

## Conversores Analógico/Digital (A/D)

Um conversor A/D é um circuito que converte um nível de tensão (ou corrente) em um valor numérico (digital) correspondente. São a base de qualquer instrumento de medição digital. Existem várias topologias de circuitos conversores A/D, cada uma delas com características específicas priorizando a velocidade de conversão, a resolução, a simplicidade ou o custo.

### Conversor A/D Paralelo ou *Flash*

O processo de conversão A/D é feito de modo paralelo (todos os bits simultaneamente), o que possibilita uma maior velocidade de operação. O sinal de entrada é comparado com  $2^n - 1$  valores intermediários de tensão distribuídos linearmente dentro da faixa dinâmica do conversor ( $n = n^\circ$  de bits do conversor). Para cada valor intermediário é utilizado um comparador de tensão. A saída dos  $2^n - 1$  comparadores é combinada por um conjunto de portas digitais, fornecendo o resultado de saída em código binário.

Circuito típico:

- $n = 2 \Rightarrow 2^2 - 1 = 3$   
comparadores de tensão

Ex: Para  $V_{ref} = 4V$ :  $V_1 = 0,5V$ ;  $V_2 = 1,5$ ;  $V_3 = 2,5V$ . A tabela a seguir mostra alguns valores digitais de saída para valores diferentes de  $V_i$ :

$V_i$ (V)	0	1	2	3
LSB	0	1	0	1
MSB	0	0	1	1

Características gerais:

- circuito complexo → alto custo;
- baixa resolução (tipicamente 4 à 8 bits);
- alta velocidade de conversão (MS/s – GS/s, sendo *S/s* equivalente a *samples per second* ou *amostragens por segundo*);
- tempo de conversão é definido pela velocidade dos comparadores e circuito codificador
- usado em osciloscópios digitais.

### Conversor A/D de Rampa Simples

É baseado na geração de uma rampa de tensão linear no tempo, obtida pela integração da tensão de entrada  $V_i$  (circuito integrador com AMPOP).

Circuito típico:

- Utiliza somente 2 comparadores de tensão;
- Possui tempo de conversão variável;
- $f_{ck}$ : sinal quadrado de frequência constante.

O tempo gasto para a rampa de tensão atingir um nível de tensão de referência é acumulado por um contador digital de  $n$  bits, sendo proporcional à tensão de entrada. A rampa de tensão é iniciada juntamente com o contador (“reset”) e a contagem prossegue até que o nível de referência seja atingido.

\* O integrador funciona também como um filtro passa-baixas do sinal de entrada.

Características gerais:

- circuito simples → baixo custo;
- tempo de conversão elevado e dependente de  $V_i$  (10ms à 1s);
- usado em médias e altas resoluções (8 à 12 bits);
- alta imunidade a ruído devido à integração do sinal de entrada\* ;
- o valor convertido depende da frequência de *clock* e do capacitor de integração.

### **Conversor A/D de Rampa Dupla**

É baseado na mesma topologia do conversor de rampa simples, com uma lógica adicional que permite eliminar a dependência da conversão com a frequência de *clock* e com o capacitor de integração. Circuito típico:

Obs:  $V_i$  deve sempre ter polaridade contrária à  $V_{ref}$ .

Funcionamento:

- 1) No início de cada etapa é efetuado um *reset* do contador e do capacitor de integração ( $T_0$ ).
- 2) o sinal de entrada  $V_i$  é integrado por um número fixo de contagens ( $T_1$ );
- 3) em seguida a tensão de referência  $V_{ref}$  é integrada até que  $V_o = 0$  ( $T_2$ );
- 4) o número de contagens efetuadas durante o tempo  $T_2$  é proporcional à  $V_i$
- 5) o valor digital é obtido diretamente da saída do contador binário

Graficamente:

- $T_1 : \Delta V_o = \frac{1}{RC} \cdot T_1 \cdot V_i$   $\left\{ \begin{array}{l} V_i/RC : \text{inclinação da reta;} \\ T_1: \text{valor final de } V_o. \end{array} \right.$
- $T_2 : \Delta V_o = \frac{1}{RC} \cdot T_2 \cdot V_{ref}$
- $T_0$ : tempo de reset;
- $T_1$ : tempo de integração constante =  $\frac{2^n}{fck}$  ;
- $T_2$ : tempo de “de-integração” variável .

Tempo total de conversão:  $\mathbf{T = T_0 + T_1 + T_2}$

Características gerais:

- Idênticas às do conversor de rampa simples com as vantagens de fornecer um valor digital independente de frequência de *clock* (para pequenos intervalos de tempo – em que não varie a temperatura, por exemplo) e da constante de integração RC.
- É o tipo de conversor usado em multímetros digitais e instrumentos de medida de baixa velocidade e alta resolução (12 à 22 bits).

### Considerações Gerais Sobre Conversores A/D

- Relação entre a tensão de entrada  $V_i$  e o valor digital de saída:

$$V_i = q \cdot [2^0 \text{ bit}0 + 2^1 \text{ bit}1 + \dots + 2^{(n-1)} \text{ bit}(n-1)] + Eq$$

$n$ : número de bits do conversor;

$q$ : intervalo de quantização;

$Eq$ : erro de quantização

- Intervalo de quantização ( $q$ ): menor intervalo de tensão que pode ser resolvido pelo conversor.

$$q = \frac{V_{FS}}{2^n}$$

$V_{FS}$ : tensão de fundo de escala

(normalmente  $V_{FS}=V_{ref}$ );

- Erro de quantização ( $Eq$ ): erro intrínseco ao processo de conversão A/D pela discretização dos níveis de tensão de entrada na etapa de comparação. Varia em função da tensão de entrada e possui valores de pico dados por:

$$Eq = \pm \frac{V_{FS}}{2^{n+1}} = \frac{q}{2}$$

Em geral o erro de quantização é expresso em valor eficaz ( $V_{RMS}$ ):

$$Eq_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{q} \int_{-q/2}^{+q/2} x^2 dx} = \frac{q}{2\sqrt{3}} [V_{RMS}]$$