

### **3 SISTEMAS DE PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES**

#### **3.1 Introducción al procesamiento digital de señales**

Una alternativa para el procesado analógico de señales es el procesado digital. Esta área se ha desarrollado durante los últimos 30 años gracias a los avances tecnológicos de procesadores digitales y de la fabricación de circuitos integrados [9].

Un sistema de procesamiento digital de señales realiza un conjunto de operaciones sobre una señal.

Una señal se define como una cantidad física que varía con el tiempo, el espacio o cualquier otra variable independiente; matemáticamente, una señal es una función de una o más variables independientes. Una señal analógica es una función definida en un rango continuo de tiempo en el cual la amplitud puede tomar valores continuos, por ejemplo, una función sinusoidal. Una señal digital es aquella en la cual el tiempo y la amplitud son discretas (definidas únicamente para determinados valores de tiempo o amplitud).

La señal se ha procesado una vez que se lleva a cabo el conjunto de operaciones en la misma.

Un sistema de procesamiento digital de señales se puede implementar mediante software (operaciones matemáticas especificadas en un programa) o hardware digital (circuitos lógicos) configurado para llevar a cabo las operaciones deseadas. En general, un sistema de procesamiento digital de señales se puede implementar como una combinación

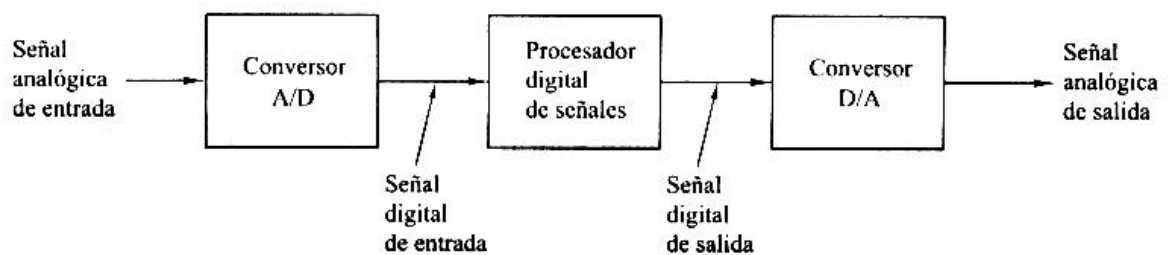
de software y de hardware digital, en el cual cada uno ejecuta un determinado conjunto de funciones [1].

Los procesadores digitales de señales son microprocesadores diseñados para realizar tareas de procesamiento digital de señales.

El procesamiento digital de señales ha permitido un significativo logro en aplicaciones como las telecomunicaciones, imágenes médicas, radar y sonar, reproducción de música de alta fidelidad, entre otros. Además, ha facilitado el diseño y la construcción de equipos altamente sofisticados que realizan complejas funciones y tareas específicas en cuanto al tratamiento en tiempo real de señales en forma digital [3].

### 3.2 Elementos de un sistema de procesamiento digital de señales

El procesamiento digital de señales consiste básicamente de tres pasos: conversión de la señal analógica en digital, procesamiento de la señal digital y finalmente, conversión de la señal procesada en una forma analógica. En la Figura 3-1 se muestra el diagrama a bloques de un sistema de procesamiento digital de señales [10].

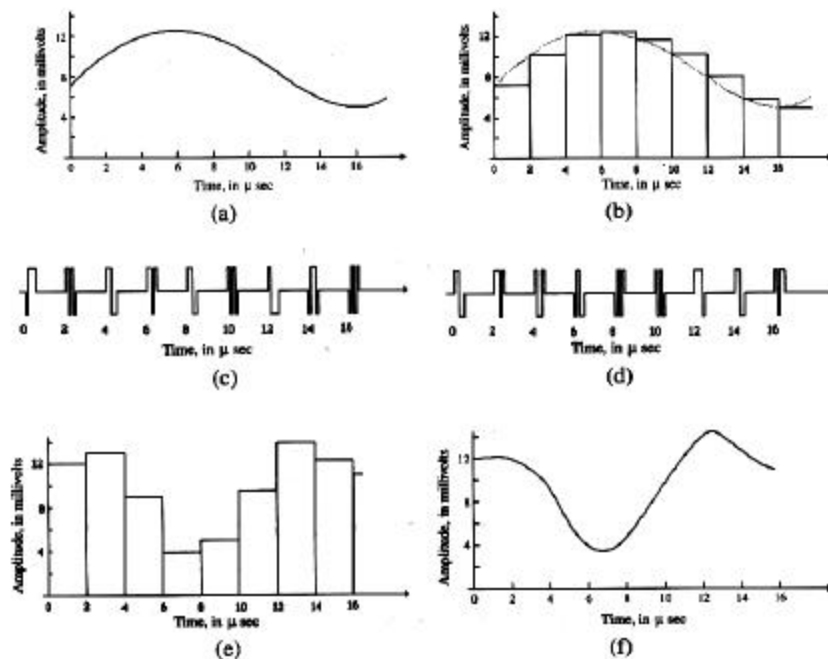


**Figura 3-1 Diagrama a bloques de un sistema de procesamiento digital de señales**

Dado que la amplitud de la señal analógica de entrada varía con el tiempo se usa un circuito Sample-and-Hold (S/H) que muestrea la señal analógica de entrada en intervalos periódicos de tiempo y mantiene el valor constante muestreado en la entrada del convertidor análogo-digital para llevar a cabo la conversión digital [10].

La salida del convertidor A/D es una cadena de datos binarios que posteriormente son procesados por el procesador digital que implementa el algoritmo deseado. La salida del procesador digital es convertido en señal analógica por el convertidor digital-análogo (D/A) [9]. El filtro pasabajas a la salida del convertidor D/A elimina los componentes de frecuencia indeseables para que a la salida se tenga procesada la señal analógica [10].

En la figura 3-2 se muestran las señales resultantes de cada etapa en el procesamiento digital de señales [10].



**Figura 3-2 Formas de onda de las señales en cada etapa del procesamiento digital**

(a) señal analógica de entrada, (b) salida del circuito S/H, (c) salida del convertidor A/D, (d) salida del procesador digital, (e) salida del convertidor D/A y (f) señal analógica de salida.

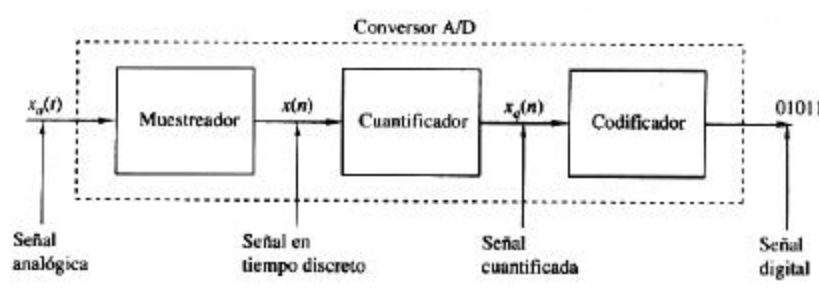
### 3.3 Conversión A/D y D/A

Dado que la mayoría de las señales de interés práctico como las señales de voz, biológicas, sísmicas, radar, sonar y de distintos tipos de comunicación como el audio y video son analógicas, es necesario convertirlas a formato digital para poderlas procesar por medios digitales, es decir, se requiere transformarlas en una secuencia de números de precisión finita; para realizar lo anterior se requieren convertidores análogo-digitales (A/D) y digital-análogos (D/A) [1].

La conversión A/D consta de las etapas siguientes:

- Muestreo
- Cuantificación
- Codificación

En la Figura 3-3 se presentan las partes básicas de un convertidor A/D [1].



**Figura 3-3 Partes básicas de un convertidor A/D**

En la práctica la conversión A/D se efectúa en un solo dispositivo que toma la entrada  $x_a(t)$  y produce un número codificado binario.

Cuando se requiere convertir las señales procesadas en forma analógica se utilizan los convertidores digital-análogos (D/A).

### 3.3.1 Muestreo

El muestreo consiste en la conversión de una señal en tiempo continuo a una señal en tiempo discreto tomando muestras de la señal en tiempo continuo en instantes de tiempo discreto. Así, si  $x_a(t)$  es la entrada del muestreador, las salida es [1]:

$$x_a(nT) = x(n), \quad (3.1)$$

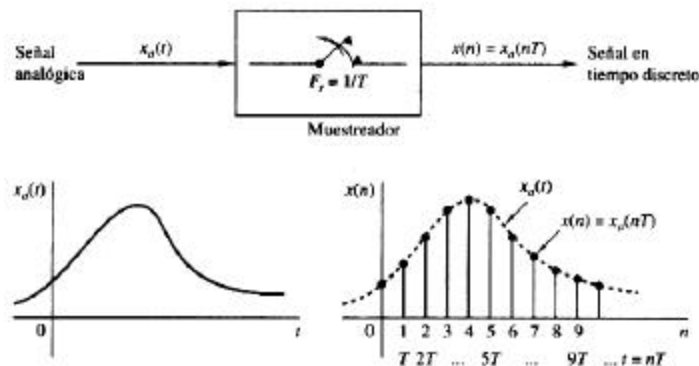
donde,  $T$  periodo o intervalo de muestreo

$x(n)$  señal en tiempo discreto obtenida tomando muestras de la señal analógica  $x_a(t)$  cada  $T$  segundos.

Dado que la frecuencia de muestreo es  $F_s = 1/T$ , se establece una relación entre  $t$  (tiempo continuo) y  $n$  (tiempo discreto) que es:

$$T = nT = n / F_s \quad (3.2)$$

El proceso de muestreo se presenta en la Figura 3-4 [1].



**Figura 3-4 Muestreo de una señal analógica**

Si se conoce la frecuencia máxima de una señal, se puede especificar la velocidad de muestreo necesaria para convertir las señales analógicas en digitales, esto se logra con el teorema de muestreo que fue introducido por Nyquist (1929) y posteriormente popularizado en el clásico artículo de Shannon (1949.) [1].

El teorema de muestreo establece que una señal de banda limitada, en tiempo continuo, cuya mayor frecuencia es  $F_{\text{máx}}$ , puede recuperarse de forma única a partir de sus muestras siempre y cuando se cumpla la relación siguiente [1]:

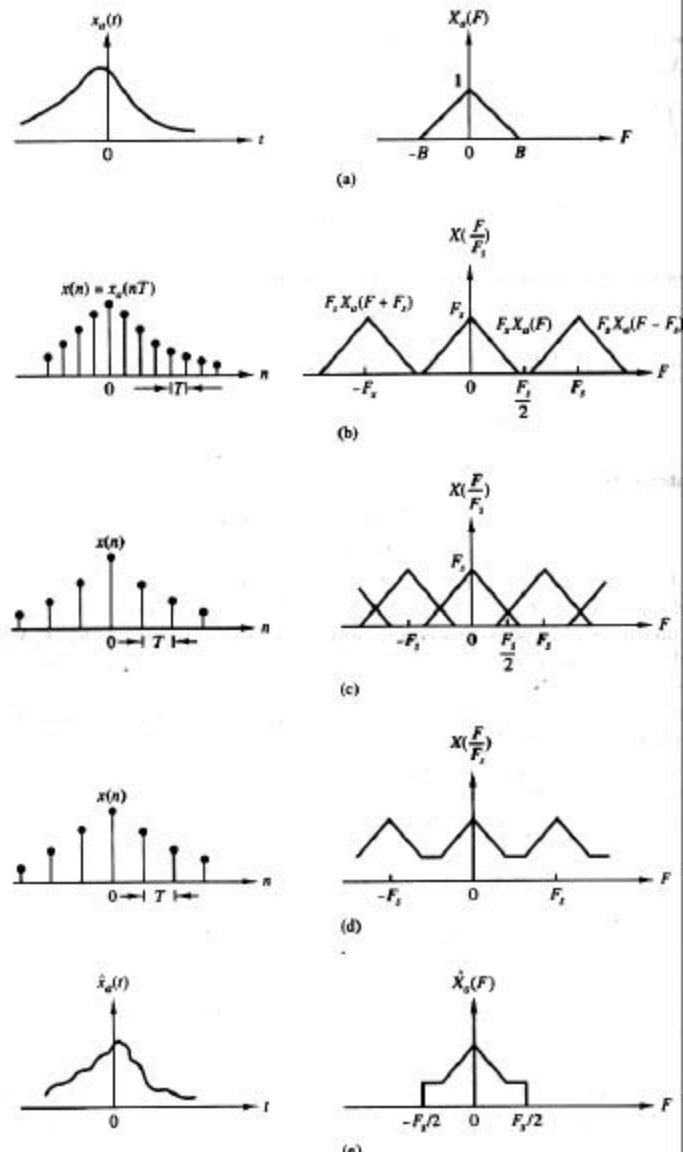
$$F_s \geq 2F_{\text{máx}} \quad (3.3)$$

Si cumple con la relación anterior se evitará el fenómeno de aliasing que se explica en la siguiente sección.

### **3.3.1.1 Aliasing**

Cuando una señal se muestrea a una velocidad menor que el doble del ancho de banda, la señal se traslapa.

En la Figura 3-5 (a) se muestra una señal de banda limitada así como su espectro, en la Figura 3-5 (b) se presenta la señal muestreada y su espectro; finalmente, en las Figuras 3-5 (c) y 3-5 (d) se presenta el espectro de la señal con aliasing [1].



**Figura 3-5 Muestreo de una señal análoga de banda limitada y aliasing de sus componentes espectrales.**

Como se observa en la figura anterior, cuando se filtre la señal con aliasing para recuperar la información, ésta no será exactamente la de la entrada sino que estará distorsionada debido al aliasing como se observa en la Figura 3-5 (e). La distorsión puede ser eliminada con un filtro previo al muestreo para limitar el ancho de banda ( $B$ ) de la señal a procesar [12].

### 3.3.2 Cuantificación

La cuantificación consiste en convertir una señal de tiempo discreto con valores continuos a una señal en tiempo discreto con valores discretos (señal digital). El valor de cada muestra de la señal se representa mediante un valor seleccionado de un conjunto finito de valores posibles [1]. La diferencia entre la muestra sin cuantificar  $x(n)$  y la salida cuantificada  $x_q(n)$  se denomina error de cuantificación. En la Figura 3-6 muestra el error de cuantificación [11].

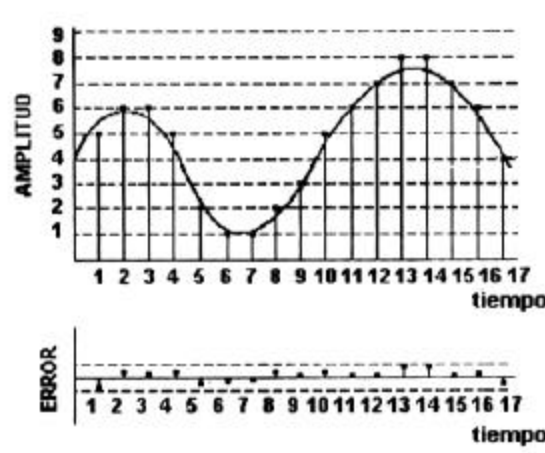


Figura 3-6 Error de cuantificación

### 3.3.3 Codificación

En el proceso de codificación, cada valor discreto  $x_q(n)$  se representa mediante una secuencia binaria de  $b$  bits, es decir, se asigna un número binario único a cada nivel de cuantificación diferente. Si se dispone de  $L$  niveles se requerirán al menos  $L$  niveles binarios distintos.

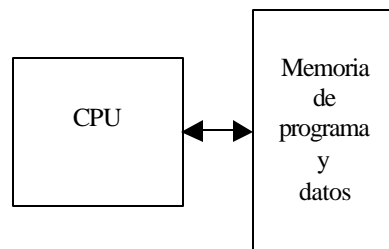
Con una longitud de palabra de  $b$  bits se pueden crear  $2^b$  números binarios diferentes, por lo tanto, el número de bits necesarios para el codificador es  $b = \log_2 L$  (ya que  $2^b = L$ ).



Los convertidores A/D disponibles comercialmente tienen una precisión de  $b = 16$  o inferior. Generalmente, cuanto mayor sea la velocidad de muestreo y más fina la cuantificación, más caro es el dispositivo [1].

### 3.4 Arquitectura de un procesador digital de señales

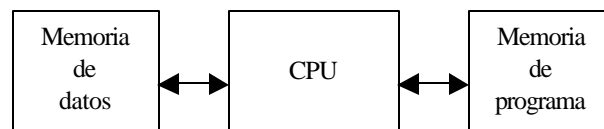
Las operaciones típicas en un sistema de procesamiento digital de señales son la suma y la multiplicación. Para realizar la multiplicación de dos números usando un procesador convencional se requeriría acceder la memoria más de una vez para tener los datos y la instrucción, esto se debe a la arquitectura Von Neuman, que es la arquitectura en la cual se basan los procesadores convencionales. La arquitectura propuesta por Von Neuman se muestra en la Figura 3-7.



**Figura 3-7 Arquitectura Von Neuman**

Como se muestra, la arquitectura Von-Neuman cuenta con un solo bus para el programa y los datos. La limitación de esta arquitectura es que requiere varios accesos a memoria para llevar la instrucción al CPU. Si la instrucción maneja datos de memoria, se deben realizar otros accesos para llevar, operar y almacenar los datos, lo cual resulta en el congestionamiento del bus [12]. La alternativa para superar estas limitaciones es la arquitectura Harvard.

Los procesadores digitales de señales se basan en la arquitectura Harvard, que consiste simplemente en un esquema en el que el CPU está conectado a dos memorias por intermedio de dos buses separados; una de las memorias contiene solamente las instrucciones del programa y es llamada Memoria de Programa, la otra memoria sólo almacena los datos y es llamada Memoria de Datos , es por esto, que el tiempo de ejecución mejora ya que se accesa al programa y datos simultáneamente. La instrucción se lleva al CPU en un solo acceso a la memoria de programa y mientras el bus de datos está libre se accede a él para llevar los datos que se requieren para ejecutar la instrucción [12]. En la Figura 3-8 se muestra la arquitectura Harvard.



**Figura 3-8 Arquitectura Harvard**

Ambos buses son totalmente independientes y pueden ser de distintos anchos por lo que el CPU puede estar accediendo a los datos para completar la ejecución de una instrucción, y al mismo tiempo estar leyendo la próxima instrucción a ejecutar. Las principales ventajas de esta arquitectura son [13]:

- a) Que el tamaño de las instrucciones no está relacionado con el de los datos, y por lo tanto puede ser optimizado para que cualquier instrucción ocupe una sola posición de memoria de programa, logrando así mayor velocidad y menor longitud de programa.
- b) Que el tiempo de acceso a las instrucciones puede superponerse con el de los datos, logrando una mayor velocidad de operación.

Dado que la arquitectura Harvard dedica un bus para las instrucciones con el otro bus disponible para los datos, algunas veces se vuelve inoperable para las operaciones de procesamiento digital de señales que usualmente involucran por lo menos dos operandos, por lo que desarrolló una nueva arquitectura basada en la arquitectura Harvard llamada SHARC (Super Harvard ARChitecture) que incluye una memoria caché que puede ser usada para almacenar instrucciones (las cuales serán reusadas), lo anterior deja libres los dos buses para datos con lo que logra aumentar la velocidad de ejecución.

### **3.5 Ventajas y desventajas del procesamiento digital**

Las ventajas de procesar una señal usando técnicas digitales se mencionan a continuación [10] [1]:

- **Flexibilidad:** debido a que el sistema digital es programable, por lo que si se requiere hacer una modificación sólo se cambia el programa mientras que si se trabaja con un sistema analógico se debe modificar el diseño.
- **Precisión:** ya que a diferencia de los circuitos analógicos, los circuitos digitales no dependen de los valores precisos de sus componentes, por lo tanto, los circuitos digitales son menos sensitivos a las tolerancias de los componentes. Además, no se ven tan afectados por la temperatura, tiempo y otros parámetros externos.
- **Fidelidad:** debido que las señales digitales se almacenan en soporte magnético sin deterioro.
- **Repetibilidad:** ya que los sistemas digitales pueden ser reproducidos en grandes volúmenes y no requieren ajustes durante su construcción o cuando están en uso.

- Simplicidad: porque algunas aplicaciones son más fáciles de implementar digitalmente que con sistemas análogos.
- Permite implementar algoritmos más sofisticados.
- Aplicabilidad a muy bajas frecuencias: por ejemplo, en aplicaciones sísmicas donde se requerirían capacitores e inductores muy grandes.

El procesamiento digital de señales está asociado con algunas desventajas. Una desventaja es la complejidad de los sistemas digitales ya que se requieren dispositivos previos y posteriores al procesamiento como los convertidores A/D y D/A, así como la circuitería digital y filtros asociados a los mismos [10]. Otra desventaja es el rango limitado de frecuencias disponibles para el procesamiento.

### **3.6 Comparación del procesador digital de señales con el procesador de propósito general y con un microcontrolador**

Todos los microprocesadores son capaces de realizar las siguientes tareas [3]:

- Manipulación de datos: como procesadores de palabras que involucran almacenamiento y clasificación de información.
- Cálculos matemáticos: usados en la ciencia e ingeniería así como en el procesamiento digital de señales.

A pesar de lo anterior, es difícil (caro) que un microprocesador sea optimizado para realizar ambas tareas, en contraste con los DSPs que se enfocan en los cálculos matemáticos necesarios en el procesamiento digital de señales.

A diferencia del procesamiento ordinario, el procesamiento digital de señales considera los siguientes aspectos:

- Las señales deben ser procesadas en tiempo real.
- Las señales deben ser discretas, lo que origina pérdida de información al muestrear.

En general, el uso de un procesador de propósito general o de un DSP depende de la aplicación, además de que también se consideran algunos factores como: costo, consumo de potencia, software, algoritmos, entre otros.

Una de las diferencias encontradas entre los dispositivos anteriormente mencionados y los microcontroladores, es que éstos últimos son utilizados para controlar otros sistemas, es decir, generan las señales necesarias para controlar a otros dispositivos. Con respecto a su arquitectura actualmente la más utilizada es la arquitectura Harvard (que se explica detalladamente en la sección 3.4).

La principal ventaja de los microcontroladores es que integran todos sus elementos en un solo dispositivo ya que a diferencia de los procesadores digitales de señales pueden contar con otros dispositivos como los convertidores A/D y D/A, estados de reposo o de bajo consumo, puertos de entrada/salida, entre otros, a diferencia de los procesadores digitales de señales que requieren que se agreguen dichos componentes; por lo anterior, una de sus principales ventajas es que gracias a su tamaño por lo regular están incluidos en el mismo dispositivo que controlan [2].

Los microcontroladores tienen una amplia gama de aplicaciones, entre las que se encuentran: máquinas expendedoras de productos, controles de acceso tanto de personas como de objetos, máquinas de herramientas, motores, temporizadores, sistemas autónomos de control, telefonía, etc. [2]