

---

# Capítulo 2

## Conversión Analógico/Digital

---

### 2.1 Introducción

Un Convertidor Analógico-Digital (CA/D) es un circuito electrónico que transforma una señal continua en el tiempo y en amplitud (señal analógica) en otra señal discreta en el tiempo y cuya amplitud está cuantificada y codificada, generalmente mediante un código binario (señal digital).

El CA/D es uno de los bloques esenciales que integran un sistema electrónico que utiliza procesamiento digital de señal.

Varias son las ventajas del procesamiento en el dominio digital de señales frente al mismo en el dominio analógico. Entre ellas podemos destacar:

- Robustez ante los ruidos e interferencias: Como las señales digitales se representan con un número discreto de valores eléctricos, resulta muy difícil para una perturbación contaminar una señal digital tanto como para llevarla a otro valor discreto. Esto no ocurre con una señal analógica, donde una pequeña perturbación puede variar el valor de dicha señal y alterar su posterior lectura y/o procesado.
- Diseño y desarrollo de circuitería simple: Como en último término tenemos secuencias de valores discretos, el diseño es personalizable, de ahí el que cada vez más el diseño de circuitos digitales tenga más un carácter de *software* (o de programación) que de *hardware* (con elementos físicos). Esto se debe a que los circuitos digitales son más modulables que los analógicos, de manera que se puede diseñar un bloque digital y su funcionalidad no se altera sustancialmente cuando ese bloque se conecta a otros. Este no es el caso de la circuitería analógica.

En la Figura 2.1 se ilustra un esquema general de un sistema de procesamiento digital de señales:



**Figura 2.1.: Sistema de procesamiento digital de señales**

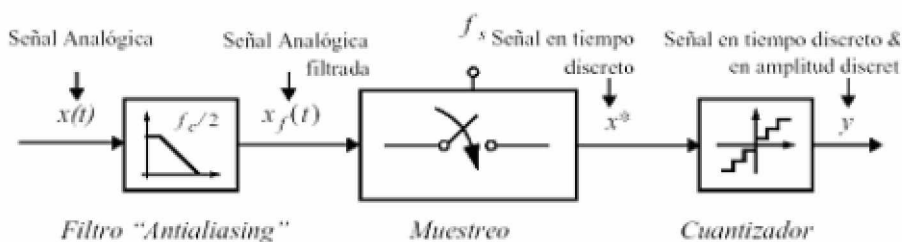
La señal de salida del procesador digital puede necesitar nuevamente una conversión de formato, en este caso de digital a analógico, antes de ser entregada al receptor de la información (Figura 2.1); o, por el contrario, puede no requerir de ninguna conversión, preservando la señal el carácter digital.

## 2.2 Conceptos básicos

La conversión de una señal analógica a una señal digital incluye tres procesos fundamentales, que son:

- Prefiltrado antisolapamiento (o “antialiasing”).
- Muestreo.
- Cuantización.

Los bloques asociados a estos procesos se muestran en la figura 2.2:



**Figura 2.2.: Diagrama general de un convertidor A/D**

Junto a estos tres procesos fundamentales veremos otros dos, que son:

- Codificación.
- Conversión de la tasa de muestreo.

## 2.2.1 Filtro analógico antisolapamiento

La señal analógica realmente nunca estará, estrictamente hablando, limitada en banda, por lo que filtramos la señal para que la entrada a nuestro muestreador sea una señal limitada en banda y no se produzca el fenómeno de solapamiento de bandas de frecuencias (o “aliasing”), que conllevaría una pérdida de información de la señal, y por lo tanto podría llegar a inutilizar el sistema. En concreto, este filtro eliminará las componentes frecuenciales de la señal de entrada por encima de la frecuencia de Nyquist.

## 2.2.2 Muestreo

El muestreo es el procedimiento mediante el cual una señal analógica  $x_a(t)$ , continua en el tiempo, se transforma en una señal en tiempo discreto  $x(n)$ , formada por las “muestras” tomadas de la señal original en distintos instantes de tiempo discreto. El método de muestreo más utilizado es el muestreo uniforme (Figura 2.3), que toma las muestras en intervalos de tiempo equiespaciados ( $T_s$ ):

$$x(n) = x_a(nT_s), \quad -\infty < n < +\infty \quad (2.1)$$

Donde  $T_s$  es el periodo de muestreo y  $F_s = 1/T_s$  es la frecuencia de muestreo.

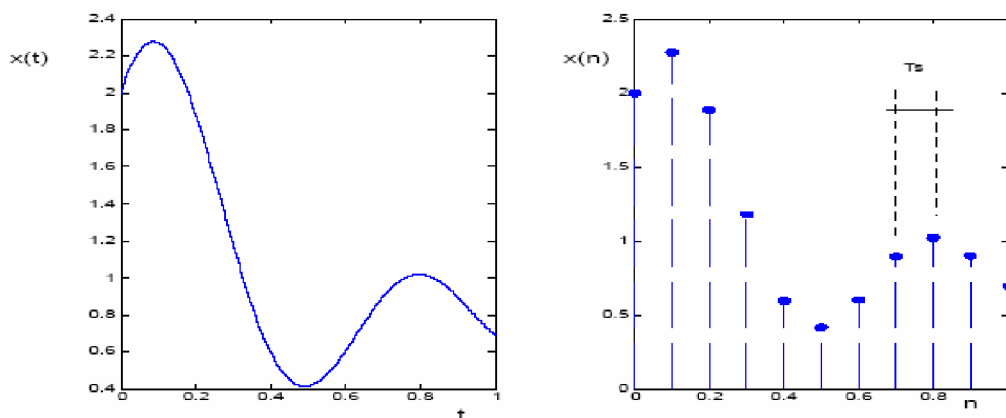


Figura 2.3.: Muestreo uniforme de una señal analógica

### 2.2.2.1 Teorema de muestreo

*Teorema de muestreo:*

"Si una señal continua,  $S(t)$ , tiene una banda de frecuencia tal que  $f_m$  es la mayor frecuencia comprendida dentro de dicha banda, dicha señal podrá reconstruirse sin distorsión a partir de muestras de señal tomadas a una frecuencia  $f_s$ , siendo  $2f_m < f_s$ ".

La señal  $x_a(t)$  se puede reconstruir totalmente a partir de sus muestras si la tasa de muestreo o frecuencia  $F_s$  cumple que  $F_s > 2B$ , siendo  $B$  la componente espectral máxima de la señal  $x_a(t)$ .

$F_N = 2B$  se denomina Tasa o Frecuencia de Nyquist.

Teorema de Muestreo  $\Rightarrow F_s > F_N$

Si la frecuencia de muestreo  $F_s$  es inferior a la frecuencia de Nyquist  $F_N$  se produce un solapamiento del espectro de la señal (aliasing), lo que imposibilita una reconstrucción perfecta de la señal.

### 2.2.3 Cuantización

La cuantificación o cuantización convierte una señal en tiempo discreto, con la amplitud definida en un intervalo continuo, en una señal en tiempo discreto definida únicamente para un conjunto de valores discretos de amplitud. La señal discreta se limita a un número finito de amplitudes posibles, resultando una diferencia entre la señal cuantizada y la señal sin cuantizar denominada error de cuantización.

$$e_q(n) = x_q(n) - x(n), \quad x_q(n) = Q[x(n)] \quad (2.2)$$

Las amplitudes permitidas para la señal discreta se denominan niveles de cuantización. La resolución del cuantizador es la distancia entre dos niveles de cuantificación sucesivos ( $\Delta$ ), cuantos más niveles se usen ( $L$ ) mayor precisión y menor error de cuantificación. En la figura 2.4. se representa la gráfica típica de un cuantizador de 8 niveles.

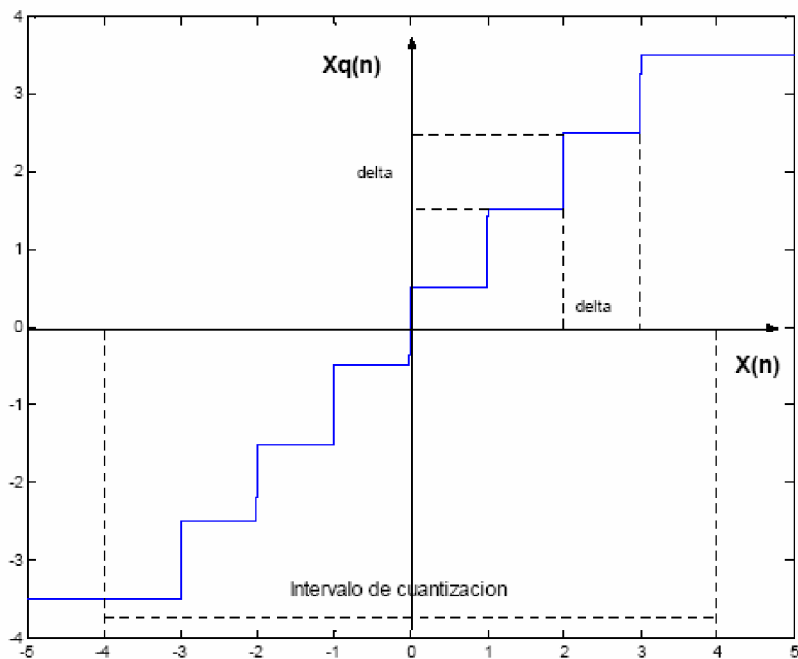


Figura 2.4.: Cuantizador de 8 niveles

## 2.2.4 Codificación

La codificación consiste en asignar a cada valor discreto de la señal cuantizada  $x_q(n)$  una secuencia de  $b$  bits. El número de niveles de cuantización está fijado por los bits de precisión del codificador, y viceversa. Si disponemos de  $b$  bits en el codificador se pueden representar un total de  $2^b$  números binarios, luego el número de niveles de cuantización máximo se define como  $L = 2^b$ .

Alternativamente, se puede decir que el número mínimo de bits del codificador debe cumplir la relación:  $b \geq \log_2 L$

## 2.2.5 Conversión de la tasa de muestreo

El proceso de cambiar la frecuencia de muestreo de una señal digital a otra frecuencia dada se denomina conversión de la tasa de muestreo. Este proceso ofrece varias posibilidades para el factor de conversión:

- Diezmado o Submuestreo (1/D): Consiste en reducir la tasa de muestreo por un factor entero  $D$ . Produce un ensanchamiento del espectro de la señal digital de entrada respecto de la nueva frecuencia.
- Interpolación o Sobremuestreo (I): Incrementa la tasa de muestreo por un factor entero  $I$ . Produce una compresión del espectro de la señal digital de entrada respecto de la nueva frecuencia.
- Factor racional I / D: Es una combinación de los dos casos anteriores.

## 2.3 Convertidor A/D

En este capítulo hemos tratado aspectos fundamentales de la conversión analógica/digital sin considerar en ningún momento su arquitectura interna o diseño de circuito. Los convertidores han sido tratados como cajas negras tales que sólo se han discutido sus relaciones entre entrada y salida.

Definiremos a continuación ciertas figuras de mérito típicas de los CA/D: relación señal a ruido, rango dinámico, relación señal a ruido y distorsión, y número efectivo de bits.

### 2.3.1 Figuras de Mérito

En este sub-apartado veremos las figuras de mérito mencionadas anteriormente una a una:

#### 2.3.1.1 Relación señal a ruido

Se define la relación señal-ruido (*SNR* del inglés “Signal to Noise Ratio”) como el cociente entre la potencia de salida a la frecuencia de la entrada (supuesta ésta sinusoidal) y la potencia en banda del ruido total. Si tenemos en cuenta tan solo el ruido de cuantización y que la amplitud de la entrada sinusoidal al CA/D es  $A$ , la *SNR* es:

$$SNR_{dB} = 10 \log \left( \frac{A^2/2}{P_e} \right) \quad (2.3)$$

donde *log* significa logaritmo en base diez. Vemos que a priori la *SNR* aumenta de forma monótona con el nivel de entrada. Pero esto sólo ocurre hasta un cierto valor, donde un exceso en el nivel de la señal de entrada del cuantizador provocará un aumento desmesurado en el ruido de cuantización (una vez la amplitud de la entrada sobrepase el fondo de escala del cuantizador), y por tanto una bajada abrupta de *SNR* a la salida del cuantizador.

#### 2.3.1.2 Rango dinámico

Se define el rango dinámico (*DR* del inglés “Dynamic Range”) como el cociente entre la potencia a la salida a la frecuencia de una senoide con una amplitud igual al rango completo del cuantizador y la potencia a la salida para una senoide que tenga la misma frecuencia y amplitud tal que no sea distinguible del fondo de ruido; esto es, con una *SNR*=0dB. Usualmente se expresa en dB.

Idealmente el rango dinámico de entrada viene limitado por la escala completa de entrada del cuantizador. Por otro lado la potencia de salida para una senoide de amplitud tal que su *SNR*=0dB vale  $P_e$ . Por tanto,

$$DR_{dB} = 10 \log \left( \frac{(x_{FS}/2)^2}{2P_e} \right) \quad (2.4)$$

### 2.3.1.3 Relación señal a ruido y distorsión

Se define la relación señal a ruido y distorsión (*SNDR* del inglés “Signal to Noise and Distortion Ratio”) como el cociente entre la potencia de salida a la frecuencia de la entrada (supuesta ésta sinusoidal) y la potencia en banda del ruido total y de la distorsión. Es decir,

$$SNDR_{dB} = 10 \log \left( \frac{P_{signal}}{P_{noise} + P_{dist}} \right) \quad (2.5)$$

donde *log* significa logaritmo en base diez,  $P_{signal}$  representa la potencia de la señal,  $P_{noise}$  la potencia del ruido y  $P_{dist}$  la potencia de la distorsión.

### 2.3.1.4 Número efectivo de bits

Se define el número efectivo de bits de un CA/D (y se representa por ENOB) como:

$$ENOB(bits) = \frac{SNDR(dB) - 1.76}{6.02} \quad (2.6)$$