PRÓLOGO

En 1854, George Boole publicó un artículo de investigación sobre las leyes del pensamiento, en las cuales están fundadas las teorías matemáticas de la lógica y la probabilidad. Boole afrontó la lógica con una nueva perspectiva, reduciéndola a unas ecuaciones sencillas e incorporando la lógica dentro de las matemáticas. Comenzó entonces el álgebra de la lógica, llamada Álgebra de Boole, en la que está basada toda la electrónica digital que conocemos.

En 1947, los físicos John Bardeen, Walter Brattain y William Schockley obtuvieron un efecto de amplificación en un dispositivo compuesto por dos sondas de oro prensadas sobre un cristal de germanio (un semiconductor): nacía así el transistor, que actualmente es el elemento fundamental de todo dispositivo electrónico. En 1965 estos físicos recibieron el Premio Nóbel.

La comercialización del transistor en 1951 sentó las bases para el desarrollo de la tecnología electrónica en la segunda mitad del siglo. El transistor permitió la existencia de una gama de aplicaciones antes impensables y la reducción de costes y del tamaño de los dispositivos electrónicos de uso común (radio, televisión, etc.), abriéndose así el camino hacia el fenómeno de la electrónica de consumo.

La aparición del transistor también proporcionó un gran impulso al desarrollo de los ordenadores. En 1959, IBM presentó el primer ordenador (el 7090) con transistores.

La evolución de la electrónica se abrió a finales de los años cincuenta con la introducción del circuito integrado. La idea fue incluir un circuito completo en una sola pastilla de semiconductor: el Chip, y hacer de las conexiones entre los dispositivos parte integrante de su proceso de producción, reduciendo así las dimensiones, peso y coste con relación al número de elementos.

El desarrollo de la microelectrónica, como se denomina la electrónica de los circuitos integrados, es impresionante. A partir de su comercialización, el número máximo de componentes integrados en un chip se duplicó cada año desde los 100 iniciales. En la segunda mitad de los años setenta, al introducirse la integración a gran escala (VLSI) y superar los 10.000 componentes, se ingresó en la época actual, en la que es normal encontrar varios millones de componentes integrados en un chip muy pequeño, por ejemplo en los microprocesadores de los teléfonos móviles, ordenadores personales o reproductores de MP3.

INTRODUCCIÓN

Este libro nace de las publicaciones que realiza el autor en varias revistas, como *Todoelectrónica*, *MundoElectrónico*, *ACM (Association for Computing Machinery)* e *IJCM (International Journal of Computational Methods)* de WorldScientific.

Adaptándose completamente a los contenidos del Ministerio de Educación y Ciencia, es diferente de los demás libros de texto de la misma materia ya que incorpora nuevos conceptos que aún no aparecen en ningún otro libro, como el concepto de Círculo de Verdad y el Método de Luque de simplificación de funciones lógicas. Cualquier profesor con un poco de experiencia en esta materia será capaz de apreciar la naturaleza de estas diferencias con una simple lectura.

Esta obra pretende que los estudiantes de Grado Medio adquieran los conocimientos suficientes para superar el módulo de Electrónica Digital y Microprogramable del ciclo formativo Equipos Electrónicos de Consumo.

Los temas que se tratan en cada capítulo de forma práctica y con muchos ejemplos son los siguientes: los sistemas y códigos de numeración, el álgebra de Boole, las tablas de verdad, las puertas lógicas y su simbología, las distintas tecnologías de fabricación de los circuitos digitales (TTL, ECL, CMOS, DTL, RTL, HTL), los bloques funcionales combinacionales, los sistemas secuenciales, la aritmética en los códigos binarios, los circuitos electrónicos de conversión A/D y D/A, los osciladores digitales, los sistemas combinacionales universales programables, los microprocesadores y dispositivos periféricos, las medidas en electrónica digital y los diagnósticos de averías. Además, incorpora un apéndice con prácticas que ayudarán al lector a comprender mejor los contenidos desarrollados.

En definitiva, esta obra se ha desarrollado con el objetivo de proporcionar un buen material didáctico-práctico para asignaturas relacionadas con la electrónica digital, pero también puede ser utilizado como libro de consulta y de aprendizaje autodidacta por cualquier persona. La profundidad con que se han tratado los temas es adecuada para estudiantes de módulos profesionales y universitarios que comienzan a introducirse en el mundo de la electrónica digital.

Ra-Ma pone a disposición de los profesores un CD-ROM que sirve de guía didáctica para el desarrollo del tema e incluye las soluciones a los ejercicios expuestos. Puede solicitarlo a editorial@ra-ma.com, acreditándose como docente y siempre que el libro sea utilizado como texto base para impartir clases.

Capítulo 1

SISTEMAS Y CÓDIGOS DE NUMERACIÓN

1.1. GENERALIDADES. SISTEMA DECIMAL

Los números pueden representarse en diversos sistemas de numeración. El sistema que más se emplea es el sistema decimal debido, principalmente, a que hay diez dedos en las manos. Si en vez de diez dedos tuviésemos ocho, lo más probable es que se utilizase otro sistema.

Cada sistema de numeración tiene una base, siendo ésta el número de símbolos distintos utilizados para la representación de las cantidades en el mismo. El **sistema decimal**, como su nombre indica, tiene una base de diez, que son los números del 0 al 9.

Para entender mejor la base de un sistema, se tomará como ejemplo el número del sorteo de la ONCE que se muestra en la figura 1.1.

De esta forma, el número 59.088 en el sistema decimal se puede expresar de la siguiente manera:

$$59.088 = 5\times 10.000 + 9\times 1.000 + 0\times 100 + 8\times 10 + 8\times 1 \qquad [1.1]$$

es decir,

$$59.088 = 5\times 10^4 + 9\times 10^3 + 0\times 10^2 + 8\times 10^1 + 8\times 10^0 \qquad [1.2]$$

A la expresión [1.2] se le llama polinomio de potencias de la base, en el ejemplo de base 10 y en general, en un sistema de base *b*, se puede representar cualquier número *N* mediante un polinomio de potencias de la base.

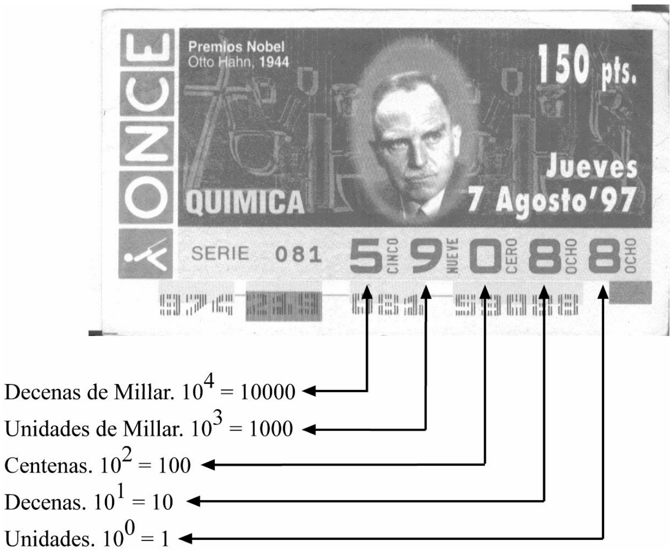


Figura 1.1 Cantidades del sistema decimal

1.2. SISTEMA BINARIO

En el mundo de la informática, las comunicaciones y la electrónica industrial no se emplea el sistema decimal. En su lugar se emplean otros sistemas. Uno de ellos es el **Sistema Binario** que, como su nombre indica, tiene una base de dos, que son los números 0 y 1 y reciben el nombre de **bit**.

Si se desea convertir un número de binario a decimal, simplemente se representará este número mediante su polinomio equivalente.

Ejemplo 1.1. Convertir el número binario 1001 a número decimal

$$1011_2 = 1\times 2^3 + 0\times 2^2 + 1\times 2^1 + 1\times 2^0$$

$$1011_2 = 8 + 0 + 2 + 1$$

$$1011_2 = 11_{10}$$

Nótese cómo se indica la base de cada número al final de éste con un subíndice.

En la tabla 1.1 se representa la equivalencia entre los dieciséis primeros números del sistema binario y decimal.

Tabla 1.1. Sistemas binario y decimal

Sistema Binario base = 2	Sistema Decimal base = 10
0 0 0 0	0
0 0 0 1	1
0 0 1 0	2
0 0 1 1	3
0 1 0 0	4
0 1 0 1	5
0 1 1 0	6
0 1 1 1	7
1 0 0 0	8
1 0 0 1	9
1 0 1 0	10
1 0 1 1	11
1 1 0 0	12
1 1 0 1	13
1 1 1 0	14
1 1 1 1	15

Para convertir un número de decimal a binario, en vez de multiplicar lo que se hace es dividir el número decimal entre dos, una y otra vez hasta obtener un número entero que no se pueda dividir más. Luego, se toma el último cociente con todos los restos y se colocan en orden inverso.

Ejemplo 1.2.1 Convertir el número decimal 83_{10} a binario.

Se divide el número decimal 83 entre dos. El resultado se vuelve a dividir entre dos y así sucesivamente hasta que no se pueda dividir más.

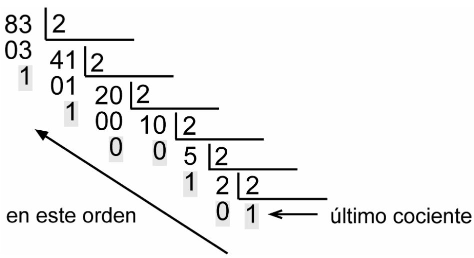


Figura 1.2: Conversión del número decimal 83 a binario

luego,

$$83_{10} = 1010011_2$$

1.3. SISTEMA OCTAL

Como su nombre indica, la base de este sistema es ocho y por tanto existen ocho símbolos diferentes que son del 0 al 7.

La sencillez para convertir un número de octal a binario y viceversa es lo que hace interesante este sistema. Solamente habrá que colocar a cada cifra su equivalente binario u octal. En la tabla 1.2 se expresa la equivalencia entre los ocho primeros números del **sistema octal** y binario.

Tabla 1.2. Sistema binario y octal

Sistema Binario base = 2	Sistema Octal base = 8
0 0 0	0
0 0 1	1
0 1 0	2
0 1 1	3
1 0 0	4
1 0 1	5
1 1 0	6
1 1 1	7

Ejemplo 1.3.1 a) Convertir el número octal 523_8 a binario.
b) Convertir el número binario 11100010_2 a octal.

a) Se toman los valores de cada una de las cifras siguiendo la tabla 1.2.

$$5_8 = 101_2 ; 2_8 = 010_2 ; 3_8 = 011_2$$

y se obtendrá: $523_8 = 101010011_2$

b) Se toman los valores empezando de derecha a izquierda, agrupándolos en grupos de tres y siguiendo los valores de la tabla 1.2.

$$010_2 = 2_8 ; 100_2 = 4_8 ; 011_2 = 3_8$$

y se obtendrá: $11100010_2 = 342_8$

La conversión de un número octal a decimal y viceversa se puede hacer de dos formas distintas. La primera sería calcular su equivalente binario y luego convertirlo a decimal. La segunda forma sería aplicando directamente los métodos que se han visto anteriormente.

Ejemplo 1.3.2 Convertir el número octal 523_8 a decimal por el método convencional.

Se calcula su polinomio equivalente:

$$523_8 = 5 \times 8^2 + 2 \times 8^1 + 3 \times 8^0$$

$$523_8 = 320 + 16 + 3$$

luego,

$$523_8 = 339_{10}$$

Se puede comprobar dividiendo entre ocho hasta obtener un número entero que no se pueda dividir más, es decir:

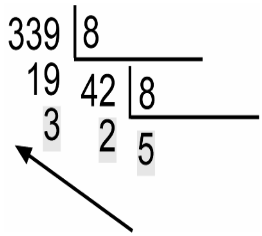


Figura 1.3. Conversión del número decimal 339_{10} a octal

1.4. SISTEMA HEXADECIMAL

Como su nombre indica, la base de este sistema es dieciséis y por tanto, existen dieciséis símbolos diferentes que son los números del 0 al 9 y las letras de la A a la F.

Al igual que en el sistema octal, la sencillez para pasar un número hexadecimal a binario y viceversa, es lo que hace interesante a este sistema. Solamente habrá que colocar a cada cifra su equivalente binario o hexadecimal. En la tabla 1.3 se expresa la equivalencia entre los dieciséis primeros números del sistema binario y **hexadecimal**.

Ejemplo 1.4.1: a) Convertir el número hexadecimal $81F3_{16}$ a binario.
b) Convertir el número 1010011101_2 a hexadecimal.

a) Se toman los valores de cada una de las cifras siguiendo la tabla 1.3.

$$8_{16} = 1000_2 \quad 1_{16} = 0001_2 \quad F_{16} = 1111_2 \quad 3_{16} = 0011_2$$

luego,

$$81F3_{16} = \underbrace{1000}_{8}\underbrace{0001}_{1}\underbrace{1111}_{F}\underbrace{0011}_{3}$$

b) Se toman los valores empezando de derecha a izquierda y agrupándolos en grupos de cuatro.

$$\underbrace{10}_{2}\underbrace{1001}_{9}\underbrace{1101}_{D}; \quad 1101_2 = D_{16}; \quad 1001_2 = 9_{16}; \quad 0010_2 = 2_{16}$$

luego,

$$1010011101_2 = 29D_{16}$$

Tabla 1.3. Sistema binario y hexadecimal

Sistema Binario base = 2	Sistema Hexadecimal base = 16
0 0 0 0	0
0 0 0 1	1
0 0 1 0	2
0 0 1 1	3
0 1 0 0	4
0 1 0 1	5
0 1 1 0	6
0 1 1 1	7
1 0 0 0	8
1 0 0 1	9
1 0 1 0	A
1 0 1 1	B
1 1 0 0	C
1 1 0 1	D
1 1 1 0	E
1 1 1 1	F

Para convertir un número de hexadecimal a decimal u octal y viceversa, lo que se hace es convertir primero el número a binario y, a continuación, se le aplican los métodos tradicionales.

1.5. CÓDIGOS BINARIOS

Los sistemas de numeración que se han visto en los apartados anteriores constituyen unos códigos de representación de cantidades.

En cualquier sistema digital, la información ha de convertirse al sistema decimal para que así sea más fácil interpretarla.

1.5.1. Código BCD

Dentro de los códigos binarios, el que más se emplea es el **Código BCD** (**Decimal Codificado en Binario**). Este código lo que hace es transformar cada dígito o número decimal en su equivalente binario con cuatro *bits*. En la tabla 1.4 se representa este código.

Tabla 1.4. Código BCD

Código BCD	Dígito Decimal
0 0 0 0	0
0 0 0 1	1
0 0 1 0	2
0 0 1 1	3
0 1 0 0	4
0 1 0 1	5
0 1 1 0	6
0 1 1 1	7
1 0 0 0	8
1 0 0 1	9

Ejemplo 1.5.1.1 Convertir el dígito decimal 48 a BCD.

Se toman los valores de cada cifra siguiendo la tabla 1.4:

$$4_{10} = 0100_{BCD}\,; \quad 8_{10} = 1000_{BCD}$$

luego,

$$48_{10} = \underbrace{0100}_{4}\underbrace{1000}_{8}$$

$$48_{10} = 01001000_{BCD}$$

1.5.2. Código Gray

La principal característica de este código binario es que es cíclico y que de una posición a la siguiente sólo cambia un *bit* o número binario.

En la tabla 1.5 se representa la formación de los **códigos de Gray** de dos, tres y cuatro *bits*.

Tabla 1.5. Código Gray

Dígito Decimal	Código Gray		
	2 bits	3 bits	4 bits
0	0 0	0 0 0	0 0 0 0
1	0 1	0 0 1	0 0 0 1
2	1 1	0 1 1	0 0 1 1
3	1 0	0 1 0	0 0 1 0
4		1 1 0	0 1 1 0
5		1 1 1	0 1 1 1
6		1 0 1	0 1 0 1
7		1 0 0	0 1 0 0
8			1 1 0 0
9			1 1 0 1
10			1 1 1 1
11			1 1 1 0
12			1 0 1 0
13			1 0 1 1
14			1 0 0 1
15			1 0 0 0

Otra forma de representar gráficamente los códigos de Gray, y que se va a emplear en los capítulos siguientes, es la de aprovechar la propiedad de que es un código cíclico y representarlo en una circunferencia. De esta forma, se obtendrá la representación de la figura 1.4.

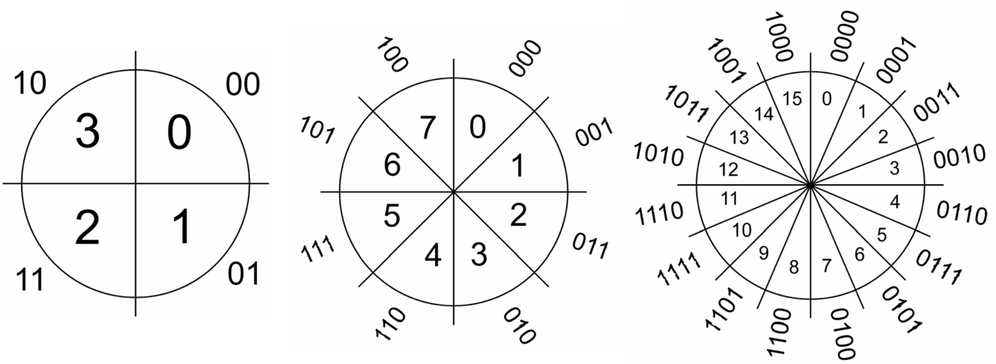


Figura 1.4. Representación de los códigos de Gray en círculos

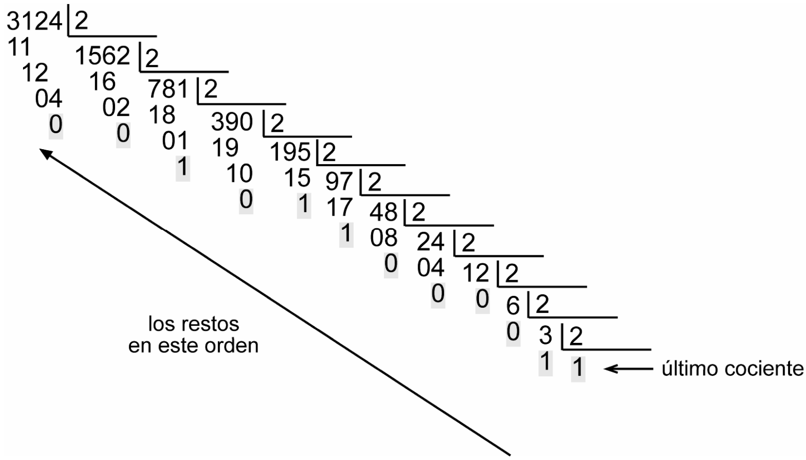
Cuando se tengan 2 *bits*, se divide la circunferencia en $2^2 = 4$ partes iguales; cuando se tengan 3 *bits*, se dividirá la circunferencia en $2^3 = 8$ partes iguales; cuando se tengan 4 *bits,* se dividirá la circunferencia en $2^4 = 16$ partes iguales. En general, cuando se tengan *n bits*, se dividirá la circunferencia en 2^n partes iguales.

En los siguientes capítulos, se verá la sencillez y utilidad de representar los códigos de Gray con esta disposición.

1.6. PROBLEMAS RESUELTOS

Problema 1. Convertir al sistema binario el número decimal 3124.

Se toma el número decimal y se divide entre dos, una y otra vez hasta obtener un número entero que no se pueda dividir más.



luego,

$$3124_{10} = 110000110100_2$$

Problema 2. Convertir al sistema octal el número binario 01110101_2.

Primero, se agrupan en grupos de tres *bits* de derecha a izquierda. Seguidamente, se convierte cada grupo de tres *bits* obtenido siguiendo la tabla 1.2.

$$01110101_2 \rightarrow \underbrace{01}_{1}\underbrace{110}_{6}\underbrace{101}_{5}$$

$$101_2 = 5_8 ; 110_2 = 6_8 ; 01_2 = 1_8$$

luego,

$$01110101_2 = 165_8$$

Problema 3. Convertir al sistema decimal el número octal 427_8.

La solución se puede obtener de dos formas distintas:

a) Obteniendo directamente el polinomio equivalente:

$$427_8 = 4\times 8^2 + 2\times 8^1 + 7\times 8^0$$

$$427_8 = 256 + 16 + 7$$

$$427_8 = 279_{10}$$

b) Calculando primero su equivalente binario y convirtiéndolo, luego, al sistema decimal:

$$4_8 = 100_2\,; 2_8 = 010_2\,; 7_8 = 111_2$$

$$427_8 = 100010111_2$$

$$100010111_2 = 1\times 2^8 + 0\times 2^7 + 0\times 2^6 + 0\times 2^5 + 1\times 2^4 + 0\times 2^3 + 1\times 2^2 + 1\times 2^1 + 1\times 2^0$$

$$100010111_2 = 256 + 0 + 0 + 0 + 16 + 0 + 4 + 2 + 1$$

$$100010111_2 = 279_{10}$$

$$427_8 = 279_{10}$$

Problema 4. Convertir al sistema hexadecimal, el número octal 129_8.

Este problema no tiene solución ya que el número 129_8 no existe. La definición de sistema octal dice que la base del sistema es ocho y que está formado por ocho símbolos diferentes, que son del 0 al 7. El número 9 no existe en el sistema octal.

Problema 5. Convertir al sistema hexadecimal el número binario 110100110_2.

Primero, se agruparán en grupos de cuatro *bits* de derecha a izquierda. Seguidamente, se convertirá cada grupo de cuatro *bits* obtenido siguiendo la tabla 1.3.

$$110100110_2 \rightarrow \underbrace{1}_{1}\underbrace{1010}_{A}\underbrace{0110}_{6}$$

$$0110_2 = 6_{16}\,; 1010_2 = A_{16}\,; 1_2 = 1_{16}$$

luego,

$$110100110_2 = 1A6_{16}$$

Problema 6. Convertir a BCD el dígito decimal 326_{10}.

Se asigna a cada dígito decimal su equivalente BCD siguiendo los valores de la tabla 1.4.

$$3_{10} \rightarrow 0011_{BCD}; 2_{10} \rightarrow 0010_{BCD}; 6_{10} \rightarrow 0110_{BCD}$$

luego,

$$326_{10} = 1100100110_{BCD}$$

Problema 7. Convertir a código Gray el código binario BCD 0110_2.

Primero, se convierte el dígito BCD a decimal siguiendo los valores de la tabla 1.4. Luego, hay que fijarse en la figura 1.4 o en la tabla 1.5, que proporcionan los valores de los códigos de Gray para 4 *bits*. Se deduce fácilmente que:

$$0110_{BCD} = 6_{10}$$

$$6_{10} = 0101_{GRAY}$$

luego,

$$0110_{BCD} = 0101_{GRAY}$$

1.7. EJERCICIOS

1.1. Convertir los siguientes números binarios a sus equivalentes decimales:

(a) 001100, (b) 000011, (c) 011100, (d) 111100, (e) 101010, (f) 111111, (g) 100001, (h) 111000.

1.2. Convertir los siguientes números decimales a sus equivalentes binarios:

(a) 64, (b) 100, (c) 111, (d) 145, (e) 255, (f) 500.

1.3. Convertir los siguientes números hexadecimales a sus equivalentes decimales:

(a) C, (b) 9F, (c) D52, (d) 67E, (e) ABCD.

1.4. Convertir los siguientes números decimales a sus equivalentes hexadecimales:

(a) 8, (b) 10, (c) 14, (d) 16, (e) 80, (f) 2560, (g) 3000, (h) 62500.

1.5. Convertir los siguientes números BCD a sus equivalentes decimales:

(a) 1010, (b) 00010111, (c) 10000110, (d) 010101000011, (e) 00110010.

1.6. Convertir los siguientes números decimales a sus equivalentes BCD:

(a) 6, (b) 13, (c) 99, (d) 872, (e) 145, (f) 21.

1.7. Convertir los siguientes números binarios a sus equivalentes en Código Gray:

(a) 1010, (b) 10000, (c) 10001, (d) 10010, (e) 10011.

1.8. Convertir los siguientes números en Código Gray a sus equivalentes binarios:

(a) 0100, (b) 11111, (c) 10101, (d) 110011, (e) 011100.