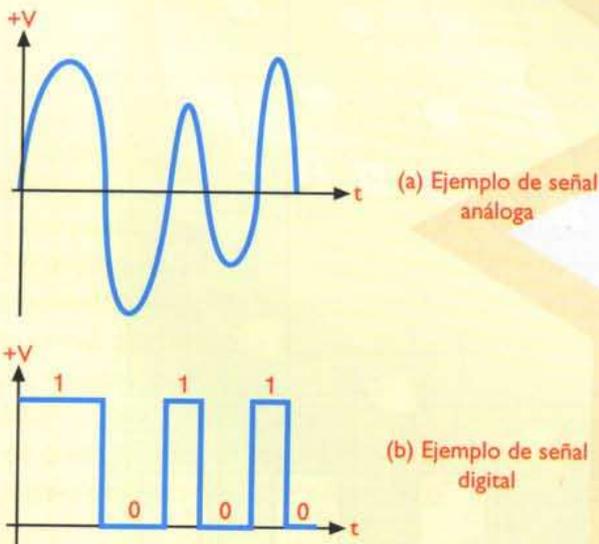


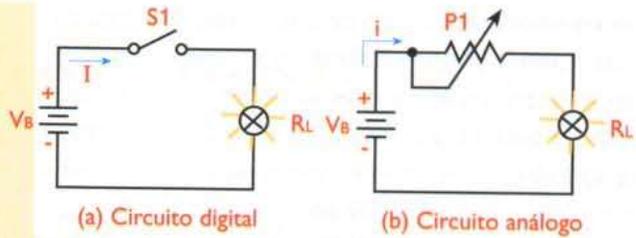
## ¿Qué son los circuitos digitales?

Prácticamente todos los circuitos examinados hasta el momento son **análogos**, lo cual implica que trabajan con señales que varían en forma gradual o continua sobre un amplio rango de valores de voltaje y/o corriente, **figura 10.1a**. También existen situaciones en las cuales es necesario operar con señales de voltaje o de corriente que sólo adoptan un número **discreto** o finito de valores, **figura 10.1b**. Este tipo de señales se denominan **señales digitales** o **lógicas** y los circuitos que trabajan las mismas, **circuitos digitales** o **lógicos**. El estudio de los circuitos digitales es el marco de acción de la **electrónica digital**.

La electrónica digital es conceptualmente más sencilla que la electrónica analógica porque trabaja con componentes y señales de naturaleza **binaria**, es decir, que sólo pueden adoptar uno de dos valores, niveles o estados posibles. En la electrónica digital, estos parámetros se designan, respectivamente, como **1** (uno) o **alto** y **0** (cero) o **bajo**. En la **figura 10.2** se comparan estos conceptos. En la **figura 10.2a** se muestra un ejemplo sencillo de circuito eléctrico de naturaleza digital. En este caso, el interruptor S1 actúa como un componente **digital** porque sólo puede estar abierto (**0**) o cerrado (**1**). Asimismo, el voltaje



**Figura 10.1.** Señales análogas y señales digitales. Una señal análoga varía en forma continua sobre una gama infinita de valores, mientras que una digital lo hace en pasos discretos



**Figura 10.2.** Comparación entre un circuito análogo y un circuito digital

aplicado a la lámpara ( $R_L$ ) es una señal digital porque sólo puede ser  $0V$  (**0**) cuando S1 está abierto, ó  $+9V$  (**1**) cuando S1 está cerrado. Una asignación similar de valores lógicos puede ser hecha a la corriente  $I$  a través del circuito (presente, ausente) o al estado de la lámpara (encendida o apagada).

En la **figura 10.2b** se muestra un ejemplo sencillo de circuito análogo. En este caso, el interruptor ha sido sustituido por un potenciómetro (P1), el cual actúa como un componente **análogo** cuya resistencia puede adoptar un número infinito de valores entre un mínimo y un máximo. Del mismo modo, el voltaje, la corriente y el nivel de brillo de la lámpara son cantidades análogas.

En la terminología digital, los niveles o estados lógicos **0** y **1** se denominan comúnmente **bits**. Un *bit* o un grupo de *bits* pueden representar muchos niveles diferentes de información en los circuitos y sistemas digitales, incluyendo números, datos y decisiones. Los números, en particular, se representan y manipulan utilizando el **sistema binario** o de **base 2**; los datos (letras, instrucciones, música, etc.), utilizando diversos tipos de **códigos**; y las decisiones, utilizando las reglas de la **lógica digital**, agrupadas bajo lo que se conoce como el **álgebra Booleana**.

## Conceptos básicos de lógica digital y álgebra Booleana

Los unos (1) y ceros (0) utilizados para representar números y construir códigos pueden también ser utilizados para representar conceptos lógicos del tipo falso/verdadero, si/no, abierto/cerrado, alto/bajo, arriba/abajo, etc., así como para tomar decisiones del tipo "**si, entonces**", es decir, **si** una serie de cir-

cunstancias particulares ocurre, **entonces** una acción particular resulta. En el caso del circuito de la **figura 10.2a**, por ejemplo, si el interruptor S1 está cerrado, **entonces** la lámpara RL ilumina. En otras palabras, si S1 es **1**, entonces RL es **1**.

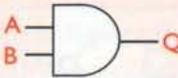
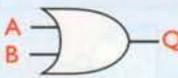
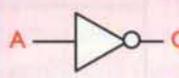
El estudio de estos procesos de razonamiento constituye el núcleo de una disciplina filosófica conocida como **lógica**, una de cuyas ramas más importantes es el **álgebra Booleana**, la cual utiliza únicamente conceptos del tipo falso/verdadero. La aplicación de este método de razonamiento matemático al análisis y diseño de circuitos digitales, recibe el nombre de **lógica digital**. El álgebra Booleana se denomina así en honor de su creador, el matemático inglés **Georg Simon Boole** (1815-1846).

La expresión verbal de un juicio acerca de algo que puede ser falso o verdadero, por ejemplo, "está lloviendo", se denomina en lógica pura una **proposición** y corresponde en el marco del álgebra Booleana a una **variable lógica**. Las variables lógicas se identifican generalmente mediante caracteres alfabéticos o alfanuméricos (A, D3, CLR, etc.). En electrónica digital, las variables lógicas se utilizan para representar señales o condiciones que sólo pueden adoptar uno de dos estados posibles (**0=falso**, **1=verdadero**). Las variables lógicas y sus relaciones se representan, manipulan y expresan mediante tablas de la verdad, ecuaciones lógicas, símbolos lógicos y operaciones lógicas.

Una **tabla de la verdad** es una representación gráfica que contiene todas las posibles combinaciones de estados de las variables de entrada y los estados de la variable de salida resultantes de cada una. Una **ecuación lógica** es una expresión matemática que describe analíticamente la relación de cada variable de salida con las variables de entrada. Las ecuaciones lógicas se representan gráficamente mediante la combinación de uno o más **símbolos lógicos**, cada uno de los cuales describe una **operación lógica** entre un cierto número de variables de entrada.

Las operaciones lógicas básicas del álgebra Booleana son: el **producto**, la **suma** y el **complemento o inversión**, denominadas respectivamente operaciones **AND**, **OR** y **NOT**. En la **figura 10.3** se muestran los símbolos, las ecuaciones y las tablas de la verdad que describen estas operaciones fundamentales. En adición a estas operaciones básicas existen otras auxiliares, derivadas de las primeras, que se utilizan con frecuencia en el diseño de circuitos digitales. Las más importantes son la AND negada (**NAND**), la OR negada (**NOR**), la OR exclusiva (**XOR**), la OR exclusiva negada (**XNOR**) y la NOT negada (**YES**). En la **figura 10.4** se describen estas operaciones auxiliares.

Tanto las operaciones fundamentales como las derivadas son ejecutadas en la práctica por circuitos electrónicos especializados llamados **compuertas**. Las compuertas son los bloques constructivos básicos de todos los circuitos y sistemas digitales. Las compuertas, así como muchas funciones especializadas construidas a base de las mismas (*flip-flops*, decodificadores, contadores, memorias, microprocesadores, etc.), están corrientemente disponibles como circuitos integrados digitales. Dependiendo del número de compuertas utilizadas en su construcción, estos últimos pueden ser de pequeña, mediada, alta, o muy alta escala de integración.

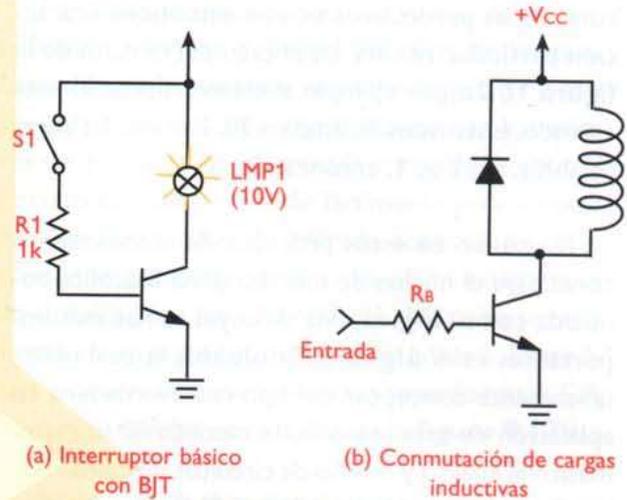
Nombre	AND	OR	NOT																																				
Símbolo																																							
Ecuación lógica	$Q = A \cdot B = AB$	$Q = A + B$	$Q = \bar{A}$																																				
Leíase como	"Q es igual a A y B"	"Q es igual a A o B"	"Q es igual a A negado"																																				
Tabla de la verdad	<table border="1"> <thead> <tr><th>A</th><th>B</th><th>Q</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>	A	B	Q	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	<table border="1"> <thead> <tr><th>A</th><th>B</th><th>Q</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>	A	B	Q	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	<table border="1"> <thead> <tr><th>A</th><th>Q</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	A	Q	0	1	1	0
A	B	Q																																					
0	0	0																																					
0	1	0																																					
1	0	0																																					
1	1	1																																					
A	B	Q																																					
0	0	0																																					
0	1	1																																					
1	0	1																																					
1	1	1																																					
A	Q																																						
0	1																																						
1	0																																						

**Figura 10.3.** Operaciones lógicas básicas. Las operaciones AND y OR son aplicables a dos o más variables de entrada. La operación NOT solamente está definida para una variable de entrada.

## El transistor como interruptor

Los circuitos digitales están basados en el uso de transistores, bipolares o de efecto de campo, operando como interruptores, es decir, entre el corte y la saturación. En la **figura 10.5a** se muestra como ejemplo la estructura de un interruptor básico con transistor NPN. En este caso, cuando se abre el interruptor S1, no hay corriente de base y por tanto no hay corriente de colector. Como resultado, el transistor está cortado (*off*) y la lámpara permanece apagada. Asimismo, cuando el interruptor se cierra, circulan una corriente de base (9,4mA) y una corriente de colector (100mA) y la lámpara se ilumina. En el primer caso, el punto de trabajo coincide con el de corte, mientras que en el segundo coincide con el de saturación.

Para la conmutación de cargas inductivas, por ejemplo, relés y motores, el transistor debe ser protegido mediante un diodo inversamente polarizado, conectado en paralelo con la carga, como se indica en la **figura 10.5b**. Sin el diodo, la corriente almacenada en la bobina tendería a seguir circulando a través del transistor, con lo cual se produciría un voltaje muy alto entre el colector y el emisor del mismo, capaz de destruirlo. El diodo evita que esto suceda, proporcionando un camino de baja resistencia para la circulación de esta corriente.



**Figura 10.5.** Interruptores con transistores bipolares

En la **figura 10.6a** se muestra el circuito básico de un interruptor con MOSFET. En este caso, con el interruptor en la posición superior, la compuerta recibe un voltaje alto (10V) y el MOSFET conduce, energizando la carga. Asimismo, con el interruptor en la posición inferior, la compuerta recibe un voltaje bajo (0V) y el MOSFET deja de conducir, desenergizando la carga. En el primer caso, el transistor está en el estado de saturación, mientras que en el segundo está en el estado de corte.

Los MOSFET posibilitan también la conmutación de señales analógicas, lo cual no es posible con transistores BJT. Esta situación se ilustra en la **figura 10.6b**.

Nombre	NAND	NOR	XOR	XNOR	YES																																																																		
Símbolo																																																																							
Ecuación lógica	$Q = \overline{A \cdot B}$	$Q = \overline{A + B}$	$Q = A \oplus B = \overline{A}B + A\overline{B}$	$Q = \overline{A \oplus B} = \overline{\overline{A}B + A\overline{B}}$	$Q = A = \overline{\overline{A}}$																																																																		
Leáse como	"Q es la negación de A y B"	"Q es la negación de A o B"	"Q es A o exclusiva B"	"Q es la negación de A o B exclusiva"	"Q es igual a A o a la doble negación de A"																																																																		
Tabla de la verdad	<table border="1"> <tr><td>A</td><td>B</td><td>Q</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> </table>	A	B	Q	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	<table border="1"> <tr><td>A</td><td>B</td><td>Q</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> </table>	A	B	Q	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	<table border="1"> <tr><td>A</td><td>B</td><td>Q</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> </table>	A	B	Q	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	<table border="1"> <tr><td>A</td><td>B</td><td>Q</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	A	B	Q	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1	<table border="1"> <tr><td>A</td><td>Q</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	A	Q	0	0	1	1
A	B	Q																																																																					
0	0	1																																																																					
0	1	1																																																																					
1	0	1																																																																					
1	1	0																																																																					
A	B	Q																																																																					
0	0	1																																																																					
0	1	0																																																																					
1	0	0																																																																					
1	1	0																																																																					
A	B	Q																																																																					
0	0	0																																																																					
0	1	1																																																																					
1	0	1																																																																					
1	1	0																																																																					
A	B	Q																																																																					
0	0	1																																																																					
0	1	0																																																																					
1	0	0																																																																					
1	1	1																																																																					
A	Q																																																																						
0	0																																																																						
1	1																																																																						

**Figura 10.4.** Operaciones lógicas derivadas. Las operaciones NAND, NOR, XOR y XNOR se aplican a dos o más variables, y la YES a una sola variable.