

# SISTEMAS DIGITALES

## Principios y aplicaciones

Sexta edición

**Ronald J. Tocci**

Monroe Community College

Con la colaboración de

**Neal S. Widmer**

Purdue University

TRADUCCIÓN:

**Francisco G. Noriega**

C.P. y Perito traductor

REVISIÓN TÉCNICA:

**Ing. José Antonio Torres Hernández**

Ing. Electrónico, Escuela de Ingeniería

Universidad "La Salle" A.C.



MÉXICO • ARGENTINA • BRASIL • COLOMBIA • COSTA RICA • CHILE  
ESPAÑA • GUATEMALA • PERÚ • PUERTO RICO • VENEZUELA



# *Conceptos introdutorios*

## TEMARIO

- |   |                                  |
|---|----------------------------------|
| 1-1 Representaciones numéricas            | 1-5 Circuitos digitales          |
| 1-2 Sistemas digitales y analógicos       | 1-6 Trasmisión paralela y serial |
| 1-3 Sistemas de numeración digital        | 1-7 Memoria                      |
| 1-4 Representación de cantidades binarias | 1-8 Computadoras digitales       |



## OBJETIVOS

Al concluir este capítulo, el lector estará capacitado para:

- Distinguir entre representación analógica y digital.
- Mencionar las ventajas, desventajas y diferencias más importantes entre los sistemas analógicos, digitales e híbridos.
- Comprender la necesidad de tener convertidores analógico-digitales (ADC; *analog-to-digital converters*) y digital-analógicos (DAC; *digital-to-analog converters*).
- Realizar conversiones entre números decimales y binarios.
- Identificar las señales digitales más comunes.
- Citar varias tecnologías para la fabricación de circuitos integrados.
- Identificar un diagrama de tiempos.
- Establecer las diferencias entre transmisión paralela y serial.
- Describir la propiedad de la memoria.
- Describir las partes más importantes de una computadora digital y comprender sus funciones.

## INTRODUCCIÓN

Cuando la mayoría de nosotros escucha el término "digital" inmediatamente pensamos en una "calculadora digital" o "computadora digital". Lo anterior probablemente puede atribuirse a la forma tan impresionante en que ahora la persona promedio tiene acceso a poderosas computadoras y calculadoras, a bajo costo. Es importante señalar que ambas representan sólo una de las muchas aplicaciones de los circuitos y principios digitales. Los circuitos digitales se emplean en productos electrónicos tales como juegos de video, hornos de microondas y sistemas de control para automóviles, así como en equipos de prueba como medidores, generadores y osciloscopios. Además, las técnicas digitales han reemplazado muchos de los "circuitos analógicos" utilizados en productos de consumo como radios, televisores y equipos para grabación y reproducción de alta fidelidad.

En este libro estudiaremos los principios y técnicas comunes a todos los sistemas digitales, desde el interruptor más simple hasta la computadora más compleja. Si este libro tiene éxito, usted adquirirá una comprensión profunda de la forma en la que trabajan los sistemas

digitales y será capaz de aplicar sus conocimientos al análisis y detección de fallas de cualquier sistema digital.

Comenzamos con la presentación de algunos conceptos que forman parte importante de la tecnología digital; todos ellos se abordarán detalladamente en capítulos posteriores, conforme se vayan necesitando. Asimismo, se presenta parte de la terminología que se necesita cuando se inicia un nuevo campo de estudio, misma que irá aumentando conforme avance la obra. El apéndice I contiene un glosario completo de términos.

## 1-1 REPRESENTACIONES NUMÉRICAS

En la ciencia, la tecnología, la administración y, de hecho, muchos otros campos de la actividad humana, constantemente se manejan *cantidades*. Estas se miden, monitorean, registran, manipulan aritméticamente, observan o, en alguna otra forma, se utilizan en muchos sistemas físicos. Cuando se manejan diversas cantidades es importante que podamos representar sus valores con eficiencia y exactitud. Existen básicamente dos maneras de representar el valor numérico de las cantidades: la *analógica* y la *digital*.

**Representaciones analógicas** En la *representación analógica*, una cantidad se representa con un voltaje, corriente o movimiento de un indicador o medidor que es proporcional al valor de esa cantidad. Un ejemplo de esto es el velocímetro de un automóvil, en el cual la deflexión de la aguja es proporcional a la velocidad a la que se desplaza el auto. La posición angular de la aguja representa el valor de la velocidad del automóvil, y la aguja sigue cualquier cambio que ocurra conforme el vehículo acelera o frena.

Otro ejemplo es el termostato común de una habitación, en el cual la flexión de la banda bimetálica es proporcional a la temperatura del cuarto. A medida que la temperatura varía gradualmente, la curvatura de la banda cambia en forma proporcional.

Otro ejemplo de una cantidad analógica es el micrófono de audio. En este dispositivo se genera un voltaje de salida en proporción con la amplitud de las ondas sonoras que chocan con el micrófono. Las variaciones en el voltaje de salida siguen las mismas variaciones del sonido de entrada.

Las cantidades analógicas antes citadas tienen una característica importante: *pueden variar gradualmente sobre un intervalo continuo de valores*. La velocidad del automóvil puede tener un valor entre cero y, digamos, 100 km/h. En forma análoga, la salida del micrófono podría encontrarse en cualquier nivel dentro de un intervalo de cero a 10mV (por ejemplo, 1mV, 2.3724 mV, 9.9999 mV).

**Representaciones digitales** En la *representación digital* las cantidades no se representan por valores proporcionales, sino por símbolos denominados *dígitos*. Para dar un ejemplo, consideremos el reloj (o cronómetro) digital, el cual da la hora del día en forma de dígitos decimales que representan horas o minutos (y algunas veces segundos). Como sabemos, la hora varía de manera continua, pero la lectura del cronómetro digital no cambia continuamente: más bien, lo hace en etapas de uno por minuto (o por segundo). En otras palabras, esta representación digital de la hora del día varía en etapas *discretas*, comparada con la representación analógica de la hora que da un reloj de pulso, donde la lectura del cuadrante varía de modo continuo.

La diferencia principal entre las cantidades analógicas y las digitales se puede enunciar en forma simple de la manera siguiente:

analógico = continuo

digital = discreto (paso por paso)

Debido a la naturaleza discreta de las representaciones digitales, no existe ambigüedad cuando se lee el valor de una cantidad digital, mientras que el valor de una cantidad analógica con frecuencia está abierta a interpretación.

### **EJEMPLO 1-1**

---

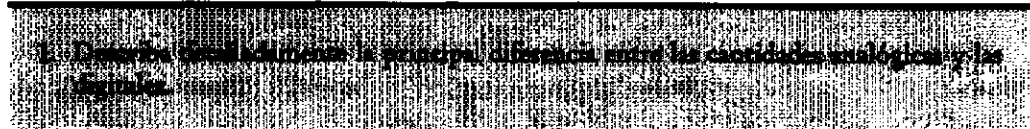
¿Cuáles de las siguientes cantidades son analógicas y cuáles son digitales?

- (a) Interruptor
- (b) Metro regular
- (c) Temperatura
- (d) Granos de arena en la playa
- (e) Control del volumen de una radio

#### **Solución:**

- (a) Digital
  - (b) Analógica
  - (c) Analógica
  - (d) Digital, ya que el número de granos sólo pueden ser ciertos valores discretos (enteros) y no cualquier valor en relación con un intervalo continuo
  - (e) Analógica
- 

### **PREGUNTA DE REPASO \***



## **1-2 SISTEMAS DIGITALES Y ANALÓGICOS**

---

Un sistema digital es una combinación de dispositivos diseñado para manipular cantidades físicas o información que estén representadas en forma digital; es decir, que sólo puedan tomar valores discretos. La mayoría de las veces, estos dispositivos son electrónicos, pero también pueden ser mecánicos, magnéticos o neumáticos. Algunos de los sistemas digitales más conocidos incluyen las computadoras y calculadoras digitales, equipo digital de audio y video y el sistema telefónico, el sistema digital, más grande del mundo.

Un sistema analógico contiene dispositivos que manipulan cantidades físicas representadas en forma analógica. En un sistema de este tipo, las cantidades varían sobre un intervalo continuo de valores. Por ejemplo, en un receptor de radio la amplitud de la señal de salida para una bocina puede tener cualquier valor entre cero y su límite máximo. Otros sistemas analógicos comunes son amplificadores de audio, equipos de cinta magnética para grabación y reproducción, y el odómetro (cuentakilómetros) de los automóviles.

\* Las respuestas a las preguntas para repaso se encuentran al final del capítulo en que aparecen.

**Ventajas de las técnicas digitales** Un número cada vez mayor de aplicaciones en electrónica, así como en muchas otras tecnologías, emplea técnicas digitales para realizar operaciones que alguna vez fueron hechas por medio de métodos analógicos. Las principales razones del cambio hacia la tecnología digital son:

1. *Los sistemas digitales generalmente son más fáciles de diseñar.* Esto se debe a que los circuitos empleados son circuitos de conmutación, donde no son importantes los valores exactos de corriente y voltaje, sino únicamente el rango en que éstos se encuentran (ALTO o BAJO).
2. *Facilidad para almacenar la información.* Esto se logra por medio de circuitos de conmutación especiales que pueden capturar información y retenerla el tiempo que sea necesario.
3. *Mayor exactitud y precisión.* Los sistemas digitales pueden manejar el número de dígitos de precisión que usted necesite, simplemente añadiendo más circuitos de conmutación. En los sistemas analógicos la precisión, en general, está limitada a tres o cuatro dígitos, ya que los valores de los voltajes y corrientes dependen en forma directa de los valores de los componentes del circuito.
4. *Programación de la operación.* Es bastante sencillo diseñar sistemas digitales cuya operación está controlada por medio de un grupo de instrucciones archivadas denominado *programa*. También es posible programar sistemas analógicos, pero la variedad y complejidad de las operaciones disponibles está severamente limitada.
5. *Los circuitos digitales se afectan menos por el ruido.* Las fluctuaciones en el voltaje (ruido) no son tan críticas en los sistemas digitales porque en ellos no es importante el valor exacto de un voltaje, siempre y cuando el ruido no sea suficientemente fuerte como para impedir la distinción entre ALTO y BAJO.
6. *Se puede fabricar más circuitería digital sobre pastillas de circuito integrado.* Es cierto que la circuitería analógica también se ha beneficiado con el gran desarrollo de la tecnología de CI, pero su relativa complejidad y el empleo de dispositivos que no se pueden integrar en forma económica (capacitores de gran valor, resistencias de precisión, inductores, transformadores), han impedido que los sistemas analógicos alcancen el mismo grado de integración que los digitales.

**Limitaciones de las técnicas digitales** Cuando se emplean técnicas digitales existe, en realidad, una sola desventaja:

**El mundo real es fundamentalmente analógico.**

La mayor parte de las cantidades físicas son de naturaleza analógica, y a menudo estas cantidades son las entradas y salidas de un sistema que las monitorea, que efectúa operaciones con ellas y que las controla. Algunos ejemplos son la temperatura, la presión, la posición, la velocidad, el nivel de un líquido, la rapidez de flujo y varias más. Tenemos el hábito de expresar estas cantidades en *forma digital*, como sucede cuando decimos que la temperatura es de 64 °C (o 63.8 °C, si queremos ser más exactos); pero en realidad lo que hacemos es una aproximación digital de una cantidad inherentemente analógica.

Para aprovechar las técnicas digitales cuando se tienen entradas y salidas analógicas, deben seguirse tres pasos :

1. Convertir las entradas analógicas del "mundo real" a la forma digital.
2. Procesar (realizar operaciones con) la información digital.
3. Convertir las salidas digitales a la forma analógica del mundo real.

La figura 1-1 muestra el diagrama de bloques de un sistema común de control de temperatura. Como se observa en el diagrama, se mide la temperatura analógica, y el valor obtenido

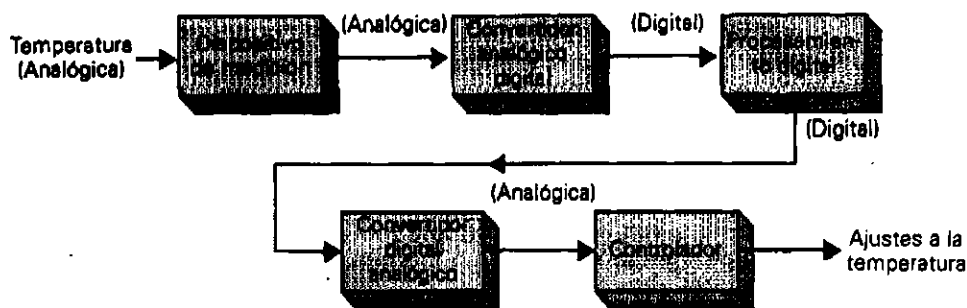


Figura 1-1 Diagrama de bloques de un sistema de control de temperatura que requiere de conversiones analógico-digitales para permitir el empleo de técnicas digitales de procesamiento.

se convierte a una cantidad digital por medio de un convertidor analógico-digital (ADC; *analog-to-digital converter*). Entonces la circuitería digital, que puede o no incluir una computadora digital, procesa esta cantidad. Su salida digital se convierte de nuevo en una cantidad analógica por medio de un convertidor digital-analógico (DAC, *digital-to-analog converter*). Esta salida alimenta un controlador, mismo que se encarga de tomar cierto tipo de acción para ajustar la temperatura.

La necesidad de conversión entre formas analógicas y digitales de información puede considerarse como una desventaja porque aumenta complejidad y costos. Otro factor que con frecuencia resulta importante es el tiempo extra que se necesita para llevar a cabo estas conversiones. En muchas aplicaciones, estos factores pesan más que los inconvenientes por las numerosas ventajas que ofrece el empleo de técnicas digitales, así que la conversión entre cantidades analógicas y digitales es ya un proceso común en la tecnología actual.

Sin embargo, existen situaciones donde lo más sencillo y económico es el empleo de técnicas analógicas. Por ejemplo, el proceso de amplificación de una señal es más simple si se emplea la circuitería analógica.

Cada vez es más frecuente observar dentro de un mismo sistema el empleo de técnicas analógicas y digitales para obtener un mayor beneficio de ambas. En estos sistemas *híbridos*, uno de los aspectos más importantes de la fase de diseño es determinar qué partes del sistema serán analógicas y cuáles digitales.

Finalmente, es posible predecir con que, al paso del tiempo, se observará una tendencia cada vez mayor del empleo de técnicas digitales, ya que los beneficios económicos de la integración serán aún mayores que hoy en día.

## PREGUNTAS DE REPASO

1. ¿Qué ventajas ofrecen las técnicas digitales en relación con las analógicas?
2. ¿Cuál es la limitación principal para el uso de las técnicas digitales?

## 1-3 SISTEMAS DE NÚMEROS DIGITALES

En la tecnología digital se utilizan muchos sistemas de números. Los más comunes son los sistemas decimal, binario, octal y hexadecimal. El sistema decimal es sin duda el más conocido por nosotros, ya que es una herramienta de uso cotidiano. Si analizamos algunas de sus características, podremos entender mejor los otros sistemas.

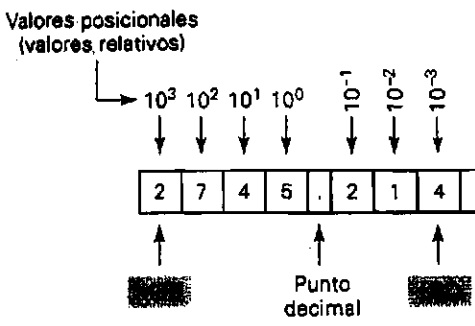


Figura 1-2 Valores de posición decimal como potencias de 10.

**Sistema decimal** El sistema decimal se compone de 10 numerales o símbolos: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9; al utilizar estos símbolos como dígitos de un número podemos expresar cualquier cantidad. El sistema decimal, también conocido como sistema de base 10, evolucionó en forma natural a partir del hecho de que el ser humano tiene 10 dedos. Incluso, la palabra "dígito" significa "dedo" en latín.

El sistema decimal es un sistema de valor posicional en el cual el valor de un dígito depende de su posición. Por ejemplo, consideremos el número decimal 453. Sabemos que el dígito 4 en realidad representa 4 centenas, el 5 representa 5 decenas y el 3, 3 unidades. En esencia, el 4 pesa más que los tres dígitos; a éste se le conoce como el dígito más significativo (MSD; most significant digit). El número 3 tiene el valor menor y se denomina dígito menos significativo (LSD; least significant digit).

Consideremos 27.35 como ejemplo. Este número es en realidad igual a 2 decenas más 7 unidades más 3 décimos más 5 centésimos, o bien,  $2 \times 10 + 7 \times 1 + 3 \times 0.1 + 5 \times 0.01$ . El punto decimal se emplea para separar los enteros y las fracciones del número.

Más rigurosamente expuesto, tenemos que las diferentes posiciones relativas al punto decimal llevan valores que se pueden expresar como potencias de 10. Esto se ilustra en la figura 1-2, donde se representa el número 2745.214. El punto decimal separa las potencias positivas de 10 de las potencias negativas. Así, el número 2745.214 es igual a

$$(2 \times 10^{+3}) + (7 \times 10^{+2}) + (4 \times 10^1) + (5 \times 10^0) + (2 \times 10^{-1}) + (1 \times 10^{-2}) + (4 \times 10^{-3})$$

En términos generales, cualquier número es simplemente la suma de los productos de cada dígito y su valor posicional.

**Conteo decimal** En el sistema decimal se comienza a contar con el 0 en la posición de las unidades y se toma cada símbolo (dígito) en progresión hasta llegar al 9. En seguida, sumamos un 1 a la siguiente posición más alta y volvemos a comenzar con cero en la primera posición (véase la figura 1-3). Este proceso continúa hasta llegar a la cuenta de 99. Sumamos un 1 a la tercera posición y se empieza de nuevo con ceros en las dos primeras posiciones. Continuamos con el mismo patrón hasta donde deseemos.

Es importante observar que en el conteo decimal la posición de las unidades (LSD) va creciendo con cada etapa del conteo; la posición de las decenas lo hace cada diez etapas; la posición de las centenas cambia en forma ascendente cada 100 etapas en el conteo, y así sucesivamente.

Otra característica del sistema decimal es que, utilizando solamente dos espacios decimales, podemos contar hasta  $10^2 = 100$  números diferentes (de 0 a 99).\* Con tres espacios decimales podemos contar hasta 1000 números (de 0 a 999); y así sucesivamente. En general,

\* El cero se cuenta como un número.



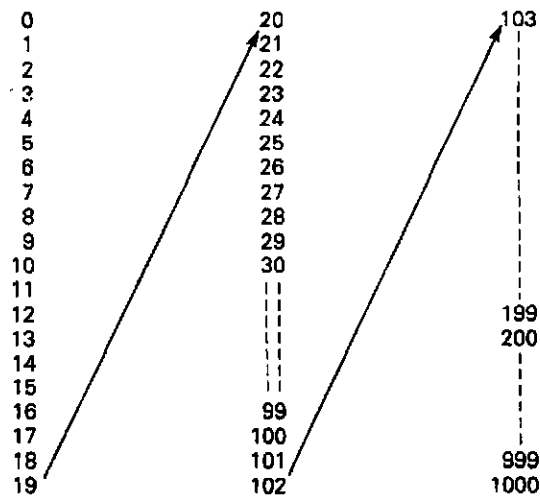


Figura 1-3 Conteo decimal.

con  $N$  espacios decimales o dígitos podemos contar hasta  $10^N$  números diferentes, comenzando con el cero. El número mayor siempre será  $10^N - 1$ .

**Sistema Binario** Desafortunadamente, el sistema numérico decimal no se presta para una instrumentación conveniente en los sistemas digitales. Por ejemplo, resulta muy difícil diseñar equipo electrónico que pueda funcionar con 10 diferentes niveles de voltaje (cada uno representando un carácter decimal, de 0 a 9). Por otro lado, es muy fácil diseñar circuitos electrónicos sencillos y precisos que operen con sólo dos niveles de voltaje. Por esta razón, casi todos los sistemas digitales utilizan el sistema numérico binario (base 2) de sus operaciones, aunque con frecuencia se emplean otros sistemas conjuntamente con el binario.

En el sistema binario sólo hay dos símbolos o posibles valores de dígitos, 0 y 1. No obstante, este sistema de base 2 se puede utilizar para representar cualquier cantidad que se denote en sistema decimal o algún otro sistema numérico. En general, se necesitarán muchos dígitos binarios para expresar una cantidad determinada.

Todos los enunciados anteriores en relación con el sistema decimal se aplican de la misma manera al sistema binario. Este es también un sistema de valor posicional, en donde cada dígito binario tiene su propio valor expresado como potencia de 2. Esto se ilustra en la figura 1-4. Aquí, los espacios que hay a la izquierda del punto binario (equivalente del punto decimal) son potencias positivas de dos y los espacios a la derecha son potencias negativas de 2. En la

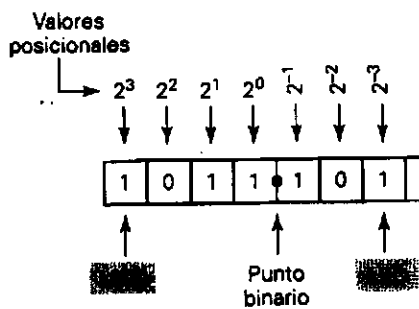


Figura 1-4 Valores de posición binaria como potencias de 2.

figura se representa el número 1011.101. Para determinar su equivalente en el sistema decimal simplemente tomamos la suma de los productos de cada valor digital (0 o 1) y su valor posicional.

$$\begin{aligned}
 1011.101_2 &= (1 \times 2^3) + (0 \times 2^2) + (1 \times 2^1) + (1 \times 2^0) \\
 &\quad + (1 \times 2^{-1}) + (0 \times 2^{-2}) + (1 \times 2^{-3}) \\
 &= 8 + 0 + 2 + 1 + 0.5 + 0 + 0.125 \\
 &= 11.625_{10}
 \end{aligned}$$

Obsérvese en la operación anterior que los subíndices (2 y 10) se usan para indicar la base en la cual se expresa un número en particular. Esta convención sirve para evitar confusión siempre que se utilice más de un sistema numérico.

En el sistema binario, el término *dígito binario* se abrevia a menudo como **bit**, término que usaremos en lo sucesivo. Así, en el número expresado en la figura 1-4 hay 4 bits a la izquierda del punto binario que representan la parte entera del número y 3 bits a la derecha del punto binario, que representan la parte fraccionaria. El bit más significativo (MSB) es aquel que se ubica más a la izquierda (el que tiene el mayor valor). El bit menos significativo (LSB) es aquel que está más a la derecha y que tiene el menor valor. Estos se ilustran en la figura 1-4.

**Conteo binario** Cuando trabajemos con números binarios, generalmente estaremos restringidos a utilizar un número específico de bits. Esta restricción se basa en la circuitería utilizada para representar estos números binarios. Usemos números binarios de 4 bits para ilustrar el método para contar en binario.

La secuencia que se muestra en la figura 1-5 comienza con todos los bits en 0; a éste se le denomina *conteo en cero*. Por cada conteo sucesivo, la posición (2<sup>0</sup>) de las unidades se *conmuta*, es decir, cambia de un valor binario al otro. Cada vez que el bit de las unidades cambia de 1 a 0, la posición (2<sup>1</sup>) de los dos se conmuta. Cada vez que la posición de los dos cambie de 1 a 0, la posición (2<sup>2</sup>) de los cuatros se conmuta. De igual manera, cada vez que la posición de los cuatros va de 1 a 0, la posición (2<sup>3</sup>) de los ochos varía. Este mismo proceso se repetiría para las posiciones de los bits de orden superior si el número binario tuviese más de 4 bits.

La secuencia de conteo binario tiene una característica importante, como se muestra en la figura 1-5. El bit de las unidades (LSB) cambia ya sea de 0 a 1 o de 1 a 0 con *cada* conteo. El

Figura 1-5 Secuencia de conteo binario.

Valores	2 <sup>3</sup>	2 <sup>2</sup>	2 <sup>1</sup>	2 <sup>0</sup>	Equivalente decimal
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	1
0	0	0	1	0	2
0	0	0	1	1	3
0	1	0	0	0	4
0	1	0	0	1	5
0	1	0	1	0	6
0	1	0	1	1	7
1	0	0	0	0	8
1	0	0	0	1	9
1	0	0	1	0	10
1	0	0	1	1	11
1	1	0	0	0	12
1	1	0	0	1	13
1	1	0	1	0	14
1	1	0	1	1	15

↑  
LSB

segundo bit (posición de los dos) permanece en 0 en dos conteos, luego en 1 en dos conteos, luego en 0 en dos conteos, etc. El tercer bit (posición de los cuatros) permanece en 0 en cuatro conteos, luego en 1 en cuatro conteos, etc. El cuarto bit (posición de los ochos) se mantiene en 0 en ocho conteos, luego en 1 en ocho conteos. Si deseáramos contar más agregaríamos espacios y este patrón continuaría con los ceros y unos alternando en los grupos de  $2^{N-1}$ . Por ejemplo, al utilizar un quinto espacio binario, el quinto bit alternaría 16 ceros, luego 16 unos y así sucesivamente.

Como vimos con el sistema decimal, también es cierto que con el sistema binario, al utilizar  $N$  bits o espacios, podemos realizar hasta  $2^N$  conteos. Por ejemplo, con 2 bits podemos realizar hasta  $2^2 = 4$  conteos (00<sub>2</sub> a 11<sub>2</sub>); con 4 bits podemos efectuar hasta  $2^4 = 16$  conteos (0000<sub>2</sub> a 1111<sub>2</sub>); y así sucesivamente. El último conteo estará constituido siempre por todos los unos y es igual a  $2^N - 1$  en el sistema decimal. Por ejemplo, al utilizar 4 bits, el último conteo es  $1111_2 = 2^4 - 1 = 15_{10}$ .

## EJEMPLO 1-2

¿Cuál es el número más grande que puede representarse con 8 bits?

### Solución

$$2^N - 1 = 2^8 - 1 = 255_{10} = 11111111_2$$

Esta ha sido una breve introducción al sistema de numeración binaria y su relación con el sistema decimal. En el siguiente capítulo dedicaremos mucho más tiempo a estos dos sistemas y a algunos otros.

## PREGUNTAS DE REPASO

1. ¿Cuál es el equivalente decimal de 110111<sub>2</sub>?
2. ¿Cuál es el siguiente número binario después de 10111<sub>2</sub> en la secuencia de conteo?
3. ¿Cuál es el mayor valor decimal que puede representarse con 12 bits?

## 1.4 REPRESENTACIÓN DE CANTIDADES BINARIAS

En los sistemas digitales, la información que se está procesando por lo general se presenta en forma binaria. Las cantidades binarias pueden representarse por medio de cualquier dispositivo que solamente tenga dos estados de operación o posibles condiciones. Por ejemplo, un interruptor sólo tiene dos estados: abierto o cerrado. Arbitrariamente, podemos hacer que un interruptor abierto represente el 0 binario y que uno cerrado represente el 1 binario. Con esta asignación ahora podemos representar cualquier número binario como se ilustra en la figura 1-6 (a); donde los estados de los diversos interruptores representan la cantidad  $10010_2$ .

Otro ejemplo se muestra en la figura 1-6(b), donde se utilizan perforaciones en papel para representar números binarios. Una perforación es un 1 binario y la ausencia de una perforación es un 0 binario.

Hay muchos otros dispositivos que sólo tienen dos estados de operación o que pueden operarse en dos condiciones extremas. Entre éstos se encuentran: la bombilla eléctrica o foco (encendido o apagado), el diodo (activado o desactivado), el relevador (energizado o desener-

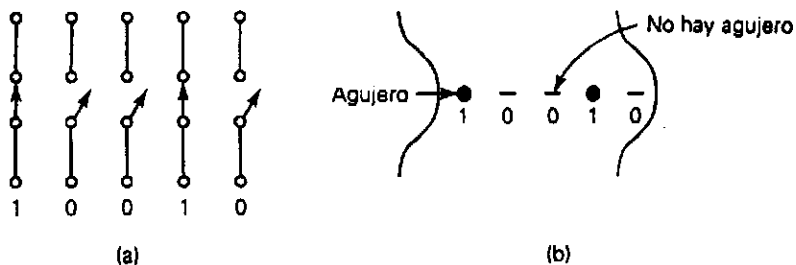


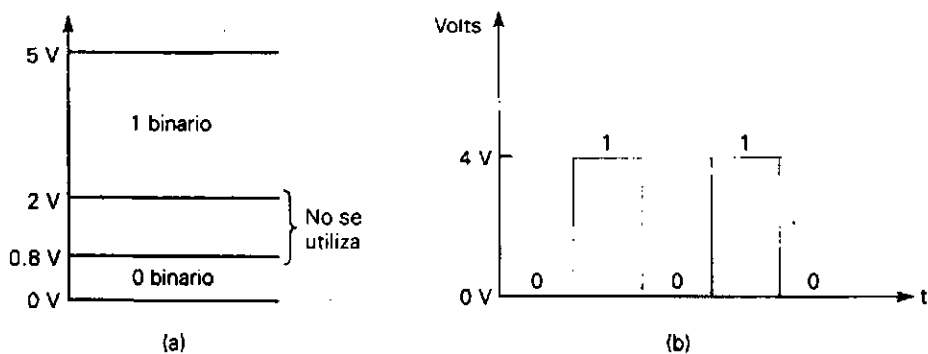
Figura 1-6 Uso de (a) interruptores y (b) cinta de papel perforada para representar números binarios.

gizado), el transistor (cortado o saturado), la fotocelda (iluminada u oscura), el termostato (abierto o cerrado), el embrague mecánico (engranado o desengranado) y la cinta magnética (magnetizada o desmagnetizada).

En los sistemas electrónicos digitales, la información binaria se representa por medio de voltajes (o corrientes) que están presentes en las entradas o salidas de los diversos circuitos. Por lo general, el 0 y el 1 binarios se representan con dos niveles de voltaje nominales. Por ejemplo, cero volts (0 V) podría representar el 0 binario y +5 V, el 1 binario. En realidad, debido a las variaciones del circuito, el 0 y el 1 se representarían por medio de intervalos de voltaje. Esto se ilustra en la figura 1-7 (a), donde cualquier voltaje entre 0 y 0.8 V representa un 0 y cualquiera entre 2 y 5 V representa un 1. Todas las señales de entradas y salidas normalmente caen en uno de estos intervalos excepto durante las transiciones de un nivel a otro. La figura 1-7 (b) muestra una señal digital común cuando forma una secuencia a través del valor binario 01010.

Ahora podemos observar otra diferencia significativa entre los sistemas digitales y los analógicos. En los sistemas digitales, el valor exacto de un voltaje *no es importante*; por ejemplo, un voltaje de 3.6 V es igual que uno de 4.3 V. En los sistemas analógicos, el valor exacto de un voltaje *sí es importante*. Por ejemplo, si el voltaje analógico es proporcional a la temperatura registrada por un transductor, 3.6 V representaría una temperatura diferente que 4.3 V. En otras palabras, el valor del voltaje conlleva información significativa. Esta característica significa que, por lo general, es más difícil diseñar circuitería analógica exacta que digital debido a la forma en que fluctúan los valores exactos del voltaje en relación con variaciones en los valores de los componentes, la temperatura y el ruido.

Figura 1-7 (a) Asignaciones comunes de voltaje en el sistema digital; (b) señal digital común.



## 1-7 MEMORIA

Cuando una señal de entrada se aplica a muchos dispositivos o circuitos, la salida de alguna manera cambia en respuesta a la entrada y, cuando se retira la señal de entrada, la salida regresa a su estado original. Estos circuitos no exhiben la propiedad de una *memoria*, ya que sus salidas regresan a su nivel normal. En los circuitos digitales, ciertos tipos de dispositivos y circuitos sí tienen memoria. Cuando una entrada se aplica a tal circuito, la salida cambia de estado, pero se mantiene en el nuevo estado aún después de que se retire la entrada. Esta propiedad de retener su respuesta a una entrada momentánea se denomina *memoria*. La figura 1-10 ilustra operaciones que no son propias de la memoria y otras que sí lo son.

Los dispositivos y circuitos de memoria desempeñan un papel importante en los sistemas digitales debido a que ofrecen medios para almacenar números binarios temporal o permanentemente, con la capacidad de cambiar la información almacenada en cualquier instante. Como veremos, los diversos elementos de la memoria incluyen los tipos magnéticos y aquellos que utilizan circuitos electrónicos, denominados *biestables* (*latches o seguros y flip-flops*).

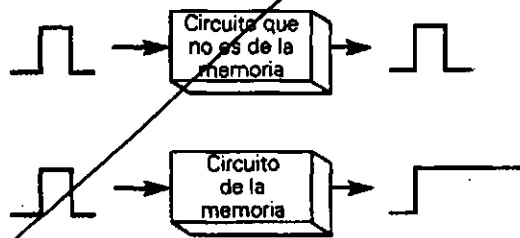


Figura 1-10 Comparación de una operación que no es de memoria con una que sí lo es.

## 1-8 COMPUTADORAS DIGITALES

Las técnicas digitales han trazado su camino en innumerables áreas de la tecnología, pero el área de las *computadoras digitales automáticas* es la más notable y extensa. Aunque las computadoras digitales afectan alguna parte de nuestras vidas, es muy dudoso que muchos de nosotros sepamos con exactitud lo que hace una computadora. En términos más simples, *una computadora es un sistema de hardware que realiza operaciones aritméticas, manipula información (generalmente en forma binaria) y toma decisiones*.

En su mayoría, los seres humanos pueden hacer cualquier cosa que haga una computadora, sólo que las computadoras lo hacen con mucha mayor velocidad y exactitud. Esto sucede a pesar del hecho de que las computadoras realizan todas sus operaciones de cálculo paso a paso. Por ejemplo, un ser humano puede tomar una lista de 10 números y sumarlos en una sola operación, listando los números uno sobre el otro y sumándolos columna por columna. Una computadora, por otro lado, sólo puede sumar dos números a la vez, así que la suma de esta misma lista de números necesitará nueve etapas reales de adición. Desde luego, el hecho de que la computadora requiere de sólo un microsegundo o menos por etapa contribuye a superar esta aparente ineficiencia.

Una computadora es más rápida y precisa que los seres humanos pero, a diferencia de la mayoría de las personas, se le tiene que dar un conjunto completo de instrucciones que indique con *exactitud* qué hacer en cada etapa de su operación. Este conjunto de instrucciones, se denomina *programa*, es elaborado por una o más personas por cada trabajo que la

computadora deba realizar. Los programas se colocan en la memoria de la computadora en forma codificada en binario y cada instrucción tiene un código único. La computadora toma estos códigos de instrucción de la memoria *uno a la vez* y efectúa la operación requerida por el código. Más adelante se tratará este tema con mayor amplitud.

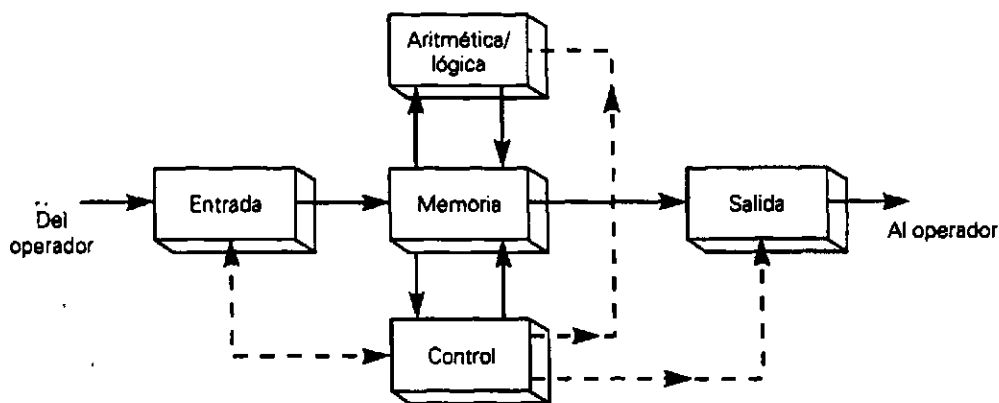
**Partes principales de una computadora** Existen varios tipos de sistemas de computación, pero cada uno se puede separar en las mismas unidades funcionales. Cada unidad desempeña funciones específicas y todas las unidades funcionan en conjunto para ejecutar las instrucciones que se dan en el programa. La figura 1-11 muestra las cinco partes funcionales más importantes de una computadora digital y su interacción. Las líneas sólidas con flechas representan el flujo de información. Las líneas punteadas con flechas representan el flujo de las señales de temporización y control.

Las funciones principales de cada unidad son:

1. **Unidad de entrada.** A través de esta unidad se alimenta el sistema de cómputo y la unidad de memoria con un conjunto de instrucciones y datos para que se almacenen hasta que se necesiten. La información comúnmente ingresa en la unidad de entrada por medio de tarjetas perforadas, cinta, discos magnéticos o un teclado.
2. **Unidad de memoria.** La memoria almacena las instrucciones y datos que se reciben de la unidad de entrada. Almacena los resultados de operaciones recibidas de la unidad aritmética. Asimismo, suministra información a la unidad de salida.
3. **Unidad de control.** Esta unidad toma instrucciones de la unidad de memoria, una por una, y las interpreta. Luego envía señales apropiadas a todas las demás unidades para que la instrucción específica sea ejecutada.
4. **Unidad aritmética lógica.** Todas las operaciones aritméticas y decisiones lógicas se realizan en esta unidad, la cual puede enviar después resultados a la unidad de memoria para que se almacenen.
5. **Unidad de salida.** Esta unidad toma datos de la unidad de memoria e imprime, exhibe o, en caso contrario, presenta la información al operador (o bien la procesa, en el caso de una computadora de control de procesos).

**¿Cuántos tipos de computadoras existen?** La respuesta depende de los criterios que se utilicen para clasificarlas. Las computadoras difieren en tamaño físico, velocidad de operación, capacidad de memoria y de procesamiento, además de otras características. La manera

Figura 1-11 Diagrama funcional de una computadora digital.



más común de clasificarlas es por su tamaño físico que suele ser, aunque no siempre, un indicador de sus capacidades relativas. Las tres clasificaciones básicas son: **microcomputadora**, **minicomputadora** y **sistemas grandes de cómputo (mainframes)**.

La **microcomputadora** es el tipo más pequeño de computadora. En general, está formada por varios CI, entre los que se incluye un **microprocesador**, circuitos de memoria y circuitos de interface para dispositivos de entrada/salida tales como el teclado y la pantalla. Las microcomputadoras son el resultado de los grandes avances en la tecnología de fabricación de CI que hicieron posible encapsular cada vez más circuitería en un espacio reducido. Por ejemplo, el microprocesador contiene la circuitería para las unidades aritmética lógica y la unidad de control.

Las **minicomputadoras** son de mayor tamaño que las microcomputadoras y tienen precios que pueden llegar a ser del orden de las decenas de miles de dólares (incluyendo equipo periférico de entrada y salida). Las "minis" se usan ampliamente en sistemas de control industrial, aplicaciones científicas para escuelas y laboratorios de investigación, y en aplicaciones comerciales para pequeñas empresas. Aunque son más costosas que las microcomputadoras, se siguen utilizando ampliamente ya que, por lo general, son más rápidas y poseen más capacidad de tipo operativo. Sin embargo, estas diferencias en velocidad y facultades operativas se desvanecen rápidamente.

Los **sistemas grandes de cómputo (mainframes)** se pueden encontrar en las grandes corporaciones, bancos, universidades y laboratorios científicos. Estas "maxicomputadoras" pueden llegar a costar varios millones de dólares e incluyen sistemas completos de equipo periférico: como unidades de cinta y de disco magnéticos, perforadoras y lectoras de tarjetas, teclados, impresoras y muchos dispositivos más. Las aplicaciones de estas computadoras van desde la solución de problemas científicos y de ingeniería orientados operacionalmente hasta aplicaciones comerciales orientadas a la información, donde se hace hincapié en el mantenimiento y actualización de importantes cantidades de datos e información.

El término **supercomputadoras** se emplea para denotar las computadoras con máxima velocidad y potencia de cómputo. Son las más costosas (aunque no necesariamente las más grandes), porque utilizan los adelantos tecnológicos más recientes para lograr un desempeño superior.

## PREGUNTAS DE REPASO

1. Explique la forma en la que un circuito digital que tiene memoria difiere de uno que no la tiene.
2. Mencione las cinco unidades funcionales más importantes de una computadora.
3. Mencione los tres tipos de computadoras, de acuerdo con su tamaño físico.

## PROBLEMAS

---

### SECCIÓN 1-2

- 1-1 Indique cuáles cantidades son analógicas y cuáles digitales
- (a) El número de átomos presente en una muestra de material
  - (b) La altitud de vuelo de un avión
  - (c) La presión en el interior de una llanta de bicicleta
  - (d) La corriente que circula en una bocina
  - (e) El reloj de un horno de microondas

### SECCIÓN 1-3

- 1-2. Convierta los siguientes números binarios a sus valores decimales equivalentes:
- (a)  $11001_2 = \text{_____}_{10}$
  - (b)  $1001.1001$
  - (c)  $10011011001.10110$
- 1-3. Utilizando 6 bits, muestre la secuencia de conteo binario de 000000 a 111111
- 1-4. ¿Hasta que número máximo podemos contar con 10 bits?
- 1-5. ¿Cuántos bits se necesitan para contar hasta 511?

### SECCIÓN 1-6

- 1-6. Suponga que se van a transmitir los valores enteros decimales de 0 a 15.
- (a) ¿Cuántas líneas se necesitarán si se utiliza la representación en paralelo?
  - (b) ¿Cuántas se necesitarán si se emplea la representación en serie?

## RESPUESTAS A LAS PREGUNTAS DE REPASO

---

### SECCIÓN 1-1

1. Las cantidades analógicas pueden tener *cualquier* valor sobre un intervalo continuo; las digitales sólo tienen valores discretos.

### SECCIÓN 1-2

1. Más fáciles de diseñar; mayor facilidad para almacenar la información; mayor exactitud y precisión; programables; afectadas en forma mínima por el ruido; mayor grado de integración.
2. Las cantidades físicas del mundo real son analógicas.

### SECCIÓN 1-3

1.  $107_{10}$    2.  $11000_2$    3.  $4095_{10}$

### SECCIÓN 1-5

1. Falso   2. Sí, siempre que los dos voltajes de entrada se encuentren del mismo rango de nivel lógico   3. Lógico

### SECCIÓN 1-6

1. La transmisión paralela es más rápida; la transmisión serial sólo requiere una línea de señal.

### SECCIÓN 1-8

1. A la que tiene memoria cambiará su salida y *permanecerá* cambiando como respuesta a un cambio momentáneo en la señal de entrada.   2. Entrada, salida, memoria, unidad aritmética/lógica, unidad de control.   3. Microcomputadora, minicomputadora, maxicomputadora (sistema grande de cómputo o mainframe)



1. ¿Cuál es la ventaja principal del código ASCII frente al binario (directo)?

## 2-8 CÓDIGOS ALFANUMÉRICOS

Además de los datos numéricos, una computadora debe ser capaz de manejar información no numérica. En otras palabras, una computadora debe reconocer códigos que representan letras del alfabeto, signos de puntuación y otros caracteres especiales, además de los números. Estos códigos se denominan *códigos alfanuméricos*. Un código completo de este tipo puede incluir 26 letras minúsculas, 26 mayúsculas, 10 dígitos, 7 signos de puntuación y entre 20 y 40 caracteres más, como +, /, #, %, \* y otros similares. Podemos afirmar que un código alfanumérico representa todos los caracteres y funciones diferentes que se encuentran en el teclado estándar de una máquina de escribir (o de una computadora).

**Código ASCII** El código alfanumérico más utilizado en la mayoría de las microcomputadoras y minicomputadoras y en muchos sistemas grandes de cómputo es el Código Americano Estándar para el Intercambio de Información (ASCII, siglas de American Standard Code for Information Interchange). El código ASCII usa 7 bits, por tanto tiene  $2^7 = 128$  grupos de posibles códigos. Esta cantidad es más que suficiente para representar todos los caracteres de un teclado estándar y las funciones de control como <RETURN> (retroceso de carro) Y <LINEFEED> (cambio de línea). La tabla 2-5 contiene una lista parcial de códigos ASCII. Además del código binario para cada símbolo, la tabla también proporciona sus equivalentes en octal y en hexadecimal.

### EJEMPLO 2-8

El siguiente es un mensaje codificado en ASCII. ¿Cuál es el mensaje?

1001000 1000101 1001100 1010000

### Solución

Primero se convierte cada código de 7 bits en su equivalente hexadecimal. Los resultados son:

48 45 4C 50

Ahora localice en la tabla 2-5 estos valores hexadecimales y determine el símbolo que representa cada uno. Los resultados son:

HELP (ayuda)

El código ASCII se emplea para transferir información alfanumérica entre una computadora y dispositivos de entrada/salida como terminales o impresoras. Una computadora también lo emplea internamente para guardar la información que el operador proporciona mediante el teclado. El siguiente ejemplo ilustra lo anterior.

Tabla 2-5 Lista parcial del código ASCII

Carácter	Bin ASCII	Decimal	Hex	Carácter	Bin ASCII	Decimal	Hex
A	100 0001	65	41	Y	011 1001	85	55
B	100 0010	66	42	Z	011 1010	86	56
C	100 0011	67	43	[	011 0000	64	40
D	100 0100	68	44	\	011 0001	65	41
E	100 0101	69	45	]	011 0010	66	42
F	100 0110	70	46	^	011 0011	67	43
G	100 0111	71	47	_	011 0100	68	44
H	100 1000	72	48	`	011 0101	69	45
I	100 1001	73	49	a	011 0110	70	46
J	100 1010	74	4A	b	011 0111	71	47
K	100 1011	75	4B	c	011 1000	72	48
L	100 1100	76	4C	d	011 1001	73	49
M	100 1101	77	4D	blank	010 0000	60	30
N	100 1110	78	4E		010 1110	66	3E
O	100 1111	79	4F		010 1000	64	34
P	101 0000	80	50		010 1011	65	35
Q	101 0001	81	51		010 0100	64	34
R	101 0010	82	52		010 1010	65	35
S	101 0011	83	53		010 1001	65	35
T	101 0100	84	54		010 1101	67	3D
U	101 0101	85	55		010 1111	67	3D
V	101 0110	86	56		010 1100	66	3C
W	101 0111	87	57		011 1101	67	3D
X	101 1000	88	58	<RETURN>	000 1101	013	0D
				<LINEFEED>	000 1010	012	0A

**EJEMPLO 2-9**

Un operador está escribiendo un programa en BASIC en el teclado de cierta microcomputadora. Ésta convierte la pulsación de cada tecla en su código ASCII y lo guarda en la memoria. Determine los códigos que serán colocados en la memoria cuando el operador teclee la siguiente instrucción en BASIC:

GOTO 25

**Solución**

El primer paso consiste en localizar cada símbolo (incluido el espacio en blanco) en la tabla 2-5 y anotar su código ASCII.

- G 1000111
- O 1001111
- T 1010100
- O 1001111
- (espacio) 0100000
- 2 0110010
- 5 0110101

## PREGUNTAS DE REPASO

1. ¿Cuál es el código estándar para ASCII utilizado para representación binaria de un carácter?
2. El carácter "A" en código ASCII se guarda en localización consecutiva de memoria de una computadora.

1010011 1010000 1001111 1010000

00000000

## 2-9 MÉTODO DE PARIDAD PARA LA DETECCIÓN DE ERRORES

La operación más frecuente realizada por los sistemas digitales es el movimiento de datos y códigos binarios de una localidad a otra. He aquí algunos ejemplos de esta operación:

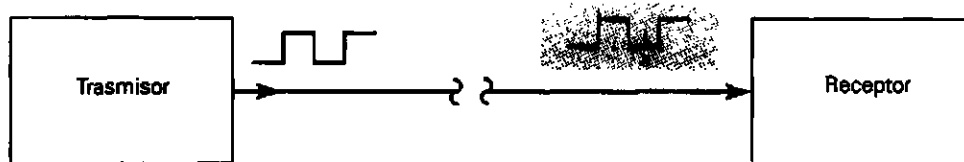
- Transmisión de una voz digitalizada sobre un enlace de microondas.
- El almacenamiento y la recuperación de datos de los dispositivos externos de memoria, como cintas y discos magnéticos.
- La transmisión de información de una computadora a una terminal remota u otra computadora.

Sin importar qué tipo de información se transmite de un dispositivo (transmisor) a otro (receptor), existe siempre la posibilidad de que se presenten errores que le impidan al receptor recibir la misma información que envió el transmisor. La causa más importante de errores es la transmisión de ruido eléctrico, que consiste en las fluctuaciones de voltaje o corriente, que siempre están presentes, en distintos grados, en todos los sistemas electrónicos. La figura 2-2 es una ilustración sencilla de un tipo de error en la transmisión.

El transmisor envía por una línea una señal digital serial, relativamente libre de ruido. Sin embargo, en el momento en que la señal llega al receptor, ésta contiene cierto grado de ruido superpuesto a la señal original. En ocasiones, el ruido tiene una magnitud suficiente para alterar el nivel lógico de la señal en algún punto  $x$ . Cuando esto ocurre, el receptor puede interpretar en forma incorrecta el nivel lógico de ese bit como 1, que no es lo que el transmisor envió.

La mayor parte del equipo digital moderno está diseñado para estar relativamente libre de error, y la probabilidad de que ocurran errores como el mostrado en la figura 2-2 es muy baja. Sin embargo, debe mencionarse que los sistemas digitales a menudo transmiten miles, incluso millones, de bits por segundo, por lo que, incluso una tasa muy pequeña de ocurrencia, sí puede provocar algún molesto error ocasional, si no es que hasta desastroso. Por esta razón, muchos sistemas digitales emplean algún método para detectar (y en ocasiones corregir) errores. Uno de los esquemas más sencillos y de mayor uso para la detección de errores es el método de la paridad.

Figura 2-2 Ejemplo de ruido que provoca un error en la transmisión de datos digitales.



**El bit de paridad** Un *bit de paridad* es un bit extra que se agrega a un grupo de código que se transfiere de una localidad a otra. El bit de paridad es un 0 o un 1, según el número de unos que haya en el grupo de código. Para esto se emplean dos métodos diferentes.

En el método de *paridad par*, el valor del bit de paridad se escoge de manera que el número total de unos en el grupo de código (incluido el bit de paridad) sea un número *par*. Por ejemplo, supóngase que el grupo de código es 1000011. Este es el carácter C en ASCII. El grupo de código tiene *tres* unos. Por tanto, sumaremos un bit de paridad 1 para hacer que el número total de unos sea un número par. El *nuevo* grupo de código, que incluye el bit de paridad, se convierte de este modo en

1 0 0 0 0 1 1  
└──────────┘ bit de paridad agregado\*

Si el grupo de código contiene un número par de unos, al bit de paridad se le asigna un valor de 0. Por ejemplo, si el grupo de código fuera 1000001 (el código ASCII para "A"), el bit de paridad asignado sería 0; así que el nuevo código, incluyendo al bit de paridad, sería 01000001.

El método de *paridad impar* se utiliza exactamente en la misma forma, excepto que se escoge el bit de paridad para que el número total de unos (incluyendo al bit de paridad) sea un número *impar*. Por ejemplo, para el código de grupo 1000001, el bit de paridad asignado sería un 1. Para el grupo de código 1000011, el bit de paridad sería un 0.

Sin importar si se utiliza la paridad par o la impar, el bit de paridad se convierte en una parte real de la palabra del código. Por ejemplo, la adición de un bit de paridad al código ASCII de 7 bits produce un código de 8 bits. Así al bit de paridad se le trata igual que a cualquier otro bit del código.

El bit de paridad se emplea para detectar cualquier error *en un solo bit* que ocurra durante la transmisión de un código de una localidad a otra (por ejemplo, de una computadora a una terminal). Así, supongamos que el carácter "A" se está transmitiendo y se emplea paridad *impar*. El código transmitido sería:

1 0 0 0 0 0 1

Cuando el circuito receptor capte este código, verificará que el código contenga un número impar de unos (incluyendo al bit de paridad). Si es así, el receptor supondrá que el código se ha recibido adecuadamente. Ahora bien, supongamos que debido a algún ruido o mal funcionamiento el receptor en realidad recibe el siguiente código.

1 0 0 0 0 0 0

El receptor notará que este código tiene un número *par* de unos. Esto le indica al receptor que debe haber un error en el código, ya que presumiblemente el transmisor y el receptor han acordado utilizar la paridad impar. Sin embargo, no hay forma de que el receptor pueda indicar cuál bit contiene el error, ya que no sabe qué código se supone que es.

Debe aclararse que este método de paridad no funcionaría si *dos* bits contuvieran algún error, ya que dos errores no cambiarían la condición de "impar" o "par" del número de unos que hay en el código. En la práctica, el método de paridad se emplea sólo en situaciones donde la probabilidad de que se cometa un solo error es muy baja y la probabilidad de errores dobles es esencialmente nula.

Cuando se emplea el método de paridad, el transmisor y el receptor deben ponerse de acuerdo con anticipación, sobre el tipo de paridad que se utilizará, par o impar. No existe ninguna ventaja de una sobre la otra, aunque parece que la que más se emplea es la paridad par. El transmisor debe colocar un bit apropiado en cada unidad de información que transmite. Por ejemplo, si el transmisor se encuentra enviando datos codificados en ASCII, debe adjuntar un

\* El bit de paridad se puede colocar al final de la palabra del código, pero por lo general se coloca a la izquierda del MSB.

bit de paridad para cada grupo ASCII de siete bits. Cuando el receptor examina los datos que ha recibido del trasmisor, verifica cada grupo del código para determinar que el número total de unos (incluido el bit de paridad) sea consistente con el tipo de paridad acordada. Este proceso recibe el nombre de *verificación de la paridad* de los datos. En caso de que detecte un error, el receptor puede enviar un mensaje al trasmisor solicitándole que vuelva a transmitir el último conjunto de datos. El procedimiento exacto que se sigue cuando se detecta un error depende del diseño particular del sistema.

## EJEMPLO 2-10

Un trasmisor envía a un receptor datos codificados en ASCII con un bit de paridad par. Muestre los códigos que el trasmisor enviará cuando transmita el mensaje "HELLO" (HOLA).

### Solución

Primero busque los códigos ASCII de todos los caracteres que conforman el mensaje. Después, para cada código, cuente el número de unos. Si este número es par, agregue un cero como el MSB. Si es impar, agregue un uno. Todos los códigos de 8 bits tendrán un número par de unos (incluyendo el bit de paridad).

		bits unidos que acaban en número par
H-	0	1 0 0 1 0 0 0
E-	1	1 0 0 0 1 0 1
L-	1	1 0 0 1 1 0 0
L-	1	1 0 0 1 1 0 0
O-	1	1 0 0 1 1 1 1

## PREGUNTAS DE REPASO

1. Agregue un bit de paridad impar al código ASCII del símbolo 7 y exprese el resultado en hexadecimal.
2. Agregue un bit de paridad par al código BCD del número decimal 69.
3. ¿Por qué el método de paridad no puede detectar un doble error en los datos transmitidos?

## 2-10 REPASO

A título de repaso, a continuación aparecen más ejemplos que ilustran las operaciones descritas en este capítulo.