

# Aula 2

## Conversão D/A, Nyquist, Amostragem, Quantização e Conversão A/D

---

Prof: Rafael Zamodzki

# Sumário

---

- Conversão D/A
- Resolução
- Topologias de conversores D/A
- Conversão A/D
- Conversor A/D de aproximações sucessivas
- Teorema da amostragem e erro de *aliasing*

# CONVERSÃO D/A e RESOLUÇÃO

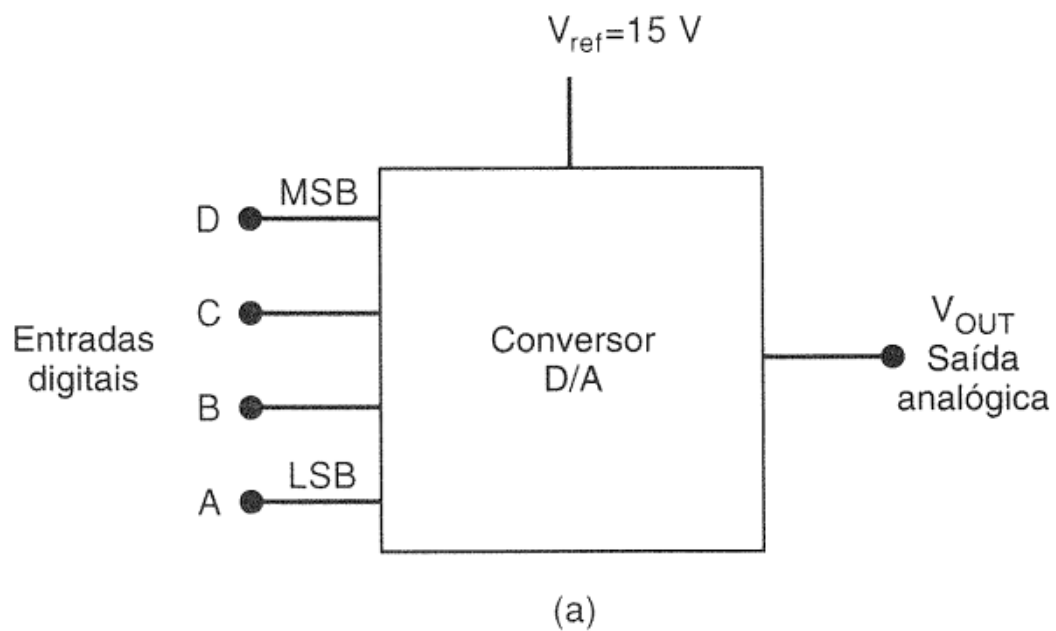
# Introdução – Conversor D/A

---

- Como diversos métodos de conversão A/D utilizam conversores D/A em sua construção, iniciaremos o estudo pelos conversores D/A.
- Conversão D/A:
  - Valor representado em código binário (digital) é convertido em tensão ou corrente (analógico) proporcional ao valor digital.

# Introdução – Conversor D/A

- Símbolo de conversor D/A típico de 4 bits



D	C	B	A	$V_{OUT}$	
0	0	0	0	0	volts
0	0	0	1	1	↓
0	0	1	0	2	
0	0	1	1	3	
0	1	0	0	4	
0	1	0	1	5	
0	1	1	0	6	
0	1	1	1	7	
1	0	0	0	8	
1	0	0	1	9	↓
1	0	1	0	10	
1	0	1	1	11	
1	1	0	0	12	
1	1	0	1	13	
1	1	1	0	14	
1	1	1	1	15	volts

(b)

**Fig. 10-2** Conversor D/A de quatro bits com saída em tensão.

# Introdução – Conversor D/A

- A figura anterior possui uma entrada para uma tensão de referência  $V_{ref}$ .
- Essa entrada representa o **fundo de escala** ou o valor máximo que o conversor D/A pode gerar na saída.
- O conversor possui  $2^4=16$  diferentes valores digitais possíveis.
- Para cada valor da entrada, a saída possuirá um valor único.

# Introdução – Conversor D/A

---

- No exemplo, a tensão de saída analógica  $V_{out}$  é igual em volts ao número binário.
- Poderia ser, no entanto, qualquer valor proporcional ao número binário de entrada do D/A.
- O mesmo é válido se a saída do conversor D/A for em corrente.
  - Saída analógica =  $K \times$  entrada digital
  - $K$  é o fator de proporcionalidade.

# Introdução – Conversor D/A

---

- Quando a saída do D/A for em tensão, a constante K terá unidade de tensão (Volts).
- Quando a saída do D/A for em corrente, a constante K terá unidade de corrente (Ampére).
- Para o DAC mostrado na figura,  $K = 1V$ .
- $V_{out} = (1V) \times \text{entrada digital}$



# Introdução – Conversor D/A

---

- Podemos usar essa expressão para calcular  $V_{out}$  para qualquer valor de entrada digital.
- Por exemplo, com um entrada digital de 1100, tem-se:
  - $1100 = 12$
- Saída analógica =  $K \times$  entrada digital
  - $V_{out} = 1V \times 12 = 12V$

# Exercícios

---

- Questão 1:
- Um DAC de 5 bits tem uma saída em corrente. Para uma entrada digital 10100, é gerada uma corrente na saída de 1mA.
- Qual será o valor de  $I_{out}$  para uma entrada digital de 11101?

# Exercícios

---

- Resposta questão 1:
- $10100 = 20$
- $I_{\text{out}} = K \times \text{entrada digital}$
- $K = I_{\text{out}} / \text{entrada digital} = 1\text{mA} / 20 = 0,05\text{mA}$
- $11101 = 29$
- Portanto:
- $I_{\text{out}} = 0,05\text{mA} \times 29 = \mathbf{1,45\text{mA}}$

# Exercícios

---

- Questão 2:
- Qual o maior valor de tensão de saída de um DAC de oito bits que gera 1V para uma entrada digital de 00110010?

# Exercícios

---

- Resposta questão 2:
- $00110010 = 50$
- $1V = K \times 50$
- $K = 20mV$
- Maior tensão de saída ocorre com entrada  $11111111 = 255$
- $V_{out(máx)} = 20mV \times 255 = \mathbf{5,1V}$

# Saída analógica

---

- A saída de um DAC não é tecnicamente uma quantidade analógica, uma vez que só pode assumir valores pré-estabelecidos, como os 16 níveis de tensão da figura 10.2 (slide 5).
- O número de saídas possíveis pode aumentar e a diferença entre valores sucessivos diminuir com o aumento do número de bits de entrada.

# Saída analógica

---

- Aumentando a quantidade de bits de entrada, faz-se com que a saída se aproxime cada vez mais de uma quantidade analógica.
- A saída de um DAC é, portanto, uma quantidade “pseudo-analógica”.
- Continuaremos a nos referir a ela como sendo analógica, uma vez que trata-se de uma aproximação para uma quantidade analógica pura.

# Pesos de entrada

---

- Para o DAC da figura 10.2 (slide 5), deve-se notar que cada entrada digital contribui com uma quantidade diferente para a saída analógica.
- Isto é fácil de perceber para o caso em que apenas uma entrada está em nível lógico alto.

**TABLE 11-1**

<i>D</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>A</i>		$V_{OUT}$ (V)
0	0	0	1	→	1
0	0	1	0	→	2
0	1	0	0	→	4
1	0	0	0	→	8



# Pesos de entrada

---

- As contribuições de cada entrada digital são ponderadas de acordo com sua posição no número binário.
- No exemplo, A (LSB) tem peso 1V, B tem peso 2V, C tem peso 4V e D (MSB) tem peso 8V.

**TABLE 11-1**

<i>D</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>A</i>		$V_{OUT}$ (V)
0	0	0	1	→	1
0	0	1	0	→	2
0	1	0	0	→	4
1	0	0	0	→	8

# Pesos de entrada

---

- Os pesos são dobrados para cada bit, iniciando-se pelo LSB.
- Pode-se considerar  $V_{out}$  como a soma ponderada das entradas digitais.
- Ex:  $0111 = 4V + 2V + 1V = 7V$ .

**TABLE 11-1**

<i>D</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>A</i>		$V_{OUT}$ (V)
0	0	0	1	→	1
0	0	1	0	→	2
0	1	0	0	→	4
1	0	0	0	→	8

# Exercícios

---

- Questão 3:
- Um conversor D/A de cinco bits gera  $V_{out} = 0,2V$  para uma entrada digital de 00001. Determine o valor de  $V_{out}$  para uma entrada 11111.

# Exercícios

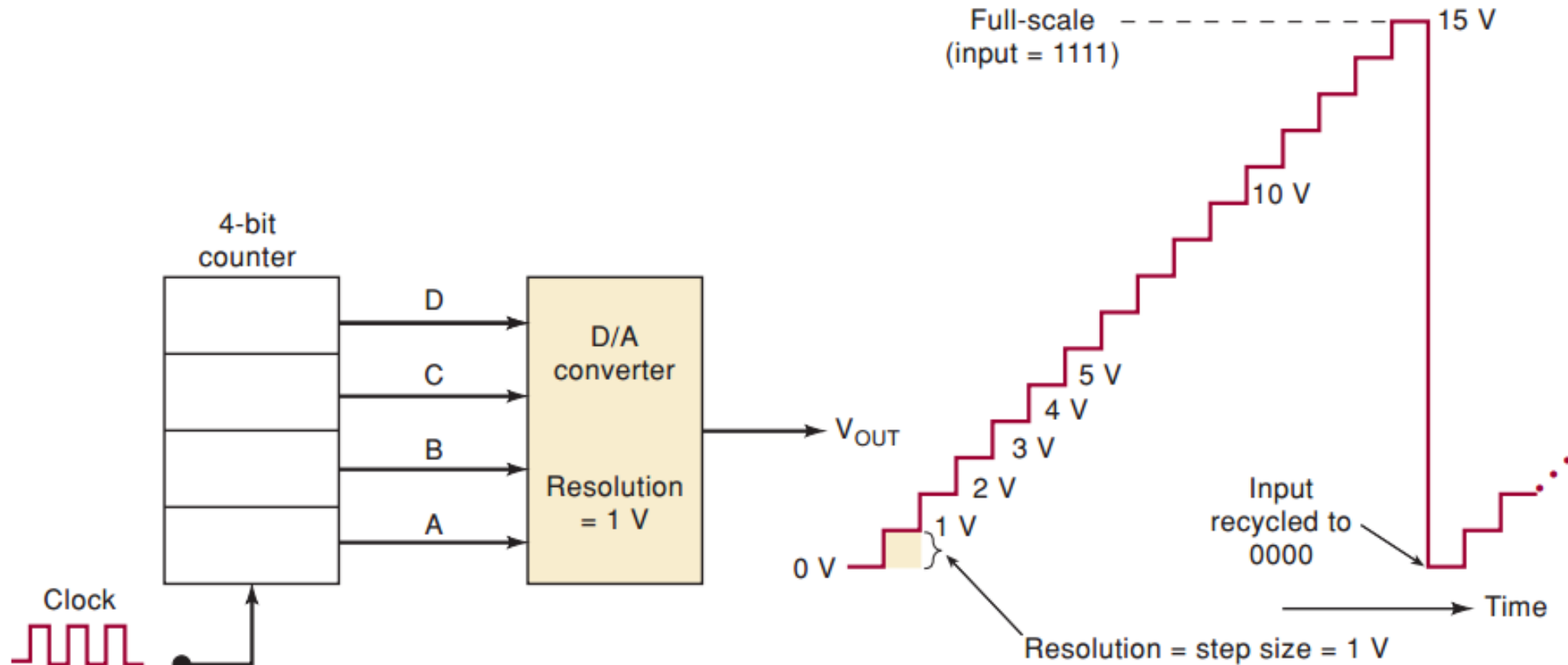
---

- Resposta questão 3:
- 0,2V é o peso do LSB.
- Demais bits terão pesos: 0,4V; 0,8V; 1,6V e 3,2V respectivamente.
- Para uma entrada digital 11111 o valor de  $V_{out}$  será:
- $3,2V + 1,6V + 0,8V + 0,4V + 0,2V = \mathbf{6,2V}$

## Resolução – Tamanho do degrau

- Resolução de um DAC é a menor variação que pode ocorrer na saída analógica como resultado de uma mudança na entrada digital.
- A resolução é sempre igual ao peso do bit LSB e também é conhecida como tamanho do degrau, pois representa a variação de  $V_{out}$  a medida que a entrada digital varia para o valor seguinte.

# Resolução – Tamanho do degrau



**FIGURE 11-3** Output waveforms of a DAC as inputs are provided by a binary counter.

## Resolução – Tamanho do degrau

- Na figura 11.3 (slide 22) as saídas de um contador de 4 bits acionam as entradas do DAC em questão.
- À medida que o contador passa por seus 16 estados, por meio do sinal de *clock*, a saída do DAC é uma forma de onda do tipo escada que aumenta 1V por degrau.
- Quando o contador está em 1111, a saída do DAC estará em seu valor máximo, que recebe o nome de saída de fundo de escala.

## **Resolução – Tamanho do degrau**

- Quando o contador recicla para 0000, a saída do DAC retorna para 0V.
- A resolução ou tamanho do degrau é o tamanho dos saltos na forma de onda do tipo escada. Nesse caso, cada degrau é de 1V.
- Existem, portanto, 16 níveis diferentes e 15 degraus ou saltos na forma de onda do tipo escada.



# Resolução – Tamanho do degrau

- Para um DAC de N bits:
  - Níveis =  $2^N$
  - Degraus =  $2^{N-1}$
- Note portanto, que a resolução é igual ao fator de proporcionalidade na relação de entrada e saída de um DAC.
- Saída analógica =  $K \times$  entrada digital

# Resolução – Tamanho do degrau

- Outra interpretação para a expressão seria:

$$resolução = K = \frac{A_{fs}}{(2^n - 1)}$$

- Em que 'Afs' representa a Amplitude de fundo de escala e 'n' o número de bits do conversor.

# Resolução percentual

---

- Embora a resolução possa ser expressa como a quantidade de tensão ou corrente por degrau, também é útil expressá-la como uma porcentagem da saída de fundo de escala.

$$resolução\% = \frac{K}{A_{fs}} \cdot 100\%$$

- Ex: resolução(%) = (1V/15V) x 100% = 6,67%

# Exercícios

---

- Questão 4:
- Um DAC de 10 bits tem tamanho de degrau de 10mV. Determine a tensão de saída de fundo de escala e a resolução percentual.

# Exercícios

---

- Resolução da Questão 4:
- Com 10 bits, existem  $2^{10} - 1 = 1023$  degraus de 10mV cada.
- A saída de Fundo de escala será, portanto, 10mV multiplicados por 1023 = 10,23V

$$resolução\% = \frac{K}{A_{fs}} \cdot 100\% = \frac{10mV}{10,23V} \cdot 100\% \approx 0,1\%$$

# Resolução percentual

---

- O exercício 4 ajuda a ilustrar o fato de que a resolução percentual se torna menor conforme o número de bits de entrada aumenta.
- De fato a resolução percentual ainda pode ser calculada como:

$$resolução\% = \frac{1}{(2^n - 1)} \cdot 100\%$$

- Portanto, é apenas o número de bits que determina a resolução percentual.

# O que significa resolução?

---

- A resolução determina quantos valores possíveis de tensão existirão na saída do DAC.
- Para um DAC de 6 bits existirão 63 degraus possíveis de 0,159V entre 0V e 10V.
- Para um DAC de 8 bits existirão 255 degraus possíveis de 0,039V entre 0V e 10V.
- Quanto maior o número de bits, mais fina será a resolução.

# O que significa resolução?

- O projetista deve decidir qual a resolução é necessária com base no desempenho requerido pelo sistema projetado.
- A resolução limita o quanto a saída de um DAC pode estar próxima de um determinado valor analógico.
- O custo dos DACs aumenta com o aumento do número de bits e portanto, o projetista usará apenas a quantidade de bits necessária.



# Exercícios

- Questão 5:
- A figura a seguir mostra um computador controlando a velocidade de um motor. A corrente analógica de 0 a 2 mA do DAC é amplificada para produzir velocidade no motor de 0 a 1000 rpm. Quantos bits deveriam ser usados para que o computador fosse capaz de produzir uma velocidade no motor que estivesse, no máximo, a 2 rpm da velocidade desejada?

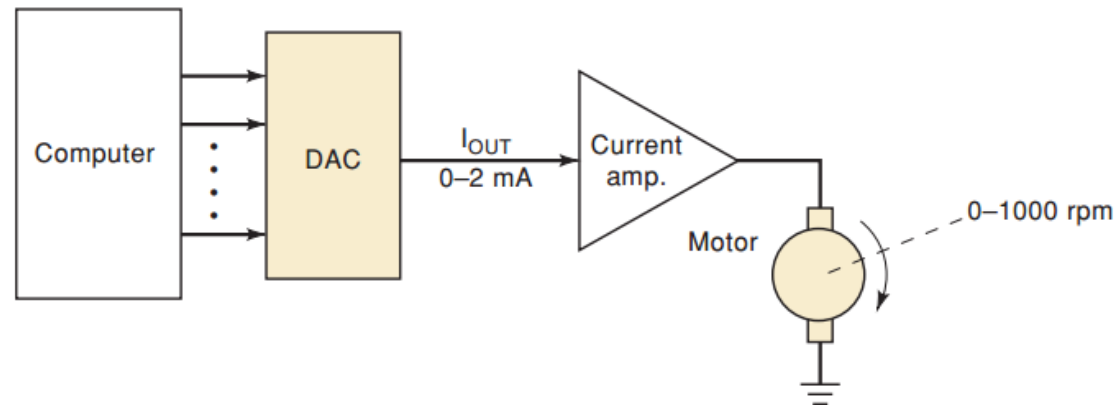
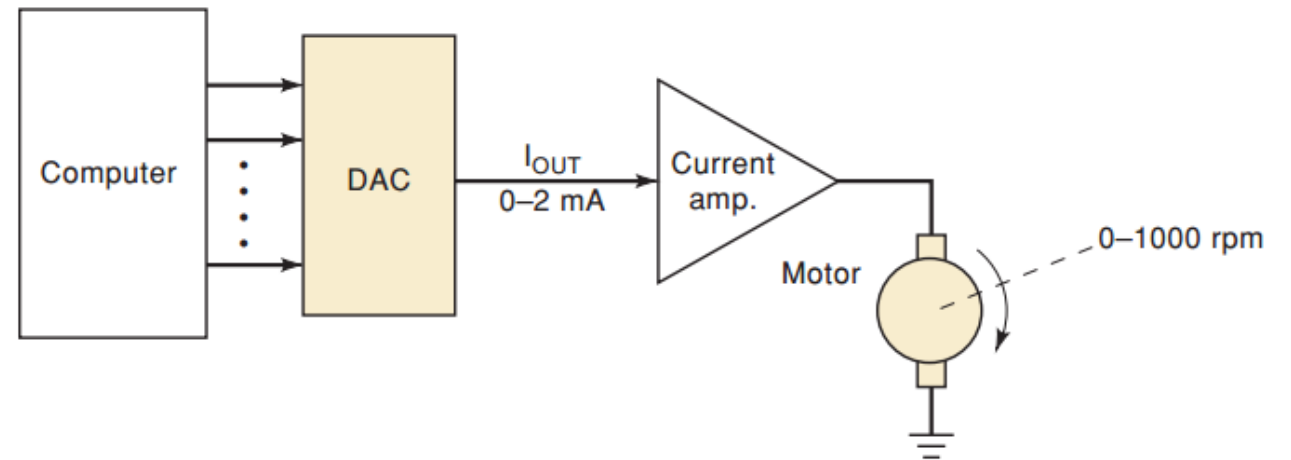


FIGURE 11-4 Example 11-5.

# Exercícios

- Resolução Questão 5:
- A velocidade do motor variará de 0 a 1000 rpm conforme o DAC vai de 0 ao fundo de escala.
- O tamanho do degrau precisa ser inferior a 2 rpm:
- $1000 \text{ rpm} / 2 \text{ rpm} = 500 \text{ degraus}$
- $2^n - 1 \geq 500$
- Portanto, **n = 9** para que  $2^n$  seja maior que 500.



# Exercícios

---

- Questão 6:
- Utilizando 9 bits, a que valor próximo de 326 rpm a velocidade do motor pode ser ajustada?

# Exercícios

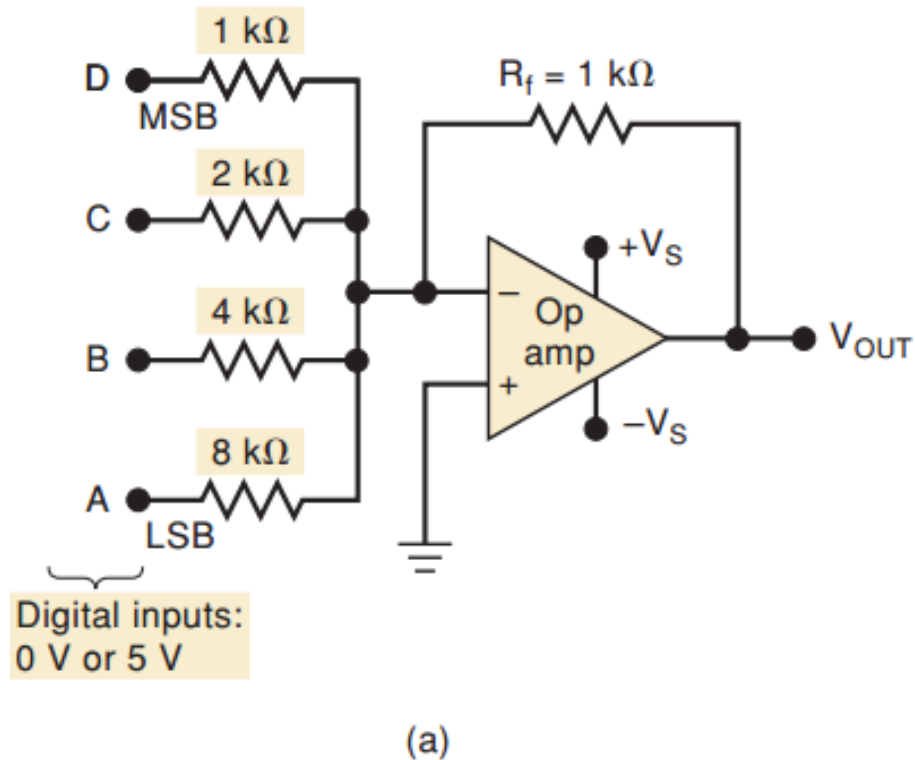
---

- Resolução Questão 6:
- 9 bits » 511 degraus
- Resolução =  $1000 \text{ rpm} / 511 = 1,957 \text{ rpm}$
- Número de degraus para 326 rpm
- $326 / 1,957 = 166,58$  » por não ser um valor inteiro, arredonda-se para 167.
- Velocidade real do motor:
- $167 \times 1,957 = \mathbf{326,8 \text{ rpm}}$

# TOPOLOGIAS DE CONVERSORES D/A

# Circuitos conversores D/A

- Resistores binariamente ponderados ou rede ponderada



Input code				$V_{OUT}$ (volts)
D	C	B	A	
0	0	0	0	0
0	0	0	1	-0.625 ← LSB
0	0	1	0	-1.250
0	0	1	1	-1.875
0	1	0	0	-2.500
0	1	0	1	-3.125
0	1	1	0	-3.750
0	1	1	1	-4.375
1	0	0	0	-5.000
1	0	0	1	-5.625
1	0	1	0	-6.250
1	0	1	1	-6.875
1	1	0	0	-7.500
1	1	0	1	-8.125
1	1	1	0	-8.750
1	1	1	1	-9.375 ← Full-scale

# Exercício

---

- (a) Determine o peso de cada bit de entrada do circuito da Figura do slide 38.
- (b) Mude  $R_f$  para  $250\Omega$  e determine a saída de fundo de escala.

# Exercício

---

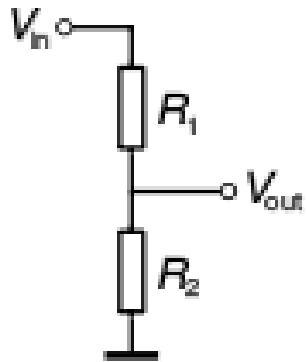
- Resposta:
- (a):
- O MSB tem ganho unitário, portanto seu peso é de **5V**
- Segundo MSB é  $5/2 = \mathbf{2,5V}$
- Terceiro MSB é  $5/4 = \mathbf{1,25V}$
- E quarto MSB = LSB é  $5/8 = \mathbf{0,625V}$
- (b):
- Se  $R_f$  diminuir para  $250\ \Omega$ , estará diminuindo num fator de 4. O peso de cada entrada será quatro vezes menor
- Saída de Fundo de escala =  $-9,375/4 = \mathbf{-2,344V}$



# Rede R/2R

---

Neste circuito, dois resistores são ligados em série como no diagrama a seguir:



A tensão de saída,  $V_{out}$ , é dada pela equação

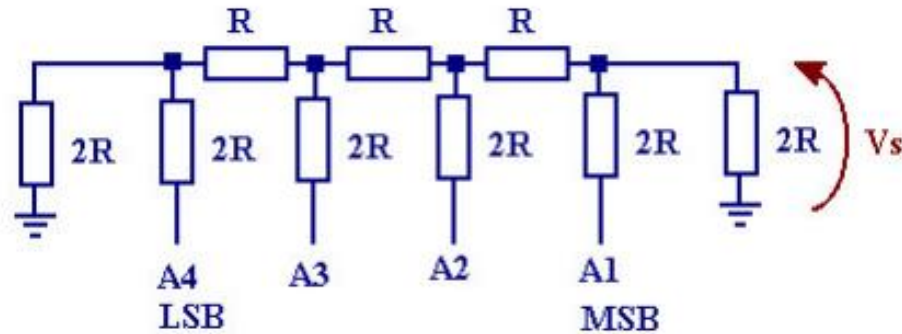
$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{in}$$

A partir desta fórmula, fazendo  $R_1 = R_2$ , temos que

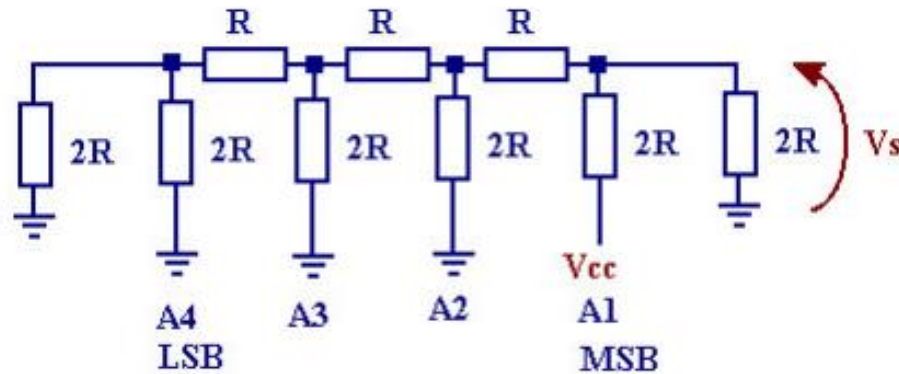
$$V_{out} = \frac{1}{2} \cdot V_{in}$$

# Rede R/2R

-Faz a conversão digital-analógica com a vantagem de utilizar apenas dois valores de resistores:

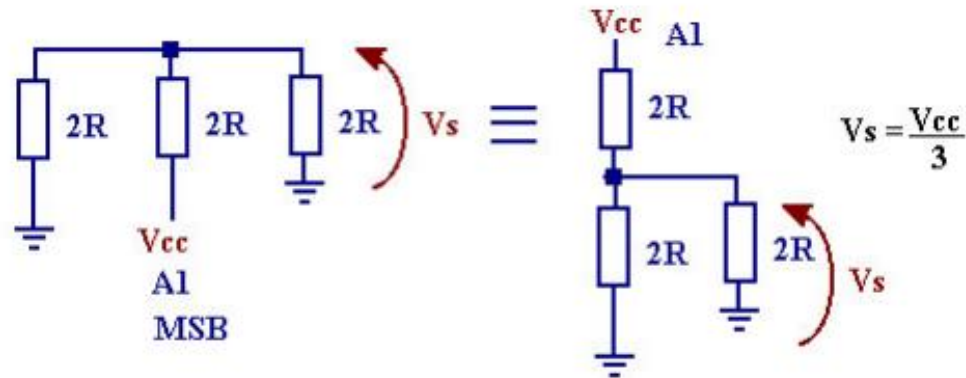


-Considerando  $A_1A_2A_3A_4 = 1000$ , teremos:



# Rede R/2R

-Calculando o resistor equivalente antes a entrada  $A_1$  teremos:



-Analogamente, podemos calcular a tensão de saída para outras entradas:

$A_1 A_2 A_3 A_4$	$V_s$
0 1 0 0	$V_s = \frac{V_{cc}}{6}$
0 0 1 0	$V_s = \frac{V_{cc}}{12}$
0 0 0 1	$V_s = \frac{V_{cc}}{24}$

-Novamente o teorema da superposição de circuitos elétricos pode ser usado aqui, assim teremos:

$$V_s = V_{cc} \left( \frac{A_1}{3} + \frac{A_2}{6} + \frac{A_3}{12} + \frac{A_4}{24} \right)$$

# Rede R/2R

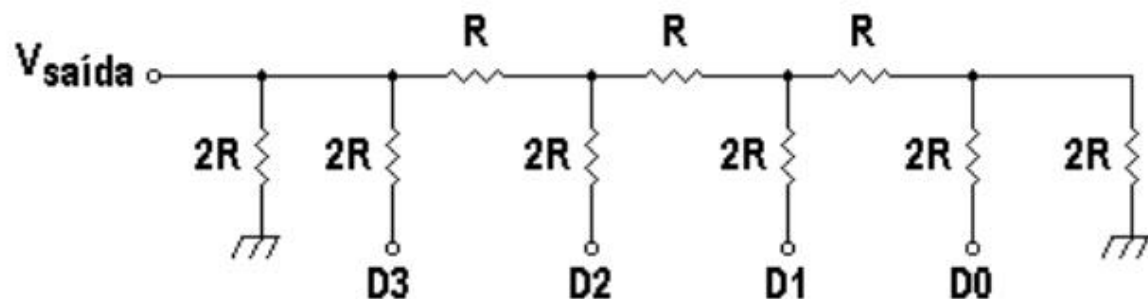


Figura 05: Rede R-2R para 4 bits.

Nas Figura 05, tem-se que **D3** é o bit mais significativo, o nível lógico 1 corresponde a **V** Volts, e que o nível lógico 0 corresponde a **0** Volts.

Supondo-se que na entrada digital tenha-se **D[3..0]=1000**, o circuito elétrico equivalente é:

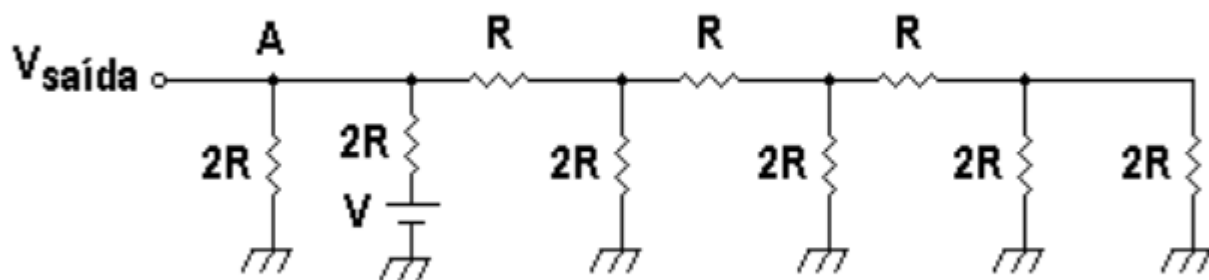
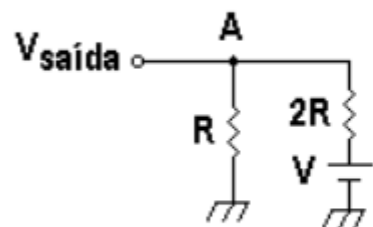


Figura 06: Análise para entrada 1000.

# Rede R/2R

A resistência equivalente entre o nó **A** e o terra é **R**. Portanto,



$$V_{\text{saída}} = \frac{V \cdot R}{3 \cdot R} = \frac{V}{3}$$

Figura 07: O circuito equivalente para entrada 1000.

Para **D[3..0] = 0100**:

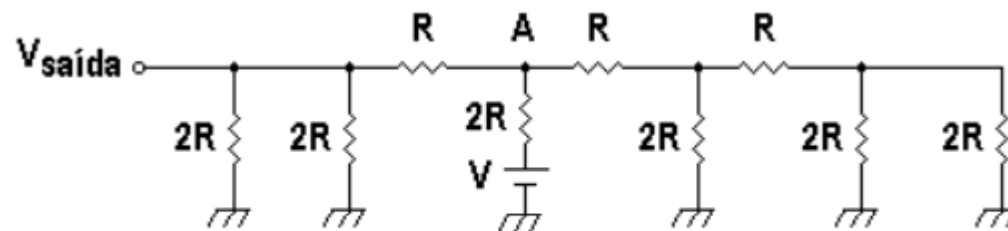


Figura 08: Análise para entrada 0100.

A tensão de saída pode ser calculada considerando-se que o no nó **A** se tem  $\frac{V}{3}$ .

$$V_{\text{saída}} = \frac{V}{3} \cdot \frac{1}{2} = \frac{V}{6}$$

# Rede R/2R

---

Para **D[3..0] = 0010**:

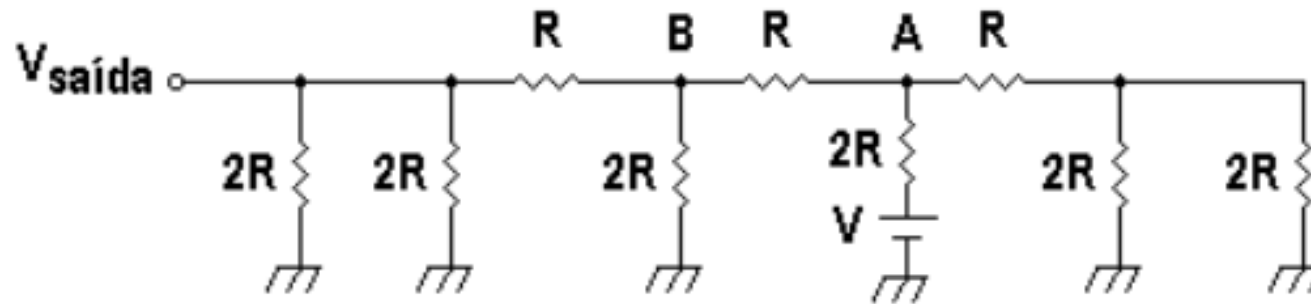


Figura 09: Análise para entrada 0010.

$$V_A = \frac{V}{3}, \quad V_B = \frac{V}{6}, \quad V_{saída} = \frac{V}{12}$$

# Rede R/2R

Para  $D[3..0] = 0001$ :

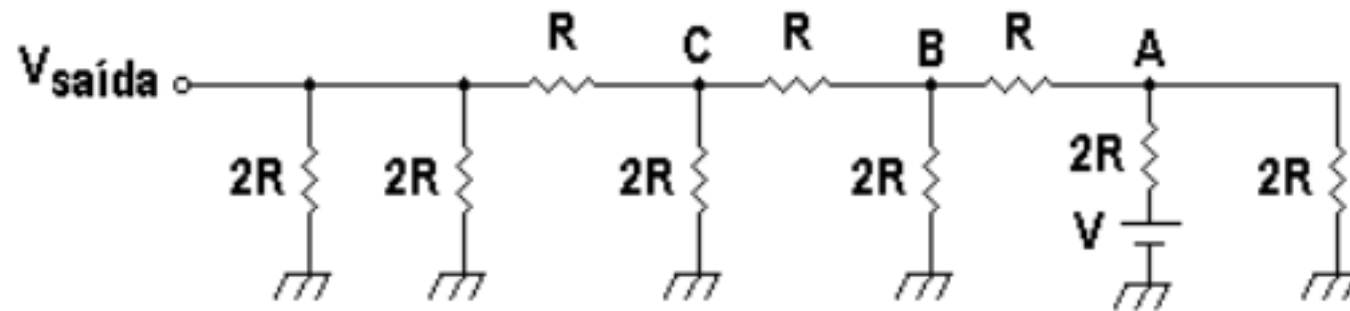


Figura 10: Análise para entrada 0001.

$$V_A = \frac{V}{3}, \quad V_B = \frac{V}{6}, \quad V_C = \frac{V}{12}, \quad V_{\text{saída}} = \frac{V}{24}$$

# Rede R/2R

---

Para os valores restantes de entrada digital, a saída pode ser facilmente calculada considerando o teorema da superposição.

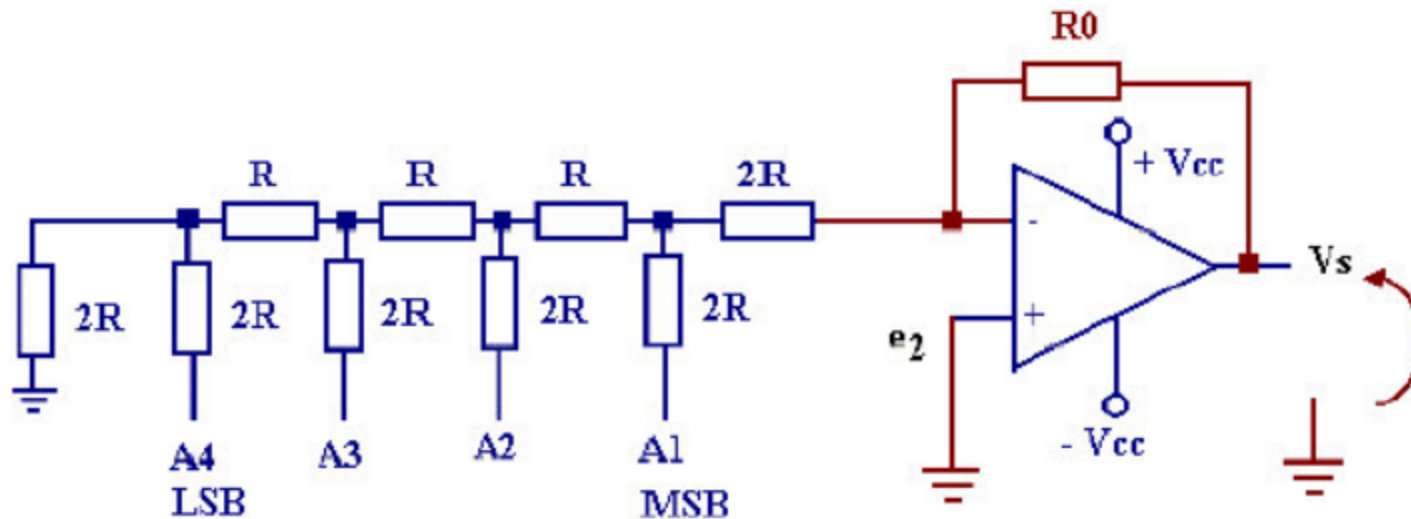
D3	D2	D1	D0	Código Hex.	Saída
0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	1	V/24
0	0	1	0	2	2V/24
0	0	1	1	3	3V/24
0	1	0	0	4	4V/24
0	1	0	1	5	5V/24
0	1	1	0	6	6V/24
0	1	1	1	7	7V/24
1	0	0	0	8	8V/24
1	0	0	1	9	9V/24
1	0	1	0	A	10V/24
1	0	1	1	B	11V/24
1	1	0	0	C	12V/24
1	1	0	1	D	13V/24
1	1	1	0	E	14V/24
1	1	1	1	F	15V/24



# Rede R/2R

## CONVERSOR D/A – REDE R-2R - COM AMPLIFICADOR OPERACIONAL

-Este conversor também pode ser acoplado no amplificador operacional. Com isso melhora o acoplamento entre este sistema e o restante do circuito. Outra vantagem desse sistema é ganho do sistema.



$$V_s = -\frac{R_0}{2R} V \left[ \frac{A_1}{3} + \frac{A_2}{6} + \frac{A_3}{12} + \frac{A_4}{24} \right]$$

# Especificação de DAC's

---

- Resolução:
- A resolução percentual de um DAC depende do número de bits. Por essa razão, a resolução é especificada pelo número de bits.
- Um DAC de 10 bits tem uma resolução melhor (menor) que um DAC de 8 bits

# Especificação de DAC's

---

- Precisão:
- Costuma ser especificada de duas formas, ambos expressos como porcentagem da saída de fundo de escala (%FS).
  - Erro de fundo de escala
  - Erro de linearidade
- Erro de Fundo de escala:
  - Desvio máximo da saída do DAC do valor esperado.

# Especificação de DAC's

---

- Precisão:
- **Exemplo:** Assuma que o Conversor DA do slide 2 possui uma precisão de  $\pm 0,01\%$  FS.
- Como o fundo de escala desse conversor é 9,375V esta porcentagem de precisão possui um valor de:
  - $\pm 0,01\% \times 9,375V = \pm 0,9375mV$
- Isso significa que qualquer valor de saída poderá possuir um desvio de  $\pm 0,9375mV$ .
- Resolução e Precisão devem ser compatíveis.

# Exercício

---

- Um conversor DA de 8 Bits possui saída de fundo de escala de 2mA e erro de fundo de escala de  $\pm 0,5\%$  FS.
- Qual será a corrente de saída para uma entrada de 10000000?

# Exercício

---

- Resposta do Exercício:
- Resolução =  $2\text{mA}/255 = \mathbf{7,84\mu A}$ .
- $10000000 = 128$
- Valor de saída ideal =  $128 \times 7,84\mu A = \mathbf{1004\mu A}$ .
- Erro de precisão será de  $\pm 0,5\% \times 2\text{mA} = \mathbf{\pm 10\mu A}$
- Valor de saída estará entre **994 $\mu A$  a 1014 $\mu A$** .

# Especificação de DAC's

---

- Erro de *Offset*:
- Idealmente uma entrada de valor 0000 terá saída com valor nulo.
- Na prática, essa saída pode apresentar algum valor, o qual recebe o nome de erro de *offset*.

**TABLE 11-3**

Input Code	Ideal Output (mV)	Actual Output (mV)
0000	0	2
0001	100	102
1000	800	802
1111	1500	1502

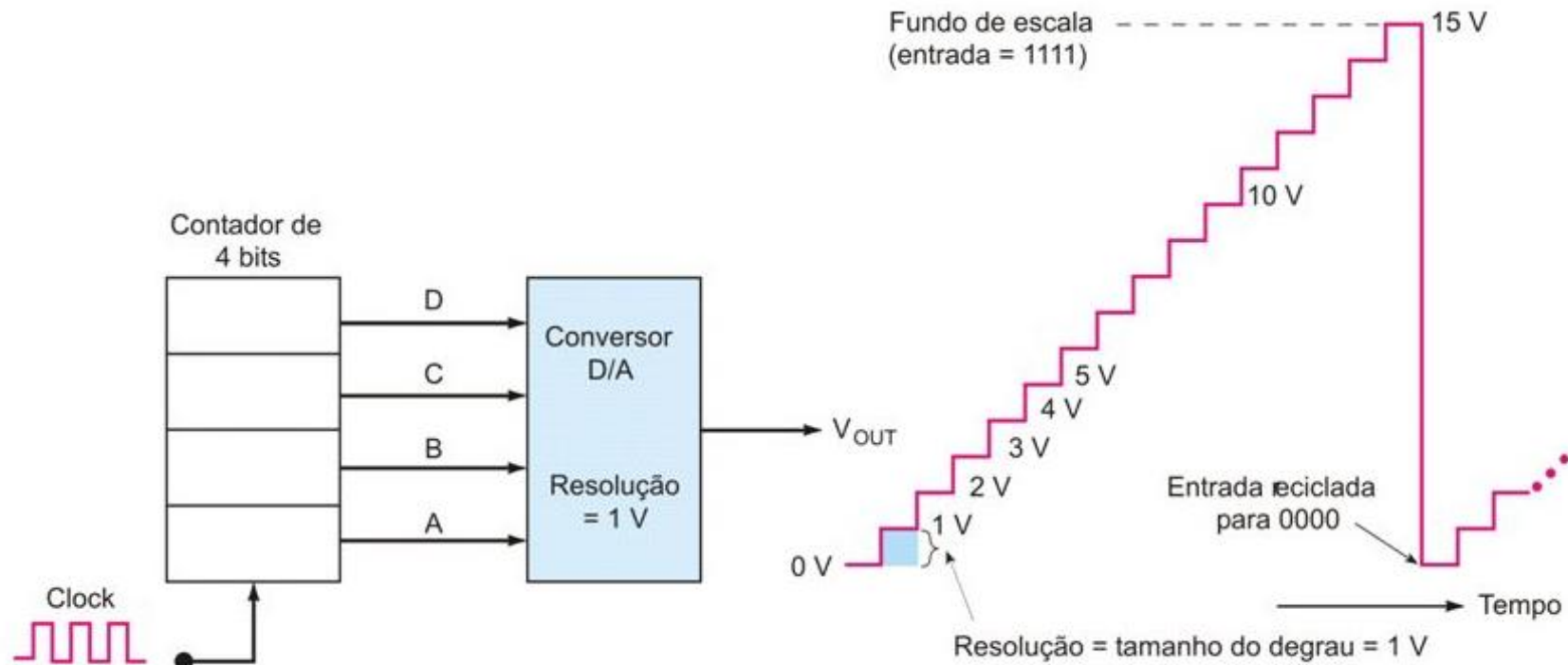
- Muitos DACs possuem um ajuste de *offset*, através de um potenciômetro.

# CONVERSÃO A/D



# Revisão – Conversor D/A

- Converter um valor digital em um sinal analógico.

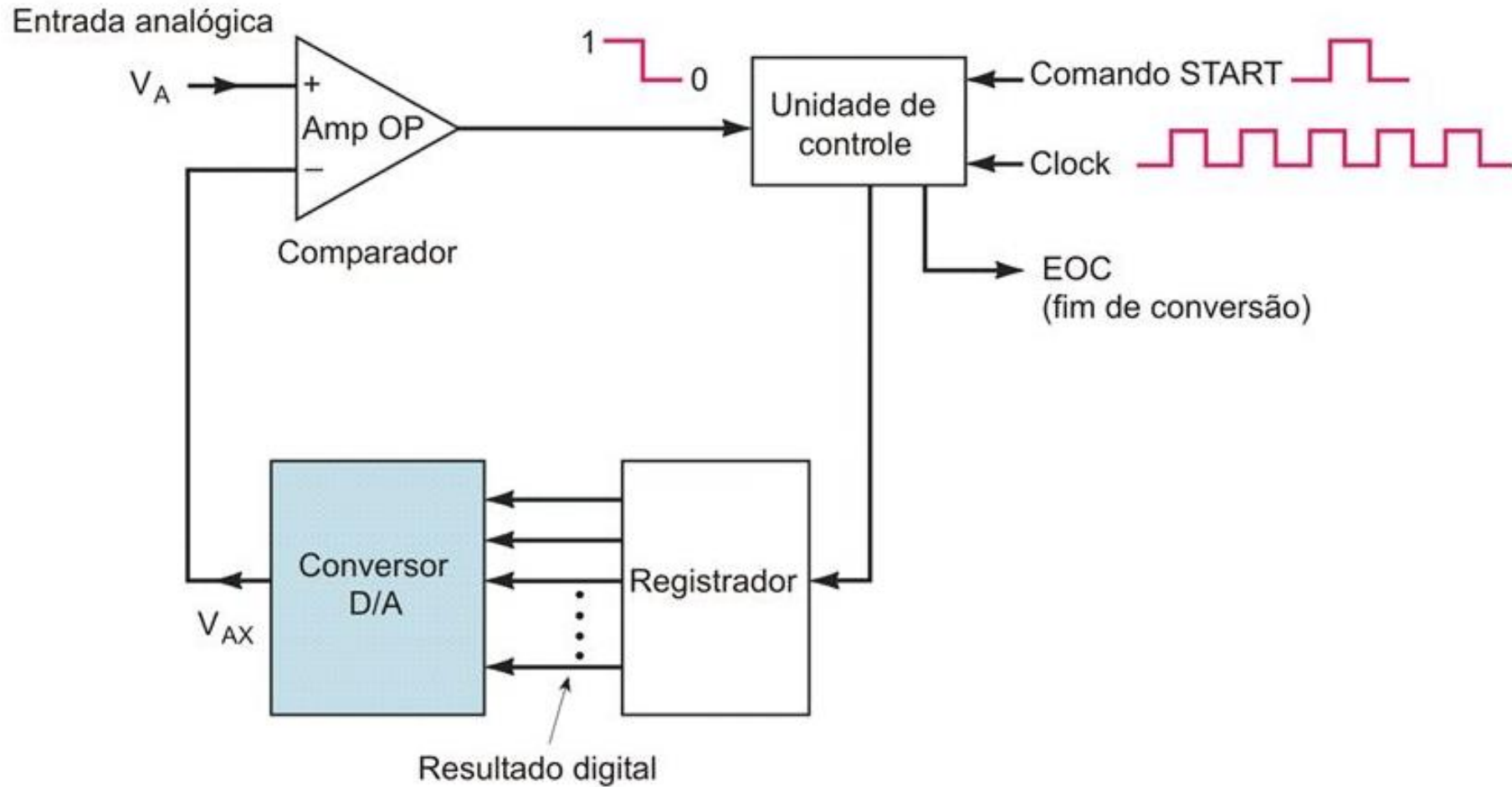


# O conversor A/D

---

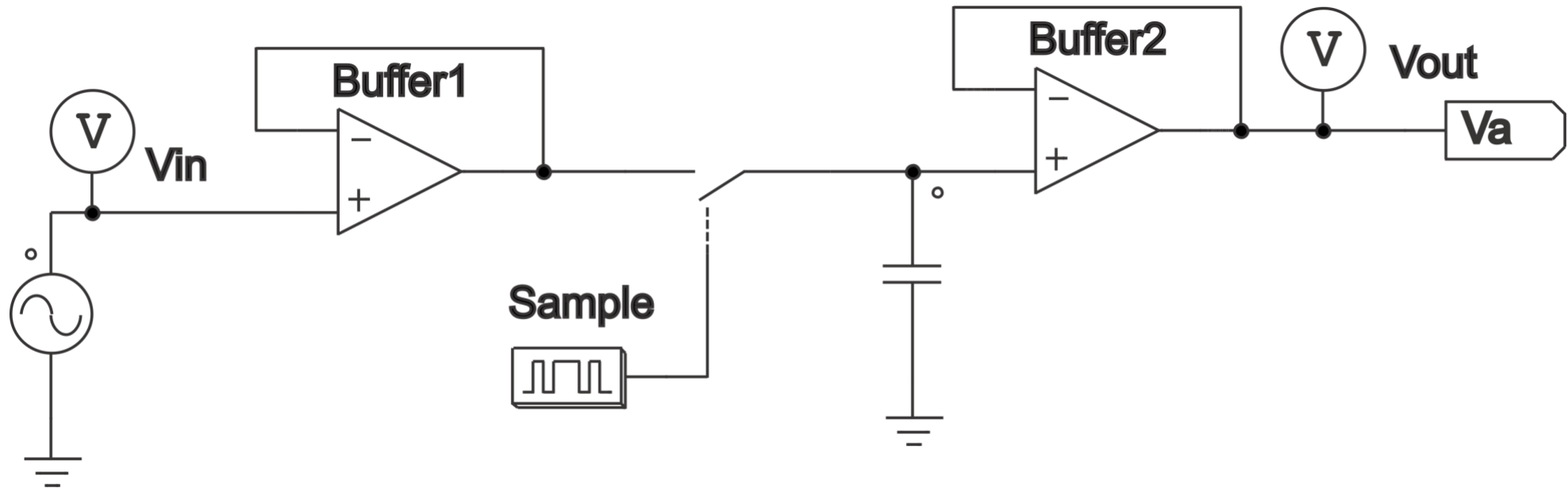
- Recebe tensão analógica de entrada e, após certo tempo, produz um código digital de saída, que representa a entrada analógica.
- Conversão A/D é mais complexa e consome mais tempo que a conversão D/A.
- Alguns tipos de conversores A/D utilizam conversores D/A em seu circuito.
- Conceitos estudados na conversão D/A são válidos na conversão A/D: resolução, número de bits, fundo de escala, entre outros.

# Diagrama geral de uma classe de ADC's

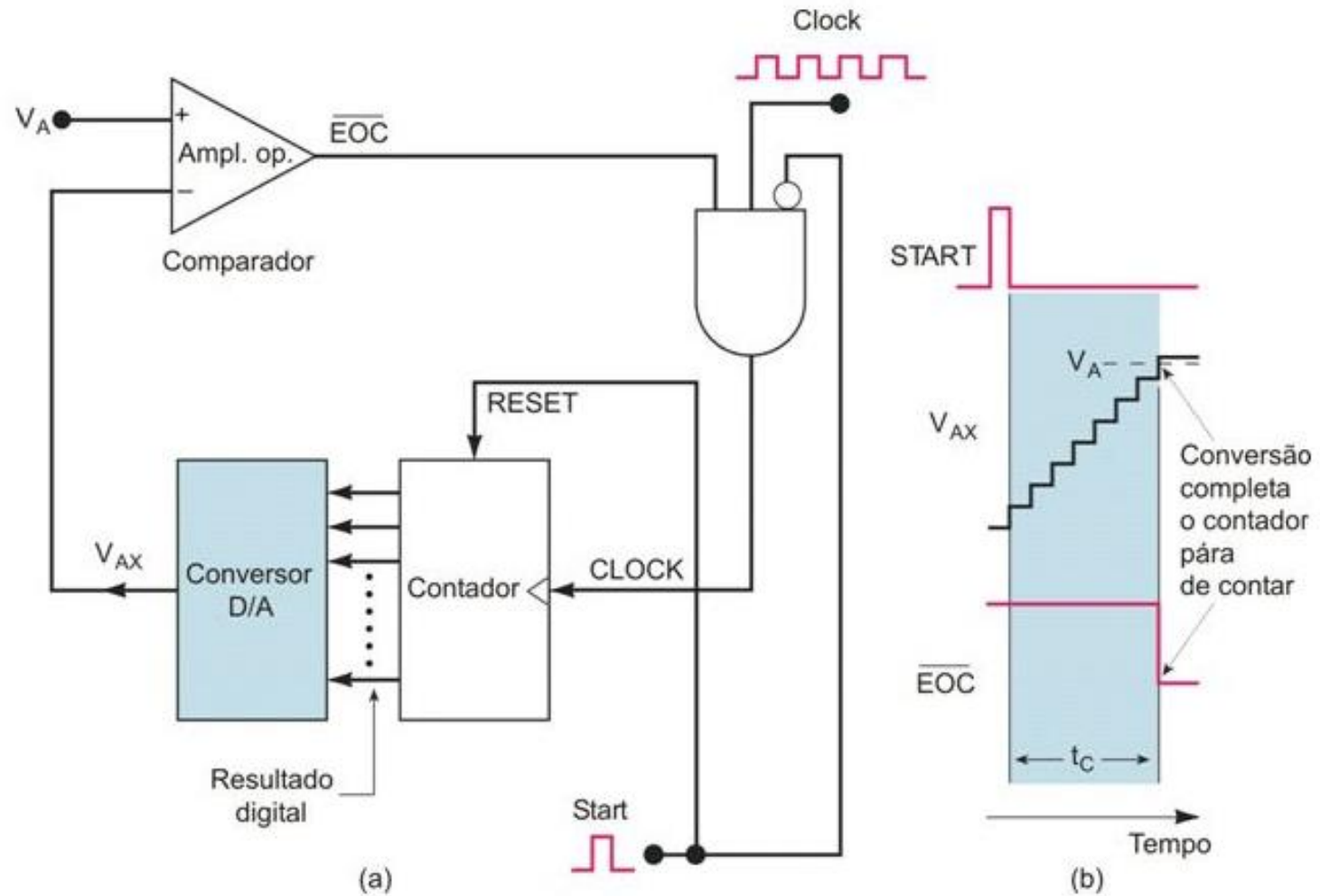


# Circuito *Sample & Hold*

---



# ADC de Rampa Digital



# ADC de Rampa Digital

---

- Tempo de conversão do ADC de rampa digital.

$$T_c = valor\_contador \cdot T_{clock}$$

$$T_c(\text{max}) = (2^n - 1) \cdot T_{clock}$$

$$T_c(\text{med}) = \frac{T_c(\text{max})}{2}$$

# Exercício Resolvido

---

- Exercício 1: Suponha os seguintes valores para o ADC de rampa digital apresentado nos slides anteriores: frequência de *clock* de 1MHz, saída de fundo de escala do DAC de 10,23V e entrada de 10 bits.  $V_T=0,1\text{mV}$ . Determine:
  - (a) O equivalente digital obtido para  $V_A=3,728\text{V}$ .
  - (b) O Tempo de conversão.
  - (c) A resolução do conversor.

# Exercício Resolvido

---

- Solução:
  - (a) DAC de 10 bits e fundo de escala 10,23V.
  - Número de degraus possíveis:

$$2^{10} - 1 = 1023$$

- Tamanho do degrau

$$\frac{10,23}{1023} = 10mV$$

- $V_{AX}$  aumenta em degraus de 10mV
- $V_A = 3,728V$  e  $V_T = 0,1mV$



# Exercício Resolvido

---

- Solução:
  - (a)
  - $V_{AX}$  precisa ter valor de pelo menos  $V_A + V_T$ , ou seja,
  - $V_{AX} = 3,7281V$

$$Degraus = \frac{3,7281}{10mV} = 372,81 = 373$$

$$convers\tilde{a}o = 373_{10} = 0101110101_2$$

# Exercício Resolvido

---

- Solução:
  - (b) Tempo de conversão
  - Contador precisa contar até 373. Numa frequência de 1MHz.

$$T_{clock} = \frac{1}{1MHz} = 1\mu s$$

$$T_c = 373\mu s$$

# Exercício Resolvido

---

- Solução:
  - (c) Resolução (tamanho do degrau)
  - Número de degraus possíveis:

$$2^{10} - 1 = 1023$$

- Tamanho do degrau

$$\frac{10,23}{1023} = 10mV$$

# Exercícios

---

- 1) Um ADC de rampa digital de oito bits com resolução de 40mV usa frequência de *clock* de 2,5MHz e comparador com  $V_T = 1\text{mV}$ . Determine os seguintes valores:
  - (a) A saída digital para  $V_A = 6\text{V}$ .
  - (b) A saída digital para  $V_A = 6,035\text{V}$ ;
  - (c) O tempo máximo e médio de conversão.
- 2) Por que as saídas digitais para os itens (a) e (b) do exercício 1 são iguais?
- 3) O que aconteceria no ADC do exercício 1 se uma tensão analógica de  $V_A = 10,835\text{V}$  fosse aplicada na entrada?

# Resolução e Precisão

---

- Deve-se notar que o tamanho do degrau do DAC interno ao conversor A/D é a menor unidade de medida.
- Diminuindo o tamanho do degrau, diminui-se os erros entre a entrada analógica e a saída digital do conversor A/D.
- Entretanto, sempre haverá uma diferença entre o valor da entrada analógica e o da saída digital. Essa diferença recebe o nome de **erro de quantização**.

# Resolução e Precisão

---

- Assim, o valor de  $V_{AX}$  é uma aproximação de  $V_A$  e o melhor que pode-se esperar é que  $V_{AX}$  represente um valor entre  $V_A$  e  $V_A +$  a resolução do conversor D/A.
- Esse erro de quantização é comumente representado como sendo um erro de +1LSB, indicando que a saída pode estar deslocada até o valor de +1LSB.

# Resolução e Precisão

---

- A especificação de precisão dos conversores A/D é proveniente de imprecisões construtivas. É a combinação da imperfeição dos componentes, como resistores, comparadores, chaves, etc.
- A precisão pode ser representada como uma porcentagem do fundo de escala, (%FS) como nos conversores D/A, mas é comumente especificada como + ou – n LSB, em que n representa um valor fracionário: + ou –  $\frac{1}{4}$  LSB.

## Exercício

---

- Determinado ADC de 8 bits (de rampa digital) possui entrada de fundo de escala de 2,55V. Ele ainda apresenta um erro especificado de + ou  $- \frac{1}{4}$  LSB. Determine o erro máximo de medida.



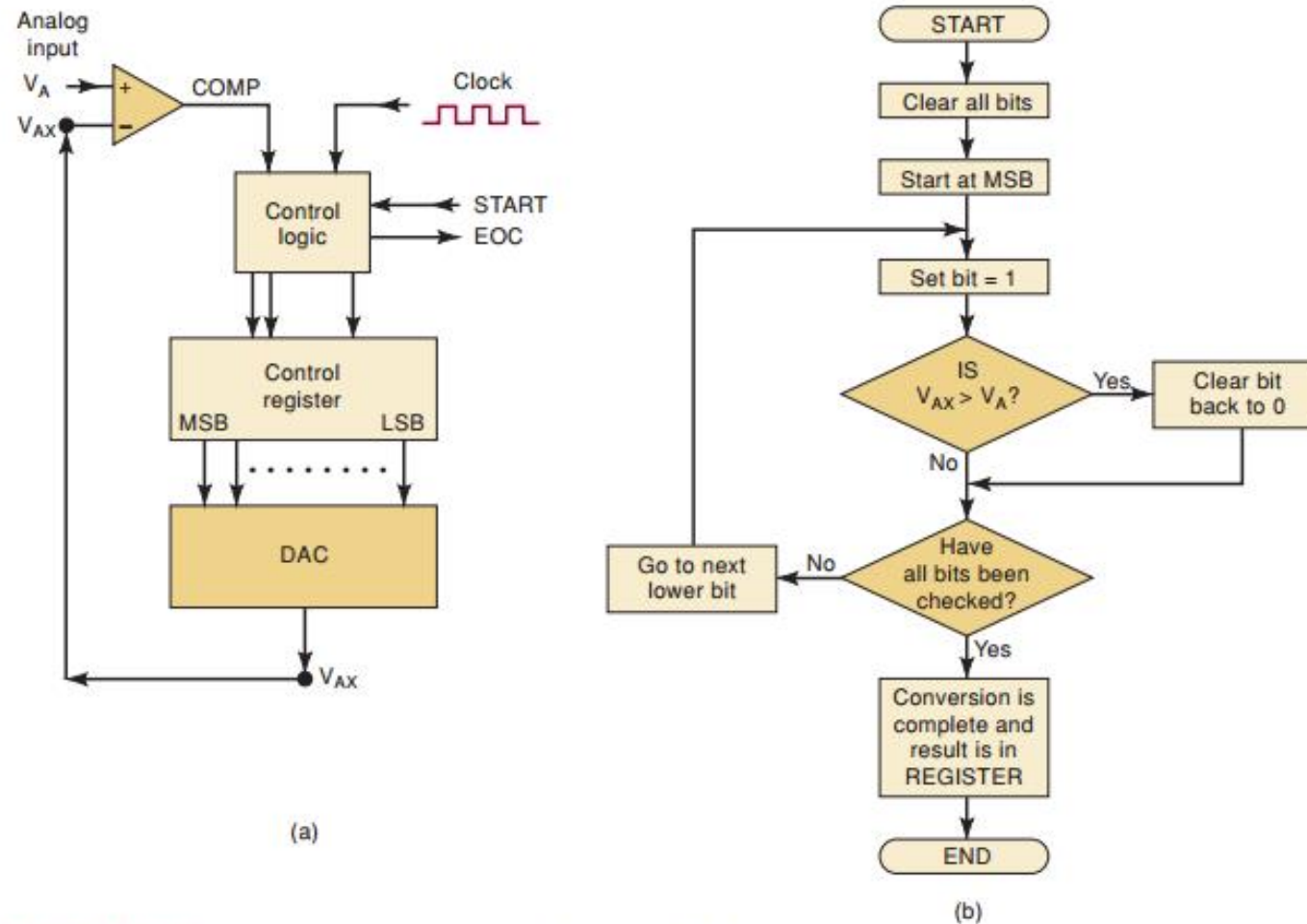
# Exercício

---

- **Resposta:**
- A resolução (degrau) é calculada como:
  - $2,55\text{V}/(2^8 - 1) = 10\text{mV}$ .
- Isso significa que mesmo que o ADC seja o mais preciso o possível, a saída  $V_{AX}$  pode estar deslocada de 10mV (Erro de quantização);
- O erro de precisão é de + ou -  $\frac{1}{4}$  , ou seja,  $\frac{1}{4}$  da resolução = **2,5mV**
- Assim, o erro total máximo possível é de **12,5mV**.

# CONVERSOR A/D DE APROXIMAÇÕES SUCESSIVAS

# A/D de Aproximações Sucessivas

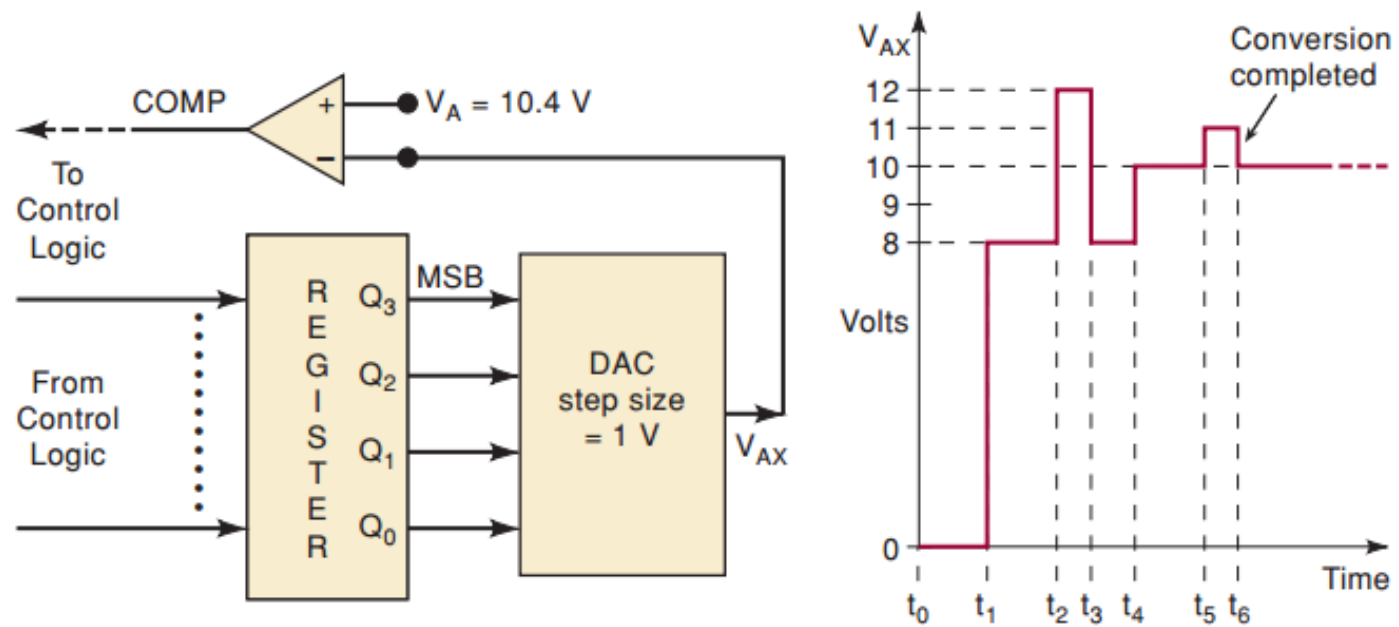


**FIGURE 11-18** Successive-approximation ADC: (a) simplified block diagram; (b) flowchart of operation.

# A/D de Aproximações Sucessivas

**FIGURE 11-19**

Illustration of four-bit SAC operation using a DAC step size of 1 V and  $V_A = 10.4$  V.

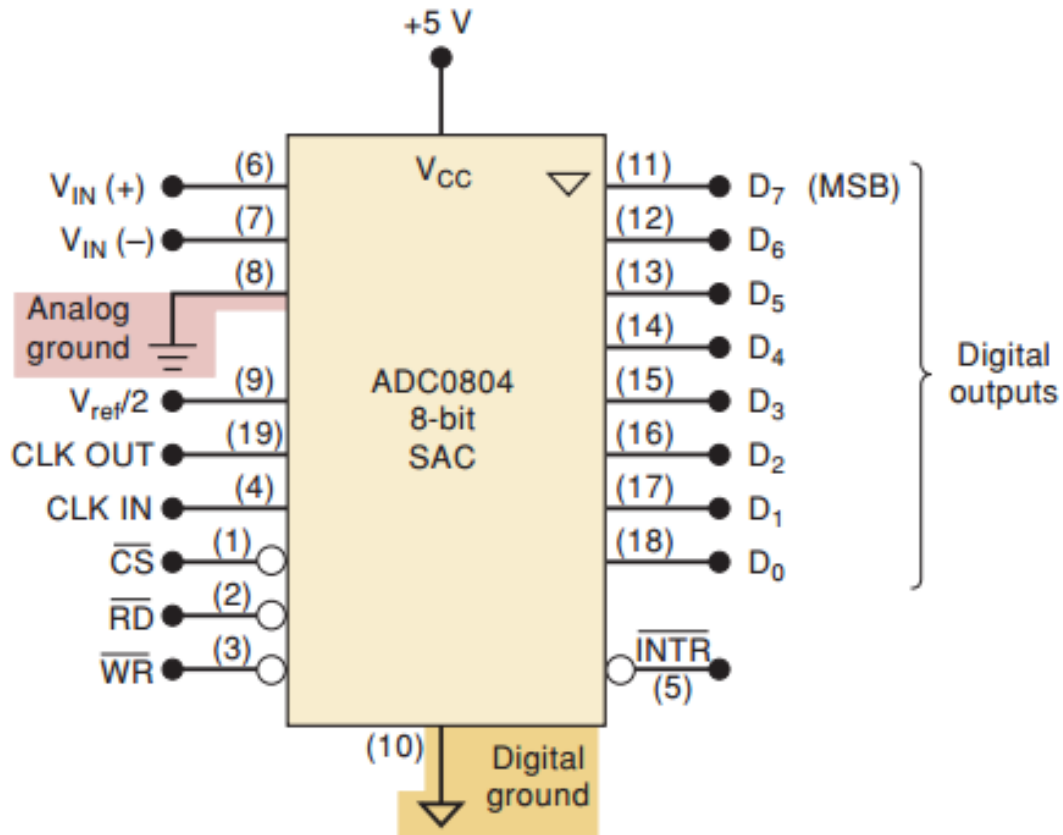


# A/D de Aproximações Sucessivas

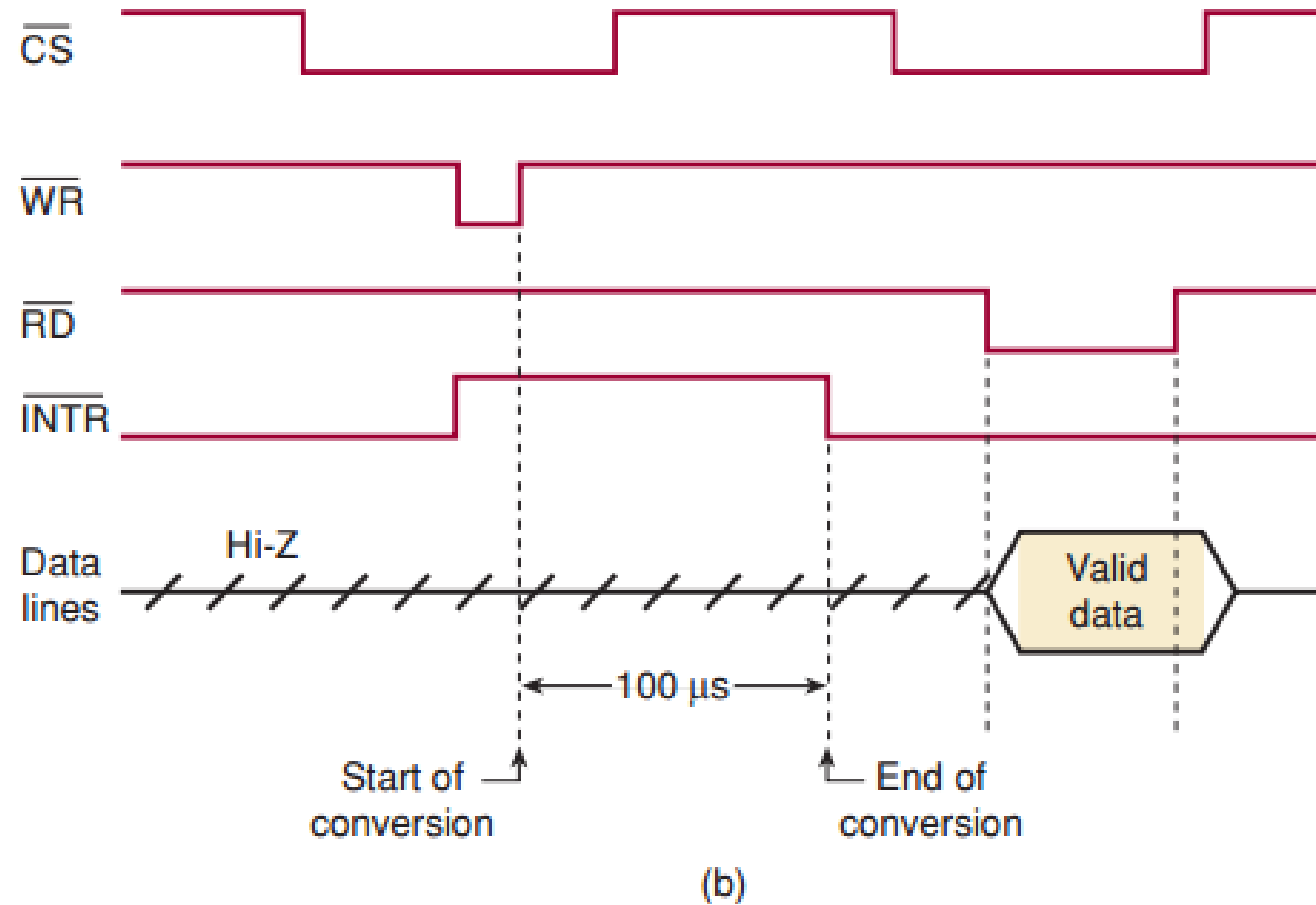
- Circuito mais complexo que ADC de rampa digital
- Tempo de conversão muito menor
- Valor fixo de tempo de conversão que não depende do valor da entrada

# CI ADC0804

**FIGURE 11-20** ADC0804 eight-bit successive-approximation ADC with tristate outputs. The numbers in parentheses are the IC's pin numbers.



# CI ADC0804



**FIGURE 11-21** (a) An application of an ADC0804; (b) typical timing signals during data acquisition.

# A/D de Aproximações Sucessivas

- Qual a vantagem principal do ADC de aproximações sucessivas sobre o ADC de rampa digital?
- Qual a maior desvantagem?
- (V) ou (F): O tempo de conversão pra o ADC de aproximações sucessivas aumenta a medida que a amplitude da entrada analógica aumenta.



# TEOREMA DA AMOSTRAGEM E ERRO DE *ALIASING*

# Amostragem (Aquisição de dados)

- Vivemos em um mundo analógico;
- Sinais que nos interessam são contínuos;
- Computadores são dispositivos digitais:
  - Dados finitos;
  - Discretos;
  - Limitados em precisão e magnitude.
- Como preencher a lacuna entre o mundo real e o mundo sintético dos computadores?

# Amostragem (Aquisição de dados)

- Registrar, de vez em quando, um valor;
- Por exemplo, uma música, amostrada a uma taxa de 16 bits a 44100 Hz, para dois canais:

$$(3 \text{ minutes}) \times \left(16 \frac{\text{bits}}{\text{sample}}\right) \times \left(44100 \frac{\text{samples}}{\text{second}}\right) \times 2.$$

Changing the units to make them uniform makes this:

$$\left(3 \text{ minutes} \frac{60 \text{ seconds}}{1 \text{ minute}}\right) \times \left(16 \frac{\text{bits}}{\text{sample}} \frac{1 \text{ byte}}{8 \text{ bits}}\right) \times \left(44100 \frac{\text{samples}}{\text{second}}\right) \times 2$$

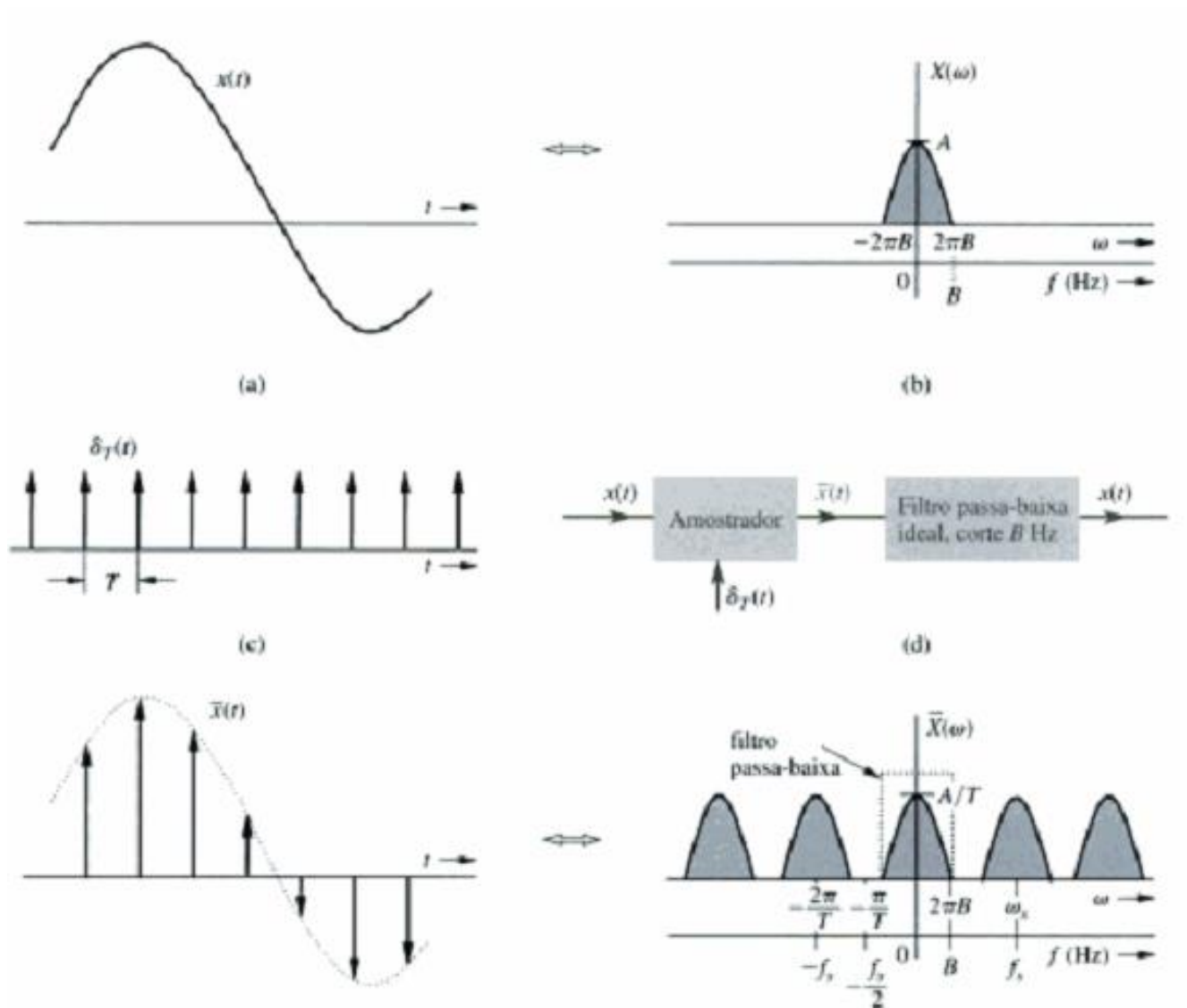
$$(180 \text{ seconds}) \times \left(2 \frac{\text{bytes}}{\text{sample}}\right) \times \left(44100 \frac{\text{samples}}{\text{second}}\right) \times 2$$

$$180 \times (2 \text{ bytes}) \times 44100 \times 2 = 31,752,000 \text{ bytes, approximately 30 MB.}$$

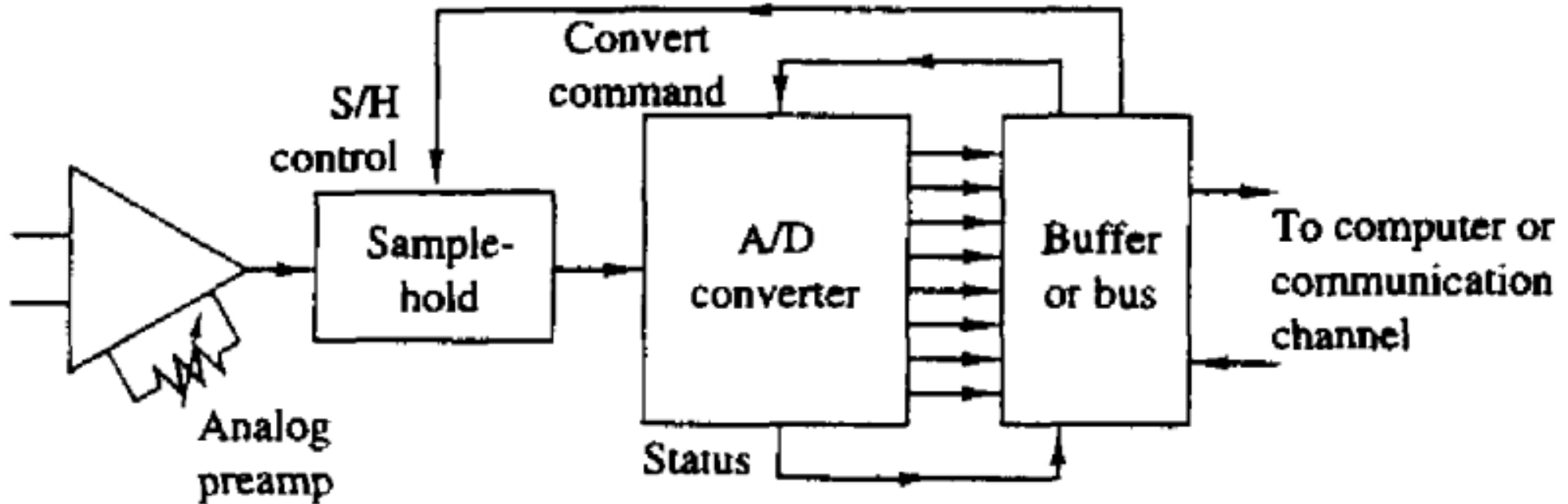
# Amostragem (Aquisição de dados)

- Antes de pensarmos na amostragem é necessário definirmos a faixa de frequência do sinal em que estamos interessados, a largura de banda;
- Na maioria das vezes utilizamos a frequência mais alta que nos interessa como a largura de banda, ou seja, entre 0 Hz e  $f_{\text{máx}}$ .

# Amostragem (Aquisição de dados)

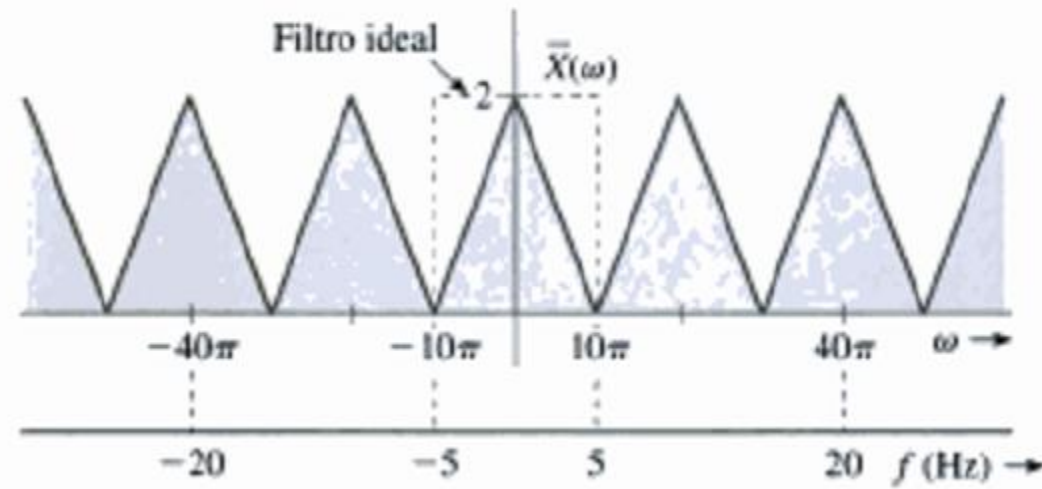
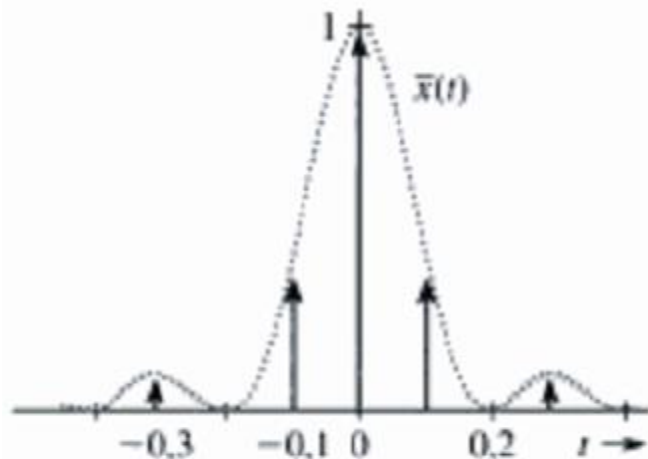


# Amostragem (Aquisição de dados)



# Amostragem (Aquisição de dados)

- Amostragem crítica:
- Taxa de amostragem equivale exatamente ao dobro da largura de banda;



# Amostragem (Aquisição de dados)

- Amostragem crítica:
  - Critério de Nyquist

$$f_{\text{sample}} \geq 2 \cdot f_{\text{máx}}$$

- Com isso é possível reconstruir o sinal de forma apropriada.

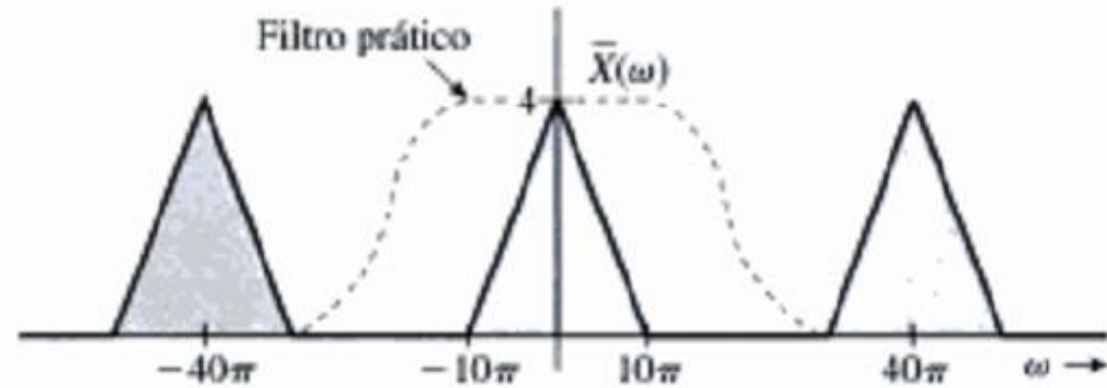
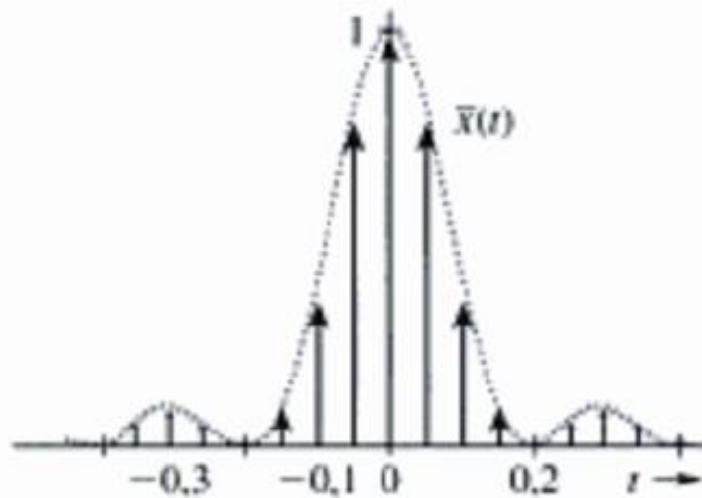


# Amostragem (Aquisição de dados)

- Sobreamostragem (oversampling):
  - Coleta de amostras com maior frequência do que o necessário;
  - Resulta em dados redundantes;
- Pode ser indesejado devido a limitações de hardware, como a incapacidade de processar o sinal com rapidez suficiente ou armazená-lo em memória;
- Pode ser desejado quando o hardware tem capacidade para isso, pois melhor será a aproximação em relação ao sinal original.

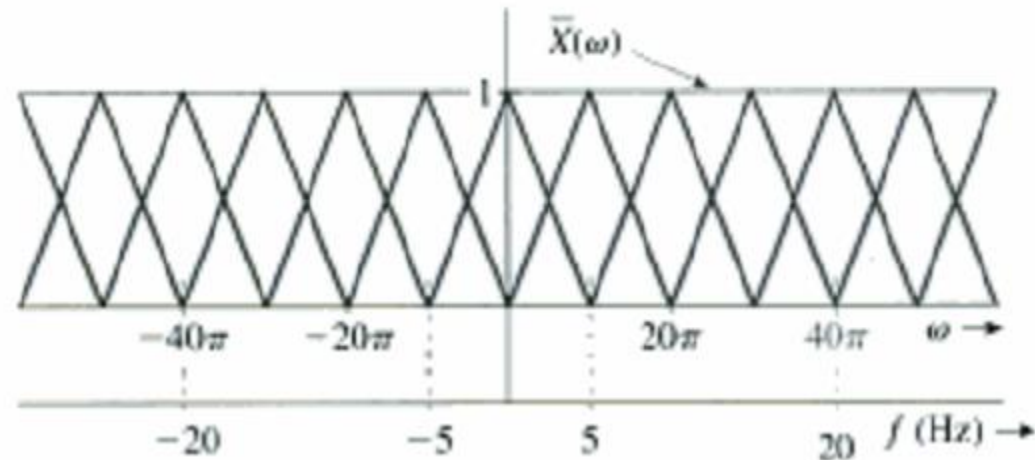
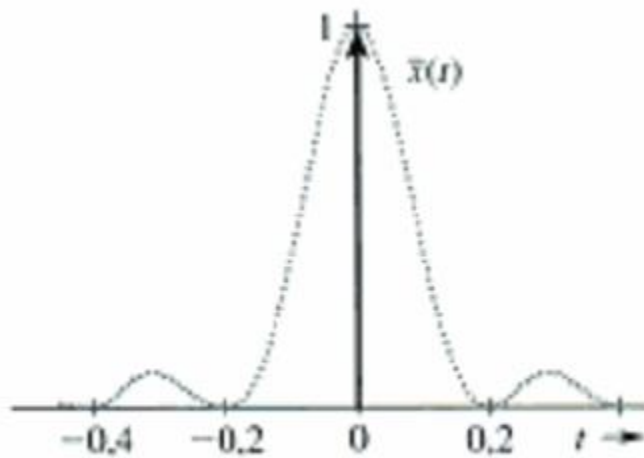
# Amostragem (Aquisição de dados)

- Sobreamostragem (oversampling):



# Amostragem (Aquisição de dados)

- Subamostragem (undersampling):
  - Ocorre quando não coletamos amostras suficientes (não atendemos ao critério de Nyquist);
  - Não é desejável, pois não é possível reconstruir o sinal original.



# Fenômeno do *Aliasing*

- Sobreposição espectral

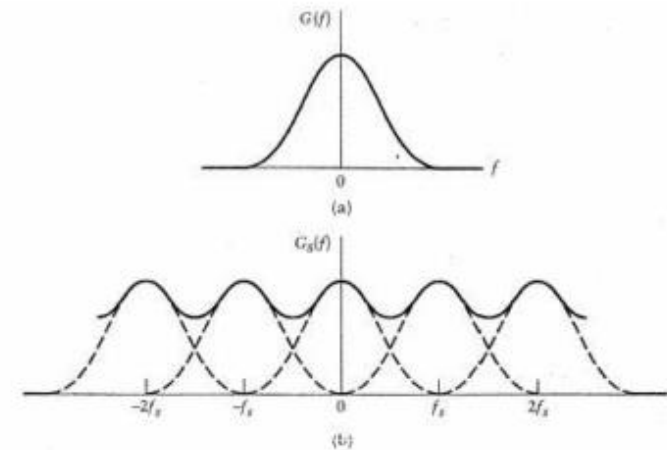
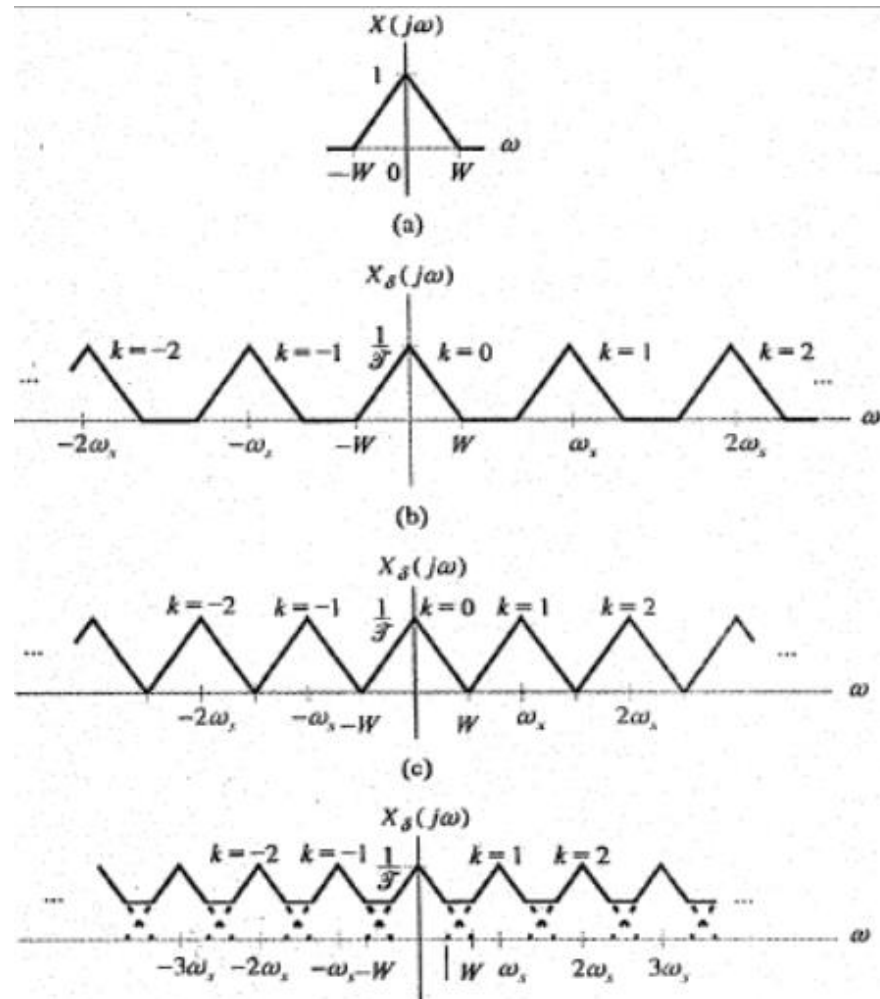


Figura 5.3 (a) Espectro do sinal. (b) Espectro de uma versão subamostrada do sinal, exibindo o fenômeno de aliasing.

# Fenômeno do *Aliasing*

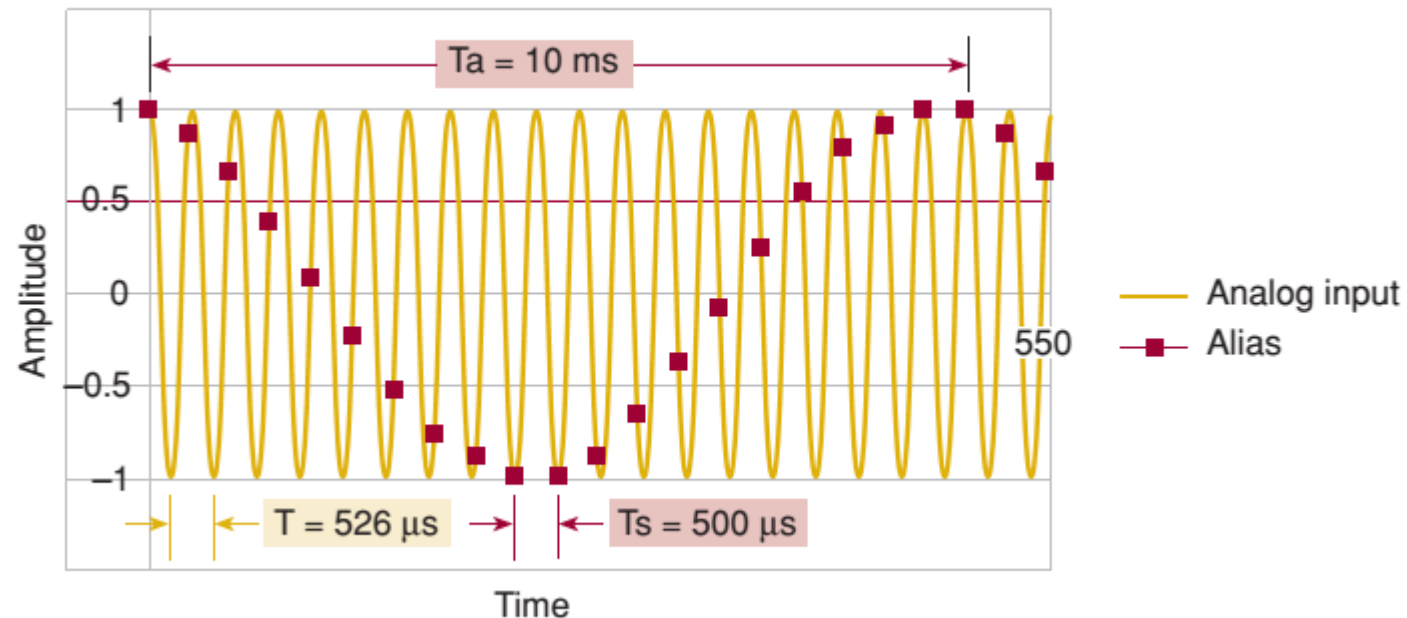
---

- E se eu amostrasse um sinal de áudio 10 kHz a uma taxa de 20000 amostras por segundo, mas existisse uma componente de 12 kHz que eu não percebi?
- Iria ocorrer o efeito do *aliasing*;
- O sinal falso que aparece possui frequência igual à diferença entre a frequência de amostragem (20 kHz) e a frequência do sinal que não foi considerado (12 kHz);
- No sinal reconstruído, ao invés de ouvir um tom na frequência de 12 kHz, ouviríamos um tom na frequência de 8 kHz que não fazia parte do sinal original.

# Fenômeno do *Aliasing*

- **Exemplo:**

- Frequência do sinal: 1900 Hz;
- Frequência de amostragem: 2000 Hz;
- Frequência do sinal falso devido ao *aliasing*: 100 Hz.

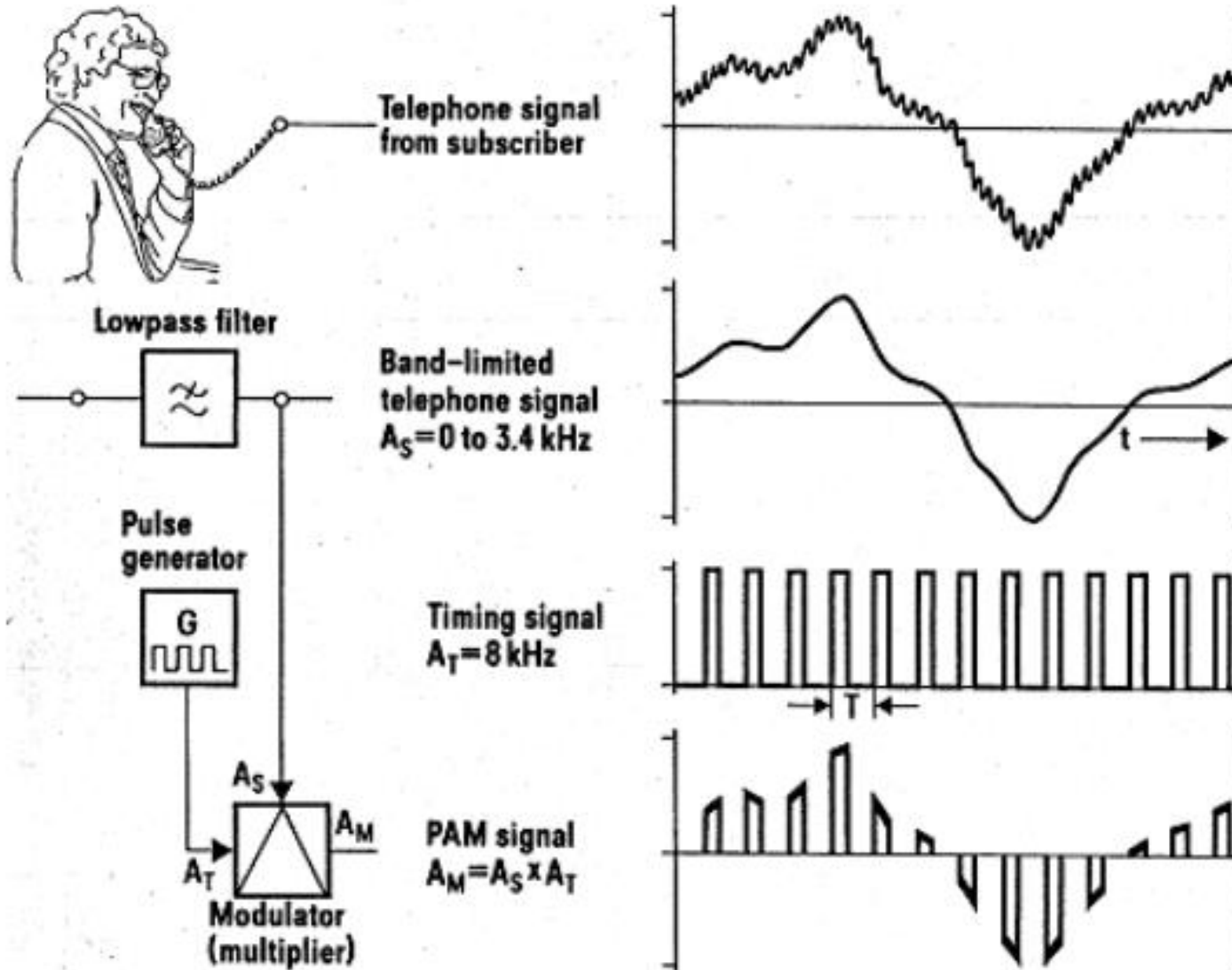


# Fenômeno do *Aliasing*

---

- O que fazer para evitar o *aliasing*?
- Para combater os efeitos do *aliasing* na prática, geralmente utiliza-se duas medidas corretivas:
  - 1) Antes da amostragem, um filtro passa-baixas anti-aliasing é utilizado para atenuar as componentes de alta frequência do sinal, que não são essenciais à informação contida no sinal (geralmente ruído);
  - 2) O sinal filtrado é amostrado a uma taxa um pouco maior do que a taxa de Nyquist.

# Exemplo do Processo de Amostragem





# Reconstrução do sinal

---

- O sistema digital armazena uma lista dos valores amostrados:

Point	Actual Voltage (V)	Digital Equivalent
<i>a</i>	1.22	01111010
<i>b</i>	1.47	10010011
<i>c</i>	1.74	10101110
<i>d</i>	1.70	10101010
<i>e</i>	1.35	10000111
<i>f</i>	1.12	01110000
<i>g</i>	0.91	01011011
<i>h</i>	0.82	01010010

# Reconstrução do sinal

