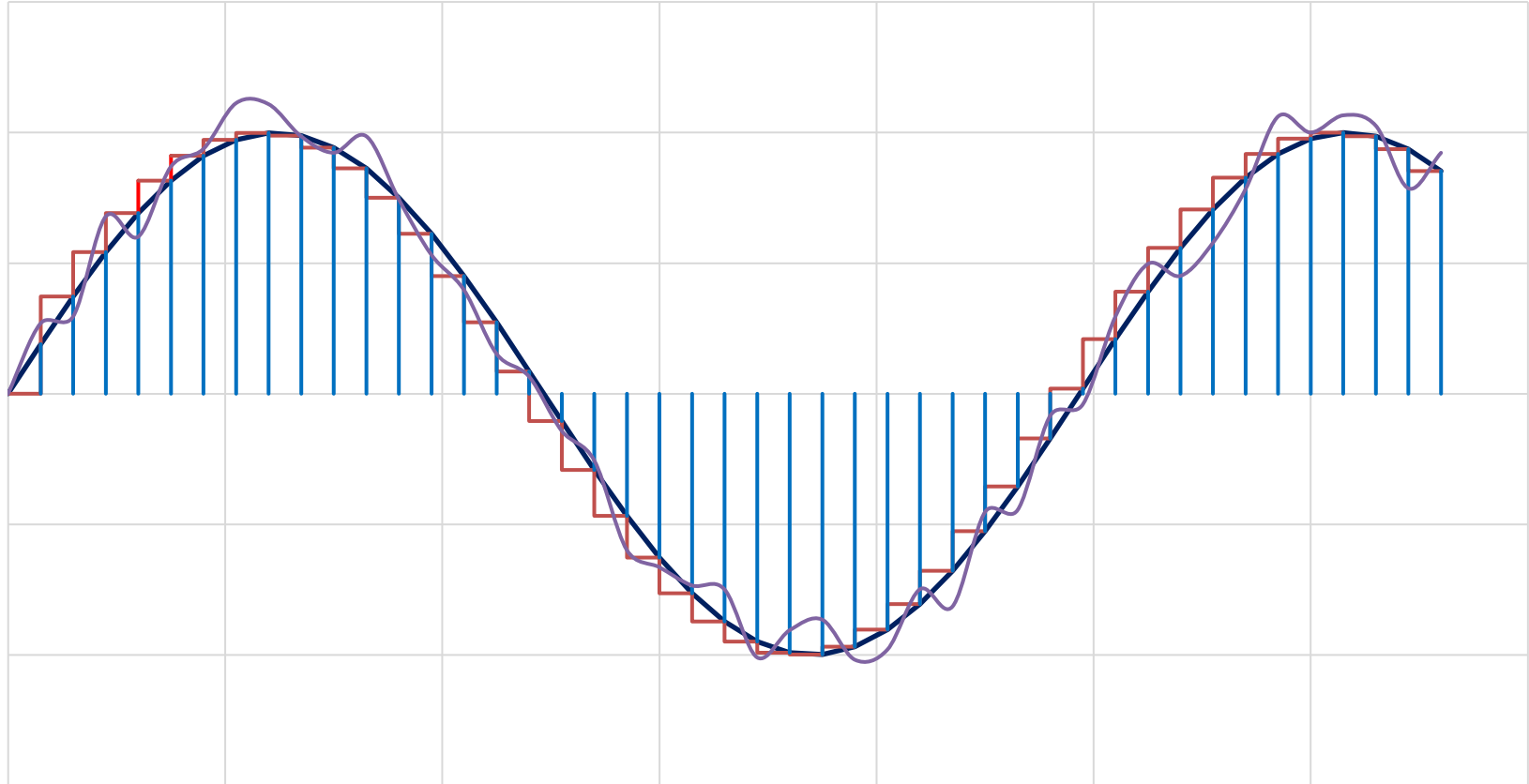
# Circuitos Sequenciais

## Conversão de Sinais



# Circuitos Sequenciais

## Conversão de Sinais



# Circuitos Sequenciais

## Conversão de Sinais

- Introdução;
- Conversão Analógico-Digital;
- Conversão Digital-Analógico;
- Processamento Digital de Sinais;

# Circuitos Sequenciais

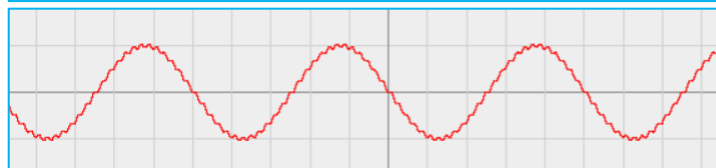
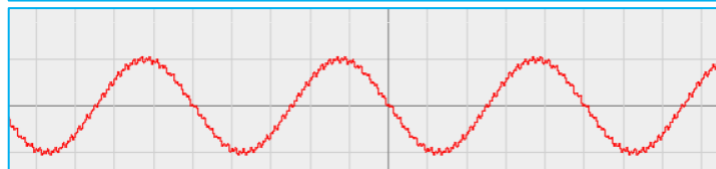
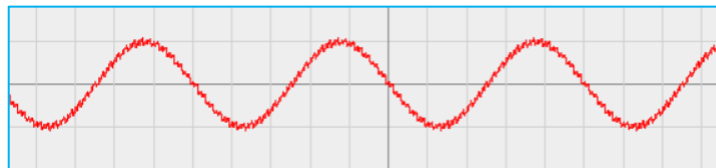
## Conversão de Sinais

- A *Conversão Analógico-Digital* é o processo de transformar a saída do circuito *sample-and-hold* em uma série de valores binários que representam as medidas da entrada analógica, em cada instante de tempo de amostragem;
- É comum a presença de ruídos e interferências nos sinais de entrada analógica;
- Assim, é frequente o uso de circuitos, comumente chamados filtro *anti-aliasing*, que eliminam ou reduzem os sinais indesejáveis, antes de realizar a amostragem;
- Com exceção de uma senoide perfeita, todos os sinais analógicos combinam um espectro de diferentes frequências;
- No caso da senoide, estes sinais indesejáveis possuem frequência múltipla da frequência (*harmônicas*) da onda principal;

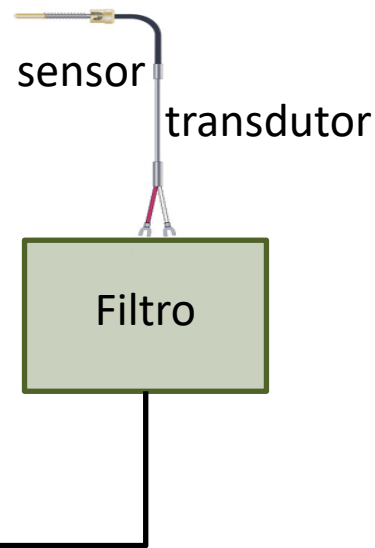
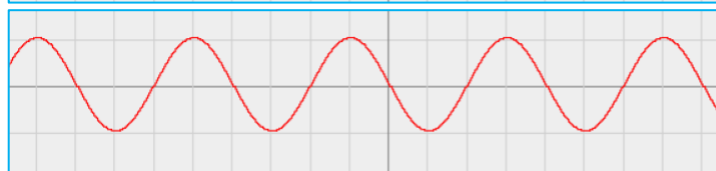
# Circuitos Sequenciais

## Conversão de Sinais

*Sinal bruto*



*Sinal filtrado*

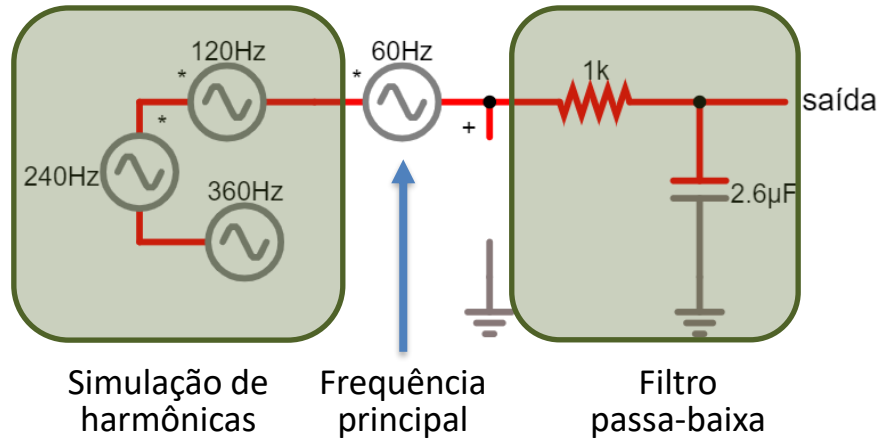




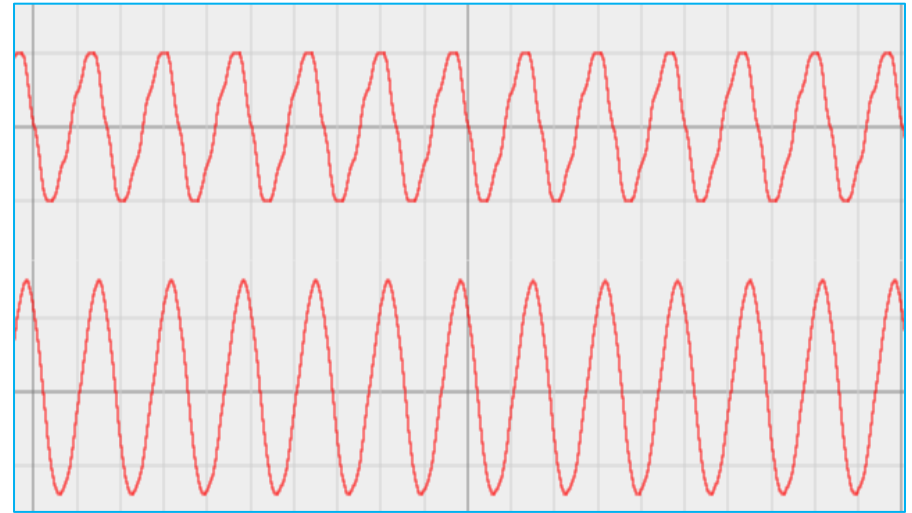
# Circuitos Sequenciais

## Conversão de Sinais

- Os filtros *passa-baixa*, ou filtros *anti-aliasing*, são utilizados para eliminar as harmônicas;
- Observe este exemplo de filtro:



Sinal analógico bruto na entrada



Sinal analógico após a filtragem

- O processo de *sample-and-hold* mantém o valor do sinal de entrada analógica constante pelo intervalo de tempo entre duas amostragens;
- Assim, a conversão analógico-digital pode ser realizada com base em um valor fixo durante todo o processo de conversão, que é o tempo entre os pulsos da amostragem;
- Pelo teorema de *Nyquist* a amostragem deve ser pelo menos duas vezes mais rápida do que a componente de maior frequência:

$$f_{sample} > 2f_{a(max)}$$

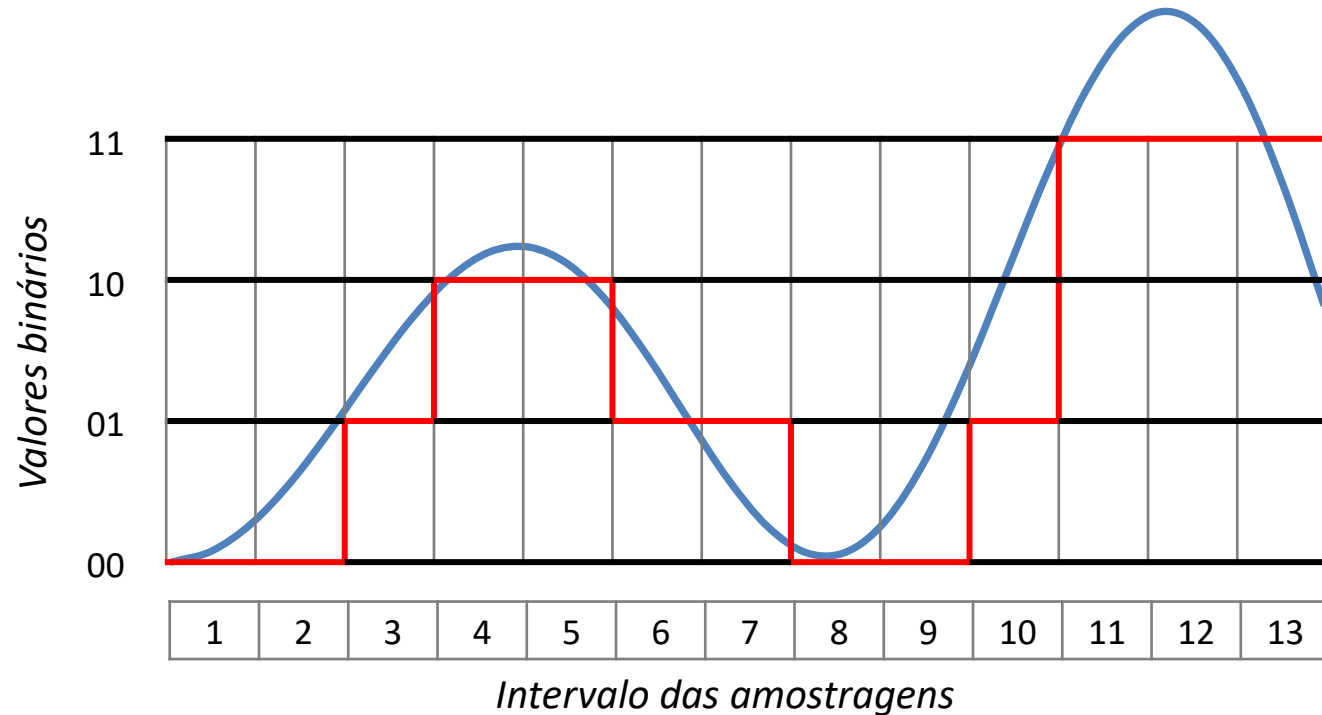
- Este conceito foi visualizado no exemplo com a bola;

- O processo de conversão de um valor analógico em um código é chamado de quantização;
- Durante o processo de quantização, o *ADC* converte cada valor amostrado do sinal analógico em um código binário;
- Quanto mais *bits* forem usados para representar um valor amostrado, mais precisa é a representação;
- Observe o exemplo a seguir:

# Circuitos Sequenciais

## Conversão de Sinais

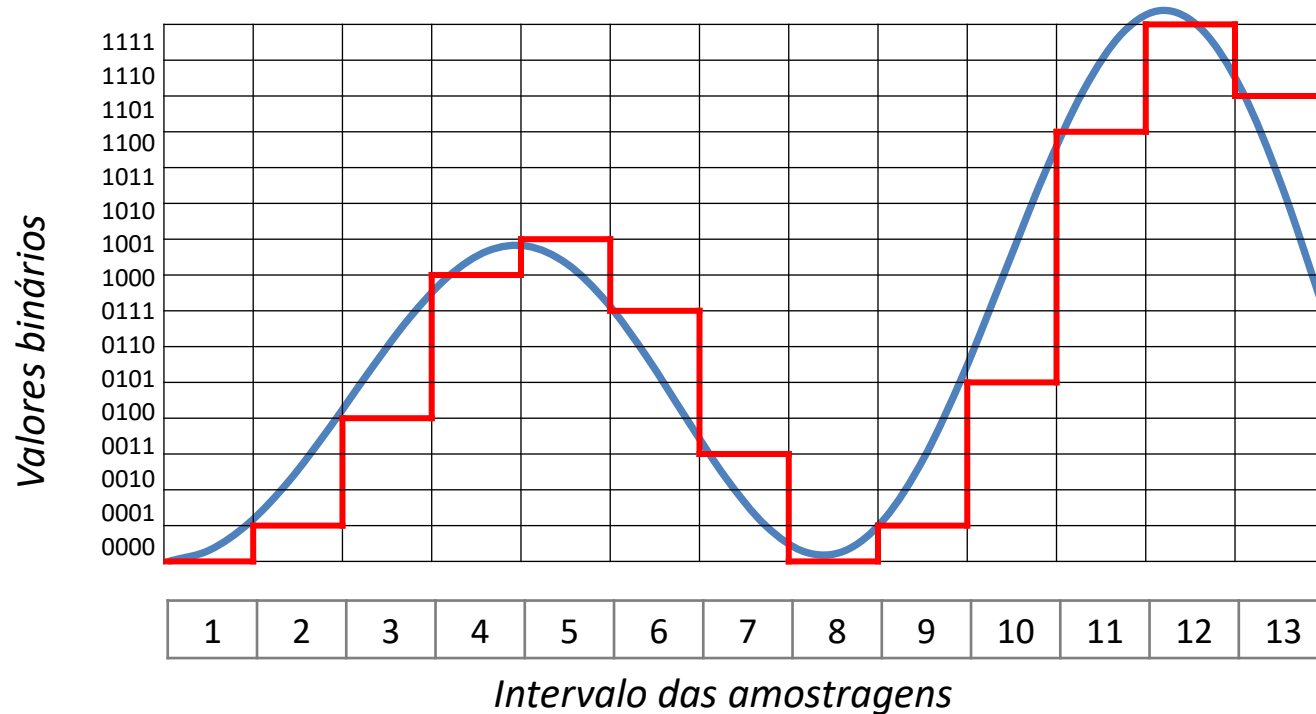
- A seguinte amostra foi quantizada em 4 níveis (2 bits);



# Circuitos Sequenciais

## Conversão de Sinais

- A mesma amostra quantizada em 16 níveis (4 bits);



# Circuitos Sequenciais

## Conversão de Sinais

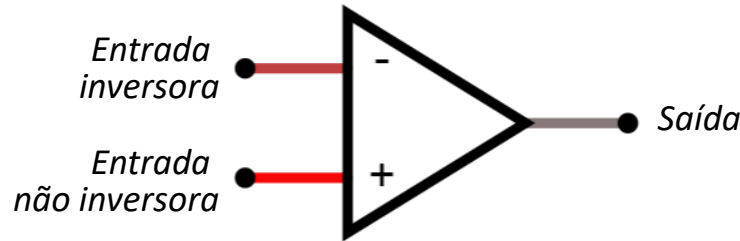
- Se os valores digitais de 2 bits fossem utilizados para reconstruir a forma de onda, o resultado apresentaria uma importante diferença em relação a onda original;
- Uma baixa precisão leva a perda de fidelidade entre a onda real e a representação digital;
- Os chips de *Conversão Analógico-Digital (ADC)* típicos utilizam resolução de 12 a 24 bits, e a função *sample-and-hold* geralmente vem embutida;
- Assim, dois parâmetros importantes para um *ADC* são:
  - ✓ *Resolução*, que é o número de *bits* por amostra, e
  - ✓ *Taxa de transferência*, que é a velocidade de amostragem que um *ADC* pode operar, cuja unidade é amostras por segundo (*sample per seconds*).

- Existem diversos métodos de *Conversão Analógico-Digital*, sendo os mais comuns:
  - ✓ Flash ADC;
  - ✓ Dual-slope ADC;
  - ✓ Successive-approximation ADC;
  - ✓ Delta-sigma ADC.
- Abordaremos apenas o primeiro método;
- Um componente comum tanto aos circuitos de *Conversão Analógico-Digital* quanto nos de *Conversão Digital-Analógico* é o *Amplificador Operacional* (*amp-op* ou *op-amp*);
- Assim, faremos uma breve exposição sobre este importante componente.

# Circuitos Sequenciais

## Conversão de Sinais

- Um *op-amp* é um amplificador linear que possui duas entradas (inversora e não inversora) e uma saída, cujas principais características são:
  - ✓ ganho de tensão muito alto;
  - ✓ impedância de entrada muito alta; e
  - ✓ impedância de saída muito baixa;

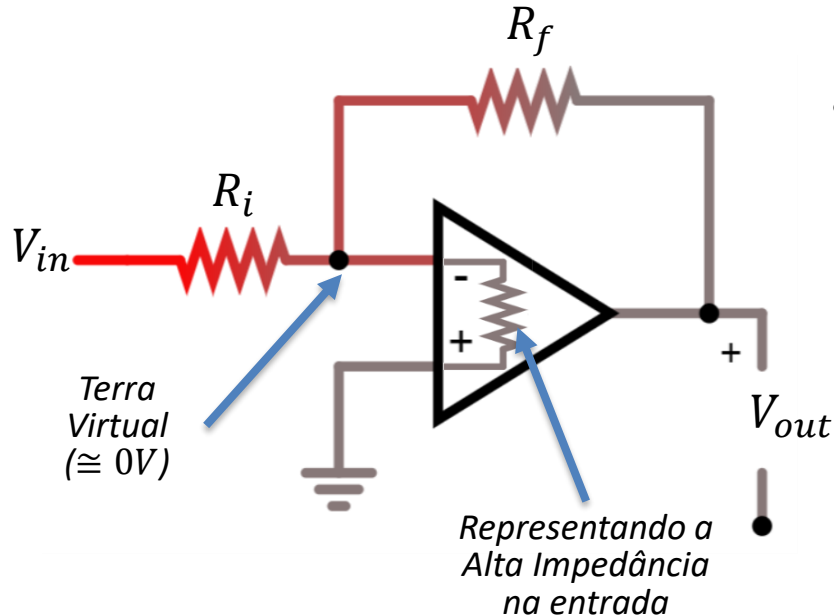




# Circuitos Sequenciais

## Conversão de Sinais

- Quando usado como amplificador inversor, o *amp-op* é configurado como segue:



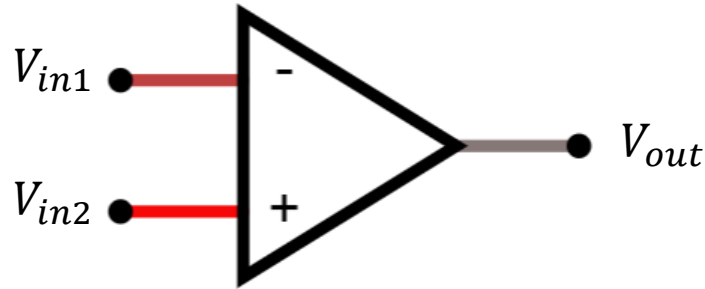
- O resistor de feedback,  $R_f$ , e o resistor de entrada,  $R_i$ , controlam o ganho de tensão em malha fechada de acordo com a fórmula:

$$Ganho = \frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_f}{R_i}$$

# Circuitos Sequenciais

## Conversão de Sinais

- Quando na função de comparador, o *amp-op* recebe duas tensões nas suas entradas;

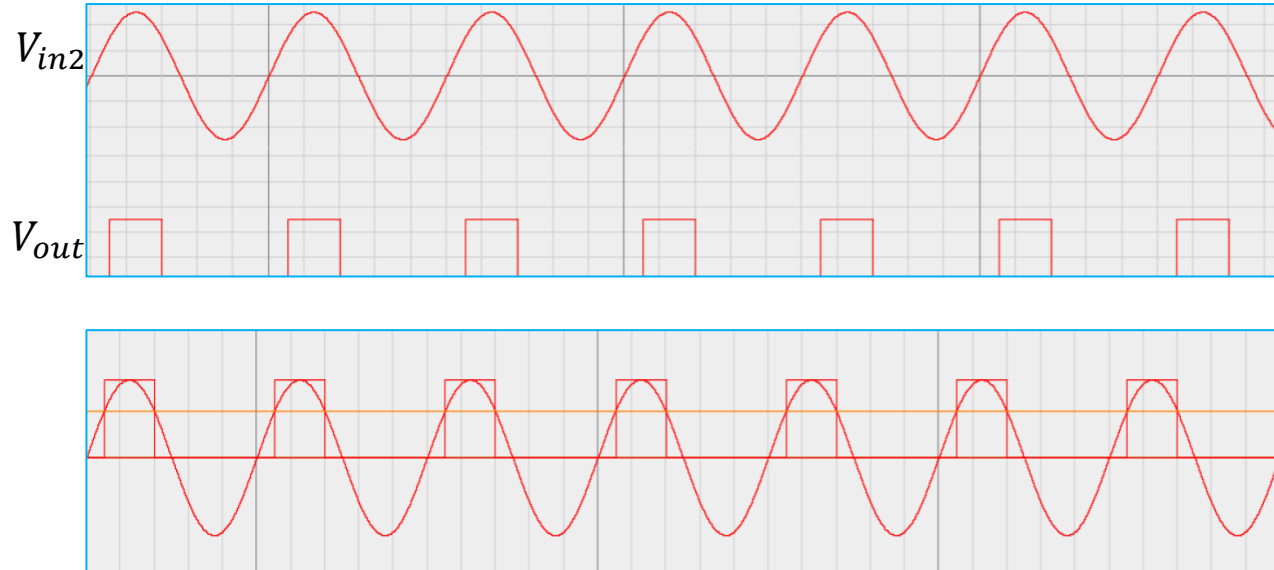
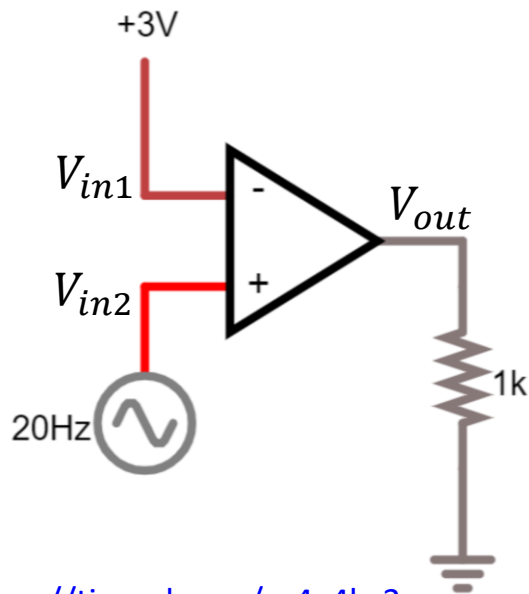


- Quando a diferença entre estas tensões for superior a um pequeno limiar, o *op-amp* é levado a um dos dois estados saturados possíveis (*HIGH* ou *LOW*), dependendo de qual entrada é maior.

# Circuitos Sequenciais

## Conversão de Sinais

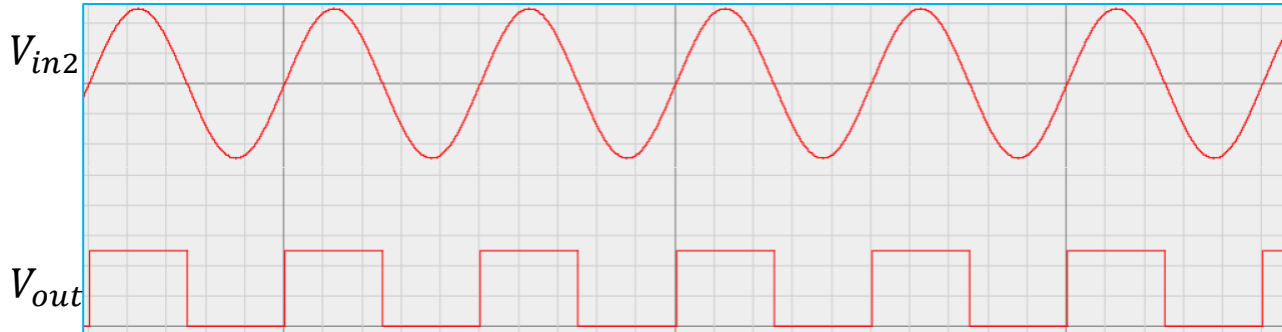
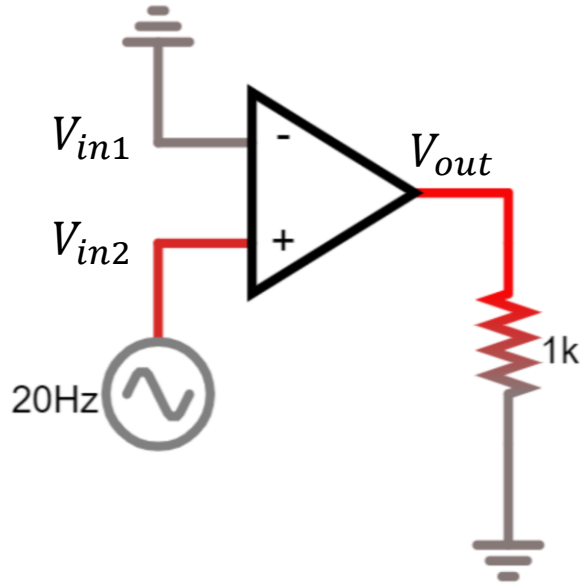
- Neste exemplo, a saída do *op-amp* altera de *LOW* para o estado *HIGH* sempre que a entrada (+) supera os 3V da entrada (-).



# Circuitos Sequenciais

## Conversão de Sinais

- Neste exemplo, a saída do *op-amp* altera de *LOW* para o estado *HIGH* sempre que a entrada (+) for positiva:



# Circuitos Sequenciais

## Conversão de Sinais

- Com esta breve introdução ao *op-amp*, podemos compreender o funcionamento dos diversos métodos de *Conversão Analógico-Digital* já mencionados;
- Abordaremos aqui apenas o Flash *ADC*;

- O método *flash* utiliza comparadores especiais de alta velocidade que comparam as tensões de referência com a tensão da entrada analógica;
- Quando a tensão da entrada exceder a tensão de referência em um determinado comparador, o estado *HIGH* é gerado;
- A seguinte figura ilustra um conversor de 3 bits que usa sete circuitos comparadores;

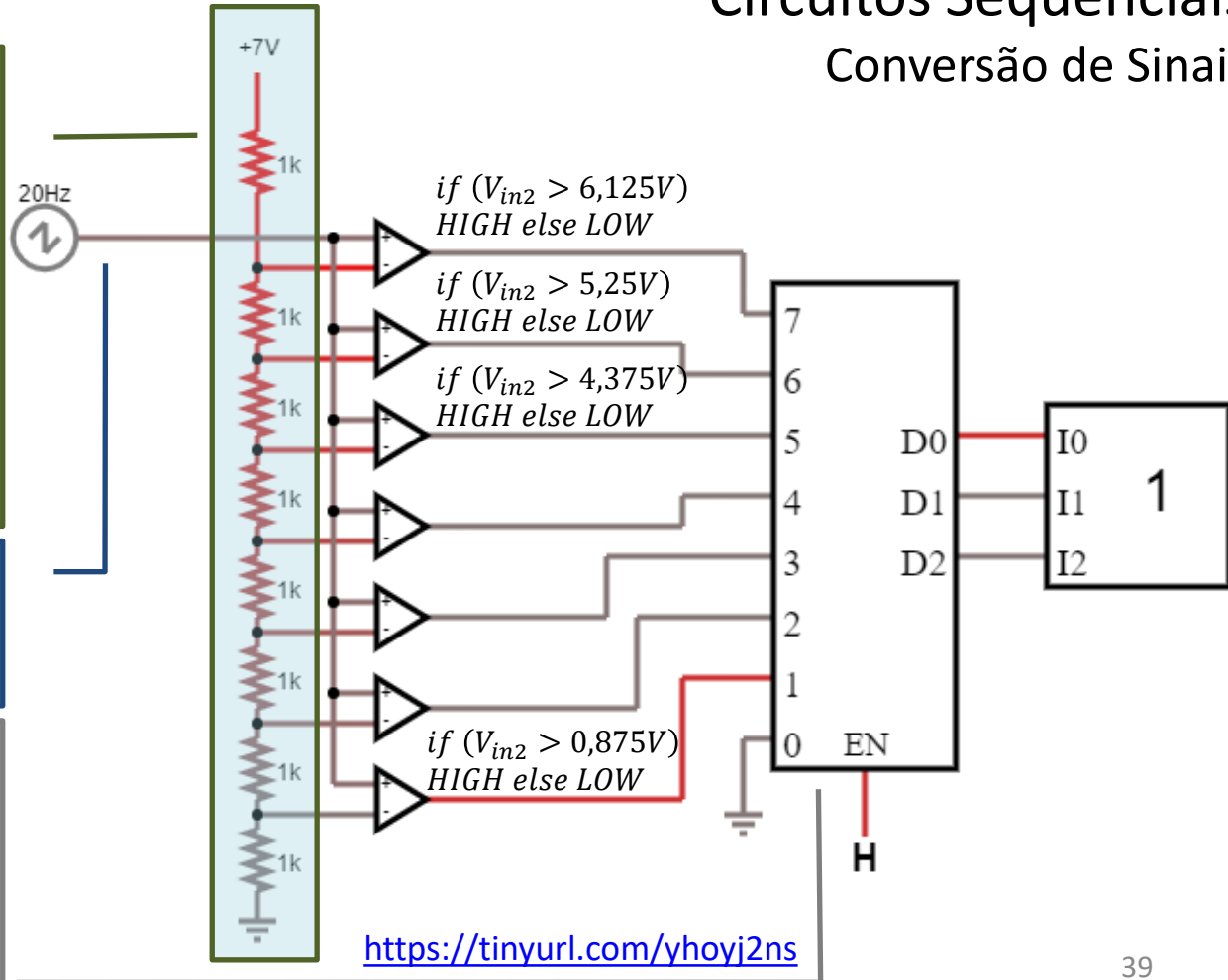
# Circuitos Sequenciais

## Conversão de Sinais

- Circuito divisor de tensão;
- Seu propósito é fornecer uma referência de tensão para cada um dos *amp-op*;
- Como todos os resistores são idênticos, a queda de tensão será de  $0,875V$  por resistor;
- Assim, cada entrada ( $-$ ) dos *amp-op* receberá a referência  $V_{in1}$  de  $6,125V$ ;  $5,25V$ ;  $4,375V$ ...

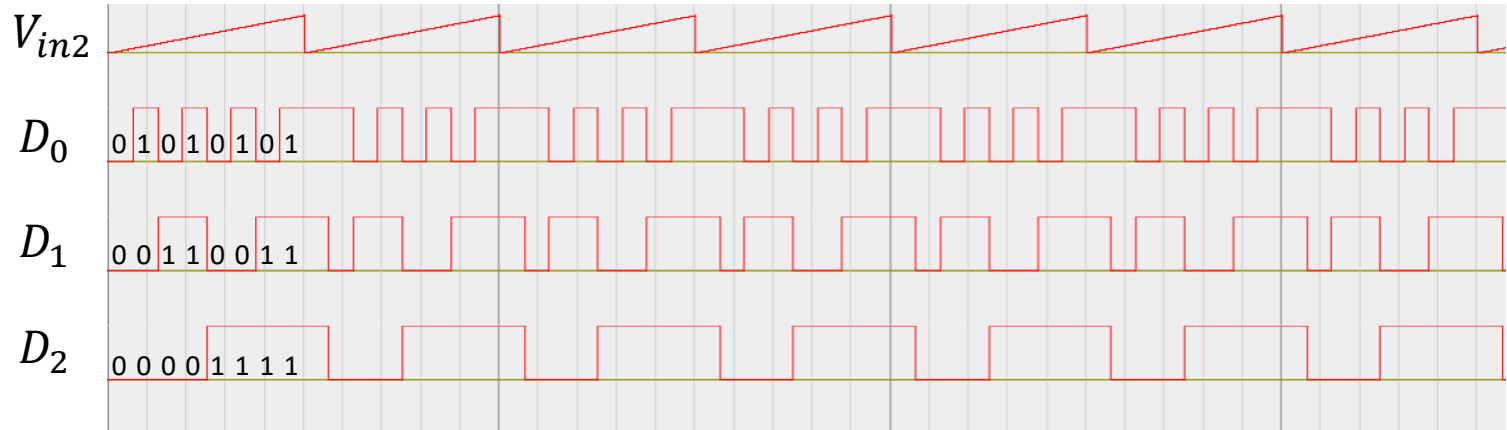
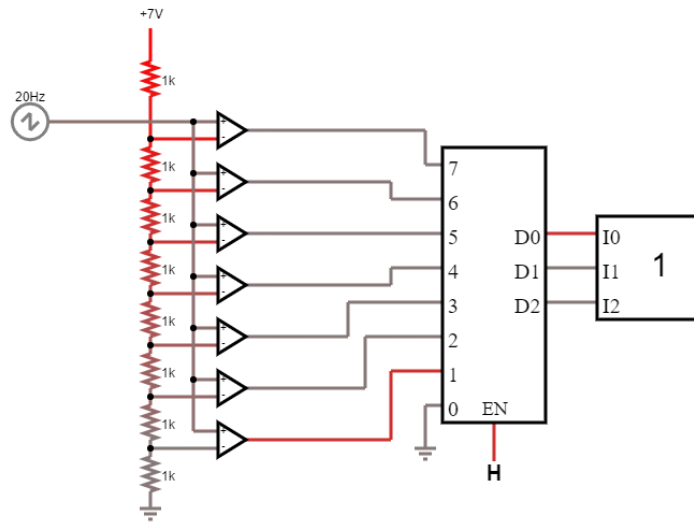
- Sinal analógico de entrada;
- Alimenta cada uma das entradas ( $+$ ) dos *amp-op* ( $V_{in2}$ );

- *Priority Encoder* com *EN*;
- Converte a entrada em um binário de 3 bits;
- Um circuito pode habilitar a saída digital sempre que um dado for necessário;



# Circuitos Sequenciais

## Conversão de Sinais

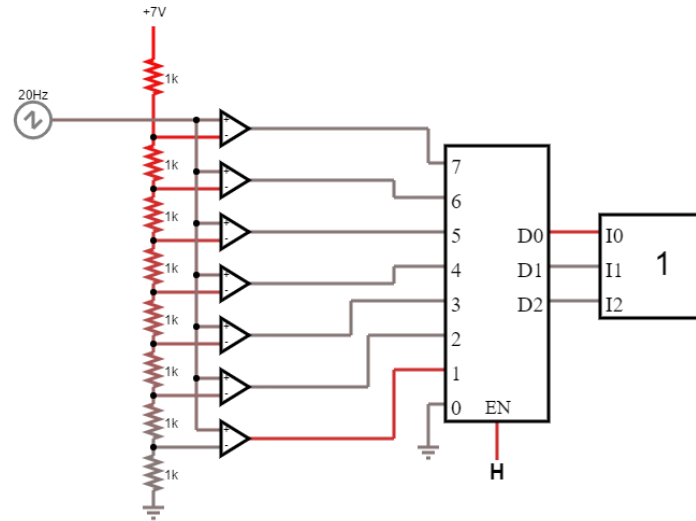




# Circuitos Sequenciais

## Conversão de Sinais

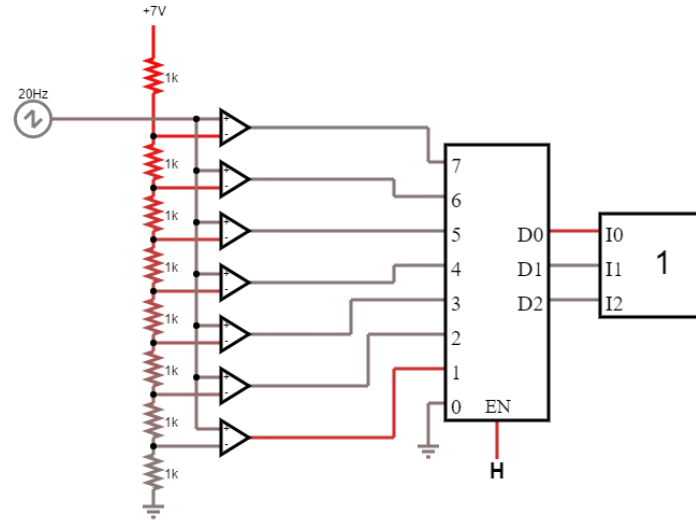
- Não é necessário um comparador para a condição 0.
- Um conversor de 4 bits com este método requer 15 comparadores;
- Em geral, são necessários  $2^n - 1$  comparadores para obter um código binário de  $n$  bits;
- O número de bits gerados pelo *ADC* é equivalente a sua resolução;
- O grande número de comparadores necessários para um número binário de tamanho razoável é uma das desvantagens do *ADC flash*;
- A principal vantagem é um tempo de conversão rápido devido ao alto rendimento, medido em amostras por segundo;



# Circuitos Sequenciais

## Conversão de Sinais

- A tensão de referência para cada comparador é definida pelo circuito divisor de tensão resistivo;
- A saída de cada comparador é conectada a uma entrada do codificador de prioridade;
- A entrada *EN* habilita o codificador, quando então um código de 3 bits, que representa o valor digital da entrada analógica, surge nas saídas do codificador;
- O código binário é determinado pela entrada de mais alta ordem que estiver em nível *HIGH*;
- A frequência dos pulsos em *EN* e o número de bits do código binário determinam as características do *ADC*;
- O sinal é amostrado cada vez que o pulso de habilitação estiver em *HIGH*.



# Circuitos Sequenciais

## Conversão de Sinais

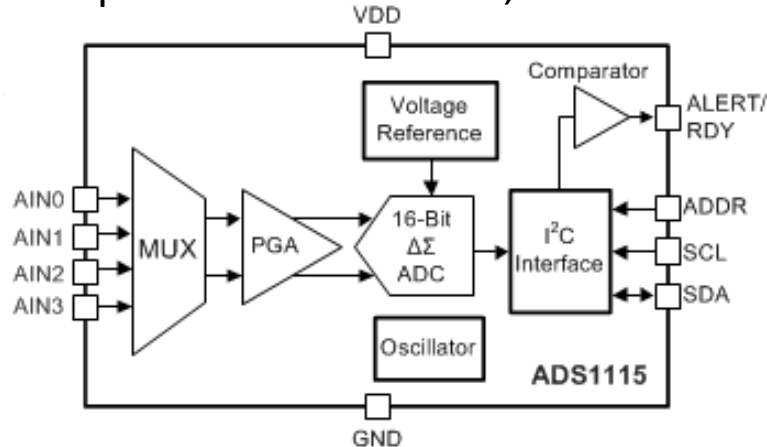
- Existem diversos modelos disponíveis no mercado;
- Na página de um determinado fabricante é possível selecionar pelas características desejadas;

Resolution	Sampling speed	Input channels	Interface
<12 bits	<0.1 MSPS	1	SPI
12 bits	0.1 MSPS - 1 MSPS	2 - 4	I2C
14 bits - 20 bits	1 MSPS - 5 MSPS	4 - 8	Parallel
>20 bits	5 MSPS - 50 MSPS	>8	JESD204 (A, B, C)
	>50 MSPS		Other interfaces

# Circuitos Sequenciais

## Conversão de Sinais

- Alguns exemplos são:
  - ✓ ADS1115 ([https://img.filipeflop.com/files/download/Datasheet\\_ADC\\_ads1115.pdf](https://img.filipeflop.com/files/download/Datasheet_ADC_ads1115.pdf));
  - ✓ ADC083X (<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/adc0831-n.pdf>);
  - ✓ ADCs embutidos no Arduino, Raspberry Pi, ESP8266 SoC e outros;
  - ✓ Dentre muitos disponíveis no mercado;



# Circuitos Sequenciais

## Conversão de Sinais

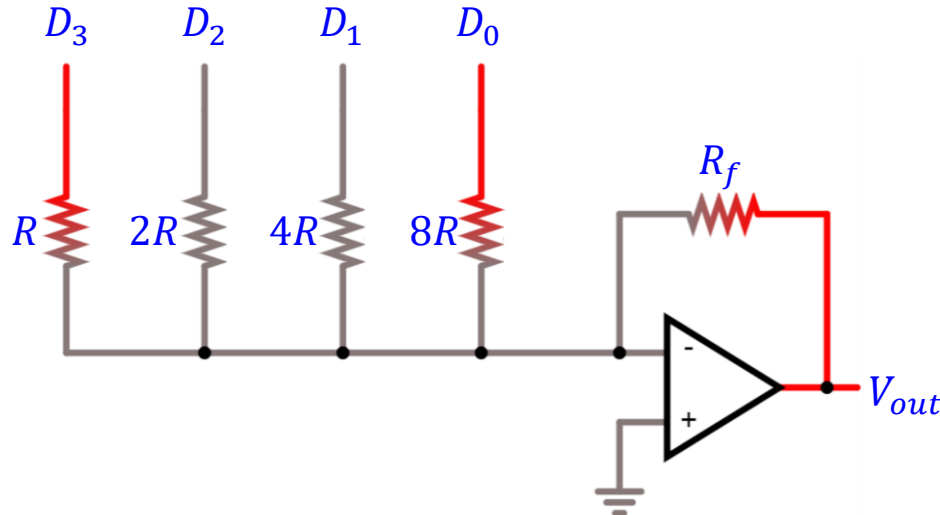
- Introdução;
- Conversão Analógico-Digital;
- Conversão Digital-Analógico;
- Processamento Digital de Sinais;

- A *Conversão Digital-Analógico (DAC)* é uma parte importante de um sistema de processamento digital;
- Uma vez que os dados digitais já tenham sido processados, é hora de convertê-los para a forma analógica;
- Por exemplo, na transmissão de voz, inicialmente o som é convertido de analógico para digital, processado, transmitido, para então ser convertido novamente, na outra ponta de digital para analógico;
- Os dois tipos básicos de *Conversores Digital-Analógico (DAC)* são:
  - ✓ *Binary-Weight-Input*, e
  - ✓ *R/2R Ladder*.

# Circuitos Sequenciais

## Conversão de Sinais

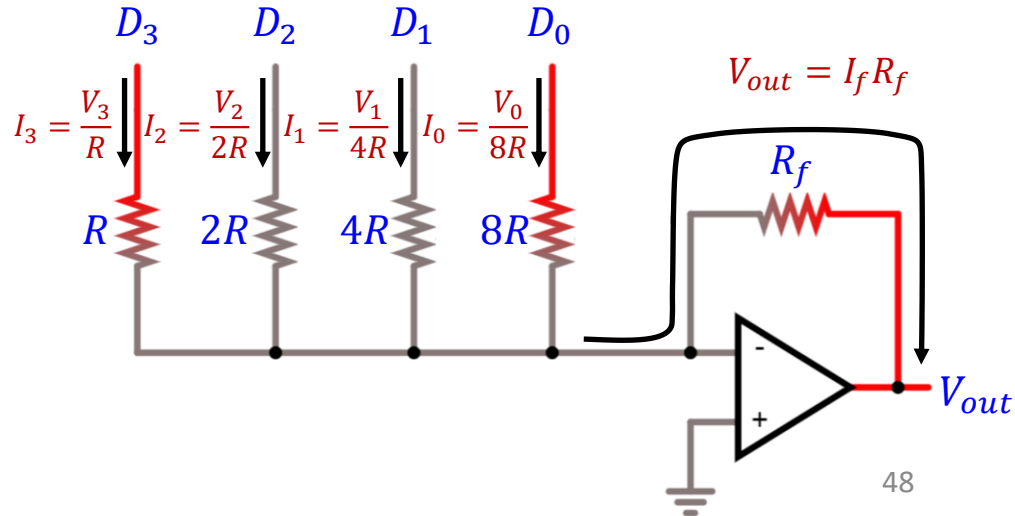
- O *Conversor Digital-Analógico (DAC) Binary-Weight-Input*, utiliza uma rede de resistores, cujos valores representam os pesos binários dos bits da entrada digital;
- Segue um *DAC* de 4 bits do tipo *Binary-Weight-Input*;



# Circuitos Sequenciais

## Conversão de Sinais

- Cada um dos resistores de entrada será percorrido ou não por uma corrente, a depender do nível de tensão de entrada;
- Se a tensão de entrada for zero (binário 0), a corrente será zero;
- Se a tensão de entrada for *HIGH* (binário 1), a corrente será inversamente proporcional ao resistor;
- O valor de cada resistor deve ser inversamente proporcional ao peso da sua entrada binária;
- Assim, uma entrada binária contribui com uma corrente proporcional ao seu peso ( $2^n$ );
- O valor de  $I_f$  será  $I_3 + I_2 + I_1 + I_0$ .





# Circuitos Sequenciais

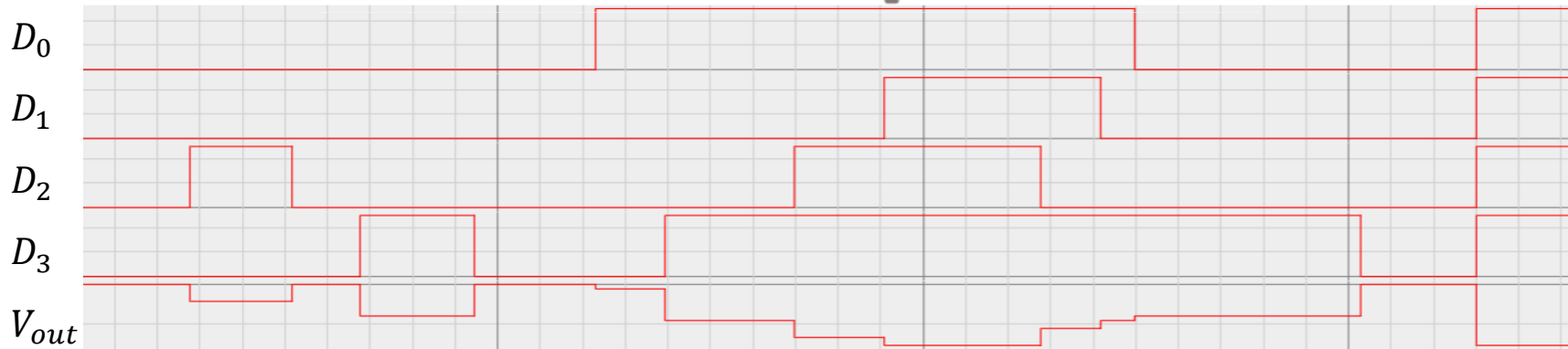
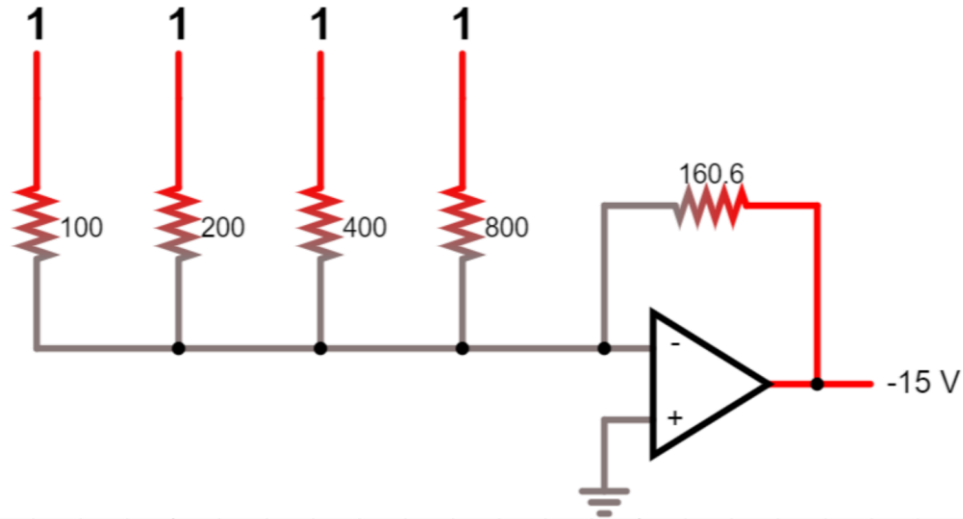
## Conversão de Sinais

- As desvantagens deste tipo de *DAC* são: a quantidade de diferentes resistores; e o fato de que os níveis de tensão devem ser exatamente os mesmos para todas as entradas;
- Um conversor de 8 bits requer oito resistores, variando de  $R$  a  $128R$  conforme os pesos binários;
- Os resistores deverão ter valores com tolerâncias de  $1/255$  (menos de 0,5%) para converter com precisão a entrada;
- Estes requisitos tornam este tipo de *DAC* muito difícil de produzir em massa;
- O seguinte link contém uma simulação deste *DAC*:

<https://tinyurl.com/yzjn4pwp>

# Circuitos Sequenciais

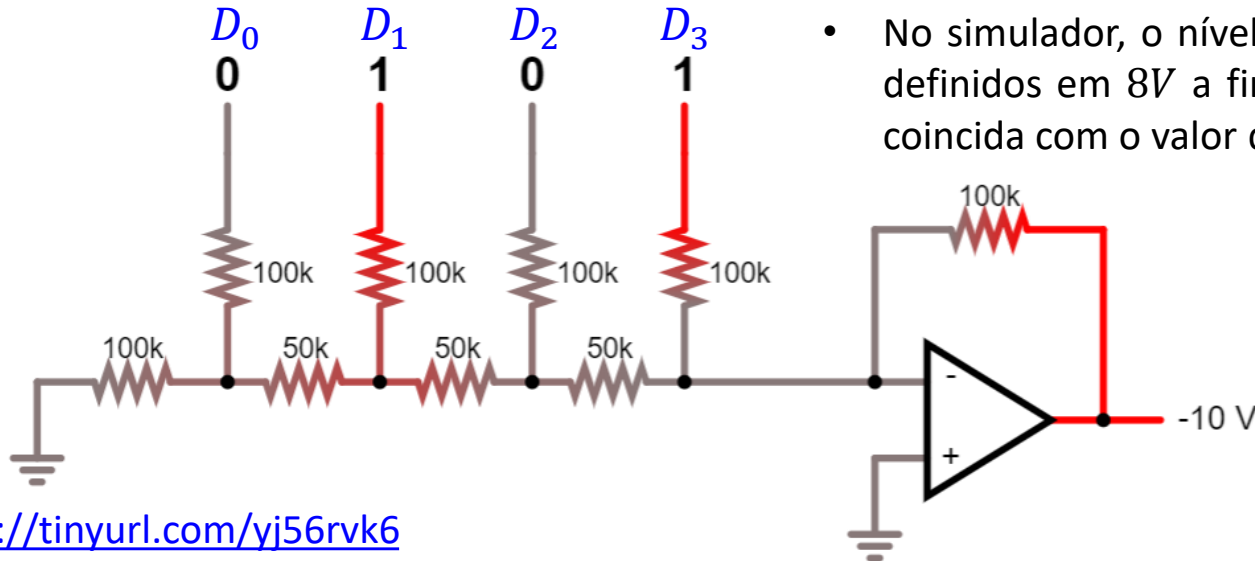
## Conversão de Sinais



# Circuitos Sequenciais

## Conversão de Sinais

- Na sequência, apenas uma breve descrição do segundo método;
- O *Conversor Digital-Analógico (DAC) R/2R Ladder* supera um dos problemas do *DAC Binary-Weight-Input*, pois utiliza apenas dois valores de resistor:



- No simulador, o nível *HIGH* das entradas foram definidos em 8V a fim de que a saída analógica coincida com o valor decimal da entrada digital.

# Circuitos Sequenciais

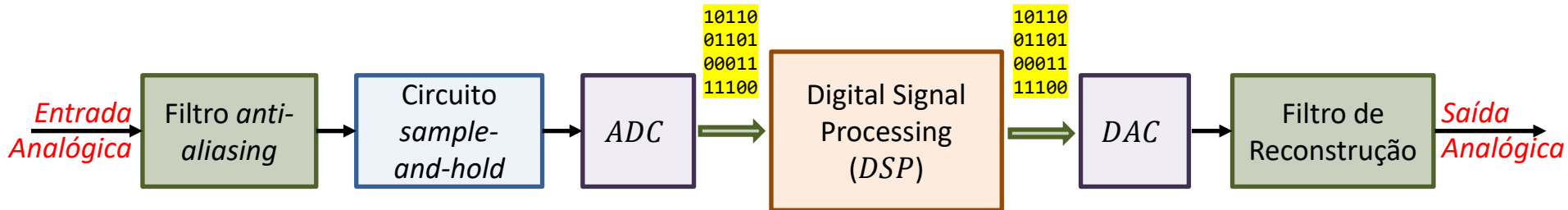
## Conversão de Sinais

- Introdução;
- Conversão Analógico-Digital;
- Conversão Digital-Analógico;
- Processamento Digital de Sinais;

# Circuitos Sequenciais

## Conversão de Sinais

- O processamento digital de sinais:
  - ✓ converte sinais que ocorrem naturalmente na forma analógica, como som, vídeo e informações de sensores, para a forma digital;
  - ✓ e utiliza técnicas computacionais para aprimorar e modificar os dados do sinal analógico para as mais diversas aplicações;
- O seguinte diagrama ilustra de modo simplificado um sistema de processamento digital de sinais:



# Circuitos Sequenciais

## Conversão de Sinais

- Os *DSPs* são microprocessador especializados em processamento veloz de grandes volumes de dados, aplicando algoritmos próprios para este fim;
- O *Conversor Analógico-Digital (ADC)* coleta amostras de dados analógicos em frequência alta o suficiente para capturar todas as flutuações relevantes do sinal;
- em paralelo o *DSP* deve estar apto a processar na taxa de amostragem do *ADC* e realizar os cálculos tão rapidamente quanto recebe os dados adquiridos;
- O *DSP* é um processador de dados de *tempo real*;
- Uma vez que os dados digitais tenham sido processados pelo *DSP*, eles seguem para o *Conversor Digital-Analógico (DAC)* e para o filtro de reconstrução para a forma analógica.

- Os *DSPs* estão presentes em aplicações das mais diversas áreas, tais como:
  - ✓ Telecomunicações;
  - ✓ Reconhecimento e geração de voz;
  - ✓ Radar;
  - ✓ Processamento de imagens;
  - ✓ Filtragem digital;
  - ✓ Smartphones (telefone celular digital);
  - ✓ Dentre outros;

# Circuitos Sequenciais

## Conversão de Sinais

- Diagrama simplificado de um telefone celular digital:

