Conversão Digital Analógico e Analógico Digital

Disciplina: Eletrônica Básica

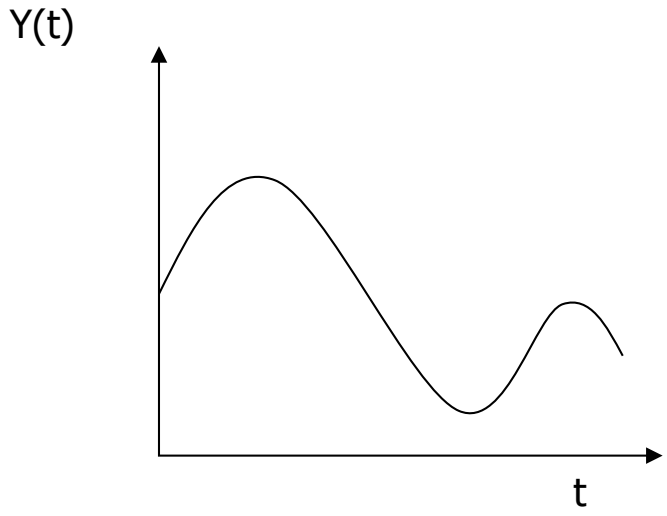
Prof. Manoel Eusebio de Lima

Agenda

- Grandezas Digitais e Analógicas
- Por que converter?
- Diagrama básico para conversão
- Conversores D/A
  - Malha Resistiva Ponderada
  - Conversores D/A Malha Resistiva R-2R
- Conversor A/D
  - Conversor Flash
  - Conversor A/D de aproximação Sucessiva
- Características dos conversores
- Conclusões

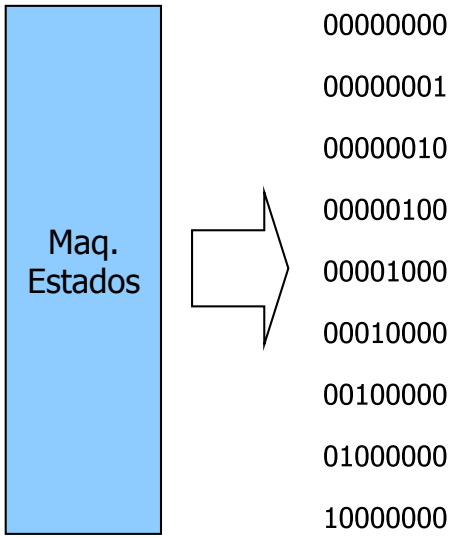
Grandezas Analógicas e Digitais

- Grandezas Analógicas
  - Operam como grandezas contínuas
  - Podem assumir diversos valores ao longo do tempo
    - Potencial elétrico
    - Volume
    - Pressão
    - Temperatura...



Grandezas Analógicas e Digitais

- Grandezas Digitais
  - Operam com códigos digitais discretos
  - Podem assumir estados ao longo do tempo
    - Estado binário
    - Código binário

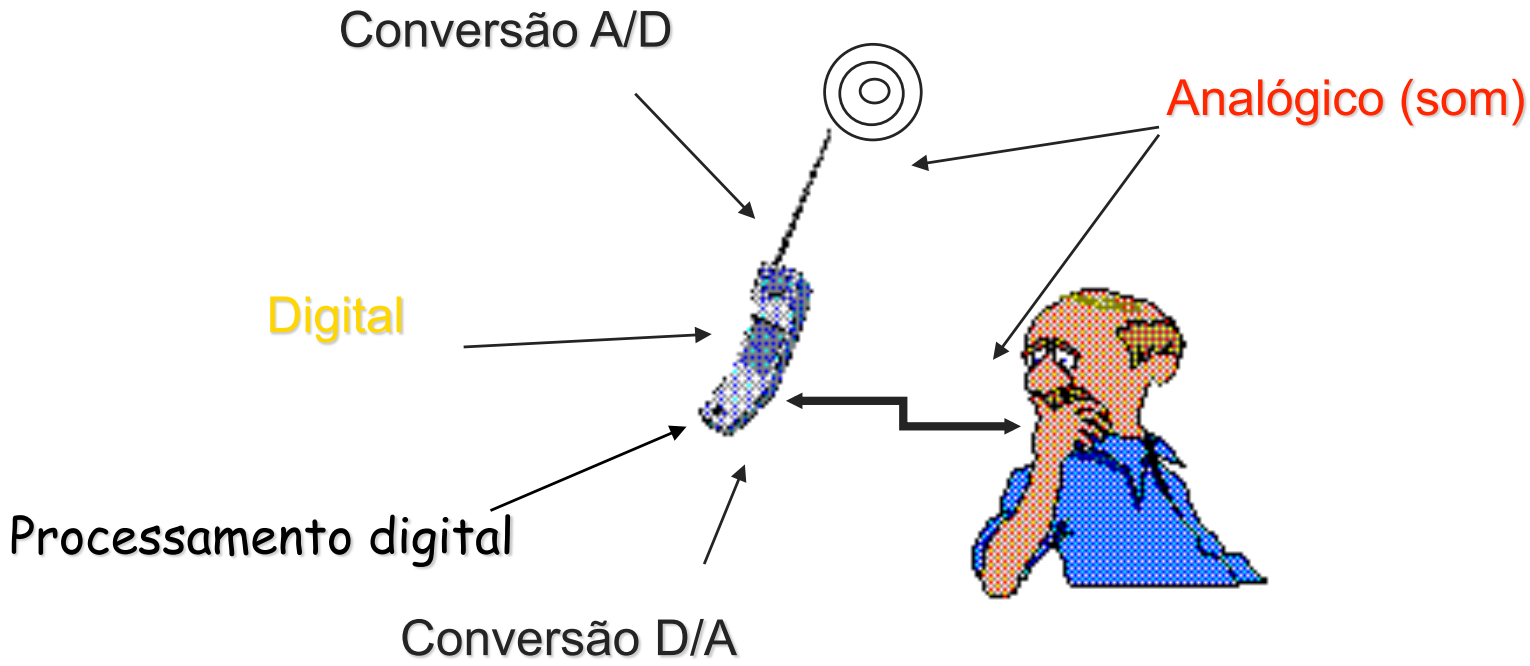


Por que Converter?

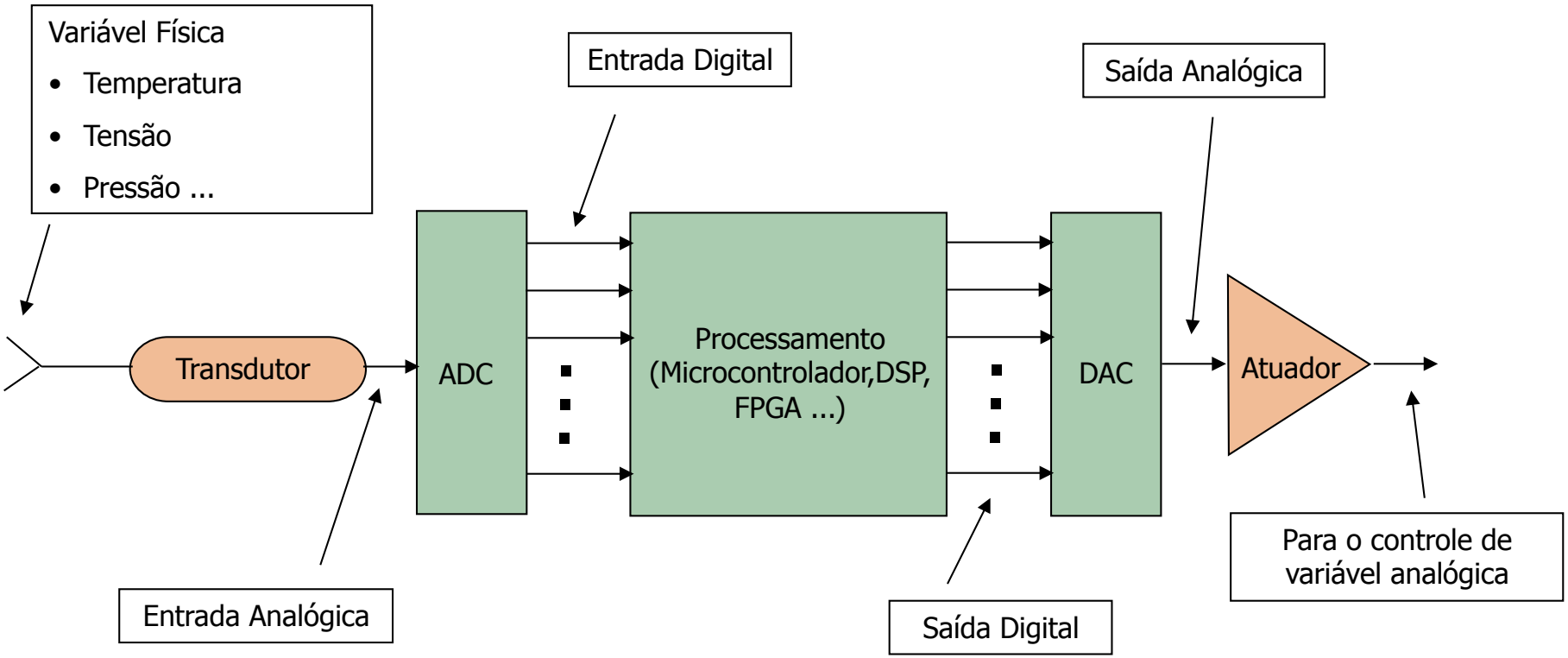
- Grandezas físicas se encontram na natureza na forma analógica
  - Difícil Processamento;
  - Difícil Armazenamento;
- Processamento digital é mais eficiente
  - Maior velocidade e precisão;
- Freqüentemente sinais processados na forma digital necessitam ser convertidos para a forma analógica
  - CD Players
  - Telefones celulares
  - .....

Sistemas Digitais e Analógicos

(em nosso cotidiano)



Exemplo: Diagrama Básico Para Tratamento de Sinais



Conversão D/A

- O conversor DA (DAC) aceita como entrada dados digitais e produz uma saída analógica, a qual é relacionada com o código digital de entrada.

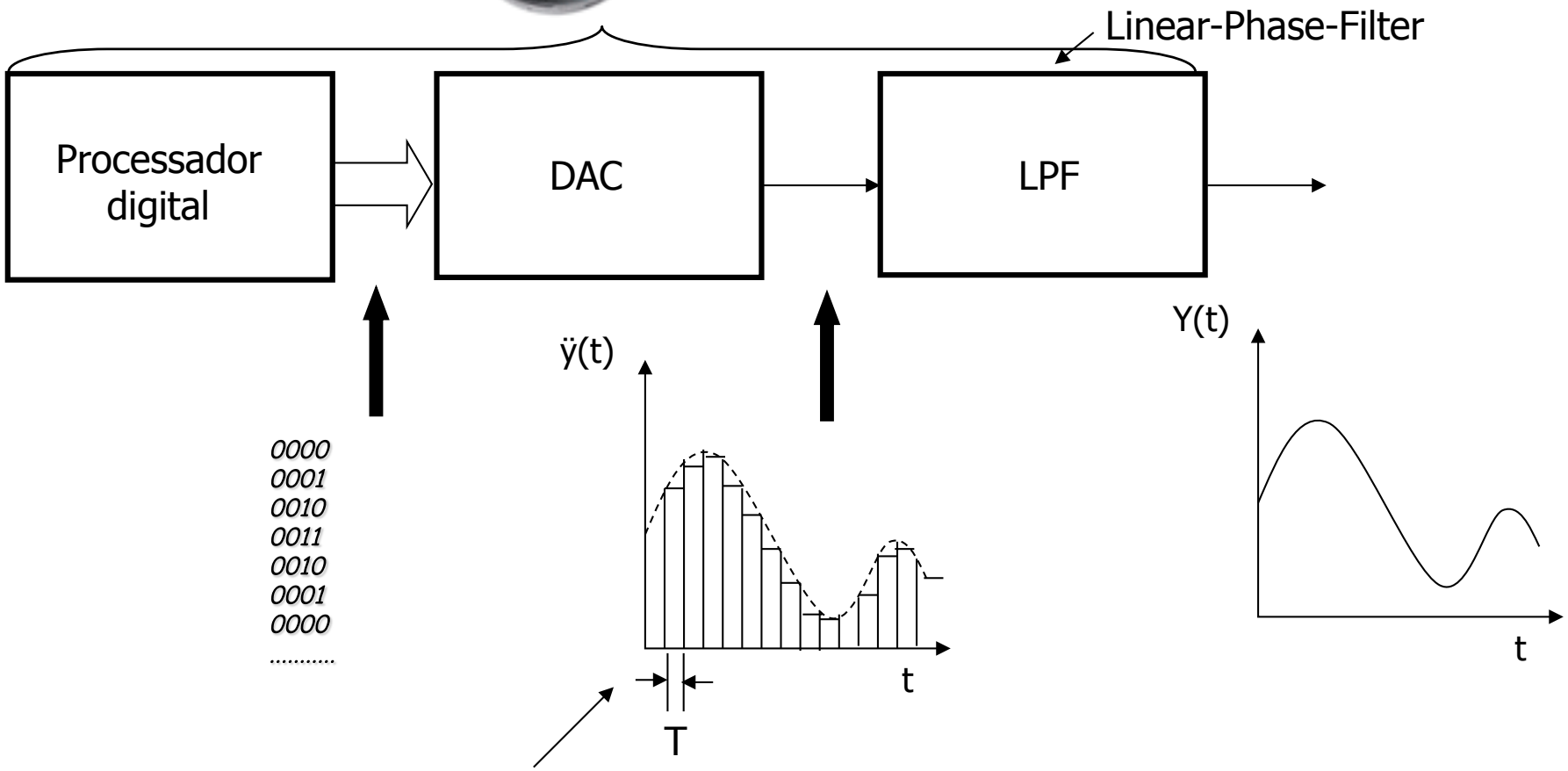
- Um registrador é usado para armazenar a entrada do DAC e assegurar que sua saída fique estável até que o conversor seja alimentado por uma outra entrada digital. O registrador pode ser externo ou fazer parte do DAC.

- Cada palavra digital (número de bits em paralelo) é convertida no tempo.

- Filtros podem ser usados para suavizar ou restaurar o sinal analógico em sua saída.

Conversão D/A - exemplo

CD player portátil



A saída do DAC tem uma forma de escada desde que cada impulso é seguro (hold) por um tempo T(s)

Conversão Digital / Analógica

- Resolução de um conversor Digital/Analógico está associado ao número de bits do conversor. É a menor quantidade (modificação) que pode ser convertida (resolvida) em sua saída analógica, resultante de uma alteração na entrada digital .
  - Exemplo:
    - Percebe-se que quanto mais bits, maior a qualidade da resolução do conversor

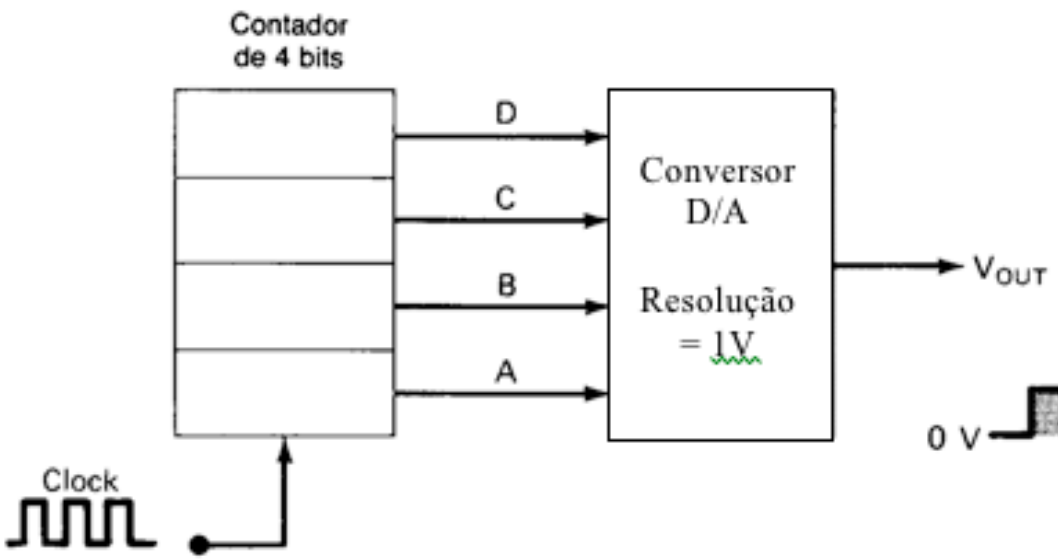
      Resolução = Vref*[1/(2^n-1)] , on Vref = *full scale*
  - Em geral, para um conversor D/A de *N* bits, o número de níveis diferentes será de 2^N, e o número de degraus será de 2^N - 1
- Range ou faixa de atuação
  - Distância entre o valor mais positivo e o valor mais negativo.
    - Exemplo:
      - Considerando conversor do exemplo anterior teríamos um faixa de atuação de

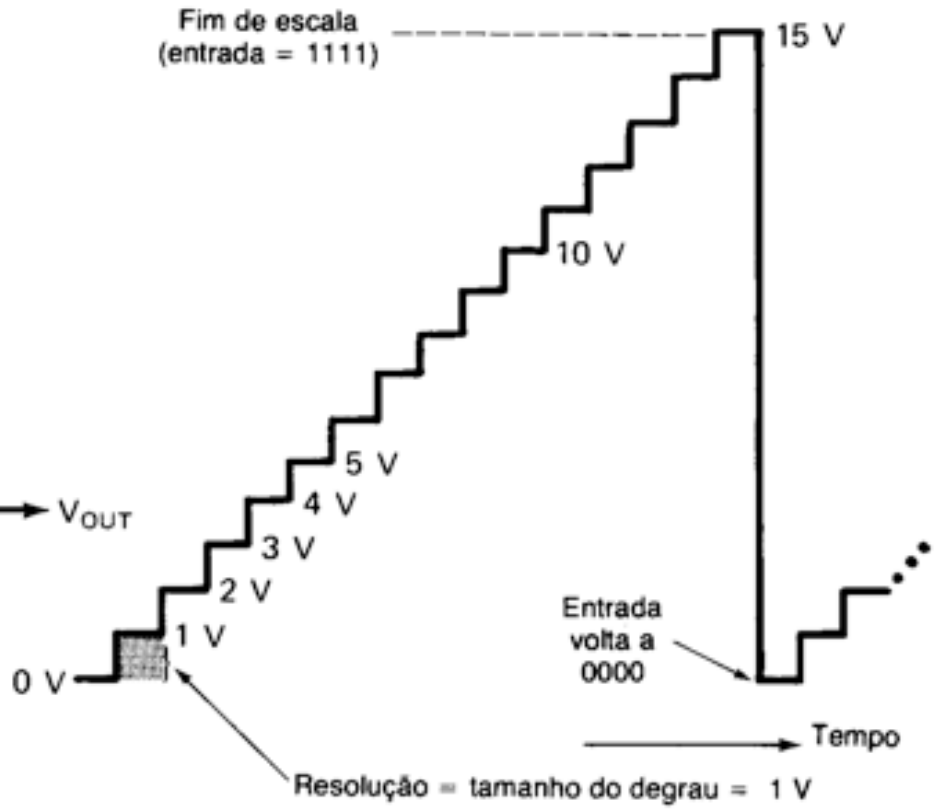
        (4,875)-0 = 4,875 de faixa de atuação

Resolução – conversor DA

Possui 16 níveis e 15 degraus

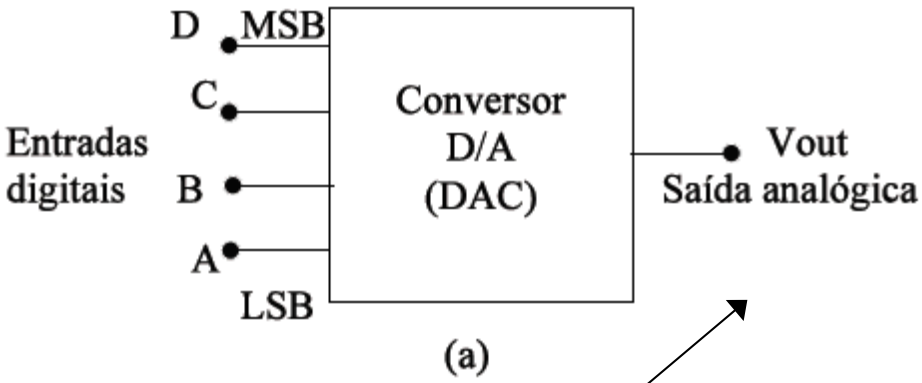
Níveis = 2^N, N= 4, níveis = 16
Degraus = $2^N - 1 = 15$
O Nível 0, não gera valor





Resolução = Vref*[1/(2^n-1)] , on Vref = *full scale = 15 V /2^4-1 = 1 V*
*Resolução (%) = (1/2^n-1) * 100 % = 6.67 %*

Conversor DA – 4 bits



(a)

2^4 = 16 números binários

D	C	B	A	Vout (V)
0	0	0	0	0
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

(b)

Saída analógica = K* entrada digital
Onde k é o fator de proporcionalidade
K é constante

K = 1
Assim para a entrada = 1010_2
a saída analógica = 1 * 10 = 10 V

Resolução percentual

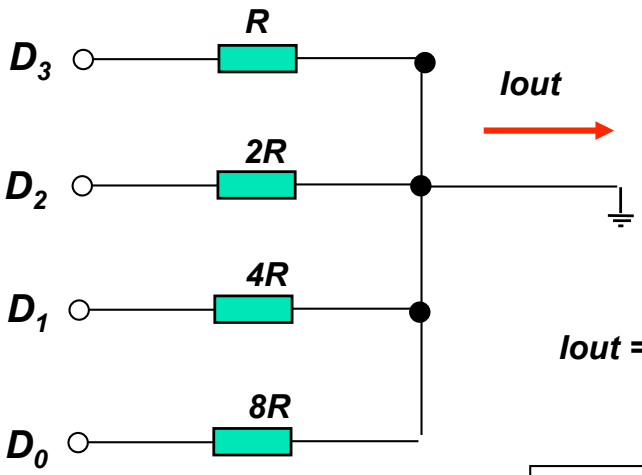
Resolução percentual é a resolução expressa como percentagem do valor máximo possível para a saída, ou valor de fim de escala.

% Resolução = [tamanho do degrau/valor de fim de escala]*100%

% Resolução = [1/número de degraus]*100% = $[1/(2^n-1)]*100\%$
n = no. de bits

Número de bits	Resolução %
4	6.67
6	1.75
8	0.392
10	0. 976
12	0.0244
14	0.00610
16	0.00153

Conversores D/A Malha Resistiva Ponderada*

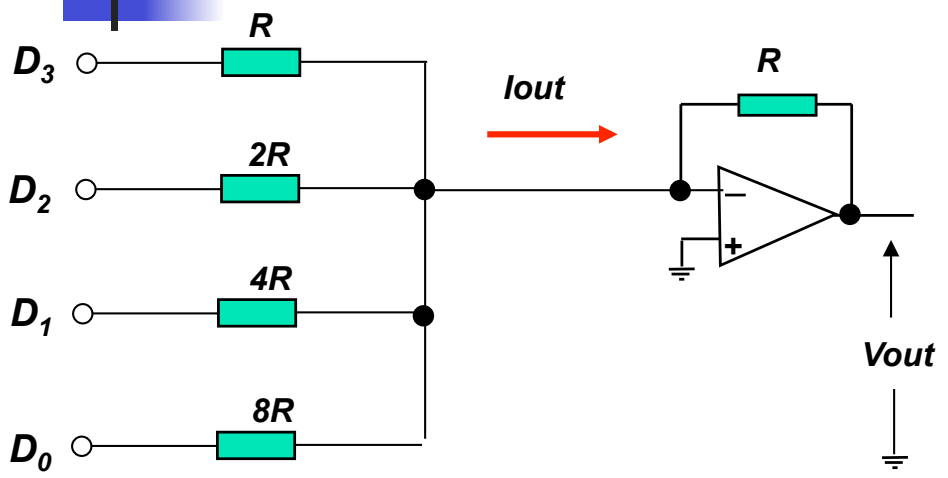


$$I_{out} = \frac{D_3}{R} + \frac{D_2}{2R} + \frac{D_1}{4R} + \frac{D_0}{8R}$$

$$\boxed{I_{out} = \frac{1}{R}\left(D_3 + \frac{D_2}{2} + \frac{D_1}{4} + \frac{D_0}{8}\right)}$$

$$D_i = \begin{cases} 1 = Vcc \\ 0 = GND \end{cases}$$

Conversores D/A Malha Resistiva Ponderada



Considerando as entradas digitais
$D_3=D_2=D_1=D_0=$ tensão = 5V

Código	Vout (Volts)
0000	0
0001	0.625
0010	1.250
0011	1.875
0100	2.500
0101	3.125
0110	3.750
0111	4.375
1000	5.000
1001	.....
.....	.....
1111	9.375

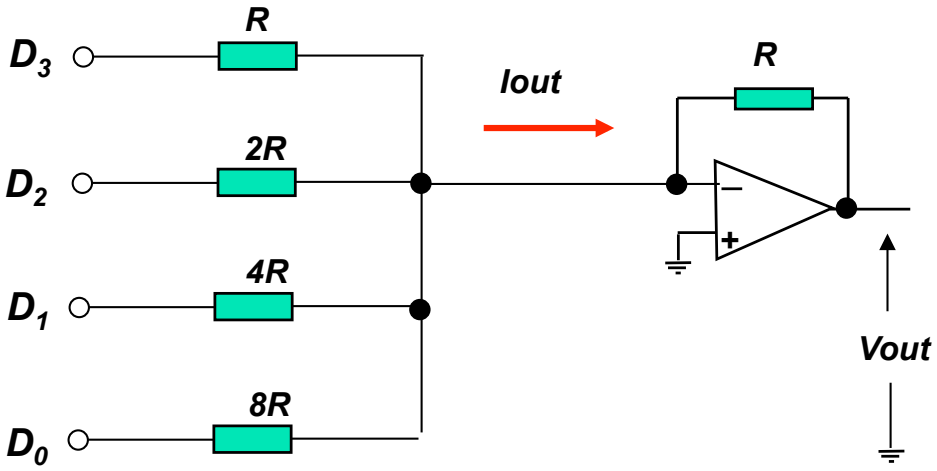
$$- Vout = R \cdot Iout$$

$$- Vout = R \cdot \frac{1}{R}\left(D_3 + \frac{D_2}{2} + \frac{D_1}{4} + \frac{D_0}{8}\right)$$

$$- Vout = \left(D_3 + \frac{D_2}{2} + \frac{D_1}{4} + \frac{D_0}{8}\right)$$

Obs: O maior problema deste tipo de conversor é a grande diferença entre valores dos resistores correspondentes aos bits mais e menos signifcativos do sinal digital, principalmente nos conversores de alta precisão.

Precisão na conversão



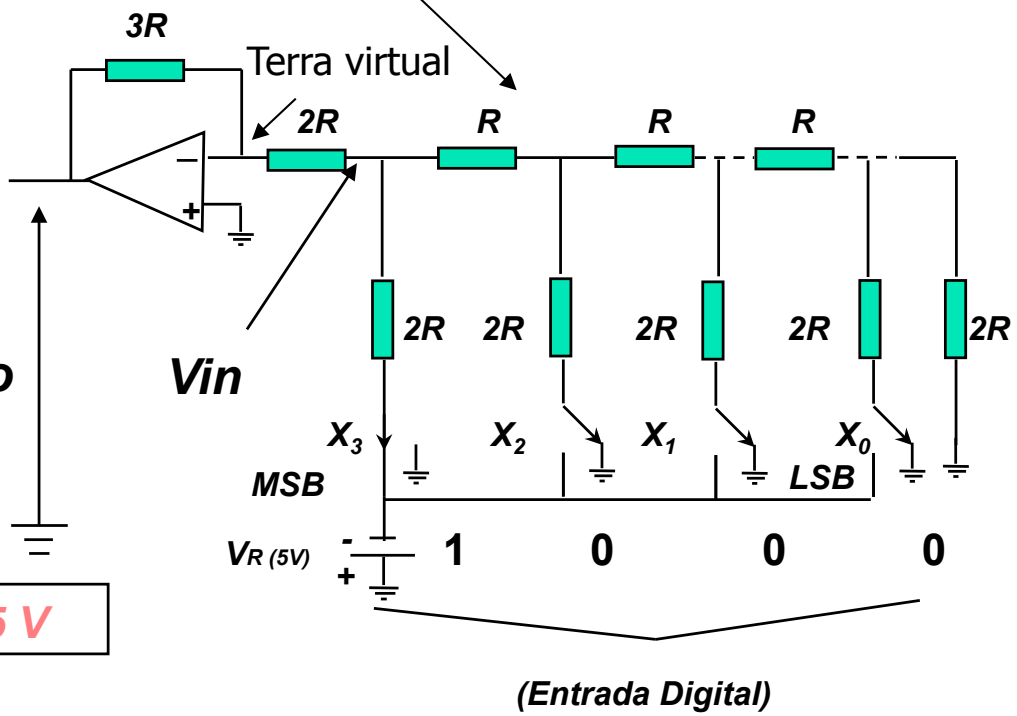
Fatores da precisão:

- Precisão dos valores dos resistores de entrada e de realimentação
- Precisão dos níveis de tensão aplicados as entradas. As entradas não podem ser advindas diretamente de portas lógicas ou Flip-Flops TTL ou CMOS, desde que não há garantias de tensões precisas para todas as entradas. Torna-se necessário a adição de um circuito especial em cada entrada.

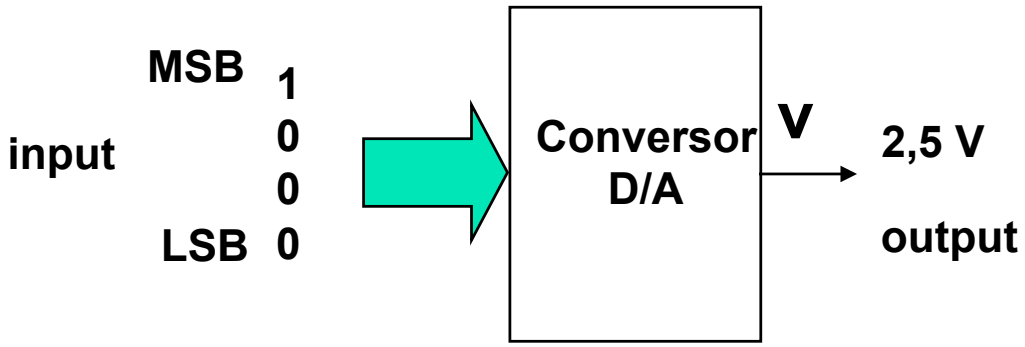
Conversão Digital/Analógica (R-2R)

Em qualquer nó da escada, olhando para direita, para a esquerda ou abaixo (chave), a resistência é de 2R. Portanto, a corrente se divide igualmente para esquerda, direita e para a direção das chaves.

Ganho do AMP-OP = (-3R/2R)
Vo = Vin.(- 3R/2R)

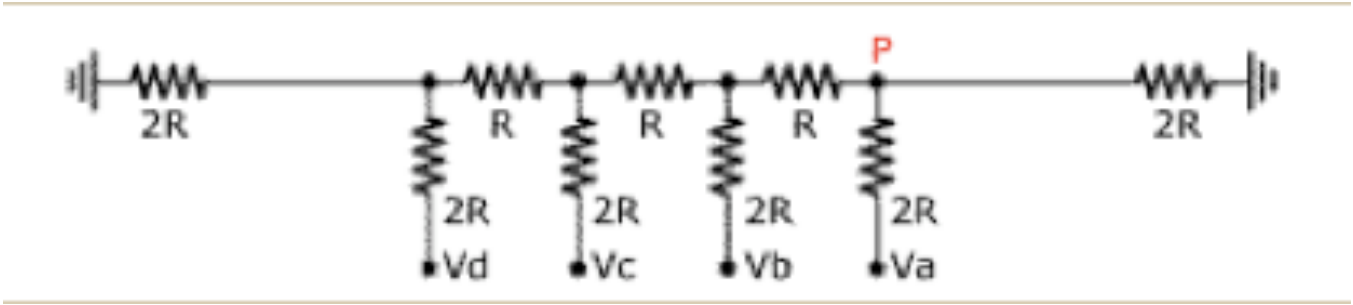


Exemplo:
Considerando V_R = +5 V
Para X=[1000] (entrada)
Vin= $-V_R/3$
Como Vo = Vin.(- 3R/2R)
Vo =(-VR/3)(-3R/2R) = VR/2 => ***Vo = 2,5 V***



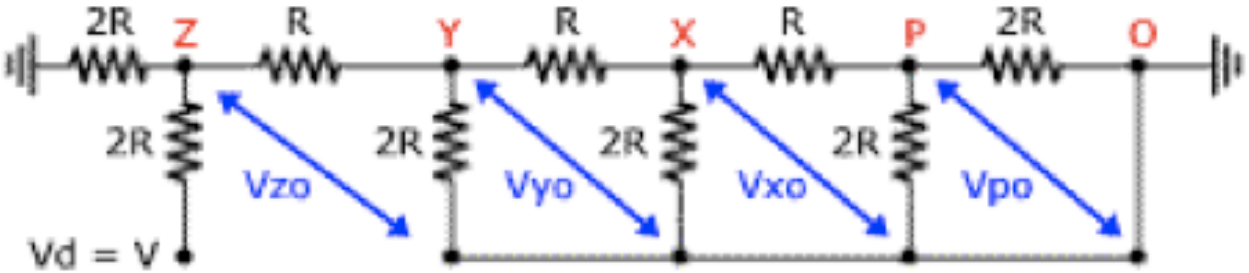
De maneira geral:

X_3	X_2	X_1	X_0	V_{in}	V0 (V)
1	0	0	0	-VR/3	+VR/2
0	1	0	0	-VR/6	+VR/4
0	0	1	0	-VR/12	+VR/8
0	0	0	1	-VR/24	+VR/16



Exemplo:

Considerando que Vd é o bit mais significativo (MSB), e que a tensão de referência está aplicada neste bit e os demais são OV, teríamos uma malha resistiva equivalente dada abaixo:



Simplificando o circuito por associações sucessivas de resistências em paralelo e em série, dedui-se que a resistência entre o ponto Z e a massa (ponto O) é R. Assim, a tensão Vzo = V/3.

A resistência entre o ponto Y e o ponto O é R e, portanto, a tensão Vyo = Vzo/2 = V/6.

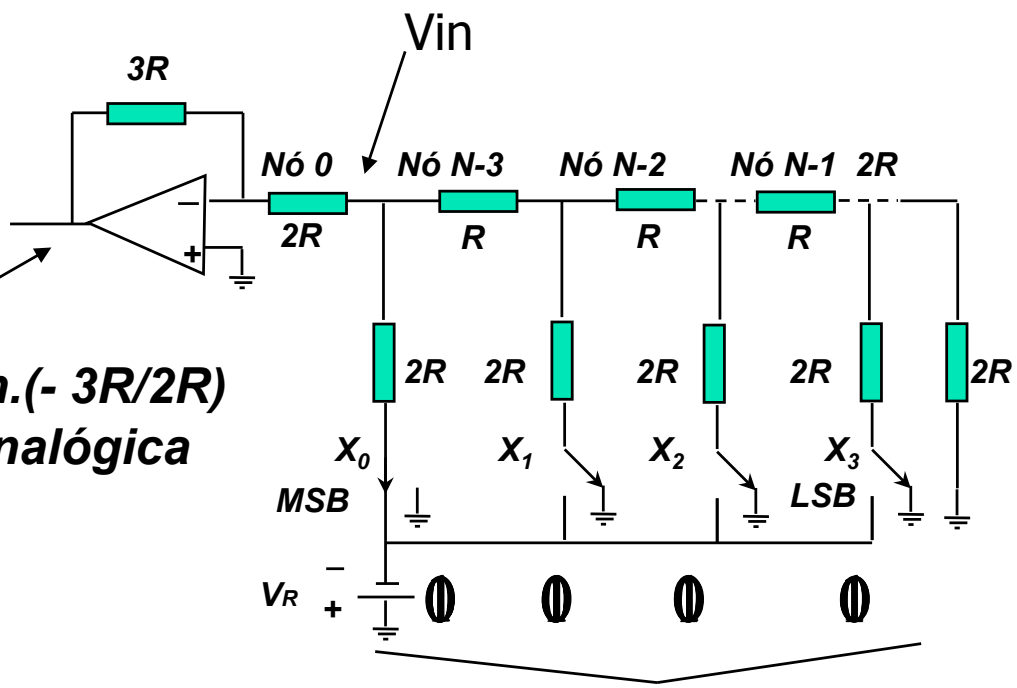
Assim de forma análoga pode-se concluir que Vxo = Vyo/2 = V/12 e Vpo = Vxo/2 = v/24.

Conversão Digital/Analógica

Saída analógica

Resolução do conversor Digital/Analógico = $5/2^N-1$ V = 0,3125 V

Vo = Vin.(- 3R/2R)



Vo = Vin.(- 3R/2R)
Saída analógica

Entrada Digital

Vo

0,0000
0,3125
0,6250
0,9375
1,2500
1,5625
1,8750
2,1875
2,5000
2,8125
3,1250
3,4375
3,7500
4,0625
4,3750
4,6875

Conversão Digital/Analógica

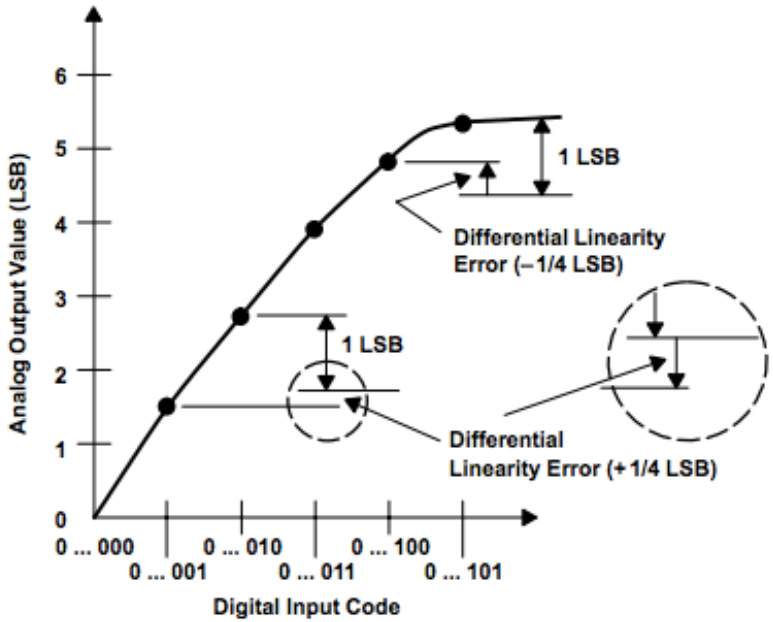
Valor Digital MSB LSB	*Ganho do AMP-OP igual a (-3R/2R)* *Vo = Vin.(- 3R/2R)*	Valor da tensão de saída (Vo)
0000	0	0,0000
0001	V_R /16	0,3125
0010	V_R /8	0,6250
0011	V_R /16 + V_R /8	0,9375
0100	V_R /4	1,2500
0101	V_R /4 + V_R /16	1,5625
0110	V_R /4 + V_R /8	1,8750
0111	V_R /4 + V_R /8 + V_R /16	2,1875
1000	V_R /2	2,5000
1001	V_R /2 + V_R /16	2,8125
1010	V_R /2 + V_R /8	3,1250
1011	V_R /2 + V_R /8 + V_R /16	3,4375
1100	V_R /2 + V_R /4	3,7500
1101	V_R /2 + V_R /4 V_R /16	4,0625
1110	V_R /2 + V_R /4 V_R /8	4,3750
1111	V_R /2 + V_R /4 V_R + /8 V_R /16	4,6875

Conversão Digital / Analógica

Erro de Linearidade

Quando mudo a tensão de ref. mudo também a saída analógica proporcionalmente, assim a linearidade se mantém a mesma.

O Erro de lineridade ou linearidade diferencial é a diferença entre o degrau (step) e o valor ideal do 1 LSB.



Exprime-se em percentagem do valor final de escala (% F.S.) ou em nº de "bits" menos significativos (LSB) ou parte deles.

Erro de Precisão

Quando mudo o valor ref., que é o valor de tensão do bit "1", isto afeta a saída analógica e assim a precisão.

Este valor caracteriza o desvio máximo entre os valores de saída analógica reais e ideais. Uma flutuação na tensão de referência, afeta a precisão mas não afeta a linearidade.

Conversão Analógico -> Digital

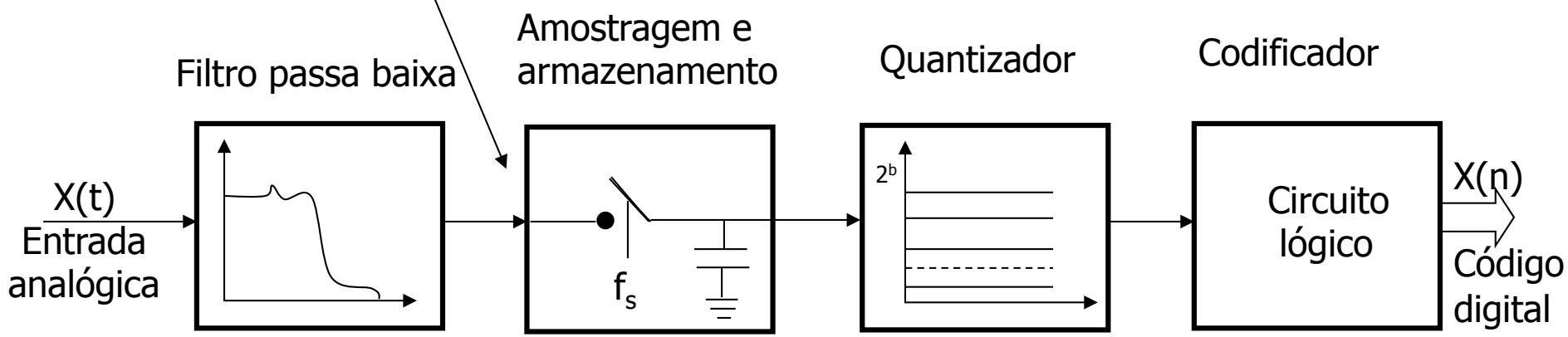
- A conversão analógico-digital ocorre através de um dispositivo que utiliza símbolos constituídos por um conjunto de "bits" para representar valores contínuos de tensão.
- A representação dos valores contínuos é feita de acordo com uma característica de transferência previamente definida:

- Esta conversão ocorre em dua fases:
- 1ª Fase:
  - Amostragem – nesta etapa do processo de conversão, o sinal analógico é amostrado periodicamente (intervalos de tempo fixos) e convertido em um valor discreto de tensão (numérico).
- 2ª fase:
  - Quantificação – nesta fase do processo de conversão, o valor discreto de tensão (amostrado) é convertido na forma de um número digital.

Processo de conversão AD

- Durante a aquisição o sinal analógico deve permanecer estático na entrada do conversor A/D.
- Enquanto a chave está fechada o sinal de entrada é amostrado e seu valor armazenado em um capacitor.
- A conversão A/D é efetuada em seguida durante o tempo em que a chave está aberta.
- A chave abre e fecha em sincronia com o conversor A/D e a cada nova aquisição.

A freqüência de amostragem deve ser pelo menos duas vezes a freqüência do sinal



Sinal é contínuo em tempo e amplitude

O sinal é contínuo em amplitude, mas definido apenas em pontos discretos de tempo. Assim, o sinal é zero, exceto no tempo t=nT(instantes de amostragem)

O sinal digital x(n) (n=0,1,..n). Este sinal existe apenas em pontos discretos no tempo e em cada ponto do tempo pode haver um dos 2^n valores (valor discreto em tempo discreto)

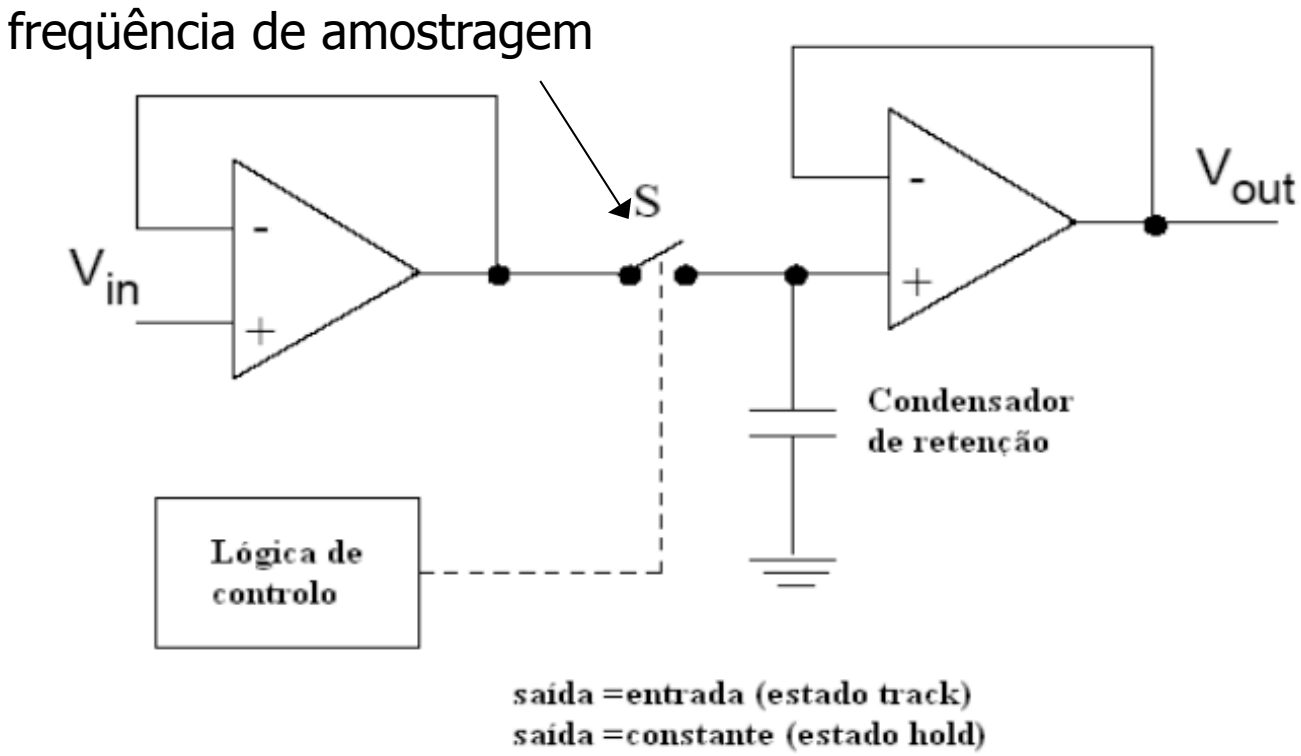
Amostragem

- A fase de amostragem é realizada utilizando-se circuitos de amostragem e retenção (sample and hold), utilizados para reter o valor analógico de um sinal.
- Em aplicações de conversores A/D pode ser interessante ler o valor do sinal a cada t segundos(tempo de amostragem). A saída será uma série de valores referentes a amostragem do sinal de entrada.
  - A periodicidade com que essas amostras são colhidas é denominada período de amostragem. Esta periodicidade influenciará na posterior recuperação do sinal amostrado.

- Teorema da amostragem (Nyquist):
  - a frequência de amostragem (taxa de amostragem) deve ser maior ou igual a duas vezes a maior frequência do sinal.
  - Quando esse teorema não é respeitado ocorre o efeito de *aliasing* (sobreposição de amostras), o que torna impossível a recuperação do sinal original.

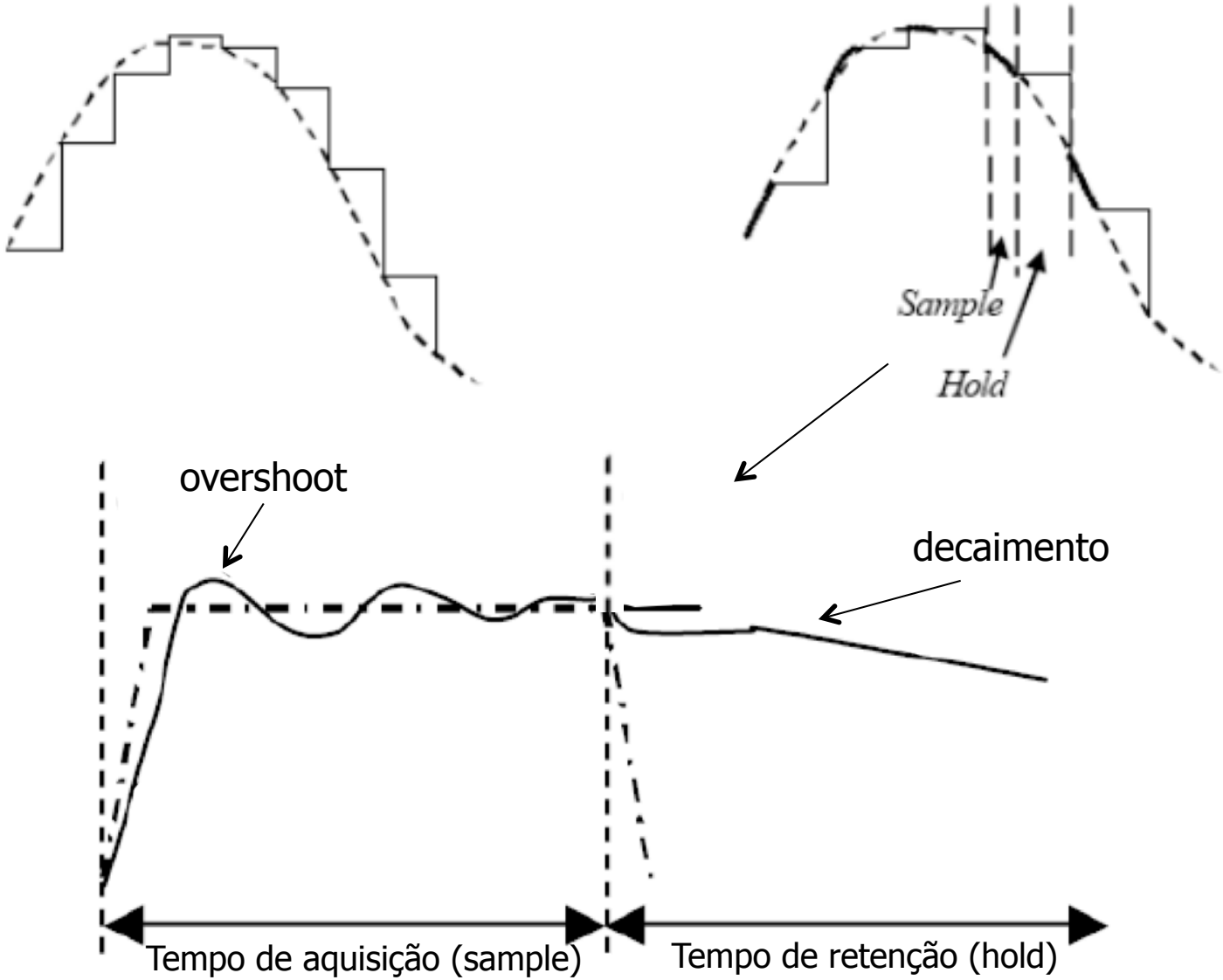
$$f_m \geq 2W$$

Amostragem e retenção (sample and hold)



- Quando o switch está ligado, o circuito encontra-se no estado de amostragem *(sample),* ou seja, a saída do circuito é igual à entrada;
- Quando o switch está desligado, o circuito encontra-se no estado de retenção *(hold),* ou seja, a saída do circuito é igual a uma constante, correspondente ao valor amostrado no instante de tempo em que o estado *hold* foi acionado.

Amostragem e retenção (sample and hold)



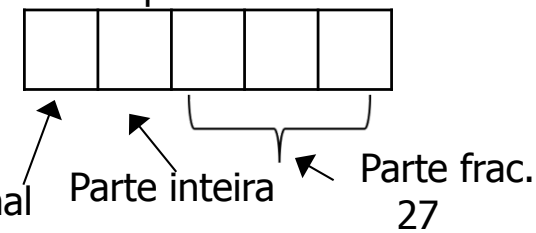
Quantização

- A quantização do valor armazenado é feita através de um circuito quantizador (conversor AD), que executa as operações de aproximação ao valor retido.

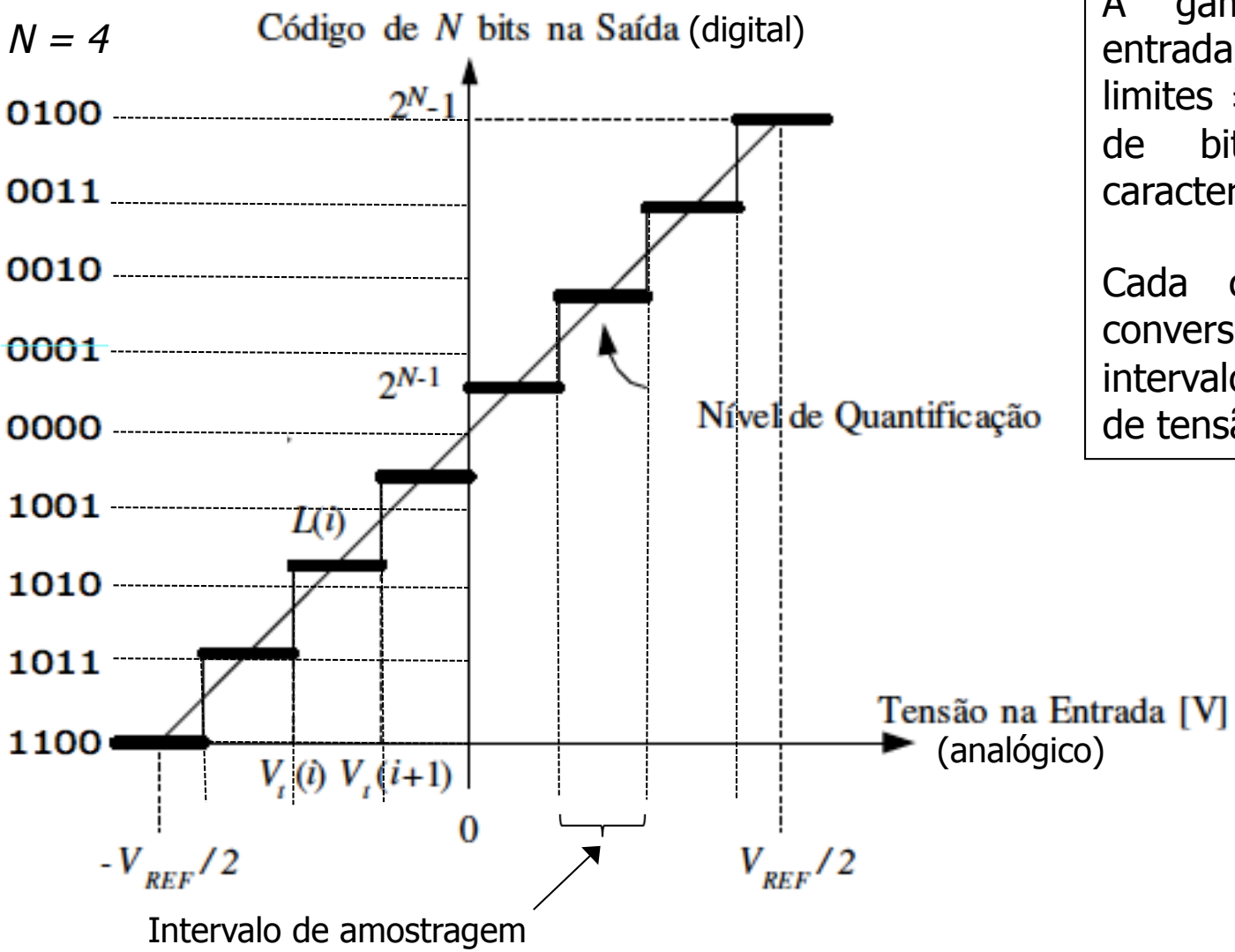
- **Exemplo:**
  - s(t) = sen wt, onde w = 12 rad/seg
  - Amostre 11 vezes no intervalo de 0 a 20 segundos.
  - Período de uma amostragem será de 2 segundos, t= nt, n= 0, 1,....10.

Amostragem	**tempo(seg)**		**X(nt)**
n	**nt**	**sen 12nt**	**(Quantização)**
0	0	0,000	00000
1	2	0,500	00100
2	4	0,866	00111
3	6	1,000	01000
4	8	0,866	00111
5	10	0,500	00100
6	12	0,000	00000
7	14	-0,500	10100
8	16	-0,866	10111
9	18	-1,000	11000
10	20	-0,866	10111

5 bits são usados para amostrar o valor digital
- 3 bits p/parte fracionária
- 1 bit p/parte inteira
- 1 bit para o sinal



Conversão A/D - Quantização



A gama de tensões na entrada, no intervalo de limites ± V_{REF} /2, e o número de bits, N, definem a característica de transferência.

Cada código na saída do conversor corresponde a um intervalo contínuo de valores de tensão na entrada.

Conversão A/D - Quantização

- Para um conversor de N bits as tensões de entrada são igualmente distribuídas por 2^N níveis diferentes. As fronteiras entre esses níveis são designadas de *tensões de transição*, $V_{t(i)}$, com i = 1,2,...,2^N−1.

- Cada par contínuo de tensões de transição define-se um nível de quantificação. A largura desses níveis representa-se pela variável:

$$L(i) = V_t(i+1) - V_t(i), \quad \text{com } i = 1,2,\ldots,2^N - 2,$$

- Em um conversor ideal o nível de quantificação é igual para todos os códigos de saída, com excepção do código 0 e 2^N−1, os quais estão associados apenas a metade desse valor.

Conversão A/D - Quantização

Considere uma tensão de entrada analógica V_{in}. A mesma seria quantificada por:

$$V_{in}' = V_{in} \pm V_x,$$

LSB – *Least Significant Bit*

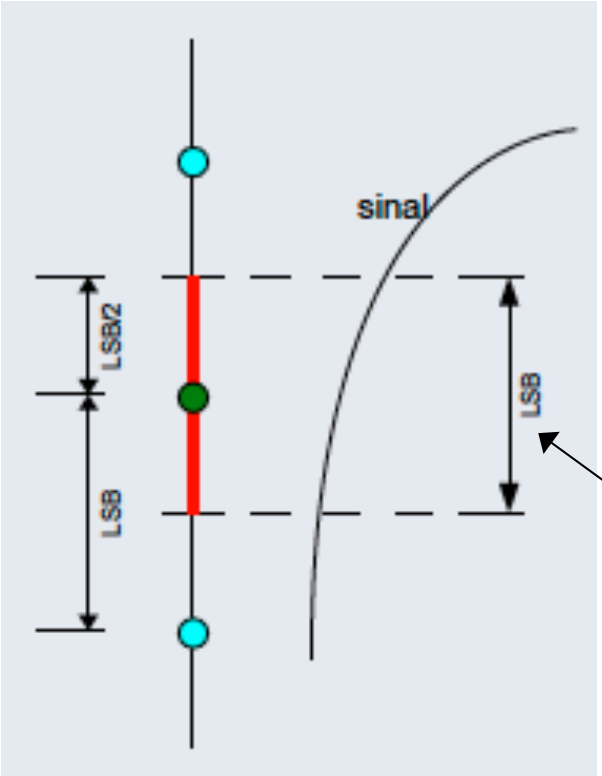
$$-\frac{1}{2}V_{LSB} \le V_x < \frac{1}{2}V_{LSB},$$

$$V_{LSB} = \frac{V_{REF}}{2^N - 1}.$$

Observamos que uma mesma palavra digital de saída representa, de fato, um intervalo de valores analógicos de tensão de entrada. Essa incerteza inerente à digitalização de um valor analógico é denominada *erro de quantização*.

O *erro de quantização* depende do número de bits no conversor, juntamente com os seus erros, ruído e não linearidades.

Erro de quantização



Limiar de detecção

- Todos os pontos do sinal que estiverem no intervalo do segmento em vermelho serão quantizados pelo nível representado pela bola verde.

- Podemos ver que o erro de quantização máximo neste cenário será LSB/2.

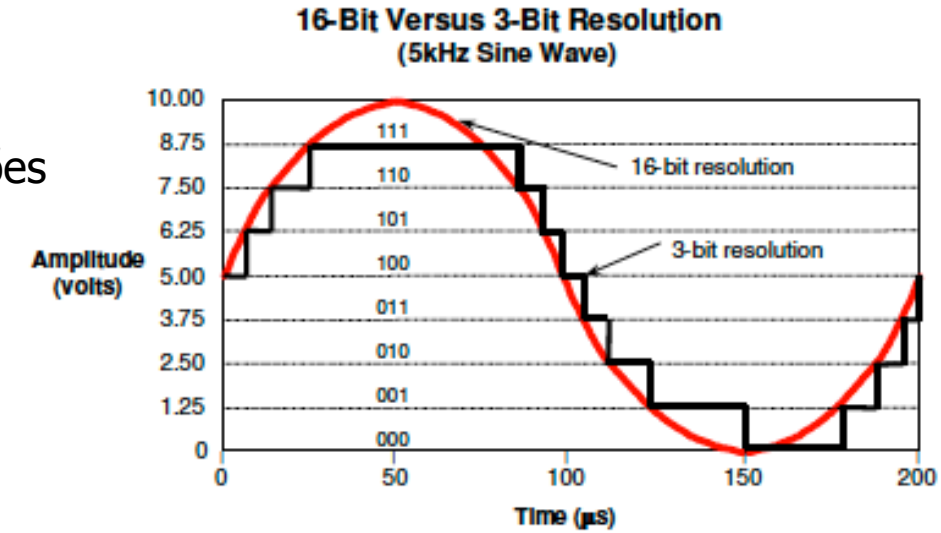
Um sinal que excursiona de 0 a 1 V, quantizado com 8 bits divide o intervalo de excusão do sinal em 256 níveis.
Desta forma, o LSB = 1 V /256 = 1/256 V
Erro de quantização = ½(LSB) = 1/512 V

Características de um conversor AD

- Resolução - A resolução de um conversor é definida como o seu número de bits. Uma resolução de N bits significa que o conversor pode distinguir entre 2^N-1 intervalos de valores analógicos diferentes.

Conversão AD:
3 bits: 2^3 (8)divisões
16 bits = 2^{16} (65.536) divisões

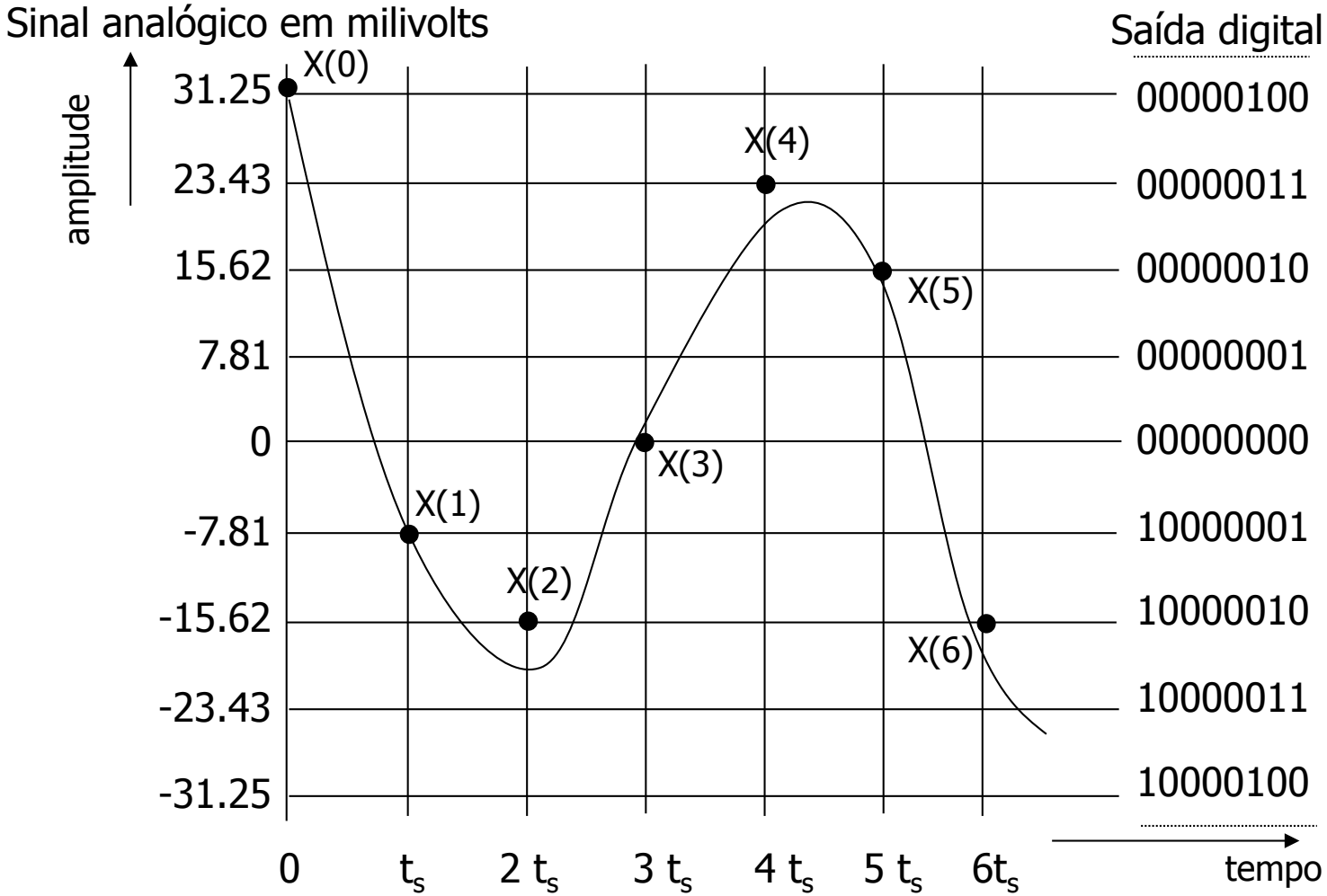
Resolução = $V_{in}/2^N$-1



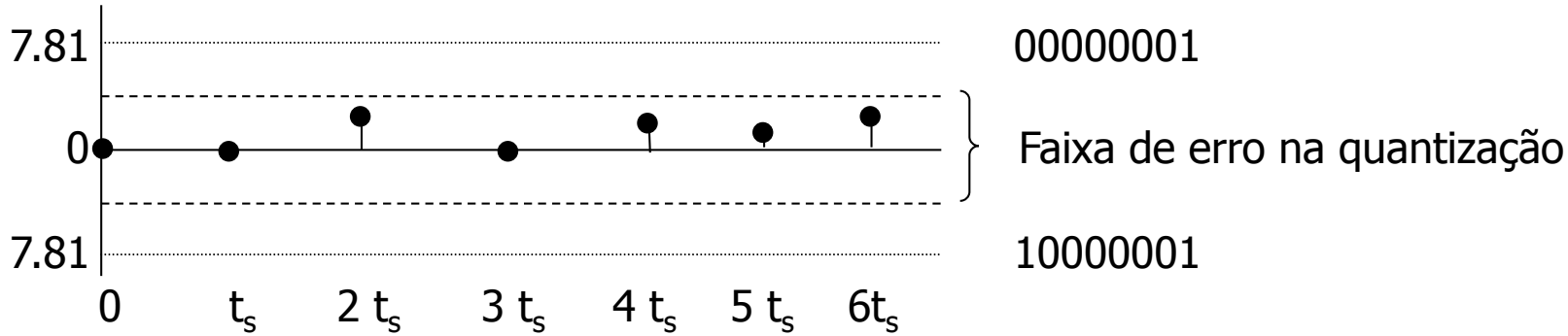
- Tempo de Aquisição - Corresponde ao tempo necessário para o S&H amostrar e reter o valor de uma tensão de entrada com uma exatidão pré-definida.

- Tempo de Conversão - Corresponde ao tempo necessário para uma conversão completa do ADC.

Conversão AD



Quantização do erro



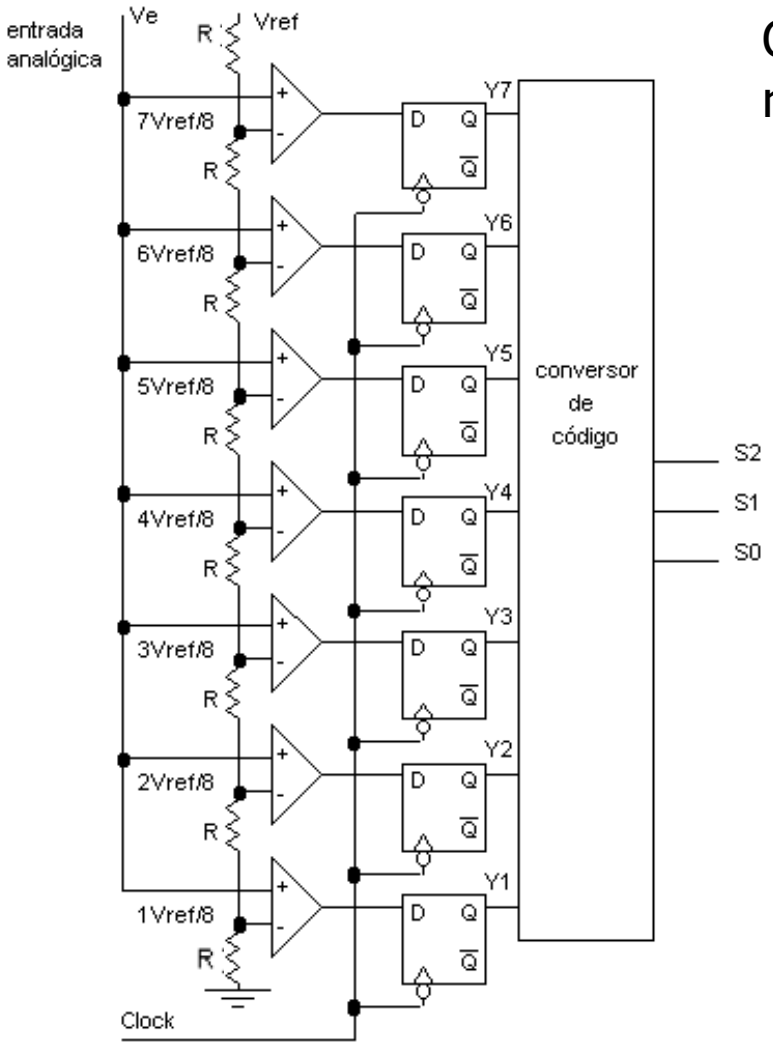
Tipos de conversores AD

- Técnicas de Conversão Analógico-Digital
  - Classificação de ADCs:
    - Integradores ou não integradores.
      - Integradores - Boa imunidade ao ruído:
        - Rampa (Simples, Dupla e Tripla).
        - Sigma-Delta (Σ-Δ).
      - Não Integradores - Maior rapidez de conversão:
        - Contador (Up, Up-Down).
        - Flash ou Paralelo.
        - Aproximações Sucessivas.
        - Redistribuição de Carga.

Tipos de conversores AD

- Com ou sem utilização de conversores digital analógico (DACs).
  - Com DAC
    - Contador (Up, Up-Down).
    - Aproximações Sucessivas.
    - Redistribuição de Carga.
    - Sigma-Delta (Σ- Δ).
  - Sem DACs
    - Rampa (Simples, Dupla e Tripla).
    - Flash ou Paralelo.

Conversor A/D Flash



Consiste em criar 2^N-1 níveis distintos de tensão de referência separados entre si por 1 LSB.

Tensão de referência

Saída

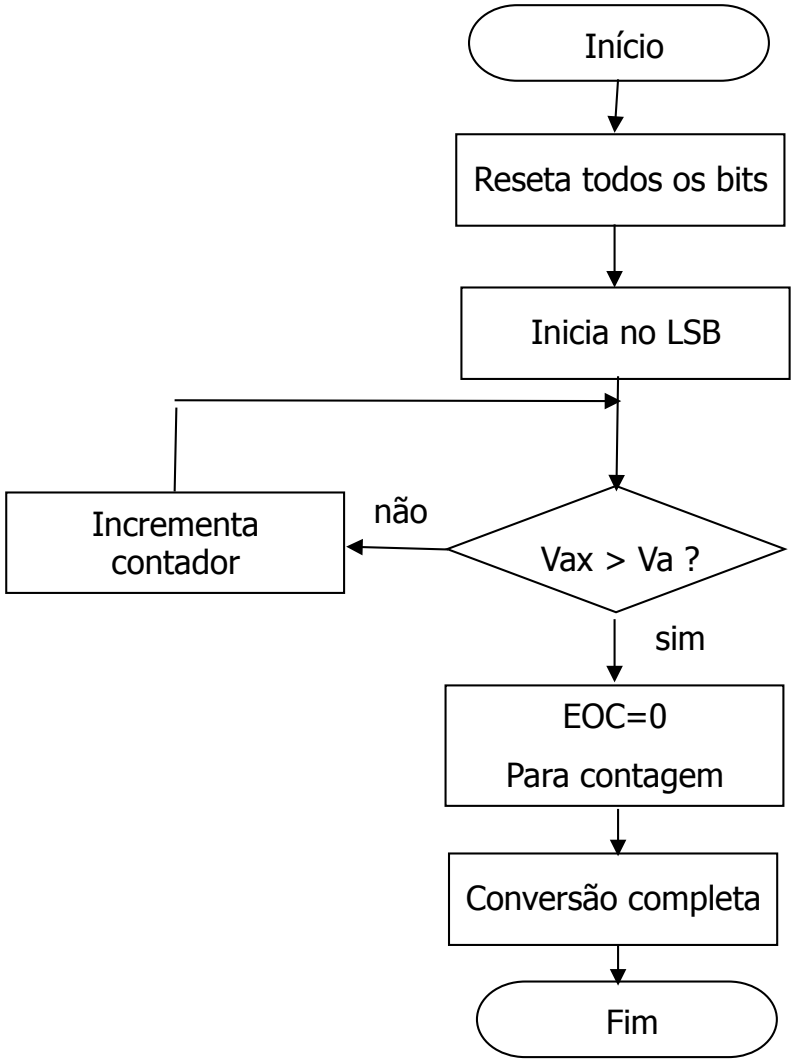
Ve	Y7	Y6	Y5	Y4	Y3	Y2	Y1	S2	S1	S0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
2	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0
3	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1
4	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0
5	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1
6	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Conversor Flash

- Características:
  - É o tipo de conversor AD mais rápido, constituído essencialmente por divisores resistivos e comparadores.
  - A rapidez de conversão do Flash permite sua utilização em frequência da ordem de 100GHz.

Conversor A/D

Conversor Analógico baseado em um contador



Início da conversão digital

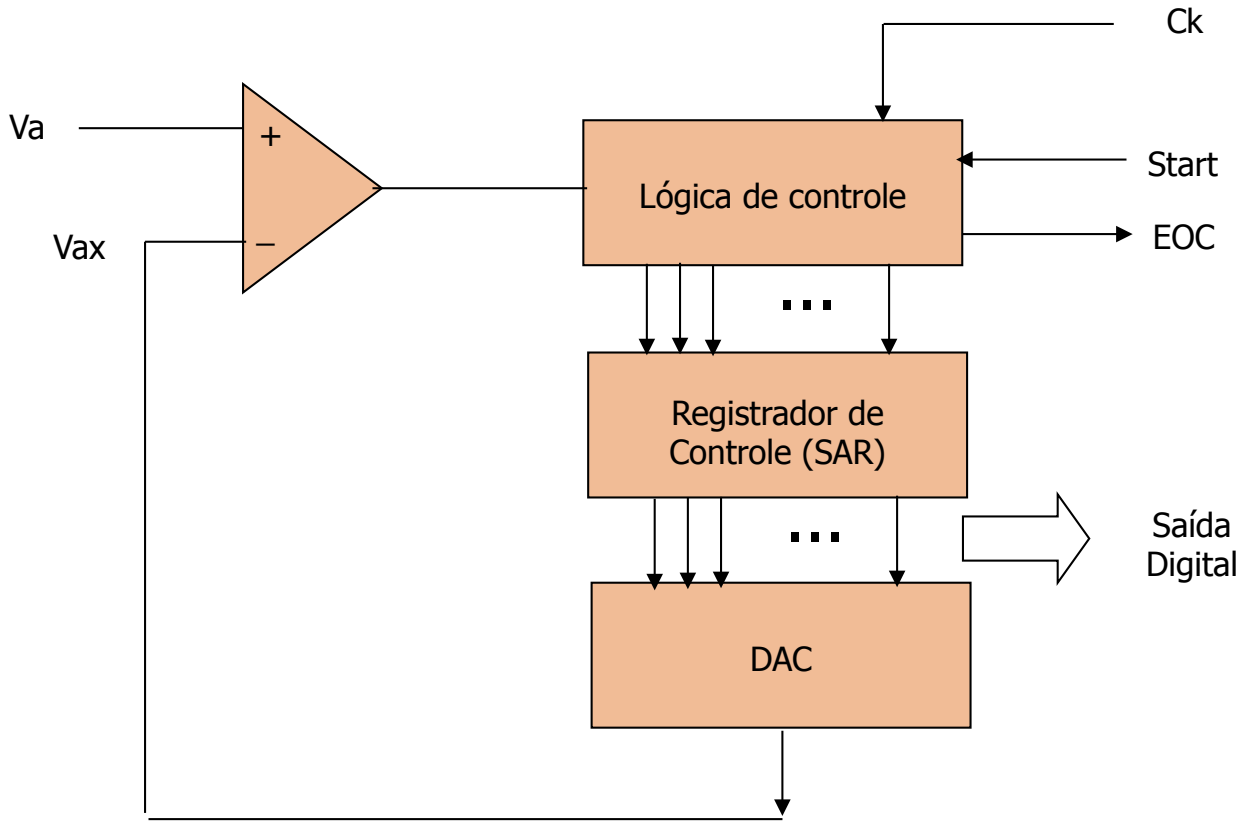
EOC =1 (Início de contagem)

Va = Valor a ser convertido

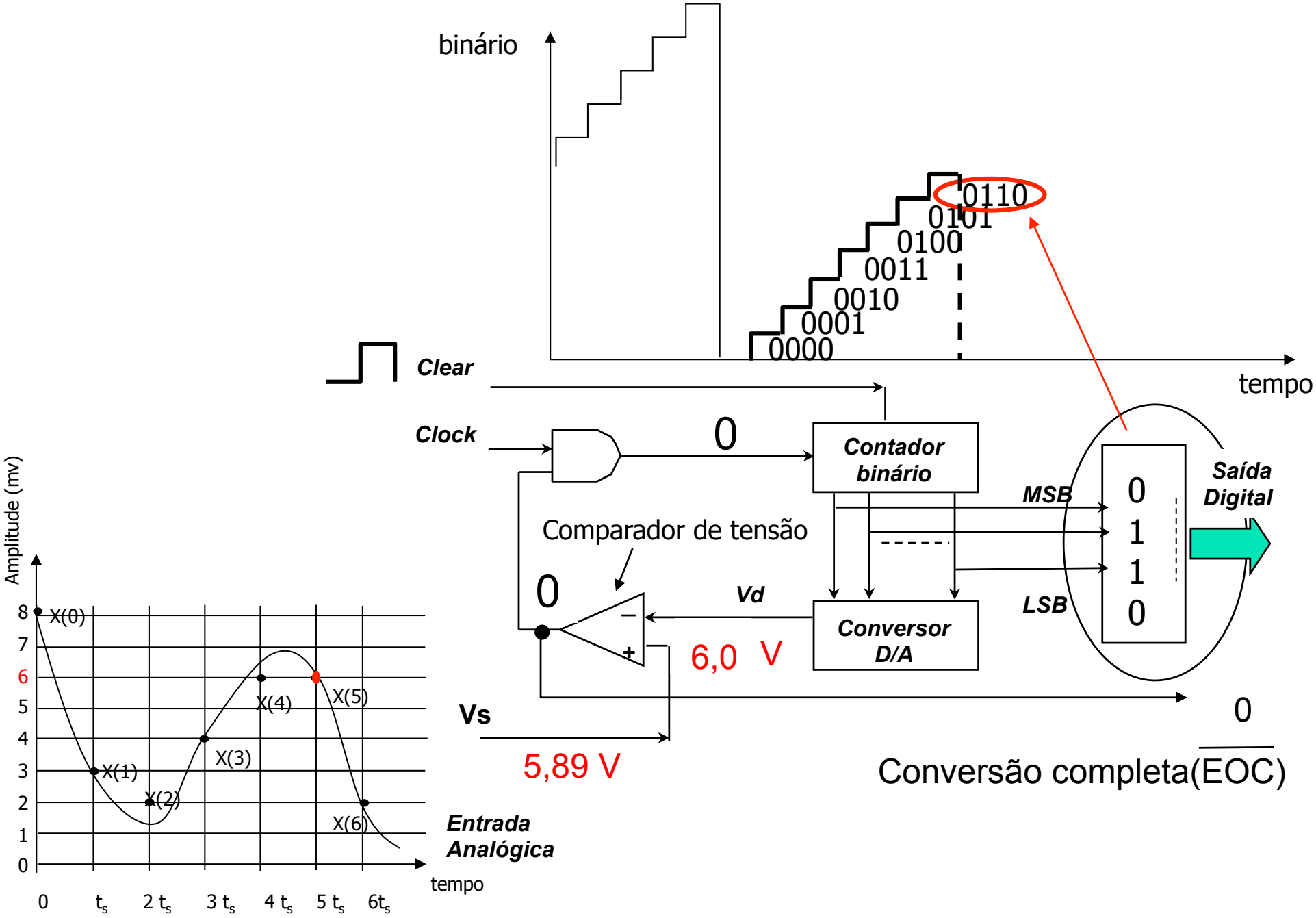
Vax = Valor gerado a ser comparado

EOC =0 (Fim de contagem)

Conversor A/D



Conversão A/D Escada



Conversor baseado em um contador

- Característcas principais:
  - Circuito simples.
  - Precisão elevada.
  - O tempo de conversão é lento quando comparado a outros métodos de conversão.
  - O tempo de conversão não é constante para todos os sinais analógicos. Depende da intensidade do sinal.

Conversor AD – Aproximação Sucessiva

- Esta técnica de conversão consiste numa comparação da tensão de entrada com uma tensão gerada pelo DAC resultante de um código binário do Registo de Aproximações Sucessivas – RAS (que faz parte do bloco de controle).

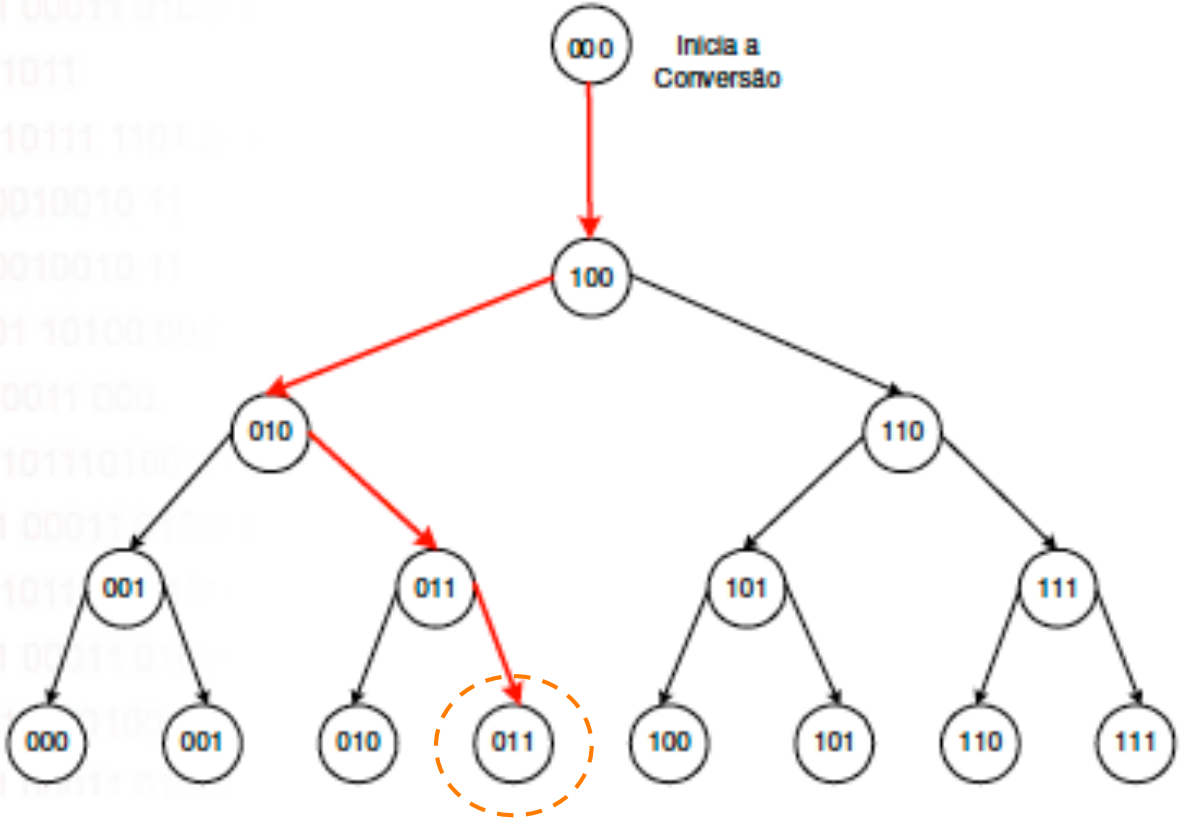
- Quando se inicia uma conversão o MSB do RAS é colocado a 1 (1/2 do valor fim-de-escala do DAC). A tensão então gerada pelo DAC é comparada com a tensão de entrada.

- Se a entrada apresenta um valor superior então o MSB é mantido a 1 e é também colocado a 1 o bit seguinte (1/4 do valor fim-de-escala) sendo feito um novo teste com este bit. Se a entrada é inferior então o MSB é colocado a 0 e o bit seguinte é testado.

- Este processo é repetido até terem sido encontrados todos os bits.

Conversor AD – Aproximação Sucessiva

Exemplo para um conversor de 3 bits – Saída 011:



Conversor AD – Aproximação Sucessiva

- Características:
  - Este método é sensível ao ruído necessitando de um sistema de filtragem.
  - A precisão do conversor depende do DAC e do comparador.
  - São geralmente utilizados para interface a computadores.
  - Possuem uma resolução elevada (cerca dos 16 bit's).
  - Possuem alta velocidade de conversão (1 MHz).
  - Não depende da amplitude do sinal de entrada.

Bibliografia

- Sistemas Digitais – Tocci & Widmer, Ed. Prentice Hall
  - Cap 10, Interface com o mundo analógico
- Eletrônica Digital – Taub & Schiling, Ed. McGraw Hill
  - Cap. Conversores AD e DA
- Understanhdo Data Converters, Application Report. Texas Instruments, 1995. (http://www.ti.com/lit/an/slaa013/slaa013.pdf)
- www.inatel.br