



Conversores A/D e D/A

Como pode ser observado, conversores analógico-digital (A/D) e digital-analógico (D/A) são responsáveis por uma grande parcela de todo o interfaceamento entre o ambiente externo (domínio analógico) e os equipamentos eletrônicos (domínio digital). Particularmente, um conversor A/D é comumente utilizado como interface para um sensor (termopar, microfone, foto-sensor), visando converter um sinal analógico (tensão ou corrente de saída de um sensor) em um sinal digital que pode então ser processado. Por sua vez, um conversor D/A é considerado como interface entre o processador e um atuador (motor, ventilador, luz, aquecedor, pistão pneumático), onde um sinal digital (resultado de um processamento) precisa ser convertido em um sinal analógico para acionar um determinado dispositivo; por exemplo, acionar um motor cuja velocidade de rotação é controlada pelo nível de tensão ou corrente presente em um dos seus circuitos de comando. Portanto, conversores A/D e D/A tem uma grande aplicabilidade prática.

As principais características de conversores A/D e D/A são:

- *Faixa dinâmica*: representa a máxima variação de amplitude do sinal analógico (tensão) para a qual o conversor opera em regime linear.
- *Resolução*: denota a menor variação que pode ser detectada dentro da faixa dinâmica considerada (depende do número de bits do conversor). Especificamente, a resolução de um conversor A/D é dada por

$$\begin{aligned} V_{\text{res}} &= \frac{V_{\text{max}} - V_{\text{min}}}{2^N - 1} \\ &= \frac{V_{\text{ref}}}{2^N - 1} \end{aligned}$$

onde V_{max} representa a tensão máxima da escala, V_{min} a tensão mínima e N o número de bits do conversor considerado. Note que N caracteriza o número de bits utilizados para representar a informação analógica no domínio digital, ou seja, um maior número de bits implica uma maior precisão.

- *Tempo de conversão*: caracteriza o tempo necessário para se obter o valor na saída do conversor a partir do momento em que um dado sinal foi aplicado na entrada.



No mercado existem inúmeros tipos de conversores A/D e D/A com diferentes resoluções (variando, por exemplo, de 2 a 24 bits), número de canais e frequências de amostragem (compreendendo desde 30 até 600 mil amostras por segundo). Geralmente, quanto melhor a resolução (maior número de bits utilizados para representar o sinal amostrado) mais caro é o conversor A/D ou D/A. Analogamente, quanto menor o tempo de conversão (frequência de amostragem mais alta), mais caro tende a ser o conversor A/D ou D/A. Em função desses aspectos, é importante conhecer as características de cada tipo de estrutura utilizada para realizar a conversão.

1.1. Conversores A/D

A conversão de um sinal analógico (contínuo) em digital pode ser visto como um processo de duas etapas, denominadas amostragem e quantização. Na primeira etapa, conforme apresentado na Figura 1, o sinal analógico passa por um circuito do tipo S/H (*sample and hold*), o qual visa manter constante o sinal durante um dado intervalo de tempo T_s (período de amostragem). Tal processo de amostragem e retenção é essencial para o funcionamento apropriado de um conversor A/D, já que a operação de conversão pode ser drasticamente afetada caso o sinal de entrada do conversor fique flutuando durante a sua operação. Em outras palavras, o sinal analógico (entrada do conversor A/D) deve ser mantido constante durante o tempo necessário para que a conversão seja realizada; para tal, um circuito contendo um capacitor para armazenar a carga associado a uma chave para conectar e desconectar o capacitor da entrada analógica é utilizado. Na prática, a maioria dos conversores A/D já inclui internamente um circuito de amostragem e retenção (S/H), o qual muitas vezes é construído através de amplificadores operacionais de ganho unitário (veja [1]).

An ADC works by sampling the value of the input at discrete intervals of time.

Na segunda etapa de conversão A/D, o valor amostrado é então quantizado por meio de algum tipo de estrutura destinada a isso, resultando em um valor discreto tanto no tempo quanto em escala. Nessa etapa de quantização, o valor amostrado (analógico) é convertido em um valor binário equivalente, o qual é agora usado para representar o sinal (em um dado instante) no domínio digital. Todavia, como não é possível discriminar os infinitos valores analógicos com um número finito de bits, cada número



binário corresponde a uma faixa de valores analógicos (conforme ilustrado na Figura 2); em outras palavras, tal conversão não é isenta de perdas, uma vez que os diferentes valores de tensão analógica são separados em níveis/degraus no domínio digital. O erro, entre o valor exato de tensão e aquele quantizado (número digital) pode ser considerado como um ruído de quantização. Note que esse ruído pode ser feito tão pequeno quanto o necessário aumentando o número de bits utilizados para discriminar os diferentes valores analógicos, ou seja, melhorando a resolução do conversor. Especificamente, a razão sinal-ruído (expressa em dB) de um conversor A/D ou D/A é dada por

$$\text{SNR} = 6,02N + 1,78$$

onde N denota o número de bits do conversor.

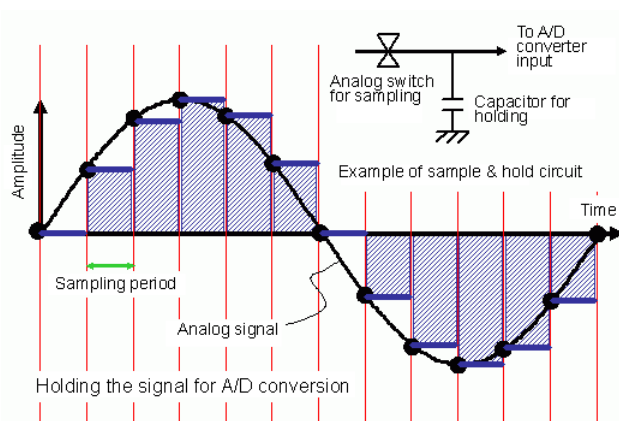


Figura 1. Amostragem de um sinal analógico.

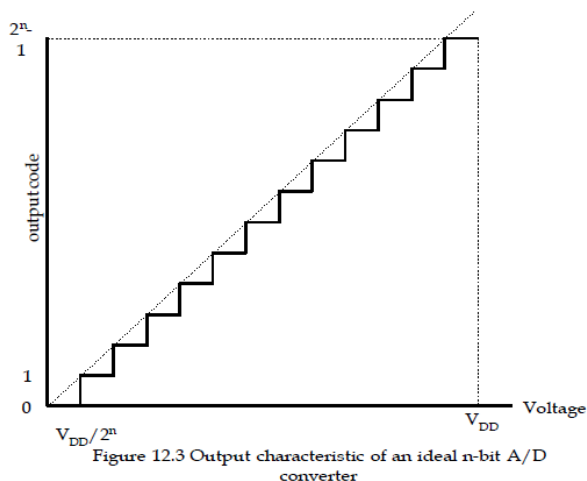


Figura 2. Características de um quantizador ideal de N bits.



Para efetuar a operação de quantização propriamente dita, diferentes estruturas vêm sendo propostas na literatura e utilizadas comercialmente, levando a uma grande variedade de conversores A/D. Dentre as principais estruturas, se destacam a do tipo comparador paralelo (flash), aproximações sucessivas (considerada no PIC), rampa digital, rampa dupla, pipelined, tensão-frequência e modulação sigma-delta (para detalhes, veja [1]). Obviamente que cada uma dessas estruturas tem suas próprias vantagens e limitações, o que torna importante conhecer detalhadamente suas características a fim de compreender melhor quando uma ou outra estrutura deve ser considerada em uma dada aplicação.

Além dos problemas relacionados a amostragem e quantização, é ainda importante assegurar que o sinal analógico seja amostrado considerando uma frequência de amostragem f_s de no mínimo duas vezes a frequência máxima f_{\max} presente no sinal, visando satisfazer o teorema de Nyquist; caso contrário, o sinal analógico não poderá ser reconstruído adequadamente a partir da sua versão digital, devido ao efeito de sobreposição (para detalhes, veja [2]). Em outras palavras, o período de amostragem do sinal analógico deve satisfazer a seguinte condição:

$$T_s = \frac{1}{f_s} \\ \geq \frac{1}{2f_{\max}}.$$

Na prática, visando minimizar o efeito de sobreposição, um filtro passa-baixas com frequência de corte dada por f_{\max} pode ser introduzido antes do conversor A/D, removendo assim componentes de frequência maiores do que f_{\max} (conforme ilustrado na Figura 3). Portanto, se a condição de Nyquist for satisfeita (caso ideal), pode-se inferir que a precisão na reconstrução do sinal está limitada aos erros de quantização.

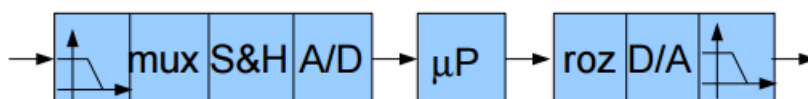


Figura 3. Processo de discretização de um sinal analógico.

1.1.1. Conversor A/D do tipo comparador paralelo

O conversor A/D do tipo comparador paralelo ou conversor flash é uma das estruturas cujo princípio de operação é mais simples (veja Figura 4). Nessa estrutura, a faixa de tensão analógica considerada é dividida em N intervalos (degraus) regulares através de divisores de tensão, criando assim uma tensão de referência para cada um dos comparadores da estrutura. Então, o sinal de entrada analógico é conectado a cada comparador da estrutura, os quais geram um nível lógico alto/baixo caso a entrada seja maior/menor do que sua tensão de referência (definida pelo divisor de tensão). Como o código obtido na saída dos comparadores não é binário, é necessária a utilização de uma lógica combinacional para convertê-lo em um código binário. Note que, além dos componentes necessários para o circuito de lógica combinacional, este tipo de estrutura requer $2^N - 1$ comparadores para um conversor A/D de N bits (2^N níveis) e 2^N resistores.

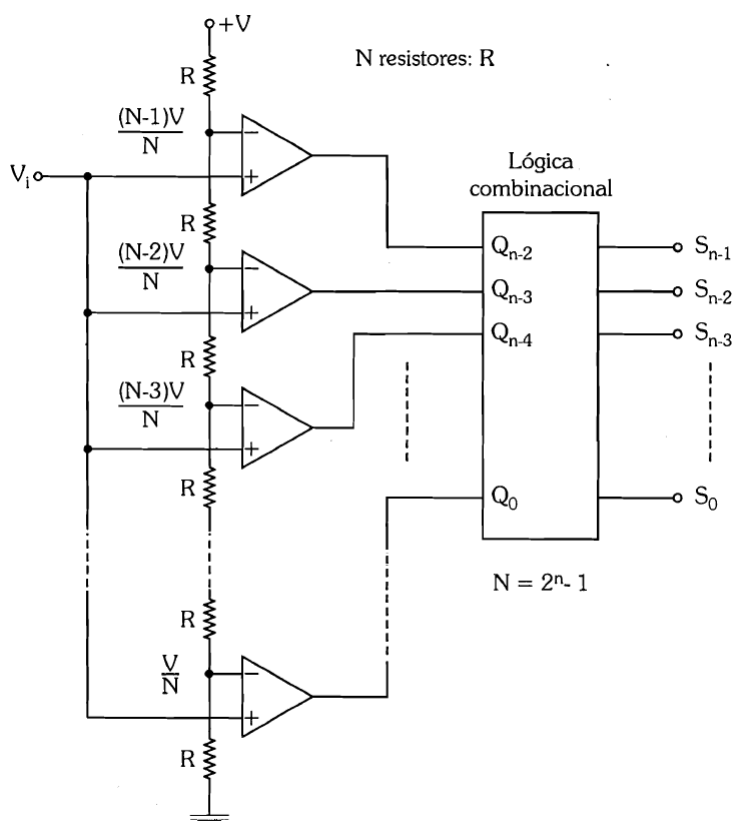


Figura 10.12 - Conversor A/D comparador paralelo.

Figura 4. Estrutura de um conversor A/D comparador paralelo.

Como principal vantagem de um conversor A/D comparador paralelo, pode-se



citar a elevada velocidade de conversão, visto que o tempo de conversão depende apenas dos atrasos de propagação dos comparadores e do circuito de lógica combinacional. Por essa razão, os conversores A/D do tipo comparador paralelo são adequados para aplicações que envolvem a digitalização de sinais analógicos de alta frequência, tais como em sistemas de comunicação, radar e sonar como também em osciloscópios e analisadores de espectro. Contudo, devido ao grande número de comparadores, este tipo de conversor A/D tende a ter um alto consumo de energia como também ser mais caro em função da inerente complexidade da estrutura. Por isso, tal estrutura é viável apenas para resoluções relativamente baixas (de 2 a 10 bits) como pode ser observado no âmbito comercial.

1.1.2. Conversor A/D do tipo aproximações sucessivas

Na prática, o conversor A/D do tipo aproximações sucessivas é um dos mais amplamente utilizados. Esse tipo de estrutura utiliza um conversor D/A para fornecer uma tensão de referência que é então comparada com a tensão do sinal de entrada analógico (conforme ilustrado na Figura 5). O elemento principal desse tipo de conversor A/D é um contador circular da esquerda para direita (MSB para LSB), denominado registrador de aproximações sucessivas. Basicamente, a lógica de controle incrementa o valor binário de tal registrador a cada iteração (modificando-o bit-a-bit), o qual é utilizado como entrada de um conversor D/A que produz um sinal de referência para o comparador. Assim, o registrador é incrementado até que a tensão de referência gerada pelo conversor D/A seja o equivalente quantizado da tensão analógica considerada. Consequentemente, após modificar um-a-um os bits do registrador, o valor resultante no registrador equivale ao valor quantizado do sinal analógico em análise, levando em conta a resolução do conversor.

Em estruturas do tipo aproximações sucessivas, são necessários N ciclos de clock (iterações) para que a lógica de controle possa atuar sobre cada bit do registrador, modificando-o e decidindo se tal bit deve ou não ser mantido em nível lógico alto. Portanto, apesar desse tipo de estrutura ter um custo significativamente menor mesmo para conversores A/D com vários bits, torna-se evidente que o tempo de conversão requerido pode ser um fator limitante para sua utilização em determinadas aplicações práticas. Comparativamente, o tempo de conversão observado nesse tipo de estrutura

tende a ser muito maior do que aquele obtido em uma estrutura do tipo comparador paralelo, especialmente, se um conversor A/D com um grande número de bits for considerado. Dessa forma, esse tipo de estrutura tem melhor aplicabilidade em sistemas de sensoriamento.

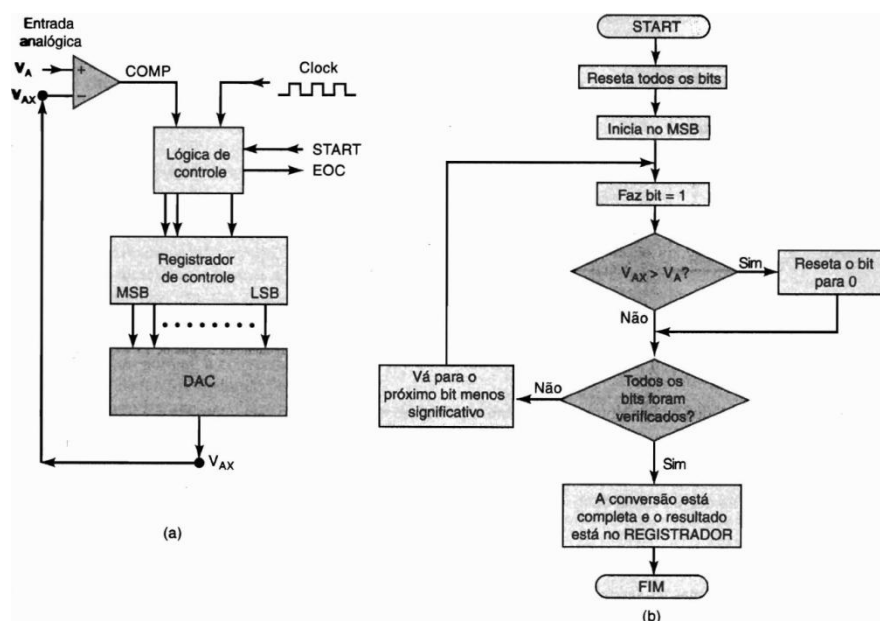
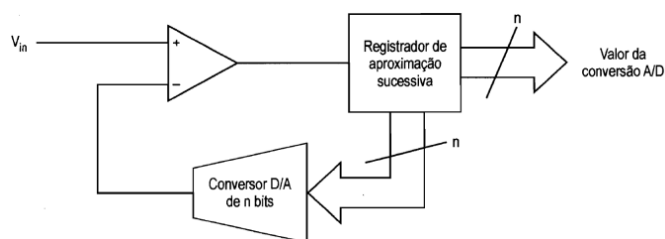


Figura 5. Estrutura de um conversor A/D do tipo aproximações sucessivas.



Atualmente, é possível encontrar conversores A/D do tipo aproximações sucessivas capazes de operar com frequências de amostragem da ordem de 100 kHz (implicando um tempo de conversão de 10 μ s), tais como o circuito integrado MAX1245 da Maxim. Tal circuito integrado tem um conversor A/D capaz de operar com uma frequências de amostragem de 100 kHz, uma resolução de 12 bits, 8 canais analógicos e, ainda, oferece suporte aos protocolos SPI e 1-wire, dentre outros. (Esse circuito integrado possui também internamente um circuito de *sample and hold*).

Apesar de existirem circuitos integrados dedicados a efetuar a conversão A/D, é importante mencionar que muitos microcontroladores comerciais já possuem



conversores A/D do tipo aproximações sucessivas integrados. Particularmente, microcontroladores como o PIC16F877A e o PIC18F4520 da Microchip possuem um conversor A/D integrado de 10 bits, capaz de operar com 8/13 canais analógicos (multiplexados) e uma frequência de amostragem de até 15 kHz. Tais microcontroladores possuem ainda circuitos de *sample and hold* incorporados, o que simplifica sobremaneira o interfaceamento com o mundo externo [3], [4].

1.2. Conversores D/A

Existem diversos métodos para implementar a conversão de um sinal digital para analógico, cada um deles tendo suas vantagens e limitações. Dentre os principais métodos, destacam-se o conversor D/A com resistores ponderados, com amplificador operacional, com chave seletora digital, com rede R-2R e com rede R-2R utilizando amplificador operacional. Embora não seja necessário conhecer profundamente cada método, é importante conhecer a filosofia de funcionamento de um conversor D/A. Para tal, considere o circuito apresentado na Figura 6, o qual representa um dos conversores D/A cujo princípio de operação é mais simples. Observe que nessa configuração, dois valores de resistores são utilizados (R e $2R$) e, dependendo da entrada b_0 - b_N , a corrente de saída será alterada. Essa corrente pode ainda ser utilizada como entrada de um amplificador operacional na configuração conversor de corrente-tensão como também conectada a um resistor $2R$ para produzir um sinal analógico proporcional à entrada binária.

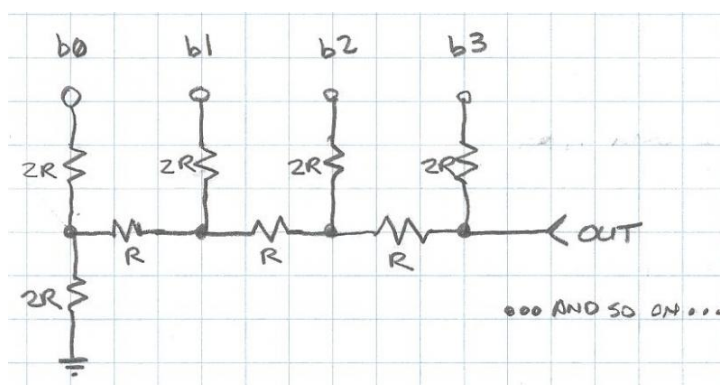


Figura 6. Conversor D/A utilizando rede R-2R.



Referências

- [1] R. J. Tocci, N. S. Widmer, and G. L. Moss, *Sistemas digitais: Princípios e aplicações*, 11 ed. São Paulo, SP: Pearson Education, Inc., 2011.
- [2] A. V. Oppenheim, A. S. Willsky, and S. Hamid, *Signals and systems*, 2nd ed. Prentice-Hall, 1996.
- [3] W. S. Zanco, *Microcontroladores PIC: Técnicas de software e hardware para projetos de circuitos eletrônicos com base no PIC16F877A*, 2^a ed. Editora Érica LTDA., 2012.
- [4] D. R. Sousa, D. J. Souza, and N. C. Lavinia, *Desbravando o microcontrolador PIC18F4520: Recursos avançados*, 1st ed. São Paulo, SP: Editora Érica LTDA., 2010.