

# EA075

## Conversão A/D e D/A



Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC)  
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

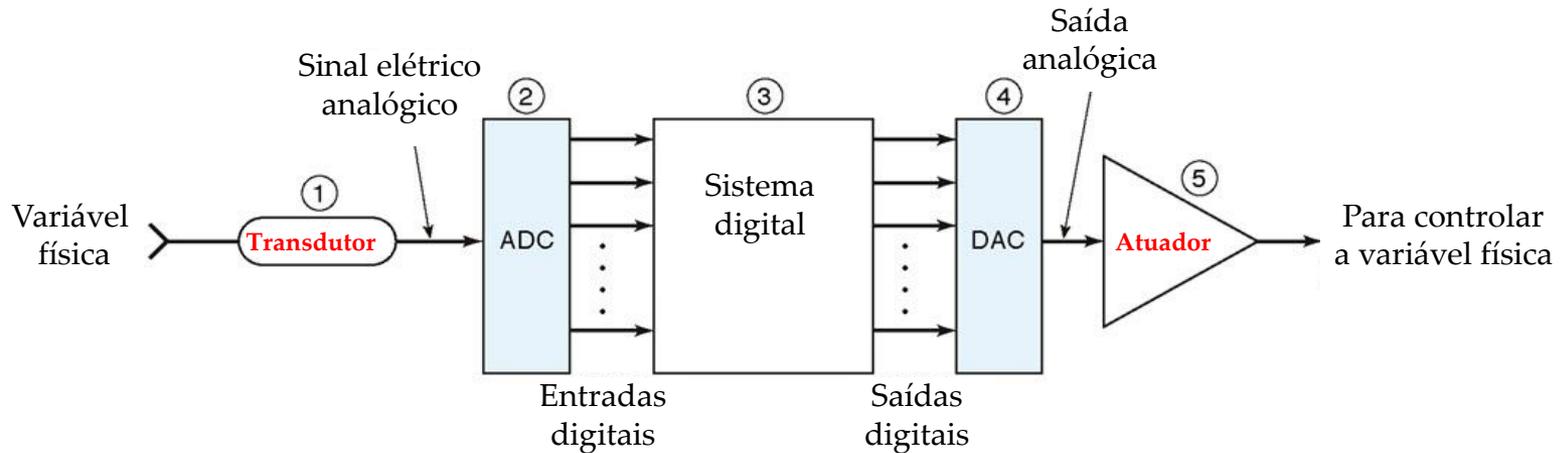
Prof. Rafael Ferrari

(Documento baseado nas notas de aula do Prof. Levy Boccato)

# Introdução

- **Sinal digital:** possui um valor especificado como uma de duas possibilidades, como 0 ou 1, BAIXO ou ALTO, que correspondem a níveis de tensão dentro de intervalos específicos (e.g., 0-0.8 V e 2 a 5 V na família TTL).
- **Sinal analógico:** pode assumir qualquer valor em um intervalo contínuo; seu valor exato é importante (e.g., representa uma grandeza, como temperatura).
- Como utilizar sistemas digitais para monitorar e/ou controlar um processo físico?

# Introdução

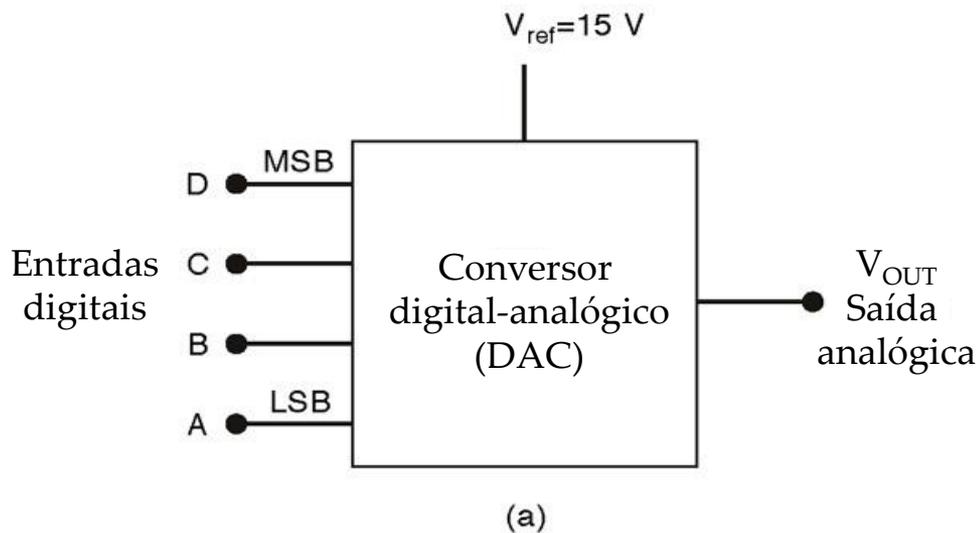


Conversores analógico-digital (ADC) e digital-analógico (DAC) são usados para permitir o contato de um sistema digital com o ambiente analógico.

# Conversão digital-analógico

- Processo que toma um valor representado em código binário (digital) e o converte em uma tensão ou corrente proporcional.
- Em geral,  
$$\text{Saída analógica} = K \times \text{entrada digital}$$
- $K$  é um fator de proporcionalidade constante para um certo DAC conectado a uma tensão fixa de referência.

# Conversão digital-analógico



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
<hr/>				
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)

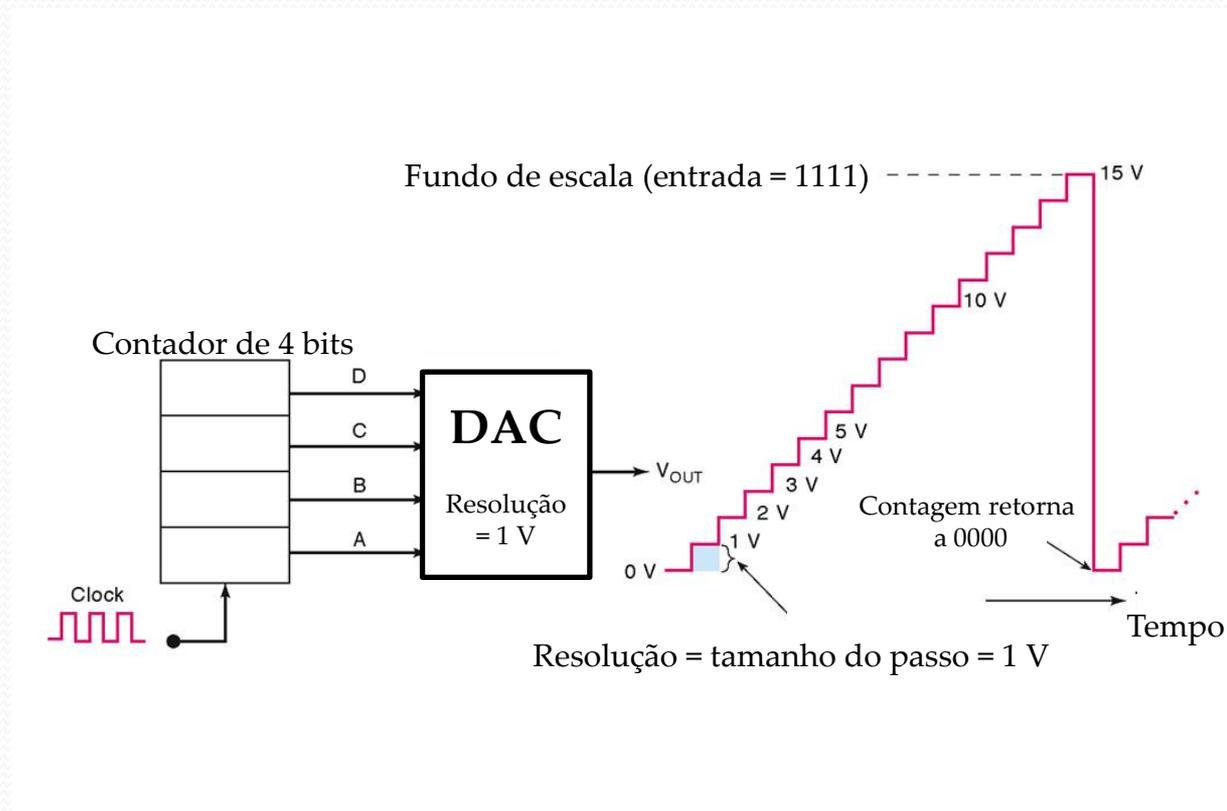
- $K = 1 \text{ V}$  e  $V_{OUT} = (1 \text{ V}) \times \text{entrada digital}$ .

# Conversão digital-analógico

- Cada entrada digital contribui com um valor diferente para a tensão analógica.
  - O bit menos significativo contribui com  $(2^0) \times K$  volts.
  - O segundo bit menos significativo contribui com  $(2^1) \times K$  volts.
  - ⋮
  - ⋮
  - O bit mais significativo contribui com  $(2^{N-1}) \times K$  volts, onde  $N$  é o número de bits que representa o valor digital.
- Exemplo:  $0110 \rightarrow (2^2 + 2^1) \times K = 6V$

# Conversão digital-analógico

- A rigor, o sinal de saída não é analógico – afinal, ele pode assumir somente  $2^N$  níveis de tensão.

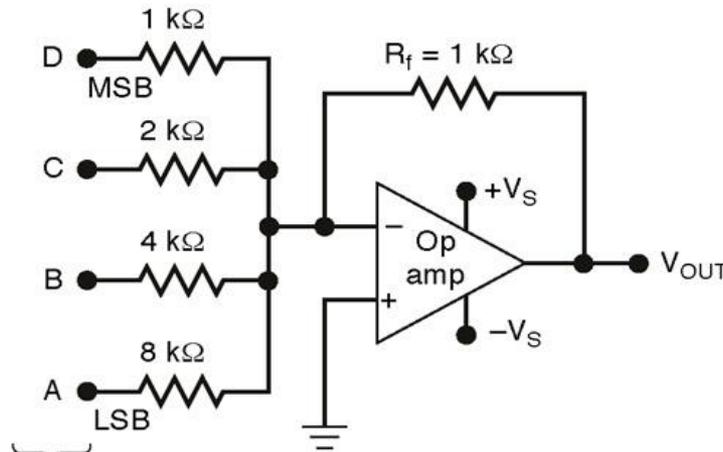


# Conversão digital-analógico

- **Resolução:** menor mudança que pode ocorrer na saída analógica como resultado de uma mudança na entrada digital (tamanho do passo).
- Com  $N$  bits, é possível representar  $2^N$  níveis de tensão. Existem, portanto,  $2^N - 1$  passos para sair do valor mais baixo (zero, por exemplo) e atingir o fundo de escala.
- Logo, a resolução é:  $K = V_{\text{ref}} / (2^N - 1)$ .
- Aumentar  $N$  diminui a resolução ( $K$ ), tornando possível a representação de um número maior de valores de tensão entre 0 e  $V_{\text{ref}}$ .

# Conversão digital-analógico

- Implementações:



Entradas digitais  
(0 V ou 5 V)

(a)

- Amplificador operacional opera como um somador.
- Cada tensão de entrada é multiplicada por um peso dado pela razão entre o resistor  $R_f$  e o resistor de entrada.

Código binário

D	C	B	A	$V_{OUT}$ (volts)
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 ← Fundo de escala

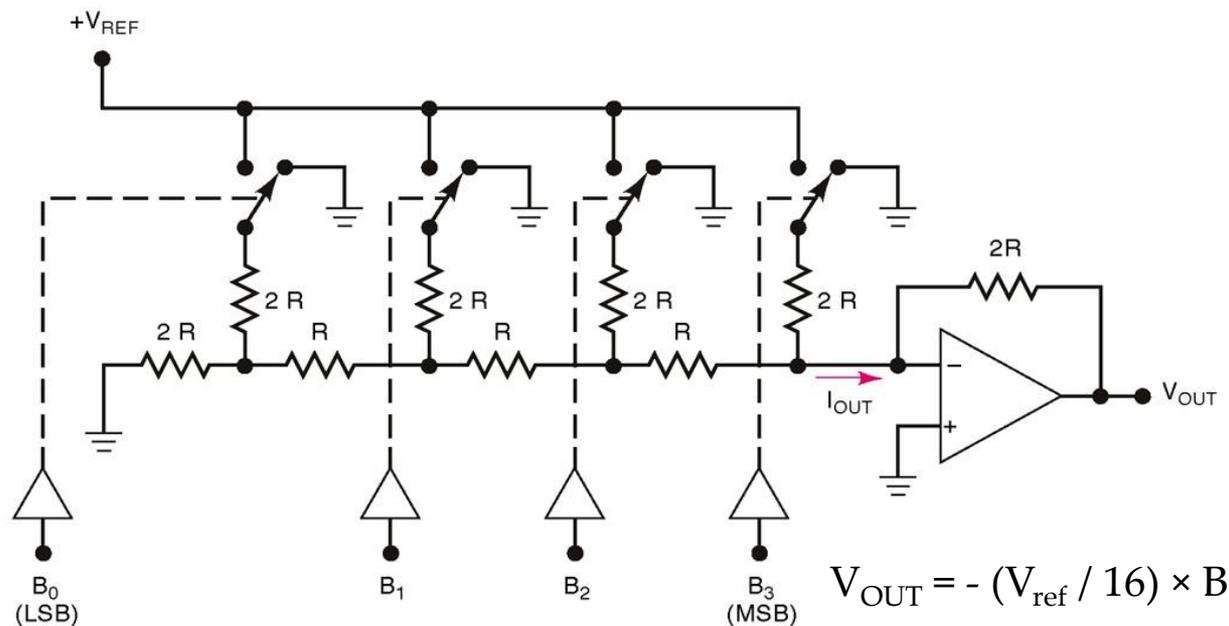
(b)

$$V_{OUT} = - (V_D + 1/2 V_C + 1/4 V_B + 1/8 V_A)$$

# Conversão digital-analógico

- **Implementações:**

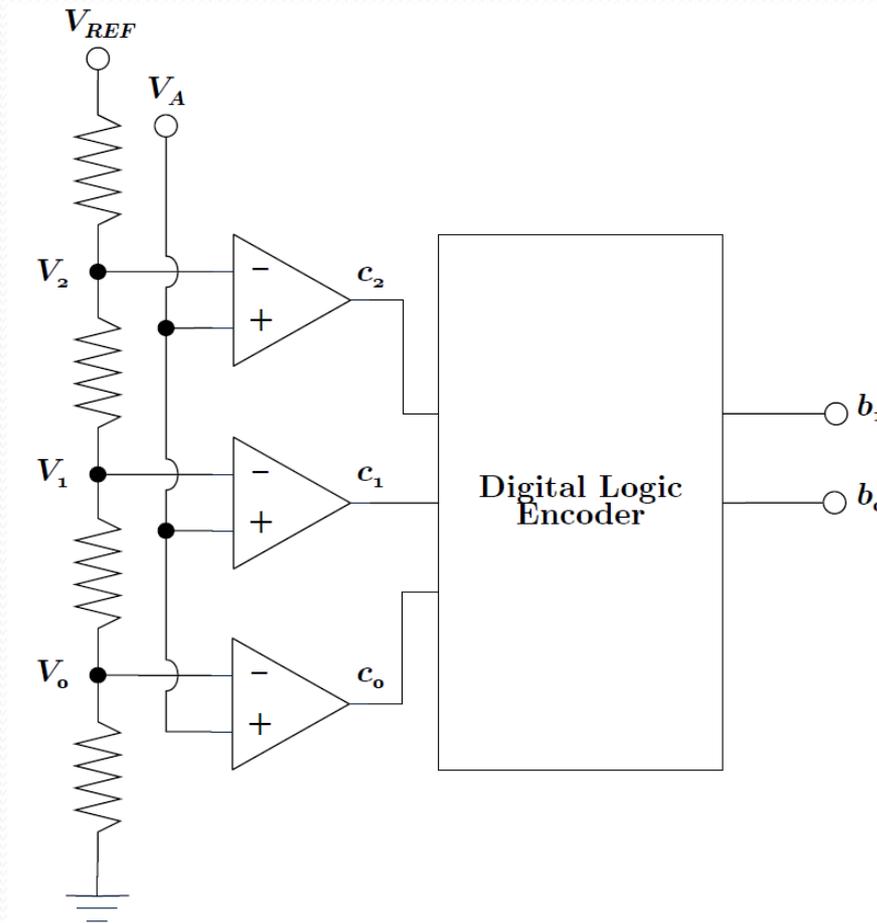
- *R / 2R ladder*: usa resistores com valores próximos ( $R$  e  $2R$  ohms), independentemente de quantos bits existem na representação.



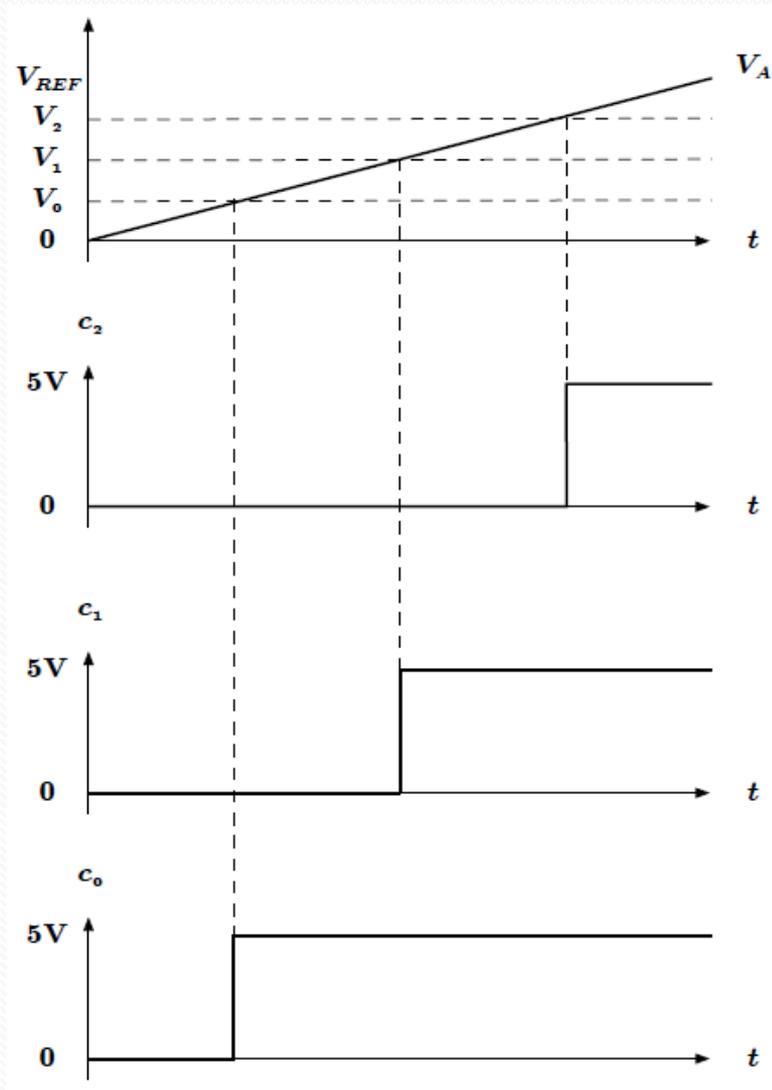
# Conversão analógico-digital

- Processo que toma um valor de tensão analógico e obtém um código binário para representá-lo.

Conversor A/D  
de dois bits



# Conversão analógico-digital



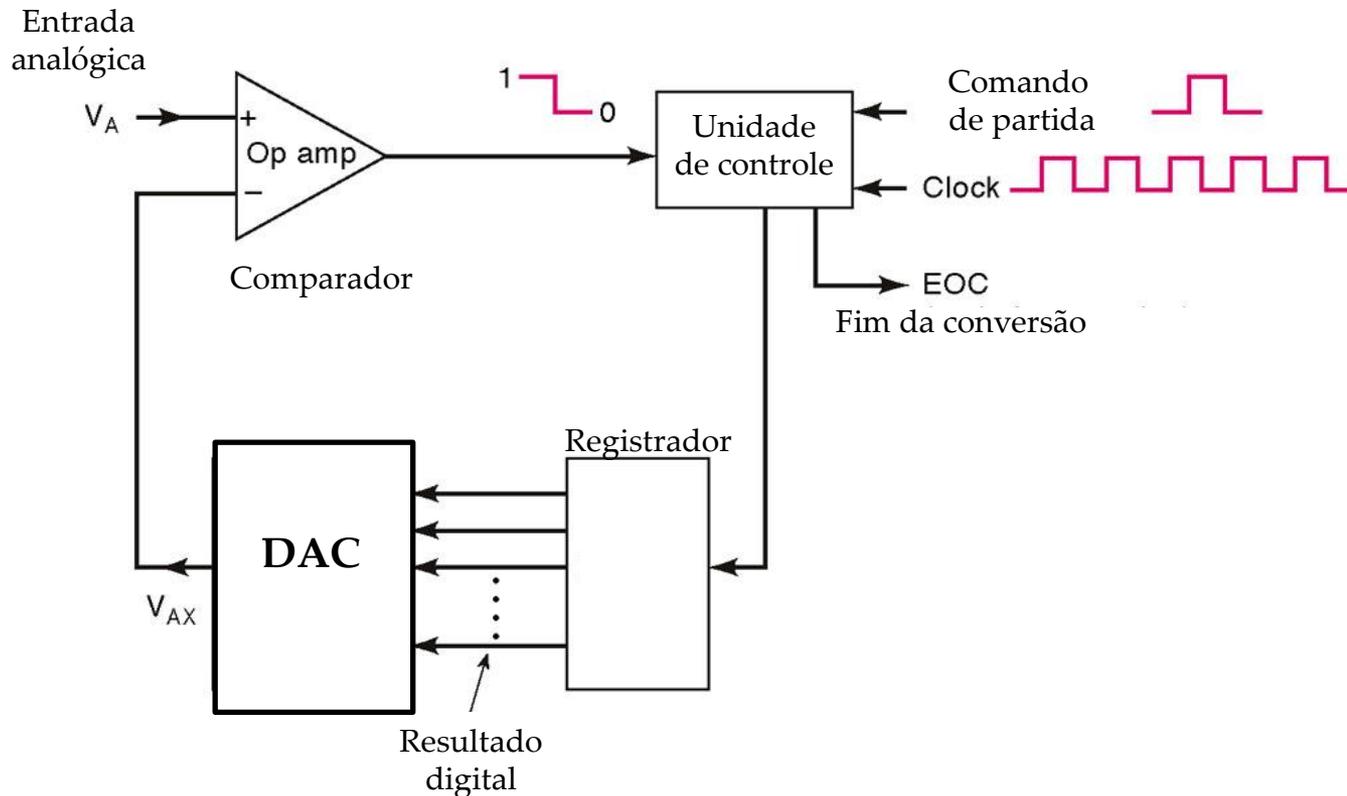
	$c_2$	$c_1$	$c_0$	$b_1$	$b_0$
$V_A < V_0$	0	0	0	0	0
$V_0 < V_A < V_1$	0	0	1	0	1
$V_1 < V_A < V_2$	0	1	1	1	0
$V_A > V_2$	1	1	1	1	1

# Conversão analógico-digital

- Com todos os resistores iguais:
  - $V_{REF} - V_2 = V_2 - V_1 = V_1 - V_0$
- Estrutura conhecida como A/D paralelo.
- **Vantagem:** conversão praticamente instantânea.
- **Desvantagem:** o número de comparadores e resistores aumenta exponencialmente com o número de bits da representação digital:
  - Resistores:  $2^N$
  - Comparadores:  $2^N - 1$
- Solução inviável em termos de miniaturização.

# Conversão analógico-digital

- Estrutura mais usual:



# Conversão analógico-digital

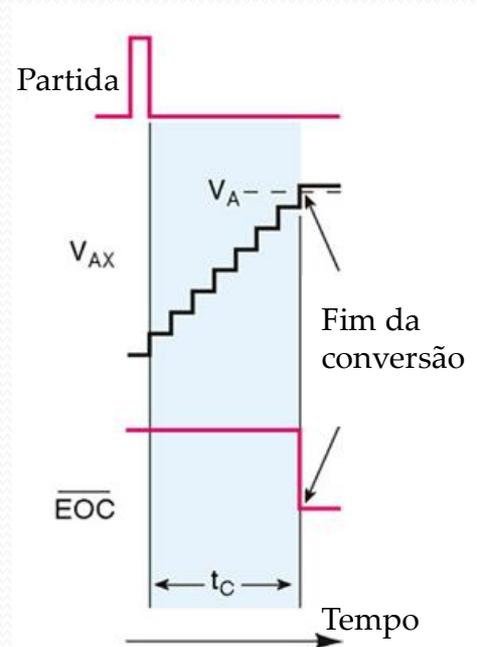
- **Operação básica:**

- O comando de partida inicia a conversão;
- Em uma taxa determinada pelo *clock*, a unidade de controle continuamente modifica o número binário armazenado no registrador;
- O DAC converte esta representação binária em um valor de tensão “analógico”  $V_{AX}$ .
- Enquanto  $V_{AX} < V_A$ , a saída do comparador fica no nível ALTO. Quando  $V_{AX}$  excede  $V_A$  (por uma quantidade maior ou igual a  $V_T$  – tensão de *threshold*), a saída vai para nível BAIXO e interrompe o processo de adaptação do conteúdo do registrador.
- Neste ponto,  $V_{AX}$  é uma aproximação de  $V_A$  e o código binário armazenado no registrador é o seu equivalente digital.
- A unidade de controle ativa o sinal EOC, indicando o fim da conversão.

# Conversão analógico-digital

- **ADC do tipo rampa digital:**

- Um contador é usado no lugar do registrador. Seu conteúdo é incrementado a cada ciclo de relógio enquanto o valor  $V_{AX}$  for menor que  $V_A$ .
- O termo rampa digital vem da forma de onda que se observa em  $V_{AX}$ .



# Conversão analógico-digital

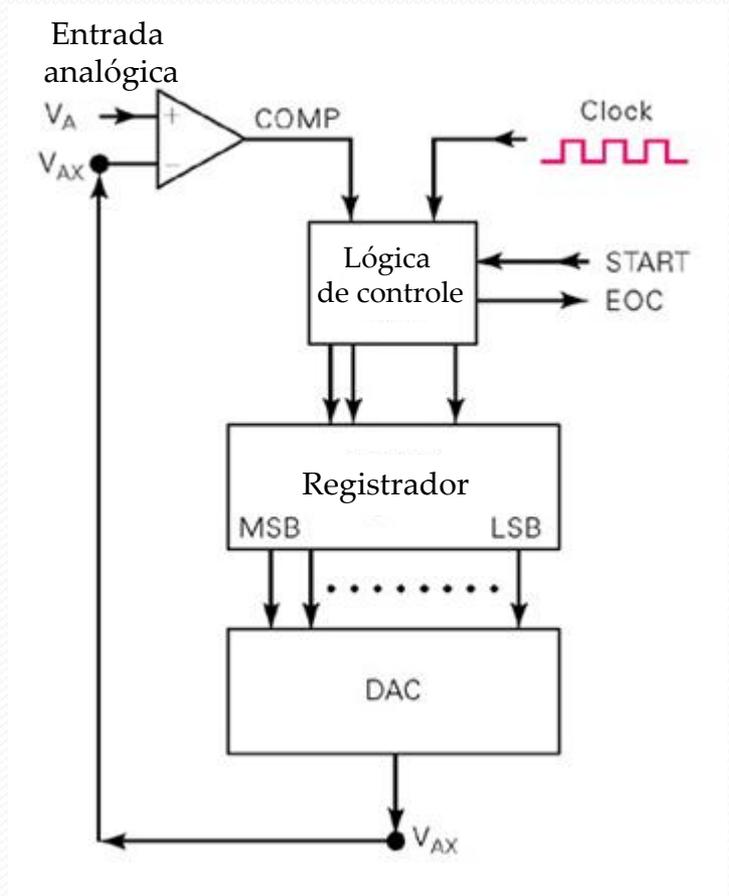
- **ADC do tipo rampa digital:**

- **Erro de quantização:** diferença entre a quantidade analógica verdadeira ( $V_A$ ) e quantidade equivalente à sequência binária armazenada ( $V_{AX}$ ).
  - Exemplo:  $V_{AX}$  está, no máximo, a 10 mV de  $V_A$  se a resolução do DAC (ADC) for 10 mV.
- **Tempo de conversão:** o máximo tempo ocorre quando  $V_A$  é um pouco menor que a tensão de fundo de escala, de maneira que  $V_{AX}$  deve chegar ao último estágio da rampa digital.
  - Considerando  $N$  bits na conversão,  $tc(\max) = 2^N - 1$  ciclos de relógio.
- **Desvantagem:** O tempo de conversão essencialmente dobra para cada bit que é adicionado ao contador – só é possível melhorar a resolução com o custo de um  $tc$  maior.
- **Vantagem:** simplicidade do circuito.

# Conversão analógico-digital

- **ADC com aproximações sucessivas:**

➤ O circuito é mais complexo, porém o tempo de conversão é bastante inferior e independe (ou seja, é aproximadamente o mesmo) do valor da entrada analógica  $V_A$ .



# Conversão analógico-digital

- **ADC com aproximações sucessivas:**

- O processo começa colocando o bit mais significativo do registrador no valor 1 e testando se  $V_{AX} > V_A$ .
- Se for maior, o bit testado tem seu valor restaurado para 0. Senão, mantemos este bit em 1.
- Este procedimento se repete para cada um dos  $N$  bits do registrador de maneira sucessiva, até que todos tenham sido avaliados.

- Exemplo:  $N = 4$  bits, resolução de 1 V e  $V_A = 10,4$  V.

1. 1000  $\longrightarrow$  8 V  $<$   $V_A$  – mantém o bit = 1 e prossegue para o próximo.
2. 1100  $\longrightarrow$  12 V  $>$   $V_A$  – zera o segundo bit e prossegue para o próximo.
3. 1010  $\longrightarrow$  10 V  $<$   $V_A$  – mantém o bit = 1 e prossegue para o próximo.
4. 1011  $\longrightarrow$  11 V  $>$   $V_A$  – zera o bit e encerra.

**FINAL:** 1010 = 10 V  $\approx$  10,4 V

# Conversão analógico-digital

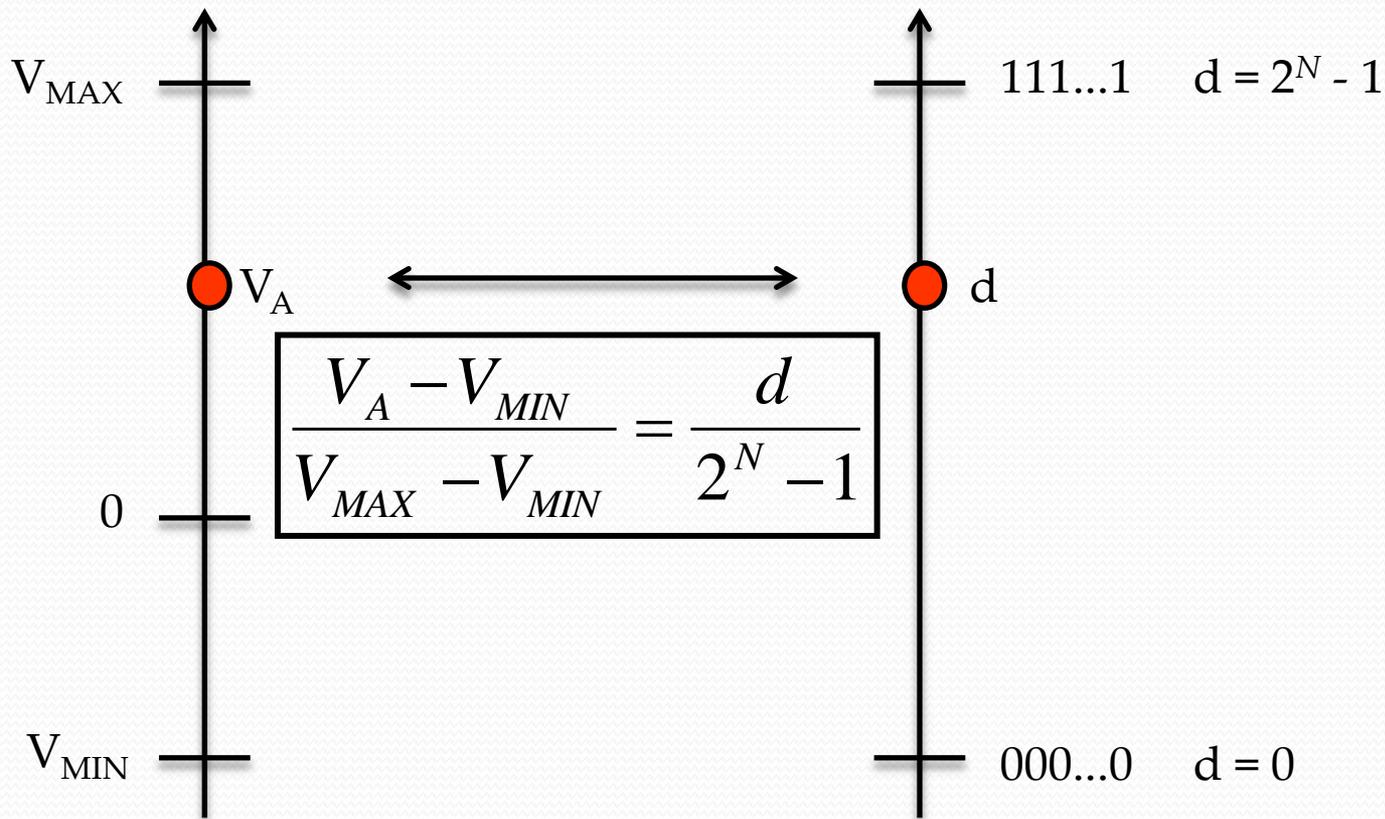
- **ADC com aproximações sucessivas:**

- Este método termina com uma sequência binária cuja tensão  $V_{AX}$  correspondente é sempre menor que a tensão analógica  $V_A$ .
- **Vantagem:** o tempo de conversão varia linearmente com o número de bits usados para representar a grandeza analógica.

$$t_c = N \text{ ciclos de relógio}$$

# Conversão analógico-digital

- Generalização



**Resolução:**  $(V_{MAX} - V_{MIN}) / (2^N - 1)$

# Bibliografía

- Tocci, Ronald J., Widmer, Neal S., Moss, Gregory L., *Digital Systems: principles and applications*. Pearson Education India, 2007. (capítulo 11)