



## Capítulo cinco **Lógica digital**

### Objetivos

Después de estudiar este capítulo, el lector debe ser capaz de:

- Reconocer los símbolos de las compuertas lógicas, AND, OR, NOT, NAND, NOR y XOR y utilizar tales compuertas en aplicaciones, reconociendo el significado de familias lógicas.
- Explicar cómo los flip-flops (biestables) SR, JK y D pueden utilizarse en sistemas de control.
- Explicar la operación de decodificadores y el temporizador 555.

### 5.1

### Lógica digital

Muchos sistemas de control tienen el propósito de activar o desactivar eventos, cuando se cumplen ciertas condiciones. Por ejemplo, en la lavadora doméstica el calentador sólo se enciende cuando la tina tiene agua y el nivel es el correcto. Ese tipo de control usa señales *digitales* donde sólo hay dos niveles de señal posibles. Los circuitos digitales son la base de las computadoras digitales y de los sistemas controlados con microprocesadores.

Con el **control digital**, por ejemplo, en el caso de la lavadora, la entrada de agua se activa cuando la puerta está cerrada y se alcanza determinado momento del ciclo de lavado. Hay dos señales de entrada que pueden ser sí o no, y una señal de salida que puede ser sí o no. Aquí, el controlador se programa de manera que sólo produzca una salida de sí, si ambas señales de entrada son sí, es decir si las entradas  $A$  y  $B$  son 1, entonces la salida será 1. Se dice que la operación anterior está controlada por una **compuerta lógica**, en este ejemplo es una compuerta AND. Muchas máquinas y procesos se controlan de esta manera. El término **lógica combinacional** se refiere a la combinación de dos o más compuertas lógicas básicas para obtener una función requerida. Por ejemplo, puede requerirse una alarma al encender un automóvil con una puerta abierta, o si las luces interiores están encendidas y la puerta del conductor se abre. La lógica combinacional depende sólo de los valores de las entradas en un determinado instante de tiempo.

Además de estudiar el tema de lógica combinacional, en este capítulo también se tratará la **lógica secuencial**. Estos circuitos digitales se usan para controlar un conjunto de eventos en una secuencia específica dictada por un reloj de control o por señales de activación-desactivación. Éstos son los circuitos de lógica combinados con memoria. De esta manera, el temporizador o historia secuencial de las señales de entrada juegan una parte en la determinación de la salida.

## 5.2

## Compuertas lógicas

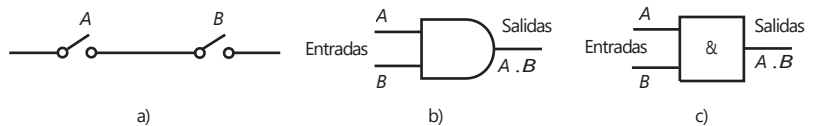
Las compuertas lógicas son los bloques de construcción básicos para los circuitos electrónicos digitales.

## 5.2.1 Compuerta AND

Suponga que tiene una compuerta que ofrece una salida alta sólo cuando la entrada  $A$  y la entrada  $B$  son altas; para todas las otras condiciones ésta ofrece una salida baja. Ésta es una compuerta lógica AND. Podemos visualizar la compuerta AND como un circuito eléctrico que incluye dos interruptores en series (Figura 5.1a). Sólo cuando un interruptor  $A$  y uno  $B$  están cerrados hay una corriente. Se han utilizado diferentes juegos de símbolos de circuitos estándar para compuertas lógicas, cuya forma principal es originada en Estados Unidos. Sin embargo, ahora se está desarrollando una forma estándar internacional (IEEE/ANSI), ésta le quita la forma característica y utiliza un rectángulo con la función lógica escrita adentro. En la Figura 5.1b) se muestra la forma estadounidense del símbolo empleado para una compuerta AND y c) muestra la nueva forma estandarizada, el símbolo  $\&$  indica AND. Ambas formas se utilizarán en este libro. Como se ilustra en la figura, se puede expresar la relación entre las entradas y las salidas y una compuerta AND en la forma de una ecuación, conocida como **ecuación booleana** (apéndice C). La ecuación booleana para la compuerta AND se escribe así:

$$A \cdot B = Q$$

Figura 5.1 Compuerta AND:  
a) representada por interruptores,  
b) símbolos estadounidenses, y  
c) nuevos símbolos estandarizados.



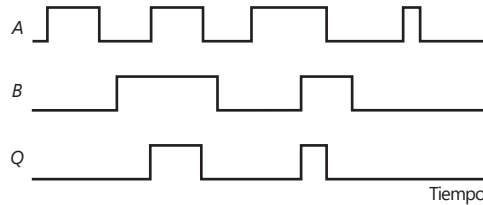
Un ejemplo de una compuerta AND es el sistema de control interbloqueo para una máquina herramienta con el guardia de seguridad en su lugar; una señal 1 y la potencia, encendida, con señal 1, entonces se da una salida, una señal 1, y la máquina funciona. Otro ejemplo es una alarma de intrusión en que ofrece una salida, el sonido de alarma, al encenderse ésta y cuando se abre una puerta para activar un sensor.

La relación entre las entradas para una compuerta lógica y las salidas puede tabularse en una forma conocida como **tabla de verdad**. Esto especifica las relaciones entre las entradas y salidas. De esta manera, para una compuerta AND con entradas  $A$  y  $B$  y una entrada sencilla  $Q$  tendremos una salida 1 cuando y sólo cuando,  $A = 1$  y  $B = 1$ . Todas las otras combinaciones de  $A$  y  $B$  generarán una salida 0. Por lo tanto, se puede escribir la tabla de verdad como sigue:

Entradas		Salidas $Q$
$A$	$B$	
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Imagine qué sucede cuando se tienen dos entradas digitales que son funciones de tiempo, como en la Figura 5.2. A esta figura se le refiere como un diagrama de tiempos de compuerta AND. Sólo habrá una salida desde la compuerta AND cuando cualquiera de las entradas es alta y por lo tanto es como se muestra en la siguiente figura.

Figura 5.2 Compuerta AND.

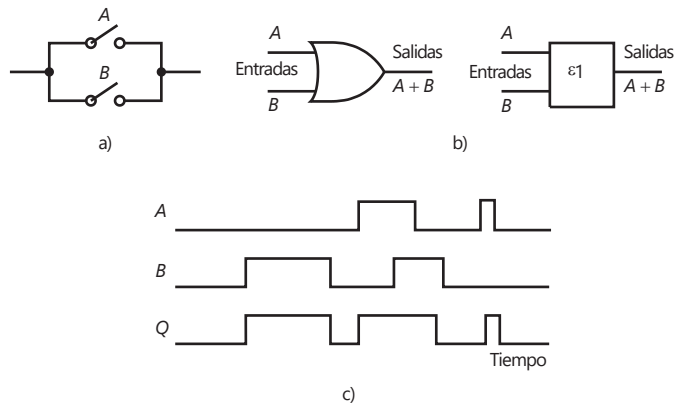


**5.2.2 Compuerta OR**

La compuerta OR produce una salida de 1 cuando las entradas A o B son 1. Se puede visualizar esta compuerta como un circuito eléctrico en el que hay dos interruptores en paralelo (Figura 5.3a). Cuando alguno de los interruptores A o B está cerrado, entonces circula la corriente. En las compuertas OR puede haber más de dos entradas. La tabla de verdad de esta compuerta es:

Entradas		Salidas
A	B	Q
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Figura 5.3 Compuerta OR:  
a) representación por interruptores, b) símbolos, c) diagramas de tiempos.



La ecuación booleana de la compuerta OR se puede expresar como:

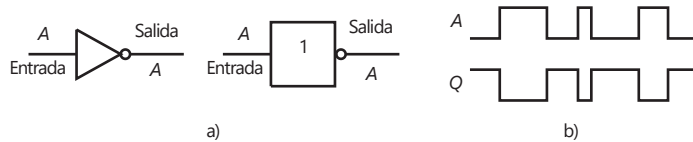
$$A + B = Q$$

Los símbolos de una compuerta OR se muestran en la Figura 5.3b); usa un signo mayor que o igual a 1 para representar esta compuerta dado que la función OR es verdadera si por lo menos una de las entradas es verdadera. La Figura 5.3c) muestra un diagrama de tiempos.

### 5.2.3 Compuerta NOT

La compuerta NOT sólo tiene una entrada y una salida: la salida es 1 cuando la entrada es 0 y es 0 cuando la entrada es 1. La compuerta NOT produce una salida igual al inverso de la entrada y se conoce como **inversor**. La Figura 5.4a) muestra los símbolos que se usan para una compuerta NOT. El 1 que representa a NOT en realidad simboliza la identidad lógica, por ejemplo no operación, y la inversión se representa por el círculo en la salida. Así, si se tiene una entrada digital que varía con el tiempo, como en la Figura 5.4b), la variación de salida con el tiempo es a la inversa.

Figura 5.4 Compuerta NOT.



La tabla de verdad de la compuerta NOT es:

Entrada A	Salida Q
0	1
1	0

La ecuación booleana que describe la compuerta NOT es:

$$\bar{A} = Q$$

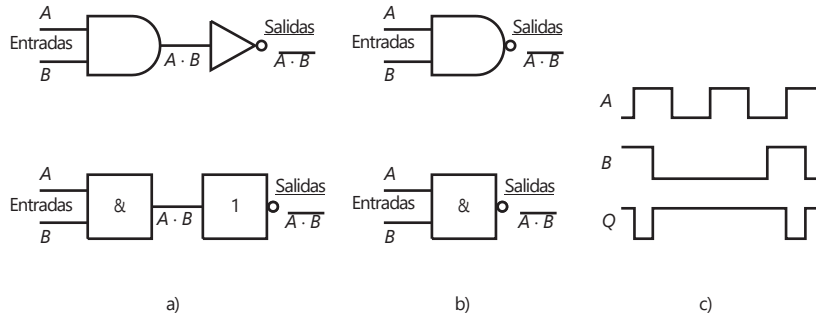
La barra sobre la letra indica que se utiliza la inversa o complemento; por lo tanto, la barra sobre la A indica que la salida Q es igual al inverso del valor A.

### 5.2.4 Compuerta NAND

La compuerta NAND se puede considerar como una combinación de una compuerta AND seguida de una compuerta NOT (Figura 5.5a). Así, cuando la entrada A es 1 y la B es 1, la salida es 0; las demás entradas dan una salida de 1.

La compuerta NAND corresponde en forma exacta a la tabla de verdad de la compuerta AND con las salidas invertidas. Otra manera de considerar esta compuerta es como una compuerta AND en cuyas entradas se conecta una compuerta NOT para invertir las entradas antes de que lleguen a la compuerta AND. La Figura 5.5b) muestra los símbolos usados para la compuerta

Figura 5.5 Compuerta NAND.



NAND, los cuales corresponden al símbolo de la compuerta AND seguido del círculo que indica la inversión. La siguiente es la tabla de verdad:

Entradas		Salidas Q
A	B	
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

La ecuación booleana que describe la compuerta NAND es

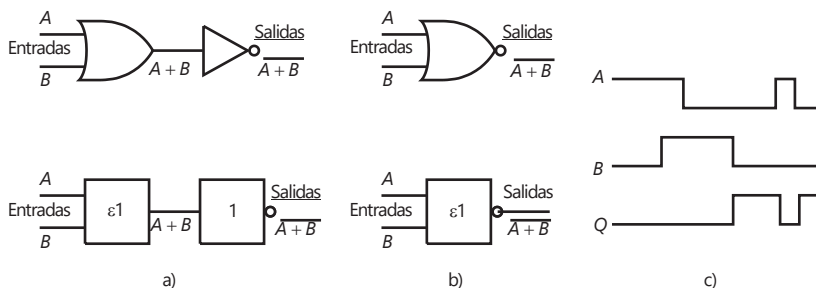
$$\overline{A \cdot B} = Q$$

La Figura 5.5c) muestra la salida que ocurre para una compuerta NAND cuando sus dos entradas son señales digitales que varían con el tiempo. Sólo hay una salida baja cuando ambas entradas son altas.

### 5.2.5 Compuerta NOR

La compuerta NOR se puede considerar como una combinación de una compuerta OR seguida de una compuerta NOT (Figura 5.6a). Cuando la entrada A o la entrada B es 1, se produce una salida de 0. Se trata de la misma compuerta OR, pero con las salidas invertidas. Otra manera de interpretar esta compuerta es como una compuerta OR en cuyas entradas se conectan compuertas NOT para invertir la entrada antes de que llegue a la compuerta OR. La Figura 5.6b) muestra los símbolos que se usan para la compuerta NOR; es el símbolo OR seguido por el círculo para indicar la inversión.

Figura 5.6 Compuerta NOR.



La ecuación booleana para la compuerta NOR es

$$\overline{A + B} = Q$$

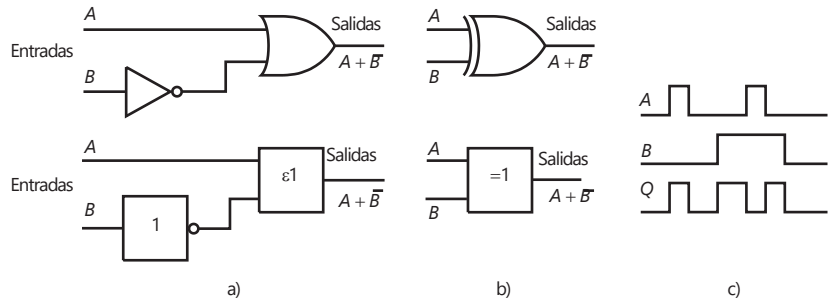
La tabla de verdad para la compuerta NOR y la Figura 5.6c) muestra su diagrama de tiempos:

Entradas		Salidas
A	B	Q
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

### 5.2.6 Compuerta XOR

La compuerta EXCLUSIVE-OR (XOR) se puede considerar como una compuerta OR con una compuerta NOT aplicada a una de las entradas para invertirla antes de que llegue a la compuerta OR (Figura 5.7a). También se puede considerar como una compuerta AND con una de sus entradas conectada a una compuerta NOT para invertirla antes de que llegue a la compuerta AND. Los símbolos se muestran en la Figura 5.7b); el = 1 indica que la salida es verdadera si sólo una entrada es verdadera. La siguiente es la tabla de verdad y la Figura 5.7c) muestra un diagrama de tiempos:

Figura 5.7 Compuerta XOR.

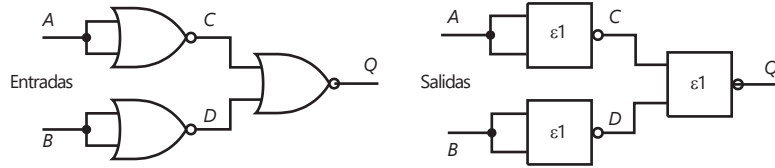


Entradas		Salidas
A	B	Q
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

### 5.2.7 Combinación de compuertas

En apariencia, para construir sistemas lógicos se requiere una variedad de compuertas. Sin embargo, como se muestra a continuación es posible construir todo tipo de compuertas a partir de una sola. Considere la combinación de las tres compuertas NOR que muestra la Figura 5.8.

Figura 5.8 Tres compuertas NOR.



La tabla de verdad con sus salidas intermedias y finales es la siguiente:

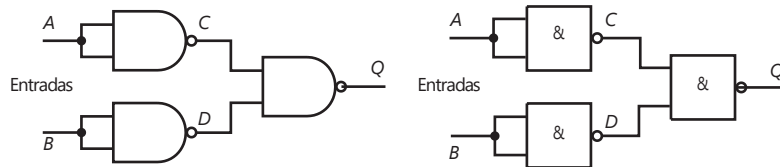
A	B	C	D	Q
0	0	1	1	0
0	1	1	0	0
1	0	0	1	0
1	1	0	0	1

El resultado es el mismo que el de una compuerta AND. Si a continuación de este conjunto de compuertas se coloca una compuerta NOT, se obtiene una tabla de verdad igual a la de una compuerta NAND.

La Figura 5.9 muestra una combinación de tres compuertas NAND. Su tabla de verdad, con las salidas intermedias y finales, es la siguiente:

A	B	C	D	Q
0	0	1	1	0
0	1	1	0	1
1	0	0	1	1
1	1	0	0	1

Figura 5.9 Tres compuertas NAND.

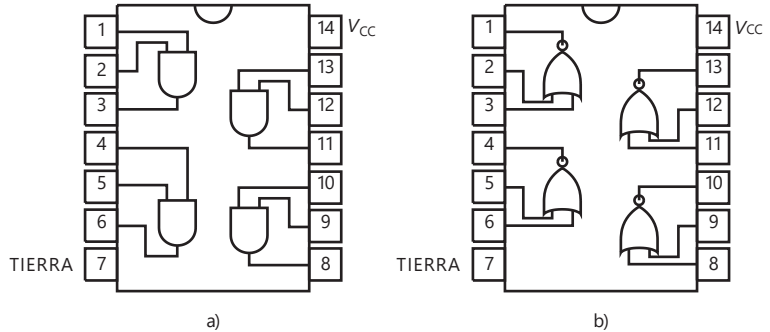


El resultado obtenido es el de una compuerta OR. Si se siguiera este conjunto por una compuerta NOT, se obtendría una tabla de verdad igual a la de una compuerta NOR.

Los dos ejemplos anteriores de combinaciones de compuertas muestran cómo usar un tipo de compuerta, NOR o NAND, para reemplazar otras compuertas, siempre y cuando se utilice más de una. También es posible combinar compuertas para obtener circuitos complejos de compuertas así como circuitos secuenciales.

Existen compuertas lógicas en forma de circuito integrados. Los fabricantes han estandarizado la numeración de sus configuraciones para que los números de sus partes básicas sean iguales sin importar el fabricante. Por ejemplo, la Figura 5.10a) muestra las compuertas con las que cuenta el circuito integrado 7408; tiene cuatro compuertas AND de dos entradas y viene en una base de 14 terminales. La alimentación se conecta en las terminales 7 y 14 las cuales alimentan el voltaje de las cuatro compuertas AND. Para indicar en

Figura 5.10 Circuitos integrados: a) 7408, b) 7402.



cuál de los extremos de la base se encuentra la terminal 1, se hace una muesca entre las terminales 1 y 14. El circuito integrado 7411 tiene tres compuertas AND y cada una tiene tres entradas; el circuito integrado 7421 tiene dos compuertas AND cada una con cuatro entradas. En la Figura 5.10b) se muestra el circuito integrado 7402. Éste tiene cuatro compuertas NOR de dos entradas cada una, en una base de 14 terminales; la alimentación se conecta en las terminales 7 y 14. El circuito integrado 7427 tiene tres compuertas, cada una con tres entradas; el circuito integrado 7425 tiene dos compuertas, cada una con cuatro entradas.

Para conocer cómo la algebra booleana, las técnicas como la ley de De Morgan y los mapas de Karnaugh se pueden utilizar para generar las funciones lógicas requeridas desde las compuertas lógicas, vea el apéndice C.

### 5.2.8 Familias lógicas y circuitos integrados

Para poder implementar diseños lógicos digitales se requiere entender qué significan las familias lógicas y sus diferentes principios de operación. Los circuitos integrados hechos con la misma tecnología y características eléctricas comprenden una **familia lógica**. Entre las familias más comunes están transistor-transistor lógico (TTL), semiconductor complementario metal-óxido (CMOS) y el emisor acoplado lógico (ECL). Los parámetros generales son:

- 1 **Nivel lógico**, es decir, el rango de niveles de voltaje que puede corresponder a los estados binarios 1 y 0. Para la serie estándar 74XX TTL, el voltaje garantizado para registrarlo como binario 0 está entre 0 y 0.4 V y para el binario 1 es entre 2.4 V y 5.0 V. Para el CMOS los niveles dependen del voltaje alimentado  $V_{DD}$  que se emplee, el cual puede ser desde +3 V hasta +15 V y el voltaje máximo para el lógico 1 es de  $0.3 V_{DD}$  en tanto que el mínimo para el lógico 1 es  $0.7 V_{DD}$ .
- 2 **Inmunidad contra el ruido o margen de ruido**, es decir la capacidad del circuito de tolerar ruido sin ocasionar cambios espurios en el voltaje de salida. Para la serie estándar 74XX TTL, el margen de ruido es 0.4 V. Por lo tanto 0.4 V es el margen que se puede aceptar en las entradas lógico 0 y lógico 1 y que lo registrarán como 0 y como 1. Para el CMOS el margen de ruido depende del voltaje alimentado y es de  $0.3 V_{DD}$ .
- 3 **Apertura**, es decir la cantidad de entradas de compuerta que puede controlar una salida de compuerta estándar al tiempo que conserva los niveles LOW o HIGH deseados. Esto se determina por cuánta corriente puede abastecer una compuerta y cuánta se necesita para controlar una. Para una compuerta TTL estándar la apertura es de 10, para el CMOS es de 50 y de 25 para el ECL. Si hay más compuertas conectadas a la compuerta controladora, entonces no abastecerá la corriente suficiente para controlarlas.



- 4 **Abastecimiento de corriente o acción de disminución de corriente**, es decir cómo fluye la corriente entre la salida de una compuerta lógica y la entrada de otra. Para que una compuerta conduzca a otra con abastecimiento de corriente, la compuerta controladora en alta suministra una corriente para la entrada de la siguiente compuerta. Pero con la disminución de corriente la compuerta controladora en baja recibe una corriente de vuelta desde la compuerta controladora. Las compuertas TTL operan con este tipo de corriente.
- 5 **Tiempo de retardo de propagación**, es decir qué tan pronto responde un circuito digital ante un cambio a nivel de entrada. Por lo común las compuertas TTL se retardan de 2 a 40 ns, lo que hace por lo general alrededor de 5 a 10 veces más rápido que las compuertas CMOS, pero más lento que las compuertas ECL, las cuales suelen tener retardos de propagación de 2 ns.
- 6 **Consumo de potencia, es decir** la cantidad de potencia que la compuerta lógica consumirá a partir del abastecimiento de potencia. La TTL consume unos 10 mW por compuerta en tanto que el CMOS no consume potencia a menos que esté en punto de interruptor. El ECL consume de 15 a 60 mW por compuerta.

Los principales criterios implicados en la determinación de qué familia lógica utilizar son el retardo de propagación y el consumo de potencia. La ventaja mayor del CMOS sobre el TTL es el menor consumo de potencia, lo que lo hace ideal para equipos operados por baterías. Es posible que circuitos integrados por familias lógicas diferentes se puedan conectar entre sí, pero se deben utilizar técnicas especiales de interconexión.

La familia TTL se utiliza ampliamente y se ha de identificar como la serie 74XX. Hay multiplicidad de formas; una de las típicas, el TTL, estándar es el 7400 cuya disipación de potencia es de 10 mW y un retardo de propagación de 10 ns. El TTL Schottky de baja potencia (LS) es el 74LS00 con una disipación de potencia de 2 mW y el mismo tiempo de retardo de propagación. El TTL Schottky de baja potencia avanzado (ALS) es el 74ALS00 y es más rápido y disipa inclusive potencias más bajas; el retardo de propagación llega a 4 ns y la disipación de potencia es de 1 mW. El rápido TTL (F) es el 74F00 y tiene un retardo de propagación de 3 ns y una disipación de potencia de 6 mW.

La familia del CMOS incluye la serie de 4000, la cual tenía la ventaja de la disipación de baja potencia sobre la serie TTS, pero por desgracia era muy lenta. La serie 40H00 era más rápida pero todavía más lenta que TTL (LS). La serie 74C00 se desarrolló para que fuera de clavija compatible con la familia TTL, utilizando el mismo sistema de numeración pero empezando con 74C. Aun cuando tenía una ventaja de potencia sobre la familia TTL, aún así era más lenta. Las 74HC00 y 74HCT00 son más rápidas y sus velocidades son comparables con las de la serie TTL (LS).

## 5.3

### Aplicaciones de las compuertas lógicas

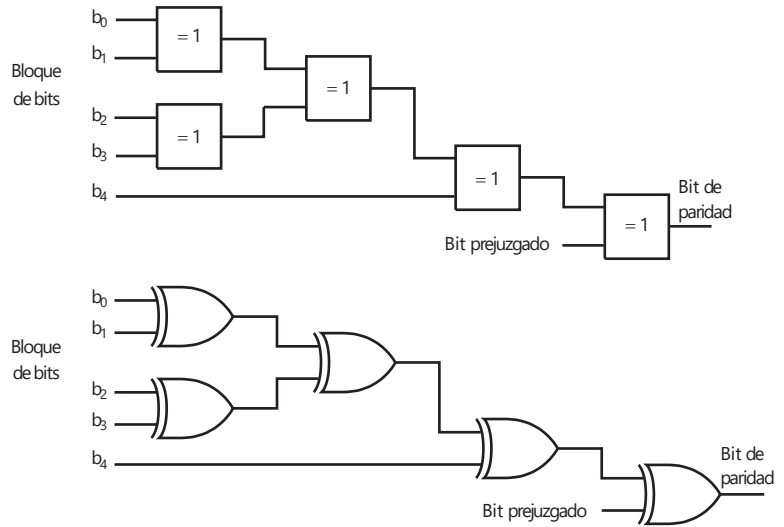
Los siguientes son algunos ejemplos de aplicaciones sencillas de las compuertas lógicas.

#### 5.3.1 Generadores de paridad

En el capítulo anterior se mostró cómo se usan los bits de paridad para detectar errores. Se añade un solo bit a cada bloque de código para forzar el número de unidades en el bloque, incluyendo el bit de paridad, y obtener un número impar, en caso de utilizar la paridad impar o un número par, si se usa la paridad par.

La Figura 5.11 muestra un circuito con compuertas lógicas que se usa para determinar y agregar el bit de paridad apropiado. El sistema utiliza compuertas

Figura 5.11 Generador de bits de paridad.

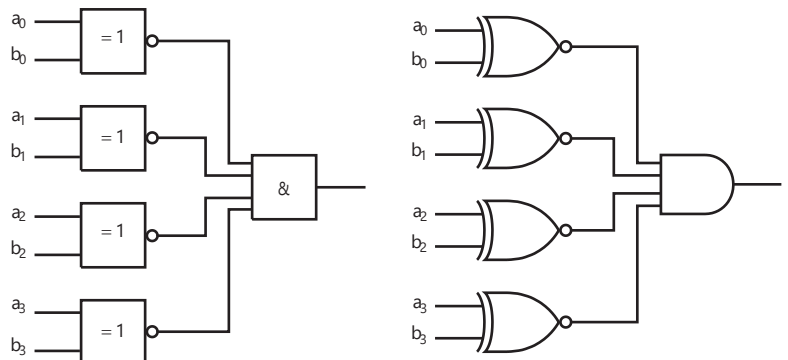


XOR; en este caso, si todas las entradas son 0, o todas son 1, la salida es 0; y si las entradas no son iguales, la salida es 1. Se verifican los pares de bits se produce una salida 1 si no son iguales. Si se requiere paridad impar, el bit preajuzgado es 0; si se usa paridad par es 1. El bit preajuzgado que sea adecuado se incorpora a la señal para su transmisión. Este mismo circuito se utiliza para verificar la paridad en el receptor, siendo la salida final igual a 1 cuando hay un error. Estos circuitos están disponibles como circuitos integrados.

### 5.3.2 Comparador digital

Un comparador digital se usa para comparar dos palabras digitales con el objetivo de saber si son exactamente iguales. Ambas se comparan bit por bit y si son iguales el resultado es 1. Para comparar la igualdad de dos bits se puede usar una compuerta XOR; si ambos bits son 0 o 1, la salida es 0; si no son iguales, la salida es 1. Para obtener una salida 1 cuando ambos bits son iguales hay que añadir una compuerta NOT; esta combinación de XOR y NOT se conoce como compuerta XNOR. Para comparar cada par de bits en dos palabras se necesita una compuerta XNOR. Si los pares consisten en los mismos bits, la salida de cada compuerta XNOR es 1. Podemos utilizar una compuerta AND para obtener una salida 1 cuando en todas las salidas de las compuertas XNOR son unos. La Figura 5.12 muestra el sistema correspondiente.

Figura 5.12 Comparador.

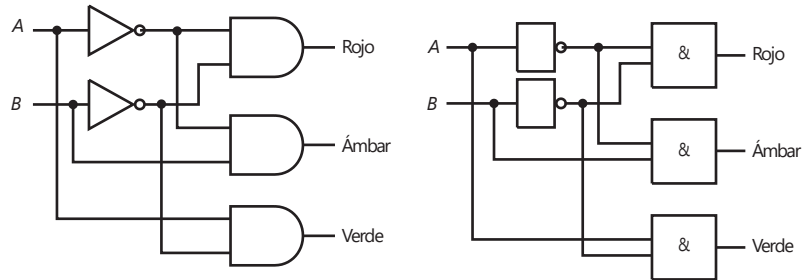


Los comparadores digitales están disponibles como circuitos integrados y en general no sólo son capaces de determinar sólo si dos palabras son iguales, sino también cuál de ellas es la mayor. Por ejemplo, el comparador de 4 bits 7485 compara dos palabras de 4 bits,  $A$  y  $B$ , su terminal 5 produce una salida 1 de la terminal 6 si  $A$  es igual a  $B$  y una salida 1 de la terminal 7 si  $A$  es menor que  $B$ .

### 5.3.3 Codificador

La Figura 5.13 muestra un sistema sencillo mediante el cual un controlador puede enviar una señal digital codificada para un conjunto de semáforos de manera que el código determine qué luz, roja, ámbar o verde cambiará. Para iluminar la luz roja se podría utilizar la señal transmitida  $A = 0, B = 0$ , para la luz ámbar  $A = 0, B = 1$  y para la luz verde  $A = 1, B = 0$ . Se pueden cambiar las luces empleando esos códigos al usar tres compuertas AND y dos compuertas NOT.

Figura 5.13 Semáforos.



### 5.3.4 Convertidor de código

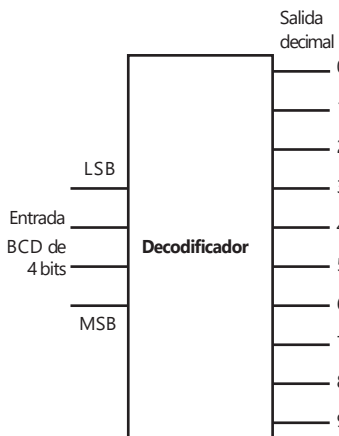
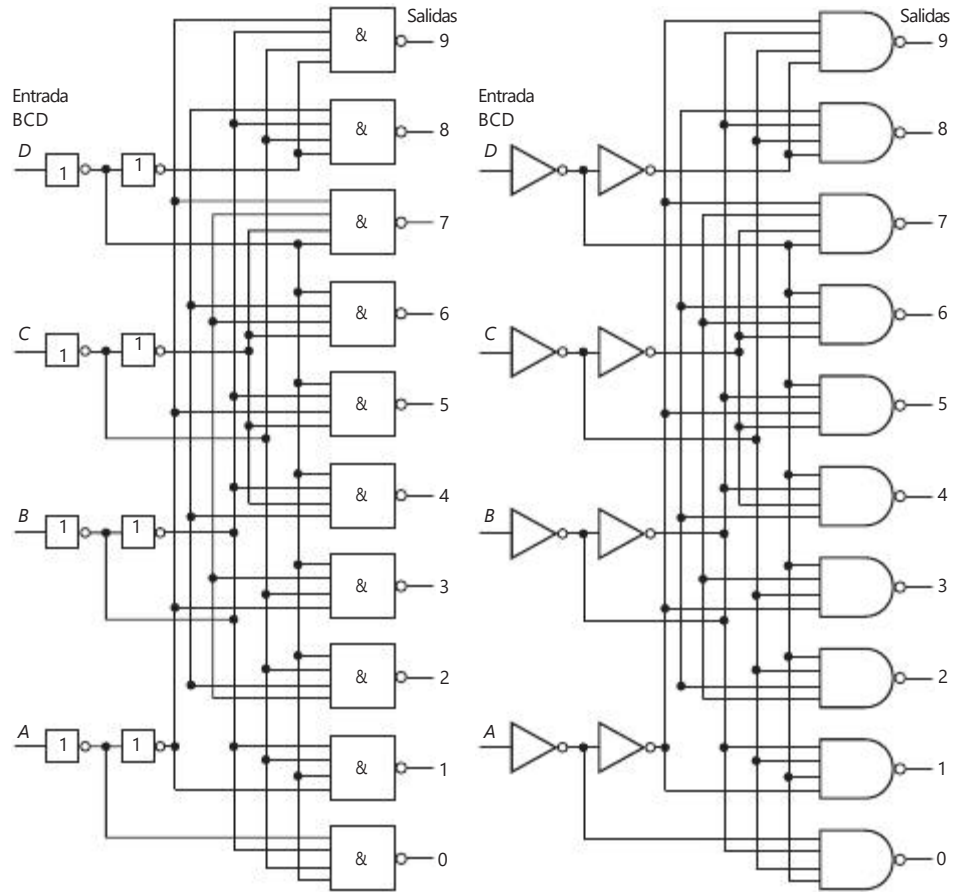


Figura 5.14 Decodificador.

En muchas aplicaciones es necesario cambiar datos de un tipo de código a otro. Por ejemplo, la salida de un microprocesador puede ser BCD (código binario decimal) y es necesario transformarla en un código que permita su presentación en un display de siete segmentos. El término **decodificación de datos** se refiere al proceso de conversión de un grupo de código, por ejemplo, BCD, binario, hexadecimal, en una salida activa individual que represente ese grupo. Un decodificador tiene  $n$  líneas de entrada binarias para la entrada codificada de una palabra de  $n$  bits y cuenta con  $m$  líneas de salida de manera que sólo una línea se activa para una posible combinación de entradas; por ejemplo, sólo una línea de salida proporciona una salida para un código de entrada de palabra. Por ejemplo, un decodificador BCD a decimal tiene un código de entrada de 4 bits y 10 líneas de salida, de manera que una particular entrada BCD causará la activación exclusiva de una de las líneas de salida, de esta manera se indica un número decimal particular por cada línea de salida correspondiente a un número decimal (Figura 5.14).

Entonces, en general, un **decodificador** es un dispositivo que ve sus entradas y determina qué número está ahí, y activa la salida que corresponde a ese número. Los decodificadores se usan ampliamente en circuitos con microprocesadores. Los decodificadores pueden tener una salida activa alta, y las inactivas bajas; o bien, la salida activa baja y las inactivas altas. En las salidas activas altas, el decodificador se construye utilizando compuertas AND, mientras que para salidas activas bajas se utilizan compuertas NAND. La Figura 5.15 muestra la configuración de un decodificador BCD a decimal para una salida activa



Entradas				Salidas									
A	B	C	D	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
0	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Figura 5.15 Decodificador BCD a decimal: 1 = ALTO, 0 = BAJO.

baja y se presenta la tabla de verdad resultante. Este tipo de decodificador está disponible como circuito integrado; por ejemplo, el 74LS145.

Uno de los decodificadores que más se utiliza es el BCD a siete, por ejemplo, el 74LS244, para tomar entrada BCD de 4 bits y producir una salida que alimente un display de siete segmentos.

El término **decodificador de 3 líneas a 8 líneas** se utiliza cuando un decodificador tiene tres líneas de entrada y ocho de salida. Éste toma el número binario de 3 bits y activa una de las ocho salidas que corresponden a ese número. En la Figura 5.16 se muestra cómo se puede implementar dicho decodificador, a partir de compuertas lógicas y su tabla de verdad.

Algunos decodificadores cuentan con una o más entradas HABILITADAS que se usan para controlar la operación del decodificador. De esta manera, con la línea de HABILITACIÓN ALTA el decodificador funcionará en su forma

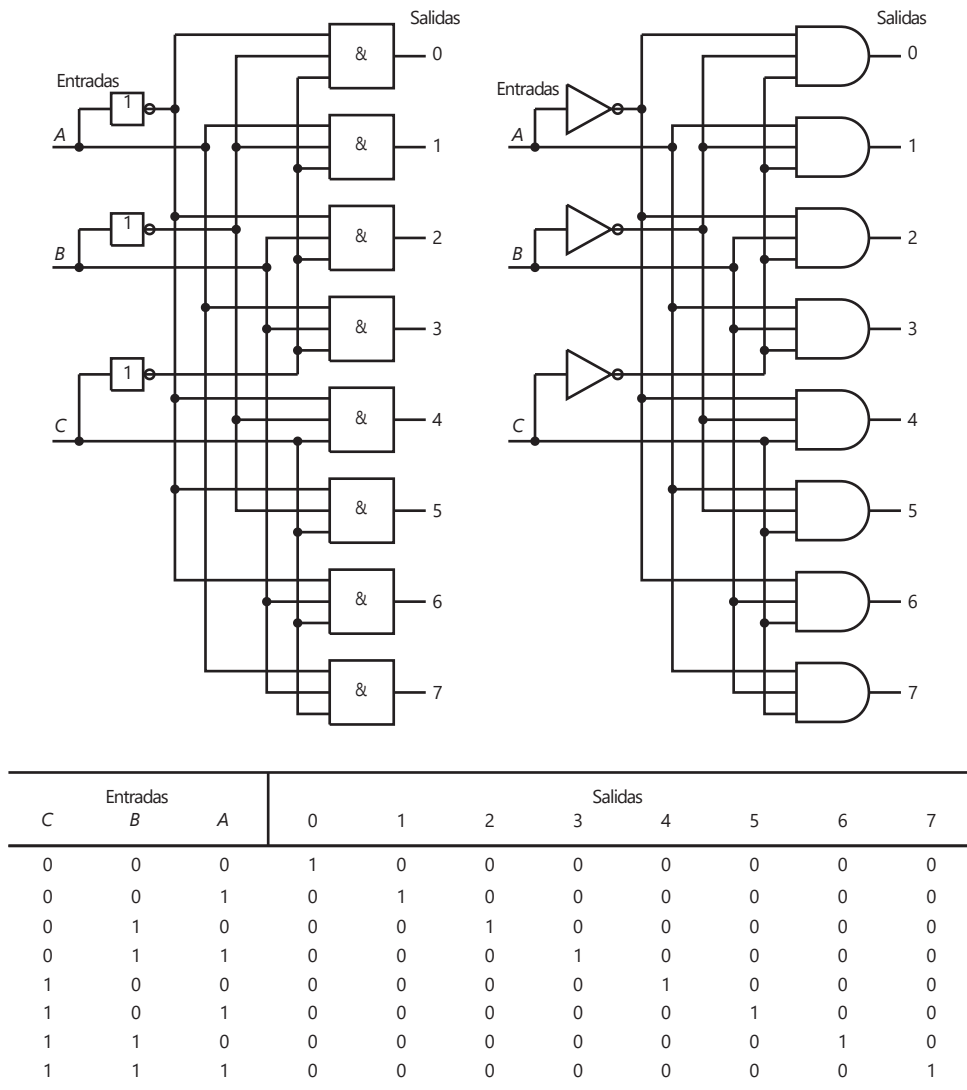
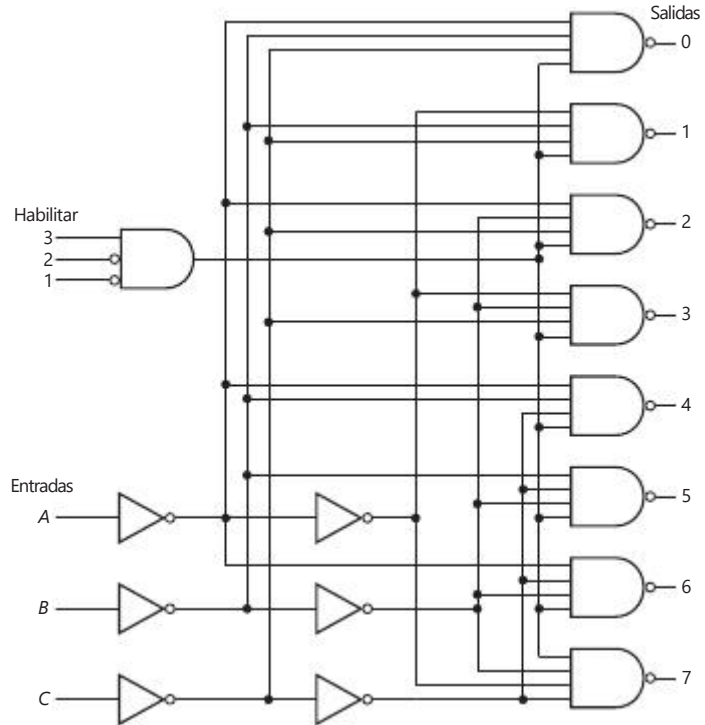


Figura 5.16 Decodificador de 3 líneas a 8 líneas.



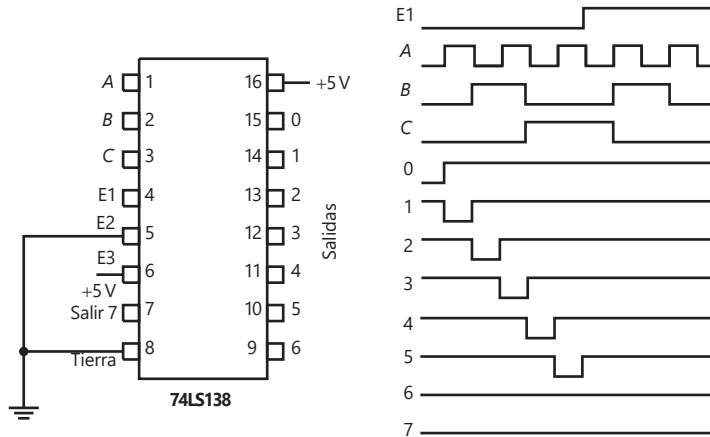
Habilitar			Entradas			Salidas							
E1	E2	E3	C	B	A	0	1	2	3	4	5	6	7
1	X	X	X	X	X	1	1	1	1	1	1	1	1
X	1	X	X	X	X	1	1	1	1	1	1	1	1
X	X	0	X	X	X	1	1	1	1	1	1	1	1
0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1
0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1
0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1
0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1
0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0

Figura 5.17 El 74LS138: 1 = ALTO, 0 = BAJO, X = no es importante.

normal y las entradas determinarán cuál salida es ALTA; con la línea HABILITADA BAJA todas las salidas son sostenidas en cuanto a las entradas. La Figura 5.17 muestra un decodificador usado de manera frecuente de 3 líneas a 8 líneas con esta instalación, el 74LS138. Note que las salidas son activo BAJAS en lugar de activo ALTAS de la Figura 5.16, y el decodificador tiene tres líneas HABILITADAS con los requerimientos para el funcionamiento normal que E1 y E3 son BAJOS y E2 es ALTO. Todas las otras variaciones dan como resultado el decodificador deshabilitado y sólo una salida ALTA.

La Figura 5.18 muestra el tipo de respuesta que se puede obtener del decodificador 74LS138 para diferentes entradas.

Figura 5.18 El 74LS138.



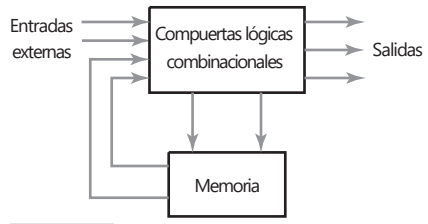
Un decodificador 74LS138 se puede utilizar con un microprocesador con la HABILITACIÓN empleada para el interruptor en el decodificador y luego depender de la salida desde tres líneas de salida desde el microprocesador de manera que una de las ocho salidas decodificadoras reciben la salida BAJA con todas las otras dejando la ALTA. Así, podemos considerar cada dispositivo de salida para tener una dirección, por ejemplo, un número de salida binario, de forma que cuando un microprocesador envíe una dirección al decodificador éste activa el dispositivo que ha sido asignado a esa dirección. El 74LS138 puede entonces ser transferido como un decodificador de dirección.

**5.4** Lógica secuencial

Los circuitos lógicos mencionados en secciones anteriores de este capítulo son ejemplos de sistemas de lógica combinacional. En estos sistemas, la salida está definida por la combinación de las variables de entrada en un instante dado. Por ejemplo, si la entrada *A* y la entrada *B* ocurren al mismo tiempo, entonces la compuerta AND produce una salida. La salida no depende de cuáles fueron las entradas anteriores. Cuando un sistema requiere una salida que dependa de valores anteriores de las entradas, se necesita un sistema de **lógica secuencial**. La diferencia principal entre un sistema de lógica combinacional y un sistema de lógica secuencial es que éste debe tener algún tipo de memoria.

La Figura 5.19 muestra la configuración básica de un sistema de lógica secuencial. La parte combinacional del sistema acepta señales lógicas provenientes de entradas externas y de salidas de la memoria. El sistema combinacional opera con esas entradas para producir sus salidas. Las salidas son, entonces, una función de sus entradas externas y de la información presente en su memoria.

Figura 5.19 Lógica secuencial.

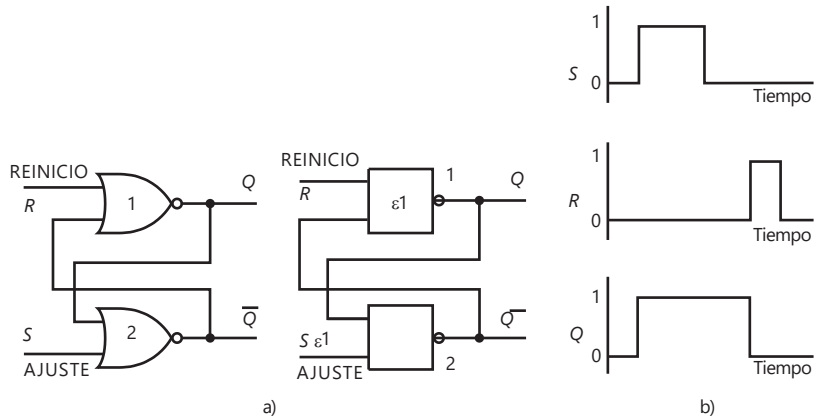


**5.4.1** El flip-flop

El **flip-flop** es un elemento de memoria básico que consta de un conjunto de compuertas lógicas, y es un dispositivo lógico secuencial. Existen diversos

tipos de flip-flops. La Figura 5.20a) muestra una forma, el flip-flop SR (set-reset), que tiene compuertas NOR. Si inicialmente se tienen ambas salidas 0 y  $S = 0$  y  $R = 0$ , entonces al hacer que  $S$  cambie de 0 a 1, la salida de la compuerta NOR2 se convertirá en 0. Esto, entonces, resultará en que ambas entradas para la compuerta NOR 1 se convertirán en 0 y así la salida se convertirá en 1. Esta realimentación actúa como entrada de la compuerta NOR 2, en la que ambas entradas son igual a 1 y al final no se produce otro cambio.

Figura 5.20 Flip-flop SR.



Si  $S$  cambia de la 1 a 0 la salida de la compuerta, NOR 1 sigue siendo 1 y la salida de la compuerta NOR 2 permanece en 0. No hay cambio en las salidas cuando la entrada  $S$  cambia de 1 a 0. Permanecerá en este estado en forma indefinida si los únicos cambios que se producen son  $S$ . Es capaz de "recordar" el estado al que fue establecido. La Figura 5.20b) ilustra lo anterior con un diagrama de tiempos, en el que un impulso rectangular se utiliza como la entrada  $S$ .

Si  $R$  cambia de 0 a 1 cuando  $S$  es 0, la salida de la compuerta NOR 1 se convierte en 0 y, por lo tanto, la salida de la compuerta NOR 2 cambia a 1, es decir, el flip-flop se reinicia. Un cambio de  $R$  a 0 no tiene efecto en estas salidas.

Así, cuando el valor  $S$  es 1 y  $R$  se hace 0, la salida  $Q$  cambia a 1 si su valor anterior fue 0, y seguirá siendo 1 si antes fue 1. Ésta es la condición de inicio y permanecerá sin cambio aun cuando  $S$  cambie a 0. Cuando  $S$  es 0 y  $R$  se hace 1, la salida  $Q$  se ajusta a 0, si su valor anterior fue 1, o sigue siendo 0 si antes fue 0. Ésta es la condición de reposo. La salida  $Q$  que se produce en un instante determinado dependerá de las entradas  $S$  y  $R$  y también del último valor de la salida. La siguiente tabla de estado ilustra lo anterior:

$S$	$R$	$Q_t = Q_{t+1}$	$\bar{Q}_t = \bar{Q}_{t+1}$
0	0	0 $\square$ 0	1 $\square$ 1
0	0	1 $\square$ 1	0 $\square$ 0
0	1	0 $\square$ 0	1 $\square$ 1
0	1	1 $\square$ 0	0 $\square$ 0
1	0	0 $\square$ 1	1 $\square$ 0
1	0	1 $\square$ 1	0 $\square$ 0
1	1	No permitido	
1	1	No permitido	



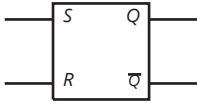
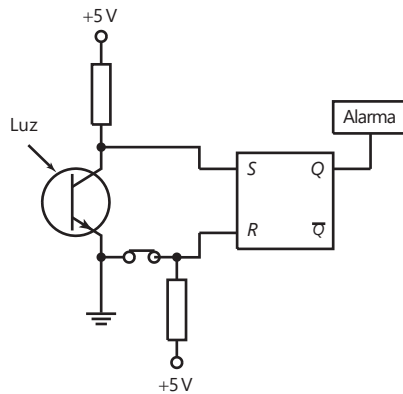


Figura 5.21 Flip-flop SR.

Observe que si  $S$  y  $R$  se hacen 1 al mismo tiempo, no existe la posibilidad de que haya un estado estable, por lo que esta condición de entrada no se permite. La Figura 5.21 muestra el símbolo de bloques simplificado que representa al flip-flop SR.

Un ejemplo sencillo de la aplicación de un flip-flop es un sistema de alarma simple, en el que la alarma suena cuando se obstruye el paso del haz luminoso; la alarma sigue sonando aun cuando ya no se interrumpa el paso de luz. La Figura 5.22 muestra un posible sistema. Se puede usar como sensor un fototransistor configurado, de manera que cuando se ilumina produce una entrada  $S$  prácticamente de 0 V, pero cuando la iluminación se interrumpe produce 5 V de entrada  $S$ . Cuando el haz luminoso se interrumpe,  $S$  se convierte en 1 y la salida flip-flop se convierte en 1, y suena la alarma. La salida permanecerá como 1 aun cuando  $S$  cambie a 0. La alarma sólo puede detenerse cuando el interruptor de ajuste se abre en forma momentánea para producir 5 V de entrada en  $R$ .

Figura 5.22 Circuito de alarma.



### 5.4.2 Sistemas síncronos

Con frecuencia es necesario definir el ajuste y reinicio de operaciones que deben ocurrir en tiempos específicos. En un sistema no temporizado o **sistema asíncrono**, las salidas de las compuertas lógicas cambian su estado cada vez que una o varias entradas cambian. En un sistema temporizado o **sistema síncrono**, los tiempos exactos en los que alguna de las salidas cambia su estado están determinados por una señal de temporización o señal de reloj. Ésta es en general un tren de pulsos rectangulares y cuando se usa la misma señal de reloj en todas las partes del sistema, las salidas están sincronizadas. La Figura 5.23a) muestra este principio con **compuertas en un flip-flop SR**. La señal de ajuste y de reloj se suministran a través de una compuerta AND en la entrada  $S$  del flip-flop. Así, la señal de ajuste llega al flip-flop sólo cuando la señal de ajuste y la de reloj tiene valor 1. Asimismo, la señal de reinicio junto con la señal de reloj entran a  $R$  a través de otra compuerta AND. En consecuencia, el ajuste y el reinicio sólo pueden ocurrir en el momento definido por el temporizador. La Figura 5.23b) muestra el diagrama de tiempos.

### 5.4.3 Flip-flop JK

Para muchas aplicaciones no es aceptable el estado de indeterminación que se presenta con un flip-flop SR cuando  $S = 1$  y  $R = 1$ ; por ello se emplea otro

Figura 5.23 Flip-flop SR de reloj.

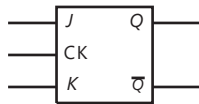
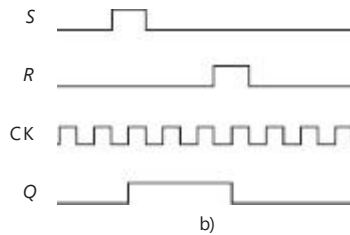
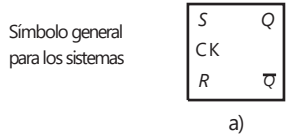
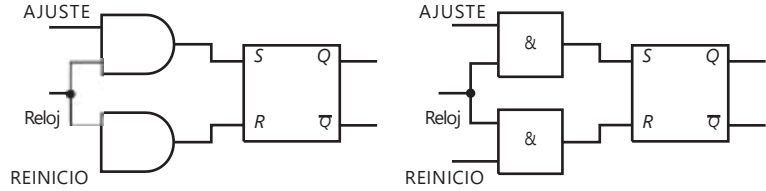


Figura 5.24 Flip-flop JK.

tipo de flip-flop: el **flip-flop JK** (Figura 5.24). Éste es un dispositivo flip-flop que se utiliza mucho.

La siguiente es la tabla de verdad de este dispositivo; observe que los únicos cambios de la tabla de estado flip-flop SR son las líneas cuando ambas entradas son 1.

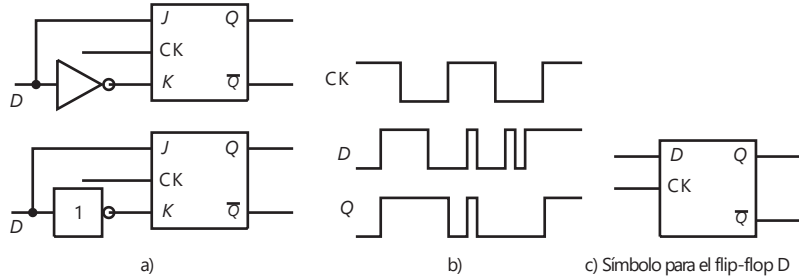
$J$	$K$	$Q_t = Q_{t+1}$	$Q_t^- = Q_{t+1}^-$
0	0	0 $\square$ 0	1 $\square$ 1
0	0	1 $\square$ 1	0 $\square$ 0
0	1	0 $\square$ 0	1 $\square$ 1
0	1	1 $\square$ 0	0 $\square$ 0
1	0	0 $\square$ 1	1 $\square$ 0
1	0	1 $\square$ 1	0 $\square$ 0
1	1	0 $\square$ 1	1 $\square$ 0
1	1	1 $\square$ 0	0 $\square$ 1

Un ejemplo de aplicación de este flip-flop es la necesidad de obtener una salida con valor alto cuando la entrada  $A$  aumenta y después de cierto tiempo la entrada  $B$  aumenta. Para determinar si ambas entradas son altas se puede emplear una compuerta AND; sin embargo, su salida será alta sin importar cuál fue la entrada que aumentó primero. No obstante, si las entradas  $A$  y  $B$  se conectan a un flip-flop JK,  $A$  debe aumentar primero para que la salida aumente cuando  $B$  también aumente.

#### 5.4.4 Flip-flop D

El biestable de datos **flip-flop D** es de hecho un flip-flop SR con reloj, o un flip-flop JK cuya entrada  $D$  se conecta de manera directa a las entradas  $S$  o  $F$  y a

Figura 5.25 Flip-flop D.

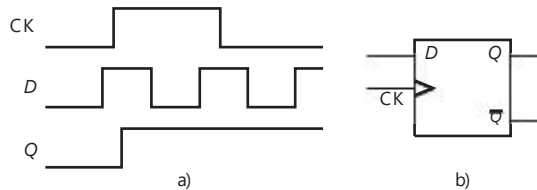


través de una compuerta NOT a las entradas  $R$  o  $K$  (Figura 5.25a); en el símbolo del flip-flop D, la entrada combinada  $R$  y  $K$  se denomina  $D$ . De esta manera, una entrada 0 o de 1 conmuta la salida de manera que siga a la entrada  $D$  cuando el pulso del reloj sea 1 (Figura 5.25b). Una aplicación particular del flip flop D es garantizar que la salida sólo tome el valor de la entrada  $D$  en tiempos definidos con precisión. La Figura 5.25c) muestra el símbolo utilizado para un flip-flop D.

En el flip-flop D, cuando la entrada del reloj o la de activación aumenta, la salida sigue a los datos presentados en la entrada  $D$ . Se dice que el flip-flop es transparente. Cuando se presenta una transición de alto a bajo en la entrada de activación, la salida  $Q$  se mantiene al nivel de datos justo anterior a la transición. Se dice que los datos en el punto de transición están **latched** (enclavados). Existen circuitos integrados de flip-flops D. Un ejemplo es el 7475, que contiene cuatro D transparentes **latched**.

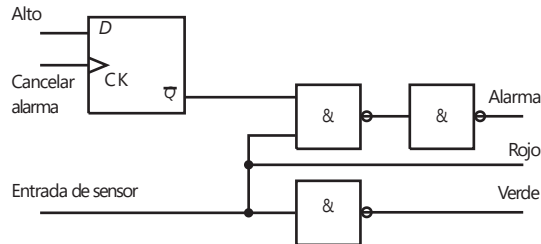
La diferencia entre el flip-flop 7474 y el 7475 consiste en que el primero es un dispositivo de activación por flanco; en el paquete hay dos de estos flip-flops. En un flip-flop D de activación por flanco, las transiciones de  $Q$  sólo ocurren en el flanco de entrada del pulso de reloj y en el 7474 en el flanco positivo, es decir, de la transición del nivel bajo a alto. La Figura 5.26a) ilustra lo anterior. La diferencia entre el símbolo básico de un flip-flop D de activación por flanco y el de un flip-flop D es el pequeño triángulo que se coloca en la entrada del reloj CK (Figura 5.26b). También hay otras dos entradas denominadas preset y clear. Un valor bajo en la entrada del preset define la salida  $Q$  igual a 1, en tanto que un valor bajo en la entrada del clear borra la salida y hace  $Q$  igual a 0.

Figura 5.26 a) Activación por borde positivo, b) símbolo para el flip-flop de activación por borde D.



Un ejemplo de una aplicación sencilla de este flip-flop se ve en la Figura 5.27, la cual muestra un sistema que sirve para que aparezca una luz verde cuando la entrada del sensor es baja y una luz roja cuando la entrada aumenta y hace sonar una alarma. La luz roja deberá permanecer encendida en tanto la entrada del sensor siga siendo alta, pero la alarma se puede apagar. Éste podría ser el sistema para monitorear la temperatura de un proceso; el sensor y el acondicionamiento de señal producen una señal baja cuando la temperatura es inferior al nivel de seguridad y una señal alta cuando es superior a ese nivel. El flip-flop tiene una entrada alta. Cuando se aplica una entrada baja a la entrada CK y la entrada del sensor es baja, se enciende la luz verde. Cuando

Figura 5.27 Sistema de alarma.

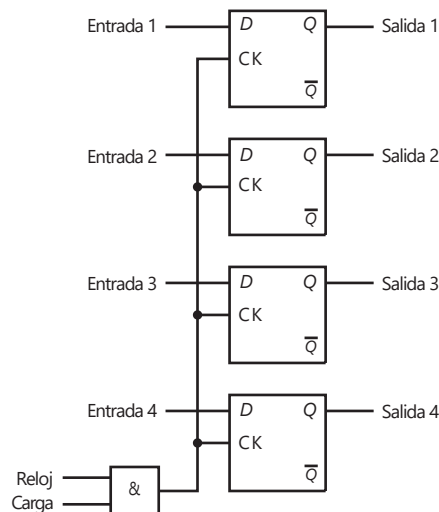


la entrada del sensor se vuelve alta, se apaga la luz verde, se enciende la roja y suena la alarma. Para eliminar la alarma se aplica una señal alta en la entrada CK, pero la luz roja permanece encendida mientras la entrada del sensor sea alta. Para construir este sistema se puede emplear un 7474 y un circuito o circuitos integrados que contengan tres compuertas NAND.

#### 5.4.5 Registros

Un **registro** es un conjunto de elementos de la memoria que sirve para guardar información hasta que se requiera. Se puede construir mediante flip-flops. Cada flip-flop guarda una señal binaria, es decir, un 0 o un 1. La Figura 5.28 muestra la configuración de un registro de 4 bits cuando se utilizan flip-flops D.

Figura 5.28 Registro.



Cuando la señal de carga es 0, no se presenta ninguna entrada de reloj en los flip-flops D, por lo que no hay cambio en los estados de los flip-flops. Cuando la señal de carga es 1, las entradas pueden modificar los estados de los flip-flops. Mientras la señal de carga sea 0, los flip-flops conservarán los valores de sus estados anteriores.

**5.4.6 El temporizador 555**

El chip temporizador 555 se utiliza ampliamente en circuitos digitales ya que puede ofrecer una amplia variedad de tareas de tiempo. Consiste en un flip-flop SR con alimentación de entrada por dos comparadores (Figura 5.29). Cada comparador tiene un voltaje de entrada que se deriva de una cadena potenciométrica de resistores de tamaño igual. De manera que el comparador A tiene una entrada de voltaje no inversor de  $V_{CC}/3$  y el comparador B tiene una entrada inversora de  $2V_{CC}/3$ .

Un uso del temporizador 555 es un **multivibrador monoestable**, el cual es un circuito que generará un pulso sencillo con la duración del tiempo deseado cuando éste recibe una señal de activación. La Figura 5.30a) muestra cómo se conecta el tiempo para dicho uso. En un principio, la salida será baja

Figura 5.29 El temporizador 555.

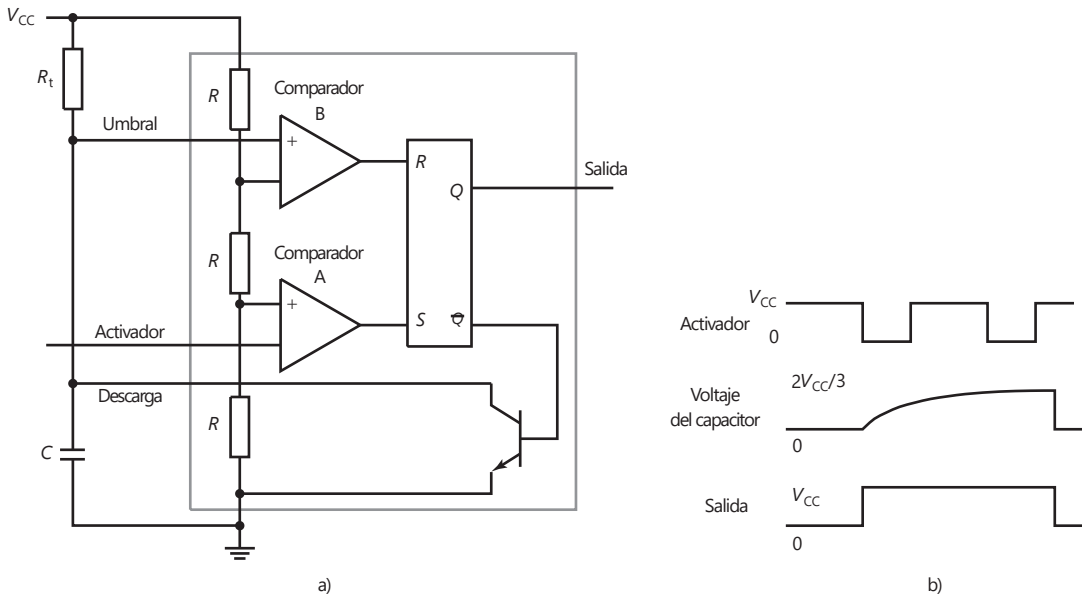
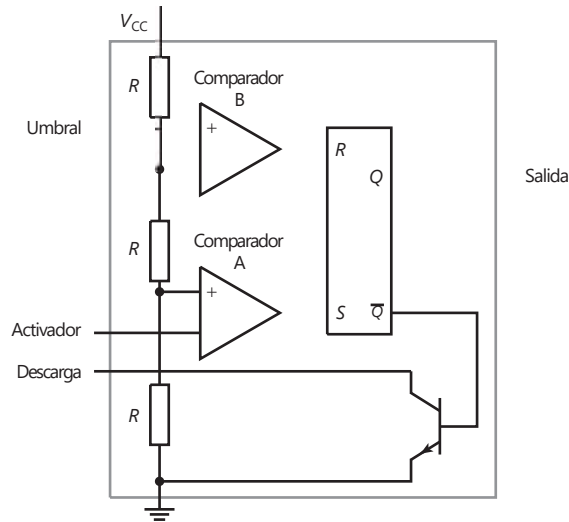


Figura 5.30 Multivibrador monoestable.

con el transistor acortando el capacitor y las salidas de ambos comparadores bajos (Figura 5.30b). Cuando el pulso de activación se va hacia abajo  $V_{CC}/3$ , el comparador de activación se va hacia arriba e instala el flip-flop. La salida es entonces alta, el transistor corta y el capacitor comienza a cargar. Cuando el capacitor alcanza  $2V_{CC}/3$ , el umbral de la comparación reajusta el flip-flop; restaurando así la salida hacia abajo y descarga el capacitor. Si el activador es pulsado mientras la salida es alta no tiene efecto. La longitud del pulso luego es el tiempo que le lleva al capacitor cargar arriba de  $2V_{CC}/3$  y esto depende de su constante de tiempo, es decir su valor de  $R_tC$ , y se da por la relación normal para la carga del capacitor a través de una resistencia de  $1.1R_tC$ . Como ejemplo, considere el caso en el que una alarma antirrobo suena cuando la puerta se abre y el propietario de la casa no introduce el número clave requerido en 30 segundos. Si el circuito de la Figura 5.30 se usa con un capacitor de  $1 \mu\text{F}$  luego  $R_t$ , necesitaría tener un valor de  $30 / (1.1 * 1 * 10^{-6}) = 27.3 \text{ M}\Omega$ .

## Resumen

Con los **sistemas lógicos combinacionales**, la salida se determina por la combinación de las variables de entrada en un instante particular de tiempo. La salida no depende de dónde estuvieron con anterioridad las entradas. Donde un sistema requiere una salida que depende de los valores previos de las entradas, se requiere un **sistema de lógica secuencial**. La principal diferencia entre un sistema lógico combinacional es que el sistema lógico secuencial debe tener alguna forma de memoria.

Las familias que se encuentran con más frecuencia son **transistor-transistor lógico (TTL)**, **semiconductor complementario metal-óxido (CMOS)** y el emisor acoplado lógico (ECL) las cuales se han de diferenciar por sus niveles lógicos, inmunidad ante el ruido, apertura, fuente de alimentación de corriente o la acción de disminución de corriente, el tiempo de retardo de propagación y la disipación de potencia.

Un **decodificador** es un circuito lógico que se enfoca en sus entradas, determina qué número está ahí, y activa la salida correspondiente al número.

El **flip-flop** es un elemento de memoria básico que está hecho de un ensamble de compuertas lógicas y es un dispositivo lógico secuencial.

Un **registro** es un conjunto de elementos de memoria y se utiliza para mantener la información hasta que sea solicitada.

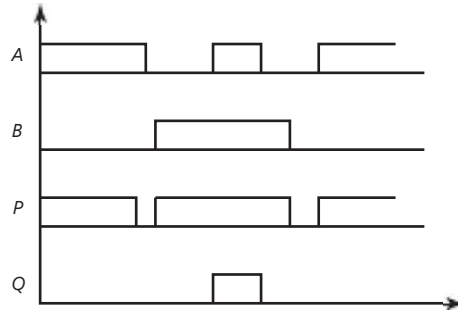
El chip **temporizador 555** consiste en un flip-flop SR con alimentador de entradas por dos comparadores.

## Problemas

- 5.1 Explique qué compuertas lógicas podrían usarse para controlar las siguientes situaciones:
- El caso de los boletos en una máquina expendedora automática en una estación de ferrocarriles.
  - Un sistema de seguridad para la operación de una máquina herramienta.
  - Un interruptor de apagado cuando la temperatura del calentador alcanza, por ejemplo,  $60^\circ \text{C}$  y la bomba de circulación está apagada.
  - Una señal para empezar un movimiento de elevación cuando la puerta del ascensor se cierra y se ha presionado un botón para seleccionar el piso.

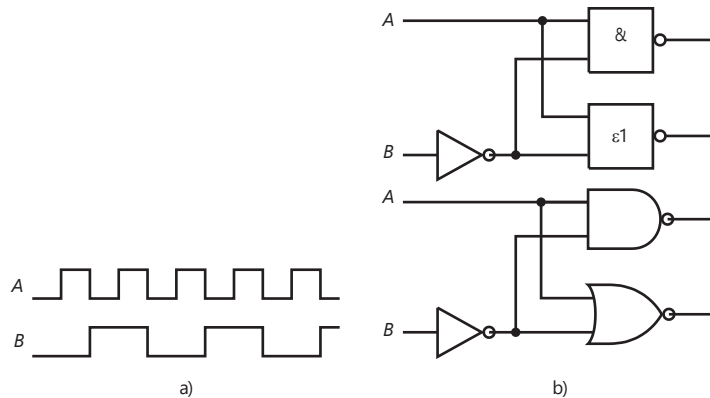
- 5.2 Para las señales de tiempo mostradas como  $A$  y  $B$  en la Figura 5.31, ¿cuál será la señal de salida si  $A$  y  $B$  son entradas para a) una compuerta AND, b) una compuerta OR?

Figura 5.31 Problema 5.2.



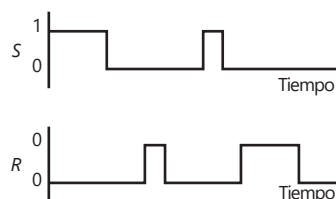
- 5.3 Se aplica una señal del reloj como una secuencia continua de pulsos a una compuerta lógica y dará salida sólo cuando una señal habilitada también se aplique a la compuerta. ¿Qué compuerta lógica puede usarse?
- 5.4 La entrada  $A$  se aplica directamente a una compuerta AND de doble entrada. La entrada  $B$  se aplica a una compuerta NOT y luego a una AND. ¿Qué condición de entradas  $A$  y  $B$  resultarán de una salida 1 desde la compuerta AND?
- 5.5 La Figura 5.32a) muestra las señales de entrada  $A$  y  $B$  aplicadas al sistema de compuerta que se muestra en la Figura 5.32b). Complete las ondas de salida que resultan de  $P$  y  $Q$ .

Figura 5.32 Problema 5.5.



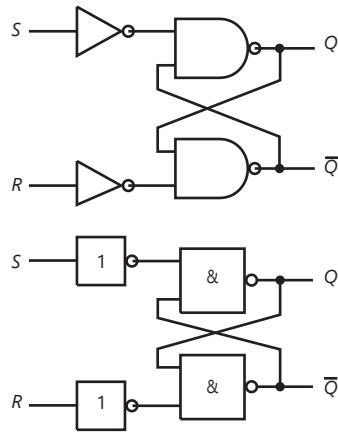
- 5.6 La Figura 5.33 muestra el diagrama de tiempos de las entradas  $S$  y  $R$  de un flip-flop RS. Complete añadiendo la salida  $Q$ .

Figura 5.33 Problema 5.6.



- 5.7 Explique cómo obtener un flip-flop RS con base en la configuración de la Figura 5.34.

Figura 5.34 Problema 5.7.







## Capítulo seis

# Sistemas de presentación de datos

### Objetivos

Después de estudiar este capítulo, el lector debe ser capaz de:

- Explicar el problema del efecto de la carga en los sistemas de medición.
- Identificar los elementos de presentación de datos utilizados de manera común y describir sus características.
- Explicar los principios de grabación magnéticos y ópticos.
- Explicar los principios de las pantallas, en particular las de siete segmentos LED y las pantallas de matriz de puntos.
- Describir los elementos básicos de sistemas de adquisición de datos e instrumentos virtuales.

### 6.1

#### Pantallas

Este capítulo aborda la manera en la que deben de aparecer los datos en pantalla, por ejemplo, como dígitos en una pantalla LED o mostrados en una pantalla de computadora, y almacenados, por ejemplo, en un disco duro o un CD.

Los sistemas de medición consisten en tres elementos: sensor, acondicionador de señal y pantalla o elemento de presentación de datos (vea la sección 1.4). Existe una muy amplia variedad de elementos que se pueden usar para la presentación de datos. Se han clasificado de manera tradicional dentro de dos grupos: indicadores y grabadores. Los **indicadores** ofrecen una indicación visual instantánea de la variable de sensación mientras los **grabadores** registran la señal de salida sobre un periodo y ofrecen de manera automática un registro permanente.

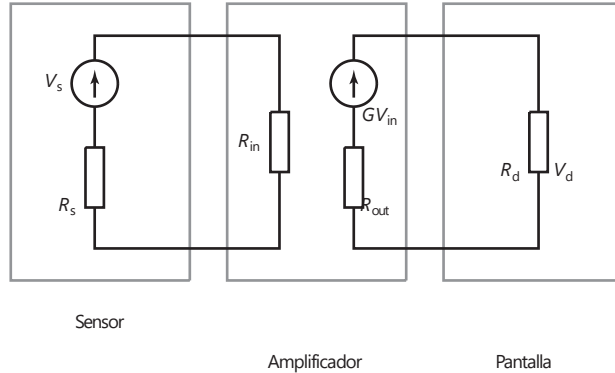
Este capítulo también puede ser considerado como el complemento de un grupo de capítulos que tienen que ver con los sistemas de medición, por ejemplo sensores, acondicionamiento de señales y ahora pantalla, y de la misma manera, este capítulo sirve para reunir los artículos en una cantidad considerable de ejemplos de los sistemas de medición completos.

#### 6.1.1 Efecto de la carga

Un punto general que tiene que tomarse en cuenta cuando se reúne cualquier sistema de medición es el **efecto de la carga**, por ejemplo el efecto de conectar una carga a través de las terminales de salida de cualquier elemento de un sistema de medición.

Al conectar un amperímetro dentro de un circuito para realizar una medición de la corriente cambia la resistencia del circuito y por lo tanto el de la corriente actual. El hecho de intentar la medición modifica la corriente que se está midiendo. Cuando un voltímetro se conecta a un resistor, entonces de manera efectiva se ponen dos resistores en paralelo, y si la resistencia del voltímetro no es considerablemente más alta que la del resistor la corriente a través del resistor

Figura 6.1 Medición del efecto de carga.



cambia de manera notable y, por lo tanto, el voltaje que se está midiendo cambia. El hecho de intentar la medición ha modificado el voltaje que se estuvo midiendo. A dichas acciones se les conoce como efecto de la carga.

El efecto de la carga también puede ocurrir cuando la conexión de un elemento a otro modifica las características del elemento precedente. Considere, por ejemplo, un sistema de medición que consiste en un sensor, un amplificador y un elemento de pantalla (Figura 6.1). El sensor tiene una salida de circuito abierto de voltaje  $V_s$  y una resistencia  $R_s$ . El amplificador tiene una resistencia de entrada  $R_{entrada}$ . Esta es, por lo tanto, la carga a través del sensor. De manera que el voltaje de entrada del sensor está dividido, por ello, la diferencia de potencial en esta carga y, por lo tanto, el voltaje de entrada  $V_{entrada}$  en el amplificador es

$$R_s + R_{entrada}$$

Si el amplificador tiene un voltaje de ganancia  $G$ , entonces la salida de voltaje de circuito abierto desde éste será  $GV_{entrada}$ . Si el amplificador tiene una resistencia de salida de  $R_{salida}$  entonces el voltaje de salida desde el amplificador está dividido de manera que la diferencia de potencial  $V_d$  a través del elemento de pantalla, resistencia  $R_d$ , es

$$V_d = \frac{GV_{entrada} R_d}{\frac{R_{salida}}{a} + \frac{GV_{entrada} R_d}{(R_{salida} + R_d)(R_s + R_{entrada})} + 1} GV_s + 1$$

6.2 Elementos para la presentación de datos

Por lo tanto, si los efectos de la carga son insignificantes, se requiere:  $R_{salida} \cdot R_d$  y  $R_s \cdot R_{entrada}$ .

Esta sección es una breve visión general de los ejemplos de elementos para la presentación de datos que se usan con mayor frecuencia.

6.2.1 Medidores analógicos y digitales

El **medidor de bobina móvil** es un indicador analógico con un puntero que se mueve a través de una escala. El movimiento básico del instrumento

es un microamperímetro de c.d. con derivadores, multiplicadores y rectificadores.

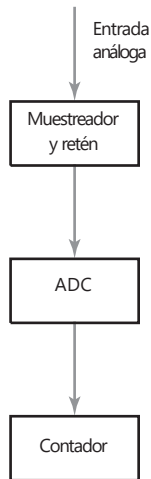


Figura 6.2 Principio del voltímetro digital.

dores que están en uso para convertirlo a otros intervalos de corriente directa y medición de corriente alterna, voltaje directo y voltaje alterno. Con corrientes y voltajes alternos, el instrumento es restringido a 50 y 10 Hz. La precisión de tal medidor depende de algunos factores, entre ellos la temperatura, la presencia de campos magnéticos cercanos o materiales ferrosos, la forma en la que se conecta el medidor; la fricción de los cojinetes, imprecisiones en la escala que se hacen durante la fabricación, etc. Además, hay errores en la lectura del medidor; por ejemplo, errores de paralaje cuando se lee la posición del puntero contra la escala desde un ángulo que no sea directo en ángulos rectos a la escala y errores que surgen desde el cálculo de la posición del puntero entre las marcas de la escala. La precisión general por lo común es del orden de  $\pm 0.1$  a  $\pm 5\%$ . El tiempo que le lleva al medidor de bobina móvil alcanzar una deflexión firme por lo general es de unos pocos segundos. La resistencia baja del medidor puede presentar problemas por efecto de la carga.

Un **voltímetro digital** da en su lectura una secuencia de dígitos. Este tipo de exhibidor elimina los errores de paralaje e interpolación y su exactitud puede llegar a  $\pm 0.005\%$ . El voltímetro digital es en esencia una unidad de muestreo y retención conectada a un convertidor analógico o digital, y un contador que se encarga de contar la salida (Figura 6.2). Su resistencia es elevada, de orden de  $10\text{ M}\Omega$ , por lo que sus efectos por carga son menos probables que en el medidor de bobina móvil cuya resistencia es mucho menor. Por ejemplo, si las especificaciones de un voltímetro digital indican "tasa de muestreo aproximada de 5 lecturas por segundo", quiere decir que el voltaje de entrada se muestrea cada 0.2 s. Éste es el tiempo que el instrumento tarda en procesar la señal y obtener una lectura. Entonces, si el voltaje de entrada cambia a una tasa tal que se presenten cambios significativos en 0.2 s, es posible que la lectura del voltímetro tenga errores. La tasa de muestreo típica de un voltímetro digital económico es de 3 por segundo y tiene una impedancia de entrada de  $100\text{ M}\Omega$ .

### 6.2.2 Grabadoras analógicas registradoras

Las grabadoras analógicas registradoras contienen datos registrados en papel hechos con tinta en plumas de punta de fibra robusta, mediante el impacto de un puntero que presiona una cinta de carbón contra el papel, mediante el uso de papel térmicamente sensible cuyos cambios colorean cuando un puntero caliente se mueve a través de éste, con un rayo de luz ultravioleta que cae en el papel sensible a éste y mediante un punzón de alambre de tungsteno moviéndose a través de la superficie de un papel especialmente recubierto, una fina capa de aluminio sobre la tinta coloreada, y la descarga eléctrica removiendo el aluminio sobre el tinte coloreado, y exponiendo el colorante. Muchas aplicaciones han sido sustituidas por instrumentos virtuales (vea más adelante en este capítulo).

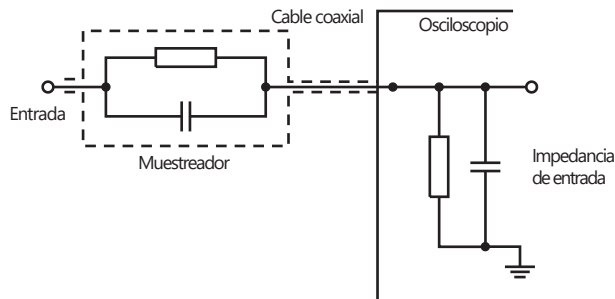
### 6.2.3 Osciloscopio de rayos catódicos

El osciloscopio de rayos catódicos es un instrumento para medición de voltaje con capacidad para desplegar señales de frecuencias muy elevadas. Un instrumento para propósito general puede responder a señales de hasta 10 MHz, en tanto que hay instrumentos más especializados que llegan a responder a señales de hasta 1 GHz. Con el osciloscopio de doble haz se pueden observar al mismo tiempo dos líneas de exploración en la pantalla mientras que los osciloscopios

con memoria guardan la línea de exploración en la pantalla después de que desaparece la señal de entrada; para quitar esta línea debe haber una acción de borrado deliberada. Los osciloscopios con memoria digital digitalizan la señal de entrada obtenida y la guardan en la memoria. Esta señal se puede analizar y manipular en la pantalla analógica del osciloscopio después de reconstruir la señal analógica. Es posible obtener registros permanentes de líneas de exploración con cámaras especiales conectadas directamente al osciloscopio.

Los osciloscopios de propósito general casi siempre tienen desviación vertical, es decir desviación en el eje Y, y sensibilidades que varían entre 5 mV y 20 V por división de la escala. Para observar componentes de ca en presencia de voltajes de c.d. elevados, se puede conectar un capacitor de bloqueo a la línea de entrada. Cuando el amplificador funciona con ca, su ancho de banda por lo general va de 2 Hz a 10 MHz y cuando funciona con c.d., ese ancho va de c.d. a 10 MHz. La impedancia de entrada Y es por lo común de 1 M $\Omega$ , derivada con una capacitancia de 20 pF. Cuando un circuito externo se conecta en la entrada Y, los problemas debidos al efecto por la carga y a la interferencia pueden distorsionar la señal de entrada. Si bien es posible reducir la interferencia utilizando cable coaxial, la capacitancia de este cable y la punta de prueba respectiva pueden ser suficientes, en especial a bajas frecuencias, para introducir una impedancia más o menos pequeña a la impedancia de entrada del osciloscopio, con lo cual se crea un efecto por carga significativo. Existen diversos muestreadores que se pueden conectar al cable de entrada y cuyo diseño permite aumentar la impedancia de entrada y evitar el problema por efecto de la carga. Un muestreador de voltaje pasivo de uso frecuente es un atenuador 10 a 1 (Figura 6.3). Tiene una resistencia de 9 M $\Omega$  y un capacitor variable en la junta del muestreador. Sin embargo, esto no sólo reduce el efecto capacitivo de la carga, sino también la sensibilidad de voltaje, por lo que es frecuente emplear una punta de prueba de voltaje que tenga un FET.

Figura 6.3 Muestreador de voltaje pasivo.



#### 6.2.4 Unidad de presentación visual (pantalla)

Cada vez más se presentan datos usando una unidad de pantalla visual (VDU). Con una pantalla de tubo de rayos catódicos, la imagen en la pantalla se construye mediante el movimiento del punto formado por un haz electrónico en una serie de líneas escaneadas de manera horizontal, una después de la otra hacia abajo de la pantalla. La imagen se crea mediante la variación de la intensidad del punto en la pantalla a medida que cada línea se escanea. A esta pantalla en forma de trama se le conoce como **no entrelazada** (Figura 6.4a). Para reducir los efectos de parpadeo se utilizan dos escaneos que recorren la pantalla hacia abajo y trazan una imagen completa. En el primer escaneo se trazan todas las líneas impares y en el segundo las líneas pares. A esta técnica se le llama **entrelazado** (Figura 6.4b).

Figura 6.4 a) Pantalla no entrelazada, b) pantalla con escaneo entrelazado.

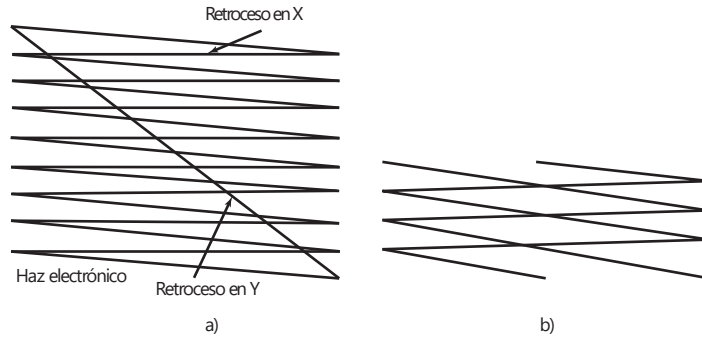
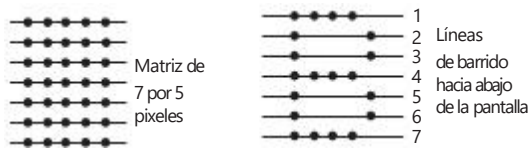


Figura 6.5 Carácter construido por una luz selectiva.

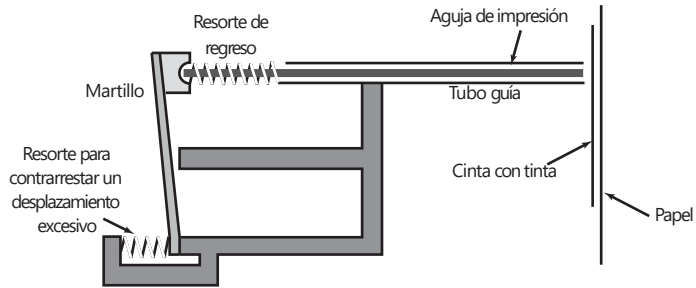


La pantalla de la unidad de presentación visual está recubierta con una gran cantidad de puntos de fósforo, estos puntos forman los **píxeles**. El término pixel denota al mínimo punto utilizable en una pantalla. Un carácter de texto o un diagrama se producen en la pantalla mediante la iluminación selectiva de estos puntos. La Figura 6.5 muestra cómo, para una matriz de 7 por 5, los caracteres se construyen por el haz electrónico que se mueve hacia abajo y en zigzag por la pantalla. Los datos de entrada de la VDU por lo general se expresan en formato **ASCII (American Standard Code for Information Interchange)** digital. Éste es un código de 7 bits, por lo que permite representar  $2^7 = 128$  caracteres. Esta cantidad abarca todos los caracteres estándar de un teclado y algunas funciones, como RETORNO, que indica el final de una línea y el inicio de la siguiente. La Tabla 6.1 contiene una lista abreviada de este código.

Tabla 6.1 Código ASCII.

Carácter	ASCII	Carácter	ASCII	Carácter	ASCII
A	100 0001	N	100 1110	0	011 0000
B	100 0010	O	100 1111	1	011 0001
C	100 0011	P	101 0000	2	011 0010
D	100 0100	Q	101 0001	3	011 0011
E	100 0101	R	101 0010	4	011 0100
F	100 0110	S	101 0011	5	011 0101
G	100 0111	T	101 0100	6	011 0110
H	100 1000	U	101 0101	7	011 0111
I	100 1001	V	101 0110	8	011 1000
J	100 1010	W	101 0111	9	011 1001
K	100 1011	X	101 1000		
L	100 1100	Y	101 1001		
M	100 1101	Z	101 1010		

Figura 6.6 Mecanismo de la cabeza de impresión de matriz de puntos.



### 6.2.5 Impresoras

Las impresoras proporcionan un registro de datos en papel. Existen diversas versiones de impresoras: de matriz de puntos, de inyección de tinta/burbuja y láser.

La **impresora de matriz de puntos** tiene una cabeza de impresión (Figura 6.6) con 9 o 24 puntos en línea vertical. Cada punto se controla con un electroimán que al activarse impulsa el punto a la cinta entintada. Esto transfiere la tinta al papel que se encuentra detrás de la cinta. Los caracteres se forman cuando la cabeza de impresión se mueve sobre el papel en línea horizontal a la derecha e izquierda y proyecta los puntos adecuados.

La **impresora de inyección de tinta** utiliza una tinta conductora que pasa por una pequeña boquilla para producir un chorro de gotitas de tinta de diámetro y frecuencia constantes. En una modalidad de esta impresora se lanza una corriente constante de tinta que pasa por un tubo para formar finas gotitas mediante un cristal piezoeléctrico que vibra a una frecuencia de unos 100 kHz (Figura 6.7). Otra variante utiliza un pequeño calentador ubicado en la cabeza de impresión y en la cual hay tinta vaporizada en un tubo capilar, que produce burbujas de gas que expulsan gotas de tinta (Figura 6.8). En una versión de impresora, cada gota de tinta se carga al pasar por un electrodo de

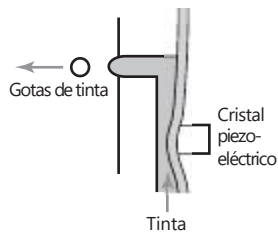


Figura 6.7 Producción de un flujo de gotas.

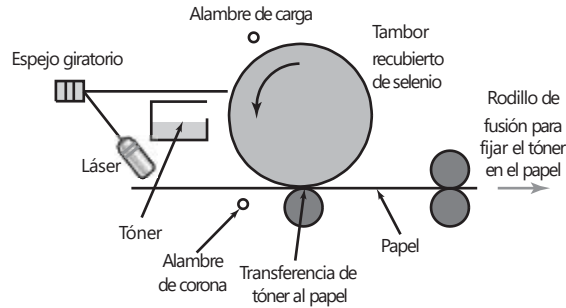
Figura 6.8 Principio de la inyección de burbuja.



carga; las gotas cargadas se desvían al pasar entre unas placas en las que se mantiene un campo eléctrico. En otra versión se usa un grupo vertical de boquillas y cada uno de los inyectores se activa o se desactiva, según se le indique. Con las impresoras de inyección de tinta se pueden producir impresiones de color usando tres sistemas de color distintos. Lo diminuto de las gotas es tal que permite lograr impresiones con una resolución de más de 600 puntos por pulgada.

La **impresora láser** tiene un tambor fotosensible recubierto de un material de selenio sensible a la luz (Figura 6.9). En la oscuridad, el selenio posee una alta resistencia y, en consecuencia, se carga al pasar cerca de un alambre de carga que tiene un alto voltaje. Con un haz luminoso se explora todo el

Figura 6.9 Elementos básicos de una impresora láser.



tambor usando un pequeño espejo giratorio de ocho lados. Cuando la luz incide en el selenio, su resistencia disminuye y no puede seguir cargado. Variando la brillantez del haz luminoso, los puntos del tambor se cargan y descargan. Conforme el tambor pasa por el recipiente del tóner (pigmento resinoso negro) las áreas cargadas atraen partículas de tóner que se adhieren a las áreas que no estuvieron expuestas a la luz, en tanto que no se produce adhesión en las áreas expuestas. El papel se carga pasándolo por otro alambre de carga, conocido como alambre de corona, de manera que cuando pasa cerca del tambor, atrae el tóner de éste. A continuación, las partículas de tóner se funden con un cilindro de fusión en caliente de manera que, una vez que pasan entre los rodillos, se adhieren con firmeza al papel. En la actualidad, las impresoras láser más comunes alcanzan una resolución de 1 200 puntos por pulgada.

### 6.3

#### Grabación magnética

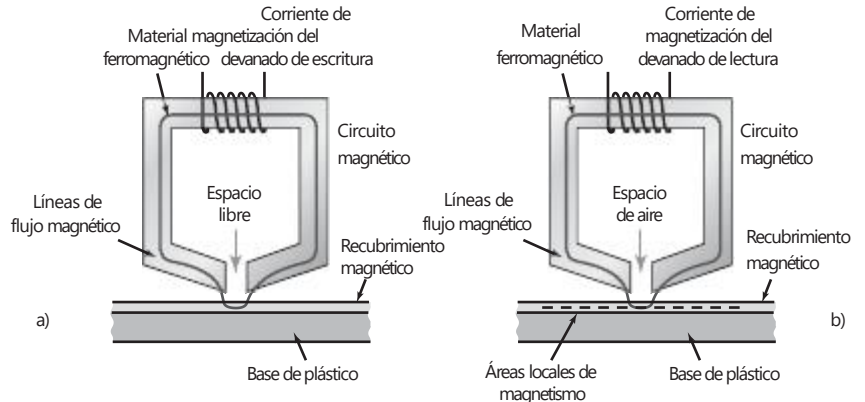
La grabación magnética se utiliza para guardar datos en discos flexibles y duros de las computadoras. El principio básico de su funcionamiento es que una cabeza de grabación, la cual responde a una señal de entrada, reproduce los patrones magnéticos correspondientes en una delgada capa de material magnético, y una cabeza de lectura produce una salida al convertir los patrones magnéticos del material magnético en señales eléctricas. Además de estas cabezas, el sistema requiere un sistema de transporte para mover de manera controlada el material magnético debajo de las cabezas.

La Figura 6.10a) muestra los elementos básicos de grabación, la cual consiste de un núcleo de material ferromagnético que tiene un espacio no magnético. Al alimentar señales eléctricas en el devanado enrollado en el núcleo, se produce un flujo magnético en el núcleo. La cercanía del plástico con la cubierta magnética al espacio no magnético causa que el flujo magnético siga con facilidad una trayectoria a través del núcleo y esa parte del recubrimiento magnético que está en el espacio vacío. Cuando hay un flujo magnético que pasa por una región del recubrimiento magnético, éste se magnetiza de modo permanente. De esta manera se produce una grabación magnética a partir de la señal de entrada eléctrica. La inversión de la dirección de la corriente invierte la dirección del flujo.

La cabeza de reproducción (Figura 6.10b) tiene una construcción similar a la de la cabeza de grabación. Al llenar el espacio vacío no magnetizado con una pieza de recubrimiento magnetizado, se induce un flujo magnético en el núcleo. Los cambios del flujo en el núcleo producen fem en el devanado enrollado alrededor del núcleo. Así, la salida producida por el devanado es una señal eléctrica relacionada con la grabación magnética del recubrimiento.



Figura 6.10 Principios básicos: a) de una cabeza de grabación magnética, b) de una cabeza de reproducción magnética.



### 6.3.1 Códigos de grabación magnética

En la grabación digital las señales se graban como una combinación codificada de bits. La celda de bits es la parte del recubrimiento magnético donde el magnetismo se satura por completo en una dirección o en la opuesta. La saturación se produce cuando el campo magnetizante aumenta a tal grado que el material magnético alcanza su máximo flujo magnético y todo incremento posterior en la corriente magnetizante ya no produce cambios.

Las celdas de bits de la superficie magnética son semejantes a las que muestra la Figura 6.11. Una forma evidente de poner datos en el material magnético es el uso del flujo magnético en una dirección para representar a 0 y en la dirección opuesta a 1. Sin embargo, es necesario leer cada celda y, por lo tanto, se requieren puntos de sincronización exactos para indicar con claridad cuándo debe realizarse el muestreo. Si para producir las señales de sincronización se utiliza un temporizador externo pueden surgir algunos problemas, como un desacoplamiento entre las señales de sincronización y la velocidad con que se desplaza la superficie magnética debajo de la cabeza, lo cual podría causar que no se leyera una celda o, incluso, que se leyera dos veces. La sincronización es esencial. Ésta se logra utilizando las mismas celdas para generar las señales para tomar muestras. Un método es usar transiciones de la superficie magnética, transiciones que van de la saturación en una dirección a la saturación en la otra; es decir, sitios donde la diferenciación entre los dos bits es del todo evidente, para realimentar la temporización de la generación de señales a fin de ajustarlas para que estén en sincronización con las celdas de bits.

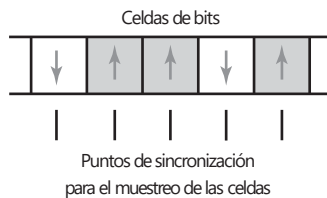


Figura 6.11 Celdas de bits.

Si las inversiones de flujo no ocurren con la frecuencia suficiente, este método de sincronización podría ocasionar errores. Una manera de solucionar este problema es usar otra forma de codificación. Los siguientes son algunos de los métodos utilizados:

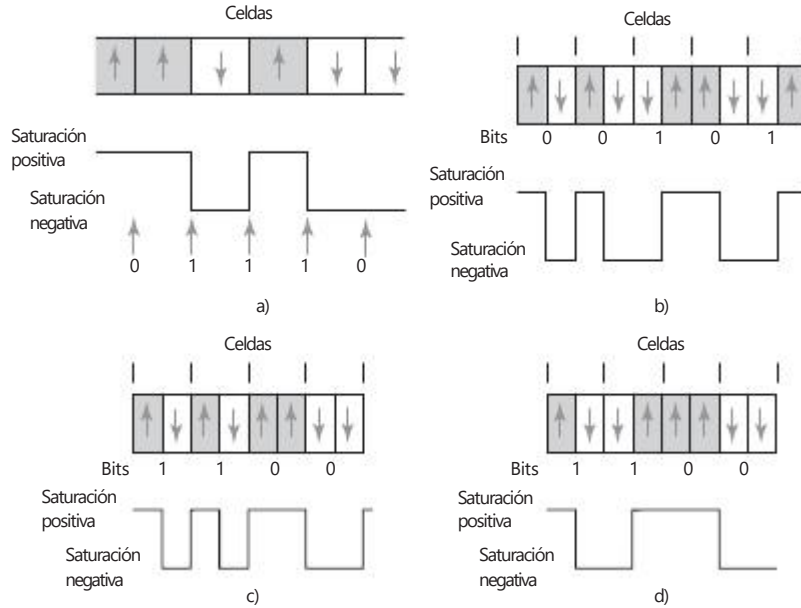
1. *Sin retorno a cero (NRZ)*

Con este sistema el flujo se graba en una cinta para la cual la ausencia de cambio de flujo representa un 0 y el cambio 1 (Figura 6.12a). Sin embargo, este sistema no tiene autosincronización.

2. *Codificación en fase (PE)*

La grabación por modulación en fase tiene la ventaja de poseer autosincronización y no requiere señales de temporización externa. Cada celda se divide en dos; una mitad tiene flujo de saturación positiva y la otra flujo

Figura 6.12 Grabación:  
 a) sin retorno a cero,  
 b) codificación en fase,  
 c) modulación en frecuencia,  
 d) modulación en frecuencia modificada.



de saturación negativa. El dígito 0 se graba como la saturación positiva de medio bit, seguido de una saturación negativa de medio bit; el dígito 1 se representa por la saturación negativa de medio bit seguida por la saturación positiva de otro medio bit. La transición de media celda de positivo a negativo indica un 0 y la transición de negativo a positivo representa un 1 (Figura 6.12b).

### 3. Modulación en frecuencia (FM)

Tiene autosincronización y es similar a la grabación por modulación en fase, sólo que siempre se produce una inversión del flujo al inicio de una celda (Figura 6.12 c). Para un bit 0 no hay inversión de flujo adicional a lo largo de la celda; en cambio, para el 1 sí la hay.

### 4. Modulación en frecuencia modificada (MFM)

Es una modificación del código de modulación en frecuencia. La diferencia consiste en que la inversión del flujo al inicio de cada código de bit sólo se presenta si la corriente y el bit anterior fueron 0 (Figura 4.19). Esto significa que sólo es necesaria una inversión de flujo por cada bit. Esto y el código de corrida limitada en longitud son los códigos que en general se utilizan en los discos magnéticos.

### 5. Corrida limitada en longitud (RLL)

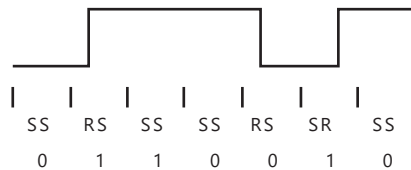
Éste es un grupo de códigos de autosincronización que especifican una distancia mínima y una máxima, es decir la corrida entre una y otra inversión de flujo. La corrida máxima es lo suficientemente breve para garantizar que las inversiones de flujo sean frecuentes como para que el código sea autosincronizador. Una forma común de este código es el RLL<sub>2,7</sub> donde el 2,7 indica que la distancia mínima entre las inversiones de flujo debe ser 2 bits y la máxima 7. La secuencia de los códigos es una secuencia de códigos S y de códigos R. En el código S, o código de espacio, no hay inversiones de flujo, mientras que en un código R, un código de inversión, ésta se produce durante el bit. Dos códigos S o R se usan para representar cada

bit. Los bits se agrupan por secuencias 2, 3 y 4 bits y a cada grupo se le asigna un código. Los códigos son:

Secuencia de bits	Secuencia de código
10	SRSS
11	RSSS
000	SSSRSS
010	RSSRSS
011	SSRSSS
0010	SSRSSRSS
0011	SSSSRSSS

La Figura 6.13 muestra la codificación de la secuencia 0110010, la cual se ha desglosado en grupos 011 y 0010, por lo que se representa por SSRSSSRSSRSS. Por lo menos hay dos códigos S entre los códigos R y no puede haber más de siete códigos S entre los códigos R.

Figura 6.13 Código RLL.



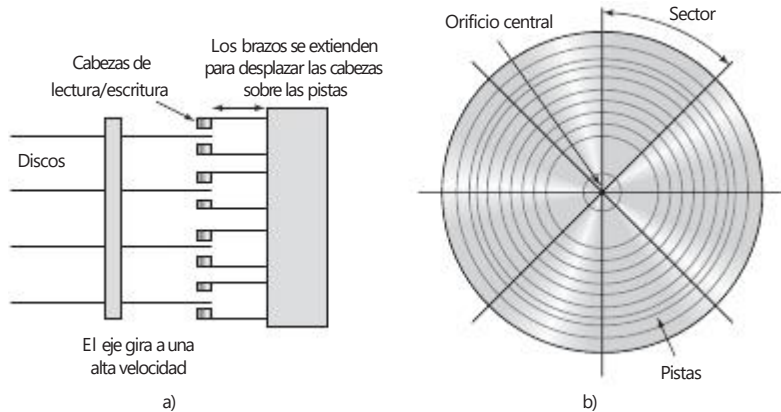
El código óptimo es el que permite el empaquetado de bits lo más cerca posible uno del otro y que se puede leer sin error. Las cabezas de lectura localizan las inversiones con bastante facilidad, aunque no deben estar muy cerca entre sí. El código RLL tiene la ventaja de ser más compacto que otros códigos: el PE y el FM ocupan la mayor parte del espacio; MFM y NRZ ocupan el mismo espacio. La desventaja del NRZ es que, a diferencia de otros códigos, no tiene autosincronización.

### 6.3.2 Discos magnéticos

El grabado digital a menudo se lleva a cabo en un disco duro. Los datos digitales se guardan en la superficie del disco en círculos concéntricos denominados pistas; un disco tiene muchas pistas. Para cada superficie de disco se utiliza una cabeza de lectura/escritura; mediante un actuador mecánico, las cabezas se desplazan hacia delante y hacia atrás para acceder a las diferentes pistas. El actuador hace girar al disco y las cabezas de lectura/escritura leen o escriben datos en una pista. Los discos duros (Figura 6.14a) son unidades selladas con datos almacenados en la superficie del disco a lo largo de los círculos concéntricos. En un disco duro hay varios de estos discos; los datos quedan guardados en los recubrimientos magnéticos de ambas caras de los discos. Éstos giran a alta velocidad y se accede a las pistas desplazando las cabezas de lectura/escritura. En estos discos se pueden guardar grandes cantidades de datos y en la actualidad es común contar con capacidades de memoria de varios gigabytes.

La superficie del disco se divide en sectores (Figura 6.14b) y la unidad de información del disco tiene una dirección que consiste en un número de pista y otro de sector. Por lo común, en un disco flexible hay entre 8 y 18 sectores

Figura 6.14 Disco duro:  
a) arreglos de discos, b) pistas y sectores.



y casi 100 pistas; en un disco duro puede haber hasta 2000 pistas por superficie y 32 sectores. Para localizar datos, la cabeza se mueve sobre la pista requerida; el tiempo que tarda es el **tiempo de búsqueda**; la cabeza espera allí hasta que el segmento buscado pasa por abajo, tiempo que se llama **tiempo de espera**. A fin de identificar una dirección es necesario que la información se haya grabado en el disco, lo que permitirá identificar segmentos y pistas. La escritura de esta información se conoce como **formateo** y se realiza antes de guardar los datos en un disco. La técnica que en general se utiliza es guardar esta información de la ubicación en las pistas para que al guardar los datos la secuencia de información de una pista se convierta en marcador del índice,

encabezado del sector 0, datos del sector 0, registro del sector 0,  
 encabezado del sector 1, datos del sector 1, registro del sector 1,  
 encabezado del sector 2, datos del sector 2, registro del sector 2,  
 etcétera.

El marcador del índice contiene el número de pista y el encabezado del sector identifica al sector. El registro del sector contiene información, por ejemplo una verificación de redundancia cíclica que se usa para verificar que la lectura de un sector sea la correcta.

## 6.4 Grabación óptica

Al igual que los discos magnéticos, los CD-ROM almacenan datos en sus pistas. A diferencia de un disco magnético, el cual tiene una serie de pistas concéntricas, un CD-ROM tiene una pista en espiral. La superficie de grabación está revestida con aluminio y es altamente reflejante. La información entonces se almacena en una pista de alrededor de  $0.6 \mu\text{m}$  de ancho como una serie hoyos de grabados dentro de la superficie al enfocar la luz de un láser en un rayo de cerca de  $1 \mu\text{m}$  de diámetro, y esto da como resultado que la luz se refleja fuertemente o no, dependiendo si golpea un hoyo o un área sin depresión. Por lo tanto, los datos se leen como una secuencia de pulsos de luz reflejados y no reflectados.

La grabación óptica emplea métodos de codificación similares a los utilizados con la grabación magnética, por lo general se usa la codificación RLL. Debido a que la grabación óptica puede corromperse con mucha facilidad por rasguños o polvo que obstruya el rayo láser en uso para lectura, se tienen que utilizar métodos para detectar y corregir errores. Uno es el **control de paridad**.

Con este método, grupos de bits son aumentados con un bit de paridad extra el cual está instalado en 0 o 1, de manera que el número total de 1 bits en un grupo es un número impar o par. Cuando se lee la información, si uno de los bits ha sido corrompido, luego el número de bits habrá cambiado y esto será detectado como un error.

## 6.5

## Pantallas o displays

Muchos sistemas de presentación visual usan indicadores luminosos para mostrar un estado encendido-apagado, o para proporcionar un display alfanumérico. El término **alfanumérico** es la contracción de los términos alfabético y numérico y describe la presentación visual de letras del alfabeto y números del 0 al 9 con puntos decimales. Una modalidad de estos displays cuenta con siete segmentos de "luz" para generar los caracteres alfabéticos y numéricos. La Figura 6.15 muestra los segmentos y la Tabla 6.2 cómo utilizar una entrada de código binario de 4 bits para generar impulsos y activar diversos segmentos.

Existe un formato que utiliza una matriz de puntos de 7 por 5 o de 9 por 7 (Figura 6.16). Los caracteres se generan mediante la activación de los puntos correspondientes.

Los indicadores de luz para tales pantallas pueden ser lámparas de neón, lámparas incandescentes, **diodos de emisión de luz (LED)** o **pantallas de cristal líquido (LCD)**. Las **lámparas de neón** necesitan voltajes altos y corrientes bajas y pueden ser potencializadas directamente desde los principales voltajes pero sólo pueden usarse para dar una luz roja. Las **lámparas incandescentes** se pueden utilizar con una amplia gama de voltajes pero necesitan una corriente comparativamente alta. Emiten luz blanca así que utilizan lentes para generar cualquier color requerido. La principal ventaja es su brillo.

Figura 6.15 Display de siete segmentos.



Tabla 6.2 Display de siete segmentos.

Entrada binaria				Segmentos activados							Número desplegado
				a	b	c	d	e	f	g	
0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0
0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1
0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	2
0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	1	3
0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	4
0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	5
0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	6
0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	7
1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	8
1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	9

Figura 6.16 Display de matriz de puntos de 7 por 5.

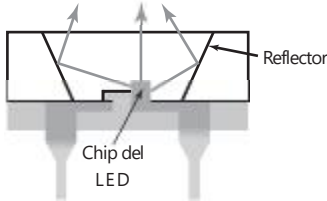
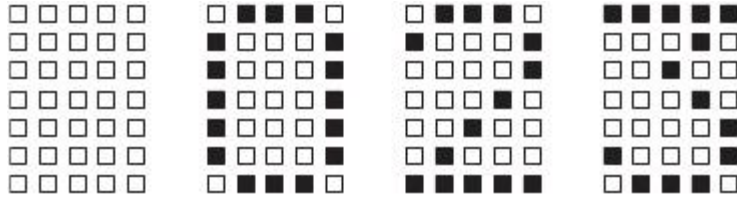


Figura 6.17 LED.

**6.5.1 Diodos emisores de luz (LED)**

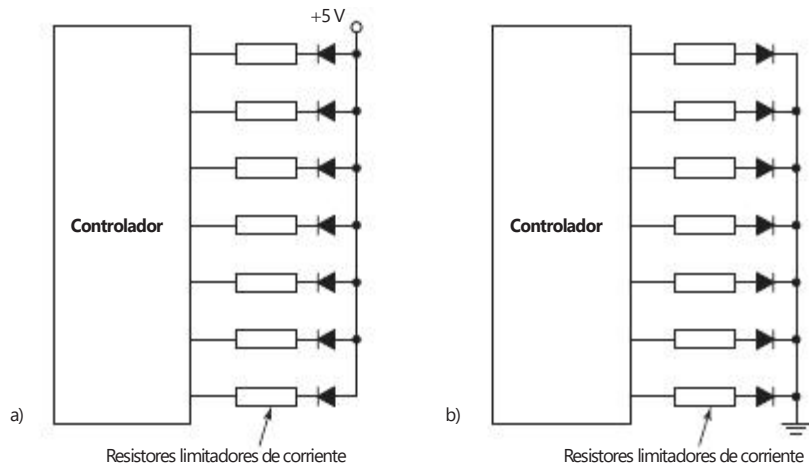
Los LED requieren bajos voltajes y bajas corrientes además de que son baratos. Estos diodos cuando están polarizados de forma directa emiten luz sobre una determinada banda de longitud de onda. La Figura 6.17 muestra la forma básica de un LED, la luz emitida desde el diodo es elevada en una dirección por medio de reflectores. Los materiales para LED que se usan comúnmente son arseniuro de galio, fosfuro de galio y aleaciones de arseniuro de galio con fosfuro de galio. Los LED que se utilizan con mayor frecuencia pueden dar colores rojo, amarillo o verde. Con sistemas basados en microprocesador, los LED son la forma más común de indicador que se usa.

Por lo general, se requiere una resistencia de corriente limitada con un LED para limitar la corriente por debajo de la corriente máxima tasada cerca de 10 a 30 mA. Es característico que un LED pueda dar a través de él una caída de voltaje de 2.1 V cuando la corriente está limitada a 20 mA. Así cuando, por ejemplo, se aplica una salida de 5 V, se tiene que dejar caer 2.9 V a través de una resistencia en serie. Esto significa que se requiere de una resistencia de  $2.9/0.20 = 145 \Omega$  y por lo tanto es probable que se use un resistor estándar de 150  $\Omega$ . Algunos LED cuentan con construcciones de resistencias de manera que puedan estar conectados directamente a sistemas de microprocesadores.

Los LED están disponibles como displays de luz sencillos, de siete y 16 segmentos de pantallas alfanuméricas, formato de matriz de puntos y en forma de gráfica de barras.

La Figura 6.18a) muestra cómo siete LED, para dar los siete segmentos de una pantalla de la forma mostrada en la Figura 6.16, pueden ser conectados a un conductor de manera que cuando una línea se baja, se aplica un voltaje y el LED en esa línea es encendido. El voltaje tiene que estar por arriba de un valor de "encendido" antes de que el LED emita una luz significativa; los voltajes de encendido comunes están alrededor de 1.5 V. A dicho arreglo se le

Figura 6.18 a) Conexión de ánodo común para LED, b) cátodo común.

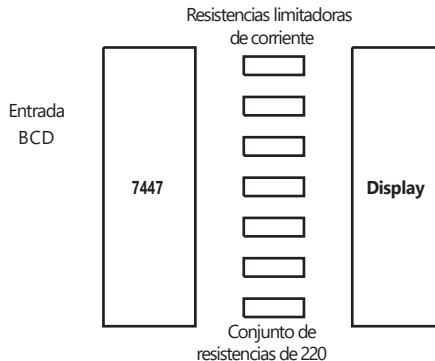


conoce como el **ánodo común** de la conexión ya que todos los ánodos LED se conectan juntos. Un arreglo alternativo es el **cátodo común** (Figura 6.18b). Los elementos en la forma del ánodo común se hacen activos por la entrada que va hacia abajo, en el tipo de cátodo común al ir alto. El ánodo común es la elección usual ya que la dirección del flujo de corriente y el tamaño de la corriente implicada por lo general son las más apropiadas.

Algunos ejemplos de dichos tipos de pantalla son las de siete segmentos de 7.6 mm y pantallas de alta intensidad de 10.9 mm de Hewlett Packard las cuales están disponibles en la forma de ánodo común o de cátodo común. Además de los siete segmentos para formar los caracteres, hay un punto decimal a la derecha o izquierda. Al iluminar diferentes segmentos de la pantalla, se puede formar una amplia gama de números y un rango pequeño de caracteres alfabéticos.

A menudo la salida desde el controlador no es la forma normal binaria sino **Código Binario Decimal** (BCD) (vea el apéndice B). Con el BCD, cada dígito decimal se codifica de forma separada en binario. Por ejemplo, el número decimal 15 tiene el 1 codificado como 0001 y el 5 como 0101 para dar el código binario decimal de 0001 0101. La salida del controlador, por lo tanto, debe ser decodificada en el formato requerido para la pantalla LED. El 7447 es un decodificador común para controlar pantallas (Figura 6.19).

Figura 6.19 Decodificador con display de siete segmentos.



La Figura 6.20 muestra la forma básica usada para una pantalla LED de matriz de 5 por 7 puntos. El arreglo consiste de cinco conectores de columna, cada uno conecta los ánodos de siete LED. Cada hilera conecta los cátodos de cinco LED. Para encender un LED particular, la energía se aplica a su columna y su hilera está aterrizada. Esta pantalla permite la producción de todos los caracteres ASCII.

### 6.5.2 Pantallas de cristal líquido

Las **pantallas de cristal líquido** no producen luz por sí mismas, pero reflejan o transmiten luz. El cristal líquido es un compuesto de largas moléculas en forma de varilla que está entre dos placas de polímero que contienen surcos microscópicos. Los surcos de las hojas superior e inferior están a  $90^\circ$  entre sí. Las moléculas del cristal líquido se alinean con los surcos del polímero y dan un leve giro para quedar a  $90^\circ$  entre ellos (Figura 6.21).

Cuando una luz polarizada en un plano incide en el cristal líquido, su plano de polarización gira conforme pasa por el material. Al quedar entre dos placas de polarizador, cuyas direcciones de transmisión están en ángulo recto, el giro permite la transmisión de la luz y el material líquido se ilumina.

Figura 6.20 Display de matriz de puntos.

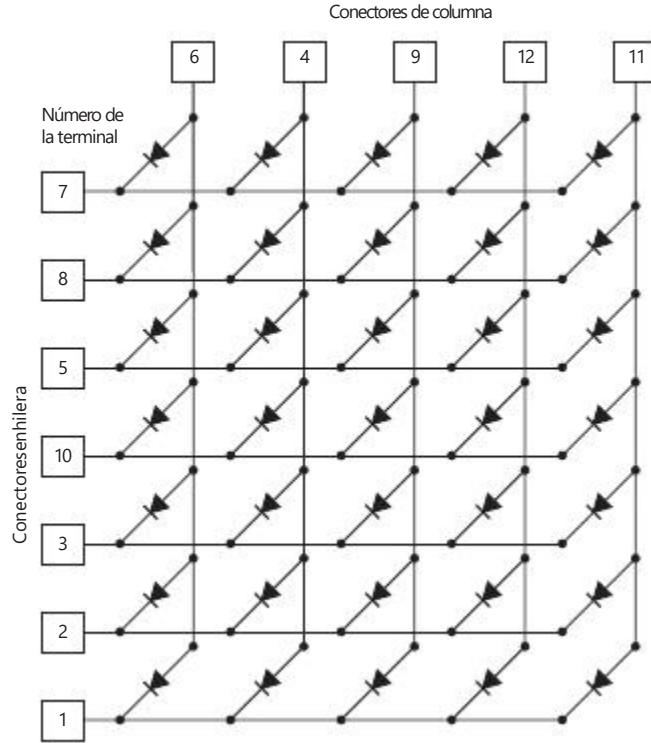
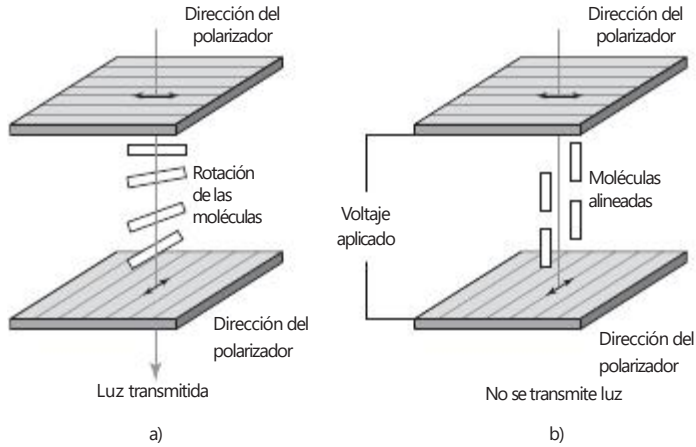


Figura 6.21 Cristal líquido: a) sin campo eléctrico, b) con campo eléctrico.



En cambio, si se aplica un campo eléctrico a través del material, las moléculas se alinean con este campo y la luz que pasa por el polarizador superior no gira y no puede llegar al polarizador inferior, por lo que al final la luz es absorbida. El material, entonces, aparece oscuro.

Este arreglo se coloca entre dos placas de vidrio que contienen electrodos transparentes en la forma que se requiere desplegar. Un display de LED puede ser transmisor o reflector. En el caso del display transmisor la pantalla recibe iluminación desde la parte posterior. Cuando la rotación del plano de polarización permite que la luz se transmita la pantalla se ilumina; de lo contrario permanece oscura. En el display reflector hay una superficie de reflexión detrás de los cristales, de manera que cuando la luz incide en ella



pasa través del display, se refleja detrás y de ese modo en el display aparece la luz. Cuando la luz que incide no puede pasar a través del display, éste se ve oscuro.

Los LCD están disponibles en muchos segmentos de capas, inclusive en un display de siete segmentos semejante al display LED de siete segmentos. La aplicación de voltajes a los diversos elementos del display hace que donde no hay campo eléctrico en ellos aparezca negro contra el display más claro. Para encender un segmento, se utiliza un campo eléctrico de c.a. de unos 3 a 12 V. El voltaje controlador no debe ser de c.d. sino de c.a. dado que los voltajes de c.d. generan reacciones que destruyen los cristales. Los LCD tiene una respuesta en tiempo relativa, por lo común de 100 a 150 ms. Su consumo de potencia es bajo.

Los LCD también están disponibles como displays de matriz de puntos; incluso, como módulos de LCD con displays de una o más filas de caracteres, por ejemplo se cuenta con un display de dos filas de 40 caracteres.

Se cuenta con controladores de circuitos integrados para controlar los LED. Así, el MC14543B se puede emplear para un display de LCD de siete segmentos. Los controladores se utilizan para cuando la entrada está en código BCD. Un display de matriz de puntos de 5  $\times$  8 se puede controlar mediante el controlador MC145000. Hay displays combinados con controladores. Por ejemplo, el LM018L de Hitachi es un módulo LCD del tipo reflector de 40 caracteres  $\times$  2 líneas con un controlador integrado HD44780 el cual proporciona un rango de características, incluyendo 192 caracteres de 5  $\times$  7 puntos más 8 caracteres de usuario definido y por lo tanto se puede hacer una interfaz directa con un microprocesador de 4 u 8 bits.

Los LED son la forma de display que se utiliza en aparatos operados por baterías como los teléfonos celulares, lavadoras y calculadoras.

## 6.6

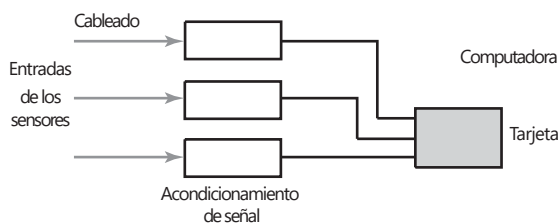
## Sistemas de adquisición de datos

El término **adquisición de datos** (DAQ) suele usarse con frecuencia en sistemas en cuyas entradas desde los sensores están convertidas a la forma digital para procesamiento, análisis y exhibición en una computadora. Por lo tanto, los sistemas contienen sensores, cableado para conectar los sensores para el acondicionamiento de señal para llevar a cabo tal vez la filtración y la amplificación, la adquisición de datos del hardware para desempeñar funciones como conversión de entrada a formato digital y conversión de señales de salida al formato análogo para los sistemas de control, la computadora y el software de adquisición de datos. El software lleva a cabo análisis de las señales de entrada digitales. Dichos sistemas están también diseñados para ejercer funciones de control.

## 6.6.1 Computadora con tarjetas con clavijas

La Figura 6.22 muestra los elementos básicos de un sistema de adquisición de datos que utiliza tarjetas con clavijas con una computadora para el hardware de adquisición de datos. El acondicionamiento de señal anterior a las entradas de la

Figura 6.22 Sistema de adquisición de datos.



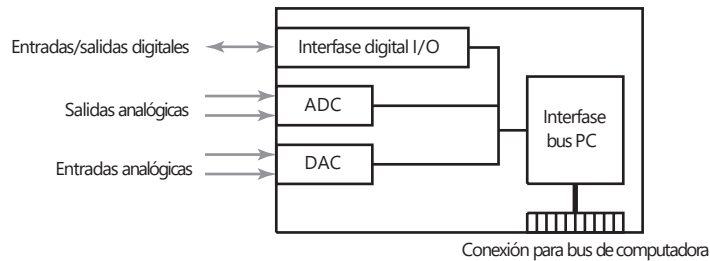
tarjeta depende de los sensores involucrados; es decir, éste puede ser para termopares: amplificación, compensación de juntas frías y linealización; para galgas extensométricas: puente de Wheatstone, suministro de voltaje para el puente y linealización; para RTD: suministro de corriente, circuitería y linealización.

Al seleccionar el tablero DAQ para usar los siguientes criterios se debe tomar en cuenta:

1. ¿Qué tipo de sistema de software de computadora se está usando, es decir Windows, MacOS?
2. ¿Qué tipo de conector es el conectado al tablero, es decir PCMCIA para laptops, Nubus para MacOS, PCI?
3. ¿Cuántas entradas análogas se requerirán y cuáles son sus rangos?
4. ¿Cuántas entradas digitales se requerirán?
5. ¿Qué resolución será requerida?
6. ¿Cuál es la velocidad de muestreo mínima requerida?
7. ¿Se requiere alguna señal de tiempo y conteo?

La Figura 6.23 muestra los elementos básicos de un tablero DAQ. Algunos tableros serán designados sólo para manejar entradas/salidas análogas y otras entradas/salidas digitales.

Figura 6.23 Elementos de tablero DAQ.



Todos los tableros DAQ usan **conductores**, software suministrado por lo general por el fabricante del tablero con un tablero, para comunicar con la computadora y decirle qué ha sido insertado y cómo puede la computadora comunicarse con el tablero. Antes de que se pueda usar un tablero, se deben establecer tres parámetros. Éstas son las direcciones de los canales de entrada y salida, el nivel de interruptor y el canal a ser usado para el acceso de memoria directa. Con los tableros "plug and play" para uso con el software Windows, estos parámetros son instalados por el software; de otra manera, los microinterruptores deben ser instalados en la tarjeta de acuerdo con las instrucciones en el manual provisto con el tablero.

La aplicación del software puede usarse para ayudar en el diseño de los sistemas de medición y los análisis de datos. Como ejemplo del tipo de software de aplicación disponible, LabVIEW es un paquete de software de programación gráfica desarrollado por National Instruments para la adquisición de datos y control de instrumento. Los programas de LabVIEW son llamados **instrumentos virtuales** porque en apariencia y operación imitan instrumentos reales. Un instrumento virtual cuenta con tres partes: un panel frontal que es la interfaz de usuario interactiva y simula el panel frontal de un instrumento que contiene control de mandos, botones para presionar y displays gráficos; un diagrama de bloque que es el código fuente para el programa con la programación hecha de manera gráfica al dibujar líneas entre los puntos de conexión en los iconos seleccionados en la pantalla de la computadora, y representación como icono y conector que puede ofrecer una representación gráfica del instrumento virtual si éste es requerido para su uso en otros diagramas de bloque.

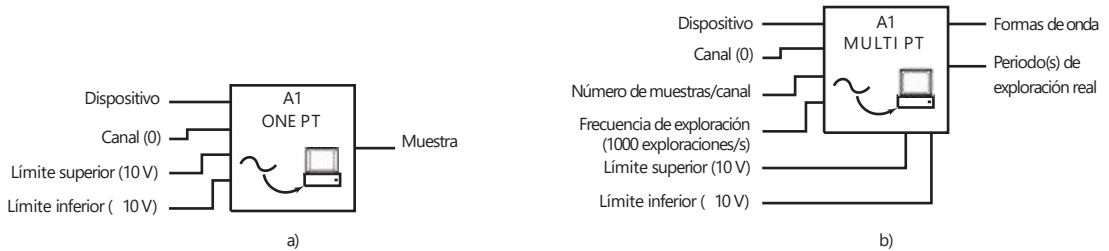


Figura 6.24 Icono de entrada analógica: a) entrada sencilla, b) para muestreo desde una cantidad de canales.

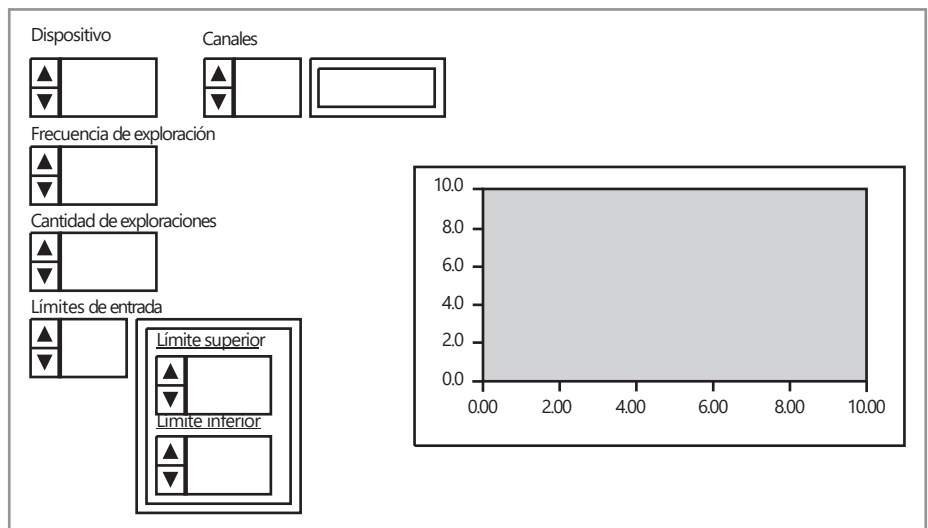
La Figura 6.24a) muestra el icono seleccionado para un instrumento virtual donde una muestra análoga se obtiene desde un canal de entrada específico, una vez seleccionado el icono desde la paleta de Entrada Análoga. El "dispositivo" es el número de dispositivo asignado al tablero de DAQ, el "canal" es la fuente de los datos, una "muestra" es una conversión análoga a digital, y "límite alto" y "límite bajo" son los límites de voltaje que se espera para la señal (el predeterminado es +10V y -10 V y al cambiar estos valores automáticamente cambia la ganancia del amplificador en el tablero de DAQ).

Si queremos una forma de onda para cada canal en una cuerda de canal designada entonces el icono mostrado en la Figura 6.24b) puede ser seleccionado. Para cada canal de entrada se requiere un juego de muestras sobre un periodo, a una velocidad de muestreo específica, y da una onda de salida que muestra cómo la cantidad análoga varía con el tiempo.

Al conectar otros iconos, por decir el icono de arriba, un diagrama de bloque se puede construir y puede tomar las entradas desde una cantidad de canales análogos, muestreándolos en secuencia y desplegando los resultados como una secuencia de gráficos. El tipo de pantalla de panel frontal que tal vez se tiene para una muestra de adquisición DAQ y pantalla se presenta en la Figura 6.25. Al usar las flechas de arriba y de abajo los parámetros pueden cambiarse y se puede observar la pantalla resultante.

Los instrumentos virtuales tienen una gran ventaja sobre los instrumentos tradicionales en los que el vendedor de un instrumento tradicional determina sus características e interfaz mientras que, con un instrumento virtual todos éstos pueden definirse por el usuario y fácilmente cambiarse.

Figura 6.25 Panel frontal.



### 6.6.2 Registradores de datos

El término **registradores de datos** se usa para los sistemas DAQ que se pueden usar desde una computadora. Una vez instalado el programa por una computadora, puede ponerse en una tarjeta de memoria la cual puede ser insertada dentro de un registrador o hacer que alguien baje el programa a ésta desde una computadora, permitiéndole así llevar a cabo las funciones DAQ requeridas.

La Figura 6.26 muestra algunos elementos básicos de un registrador de datos. Dicha unidad puede monitorear las entradas desde una gran cantidad de sensores. Las entradas desde los sensores individuales, después de un acondicionamiento de señal adecuado, son alimentados dentro del multiplexor. El multiplexor se utiliza para seleccionar una señal que luego es alimentada, después de la amplificación, al convertidor analógico - digital. La señal digital luego es procesada mediante un microprocesador. El microprocesador es capaz de desempeñar operaciones aritméticas sencillas, tal vez tomando el promedio de un número de mediciones. La entrada desde el sistema puede ser desplegada en un medidor digital que indica la salida y el número de canal, que se usa para dar un registro permanente con una impresora, almacenado en un disco suave o quizás transferido a una computadora para análisis.

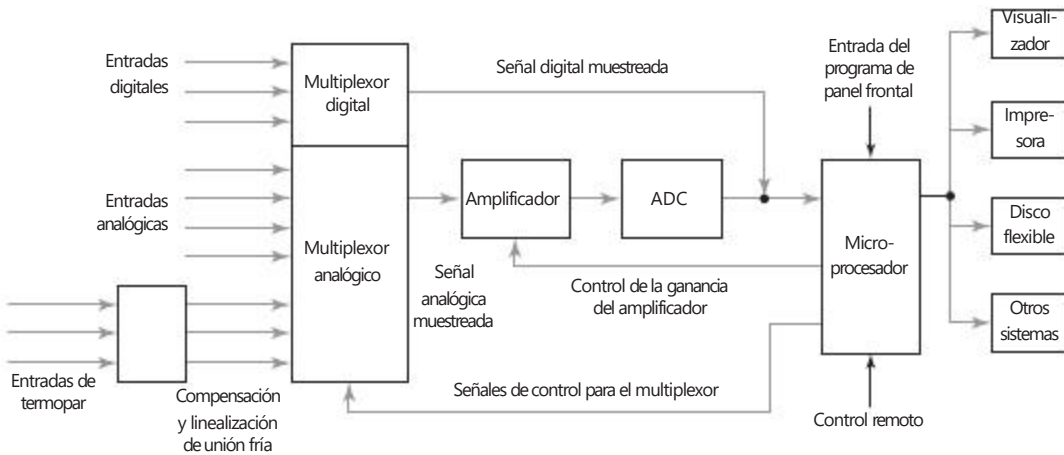


Figura 6.26 Sistema de registro de datos.

Puesto que los registradores de datos a menudo se utilizan con termopares, a menudo son entradas especiales para termopares, éstos ofrecen compensación de unión fría y linealización. El multiplexor puede ser cambiado a cada sensor a su vez y así la salida consiste en una secuencia de muestras. La exploración de las entradas se puede seleccionar al programar el microprocesador para cambiar el multiplexor para mostrar un solo canal, llevar a cabo una exploración sencilla de todos los canales, una exploración continua de todos los canales, o tal vez una exploración periódica de todos los canales, es decir cada 1, 5, 15, 30 o 60 minutos.

Es común que un registrador de datos pueda manejar de 20 a 100 entradas, aunque algunos pueden manejar un número más considerable, tal vez hasta 1000. Éste puede tener una muestra y una conversión de tiempo de  $10^{-5}$ s y utilizarse para realizar quizás 1000 lecturas por segundo. La precisión es por lo común alrededor de 0.01% de la entrada a completa escala y la linealidad es cerca de  $\pm 0.005\%$  de la entrada de la escala completa. Por lo general, la diafonía es de 0.01% de la entrada de la escala completa en cualquier entrada. El término **diafonía** se emplea para describir la interfaz que puede ocurrir cuando un sensor está siendo mostrado como resultado de las señales desde otros sensores.

## 6.7

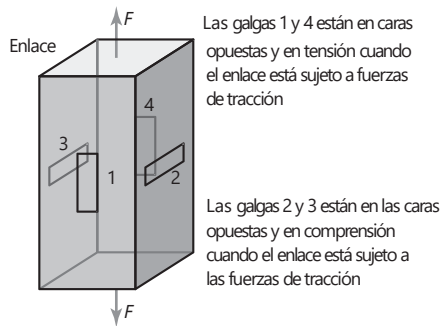
## Sistemas de medición

Los siguientes ejemplos ilustran algunos de los puntos relacionados en el diseño de sistemas de medición para aplicaciones particulares.

### 6.7.1 Celdas de carga para uso como enlace para detectar el levantamiento de la carga

Una celda de carga tipo enlace, de la forma mostrada en la Figura 6.27, tiene cuatro galgas extensométricas adjuntas a su superficie y pueden ser insertadas entre el cable de levantamiento de una carga y la carga para dar una medida de aquella que está siendo levantada. Dos de las galgas están en la dirección del eje longitudinal y dos en dirección transversal. Cuando el enlace está sujeto a fuerzas de tracción, las galgas de los ejes estarán en tensión y las galgas transversales en compresión. Suponga que tiene los criterios del diseño para la celda de carga de una sensibilidad de manera que haya una salida de 30 mV cuando el esfuerzo aplicado al enlace es de 500 MPa. Asuma que las galgas extensométricas pueden tener factores de calibración de 2.0 y resistencias de 100  $\Omega$ .

Figura 6.27 Celda de carga.



Cuando la carga  $F$  se aplica al enlace, luego, puesto que el módulo elástico  $E$  es tensión/tracción y tensión es la fuerza por área de unidad, la galga del eje longitudinal  $\epsilon_l$  es  $F/AE$  y la tracción transversal  $\epsilon_t$  es  $-\nu F/AE$ , donde  $A$  es el área de la sección transversal y  $\nu$  es el coeficiente de Poisson para el material de enlace. Las respuestas de las galgas extensométricas (vea la sección 2.3.2) a estas tracciones son:

$$\frac{dR_1}{R_1} = \frac{dR_4}{R_4} = G\epsilon_l = \frac{GF}{AE}$$

$$\frac{dR_3}{R_3} = \frac{dR_2}{R_2} = G\epsilon_t = -\frac{nGF}{AE}$$

El voltaje de salida del puente de Wheatstone (vea la sección 3.5) se da por

$$V_o = \frac{V_s R_1 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \left[ \frac{dR_1}{R_1} - \frac{dR_2}{R_2} - \frac{dR_3}{R_3} + \frac{dR_4}{R_4} \right]$$

Con  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$  y con  ${}^{\text{TM}}R_1 = {}^{\text{TM}}R_4$  y  ${}^{\text{TM}}R_2 = {}^{\text{TM}}R_3$ , entonces

$$V_o = \frac{V_s}{2R} (dR_1 - dR_2) = \frac{V_s GF}{2AE} (1 + n)$$

Suponga que consideramos el acero para el enlace. Luego las tablas dan  $E$  cercano a 210 GPa y  $\nu$  sobre 0.30. Así, con una tensión ( $=F/A$ ) de 500 MPa se tiene, para galgas extensiométricas con un factor de calibración de 2.0,

$$V_o = 3.09 * 10^{-3} V_s$$

Para un voltaje de puente con un suministro de voltaje de 10 V este sería un voltaje de salida de 30.9 mV. No se requiere amplificación si éste es el único valor de carga requerido; sin embargo, si éste es un valor máximo y se desea determinar cargas por debajo de este nivel, entonces se podría usar un amplificador diferencial. La salida puede desplegarse en un voltímetro de resistencia alta para evitar problemas de carga. Un voltímetro digital puede entonces ser adecuado.

### 6.7.2 Sistema de alarma de temperatura

Se requiere un sistema de medición el cual disparará la alarma cuando la temperatura de un líquido se eleve por arriba de 40° C. El líquido por lo general está a 30° C. La salida desde el sistema debe estar a una señal de 1 V para operar la alarma.

Puesto que la salida debe ser eléctrica y es probable que se requiera una velocidad razonable de respuesta, una posibilidad obvia es un elemento de resistencia eléctrico. Para generar una salida de voltaje el elemento de resistencia podría usarse con un puente Wheatstone. La salida de voltaje será probablemente menos que 1 V para un cambio desde 30 a 40° C, pero un amplificador diferencial podría emplearse para permitir el voltaje que se requiere obtener. Un comparador puede entonces usarse para comparar el valor con el establecido para la alarma.

Suponga que un elemento de níquel se usa. El níquel tiene un coeficiente de temperatura de resistencia de 0.0067/K. Así, el elemento de resistencia es tomado como de 100  $\Omega$  a 0° C luego, la resistencia a 30° C será:

$$R_{30} = R_0(1 + \alpha t) = 100(1 + 0.0067 * 30) = 120.1 \Omega$$

y a 40° C

$$R_{40} = 100(1 + 0.0067 * 40) = 126.8 \Omega$$

Por lo tanto, hay un cambio en la resistencia de 6.7  $\Omega$ . Si este elemento forma un brazo de un puente Wheatstone el cual está balanceado a 30° C, entonces el voltaje de salida  $V_o$  está dado por (vea la sección 3.5)

$$dV_o = \frac{V_s dR_1}{R_1 + R_2}$$

Con el puente balanceado a 30° C y, por decir, si todas las alarmas tienen el mismo valor y suministro de voltaje de 4V, entonces

$$dV_o = \frac{4 * 6.7}{126.8 + 120.1} = 0.109 \text{ V}$$

Para amplificar esto a 1 V se puede usar un amplificador diferencial (vea la sección 3.2.5)

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} (V_2 - V_1)$$

$$1 = \frac{R_2}{R_1} * 0.109$$

Por lo tanto,  $R_2/R_1 = 9.17$  y si se usa una resistencia de entrada de  $1 \text{ k}\Omega$  la resistencia de retroalimentación debe ser  $9.17 \text{ k}\Omega$ .

### 6.7.3 Posición angular de una rueda de poleas

Un potenciómetro se utiliza para monitorear la posición angular de una rueda de poleas. Considere los artículos que puedan necesitarse para permitir ahí una salida para un registrador de  $10 \text{ mV}$  por grado, si el potenciómetro tiene una rotación angular de escala completa de  $320^\circ \text{ C}$ .

Cuando el voltaje suministrado  $V_s$  está conectado a través del potenciómetro necesitaremos salvaguardarlo al igual que el cableado contra las posibles corrientes altas para que así una resistencia  $R_s$  pueda ponerse en serie con el potenciómetro  $R_p$ . El voltaje total que cae a través del potenciómetro es, por lo tanto,  $V_s R_p / (R_s + R_p)$ . Para un ángulo  $\theta$  con un potenciómetro con una deflexión angular de amplia escala de  $\theta$  obtendremos una salida desde el potenciómetro de

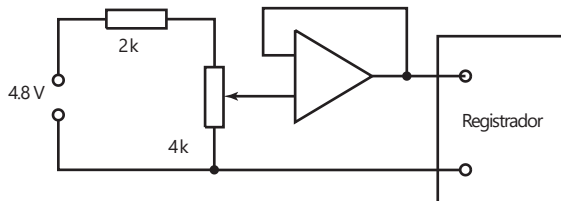
$$V_u = \frac{\theta}{\theta_F} \frac{V_s R_p}{R_s + R_p}$$

Suponga que se considera un potenciómetro con una resistencia de  $4 \text{ k}\Omega$  y sea  $R_s$  tener  $2 \text{ k}\Omega$ . Entonces, para  $1 \text{ mV}$  por grado se tiene

$$0.01 = \frac{1}{320} \frac{4V_s}{4 + 2}$$

Por consiguiente, se podría necesitar un suministro de voltaje de  $4.8 \text{ V}$ . Para prevenir el efecto de la carga del potenciómetro por la resistencia del registrador, se puede utilizar un seguidor de voltaje de circuito. De esta manera, el circuito puede ser de la forma mostrada en la Figura 6.28.

Figura 6.28 Monitor de rueda de poleas.

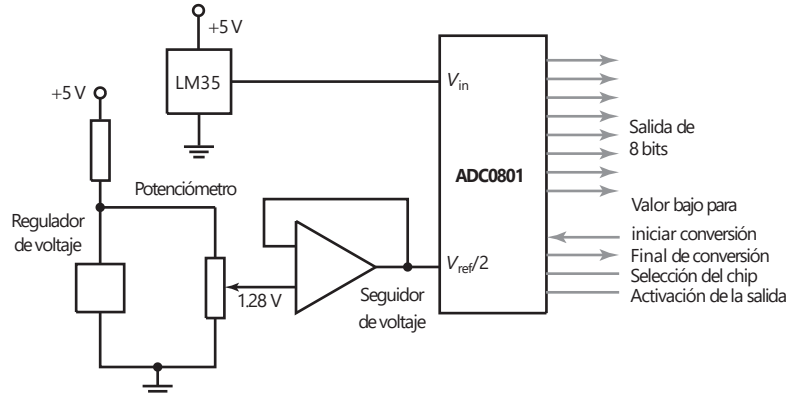


### 6.7.4 Medición de temperatura para dar una salida binaria

Considere el requerimiento para un sistema de medición de temperatura en el rango  $0$  a  $100^\circ \text{ C}$  el cual dará una salida binaria de  $8$  bits con un cambio en  $1$  bit correspondiente a un cambio de temperatura de  $1^\circ \text{ C}$ . La salida está prevista para la entrada a un microprocesador como parte de un sistema de control de temperatura.

Se requiere un sensor de temperatura lineal y de esta manera se puede utilizar el termotransistor LM35 (vea la sección 2.9.4). El LM35 da una salida de  $10 \text{ mV}/^\circ \text{ C}$  cuando éste tiene un suministro de voltaje de  $5 \text{ V}$ . Si se aplica la salida desde el LM35 a un convertidor analógico a digital de  $8$  bits, entonces se puede obtener una salida digital. Se necesita la resolución del ADC para estar en  $10 \text{ mV}$  de manera que cada paso de  $10 \text{ mV}$  generará un cambio en la salida de  $1$  bit. Suponga que se utiliza un ADC de aproximaciones sucesivas, por ejemplo ADC0801; entonces, esto requiere una entrada de un voltaje de referencia que cuando se subdivide  $2^8 = 256$  bits da  $10 \text{ mV}$  por bit. De esta manera se requiere un voltaje de referencia de  $2.56 \text{ V}$ . Esto para obtener la entrada de voltaje de referencia al ADC0801 tiene que ser  $V_{ref}/2$  y por lo tanto se requiere de un voltaje de

Figura 6.29 Sensor de temperatura.



entrada precisa de 1.28V. Dicho voltaje se puede obtener mediante el uso de un circuito potenciométrico a través del suministro de 5 V con un voltaje seguidor de corriente para evitar los problemas del efecto de la carga. Puesto que el voltaje debe permanecer estable a 1.28 V, aun si el suministro de voltaje 5 V fluctúa, es probable que se requiera un regulador de voltaje, por ejemplo un regulador de voltaje de 2.45 V ZN458/B. Así, el circuito puede ser como en la Figura 6.29.

## 6.8

### Prueba y calibración

La prueba de instalación de un sistema de medición se divide en tres etapas:

#### 1 Prueba de preinstalación

Ésta es la prueba de cada instrumento para su correcta calibración y operación antes de que éste sea instalado.

#### 2 Prueba de tuberías y cable

En el caso de líneas neumáticas esto implica, antes de la conexión de los instrumentos, soplar a través de ellos aire limpio y seco antes de la conexión y probarlos a presión para asegurar que no haya fugas. Con las tuberías de proceso, toda la tubería deberá ser llenada y probada antes de la conexión de instrumentos. Con los cables para el instrumento, se debe revisar toda la continuidad y la resistencia del aislamiento antes de la conexión de cualquier instrumento.

#### 3 Prueba prefuncional

Esto implica probar que la instalación esté completa, todos los componentes de instrumentos en orden operacional completo cuando se interconectan y todos los paneles de la sala de control o funciones de pantalla.

### 6.8.1 Calibración

La **calibración** consiste en comparar la salida de un sistema de medición y sus subsistemas contra los estándares de precisión conocidos. Los estándares pueden ser otros instrumentos que se mantienen especialmente para los deberes de calibración o algunos elementos de valores estándares definidos. En muchas compañías algunos instrumentos y artículos como resistores estándar y celdas se mantienen en un departamento de estándares de la compañía y se utilizan sólo para propósitos de calibración. La relación entre la calibración de un instrumento de uso cotidiano y los estándares nacionales se describe a continuación.

- 1 Se utilizan estándares nacionales para calibrar estándares para centros de calibración.
- 2 Los estándares del centro de calibración se utilizan para calibrar estándares para fabricantes de instrumento.



- 3 Se utilizan instrumentos estandarizados de los fabricantes de instrumento para proveer estándares en la compañía.
- 4 Los estándares de la compañía se usan para calibrar instrumentos de proceso.

Existe una cadena de trazabilidad desde el instrumento usado en un proceso hasta el retorno a los estándares nacionales. Los siguientes son algunos ejemplos de procedimientos de calibración que se pueden emplear en una compañía:

- 1 *Voltímetros*

Éstos se pueden revisar contra los voltímetros estándar o celdas estándar, lo que da estándares de fem.

- 2 *Amperímetros*

Éstos pueden ser revisados contra los amperímetros estándar.

- 3 *Factor de calibración de las galgas extensométricas*

Esto se puede revisar mediante la toma de una muestra de galgas de un lote y la aplicación de tracciones medidas a ellas cuando se montan en alguna pieza de prueba. Los cambios de resistencia se pueden medir y por lo tanto calcular el factor de calibración.

- 4 *Circuitos del puente de Wheatstone*

La salida de un puente de Wheatstone se puede revisar al introducir una resistencia en uno de los brazos.

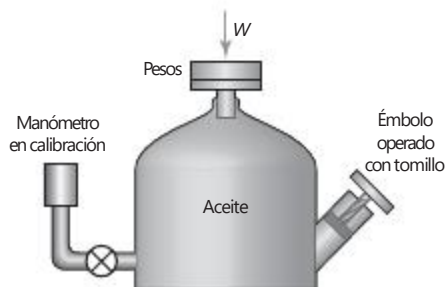
- 5 *Celdas de carga*

Para las celdas de carga de baja capacidad, las cargas de peso muerto se pueden usar mediante el uso de pesos estándar.

- 6 *Sensores de presión*

Los sensores de presión se pueden calibrar mediante el uso de un probador de peso muerto (Figura 6.30). Las presiones de calibración son generadas al añadir pesos estándar  $W$  a la charola del pistón. Una vez puestos los pesos en la charola, un émbolo operado con tornillo es forzado a introducirse en el aceite hidráulico en la cámara para subir el ensamble de peso del pistón. La presión de calibración es entonces  $W/A$ , donde  $A$  es el área transversal del pistón. De manera alternativa el probador de peso muerto se puede utilizar para calibrar una galga de presión y ésta se puede usar para calibrar las otras.

Figura 6.30 Calibración de peso muerto para galgas de presión.



- 7 *Sensores de temperatura*

Éstos se pueden calibrar mediante la inmersión en una fundición de un metal puro o en agua. Luego la temperatura de la sustancia se reduce lentamente y se obtiene un registro de tiempo-temperatura. Cuando la sustancia cambia su estado de líquido a sólido, la temperatura permanece constante. Su valor puede encontrarse en tablas y, por lo tanto, se obtiene una temperatura de referencia precisa para la calibración. De manera alternativa, se puede usar la temperatura de un líquido en ebullición. Sin

embargo, el punto de ebullición depende de la presión atmosférica y las correcciones deben aplicarse si éste difiere de la presión atmosférica estándar. De forma alternativa, en la compañía, las lecturas dadas por el sistema de medición se pueden comparar con las del termómetro estándar.

## Resumen

Un punto general que se debe tomar en cuenta cuando se reúne cualquier sistema de medición es el **efecto de la carga**, es decir el efecto de conectar una carga a través de las terminales de salida de cualquier elemento de un sistema de medición.

Los **indicadores** dan una indicación visual instantánea de la variable sensible, mientras los **grabadores** registran la señal de salida en un lapso de tiempo y dan un registro permanente de forma automática.

El término **adquisición de datos** (DAQ) tiende a usarse con frecuencia para sistemas en cuyas entradas desde los sensores son convertidos en una forma digital para procesar, analizar y desplegar por una computadora. El término **registrador de datos** se utiliza para los sistemas DAQ que se pueden usar lejos de la computadora.

Los **instrumentos virtuales** son instrumentos generados por software, en apariencia y operación imitan los instrumentos reales.

Probar una instalación de sistema de medición tiene tres etapas: prueba de preinstalación, prueba de tubería y cableado, prueba prefuncional.

La **calibración** consiste en comparar la salida de un sistema de medición y sus subsistemas contra estándares de precisión conocidos.

## Problemas

- 6.1 Explique el significado de los siguientes términos tomados de las especificaciones de los sistemas de exhibición:
  - a) Registrador: banda muerta  $\pm 0.2\%$  de extensión.
  - b) El disco duro tiene dos discos con cuatro cabezas leer/escribir, una para cada superficie de los discos. Cada superficie tiene 614 pistas y cada pista tiene 32 sectores.
  - c) Registrador de datos: número de entradas 100, diafonía en cualquier salida 0.01% de la entrada de escala amplia.
  - d) El osciloscopio de doble rayo: deflexión vertical con dos canales idénticos, ancho de banda d.c. a 15 MHz, factor de deflexión de 10 mV/div a 20 V/div en 11 pasos calibrados, tiempo base de 0.5  $\mu$ s/div a 0.5 s/div en 19 pasos calibrados.
- 6.2 Explique los problemas del efecto de la carga cuando un sistema de medición está siendo ensamblado desde un sensor, acondicionamiento de señal y pantalla.
- 6.3 Sugiera una unidad de pantalla que se pueda usar para dar:
  - a) Un registro permanente de la salida desde un termopar.
  - b) Una pantalla que permita la presión de aceite en un sistema a ser observado.
  - c) Un registro para ser mantenido en la salida digital desde un microprocesador.
  - d) Los voltajes transitorios que resultan del monitoreo de las cargas en una aeronave durante la simulación de turbulencia.

- 6.4 Una celda de carga cilíndrica de la forma mostrada en la Figura 2.32, tiene cuatro galgas extensométricas adjuntas a su superficie. Dos de las galgas están en dirección de circunferencia y dos en la dirección de ejes longitudinales. Cuando el cilindro está sujeto a una carga de compresión, las galgas axiales estarán en compresión mientras las que están en circunferencia estarán en tensión. Si el material del cilindro tiene un área transversal  $A$  y un módulo elástico  $E$ , entonces una fuerza  $F$  que actúa en el cilindro dará una acción de tracción sobre las galgas axiales de  $-F/AE$  y en las galgas de la circunferencia de  $+vF/AE$ , donde  $v$  es el coeficiente de Poisson para el material. Diseñe un sistema de medición completo que utilice celdas de carga, que se pueden usar para monitorear la masa de agua en un tanque. El tanque por sí mismo tiene una masa de 20 kg y el agua al nivel requerido de 40 kg. La masa es para ser monitoreada a una precisión de  $\pm 0.5$  kg. Estas galgas extensométricas tienen un factor de calibración de 2.1 y son todas de la misma resistencia de  $120.0 \text{ } \Omega$ . Para todos los demás artículos, especifique lo que requiere su diseño. Si utiliza acero suave para el material de celda de carga, entonces el módulo de tensión puede tomar 210 GPa y el coeficiente de Poisson es 0.30.
- 6.5 Diseñe un sistema de medición completo que incluya el uso de un termopar para determinar la temperatura del agua en un calentador y dar una indicación visual en un medidor. La temperatura estará en el rango 0 a  $100^\circ \text{C}$  y se requiere una precisión de  $\pm 1\%$  de la lectura de escala completa. Especifique los materiales a ser usados para el termopar y todos los demás artículos necesarios. Al diseñar, debe tomar en cuenta los problemas de una unión fría y la no linealización. Probablemente necesitará consultar las tablas de termopar. Los siguientes datos están tomados de dichas tablas, la unión fría es de  $0^\circ \text{C}$ , y puede usarse como guía:

Materiales	Fem en mV a				
	20° C	40° C	60° C	80° C	100° C
Cobre-constantán	0.789	1.611	2.467	3.357	4.277
Cromo-constantán	1.192	2.419	3.683	4.983	6.317
Hierro-constantán	1.019	2.058	3.115	4.186	5.268
Cromo-alumel	0.798	1.611	2.436	3.266	4.095
Platino-10% Rh, Pt	0.113	0.235	0.365	0.502	0.645

- 6.6 Diseñe un sistema de medición que pueda usarse para monitorear las temperaturas, de el orden de  $100^\circ \text{C}$ , en posiciones esparcidas en una cantidad de puntos en una planta y presente los resultados en un panel de control.
- 6.7 Un diseño sugerido para la medición del nivel líquido en un recipiente incluye un flotador cuyo movimiento vertical dobla un voladizo. El grado de dobléz de un voladizo, por lo tanto, se toma como una medida del nivel del líquido. Cuando una fuerza  $F$  se aplica al extremo libre de un voladizo de longitud  $L$ , la tracción en su superficie a una distancia  $x$  desde el extremo sujeto se da por:

$$\text{tracción} = \frac{6(L - x)}{wt^2E}$$

donde  $w$  es el ancho del voladizo,  $t$  es el grosor y  $E$  el módulo elástico del material. Las galgas extensométricas se usan para monitorear el doblez del voladizo con dos galgas extensométricas adjuntas de forma longitudinal a la superficie más alta y dos de manera longitudinal a la superficie más baja. Las galgas son entonces incorporadas dentro de cuatro galgas de puente de Wheatstone y el voltaje de salida, después de su amplificación posible se toman como medida del nivel del líquido. Determinar las especificaciones requeridas para los componentes de este sistema si va a haber cambio en el nivel de salida de 10 mV por 10 cm.

- 6.8 Diseñe un sistema de medición estático basado en un sensor que incluye un diafragma de 40 mm de diámetro a través de los cuales hay una diferencia de presión máxima de 500 MPa. Para un diafragma donde la deflexión central  $y$  es mucho más pequeña que el grosor  $t$  del diafragma.

$$y \ll \frac{3r^2P(1 - \nu^2)}{16Et^3}$$

donde  $r$  es el radio del diafragma,  $P$  la diferencia de presión,  $E$  el módulo de elasticidad y  $\nu$  el coeficiente de Poisson. Explique cómo la deflexión  $y$  se convertirá en una señal que puede desplegarse en un medidor.

- 6.9 Sugiera los elementos que pueden considerarse para los sistemas de medición a usar:
- Monitoree la presión en una línea de presión de aire y presente el resultado en un dígito, no se requiere de mucha exactitud.
  - Monitoree de manera continua y registre la temperatura de una habitación con una exactitud de  $\pm 1^\circ\text{C}$ .
  - Monitoree el peso de camiones que pasan sobre una plataforma de peso.
  - Monitoree la velocidad angular de la rotación de un eje.

# Parte III

## Actuación





## Capítulo siete

# Sistemas de actuación neumática e hidráulica

### Objetivos

Después de estudiar este capítulo, el lector debe ser capaz de:

- Interpretar los dibujos de sistemas y diseñar sistemas sencillos para los sistemas de control secuencial, entre ellos las válvulas hidráulicas/neumáticas y cilindros para control de dirección.
- Explicar los principios de las válvulas de control de proceso, sus características y dimensionamiento.

### 7.1

#### Sistemas de actuación

Los **sistemas de actuación** son los elementos de los sistemas de control que transforman la salida de un microprocesador o un controlador en una acción de control para una máquina o dispositivo. Por ejemplo, puede ser necesario transformar una salida eléctrica del controlador en un movimiento lineal que desplaza una carga. Otro ejemplo sería cuando la salida eléctrica del controlador debe transformarse en una acción que controle la cantidad de líquido que pasa por una tubería.

En este capítulo se analizan los sistemas de actuación neumáticos e hidráulicos. El término **neumática** se utiliza cuando se emplea el aire comprimido e **hidráulica** para líquidos, por lo común aceite. En el Capítulo 8 se analizan los sistemas de actuación mecánicos y en el Capítulo 9 los sistemas de actuación eléctricos.

### 7.2

#### Sistemas neumáticos e hidráulicos

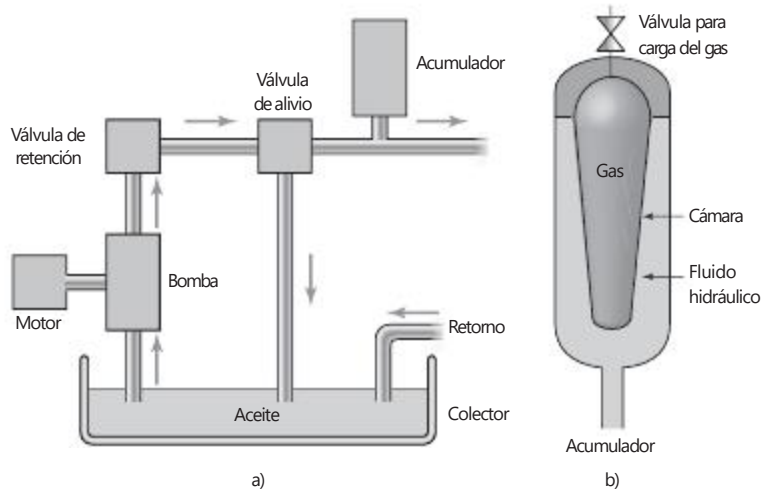
Con frecuencia las señales neumáticas se utilizan para manejar elementos finales de control, incluso cuando el sistema de control es eléctrico. Esto se debe a que con esas señales es posible accionar válvulas grandes y otros dispositivos de control que requieren mucha potencia para mover cargas considerables. La principal desventaja de los sistemas neumáticos es la compresibilidad del aire. Los sistemas hidráulicos se usan en dispositivos de control de mucho mayor potencia, pero son más costosos que los sistemas neumáticos y hay riesgos asociados con fugas de aceite que no ocurren con fugas de aire.

La presión atmosférica varía con la localización y el tiempo, pero en los neumáticos por lo general se toma para ser  $10^5$  Pa. A esta presión se le conoce como 1 barra.

#### 7.2.1 Sistemas hidráulicos

Con un sistema hidráulico se suministra aceite presurizado mediante una bomba de motor eléctrico. Se bombea el aceite desde un colector a través de una válvula de retención y un acumulador para regresar al colector. En la Figura 7.1a) se muestra el arreglo. Se incluye una válvula de descarga de presión si ésta sube por arriba del nivel de seguridad. La válvula sin retorno es

Figura 7.1 a) Suministro de energía hidráulica, b) acumulador.



para evitar que el aceite impulsado se regrese por la bomba y el acumulador es para alisar fluctuaciones en la presión del aceite de salida. En esencia, el acumulador es sólo un contenedor en el cual el aceite se mantiene bajo presión contra una fuerza externa. La Figura 7.1b) muestra la forma de uso más común en la cual el aceite es presurizado y consiste en gas dentro de una bolsa en la cámara que contiene el fluido hidráulico; un tipo más antiguo contiene un muelle pistón. Si hay presión de aceite, entonces la bolsa se contrae, aumenta el volumen que el aceite puede ocupar y así reduce la presión. Si la presión de aceite cae, la bolsa se expande para reducir el volumen ocupado por el aceite y así aumenta su presión.

Las bombas hidráulicas que a menudo se utilizan son la bomba de engranajes, la bomba de vástago y la bomba de pistón. La **bomba de engranajes** consiste en dos ruedas de engranaje de enlace cerrado que giran en direcciones opuestas (Figura 7.2a). El fluido entra de manera forzada a través de la bomba y queda atrapado entre los dientes del engranaje al girar la carcasa y de esta manera es transferido desde el puerto de entrada para ser descargado al puerto de salida. Estas bombas se usan bastante por ser baratas y resistentes. Por lo general se operan a una presión por debajo de 15 MPa a 2400 revoluciones por minuto. La capacidad máxima de flujo es alrededor de  $0.5\text{m}^3/\text{min}$ . Sin embargo, la fuga ocurre entre los dientes y la cubierta y entre los dientes engranados, esto limita su eficiencia. La **bomba de vástago** tiene resortes deslizantes en vástagos ranurados en un rotor conductor (Figura 7.2b). A medida que el rotor gira, los vástagos siguen los contornos de la cubierta. Esto da como resultado un fluido que se queda atrapado entre los vástagos sucesivos y de la cubierta y se transportan desde el puerto de entrada hasta el puerto de salida. La fuga es menor que con la bomba de engranes. Las **bombas de pistones** que se utilizan en hidráulica pueden tener una variedad de formas. Con la **bomba de pistón radial** (Figura 7.2c), un bloque cilíndrico gira alrededor de la leva estacionaria y esto ocasiona que pistones huecos, con retorno por muelle, se muevan adentro y afuera. El resultado es que el fluido se extrae desde el puerto de entrada y se transporte para la expulsión desde el puerto de descarga. La **bomba de pistón axial** (Figura 7.2c) tiene pistones que se mueven en forma axial en lugar de radialmente. Los pistones están arreglados a manera de eje en un bloque cilíndrico rotatorio y hechos para mover por

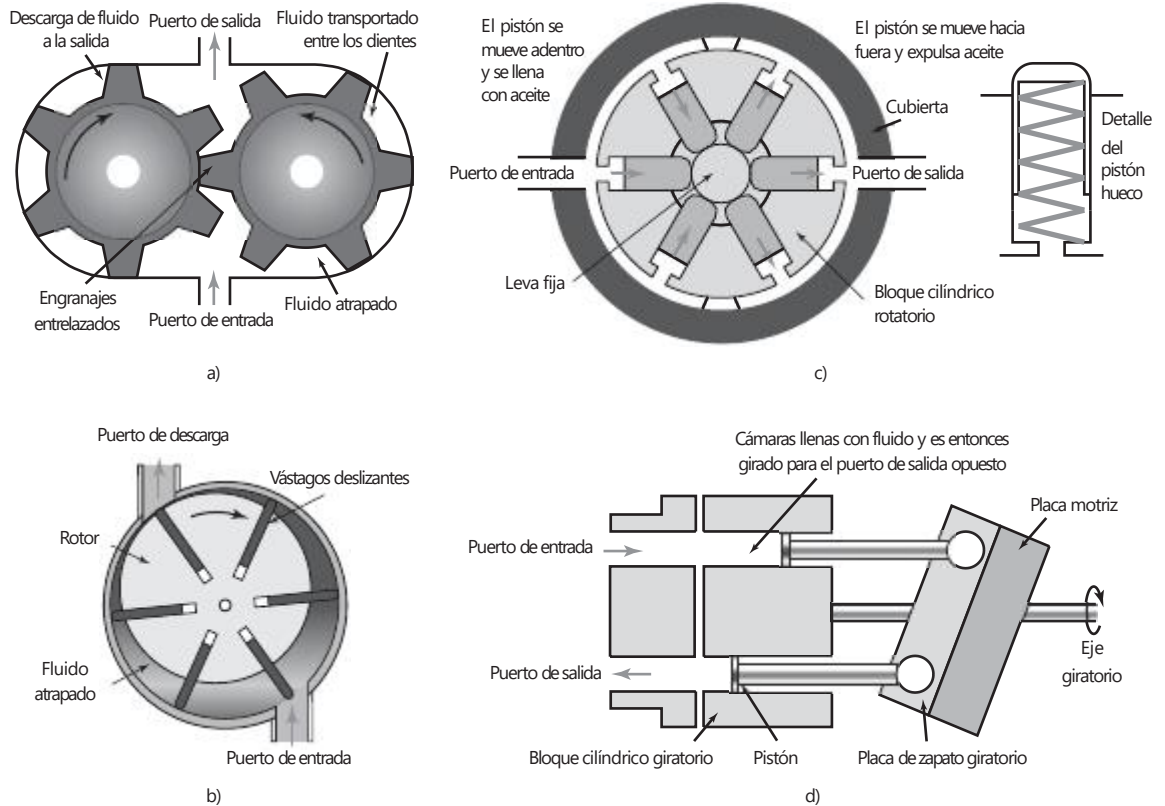


Figura 7.2 a) Bomba de engranajes, b) bomba de vástago, c) bomba de pistón radial, d) bomba de pistón axial placa motriz.

contacto con la placa motriz. Esta placa está en ángulo al eje conductor y de esta manera a medida que el eje gira se mueven los pistones, de manera que el aire es absorbido cuando el pistón está en posición opuesta al puerto de entrada y es expulsado cuando está en posición opuesta al puerto de descarga. Las bombas de pistones tienen una alta eficiencia y se pueden emplear a presiones hidráulicas más altas que las bombas de engranajes o las bombas de vástago.

### 7.2.2 Sistemas neumáticos

Con un suministro de energía neumática (Figura 7.3) un motor eléctrico impulsa un compresor de aire. La entrada de aire al compresor es probable que se filtre y a través de un silenciador se reduzca el nivel del ruido. Una válvula de descarga de presión ofrece protección contra la presión en el sistema que surge sobre un nivel seguro. Puesto que el compresor de aire aumenta la temperatura del aire, es probable que haya un sistema de enfriamiento para quitar la contaminación y el agua del aire con un filtro con una trampa de agua. Un recipiente de aire aumenta el volumen del aire en el sistema y suaviza cualquier fluctuación de presión a corto plazo.

Por lo general, los compresores de aire que se utilizan son en los que sucesivos volúmenes de aire son aislados y luego comprimidos. La Figura 7.4a) muestra un compresor recíprocante vertical de acción y etapa sencillas. En el



Figura 7.3 Suministro de energía neumática.

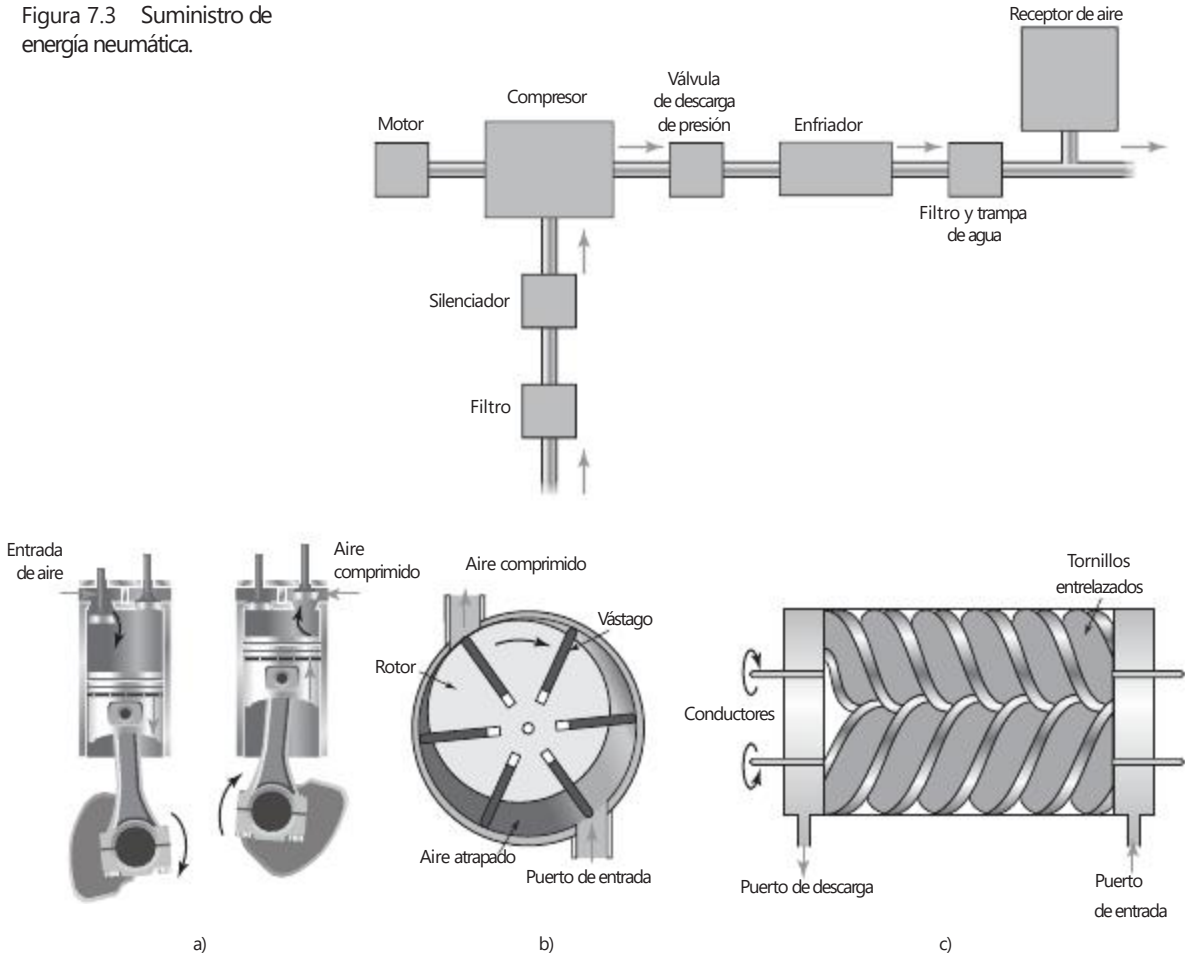


Figura 7.4 a) Compresor recíprocante vertical de acción y etapa sencillas, b) compresor de vástago rotatorio, c) compresor rotativo.

aire de combustión interna, el pistón descendiente provoca que el aire sea succionado dentro de la cámara a través de la válvula inyectora de presión y cuando el pistón comienza a elevarse de nuevo, el aire atrapado obliga a la válvula de entrada a cerrarse y así a comprimirse el aire. Cuando la presión del aire ha subido lo suficiente, la válvula reductora de presión se abre y el aire atrapado fluye dentro del sistema de aire comprimido. Una vez que el pistón ha alcanzado la parte superior del centro muerto éste comienza a descender y el ciclo se repite. Tal compresor es conocido como de **simple acción** puesto que un pulso de aire se produce por el golpe; para producir pulsos de aire se diseñan compresores de **doble acción** tanto en los golpes de pistón superiores como inferiores. A esto también se le llama **etapa sencilla** puesto que el compresor va directamente desde la presión atmosférica hasta la presión requerida en una sola operación. Para la producción de aire comprimido a unas cuantas barras más, se usan dos o más pasos. Es común que se utilicen dos etapas para que la presión suba de 10 a 15 barras aproximadamente y más etapas para presiones más altas. Por lo tanto, con un compresor

de dos etapas tal vez se tenga el primer paso tomando aire a una presión atmosférica y comprimirla a, por decir, 2 barras y luego la segunda etapa comprimir este aire a 7 barras, por ejemplo. Los compresores de pistón reciprocante se pueden emplear como un compresor de etapa sencilla para producir presiones de aire por arriba de 12 barras y como un compresor multietapas por arriba de 140 barras. Por lo general, las entregas de flujo de aire oscilan en un rango de cerca de  $0.02 \text{ m}^3/\text{min}$  de entrega de aire libre a cerca de  $600 \text{ m}^3/\text{min}$  de entrega de aire libre; luego, aire libre es el término que se usa para el aire a presión atmosférica normal.

Otra forma de compresor es el **compresor rotativo de vástago**. Éste cuenta con un rotor montado excéntricamente en una cámara cilíndrica (Figura 7.4b). El rotor tiene cuchillas, los vástagos que son libres de deslizarse en ranuras radiales con rotación que provocan que los vástagos sean conducidos hacia fuera contra las paredes del cilindro. A medida que el rotor gira, el aire es atrapado en cavidades formadas por los vástagos y conforme el rotor gira, las cavidades se vuelven más pequeñas y el aire se comprime. Los paquetes comprimidos de aire son por lo tanto descargados desde el puerto de descarga. Los compresores de vástago rotatorio de etapa sencilla, por lo común se pueden usar para presiones por arriba de 800 kPa con tasas de flujo de  $0.3$  a  $30 \text{ m}^3/\text{min}$  de entrega de aire libre.

Otra forma de compresor es el **compresor helicoidal rotativo** (Figura 7.4c). Éste tiene dos tornillos entrelazados que giran en direcciones opuestas. Mientras los tornillos giran, el aire es atraído hacia la cubierta a través del puerto de entrada y dentro del espacio entre los tornillos. Luego este aire atrapado se mueve a lo largo de la longitud de los tornillos y es comprimido a medida que el espacio se vuelve progresivamente más pequeño, y sale del puerto de descarga. Es común que los compresores rotatorios de etapa sencilla se puedan utilizar para presiones por arriba de 1000 kPa con tasas de flujo entre  $1.4$  y  $60 \text{ m}^3/\text{min}$  de entrega de aire libre.

### 7.2.3 Válvulas

Las válvulas se usan con sistemas neumáticos e hidráulicos para dirigir y regular el flujo del fluido. Existen básicamente dos formas de válvula, las de **posición finita** y las de **posición infinita**. Las válvulas de posición finita sólo permiten o bloquean el flujo del fluido y así pueden usarse para encender o apagar actuadores. Se pueden emplear para el control direccional del flujo de una trayectoria a otra y así desde un actuador a otro. Las válvulas de posición infinita son capaces de controlar el flujo en cualquier lado entre completamente encendido o apagado, y de esta manera se usan para controlar las fuerzas de variación o la tasa de flujo del fluido para una situación de control de proceso.

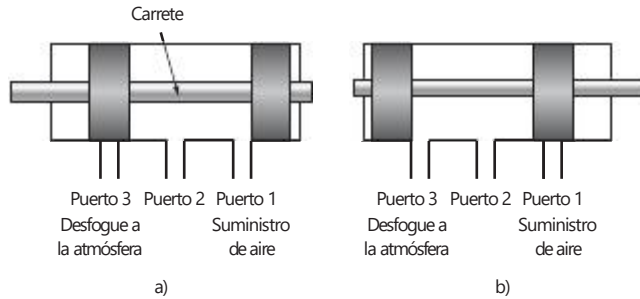
## 7.3

### Válvulas para control de dirección

En los sistemas neumáticos e hidráulicos se utilizan válvulas de control direccionales para controlar el sentido del flujo del fluido que pasa por un sistema. Su función no es modificar el gasto de un fluido, son dispositivos para abrir o cerrar del todo, es decir, abierto/cerrado (on/off). Estas válvulas se utilizan con frecuencia en el diseño de sistemas de control en secuencia (vea más adelante en este capítulo), y se activan para cambiar la dirección de flujo de un fluido mediante señales mecánicas, eléctricas o de presión de fluidos.

Un tipo muy común de válvula de control de dirección es la **válvula de carrete**. Dentro del cuerpo de la válvula se desplaza un carrete en forma

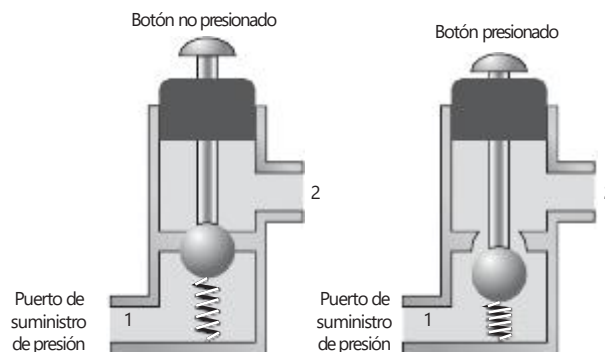
Figura 7.5 Válvula de carrete.



horizontal para controlar el flujo. La Figura 7.5 muestra una forma de esta válvula. En a) la fuente de alimentación de aire está conectada al puerto 1 y el puerto 3 está cerrado. Así, es posible presurizar el dispositivo conectado al puerto 2. Cuando el carrete se mueve a la izquierda (Figura 7.5b) se interrumpe el suministro de la fuente de alimentación y el puerto 2 se conecta al puerto 3. Éste es un desfogue a la atmósfera, por lo que la presión de aire del sistema vinculado al puerto 2 sale por ahí. Así, el desplazamiento del carrete permite que el aire fluya primero dentro del sistema, para luego invertirlo y salir del sistema. Las **válvulas giratorias de carrete** tienen un carrete giratorio que al dar vuelta abre y cierra los puertos de manera similar.

Otra modalidad común de válvula de control direccional es la **válvula de vástago**. La Figura 7.6 muestra un ejemplo. En condiciones normales esta válvula está cerrada, y no hay conexión entre el puerto 1 (con el cual está conectada la fuente de presión) y el puerto 2 (conectado con el sistema). Para controlar el flujo en las válvulas de vástago se utilizan bolas, discos o conos junto con los asientos de los vástagos. En la figura se muestra una bola. Cuando se oprime el botón, la bola sale de su asiento y hay flujo como resultado de la conexión del puerto 1 con el puerto 2. Cuando el botón se deja de oprimir, el resorte obliga a la bola a volver a su asiento y el flujo se interrumpe.

Figura 7.6 Válvula de vástago.

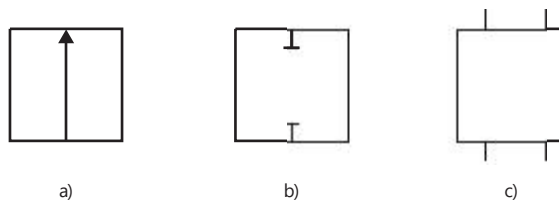


### 7.3.1 Símbolos de válvulas

Las diferentes posiciones de conexión de las válvulas de control se representan mediante un cuadrado. Por ejemplo, en la válvula de vástago de la Figura 7.6 hay dos posiciones: una cuando el botón no se oprime y otra cuando se oprime. Así, la válvula de dos posiciones tendrá dos cuadrados; una de tres, tendrá tres cuadrados, etcétera. Las flechas (Figura 7.7a) indican la dirección del flujo en

cada una de las posiciones; las líneas con tope corresponden a líneas de flujo cerradas (Figura 7.7b). En la posición inicial de la válvula, las conexiones con los puertos se indican en la Figura 7.7c); en ella, la válvula tiene cuatro puertos. Éstos se identifican con un número o una letra, de acuerdo con su función. Los puertos se identifican con 1 (o P) para el suministro de presión, 3 (o T) para el puerto de regreso hidráulico, 3 o 5 (R o S) para los puertos de desfogue y 2 o 5 (B o A) para los puertos de salida.

Figura 7.7 a) Trayectoria del flujo, b) interrupción del flujo, c) conexiones iniciales.



La Figura 7.8a) ofrece ejemplos de algunos de los símbolos que se emplean para indicar las diferentes maneras en que las válvulas pueden actuar. Más de uno de estos símbolos se puede utilizar con el símbolo de válvula. Como se presenta en la ilustración, la Figura 7.8b) muestra el símbolo para dos puertos de la válvula de asiento de dos posiciones de la Figura 7.6. Observe que uno de los dos puertos de la válvula de asiento de dos posiciones podría describirse como una válvula 2/2, el primer número indica el número de puertos y el segundo el número de posiciones. La válvula funciona al presionar un botón y un resorte.

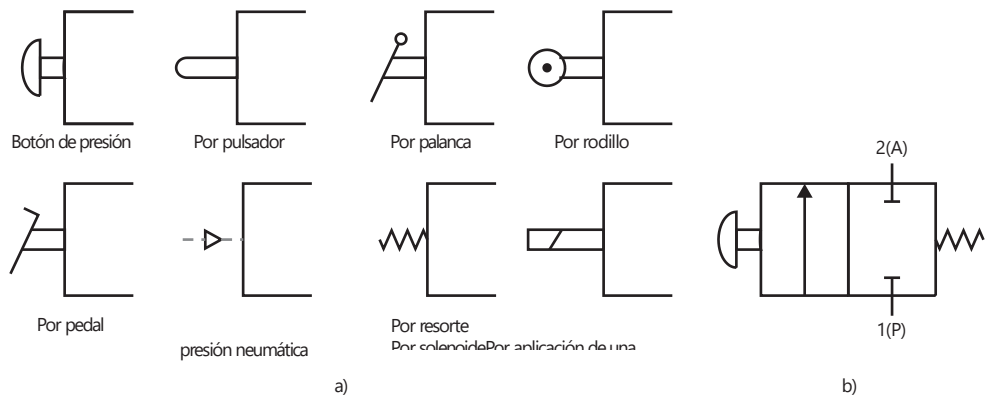


Figura 7.8 Símbolos de modalidades de actuadores de válvulas.

Para más información, observe la Figura 7.9 que muestra una válvula de carrete operada por solenoide y su símbolo. La válvula se acciona mediante una corriente que pasa a través de un solenoide y regresa a su posición original con la ayuda de un resorte.

En la Figura 7.10 hay un símbolo para una válvula 4/2. Las conexiones se observan en el estado inicial, es decir, 1(P) se conecta a 2(A) y 3(R) cerrados. Cuando se activa el solenoide, éste ofrece el estado indicado por los símbolos empleados en el cuadro al cual está adjunto, por ejemplo ahora se tiene 1(P)

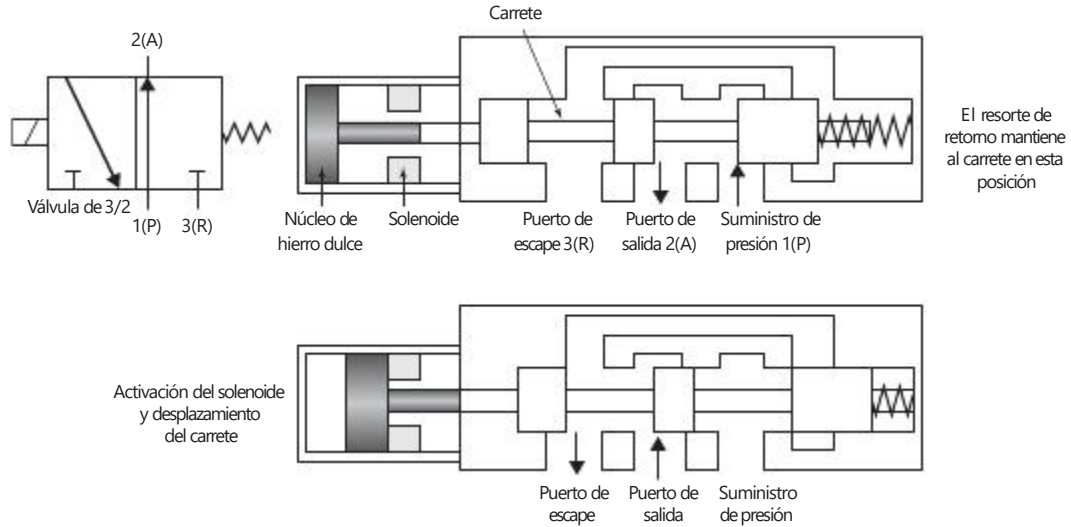


Figura 7.9 Válvula de un solenoide.

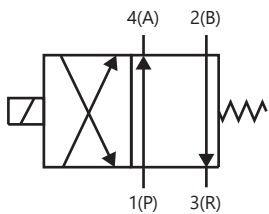
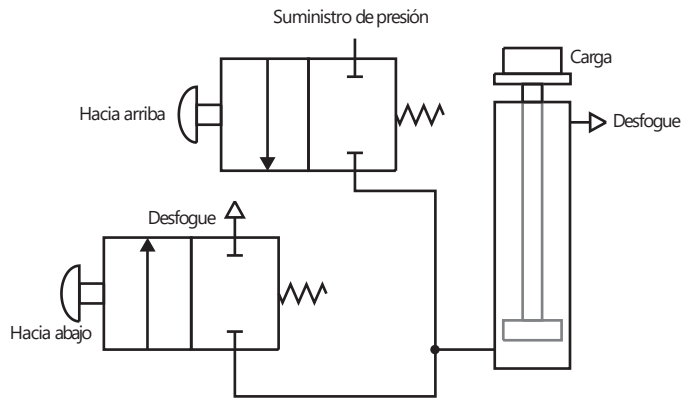


Figura 7.10 Válvula de 4/2.

cerrado y 2(A) conectado a 3(R). Cuando no hay corriente en el solenoide, el resorte obliga a la válvula a regresar a su posición inicial. El movimiento del resorte produce el estado que indican los símbolos del cuadrado respectivo.

La Figura 7.11 muestra un ejemplo sencillo de una aplicación de las válvulas en un sistema neumático de levantamiento. Se utilizan dos válvulas de botón 2/2. Cuando el botón de la válvula de arriba se oprime, la carga se levanta. Cuando se oprime el botón de la válvula de abajo, la carga baja. Observe que en los sistemas neumáticos un desfogue a la atmósfera se indica con una flecha.

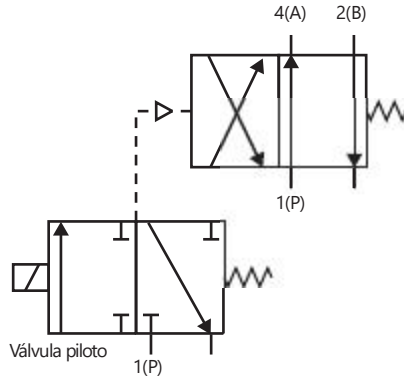
Figura 7.11 Sistema de levantamiento.



### 7.3.2 Válvulas operadas por válvula piloto

La fuerza necesaria para accionar la bola o desplazar la válvula en ocasiones es demasiado grande para la operación manual o con un solenoide. Para solucionar ese problema se utiliza un **sistema operado por válvula piloto**, el cual

Figura 7.12 Sistema operado por válvula piloto.



usa una válvula para controlar una segunda válvula; la Figura 7.12 ilustra esto. La capacidad de la válvula piloto es pequeña y se acciona en forma manual o mediante un solenoide. Su función es permitir que la válvula principal sea operada por el sistema de presión. La línea de presión piloto se representa con líneas punteadas. Aunque las válvulas piloto y principal se pueden accionar con dos válvulas independientes, lo más frecuente es encontrarlas dentro de la misma carcasa.

### 7.3.3 Válvulas direccionales

La Figura 7.13 muestra una **válvula direccional** y su símbolo. El flujo sólo se realiza en la dirección en la que la bola empuja al resorte. El flujo en la dirección opuesta está bloqueado porque el resorte empuja la bola contra su asiento.

Figura 7.13 Válvula direccional.



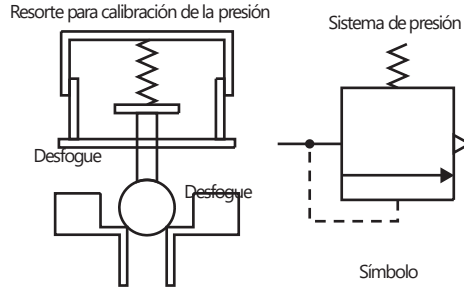
## 7.4

### Válvulas de control de presión

Hay tres tipos principales de válvulas de control de presión:

- 1 *Válvulas para regulación de presión*  
Sirven para controlar la presión de operación en un circuito y mantenerla en un valor constante.
- 2 *Válvulas limitadoras de presión*  
Se usan como dispositivos de seguridad para limitar la presión en un circuito abajo de cierto valor de seguridad. La válvula se abre y desfoga a la atmósfera, o devuelve el fluido al pozo recolector si la presión es mayor que el valor de seguridad predeterminado. La Figura 7.14 muestra una **válvula limitadora de presión** que cuenta con un orificio que por lo general está cerrado. Cuando la presión de entrada supera la fuerza ejercida por el resorte, la válvula abre y desfoga a la atmósfera, o se devuelve al pozo.

Figura 7.14 Válvula limitadora de presión.



3 Válvulas de secuencia de presión

Estas válvulas se usan para detectar la presión de una línea externa y producir una señal cuando se alcanza un valor establecido. Con la válvula limitadora de presión de la Figura 7.15, la presión límite se establece por la presión a la entrada de la válvula. Se puede adaptar esta válvula para dar una válvula de secuencia. Esto se puede usar para permitir que el flujo tenga lugar en alguna parte del sistema cuando la presión ha subido al nivel requerido. Por ejemplo, en una máquina automática se podría requerir alguna operación para empezar cuando la presión de sujeción aplicada a una pieza de trabajo adquiere un valor particular. La Figura 7.15a) muestra el símbolo para una válvula de secuencia, la válvula que se enciende cuando la presión interna alcanza un valor particular y permite a la presión ser aplicada al sistema que sigue. La Figura 7.15b) muestra un sistema en el que se usa dicha válvula de secuencia. Cuando la válvula 4/3 opera primero, se aplica la presión al cilindro 1 y su émbolo se desplaza a la derecha. Mientras esto pasa, la presión es demasiado baja para operar la válvula de secuencia y así ninguna presión es aplicada al cilindro 2. Cuando el émbolo del cilindro 1 llega al tope del extremo, la presión en el sistema aumenta, a un nivel apropiado, activa la válvula de secuencia para abrirla y así aplicar presión al cilindro 2 para empezar el desplazamiento del émbolo.

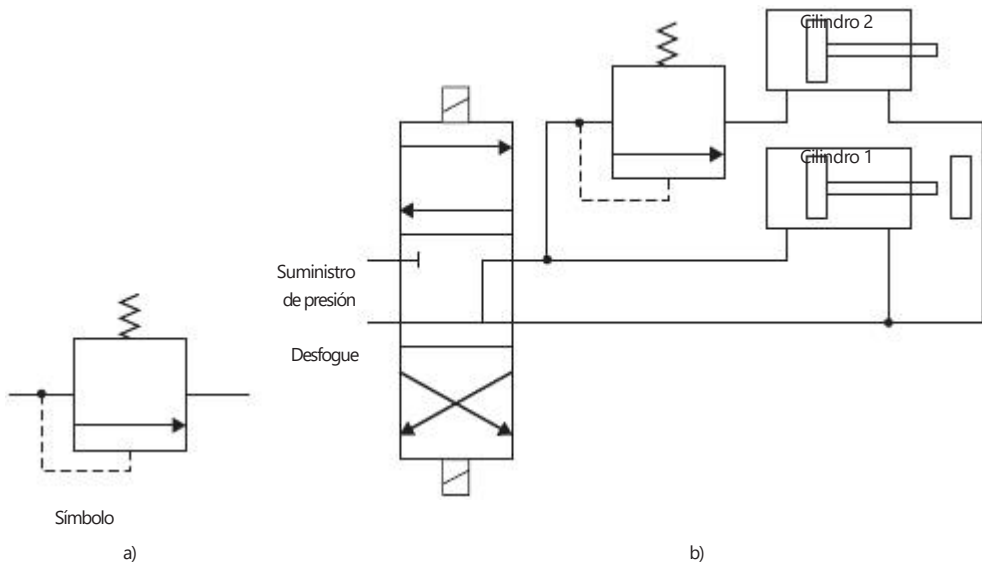


Figura 7.15 a) Símbolo de válvula secuencial, b) sistema secuencial.

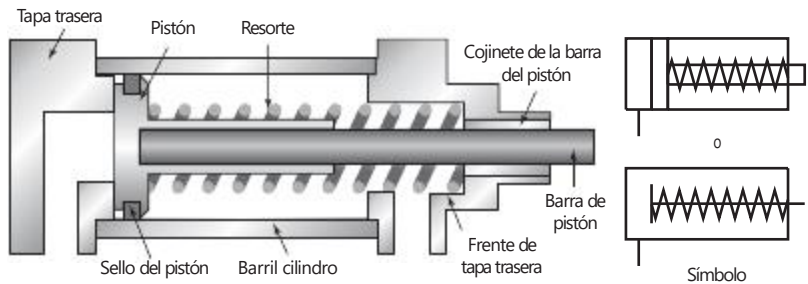
## 7.5

## Cilindros

El **cilindro hidráulico** o **neumático** es un ejemplo de actuador lineal. Los principios y configuración son los mismos para la versión hidráulica y la neumática; la diferencia es el tamaño como consecuencia de las presiones más altas usadas en las versiones hidráulicas. El cilindro consiste en un tubo cilíndrico por el que se desplaza un pistón/émbolo. Existen dos tipos básicos, los cilindros de acción y los de doble acción.

El término simple acción se utiliza cuando la presión se aplica sólo en uno de los extremos del pistón; en general se utiliza un resorte para oponerse al desplazamiento del pistón. El otro lado del pistón se abre a la atmósfera. La Figura 7.16 muestra un cilindro con un resorte de regreso. El fluido es aplicado a un lado del pistón a una presión manométrica  $p$  con el otro lado a la presión atmosférica y así se produce una fuerza en el pistón de  $pA$ , donde  $A$  es el área del pistón. La fuerza real que actúa en la barra del pistón será menos que ésta debido a la fricción.

Figura 7.16 Cilindro de acción simple.



Para el cilindro de acción sencilla que se muestra en la Figura 7.17, cuando las corrientes pasan por el solenoide, la válvula cambia la posición y la presión es aplicada para mover el pistón a lo largo del cilindro. Cuando la corriente a través del solenoide cesa, la válvula vuelve a su posición inicial y el aire se desfoga del cilindro. Como consecuencia, el resorte regresa al pistón hacia atrás a lo largo del cilindro.

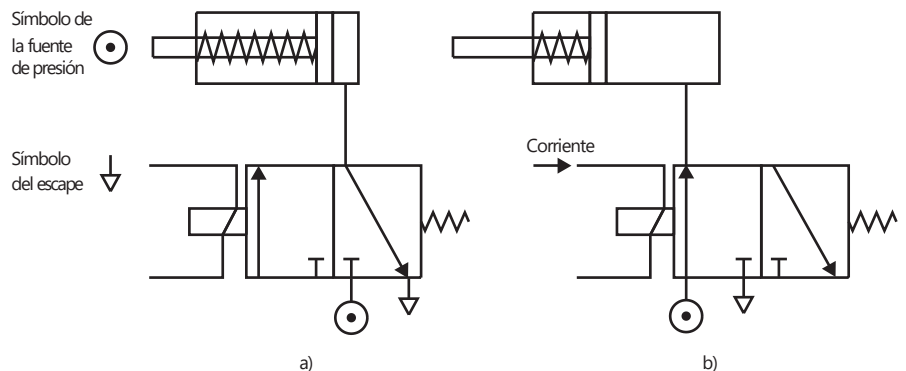


Figura 7.17 Control de un cilindro de acción sencilla con a) no corriente a través del solenoide, b) una corriente a través del solenoide.

El término doble acción se utiliza cuando se aplica presión de control a los dos lados de un pistón (Figura 7.18). La diferencia de presión entre ambos lados produce el movimiento del pistón, el cual se puede mover en cualquier dirección por el cilindro como resultado de las señales de alta presión. En el



Figura 7.18 Cilindro de doble acción.

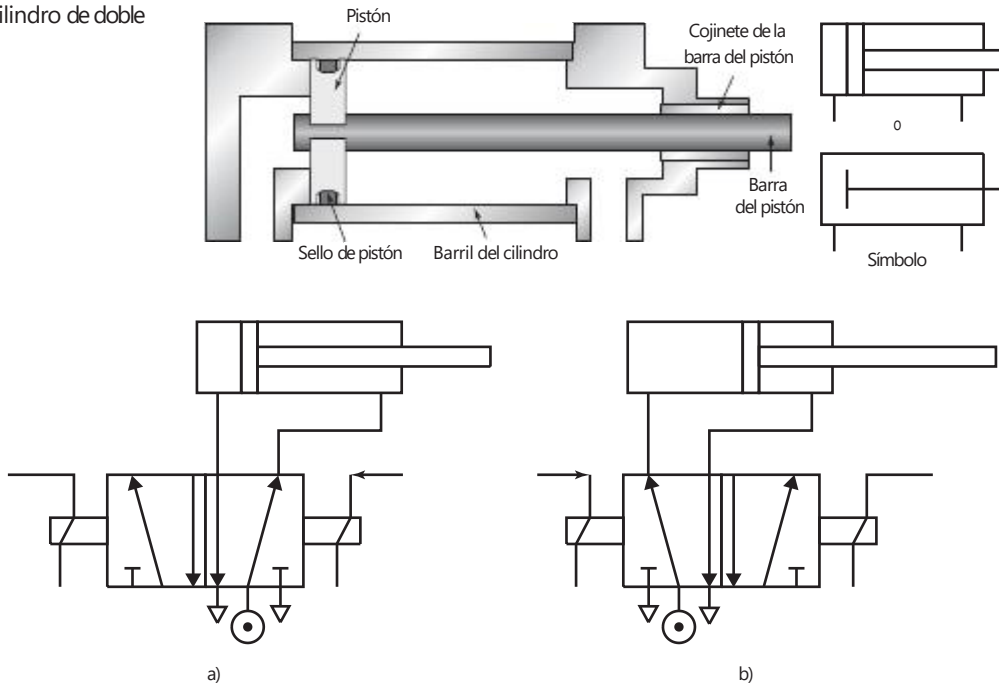


Figura 7.19 Control de un cilindro de doble acción con solenoide, a) no activado, b) activado.

cilindro de doble acción de la Figura 7.19, la corriente que pasa por un solenoide causa que el pistón se mueva en una dirección y la corriente por el otro solenoide invierte la dirección del movimiento.

La selección del cilindro dependerá de la fuerza y velocidad que se requieran para desplazar la carga. Los cilindros hidráulicos tienen mayor capacidad de fuerza que los neumáticos; sin embargo, éstos son más veloces. La fuerza que produce un cilindro es igual al área de la sección transversal del cilindro multiplicada por la presión de trabajo, es decir la diferencia entre las presiones en ambos lados del pistón en el cilindro. Si se utiliza un cilindro con presión neumática de trabajo de 500 kPa y diámetro de 50 mm, se obtiene una fuerza de 982 N. Un cilindro hidráulico del mismo diámetro con presión de trabajo de 15 000 kPa produce una fuerza de 29.5 kN.

Si el gasto de un líquido hidráulico que fluye por un cilindro tiene un volumen  $Q$  por segundo, el volumen que abarca el pistón en un tiempo de 1 s debe ser igual a  $Q$ . Pero para un pistón con un área de sección transversal  $A$ , se trata de un movimiento que recorre una distancia igual a  $v$  en un 1 s, por lo que  $Q = Av$ . Por lo tanto, la velocidad  $v$  de un cilindro hidráulico es igual al gasto del líquido  $Q$  que pasa por el cilindro dividido entre el área de la sección transversal  $A$  del cilindro. Si un cilindro hidráulico tiene un diámetro de 50 mm y un flujo hidráulico de  $7.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ , la velocidad es 3.8 m/s. No es posible calcular de esta manera la velocidad de un cilindro neumático dado que esta velocidad depende de la velocidad de desfogue del aire que precede al pistón que se desplaza. Para regular la velocidad se puede utilizar una válvula.

Como ejemplo, considere el problema de un cilindro hidráulico que va a transportar una pieza de trabajo en una operación de manufactura a lo largo de 250 mm en 15 s. Si se necesita una fuerza de 50 kN para mover la pieza,

¿cuál será la presión de trabajo y el gasto del líquido hidráulico, si el cilindro tiene un diámetro de 150 mm? El área de la sección transversal del pistón es  $\frac{1}{4}\pi * 0.150^2 = 0.0177 \text{ m}^2$ . La fuerza que produce el cilindro es igual al producto del área de la sección transversal del cilindro y la presión de trabajo. Por lo tanto, la presión de trabajo es  $50 * 10^3 / 0.0177 = 2.8 \text{ MPa}$ . La velocidad de un cilindro hidráulico es igual al gasto del líquido a través del cilindro dividido entre el área de la sección transversal del cilindro. Por lo tanto, el gasto necesario es  $(0.250/15) * 0.0177 = 2.95 * 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ .

### 7.5.1 Secuenciado de cilindros

En muchos sistemas de control se utilizan cilindros neumáticos e hidráulicos como elementos de actuación que requieren una secuencia de extensiones y contracciones de dichos cilindros. Por ejemplo, suponiendo que se tienen los cilindros A y B y se necesita que al oprimir el botón de arranque se extienda el pistón del cilindro A y, una vez extendido, se extienda el cilindro B. Cuando esto ocurre y ambos cilindros están extendidos, se necesita que el cilindro A se contraiga y una vez que está todo contraído, el pistón B se contraiga. En el control secuencial mediante cilindros es común asignar a los cilindros una literal de referencia A, B, C, D, etcétera, e indicar el estado correspondiente del cilindro mediante un signo +, si el cilindro está extendido, o un signo - si está contraído. De este modo, la secuencia de operaciones sería: A+, B+, A- y B-. En la Figura 7.20 se muestra un circuito mediante el que se produciría esta secuencia.

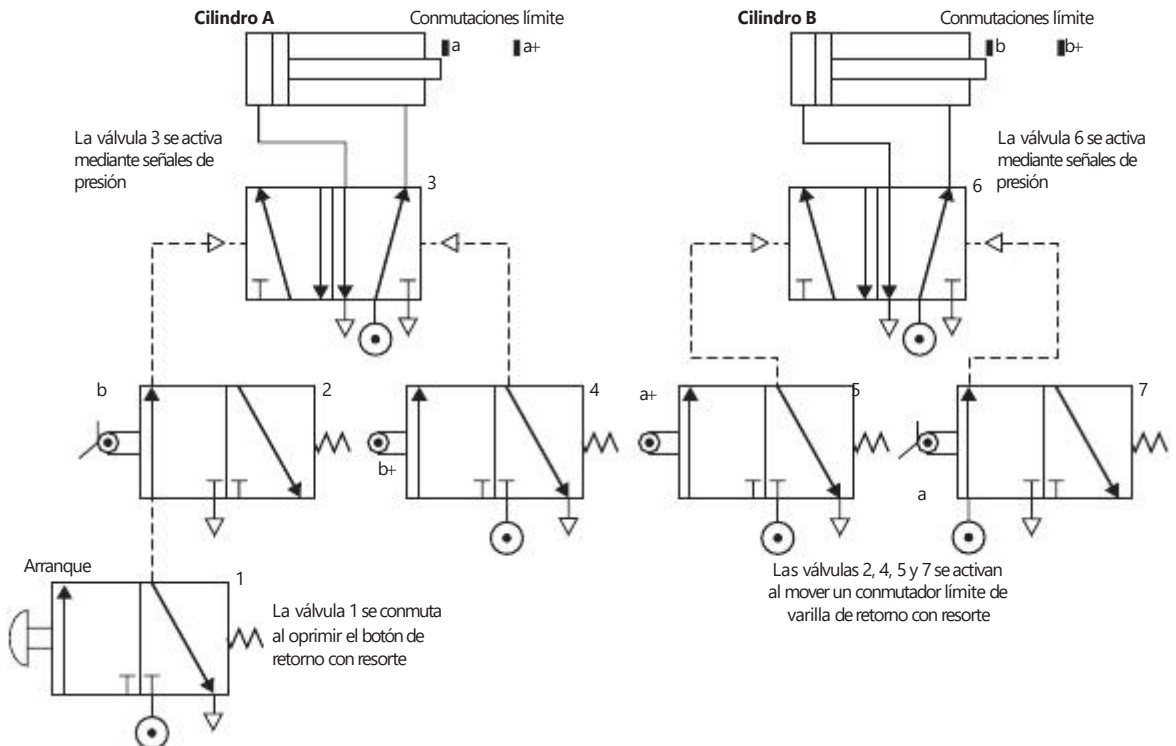


Figura 7.20 Operación de dos actuadores secuenciales.

La secuencia de operación es la siguiente:

- 1 Al principio los pistones de ambos cilindros están contraídos. Se oprime el botón de arranque de la válvula 1, esta acción aplica presión a la válvula 2, conforme el interruptor límite b- se activa; a continuación se conmuta la válvula 3 para aplicar presión al cilindro A y éste se extiende.
- 2 El cilindro A se extiende y se deja de presionar el interruptor límite a-. Cuando el cilindro A está del todo extendido, se activa el interruptor límite a+. Éste conmuta la válvula 5 y provoca que se aplique presión a la válvula 6 para conmutarla y así aplicar presión al cilindro B a fin de que se extienda su pistón.
- 3 El cilindro B se extiende y se libera el interruptor b-. Una vez que el cilindro B está extendido entra en funcionamiento el interruptor límite b+. Éste conmuta la válvula 4 y causa que se aplique presión a la válvula 3 y al cilindro A para iniciar la contracción de su cilindro.
- 4 El cilindro A se contrae y libera al interruptor límite a+. Cuando el cilindro A está extendido se activa el interruptor límite a-. Éste conmuta la válvula 7, aplica presión a la válvula 5 y al cilindro B para que inicie la contracción de su cilindro.
- 5 El cilindro B se contrae y libera al interruptor límite b+. Una vez contraído el cilindro B, entra en operación el interruptor límite b- para completar el ciclo.

Para iniciar de nuevo el ciclo basta oprimir el botón de arranque. Si se desea el funcionamiento continuo del sistema, será necesario que el último movimiento de la secuencia active el primer movimiento.

Otra forma de lograr la secuencia anterior es conectar y desconectar por grupos el suministro del aire que se alimenta a las válvulas, método que se conoce como **control en cascada** y con el cual se evita un problema que puede presentarse en los circuitos dispuestos como se ve en la Figura 7.20. En ellos el aire queda atrapado en la línea de presión para controlar una válvula, evitando así que sea conmutada. Al usar el control en cascada, la secuencia de operaciones se distribuye entre grupos donde la letra para identificar los cilindros aparece sólo una vez por grupo. Así, en la secuencia A+, B+, B- y A-, se tendrían los grupos A+, B+ y A-, B-. A continuación se utiliza una válvula para conmutar el suministro de aire entre ambos grupos; es decir, se proporciona aire al grupo A+B+ y luego al grupo A-B-. En la línea para seleccionar el primer grupo se incluye una válvula de arranque/paro y, si se desea, la repetición continua de la secuencia, en la última operación se debe producir una señal que inicie de nuevo la secuencia. La primera función de cada grupo se inicia con la conmutación de la fuente de alimentación de ese grupo. Las siguientes acciones del grupo se controlan mediante válvulas operadas por interruptor; la última operación de una válvula activa al siguiente grupo elegido. La Figura 7.21 muestra el circuito neumático.

## 7.6

### Servoválvulas y válvulas de control proporcional

Las **servoválvulas y válvulas de control proporcional** son válvulas de posición infinita que dan a una válvula de carrete desplazamiento proporcional a la corriente aplicada a un solenoide. Básicamente, las servoválvulas tienen un par motor para mover el carrete dentro de una válvula (Figura 7.22). Al variar la corriente aplicada al par motor, se desvía una armadura y esto mueve el carrete en la válvula y, por lo tanto, da un flujo que se relaciona con la corriente. Las servoválvulas son de alta precisión y costosas y por lo general se utilizan en un sistema de control de lazo cerrado.

Las válvulas de control proporcional son menos caras y en esencia tienen la posición del carrete directamente controlada por el tamaño de la corriente para la válvula solenoide. A menudo se emplean en sistemas de control de lazo cerrado.

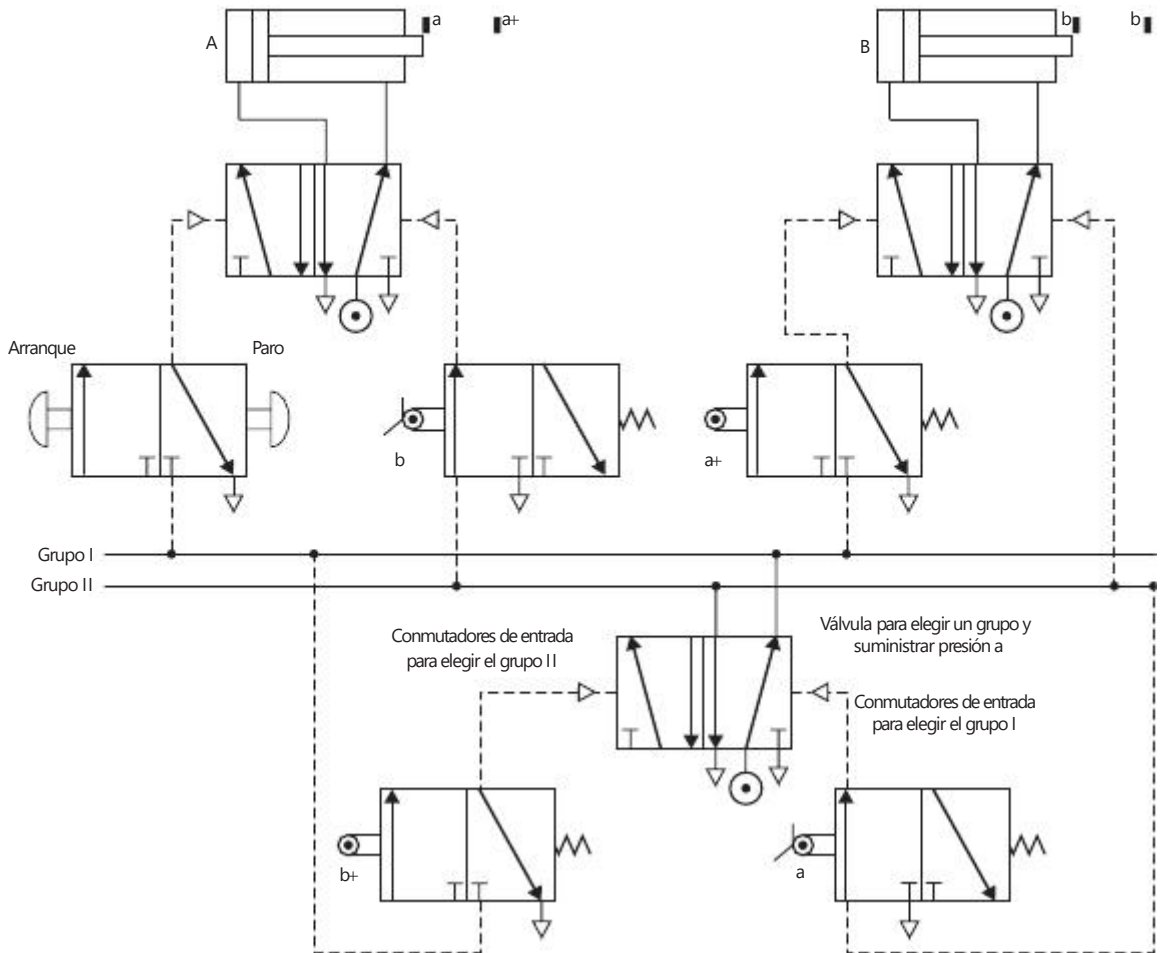
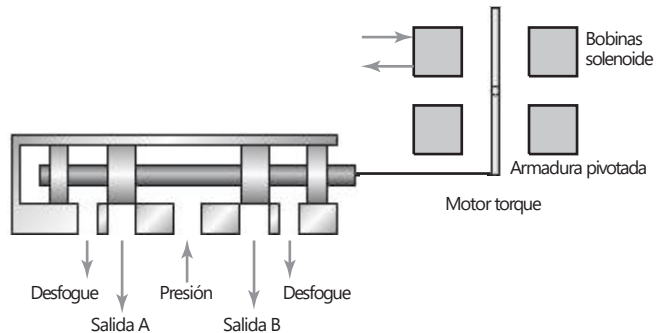


Figura 7.21 Control en cascada que se usa para dar A+, B+, B- A-.

Figura 7.22 La forma básica de una servoválvula.



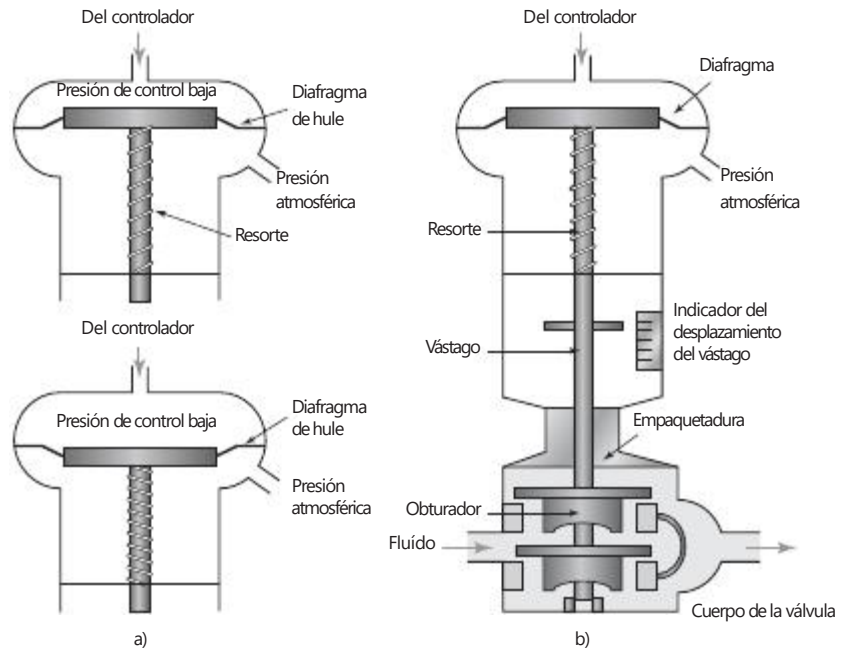
## 7.7

Válvulas  
para el control  
de procesos

Las **válvulas para el control de procesos** permiten controlar el gasto de un fluido; por ejemplo, cuando se debe controlar el gasto del líquido a un tanque. Uno de los elementos básicos de estas válvulas es un actuador que desplaza un obturador en la tubería por donde circula el fluido modificando el área de la sección transversal de dicha tubería.

Una forma común para el manejo del actuador neumático que se utiliza en las válvulas para el control de procesos es el **actuador de diafragma** que, en esencia, consiste en un diafragma con la señal de presión de entrada del controlador en un lado y la presión atmosférica en el otro; esta diferencia de presión se conoce como **presión manométrica**. El diafragma está hecho de hule sujeto entre dos discos de acero. El efecto de los cambios de la presión de entrada produce el desplazamiento de la parte central del diafragma, como se observa en la Figura 7.23a). Este movimiento se transmite al elemento de control final por un vástago unido al diafragma, como por ejemplo en la Figura 7.23b).

Figura 7.23 a) Actuador de diafragma neumático, b) válvula de control.



La fuerza  $F$  que actúa en el vástago es la que se aplica al diafragma y su valor es igual a la presión manométrica  $P$  multiplicada por el área del diafragma  $A$ . Un resorte proporciona una fuerza de restauración. Si el vástago se desplaza una distancia  $x$  y suponiendo que la compresión del resorte es proporcional a la fuerza aplicada, es decir,  $F = kx$ , con  $k$  como una constante, entonces  $kx = PA$  y, por eso, el desplazamiento del vástago es proporcional a la presión manométrica.

Para ilustrar lo anterior considere un actuador de diafragma que se usa para abrir una válvula de control, si debe aplicarse una fuerza de 500 N a la válvula, ¿qué área debe tener el diafragma para manejar una presión manométrica de control de 100 kPa? La fuerza  $F$  que se aplica al diafragma con área  $A$  mediante una presión  $P$  está dada por  $P = F/A$ . Por lo tanto,  $A = 500/(100 \cdot 10^3) = 0.005 \text{ m}^2$ .

### 7.7.1 Cuerpos y obturadores de las válvulas

La Figura 7.23b) muestra la sección transversal de una válvula que controla el gasto de un fluido. El cambio de presión en el actuador desplaza el diafragma y el vástago de la válvula. Como resultado, el obturador interior de la válvula se mueve dentro de ésta. El obturador restringe el flujo del fluido y su ubicación determina el gasto.

Los cuerpos de las válvulas y los obturadores tienen formas diversas; la Figura 7.24 muestra algunas formas. Se denomina **de un asiento** a la válvula en la que el fluido sólo tiene una trayectoria para recorrerla, y con ello sólo requiere un obturador para controlar el flujo. Se dice que una válvula tiene **doble asiento** cuando el fluido que entra por ella se divide en dos corrientes, como en la Figura 7.23; donde cada corriente pasa por un orificio controlado por un obturador; es decir, en este tipo de válvula hay dos obturadores.

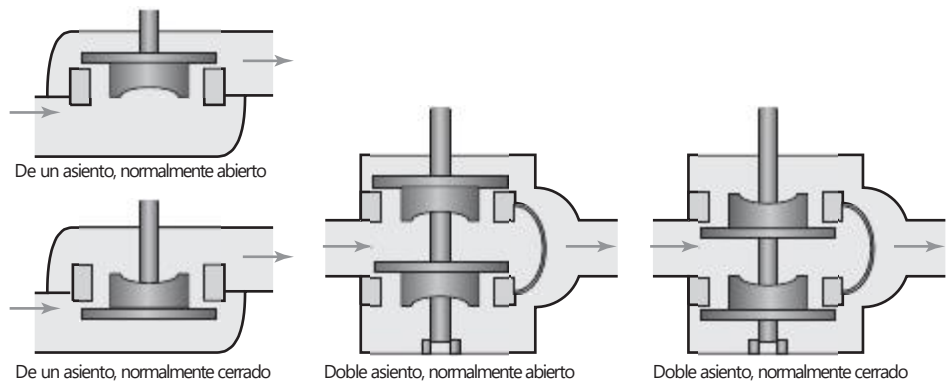


Figura 7.24 Cuerpos de las válvulas.

La válvula de un asiento tiene la ventaja de que su cierre es más hermético que el de una válvula de doble asiento; su desventaja es que la fuerza que el flujo ejerce sobre el obturador es mucho mayor, por lo que el diafragma del actuador tiene que aplicar fuerzas mucho mayores al vástago. Esto puede ocasionar problemas en la colocación exacta del vástago. Las válvulas de doble asiento no tienen ese problema. La forma del cuerpo también determina si un aumento en la presión del aire producirá la apertura o cierre de la válvula.

La forma del obturador define la relación que existe entre el movimiento del vástago y el efecto en el gasto. La Figura 7.25a) muestra tres tipos de obturadores de uso común y la Figura 7.25b), la relación porcentual entre el gasto volumétrico y el desplazamiento del vástago de la válvula.

Con el tipo de **apertura rápida**, a un cambio considerable del gasto corresponde un ligero movimiento del vástago de la válvula. Este tipo de obturador se utiliza cuando se necesita un control encendido/apagado (on/off) del gasto.

En el obturador de **contorno lineal**, el cambio de flujo es proporcional al cambio en el desplazamiento del vástago de la válvula, es decir:

$$\text{Cambio en el gasto} = k (\text{cambio en el desplazamiento del vástago})$$

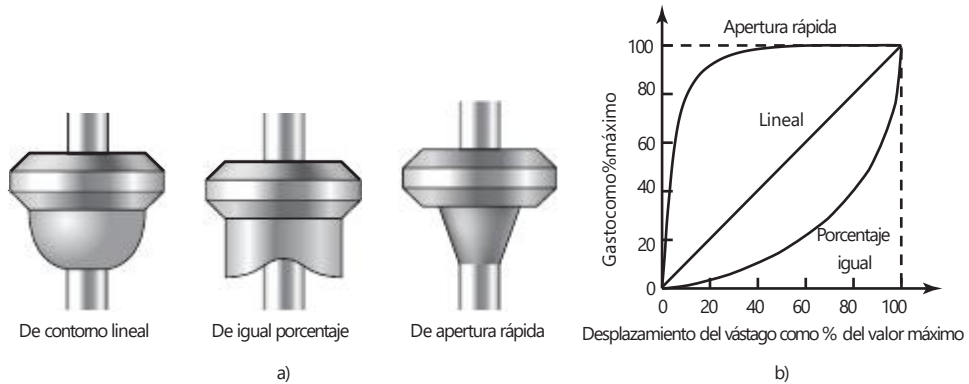


Figura 7.25 a) Formas de obturadores de bolsa, b) características de flujo.

donde  $k$  es una constante. Si  $Q$  es el gasto del desplazamiento del vástago de la válvula  $S$  y  $Q_{\max}$  es el gasto máximo para el desplazamiento máximo,  $S_{\max}$ , se tiene que:

$$\frac{Q}{Q_{\max}} = \frac{S}{S_{\max}}$$

es decir, el porcentaje de cambio en el flujo es igual al porcentaje de cambio en el desplazamiento del vástago.

Para ejemplificar lo anterior considere el problema de un actuador cuyo desplazamiento total es 30 mm. Si está montado en una válvula con obturador lineal cuyo gasto mínimo es 0 y el máximo es 40 m<sup>3</sup>/s, ¿cuál será el gasto con un desplazamiento de vástago de a) 10 mm, b) 20 mm? Dado que el porcentaje del gasto es igual al porcentaje del desplazamiento del vástago: a) un porcentaje de desplazamiento de vástago de 33% produce un gasto de 33%, es decir 13 m<sup>3</sup>/s; b) un porcentaje de desplazamiento de vástago de 67% produce un gasto de 67%, es decir 27 m<sup>3</sup>/s.

Con el obturador de **igual porcentaje**, los cambios en porcentaje en el gasto son iguales a los cambios en porcentaje de la posición del vástago de la válvula, es decir:

$$\frac{\Delta Q}{Q} = k \frac{\Delta S}{S}$$

donde  $\Delta Q$  es el cambio experimentado en el gasto  $Q$  y  $\Delta S$  el cambio en la posición de la válvula resulta del cambio anterior. Si la ecuación anterior expresa los cambios pequeños y luego se integra, se obtiene:

$$\int_{Q_{\min}}^Q \frac{1}{Q} dQ = k \int_{S_{\min}}^S \frac{dS}{S}$$

$$\ln Q - \ln Q_{\min} = k(S - S_{\min})$$

Al despejar el gasto  $Q_{\max}$ , el cual está en función de  $S_{\max}$ , se tiene que:

$$\ln Q_{\max} - \ln Q_{\min} = k(S_{\max} - S_{\min})$$

Al eliminar  $k$  de estas dos ecuaciones se tiene:

$$\frac{\ln Q - \ln Q_{\min}}{\ln \frac{Q}{Q_{\min}}} = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{S_{\max} - S_{\min}} \ln \frac{Q_{\max}}{Q_{\min}}$$

y así  $\frac{Q}{Q_{\max}} = \left( \frac{S - S_{\min}}{S_{\max} - S_{\min}} \right)^{\frac{S_{\max} - S_{\min}}{S_{\max} - S_{\min}}}$

Una característica de la relación  $Q_{\max}/Q_{\min}$  es la **capacidad de rango (rangeabilidad)**.

Para ilustrar lo anterior, considere el problema de un actuador, con un desplazamiento total de vástago de 30 mm. Está montado en una válvula de control que tiene un obturador de igual porcentaje y un gasto mínimo de 2 m<sup>3</sup>/s y un gasto máximo de 24 m<sup>3</sup>/s. ¿Cuál será el gasto si el desplazamiento del vástago es: a) 10 mm, b) 20 mm? Con base en la ecuación:

$$\frac{Q}{Q_{\max}} = \left( \frac{S - S_{\min}}{S_{\max} - S_{\min}} \right)^{\frac{S_{\max} - S_{\min}}{S_{\max} - S_{\min}}}$$

tenemos que para a)  $Q = 2 * (24/2)^{10/30} = 4.6 \text{ m}^3/\text{s}$  y para b)  $Q = 2 * (24/2)^{20/30} = 10.5 \text{ m}^3/\text{s}$ .

La relación entre el gasto y el desplazamiento del vástago es una de las características inherentes de la válvula. En la práctica, esto sólo se puede observar si las pérdidas de presión en el resto de la tubería son despreciables en comparación con la caída de presión a través de la válvula. Si las caídas de presión en la tubería son de tal magnitud que, por ejemplo, la mitad de la caída de la presión se produce en la válvula, una característica de operación de tipo lineal se convertiría casi en una característica de apertura rápida. Las características lineales tienen amplia aplicación en casos que requieren una respuesta lineal y cuando la mayor parte de la presión del sistema cae al pasar por la válvula. El efecto de una caída de presión considerable en la tubería si se usa una válvula de igual porcentaje, es darle aún más características lineales. Por ello, si se necesita una respuesta lineal sólo una pequeña porción de la presión del sistema se pierde al pasar por la válvula, es recomendable usar una válvula de igual porcentaje.

### 7.7.2 Dimensionamiento de válvulas de control

El término dimensionamiento de válvulas de control se refiere al procedimiento para calcular el tamaño adecuado del cuerpo de una válvula. La ecuación que relaciona el gasto de un líquido  $Q$  que fluye por una válvula toda abierta y el tamaño de ésta es:

$$Q = A_v \frac{\sqrt{\Delta P}}{\rho}$$

donde  $A_v$  es el coeficiente de flujo de la válvula,  $\Delta P$  la caída de presión a través de la válvula y  $\rho$  la densidad del fluido. Esta ecuación también se expresa de la siguiente manera, con las magnitudes en unidades del SI,

$$Q = 2.37 * 10^{-5} C_v \frac{\sqrt{\Delta P}}{\rho}$$



donde  $C_v$  es el coeficiente de flujo de la válvula. Otra manera de expresar la misma ecuación es

$$Q = 0.75 * 10^{-6} C_v \frac{\sqrt{\Delta P}}{A G}$$

donde  $G$  es la gravedad específica o densidad relativa. Estas dos últimas ecuaciones se obtuvieron de la ecuación original en términos de galones estado-unidenses. La Tabla 7.1 muestra algunos valores típicos de  $A_v$ ,  $C_v$  y la dimensión de la válvula.

Tabla 7.1 Coeficientes de flujo y tamaños de válvula.

Coeficientes de flujo	Tamaños de la válvula (mm)							
	480	640	800	960	1260	1600	1920	2560
$C_v$	8	14	22	30	50	75	110	200
$A_v \cdot 10^5$	19	33	52	71	119	178	261	474

Para ejemplificar lo anterior, considere el problema al calcular el tamaño de una válvula que se utiliza para controlar un flujo de agua, cuando el máximo flujo requerido es  $0.012 \text{ m}^3/\text{s}$  y la caída de presión permisible en la válvula es 300 kPa. Al usar la ecuación:

$$Q = A_v \frac{\sqrt{\Delta P}}{A r}$$

por lo tanto, dado que la densidad del agua es  $1000 \text{ kg/m}^3$ ,

$$A_v = Q \frac{r \sqrt{1000}}{A \sqrt{\Delta P}} = 0.012 \frac{r \sqrt{1000}}{A \sqrt{300 * 10^3}} = 69.3 * 10^{-5}$$

Entonces, al usar la Tabla 7.1, el tamaño de la válvula es 960 mm.

### 7.7.3 Ejemplo de un sistema de control de fluidos

La Figura 7.26a) muestra las características esenciales de un sistema para controlar una variable, como es el nivel de líquido en un recipiente, controlando la velocidad a la que entra el líquido. La salida que produce el sensor de nivel del líquido, después del acondicionamiento de señal, se transmite al convertidor de corriente a presión como una corriente de entre 4 y 20 mA. A continuación, esta señal se convierte en una presión manométrica de 20 a 100 kPa con la cual se acciona la válvula de control neumático y se controla el gasto con el que el líquido entra en el recipiente.

La Figura 7.26b) ilustra la configuración básica de un convertidor de corriente a presión. La corriente de entrada pasa por bobinas montadas en un núcleo que es atraído hacia un imán; el grado de atracción depende de la magnitud de la corriente. El movimiento del núcleo provoca el desplazamiento de la palanca alrededor de su pivote y de una aletilla situada arriba de la boquilla. La posición de la aletilla en relación con la boquilla define el gasto de salida del aire del sistema y, por lo tanto, la presión de aire en el sistema. Se utilizan resortes en la aletilla para ajustar la sensibilidad del convertidor, de manera que una corriente entre 4 y 20 mA produzca una presión manométrica de 20 a 100 kPa. Éstos son valores estándar que en general se utilizan en este tipo de sistemas.

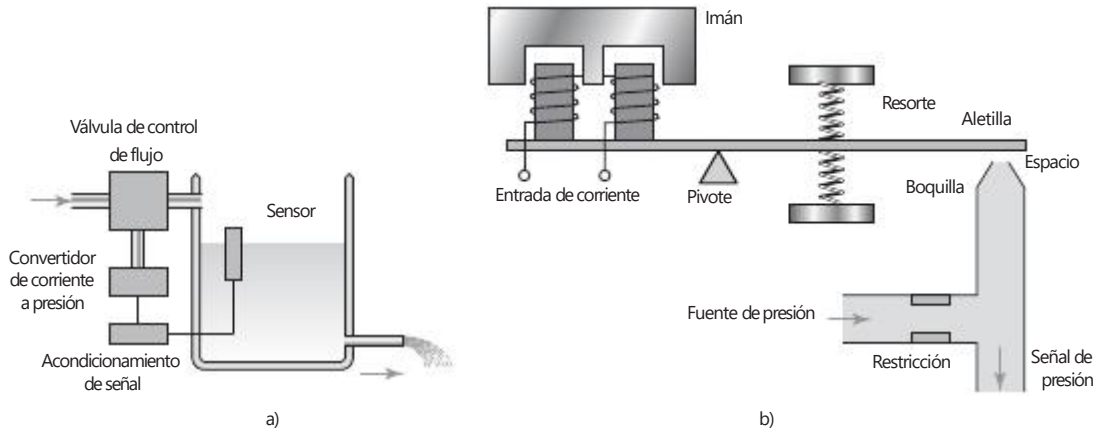


Figura 7.26 a) Sistema de control de fluidos, b) convertidor de corriente a presión.

7.8

Actuadores giratorios

Un cilindro lineal provisto de las conexiones necesarias se usa para producir movimientos rotatorios con ángulos menores de 360°; la Figura 7.27a) ilustra este tipo de configuración. Otra alternativa es el **actuador semigiratorio**, en el cual se utiliza un álabe (Figura 7.27b). La diferencia de presión entre ambos puertos hace girar el álabe y el vástago, lo cual es una medida de la diferencia de presiones. Dependiendo de éstas, el álabe gira en sentido de las manecillas del reloj o en sentido contrario.

Para giros de más de 360° se emplea un motor neumático; una modalidad de éste es el **motor de álbes** (Figura 7.27c). Un rotor excéntrico tiene ranuras que fuerzan el desplazamiento hacia fuera de los álbes, empujando las paredes del cilindro a causa de la rotación. Los álbes dividen la cámara en compartimientos separados cuyo tamaño aumenta desde el puerto de entrada hasta el puerto de salida. El aire que entra al compartimiento ejerce una fuerza en uno de los álbes y provoca así el giro del rotor. La dirección de rotación del motor se puede invertir utilizando otro puerto de entrada.

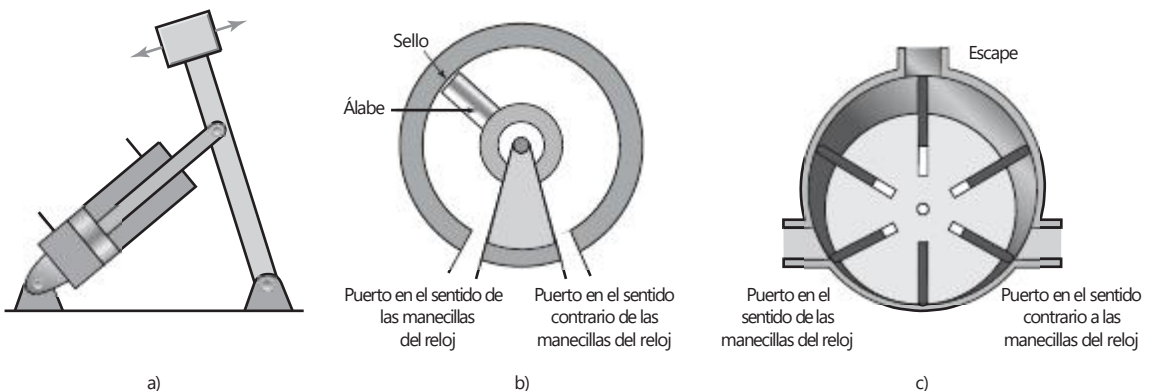


Figura 7.27 a) Cilindro lineal usado para producir una rotación, b) actuador giratorio tipo álabe, c) motor tipo álabe.

## Resumen

Los **sistemas neumáticos** utilizan aire, los **sistemas hidráulicos** usan aceite. El principal inconveniente en los sistemas neumáticos es la compresibilidad del aire. Los sistemas hidráulicos se pueden usar para dispositivos de control con mayor poder pero son más caros que los sistemas neumáticos y hay peligros asociados con las fugas de aceite que no ocurren con las fugas de aire.

Los sistemas neumáticos e hidráulicos usan **válvulas de control de dirección** para dirigir el flujo del fluido a través de un sistema. Estas válvulas son válvulas de encendido/apagado. El símbolo que se utiliza para estas válvulas es un cuadrado para cada una de sus posiciones de encendido, los símbolos que se usan en cada cuadro indican las conexiones que se hacen cuando se activa esa posición.

El **cilindro neumático** o **hidráulico** consiste en un tubo cilíndrico con un pistón/émbolo que puede deslizarse. Existen dos tipos básicos, **cilindros de simple acción** y **cilindros de doble acción**. Con la acción simple, la presión del control es aplicada a sólo un lado del pistón, a menudo se utiliza un resorte para ofrecer la oposición al movimiento del pistón. El otro lado del pistón está abierto a la atmósfera. El término doble acción se usa cuando las presiones de control se aplican en cada lado del pistón.

Las **servoválvulas y válvulas de control proporcional** son válvulas de posición infinita que dan a la válvula de carrete desplazamiento proporcional a la corriente suministrada al solenoide.

Las **válvulas para el control de procesos** se utilizan para controlar el ritmo del flujo del fluido. Las bases de dichas válvulas son un actuador que se usa para mover un conector al tubo del flujo y así cambiar la sección transversal del tubo a través del cual el fluido puede fluir. Hay muchas formas de cuerpo y obturador de válvula que determinan la manera en la que el flujo del fluido controla la válvula.

## Problemas

- 7.1 Describa las características básicas de: a) una válvula de vástago; b) una válvula de lanzadera.
- 7.2 Explique el principio de una válvula accionada por válvula piloto.
- 7.3 Explique cómo se usa una válvula de secuencia para iniciar una operación cuando ha concluido otra operación.
- 7.4 Dibuje los símbolos de las siguientes válvulas: a) válvula de alivio de presión; b) válvula 2/2 que tiene actuadores de botón y un resorte; c) válvula 4/2; d) válvula direccional.
- 7.5 Indique la secuencia de operaciones de los cilindros A y B de la Figura 7.28 al oprimir el botón de arranque. a-, a+, b- y b+ son interruptores límite para detectar el momento en que los cilindros están del todo contraídos y extendidos.
- 7.6 Diseñe un circuito de válvulas neumáticas que produzca la secuencia A+, seguida de B+, y luego en forma simultánea produzca A- y B-.
- 7.7 Se necesita una fuerza de 400 N para abrir una válvula para el control de procesos. ¿Qué área deberá tener el diafragma de un actuador para abrir la válvula utilizando una presión manométrica de control de 70 kPa?

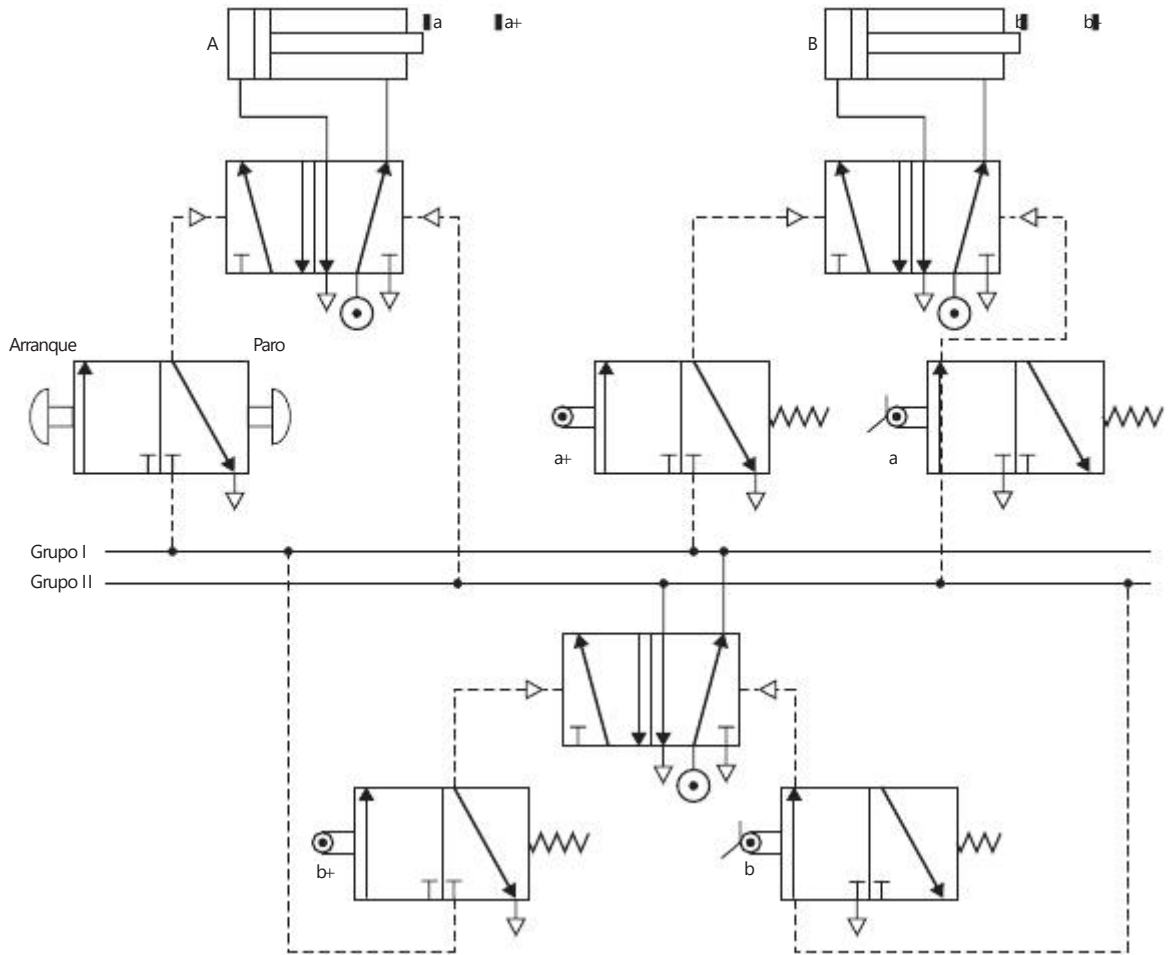


Figura 7.28 Problema 7.5.

- 7.8 Si un sistema neumático opera a una presión de 1000 kPa, ¿qué diámetro debe tener el cilindro para desplazar una carga de 12 kN?
- 7.9 Para desplazar una pieza de trabajo de una operación de manufactura se utiliza un cilindro hidráulico; el desplazamiento es 50 mm en 10 s. Para desplazar la pieza de trabajo se requiere una fuerza de 10 kN. Calcule la presión de trabajo y el gasto hidráulico del líquido si se utiliza un cilindro con un diámetro de 100 mm.
- 7.10 El desplazamiento total de un actuador es de 40 mm; está montado en una válvula de control de procesos con obturador lineal que tiene un gasto mínimo de 0 y un gasto máximo de 0.20 m<sup>3</sup>/s. ¿Cuál será el gasto si el vástago es: a) 10 mm y b) 20 mm?
- 7.11 El desplazamiento total de un actuador es 40 mm y está montado en una válvula para el control de procesos con un obturador de igual porcentaje; su gasto mínimo es 0.2 m<sup>3</sup>/s y el gasto máximo 4.0 m<sup>3</sup>/s. ¿Cuál sería el gasto si el desplazamiento del vástago es: a) 10 mm, b) 20 mm?
- 7.12 ¿Cuál será la dimensión de una válvula de control de procesos que se requiere para controlar el flujo de agua cuando el flujo máximo es 0.002 m<sup>3</sup>/s y la caída de presión permisible en la válvula correspondiente a este gasto sea 100 kPa? La densidad del agua es 1000 kg/m<sup>3</sup>.



## Capítulo ocho

# Sistemas de actuación mecánica

### Objetivos

Después de estudiar este capítulo, el lector debe ser capaz de:

- Determinar los posibles sistemas de actuación mecánica para la transmisión de movimiento entre los que están lineal a rotatorio, rotatorio a rotatorio, rotatorio a lineal y transmisión de movimiento cíclico.
- Evaluar las capacidades de acoplamientos, levas, engranes, trinquete, bandas de transmisión, impulsores de cadena y cojinetes para sistemas de actuación.

### 8.1

#### Sistemas mecánicos

Este capítulo aborda el tema de los **mecanismos**, es decir, dispositivos que se pueden considerar convertidores de movimiento, en tanto transforman el movimiento de una forma a otra. Por ejemplo, con un mecanismo, un movimiento lineal se puede convertir en un movimiento rotacional; un movimiento en una dirección convertirse en uno con otra dirección en ángulo recto respecto al primero; un movimiento lineal alterno en uno rotacional, como en el motor de combustión interna, donde el movimiento alterno de los pistones se convierte en el del cigüeñal y éste, a su vez, lo transfiere al eje de la transmisión.

Entre los elementos mecánicos están los mecanismos de barras articuladas, levas, engranes, piñón y cremalleras, cadenas, bandas de transmisión, etcétera. Por ejemplo, el arreglo piñón y cremallera convierte un movimiento rotacional en uno lineal; los engranes con eje paralelo reducen la velocidad de un eje; los engranes cónicos transmiten movimiento rotacional en un ángulo de  $90^\circ$ ; una banda dentada o una cadena de transmisión transforman el movimiento rotacional de un eje en el movimiento de otro eje; las levas y las barras articuladas son útiles para obtener movimientos que varíen en la forma que se desea. En este capítulo se presentan las características básicas de algunos mecanismos.

Muchos de los efectos que antes se obtenían con el uso de mecanismos en la actualidad se logran mediante sistemas de microprocesadores. Por ejemplo, antes en las lavadoras domésticas se utilizaban levas montadas en un eje rotacional para lograr una secuencia de acciones sincronizadas, como abrir una válvula para dejar pasar agua al tambor, cerrar el suministro de agua, encender un calentador, etcétera. En las lavadoras modernas se utiliza un microprocesador que se programa para que produzca las salidas deseadas en la secuencia requerida. Otro ejemplo es la rueda de balance de resorte helicoidal con engranes y manillas de un reloj que en la actualidad son reemplazados en gran parte por un circuito integrado tal vez con una pantalla de cristal líquido. El enfoque de la mecatrónica da como resultado una simplificación, y a menudo la reducción de costos.

No obstante, los mecanismos todavía son útiles en los sistemas mecatrónicos. Por ejemplo, el sistema mecatrónico de las cámaras fotográficas automáticas que ajusta la apertura para obtener una exposición adecuada usa un mecanismo que ajusta el tamaño del diafragma.

Si bien la electrónica hoy día se utiliza en forma generalizada para desempeñar diversas funciones que antes se realizaban con mecanismos, éstos todavía son útiles para llevar a cabo funciones como las siguientes:

- 1 Amplificación de fuerzas, como la que dan las palancas.
- 2 Cambio de velocidad; por ejemplo, mediante engranes.
- 3 Transferencia de rotación de un eje a otro; por ejemplo, una banda síncrona.
- 4 Determinados tipos de movimiento, como los que se obtienen mediante un mecanismo de retorno rápido.

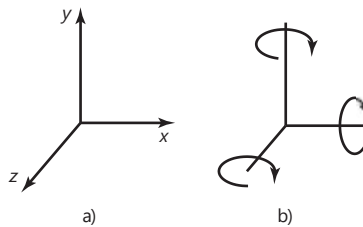
El término **cinemática** se refiere al estudio del movimiento sin tener en cuenta las fuerzas. Al analizar los movimientos sin considerar las fuerzas o energías, se dice que se hace el análisis cinemático de un mecanismo. Este capítulo es una introducción a este tipo de análisis.

## 8.2

## Tipos de movimiento

El movimiento de un cuerpo rígido se puede considerar como la combinación de movimientos de traslación y rotación. Al considerar las tres dimensiones espaciales, el **movimiento de traslación** sería un movimiento que se divide en componentes que coinciden con uno o más de los tres ejes (Figura 8.1a). Un **movimiento de rotación** puede ser una rotación con componentes que giran alrededor de uno o más de los ejes (Figura 8.1b).

Figura 8.1 Tipos de movimiento: a) traslación, b) rotación.

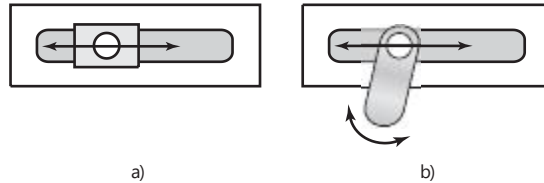


Los movimientos complejos pueden ser una combinación de movimientos de traslación y rotación. Por ejemplo, el movimiento para levantar con la mano un lápiz que está sobre una mesa. Esto puede involucrar que oriente la mano en determinado ángulo con la mesa, gire la mano, separe los dedos y los coloque en la posición adecuada para tomar el lápiz. Ésta es una secuencia de movimientos bastante complejos. Sin embargo, es posible separarlos en combinaciones de movimientos de traslación y rotación. Este tipo de análisis es relevante no cuando movemos una mano humana, sino cuando damos instrucciones a un robot para que realice una tarea. En este caso es necesario separar el movimiento en una combinación de movimientos de traslación y rotación para diseñar mecanismos que ejecuten estos componentes del movimiento. Por ejemplo, entre la secuencia de señales de control que se envían a un mecanismo podrían figurar agrupamientos de señales con las cuales se instruye a la articulación 1 girar  $20^\circ$  y a la articulación 2 hacer una extensión de 4 mm de movimiento de traslación.

### 8.2.1 Grados de libertad y de restricción

Un aspecto importante del diseño de los elementos mecánicos es la orientación y disposición de elementos y partes. Un cuerpo que está libre en el espacio se desplaza en tres direcciones mutuamente perpendiculares e independientes y gira de tres maneras alrededor de estas direcciones (Figura 8.1). Se dice que este cuerpo tiene seis grados de libertad. El número de **grados de libertad** es el número de componentes de movimiento requeridas para generar el movimiento. Si una articulación está limitada a desplazarse a lo largo de una línea, sus grados de libertad de traslación se reducen a uno. La Figura 8.2a) muestra una articulación que sólo tiene este grado de libertad de traslación. Si la articulación está limitada a desplazarse en un plano, entonces tiene dos grados de libertad de traslación. La Figura 8.2b) ilustra una articulación que tiene un grado de libertad de traslación y un grado de libertad de rotación.

Figura 8.2 Articulación con:  
a) un grado de libertad, b) dos  
grados de libertad.



Uno de los problemas más importantes del diseño es reducir la cantidad de grados de libertad, lo cual requiere un número y orientación idónea de las restricciones. Si no hay restricciones, un cuerpo tendría seis grados de libertad. Se asigna una restricción por cada grado de libertad que no se desea. Suponiendo que no hay restricciones redundantes, el número de grados de libertad sería igual a 6 menos el número de restricciones presentes. Sin embargo, las restricciones redundantes son frecuentes, de modo que para las restricciones de un cuerpo rígido se cumple la regla básica:

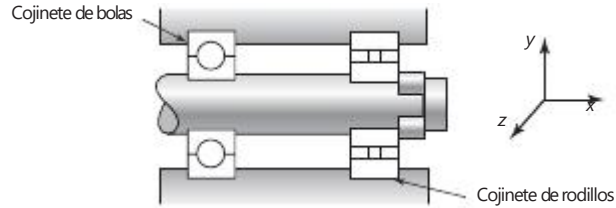
$$6 - \text{número de restricciones} = \text{número de grados de libertad} - \text{número de redundancias}$$

Por lo tanto, si se desea que un cuerpo esté fijo, es decir, que tenga cero grados de libertad, y si no se introducen restricciones redundantes, el número de restricciones necesarias es seis.

Un concepto que se utiliza en diseño es el **principio de la restricción mínima**, el cual establece que al fijar un cuerpo o al guiarlo en determinado tipo de movimiento, debe emplearse la cantidad mínima de restricciones, es decir no deben existir redundancias. Con frecuencia esto recibe el nombre de **diseño cinemático**.

Por ejemplo, para definir una flecha que sólo gire alrededor de un eje, sin movimiento de traslación, hay que reducir a 1 el número de grados de libertad. Por lo tanto, 5 es la cantidad mínima de restricciones para hacerlo. Cualquier restricción adicional sólo producirá redundancias. El montaje que se utilizará para montar la flecha tiene un cojinete de bolas en un extremo y un cojinete de rodillo en el otro (Figura 8.3). Este par de cojinetes impide el movimiento de traslación en dirección perpendicular al eje y y la rotación alrededor del eje z y el eje y. El cojinete de bolas impide el movimiento de traslación en el eje x y el eje z. Por lo tanto, en total hay cinco restricciones. Es decir, sólo queda un grado de libertad para la rotación requerida en torno al eje x. Si en ambos extremos de la flecha se coloca un cojinete de rodillos, entonces los dos

Figura 8.3 Eje sin redundancias.



cojinetes impiden el movimiento de traslación en el eje  $x$  y el eje  $z$ , lo que implicaría una redundancia. Esta redundancia podría causar daño. Si en ambos extremos de la flecha se utilizan cojinetes de bola, entonces, para evitar redundancias, el anillo de rodamiento de uno de los cojinetes no se fija en su cubierta para permitir cierto grado de deslizamiento en una dirección axial.

### 8.2.2 Carga

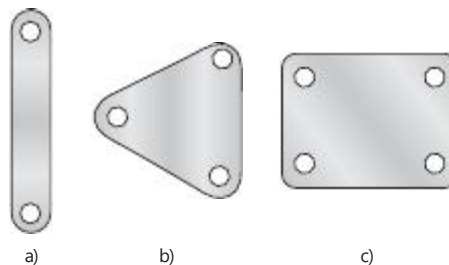
Los mecanismos son estructuras y por lo tanto transmiten y soportan cargas. Para determinar las cargas que soporta cierto elemento es necesario hacer un análisis. Después se evalúan las dimensiones del elemento para que su fuerza y, quizá su rigidez, sean suficientes para soportar esas cargas.

## 8.3

### Cadenas cinemáticas

Cuando se analizan los movimientos de un mecanismo sin prestar atención a las fuerzas, dicho mecanismo puede considerarse como una serie de articulaciones individuales. Cada parte del mecanismo que se mueve en relación con otras se denomina **articulación**. Ésta no tiene que ser un cuerpo rígido, basta que sea un cuerpo resistente capaz de transmitir la fuerza requerida con una deformación despreciable. Por este motivo, en general se representa como un cuerpo rígido con dos o más puntos de unión con otras articulaciones que se llaman **nodos**. Cada articulación puede desplazarse en relación con sus articulaciones vecinas. La Figura 8.4 muestra ejemplos de articulaciones con dos, tres y cuatro nodos. Una **articulación** es una conexión de dos o más articulaciones en sus nodos, la cual permite que haya cierto movimiento entre las articulaciones conectadas. Las palancas, el eje del cigüeñal, la biela y los pistones, las guías de deslizamiento, las poleas, correas y ejes son ejemplos de articulaciones.

Figura 8.4 Articulaciones: a) con dos nodos, b) con tres nodos, c) con cuatro nodos.

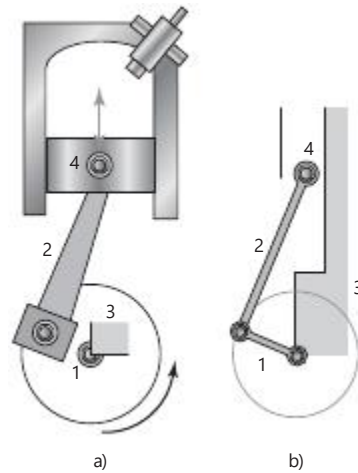




Una secuencia de piezas de articulación y articulaciones se conoce como **cadena cinemática**. Para que una cadena cinemática transmita movimiento, una articulación debe estar fija. El movimiento de una articulación produce movimientos relativos predecibles en las demás. Al variar la articulación que se mantiene fija es posible obtener diversos mecanismos a partir de una misma cadena cinemática.

Un ejemplo de cadena cinemática es el motor de un automóvil, donde el movimiento alterno de un pistón se transforma en el movimiento rotacional de un eje de cigüeñal montado en un marco fijo (Figura 8.5a). Esto se puede representar como cuatro articulaciones conectadas (Figura 8.5b). La articulación 1 es el cigüeñal, la articulación 2 la biela, la articulación 3 el sistema articulado fijo y la articulación 4 la guía de deslizamiento, es decir el pistón, que se desplaza en relación con el sistema articulado fijo (vea mayores detalles en la sección 8.3.2).

Figura 8.5 Mecanismo de un motor simple.

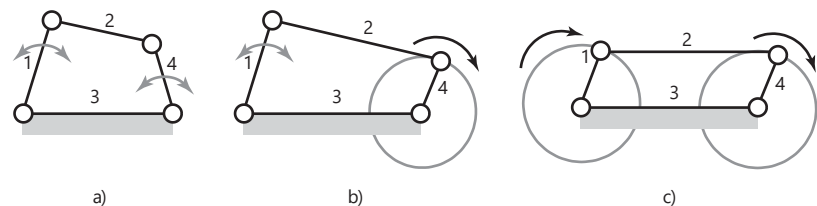


El diseño de muchos mecanismos se basa en dos formas básicas de cadenas cinemáticas, la cadena de cuatro barras y la cadena biela-corredera-cigüeñal. Los siguientes son ejemplos de las formas que estas cadenas pueden adoptar.

### 8.3.1 Cadena de cuatro barras

La **cadena de cuatro barras** consiste en cuatro acoplamientos conectados entre sí de manera que producen cuatro piezas de articulación alrededor de las cuales pueden girar. La Figura 8.6 muestra variantes de esta cadena obtenidas al modificar las longitudes relativas de las articulaciones. Si la suma de la longitud de la articulación más corta más la longitud de la más larga es menor o igual que la suma de las longitudes de las otras dos articulaciones, por

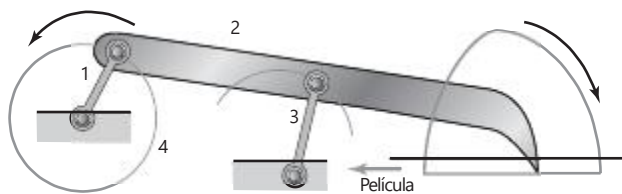
Figura 8.6 Ejemplos de cadenas de cuatro barras.



lo menos una de las articulaciones podrá completar una revolución respecto al acoplamiento fijo. Si la condición anterior no se cumple, ninguno de los acoplamientos podrá realizar una revolución completa. Ésta se conoce como condición de Grashof. En la Figura 8.6a), el acoplamiento 3 está fijo y las longitudes relativas de los acoplamientos son tales que los acoplamientos 1 y 4 pueden oscilar, pero no girar. El resultado es un **mecanismo de doble palanca**. Al acortar el acoplamiento 4 en relación con el 1, el acoplamiento 4 puede girar (Figura 8.6b) con el acoplamiento 1 oscilando, y el resultado anterior se conoce como **mecanismo palanca-cigüeñal**. Los acoplamientos 1 y 4 tienen la misma longitud y ambos pueden girar (Figura 8.6c); lo que se obtiene se conoce como **mecanismo de doble cigüeñal**. Al modificar el acoplamiento fijo se obtienen otros mecanismos.

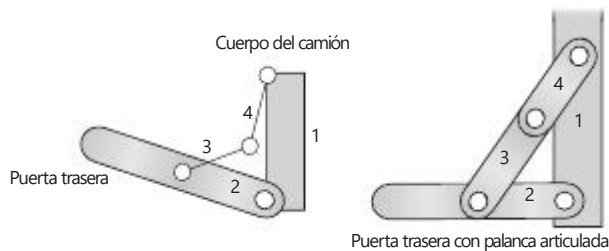
La Figura 8.7 ilustra cómo aprovechar el mecanismo anterior para avanzar la película en una cámara de cine. Conforme el acoplamiento 1 gira, el extremo del acoplamiento 2 se engancha en una de las perforaciones de la película, la jala, la suelta, avanza y retrocede para quedar nuevamente enganchado en la siguiente perforación.

Figura 8.7 Mecanismo para avance de película cinematográfica.



Algunas piezas de articulación tienen **posiciones de palanca articulada**, en las cuales la articulación no reacciona ante las entradas de sus acoplamientos. La Figura 8.8 ilustra esta palanca articulada, una articulación que controla el movimiento de la puerta trasera de un camión de manera que cuando el acoplamiento 2 queda en posición horizontal ninguna carga adicional en el acoplamiento provocará otro desplazamiento. Hay otra posición de palanca articulada en este acoplamiento: cuando los acoplamientos 3 y 4 están en posición vertical y la puerta trasera está en posición vertical.

Figura 8.8 Acoplamiento articulado.



### 8.3.2 Mecanismo biela-corredera-cigüeñal

Este mecanismo consta de un cigüeñal, una biela y una corredera como el que presenta la Figura 8.5 que corresponde a un motor simple. En esta configuración el acoplamiento 3 está fijo, es decir no hay movimiento relativo entre el centro de rotación del cigüeñal y la cubierta en la que se desplaza el pistón. El acoplamiento 1 es el cigüeñal que gira, el acoplamiento 2 la biela y el acoplamiento 4 la corredera que se desplaza en relación con el acoplamiento fijo. Cuando el pistón se desplaza atrás y adelante, es decir cuando el acoplamiento 4 se desplaza atrás y adelante, el acoplamiento 1, o cigüeñal, se ve obligado a girar. De esta manera, el mecanismo se transforma en una entrada de movimientos

Figura 8.9 Secuencia de posición de los acoplamientos en un mecanismo de cigüeñal de biela-corredera.

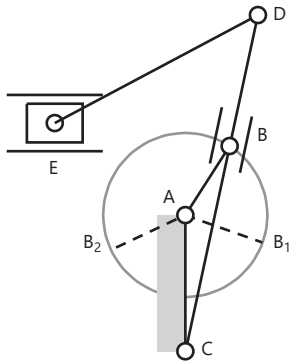
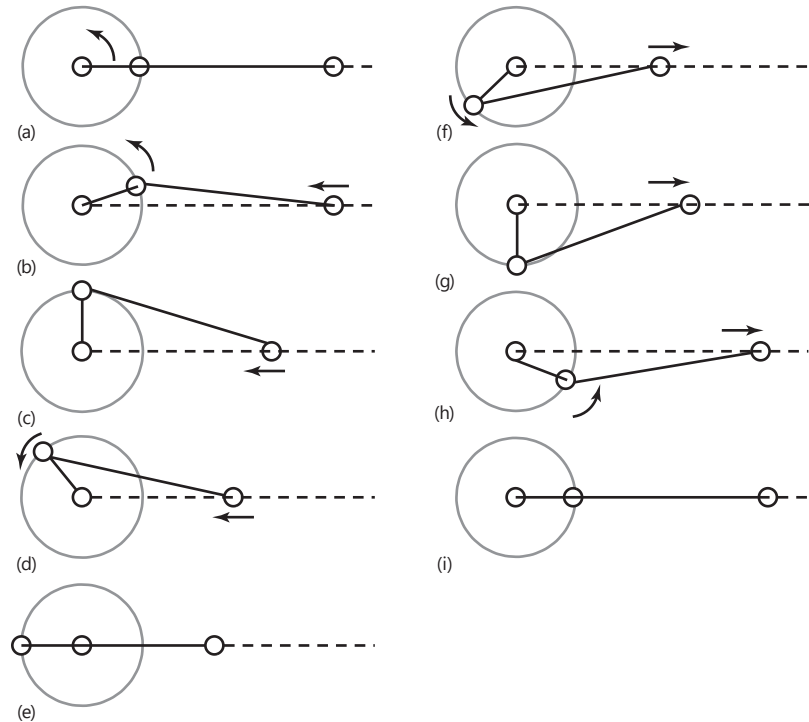


Figura 8.10 Mecanismo de retroceso rápido.

atrás y adelante que se transforma en un movimiento rotacional. La Figura 8.9 muestra varias etapas de este movimiento. Una manera útil de ver cómo se debe comportar cualquier mecanismo es construir a escala un modelo en cartulina y mover los acoplamientos. El cambio en la longitud de un acoplamiento hace entonces que se determinen los cambios en el comportamiento del mecanismo.

La Figura 8.10 presenta otra modalidad de este mecanismo, un **mecanismo de retroceso rápido**, éste consiste en un cigüeñal en rotación, el acoplamiento AB, el cual gira alrededor de un centro fijo; una palanca oscilatoria CD, la cual hace que gire en torno a C por el deslizamiento del bloque en B a lo largo de CD en cuanto AB gira, y un acoplamiento DE que hace que E se desplace hacia adelante y hacia atrás. E puede ser el carro de una máquina que contenga una herramienta de corte. El carro estará en los extremos de su movimiento cuando las posiciones del cigüeñal sean AB<sub>1</sub> y AB<sub>2</sub>. De este modo, conforme el cigüeñal se mueve en sentido contrario al de las manecillas del reloj, de B<sub>1</sub> a B<sub>2</sub>, el carro hace un recorrido completo, la carrera de corte. Si el cigüeñal gira a una velocidad constante dado que el ángulo de rotación del cigüeñal requerido para el recorrido de corte es mayor que el ángulo para el recorrido de retroceso, el recorrido de corte consume más tiempo que el recorrido de retroceso, de donde le viene el concepto de mecanismo de retroceso rápido. Un modelo en cartulina y diagramas similares se pueden construir como los que se presentan en la Figura 8.9.

8.4

Levas

Una **leva** es un cuerpo que gira u oscila y, al hacerlo, transmite un movimiento alterno u oscilatorio a un segundo cuerpo conocido como **seguidor**, con el cual está en contacto (Figura 8.11). Al girar la leva, el seguidor sube, se detiene y desciende; los lapsos correspondientes a estos pasos dependerán de la

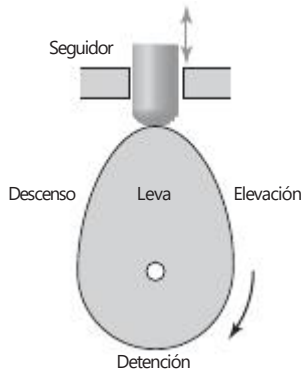
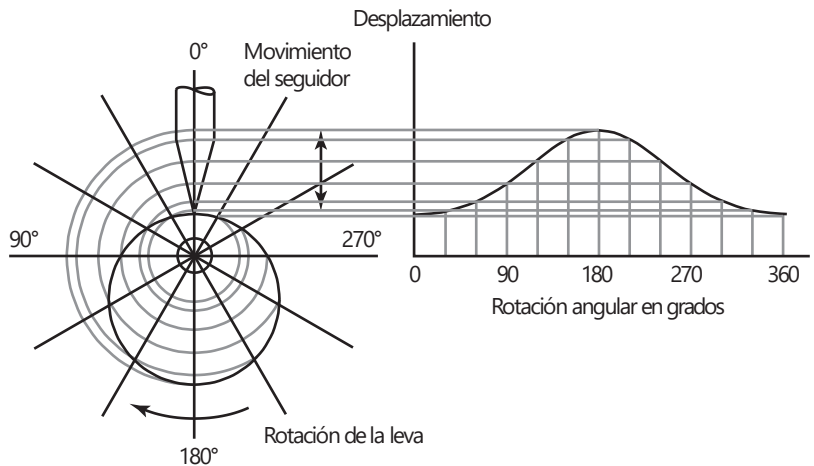


Figura 8.11 Leva y seguidor de leva.

Figura 8.12 Diagrama de desplazamiento de una leva excéntrica.



La Figura 8.13 muestra los tipos de diagramas de desplazamiento del seguidor que pueden producir con otras diferentes formas de levas y cualesquier seguidores, de punto o de cuchilla.

La leva en forma de corazón (Figura 8.13a) proporciona un desplazamiento de seguidor que se incrementa a una velocidad constante con el tiempo antes de disminuir a una velocidad constante con el tiempo, de donde se da una velocidad uniforme al seguidor. La leva en forma de pera (Figura 8.13b) proporciona un movimiento estacionario al seguidor de alrededor de media revolución de la leva y se eleva y cae de manera simétrica en cada uno de los restantes cuartos de revolución. Este tipo de leva se utiliza en control de válvulas de motores. La detención mantiene abierta la válvula en tanto que la mezcla de aire y combustible pasa al cilindro. Cuanto más grande sea la detención, es decir cuanto mayor sea la superficie de la leva con un radio constante, más tiempo tiene el cilindro para cargarse por completo con vapores inflamables.

La Figura 8.14 muestra varios ejemplos de diversos tipos de seguidores de leva. Los de rodillo se construyen principalmente de bolas o de rodillos. Su

Figura 8.13 Levas: a) en forma de corazón; b) en forma de pera.

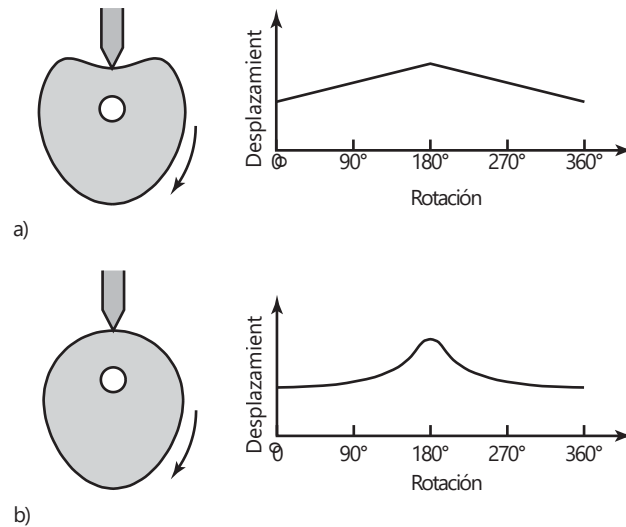
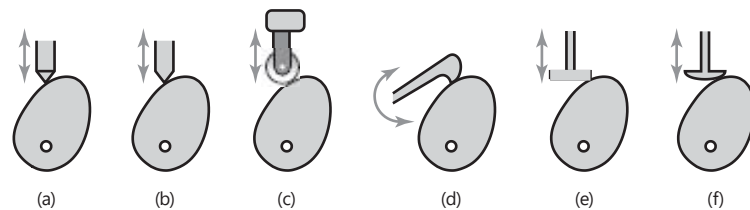


Figura 8.14 Seguidores de leva: a) de punto; b) de cuchilla; c) de rodillo; d) deslizante y oscilante; e) plana y f) de hongo.



gran ventaja es la baja fricción con respecto al contacto deslizante aunque tienen un costo mayor. Los seguidores de cara plana tienen más demanda por ser más económicos y se pueden fabricar en tamaños más pequeños. Se utilizan mucho en levas de válvulas de motor. Aunque se pueden usar en seco, se les suele lubricar e incluso pueden estar sumergidas en aceite.

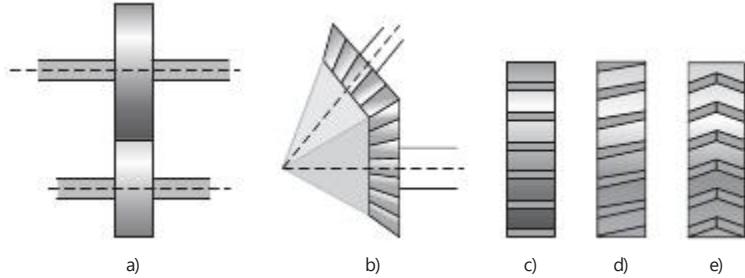
## 8.5

## Engranés

Los **trenes de engranes** son mecanismos muy utilizados para transferir y transformar el movimiento rotacional. Se emplean cuando se necesita un cambio en la velocidad o en el par motor de un dispositivo que está girando. Por ejemplo, la caja de velocidades de un auto permite al conductor igualar los requerimientos de velocidad y par motor para cierta superficie con la potencia disponible del motor.

Los engranes transmiten el movimiento rotacional entre ejes paralelos (Figura 8.15a) y entre ejes inclinados entre sí (Figura 8.15b). El término **engrane cónico** se usa cuando las líneas de los ejes se intersectan, como se observa en la (Figura 8.15b). Cuando dos engranes están dentados, el mayor se llama **corona** o **engrane** y el menor **piñón**. Los engranes que se usan para conectar ejes paralelos tienen dientes rectos; es decir, los ejes se cortan en líneas axiales paralelas al eje (Figura 8.15c). Este tipo de engrane se conoce como **engrane recto**. Una variante es la que tiene dientes helicoidales, los cuales se cortan en forma de hélice (Figura 8.15d) y se conocen como **engranes helicoidales**. Éstos ofrecen la ventaja de un engranado gradual de

Figura 8.15 a) Ejes de engranes paralelos, b) ejes inclinados entre sí, c) dentadura axial, d) dentadura de hélice, e) dentadura de doble hélice.



los dientes y, por lo tanto, la transmisión en los dientes es más suave y su vida se prolonga más. Sin embargo, la inclinación de los dientes respecto al eje produce una componente de fuerza axial en el cojinete del eje. Para eliminarla se utiliza una doble hilera de dientes helicoidales (Figura 8.15e).

Considere dos engranes conectados, A y B (Figura 8.16). Si el engrane A tiene 40 dientes y el B 80 dientes, el engrane A gira dos veces en el mismo tiempo que el engrane B gira una vez. Por lo tanto, la velocidad angular del engrane A,  $v_A$ , debe ser el doble de la del engrane B,  $v_B$ , es decir:

$$\frac{v_A}{v_B} = \frac{\text{número de dientes en B}}{\text{número de dientes en A}} = \frac{80}{40} = 2$$

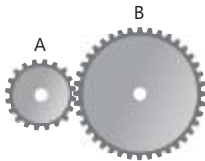


Figura 8.16 Dos engranes conectados.

Dado que la cantidad de dientes de un engrane es proporcional a su diámetro, se tiene que:

$$\frac{v_A}{v_B} = \frac{\text{número de dientes en B}}{\text{número de dientes en A}} = \frac{d_B}{d_A}$$

Por lo tanto, en este caso, el engrane B debe tener dos veces el diámetro del A. El término **relación de engranaje** designa la relación entre las velocidades angulares de un par de engranes conectados. En el ejemplo, esta relación es 2.

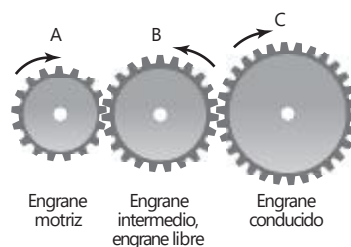
### 8.5.1 Trenes de engranes

El término **tren de engranes** describe una serie de engranes conectados entre sí. El término **tren de engranes simple** se aplica a un sistema en el que cada uno de sus ejes sólo tiene un engrane, como en la Figura 8.17. En este caso, la relación de engranaje total es la relación entre las velocidades angulares entre los ejes de entrada y salida y, por lo tanto, es igual a  $v_A/v_C$ .

$$G = \frac{v_A}{v_C}$$

Considere un tren de engranes que consta de los engranes A, B y C, como en la Figura 8.17. El engrane A tiene 9 dientes y C, 27. Ahora bien, dado que la

Figura 8.17 Tren de engranes simple.



velocidad angular de un engrane es inversamente proporcional a la cantidad de dientes, la relación de engranaje es  $27/9 = 3$ . El efecto del engrane B es sólo modificar la dirección de rotación del engrane de salida respecto a la que tendría si sólo los engranes A y C estuvieran conectados. El engrane intermedio B, se denomina **engrane libre**.

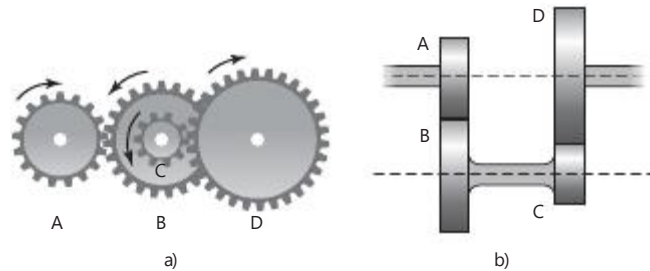
Esta ecuación para la relación de engranaje total  $G$  se puede reescribir como

$$G = \frac{V_A}{V_C} = \frac{V_A}{V_B} \cdot \frac{V_B}{V_C}$$

Pero  $V_A/V_B$  es la relación de engranaje del primer par y  $V_B/V_C$  es la del segundo par. Por lo tanto, la relación de engranaje total de un tren de engranes simple es igual al producto de las relaciones de engranaje de cada par sucesivo de engranes.

El término **tren de engranes compuesto** se refiere a un tren de engranes cuando dos de ellos están montados en un eje común. En la Figura 8.18a) y b) se muestran dos ejemplos de este tren de engranes. El tren de engranes de la Figura 8.18b) permite que los ejes de entrada y salida estén en línea.

Figura 8.18 Tren de engranes compuesto.



Cuando dos engranes están montados en el mismo eje, su velocidad angular es igual. Por lo tanto, para los dos trenes de engranes compuestos de la Figura 8.16,  $v_B = v_C$ . La relación de engranaje total  $G$  es, por lo tanto,

$$G = \frac{V_A}{V_D} = \frac{V_A}{V_B} \cdot \frac{V_B}{V_C} \cdot \frac{V_C}{V_D} = \frac{V_A}{V_B} \cdot \frac{V_C}{V_D}$$

En el arreglo de la Figura 8.16b), para que los ejes de entrada y de salida estén alineados, es necesario que los radios de los engranes cumplan lo siguiente:

$$r_A + r_B = r_D + r_C$$

Considere un tren de engranes compuestos como el de la Figura 8.18a), donde A, el engrane motriz, tiene 15 dientes; B, 30 dientes; C, 18 dientes y D, el engrane conducido, 36 dientes. Dado que la velocidad angular de un engrane es inversamente proporcional al número de dientes, la relación de engranaje total es:

$$G = \frac{30}{15} \cdot \frac{36}{18} = 4$$

Por lo tanto, si la entrada en el engrane A es una velocidad angular de 160 rev/min, la velocidad angular de salida del engrane D es  $160/4 = 40$  rev/min.

Un tren de engranes simple, sea de engranes de dientes rectos o helicoidales, o engranes cónicos, por lo general está limitado a una relación de engranaje

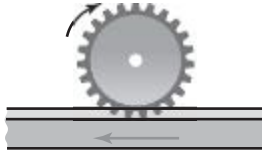


Figura 8.19 Piñón y cremallera.

### 8.5.2 Movimiento rotacional a movimiento de traslación

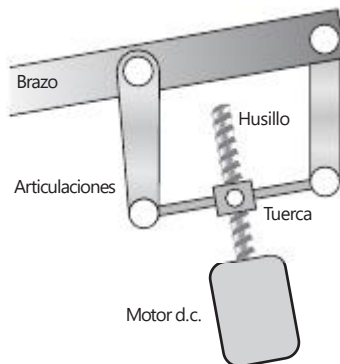
El **piñón y cremallera** (Figura 8.19) es otra forma de engranaje, que es en esencia dos engranajes interbloqueados uno con una base circular del radio infinito. Tales engranajes se pueden utilizar para transformar ya sea un movimiento lineal a uno rotatorio o un movimiento rotatorio a un movimiento interlineal.

Otro método que se ha empleado para convertir un movimiento rotatorio en uno de traslación es el **sistema de tornillo y tuerca**. Con la forma convencional de tornillo y tuerca, la tuerca gira y se mueve a lo largo del tornillo estacionario. Sin embargo, si el tornillo se gira en la tuerca adjunta a la parte a ser conducida, la tuerca se mueve a lo largo de la rosca. A este arreglo se le conoce como **tornillo de avance**. El avance  $L$  es la distancia de movimiento paralelo al eje del tornillo cuando se le da una vuelta a la tuerca; para una rosca simple el avance es igual al paso. En  $n$  revoluciones la distancia de movimiento en paralelo al eje del tornillo será  $nL$ . Si se completan  $n$  revoluciones en un tiempo  $t$ , la velocidad lineal  $v$  paralela al eje del tornillo es  $nL/t$ . Como  $n/t$  es la cantidad de revoluciones por segundo  $f$  para el tornillo, entonces:

$$v = \frac{nL}{t} = fL$$

Sin embargo, hay problemas al utilizar este tipo de arreglo para convertir el movimiento de rotación en un movimiento lineal, ya que hay fuerzas de alta fricción implicadas en el contacto de deslizamiento directo entre el tornillo y la tuerca así como con la falta de rigidez. El punto de la fricción se puede resolver si se utiliza un **husillo**. Este tipo de tornillo es idéntico en principio al tornillo de cabeza, pero los cojinetes de bolas se ubican en la tuerca del tornillo. Este arreglo se ha usado en robots para manejar el brazo, que funciona con un motor de c.d. (Figura 8.20). El motor hace girar el tornillo, que a su vez mueve la tuerca hacia arriba o hacia abajo. El movimiento de la tuerca se transmite al brazo mediante una articulación.

Figura 8.20 Husillo y articulaciones utilizados para mover el brazo de un robot.





### 8.6 Rueda dentada y trinquete

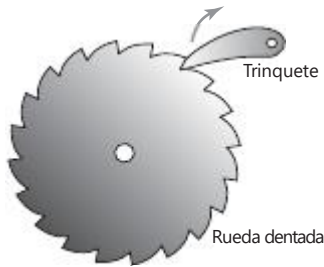


Figura 8.21 Rueda dentada y trinquete.

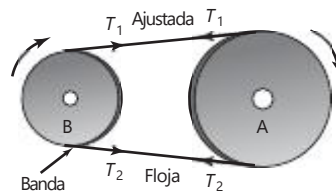
Los **trinquetes** se utilizan para trabar un mecanismo cuando sostiene una carga. La Figura 8.21 muestra una rueda dentada y un seguro. Este mecanismo consta de una **rueda dentada**, con dientes en forma de sierra que se enganchan con un brazo denominado **trinquete**. El brazo está sujeto a un pivote que se mueve hacia atrás y hacia adelante para trabar la rueda. La forma de los dientes es tal que sólo permite la rotación en una dirección. El trinquete impide la rotación de la rueda dentada en el sentido de las manecillas del reloj y sólo puede hacerlo levantando el seguro, el cual casi siempre se acciona con un resorte para garantizar que de manera automática quede trabado en los dientes de la rueda dentada.

Un malacate que sirve para enrollar un cable en un tambor debe tener un trinquete para impedir que el cable se desenrolle al levantar la palanca.

### 8.7 Bandas y cadenas de transmisión

Las bandas de transmisión son en esencia un par de cilindros giratorios con el movimiento de uno de ellos transfiriéndose al otro mediante una banda (Figura 8.22). En las bandas de transmisión se aprovecha la fricción que se crea entre las poleas montadas sobre los ejes y la banda que rodea el arco de contacto para transmitir un par motor. Dado que la transferencia se basa en las fuerzas de fricción, existe la posibilidad de un derrape o deslizamiento. El par motor transmitido se debe a las diferencias de tensión que se producen en la banda durante la operación. Esta diferencia ocasiona que en la banda haya un lado apretado y otro flojo. Si la tensión en la parte apretada es igual a  $T_1$  y la del lado flojo es  $T_2$ , entonces la polea A de la Figura 8.22 es la polea conductora:

Figura 8.22 Banda de transmisión.



$$\text{par motor en A} = (T_1 - T_2)r_A$$

donde  $r_A$  es el radio de la polea A. Para la polea impulsada B se tiene que:

$$\text{par motor en B} = (T_1 - T_2)r_B$$

donde  $r_B$  es el radio de la polea B. Dado que la potencia transmitida es igual al producto del par motor y de la velocidad angular, y puesto que la velocidad angular es igual a  $v/r_A$  para la polea A y  $v/r_B$  para la polea B, donde  $v$  es la velocidad de la banda, entonces en cada polea tenemos:

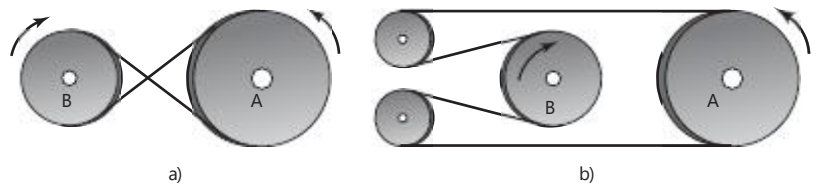
$$\text{potencia} = (T_1 - T_2)v$$

En el método para transmitir potencia entre dos ejes, las bandas de transmisión tienen la ventaja de que la longitud de la banda se ajusta con facilidad

para adaptarla a una amplia gama de distancias eje a eje, y proteger el sistema de manera automática de una sobrecarga, pues si la carga rebasa la tensión máxima que puede mantener gracias a las fuerzas de fricción, de inmediato se produce un deslizamiento. Si las distancias entre los ejes son grandes, es más conveniente usar bandas de transmisión que engranes; en cambio, para distancias de separación pequeñas es preferible usar engranes. Para obtener un efecto de engranaje se utilizan poleas de diferente tamaño. Sin embargo, la relación de engranaje está limitada a alrededor de 3, debido a la necesidad de mantener un arco de contacto adecuado entre la banda y las poleas.

La banda de transmisión de la Figura 8.22 hace girar la rueda impulsada en la misma dirección de la rueda impulsora. La Figura 8.23 muestra dos tipos de transmisiones inversoras. En las dos formas de transmisión, ambas caras de la banda están en contacto con las ruedas, por lo que no es posible utilizar bandas en V (bandas trapezoidales) ni bandas dentadas reguladoras de tiempo.

Figura 8.23 Bandas de transmisión inversas:  
a) transmisión cruzada,  
b) transmisión abierta.



### 8.7.1 Tipos de bandas

Los cuatro tipos principales de bandas (Figura 8.24) son:

#### 1 Plana

El área transversal de esta banda es rectangular. La eficiencia de esta transmisión es casi 98% y produce poco ruido. Es capaz de transmitir la potencia en largas distancias entre los centros de las poleas. Las poleas con cejas se usan para impedir que las bandas se salgan de la guía.

#### 2 Redonda

La sección transversal es circular y se emplea con poleas con ranura.

#### 3 En V

Las bandas en V o trapezoidales se utilizan en poleas con ranura. Son menos eficientes que las bandas planas, aunque se pueden usar muchas de ellas en una sola rueda, por lo que es posible obtener una transmisión múltiple.

#### 4 Banda dentada reguladora de tiempo

Las bandas reguladoras de tiempo requieren ruedas dentadas en las que cada diente encaje en las ranuras de las ruedas. Esta banda, a diferencia de otras, no se estira ni se resbala, por lo que transmite potencia a una velocidad angular constante. Los dientes le permiten avanzar a velocidad lenta o rápida.

Figura 8.24 Tipos de banda.



### 8.7.2 Cadenas

Para evitar deslizamientos se utilizan cadenas que se traban en los dientes de los cilindros rotacionales, lo que equivale a un par de engranes conectados. La relación de engranaje de una cadena es la misma que la de un tren de engranes. El mecanismo de transmisión de una bicicleta es un ejemplo de cadena de transmisión. Las cadenas permiten controlar varios ejes usando sólo una rueda, con lo que se logra una transmisión múltiple. No son tan silenciosas como la banda dentada reguladora de tiempo, pero se pueden usar en pares de rotación mayores.

## 8.8

### Cojinetes (chumaceras)

Siempre que hay desplazamiento de una superficie que está en contacto con otra, ya sea por rotación o deslizamiento, las fuerzas de fricción producidas generan calor que desperdicia energía y produce desgaste. La función de los **cojinetes** o **chumaceras** (también conocidos como **rodamientos**) es guiar el movimiento de una parte respecto a otra con mínima fricción y máxima exactitud.

Es de particular importancia la necesidad de proporcionar un soporte adecuado a los ejes rotacionales, es decir un soporte a las cargas radiales. El término **cojinete de empuje** designa los cojinetes que permiten soportar fuerzas a lo largo de un eje cuando el movimiento relativo es una rotación. En las siguientes secciones se resumen las características de diversos tipos de chumaceras de uso común.

#### 8.8.1 Cojinetes de deslizamiento

Los cojinetes se usan para apoyar ejes rotacionales que soportan carga en dirección radial. El cojinete consiste básicamente en una inserción de un material adecuado que se ajusta entre el eje y el soporte (Figura 8.25). Al girar el eje, la superficie del soporte se desliza sobre la superficie del cojinete. El inserto puede ser un metal blando, una aleación de aluminio, una aleación de cobre, bronce o un polímero como el nailon o el PTFE. Gracias al material insertado se reducen la fricción y el desgaste que se habrían producido si el eje hubiese girado en un orificio en el soporte. El cojinete puede operar en seco o lubricado. Plásticos como el nailon y el PTFE en general se utilizan sin lubricación, ya que su coeficiente de fricción es muy bajo. Un material muy utilizado para fabricar cojinetes es el bronce sinterizado, cuya estructura porosa permite que se impregne aceite y, de esta manera, el cojinete ya tiene un lubricante "incorporado".

La lubricación puede ser:

##### 1 Hidrodinámica

El **cojinete con lubricación hidrodinámica** tiene un eje que gira continuamente en aceite, de manera que su desplazamiento sólo se realiza en el aceite y no se apoya en el metal (Figura 8.26). La carga se soporta gracias a la presión que la rotación del eje genera en el aceite.

##### 2 Hidrostática

Un problema de la lubricación hidrodinámica es que el eje sólo se mueve en aceite cuando gira; pero si está en reposo, hay contacto metal a metal. Para evitar un excesivo desgaste durante el arranque y cuando la carga es baja, se bombea aceite al área del cojinete con presión suficiente para levantar el eje y mantenerlo separado del metal en condiciones de reposo.

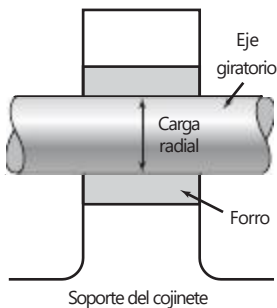


Figura 8.25 Cojinete de deslizamiento.

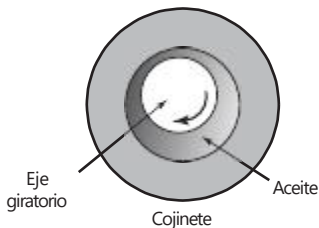


Figura 8.26 Cojinete con lubricación hidrodinámica.

### 3 De capa sólida

Es un revestimiento de material sólido como grafito o disulfuro de molibdeno.

### 4 Capa límite

Se trata de una delgada capa de lubricante que se adhiere a la superficie del cojinete.

## 8.8.2 Cojinetes de bolas y de rodillos

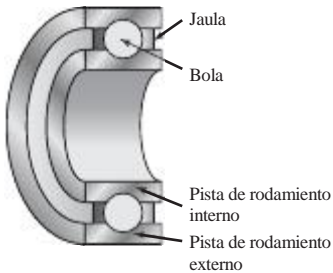


Figura 8.27 Elementos básicos de un cojinete de bolas.

Con este tipo de cojinetes, la carga principal se transfiere del eje rotacional al apoyo mediante un contacto de rodadura en vez de un contacto por deslizamiento. Un cojinete de rotación consta de cuatro elementos principales: una pista interna, una pista externa, el elemento de rodamiento de bolas o rodillos y una jaula que mantiene separados los elementos de rodamiento (Figura 8.27). Las pistas de rodamiento internas y externas contienen guías endurecidas dentro de las cuales giran los elementos rodantes.

Hay varios tipos de cojinetes de bolas:

#### 1 Rígido de bolas (Figura 8.28a)

Este cojinete es bueno para soportar cargas radiales, aunque moderadamente bueno para soportar cargas axiales. Es un rodamiento versátil que se puede utilizar con una amplia gama de cargas y velocidades.

#### 2 Ranura de relleno (Figura 8.28b)

Este cojinete soporta cargas radiales mayores que los rígidos de bolas, pero no se usan cuando hay cargas axiales.

#### 3 Contacto angular (Figura 8.28c)

Es recomendable para cargas radiales y axiales y mejor aún para cargas axiales que el rígido de bolas.

#### 4 De doble hilera (Figura 8.28d)

Los cojinetes de bolas de doble hilera se fabrican en diversos tipos y son capaces de soportar cargas radiales mayores que los de una hilera. En la figura se ilustra un cojinete de bolas de doble hilera con ranura profunda; existen versiones de doble hilera para cada una de las versiones de una hilera anteriores.

#### 5 Cojinete autoalineable (Figura 8.28e)

Los cojinetes de una hilera pueden aceptar una ligera desalineación del eje, pero si la desalineación es considerable, debe usarse un cojinete corrector de holgura. Éste sólo tiene capacidad para soportar cargas radiales moderadas y es deficiente para cargas axiales.

#### 6 Axiales (Figura 8.28f)

Están diseñados para soportar cargas axiales, aunque no son adecuados para cargas radiales.

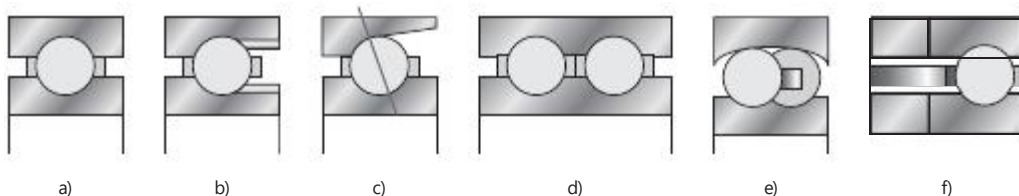


Figura 8.28 Tipos de un cojinete de bolas.

También hay varios tipos de cojinetes de rodillos; los siguientes son algunos ejemplos:

1 *Rodillo cilíndrico* (Figura 8.29a)

Es mejor para cargas radiales que el cojinete de bolas equivalente, pero en general no es recomendable para cargas axiales. Soportan cargas mayores que los cojinetes de bolas de las mismas dimensiones debido a su mayor área de contacto. Sin embargo, no permiten desalineamiento.

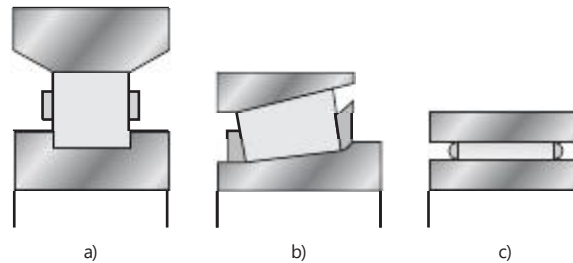
2 *Rodillo cónico* (Figura 8.29b)

Es bueno para cargas radiales y en una dirección para cargas axiales.

3 *Rodillo de agujas* (Figura 8.29c)

Su rodillo tiene una relación longitud/diámetro de valor elevado y tiende a usarse en situaciones donde no hay suficiente espacio para alojar el cojinete de bolas o de rodillos equivalente.

Figura 8.29 Cojinetes de rodillos.



### 8.8.3 Selección de los rodamientos

En general, los cojinetes de deslizamiento seco sólo se utilizan en ejes de diámetro pequeño con carga y velocidad también pequeños; los rodamientos de bolas y de rodillos, es decir en los que hay movimiento rotacional, se usan para rangos mucho más amplios de diámetros de eje, cargas y velocidad más altas, y los rodamientos hidrodinámicos se usan para cargas y ejes de diámetro grandes.

#### Resumen

Los **mecanismos** son dispositivos que pueden considerarse convertidores de movimiento porque transforman el movimiento de una forma a otra forma requerida.

Al movimiento de un cuerpo se le puede considerar una combinación de movimientos de rotación y de traslación. El número de **grados de libertad** es el número de componentes al movimiento que son requeridos para generar el movimiento.

Cada parte de un mecanismo que tiene movimiento relativo a alguna otra parte es conocido como **articulación**. A los puntos de unión de una articulación con los puntos de otras se les llama **nodos**. Una **unión** es una conexión entre dos o más articulaciones en sus nodos. A una secuencia de uniones y articulaciones se le conoce como **cadena cinemática**. Una **cadena de cuatro barras** consiste de cuatro articulaciones conectadas para dar cuatro uniones en las que se pueda realizar un giro.

Una **leva** es un cuerpo que gira u oscila y al hacer esto difunde un movimiento recíprocante u oscilatorio a un segundo cuerpo llamado **seguidor**, con el que está en contacto.

Los **engranes** se pueden utilizar para la transmisión del movimiento rotatorio entre los ejes paralelos y para los ejes cuyos ejes están inclinados entre sí.

Los sistemas de **piñón y cremallera** y de **tornillo y tuerca** se pueden emplear para convertir el movimiento de rotación a movimiento de traslación.

Los **trinquetes** se usan para asegurar o detener un mecanismo cuando está sosteniendo una carga.

La **banda** y la **cadena de transmisión** se pueden usar para transmitir el movimiento rotatorio entre ejes que son paralelos y tienen alguna distancia.

Los **cojinetes** se utilizan para guiar con la mínima fricción y la máxima exactitud el movimiento de una pieza con relación a otra.

## Problemas

- 8.1 Explique los términos: a) mecanismo, b) cadena cinemática.
- 8.2 Explique qué es una cadena de cuatro barras.
- 8.3 Después de analizar los siguientes mecanismos, indique los grados de libertad de cada uno:
  - a) El mecanismo de la bisagra del cofre de un automóvil.
  - b) El mecanismo de la puerta trasera de una camioneta.
  - c) El mecanismo del limpiaparabrisas.
  - d) Su rodilla
  - e) Su tobillo.
- 8.4 Analice el movimiento de los siguientes mecanismos e indique si hay rotación pura, traslación pura o es una combinación de componentes de rotación y traslación.
  - a) Las teclas en el teclado de una computadora.
  - b) La pluma de un graficador XY (plotter).
  - c) La manecilla de un reloj.
  - d) La aguja de un amperímetro de bobina móvil.
  - e) Un desarmador automático.
- 8.5 En el mecanismo de la Figura 8.30, el brazo AB gira a velocidad constante. B y F son guías de deslizamiento que van de CD y de AF. Describa el comportamiento de este mecanismo.

Figura 8.30 Problema 8.5.

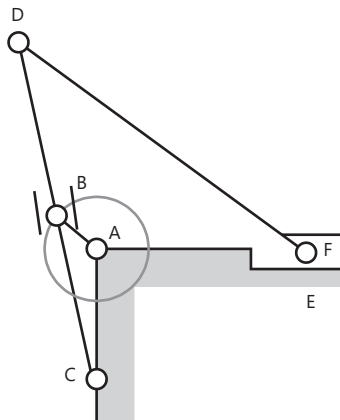




Figura 8.31  
Problema 8.6.

- 8.6 Explique cómo variará el desplazamiento de la leva-seguidor de la Figura 8.31 con el ángulo de rotación de la leva.
- 8.7 Una leva circular con diámetro de 100 mm tiene un eje de rotación excéntrico desviado unos 30 mm del centro. Cuando se usa con un seguidor tipo cuchillo y su línea de acción pasa por el centro de rotación, ¿cuál será la diferencia entre los desplazamientos máximo y mínimo del seguidor?
- 8.8 Diseñe un sistema de leva-seguidor que produzca velocidades de seguidor constantes cuando los desplazamientos del seguidor varíen entre 40 y 100 mm.
- 8.9 Diseñe un sistema mecánico que sirva para:
- Operar una secuencia de microinterruptores de acuerdo con una secuencia programada.
  - Mover una herramienta a velocidad constante en una dirección y luego rápidamente regresarla a su posición inicial.
  - Transformar una rotación en un movimiento lineal de avance y retroceso con movimiento armónico simple.
  - Transformar una rotación con cierta abertura angular en un desplazamiento lineal.
  - Transformar la rotación de un eje en la rotación de otro eje paralelo a determinada distancia del primero.
  - Transformar la rotación de un eje en la rotación de otro eje cercano en posición perpendicular respecto al primero.
- 8.10 Un tren de engranes compuesto consta de un engrane final impulsado con 15 dientes conectado a otro engrane con 90 dientes. En el mismo eje del segundo engrane hay un engrane con 15 dientes; éste se conecta con un cuarto engrane, que es el engrane motriz con 60 dientes, ¿cuál es la relación de engranaje total?

## Objetivos

Después de estudiar este capítulo, el lector debe ser capaz de:

- Evaluar las características operacionales de los sistemas de actuación eléctrica: relevadores, interruptores de estado sólido (tiristores, transistores bipolares y MOSFETs), solenoides, motores de c.d., de c.a. y paso a paso.
- Explicar los principios de motores de c.d., entre ellos el motor de imán permanente y cómo éste puede tener su velocidad controlada.
- Explicar el principio del motor de c.d. de imán permanente sin escobillas.
- Explicar los principios de la reluctancia variable, imán permanente y formas híbridas del motor paso a paso y cómo se pueden generar las secuencias de paso.
- Explicar los requerimientos para seleccionar motores de concordancia de inercia, así como los de torque y potencia.

### 9.1

#### Sistemas eléctricos

Al estudiar los sistemas eléctricos que se emplean como actuadores de control deberán tenerse en cuenta los siguientes dispositivos y sistemas:

- 1 *Dispositivos de conmutación*, como interruptores mecánicos, por ejemplo relevadores e interruptores de estado sólido, como diodos, tiristores y transistores, en los que la señal de control enciende o apaga un dispositivo eléctrico, tal vez un calentador o un motor.
- 2 *Dispositivos tipo solenoide*, en los cuales una corriente que pasa por un solenoide acciona un núcleo de hierro dulce, por ejemplo una válvula hidráulica/neumática operada por solenoide, donde la corriente de control que pasa por el solenoide se utiliza para regular el flujo hidráulico/neumático.
- 3 *Sistemas motrices*, por ejemplo, motores de c.d. y de c.a., en los cuales la corriente que pasa por el motor produce una rotación.

Este capítulo da un panorama general de este tipo de dispositivos y sus características.

### 9.2

#### Interruptores mecánicos

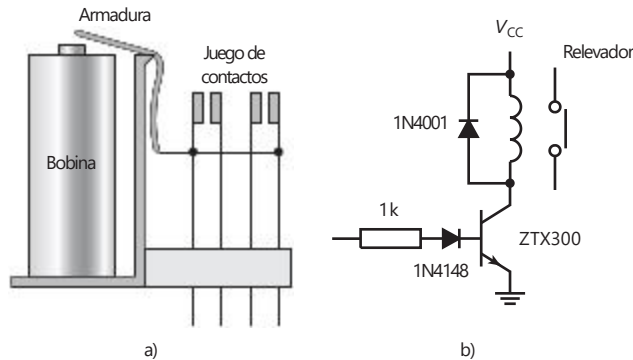
Los interruptores mecánicos son elementos que con frecuencia se usan como sensores para producir y enviar entradas a diversos sistemas, por ejemplo un teclado (vea la sección 2.12). En este capítulo nos concentraremos en su empleo como actuadores quizá para encender motores eléctricos o elementos calefactores, o para poner en circulación una corriente para la actuación de válvulas solenoide que controlan cilindros hidráulicos o neumáticos. El **relevador** eléctrico es un ejemplo de interruptor mecánico que en los sistemas de control se usa como actuador.



### 9.2.1 Relevadores

Los relevadores son interruptores operados eléctricamente, en los que el cambio de corriente en un circuito hace que circule o no una corriente en otro circuito. Para el relevador que se muestra en la Figura 9.1a), cuando fluye corriente a través del solenoide del relevador, se produce un campo magnético que atrae la armadura metálica, mueve la varilla de empuje, cierra los contactos del interruptor normalmente abierto (NO, **normally open**) y abre los contactos del interruptor normalmente cerrado (NC, **normally closed**).

Figura 9.1 a) Un relevador, b) un circuito conductor.



Los relevadores se utilizan con frecuencia en sistemas de control; la salida del controlador es relativamente pequeña y para encender o apagar el elemento final de corrección se necesita una corriente mucho más grande, por ejemplo, la corriente requerida por un calefactor eléctrico en un sistema de control de temperatura o por un motor. En tal situación es posible que se usen relevadores en conjunto con circuitos transistorizados; la Figura 9.1b) muestra el tipo de circuito que se utilizaría. Debido a que los relevadores son inductores, pueden generar un contra voltaje cuando deja de fluir la corriente de energización o cuando sus interruptores de entrada van de un estado alto a uno bajo. Como resultado se puede presentar daño en el circuito de conexión. Para solucionar este problema, se conecta un diodo a través del relevador. Cuando se presenta la fuerza contraelectromotriz, el diodo conduce y la extingue. Este diodo es conocido como **diodo de protección** o **flyback**.

Para ilustrar cómo se utilizan los relevadores en los sistemas de control, la Figura 9.2 muestra cómo se usan dos relevadores para controlar el funcionamiento de válvulas neumáticas, las que a su vez controlan el movimiento de los vástagos de tres cilindros A, B y C. La secuencia de operaciones es la siguiente:

- 1 Al cierre del interruptor de arranque, la corriente se aplica a los solenoides A y B, con lo que A y B se extienden, es decir A+ y B+.
- 2 Los sensores de final de carrera a+ y b+ se cierran; al cierre de a+ fluye una corriente por el devanado del relevador 1, el cual cierra sus contactos y suministra corriente al solenoide C que se extiende, es decir C+.
- 3 Debido a esta extensión, el sensor de final de carrera c+ se cierra y se suministra corriente para conmutar las válvulas de control A y B, lo que provoca la retracción de los cilindros A y B, es decir A- y B-.
- 4 Al cerrar el sensor de final de carrera a- pasa una corriente por el devanado del relevador 2; sus contactos se cierran y suministra corriente a la válvula C y el cilindro C se retrae, es decir C-.

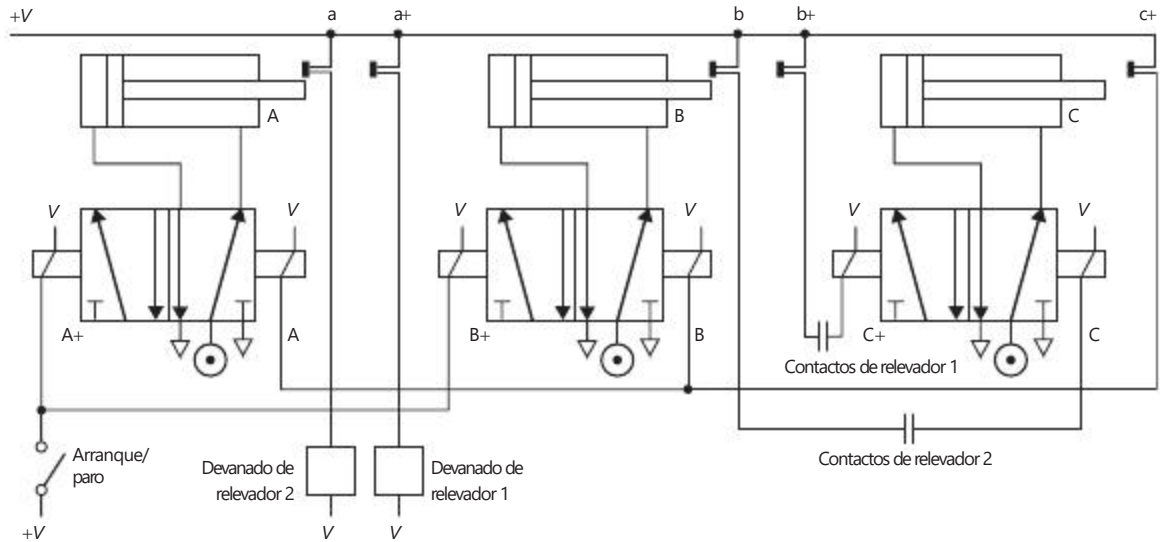


Figura 9.2 Sistema controlado por relevador.

La secuencia dada por este sistema es: A+ y B+ en forma simultánea; luego, C+, seguido de A y B simultáneamente y, al final, C .

Los **relevadores de retardo** son relevadores de control y su acción de conmutación se produce con un retardo que, por lo general, es ajustable y se inicia al pasar una corriente por el devanado del relevador o cuando deja de pasar por éste.

## 9.3

### Interruptores de estado sólido

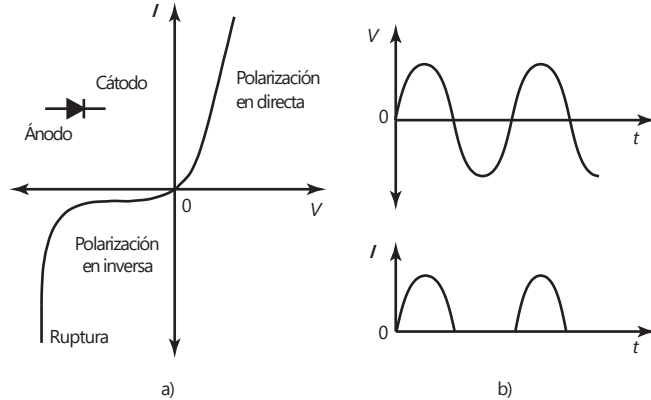
Para realizar la conmutación electrónica de los circuitos se utilizan diversos dispositivos de estado sólido. Entre éstos figuran los siguientes:

- 1 Diodos
- 2 Tiristores y triacs
- 3 Transistores bipolares
- 4 MOSFET de potencia

#### 9.3.1 Diodos

Un **diodo** tiene la característica mostrada en la Figura 9.3a), en la que el diodo sólo da paso a la corriente cuando su polarización es en directa, es decir cuando el ánodo es positivo respecto del cátodo. Si el diodo tiene una polarización en inversa suficiente, es decir un voltaje muy alto, causa una ruptura. Si a un diodo se le aplica un voltaje alterno, se puede considerar que está conectado sólo cuando la dirección del voltaje es tal que produce una polarización en directa; el diodo se desconecta cuando está en la dirección de polarización en inversa. El resultado es que la corriente que fluye por el diodo está rectificadora a la mitad para convertirse justo en la corriente debida a la mitad positiva del voltaje de entrada (Figura 9.3 b), por ejemplo el circuito sólo "enciende" para la mitad de ciclo positivo.

Figura 9.3 a) Características del diodo, b) rectificación de media ola.



**9.3.2 Tiristores y triacs**

El **tiristor** o **rectificador controlado de silicio (SCR, por sus siglas en inglés)** es un diodo con una compuerta que controla las condiciones en las que se activa. La Figura 9.4a) muestra las características de un tiristor. Si la corriente en la compuerta es cero, el tiristor pasa una corriente despreciable cuando la polarización es en inversa (a menos que su polarización en inversa tenga un valor elevado, de cientos de volts, cuando se produce su ruptura). Si el tiristor tiene polarización en directa, la corriente también es despreciable, hasta que se rebasa el voltaje de ruptura. Cuando esto sucede, el voltaje en el diodo desciende a un nivel bajo, de 1 o 2 V, y lo único que limita la corriente es la resistencia externa en un circuito. Por ejemplo, si el voltaje de ruptura en sentido directo es 300 V, al alcanzar este voltaje, el tiristor se activa y el voltaje desciende a 1 o 2 V. Si el tiristor está en serie con un resistor, por ejemplo de 20  $\Omega$  (Figura 9.4b), se tiene una resistencia muy alta antes de la ruptura en serie con los 20  $\Omega$  y virtualmente todos los 300 V están en el tiristor y la corriente es despreciable. Si la ruptura ocurre en sentido directo, el voltaje en el tiristor disminuye, por ejemplo a 2 V; por lo tanto, ahora hay  $300 \text{ V} - 2 = 298 \text{ V}$  en el resistor de 20  $\Omega$ , y la corriente aumenta a  $298/20 = 14.9 \text{ A}$ .

Una vez activado el tiristor permanece así hasta que la corriente en sentido directo disminuye a un valor inferior a unos cuantos miliamperes. El voltaje que produce la ruptura en sentido directo depende de la corriente que entra a la compuerta: cuanto mayor sea la corriente, menor será el voltaje de ruptura. La capacidad para manejar voltajes de un tiristor es alta y, por lo tanto, con frecuencia se usan para conectar/desconectar aplicaciones que manejan voltajes elevados. Por ejemplo, el CF106D de Texas Instruments tiene un

Figura 9.4 a) Características de un tiristor, b) circuito del tiristor.

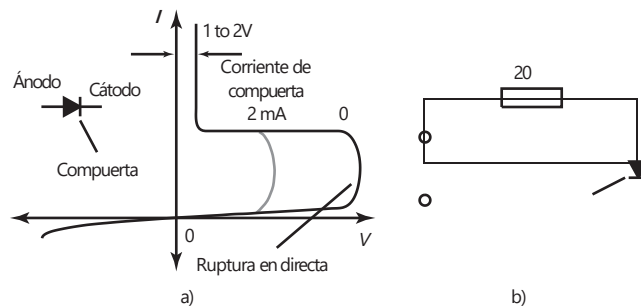
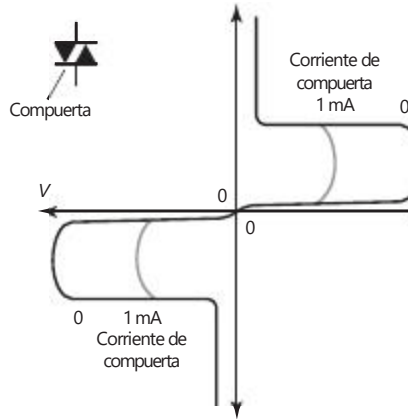


Figura 9.5 Características de un triac.

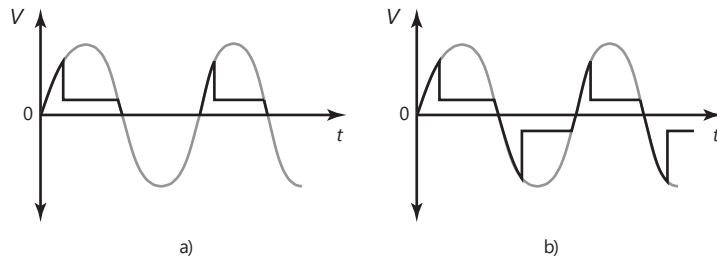


voltaje máximo sin riesgo de disparo de 400 V y una corriente máxima de disparo en la compuerta de 0.2 mA.

El triac (tiristor bidireccional) es similar al tiristor y equivale a un par de tiristores conectados en forma inversa y en paralelo al mismo chip. El triac se activa en sentido directo y en sentido inverso; la Figura 9.5 ilustra sus características. Un ejemplo es el triac MAC212-4 de Motorola, que tiene un voltaje máximo sin riesgo de disparo de 200 V y una corriente máxima en condiciones de trabajo de 12 A r.m.s. Los triacs son un medio sencillo y más o menos barato para controlar potencia de c.a.

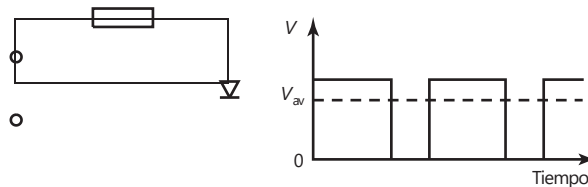
La Figura 9.6 muestra el efecto que se produce al aplicar un voltaje alterno senoidal en: a) un tiristor y b) un triac. La ruptura en sentido directo ocurre cuando el voltaje aumenta hasta el valor de ruptura; a partir de ese momento, el voltaje en el dispositivo permanece bajo.

Figura 9.6 Control de voltaje: a) tiristor, b) triac.



Un ejemplo de cómo usar estos dispositivos en aplicaciones de control, se ilustra en la Figura 9.7 con un tiristor para controlar un voltaje de c.d. con valor constante  $V$ . El tiristor funciona como interruptor mediante la compuerta para activar o desactivar el dispositivo. Al aplicar una señal alterna en la compuerta se recorta el voltaje de alimentación y se produce un voltaje intermitente. De esta manera, la señal alterna aplicada a la compuerta modifica el valor promedio ( $V_{av}$ ) del voltaje de c.d. de salida y, por lo tanto, lo controla.

Figura 9.7 Control de c.d. por tiristor.



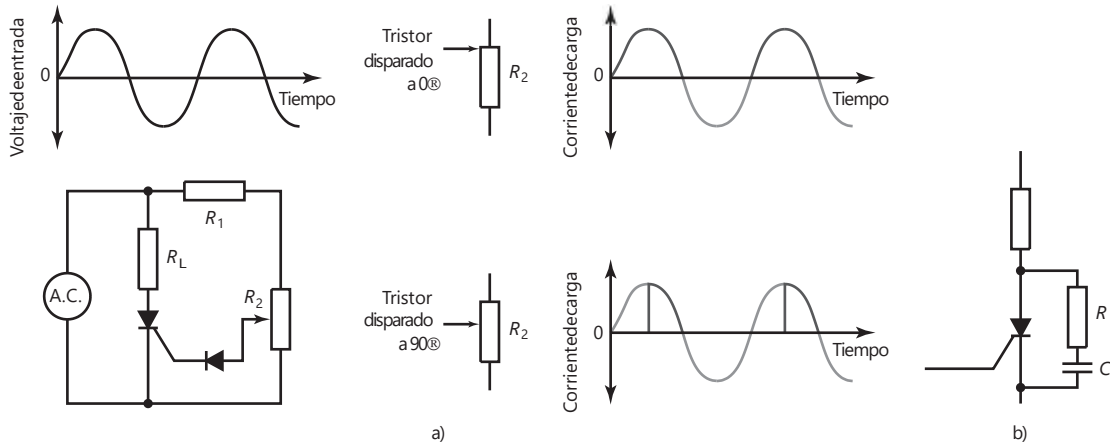


Figura 9.8 a) Circuito para control de fase, b) circuito amortiguador o de frenado (*snubber*).

Otro ejemplo de aplicación de control es la corriente alterna que se usa en los calentadores eléctricos, los motores eléctricos o los controladores de intensidad luminosa de los focos (*dimmers*). La Figura 9.8a) muestra un circuito para control de fase, de resistencia variable y de media onda. La corriente alterna se aplica en la carga, por ejemplo en el foco del circuito de control de intensidad luminosa, y en serie con el tiristor.  $R_1$  es un resistor limitador de corriente y  $R_2$  un potenciómetro que establece el valor a partir del cual se dispara el tiristor. El diodo impide que la parte negativa del ciclo de voltaje alterno se aplique a la compuerta. Al ajustar  $R_2$ , el tiristor se disparará a cualquier valor comprendido entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$  durante el semiciclo positivo del voltaje alterno aplicado. Cuando el tiristor se dispara cerca del inicio del ciclo, es decir cerca de  $0^\circ$ , conduce durante todo el semiciclo positivo y a la carga se aplica el máximo voltaje. Conforme el disparo del tiristor se retrasa a un momento posterior del ciclo, el voltaje que se aplica a la carga también se reduce.

Cuando se aplica voltaje de manera súbita a un tiristor o un triac, con la compuerta apagada, el tiristor cambia su condición de desactivado a activado. Un valor de voltaje característico que permite producir este efecto es del orden de  $50 \text{ V}/\omega s$ . Si la fuente de alimentación es un voltaje de c.d., el tiristor puede continuar en el estado de conducción anterior hasta que se produce una interrupción del circuito. Para evitar este brusco cambio del voltaje de alimentación que causa este efecto, se controla la razón de cambio del voltaje con respecto al tiempo, es decir  $dV/dt$ ; para ello se usa un **circuito amortiguador o de frenado (*snubber*)**, que consta de un resistor conectado en serie con un capacitor que se coloca en paralelo con el tiristor (Figura 9.8b).

### 9.3.3 Transistores bipolares

Existen dos tipos de **transistores bipolares**: el npn y el pnp. La Figura 9.9a) muestra el símbolo de cada uno. En el transistor npn la corriente principal entra por el colector y sale por el emisor y en la base se aplica una señal de control. En el transistor pnp la corriente principal entra por el emisor y sale por el colector y en la base se aplica una señal de control.

En un transistor npn conectado como ilustra la Figura 9.9b), o el circuito conocido como emisor común, la relación entre la corriente de colector,  $I_C$ , y la diferencia de potencial entre el colector y el emisor,  $V_{CE}$ , se describen

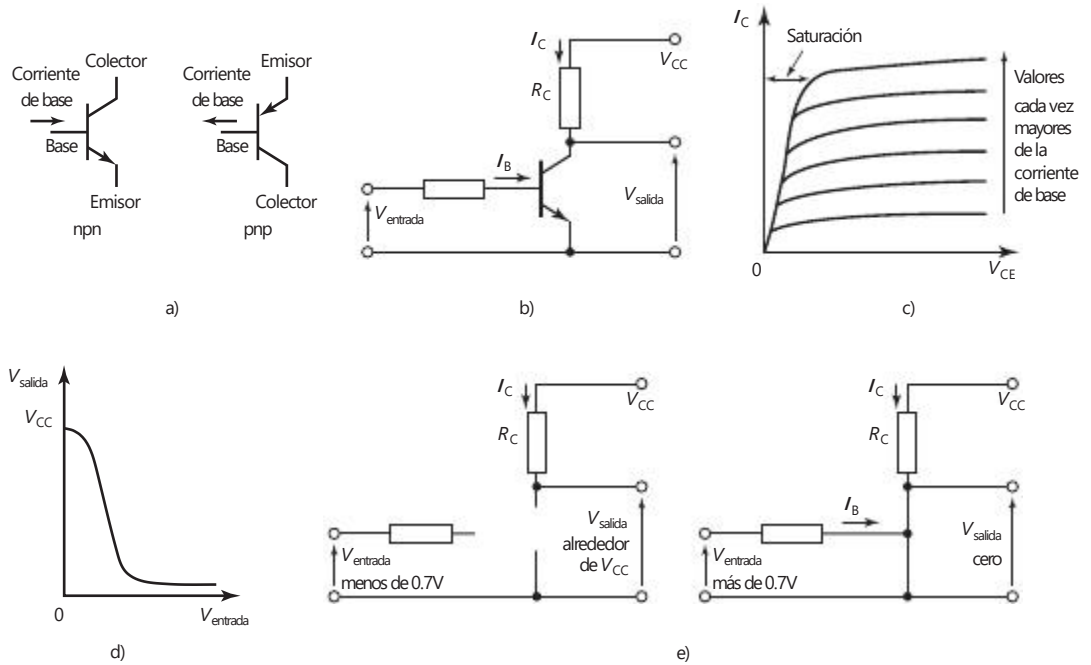


Figura 9.9 a) Símbolos de los elementos de un transistor: b), c), d), e) interruptor del transistor.

mediante la serie de gráficas de la Figura 9.9c). Cuando la corriente de base  $I_B$  es cero, el transistor está en corte; en este estado, la unión base-emisor y la unión base-colector tienen polarización en inversa. Al aumentar la corriente de base, la corriente del colector también aumenta y  $V_{CE}$  disminuye como consecuencia de la mayor cantidad de voltaje que cae en  $R_C$ . Cuando el valor de  $V_{CE}$  aumenta hasta el valor  $V_{CE(sat)}$ , la unión base-colector se polariza en directa y la corriente del colector ya no puede aumentar, aun cuando aumentara la corriente de base. Lo anterior se llama  **saturación** . Al modificar el valor de la corriente de base entre 0 y un valor que lleve al transistor a la saturación, es posible usar un transistor bipolar como interruptor. Cuando no hay voltaje de entrada, casi todo el voltaje aparece en la salida. Cuando el voltaje de entrada se hace suficientemente alto, el transistor cambia de forma que en la salida aparece una pequeña fracción del voltaje (Figura 9.9d). La Figura 9.9e) resume este comportamiento invertido de un transistor típico.

La relación entre la corriente de colector y la corriente de base  $I_B$  para valores por debajo de aquellos que llevan al transistor a la saturación es:

$$I_C = h_{FE} I_B$$

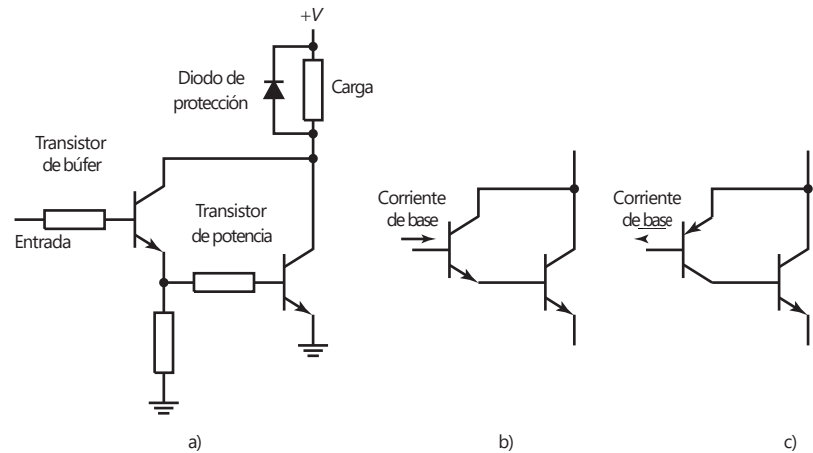
donde  $h_{FE}$  es la  **ganancia de corriente** . En condiciones de saturación, la corriente del colector  $I_{C(sat)}$  es:

$$I_{C1sat2} = \frac{V_{CC} - V_{CE1sat2}}{R_C}$$

Para asegurar que el transistor llegue a la saturación, la corriente de base deberá, por lo tanto, aumentar por lo menos hasta el valor:

$$I_{B1sat2} = \frac{I_{C1sat2}}{h_{FE}}$$

Figura 9.10 a) Conmutación de una carga, b) y c) pares de Darlington.



De esta manera, en un transistor con  $h_{FE}$  de 50 y  $V_{CE(sat)}$  de 1 V, en un circuito con  $R_C = 10 \text{ } \Omega$  y  $V_{CC} = 5 \text{ V}$ , la corriente de base debe aumentar por lo menos a 8 mA.

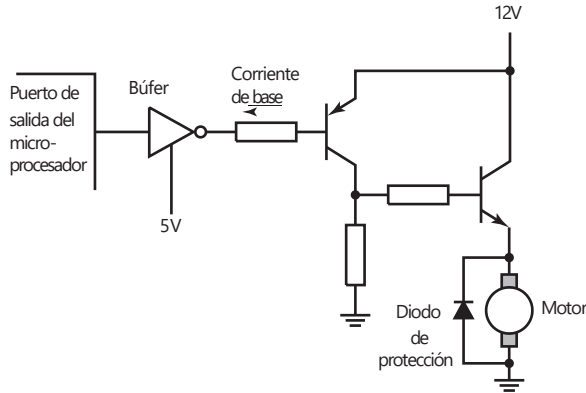
Debido a que la corriente de base necesaria para excitar un transistor de potencia bipolar es bastante grande, es frecuente la necesidad de un segundo transistor para activar la conmutación mediante corrientes relativamente pequeñas, por ejemplo la corriente que proporciona un microprocesador. Por lo tanto, un circuito conmutador sería de la forma mostrada en la Figura 9.10a). La combinación de un par de transistores que permita la conmutación de un valor de corriente alto con una entrada de corriente pequeña se conoce como **par de Darlington**, el cual se puede obtener en dispositivos de un solo **chip**. Por lo general, un **diodo de protección** se conecta en paralelo al transistor de potencia para evitar que el transistor se dañe durante su desconexión, ya que en general se emplea con cargas inductivas y pueden producirse voltajes transitorios considerables. El circuito integrado ULN2001N de SGS-Thompson contiene siete pares de Darlington separados, cada uno con su propio diodo de protección. La especificación de los pares indica 500 mA continuos y resiste picos de hasta 600 mA.

La Figura 9.10b) ilustra las conexiones de un par de Darlington cuando se combina un transistor npn pequeño con un transistor npn grande; lo que se obtiene equivale a un transistor npn grande, con un factor de amplificación grande. La Figura 9.10c) muestra las conexiones de un par de Darlington de un transistor pnp pequeño unido a un transistor npn grande; lo que se obtiene equivale a un transistor pnp grande.

Cuando se utilizan actuadores controlados por transistor con un microprocesador, debe ponerse atención en la magnitud de la corriente de base requerida y su dirección. El valor de dicha corriente podría ser demasiado grande y requerir el empleo de un **búfer**. Éste aumenta la corriente de excitación hasta alcanzar el valor requerido. El búfer también puede servir para invertir. La Figura 9.11 ilustra cómo emplear un búfer cuando se utiliza una conmutación por transistor para controlar un motor de c.d. mediante una conmutación de encendido-apagado. El búfer tipo 240 es inversor, en tanto los tipos 241 y 244 son no inversores. El búfer 74LS240 tiene una corriente máxima de salida de alto nivel de 15 mA y una corriente máxima de salida de bajo nivel de 24 mA.

La conmutación de un transistor bipolar se realiza mediante corrientes de base y existe la posibilidad de utilizar frecuencias de conmutación mayores que en los tiristores. Su capacidad de manejo de potencia es menor que la de los tiristores.

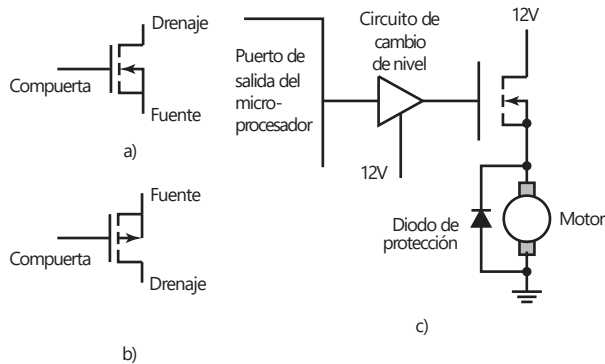
Figura 9.11 Control de un motor de c.d.



### 9.3.4 MOSFET

Hay dos tipos de **MOSFET** (transistores de efecto de campo de semiconductor de óxido metálico, **metal-oxide field effect transistors**): de canal n y de canal p; la Figura 9.12a) y b) muestra los símbolos correspondientes. La diferencia principal en el uso de un MOSFET para conmutación y un transistor bipolar para el mismo propósito es que no entra corriente a la compuerta para lograr dicho control. El voltaje de compuerta es la señal de control. Por lo tanto, los circuitos de excitación se simplifican dado que no es necesario ocuparse de la magnitud de la corriente.

Figura 9.12 MOSFET:  
a) canal n, b) canal p, c) usado para controlar un motor de c.d.



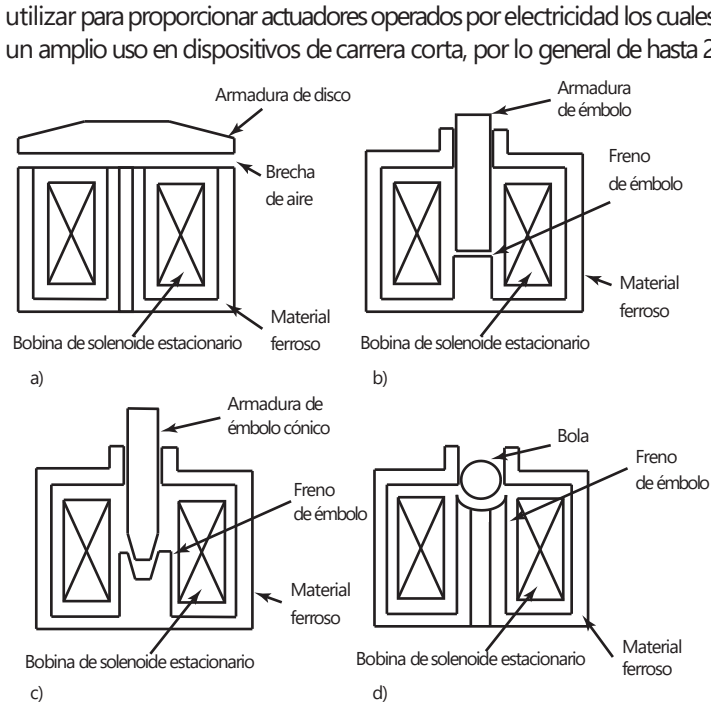
La Figura 9.12c) ilustra una aplicación del MOSFET como interruptor de encendido/apagado de un motor; compare este circuito con el de la Figura 9.11, donde se utilizan transistores bipolares. Se observa un búfer para cambio de nivel para aumentar el nivel de voltaje hasta el valor que requiere el MOSFET.

Con los MOSFET son posibles las conmutaciones a muy altas frecuencias, de hasta 1 MHz; la interconexión con un microprocesador es mucho más sencilla que con transistores bipolares.

Esencialmente, los solenoides constan de un devanado de cable eléctrico con una armadura la cual es atraída a la bobina cuando una corriente pasa a través de ella y produce un campo magnético. El movimiento de la armadura contrae un resorte de retorno, lo cual permite que la armadura regrese a su posición original una vez que cesa la corriente. Los solenoides pueden ser lineales o giratorios, de encendido y apagado (on/off) o de posicionamiento variable y operados por corriente directa o alterna (c.d., c.a.). Este tipo de arreglo se puede



Figura 9.13 Formas básicas de solenoides lineales con a) disco, b) émbolo, c) émbolo cónico, d) formas de bola de la armadura. En estas figuras no se muestran los resortes que se requieren para volver la armadura a su posición original cuando cesa la corriente que atraviesa los solenoides.

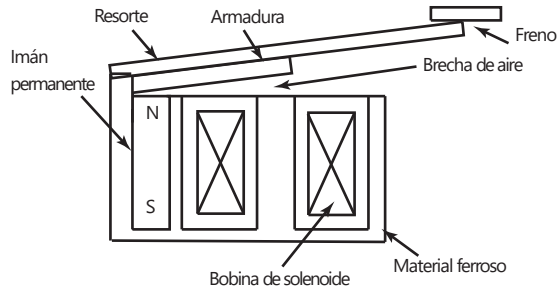


La Figura 9.13 presenta cuatro ejemplos de solenoides lineales con diferentes formas de armadura. La forma de la armadura, el conjunto de piezas y el tubo central dependerán del uso para el que se diseñe el actuador. Las armaduras de disco son útiles donde se requieren distancias cortas de viaje y rapidez de acción. Las armaduras de émbolo se utilizan ampliamente en aplicaciones que requieren distancias cortas de viaje y acción rápida. En aplicaciones de carrera corta se utilizan las armaduras cónicas, una de las cuales es la del mecanismo de cierre de puertas de automóviles. Y en las aplicaciones de control de fluidos se usan las armaduras de bola, como en el mecanismo del despliegue de las bolsas de aire.

Para un dispositivo sencillo de encendido y/o apagado no se necesita un diseño de característica lineal. Si se requiere un actuador proporcional, se necesita un diseño cuidadoso para dar un movimiento proporcional de la armadura a la corriente del solenoide. Un ejemplo sencillo del uso de un actuador de solenoide de encendido/apagado es como el del cierre de puerta con el cierre ya sea activado por el paso de una corriente a través del solenoide, o en el caso contrario cuando el paso de la corriente desbloquea la puerta.

Las válvulas solenoide son otro ejemplo de estos dispositivos y se utilizan para controlar el flujo de fluidos en sistemas hidráulicos o neumáticos (Figura 7.9). Cuando una corriente pasa por el devanado de la bobina, una forma de émbolo de hierro dulce de la armadura es impulsada hacia la armadura y, al hacerlo, abre o cierra puertos que permitan el flujo de un fluido. La fuerza ejercida por el solenoide en la armadura es una función de la corriente en el devanado y la longitud de la armadura dentro del devanado. Con las válvulas de encendido/apagado, es decir las que se emplean para el control direccional, la corriente en el devanado está controlada para encendido o apagado y en consecuencia el núcleo está en una de dos posiciones. Con válvulas de control proporcional, la corriente en el devanado está controlada para dar movimiento al émbolo el cual es proporcional al tamaño de la corriente.

Figura 9.14 Solenoide actuador de aseguramiento.



Se puede hacer que los actuadores de solenoide se conviertan en cerrojos, es decir que retengan su posición actuada cuando se desconecte la corriente del solenoide. La Figura 9.14 ilustra el caso. Se agrega un imán permanente de modo que cuando no haya corriente a través del solenoide no tenga la fuerza suficiente para impeler la armadura contra su resorte retenedor dentro de la posición cerrada. No obstante, cuando hay corriente a través del solenoide para conformar un campo magnético en la misma dirección que el imán permanente, entonces la armadura es impelida dentro de la posición cerrada. Cuando se desconecta la corriente a través del solenoide, el imán permanente es lo bastante fuerte para retener la armadura en su posición cerrada. Para abrirla, se debe invertir la corriente a través del solenoide para crear un campo magnético en la posición opuesta a la del imán permanente. Entonces se puede utilizar un actuador solenoide de estas características para conectarlo a algún dispositivo y dejarlo conectado hasta que se reciba la señal de la corriente inversa.

## 9.5

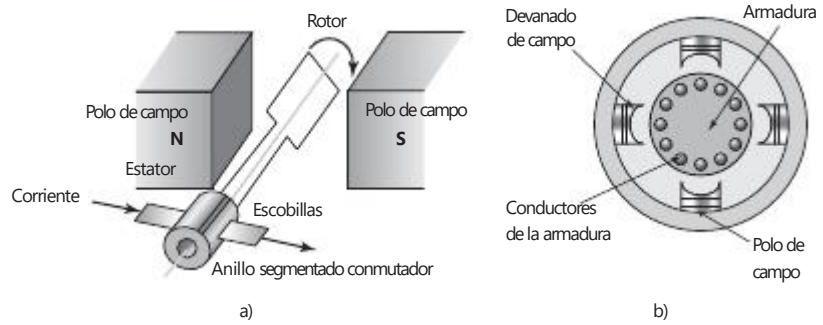
### Motores de c.d.

Los motores eléctricos con frecuencia se usan como elemento de control final en los sistemas de control por posición o de velocidad. Los motores se pueden clasificar en dos categorías principales: motores de c.d. y motores de c.a. La mayoría de los motores que se emplean en los sistemas de control modernos son **motores de c.d.**, los cuales se pueden dividir en dos grupos principales: los que usan escobillas para hacer contacto con un ensamble de anillo conmutador en el rotor para cambiar la corriente de un rotor a otro y los que no tienen escobillas. Con los de escobillas, el rotor tiene devanado de bobina y el estator puede ser un imán permanente o electroimán. Con los que no tienen escobillas, el arreglo es a la inversa, en ese rotor es un imán permanente y el estator tiene el devanado de bobina.

#### 9.5.1 Motor de c.d. con escobillas

Un **motor de c.d. con escobillas** es esencialmente una bobina de alambre que gira libre, y el llamado rotor, en el campo de un imán permanente o un electroimán, al imán se le llama estator puesto que es estacionario (Figura 9.13a). Cuando una corriente pasa a través de una bobina, las fuerzas resultantes ejercidas en sus lados y en ángulo recto al campo provocan fuerzas que actúan a cada lado para producir la rotación. Sin embargo, para que la rotación continúe cuando la bobina pasa a través de la posición vertical, la dirección de la corriente se debe invertir y esto se logra mediante el uso de escobillas que hacen contacto con un anillo segmentado conmutador; el conmutador gira con la bobina.

Figura 9.15 Motor de c.d.: a) básicos, b) con dos juegos de polos.



En un motor de c.d. convencional, las bobinas de alambre están montadas en ranuras en un cilindro de material magnético llamado **armadura**. La armadura está montada en cojinetes y puede girar libremente. Ésta se monta en el campo magnético producido por los **polos de campo**, que pueden servir para motores pequeños, imanes permanentes o electroimanes con su magnetismo producido por una corriente a través de los **devanados de campo**. La Figura 9.15b) muestra el principio básico de un motor de c.d. de cuatro polos, cuyo campo magnético se produce por devanados que transportan corriente. Los extremos de los devanados de la armadura se conectan con los segmentos adyacentes de un anillo segmentado conocido como conmutador, el contacto eléctrico con los segmentos se logra mediante contactos de carbón conocidos como escobillas. A medida que la armadura gira, el conmutador invierte la corriente de cada uno de los devanados al desplazarse por los polos de campo. Esto es necesario para que las fuerzas que actúan en la bobina sigan funcionando en la misma dirección y así continúe la rotación. La dirección de rotación del motor de c.d. se invierte al invertir la corriente de la armadura o la corriente de campo.

Considere un motor de c.d. con imán permanente que tiene una densidad de flujo de valor constante. Para un conductor de armadura de longitud  $L$  y corriente  $i$ , la fuerza resultante de una densidad de flujo magnético  $B$  perpendicular al conductor es  $BiL$  (Figura 9.16a). Con conductores  $N$  la fuerza es  $NBiL$ . Las fuerzas resultan en un par  $T$  en el eje del devanado con un valor de  $Fb$ , donde  $b$  es el ancho de la bobina. Por lo tanto,

$$\text{Par en una vuelta de armadura } T = NBbLi = \sqrt{i}$$

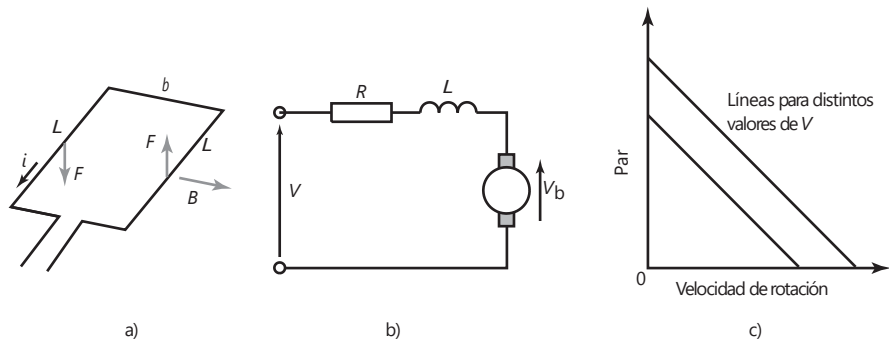


Figura 9.16 Motor de c.d.: a) fuerzas en la armadura, b) circuito equivalente, c) características de velocidad par.

donde  $\lambda$  es el flujo vinculado por una vuelta de armadura. En la práctica habrá más de una vuelta de armadura y más de un conjunto de polos, de modo que podemos escribir

$$\text{par } T = k_t \lambda i$$

y  $k_t$  es una constante. También se puede escribir así la ecuación  $T = K_t i$  donde  $K_t$  se denomina par constante de un motor. Dado que el devanado de una armadura está girando en un campo magnético, ocurrirá una inducción electromagnética y se inducirá una fuerza contraelectromotriz. Esta fuerza  $v_b$  es proporcional a la velocidad a la que el flujo vinculado por la bobina cambia y por consiguiente, para un campo magnético constante, es proporcional a la velocidad angular  $V$  de la rotación. Entonces,

$$\text{fuerza contraelectromotriz } v_b = k_v \lambda V$$

donde  $k_v$  es una constante. La ecuación se puede escribir como  $v_b = K_v V$  donde  $K_v$  es la constante de la fuerza contraelectromotriz de un motor.

Ahora se puede considerar que motor de c.d. debe tener el circuito equivalente que se muestra en la Figura 9.16b); es decir, el devanado de la armadura está representado por un resistor  $R$  en serie con una inductancia  $L$  en serie con una fuente de fuerza contraelectromotriz. Si se pasa por alto la inductancia del devanado de la armadura, entonces el voltaje que provee la corriente  $i$  a través de la resistencia es el voltaje  $V$  aplicado menos la fuerza contraelectromotriz, a saber:  $V - v_b$ . Por lo tanto,

$$i = \frac{V - v_b}{R} = \frac{V - k_v \lambda V}{R} = \frac{V - K_v V}{R}$$

El par  $T$  es entonces:

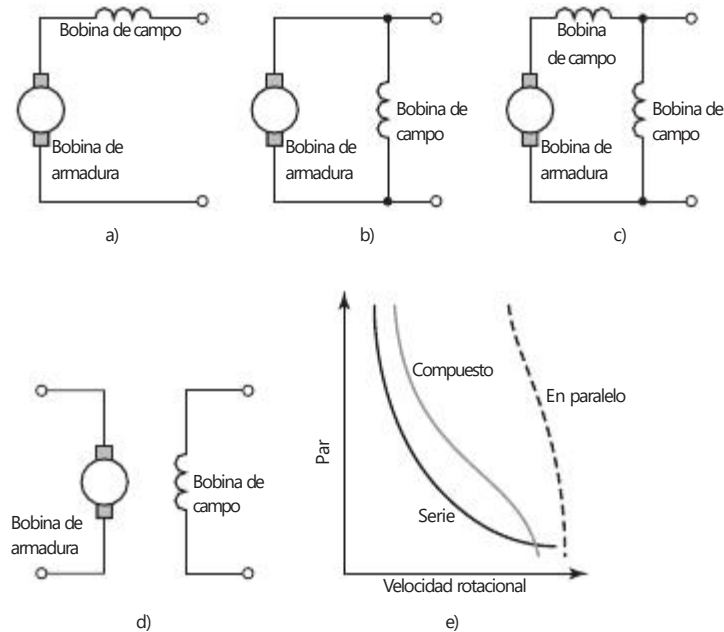
$$T = k_t \lambda i = \frac{k_t \lambda}{R} (V - k_v \lambda V) = \frac{K_t}{R} (V - K_v V)$$

Las gráficas del par contra la velocidad de rotación  $V$  son una serie de rectas con diferentes valores de voltaje (Figura 9.16c). El par inicial, el de cuando  $\omega = 0$  es, al poner este valor de cero en las ecuaciones derivadas,  $K_t V/R$  y por lo tanto es proporcional al voltaje aplicado, y la corriente inicial es  $V/R$ . El par decrece al aumentarse la velocidad. Si un motor de imán permanente desarrollara un par de 6 N m con una corriente de armadura de 2 A, entonces, como  $T = K_t i$ , el par desarrollado con una corriente de 1 A podría ser de 3 N m.

La velocidad de un motor de imán permanente depende de la corriente que pasa por el devanado de la armadura y por lo tanto puede ser controlada al cambiar la corriente de la armadura. La potencia eléctrica convertida a potencia mecánica desarrollada por un motor cuando funciona en condiciones de estado estático o permanente, es producto del esfuerzo de torsión y de la velocidad angular. La potencia entregada al motor en condiciones de estado estable es la suma de la potencia perdida a través de la resistencia del devanado de la armadura y de la potencia mecánica desarrollada.

Como ejemplo, un motor pequeño de imán permanente S6M41 de PMI Motors tiene  $K_t = 3.01$  N cm/A,  $K_v = 3.15$  V por miles de rev/min, una resistencia de terminal de 1.207  $\Omega$  y una resistencia de armadura de 0.940  $\Omega$ .

Figura 9.17 Motores de c.d.:  
 a) en serie, b) en paralelo,  
 c) compuesto, d) de excitación independiente, e) características par-velocidad.



### 9.5.2 Motores de c.d. con escobillas y devanados de campo

Los motores de c.d. con devanados de campo se dividen en motores en serie, en paralelo, compuestos y de excitación independiente, de acuerdo con el modo en que los devanados de campos y los devanados de la armadura estén conectados (Figura 9.17).

#### 1 Motor con excitación en serie (Figura 9.17a)

En este tipo de motor las bobinas de la armadura y del campo están en serie y por lo tanto transportan la misma corriente. El flujo  $\psi$  depende de la corriente  $i_a$  de la armadura y por lo tanto el par que actúa sobre la armadura es  $k_t \psi i_a = k i_a^2$ . En el arranque, cuando  $V = 0$ ,  $i_a = V/R$  y por lo tanto el par de arranque es  $k(V/R)^2$ . Como este tipo de motores tiene una resistencia baja, su par de arranque es alto y de velocidad alta sin carga. Al aumentarse la velocidad el par decrece. Dado que  $Ri$  es pequeña,  $V = v_b + Ri$  y  $v_b$  es proporcional a  $i$ , tenemos que  $V$  es proporcional a  $i^2$ . A una aproximación razonable  $V$  es constante y por lo tanto la velocidad es proporcional de manera inversa a la corriente. De ese modo la velocidad decae marcadamente al incrementarse la carga. La inversión de la polaridad de la corriente de alimentación a las bobinas no afecta en la dirección del giro del motor; seguirá rotando en la misma dirección dado que tanto la corriente del campo y la de la armadura se han invertido. Los motores de c.d. se utilizan cuando se requieren pares de largo arranque. Con cargas ligeras se corre el peligro de que los motores con excitación en serie alcancen velocidades muy altas.

#### 2 Motor con excitación en paralelo (Figura 9.17b)

Con este tipo de motor, las bobinas de la armadura y del campo están en paralelo. Proporciona el par de arranque más bajo y una velocidad mucho menor sin carga así como una buena regulación de la velocidad. El devanado del campo consta de muchas vueltas de alambre fino, lo que lo hace más

resistente que el de la armadura. De este modo, al recibir un voltaje de alimentación constante, la corriente de campo es virtualmente constante. El par en el arranque es  $k_t V/R$  y por consiguiente proporciona un par de arranque bajo y una velocidad baja sin carga. Con  $V$  virtualmente constante, el motor proporciona una velocidad casi constante independiente de la carga y debido a estas características este tipo de motor se utiliza mucho. Para invertir la dirección de la rotación se deben invertir ya sea la armadura o el campo.

### 3 Motor de excitación compuesta (Figura 9.17c)

Este motor tiene dos devanados de campos, uno en serie con la armadura y otro en paralelo. En estos motores se intenta conjuntar lo mejor del motor (excitado) en serie y del motor en paralelo: un par de inicio de valor elevado y una buena regulación de la velocidad.

### 4 Motor de excitación independiente (Figura 9.17b)

En este motor el control de las corrientes de armadura y de campo es independiente y se le puede considerar como un caso especial del motor en paralelo.

La velocidad de estos motores se puede modificar si se cambia la corriente de la armadura o del devanado. En general la que se cambia es la corriente de la armadura. Esto se puede hacer con un resistor en serie. Sin embargo, este método es muy ineficiente dado que el resistor del controlador consume grandes cantidades de potencia. Una alternativa es controlar el voltaje de la armadura (vea la sección 9.5.3). Los motores de corriente directa desarrollan un par en detención por lo que son de autoarranque. Pueden, sin embargo, necesitar una resistencia de arranque para limitar la corriente de arranque en cuanto dicha corriente  $i = (V - v_b)/R$ . Dado que inicialmente no hay una fuerza contraelectromotriz  $v_b$  para limitar la corriente, la corriente de arranque puede ser muy grande.

La elección del motor dependerá de su aplicación. Por ejemplo, con un manipulador de robot, la muñeca del robot puede utilizar un motor excitado en serie porque la velocidad disminuye al crecer la carga. Un motor excitado en paralelo se debiera usar cuando se requiera una velocidad constante, sin importar la carga.

## 9.5.3 Control de motores de c.d. con escobillas

La velocidad que alcanza un motor de imán permanente depende de la magnitud de la corriente que pasa por el devanado de la armadura. En un motor con devanado de campo, la velocidad se modifica variando la corriente de la armadura o la de campo; en general, es la primera la que se modifica. Por lo tanto, para controlar la velocidad se puede utilizar el control del voltaje que se aplica a la armadura. Sin embargo, dado que es frecuente el empleo de fuentes de voltaje de valor fijo, el voltaje variable se logra mediante un circuito electrónico.

En una fuente de corriente alterna se utiliza el circuito de tiristor de la Figura 9.4b) para controlar el voltaje promedio que se aplica a la armadura. Sin embargo, es común que nos interese el control de motores de c.d. mediante señales de control provenientes de microprocesadores. En estos casos se utiliza la técnica de **modulación por ancho de pulso (PWM)**, que utiliza una fuente de voltaje de c.d. constante y secciona su voltaje para que varíe su valor promedio (Figura 9.18).

La Figura 9.19a) muestra cómo obtener la PWM utilizando un circuito de transistor básico. El transistor se activa y desactiva mediante una señal que se aplica a su base. El diodo tiene por objeto servir de trayectoria a la corriente que surge cuando el transistor se desconecta, debido a que el motor se comporta como generador. Este circuito sólo se utiliza para operar el motor en una dirección.

Figura 9.18 PWM: a) principio del circuito PWM, b) variación del voltaje promedio de armadura mediante el seccionamiento de voltaje de c.d.

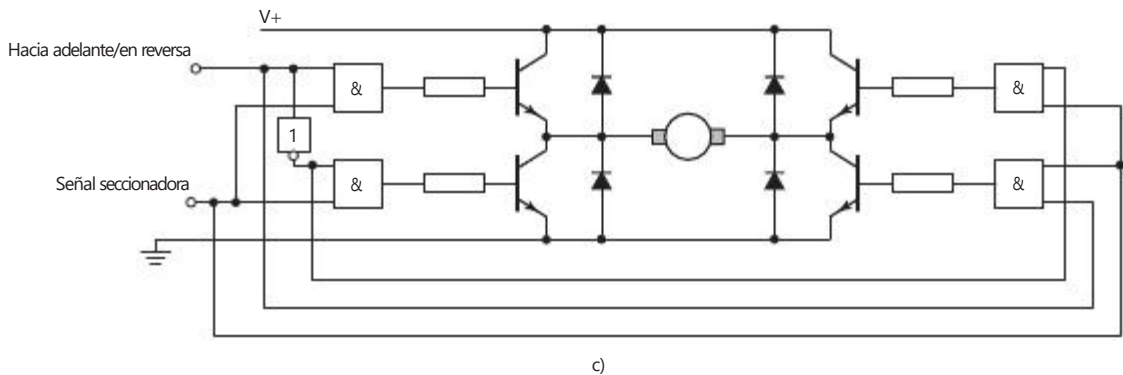
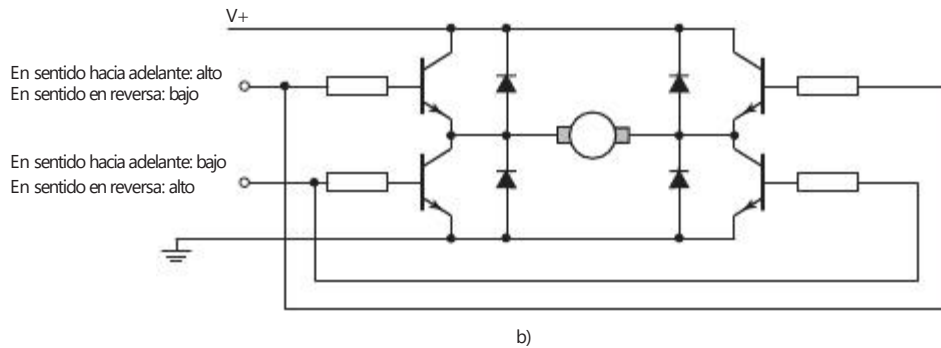
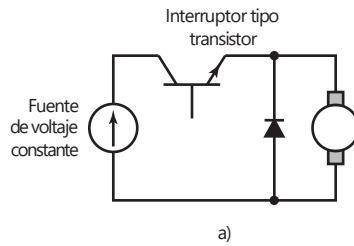
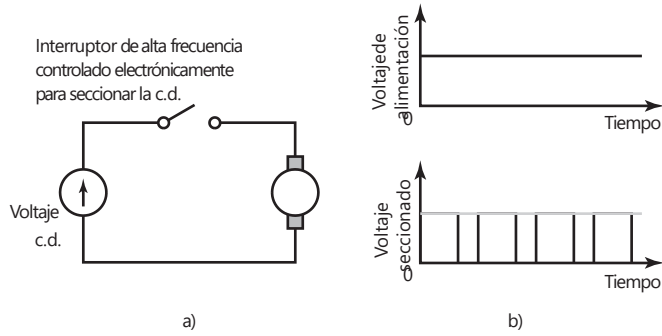
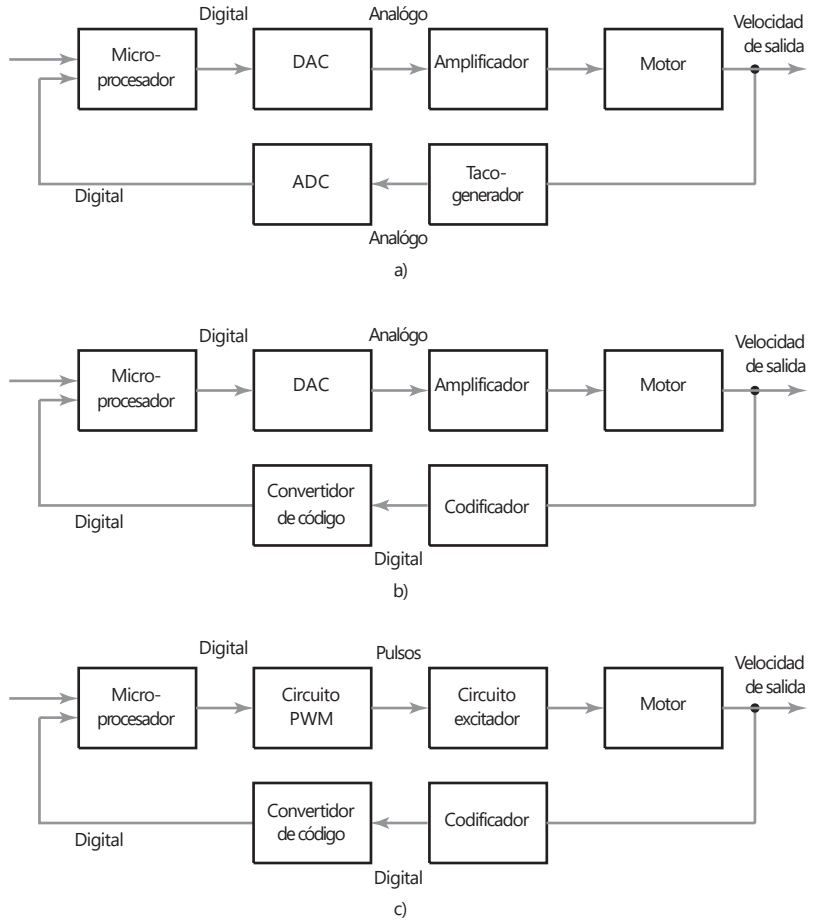


Figura 9.19 a) Circuito transistor básico, b) circuito H, c) circuito H con compuertas lógicas.

Para utilizar el motor en dirección directa e inversa se utiliza un circuito con cuatro transistores, conocido como circuito H (Figura 9.19b). Este circuito se puede modificar mediante compuertas lógicas, de manera que una entrada controle la conmutación, y la otra la dirección de rotación (Figura 9.19c).

Los anteriores son ejemplos de control en malla abierta, para los cuales se supone que las condiciones permanecen constantes, por ejemplo, el voltaje de alimentación y la carga que desplaza el motor. En los sistemas de control en malla cerrada se utiliza la retroalimentación para modificar la velocidad del motor si cambian las condiciones. La Figura 9.20 muestra algunos métodos que se pueden emplear.

Figura 9.20 Control de velocidad con retroalimentación.



En la Figura 9.20a) un tacogenerador produce la señal de retroalimentación, esto genera una señal analógica que es necesario convertir en una señal digital utilizando un ADC, para introducirla en un microprocesador. La salida del microprocesador se convierte en una señal analógica con un DAC para variar el voltaje aplicado a la armadura del motor de c.d. En la Figura 9.20b) un codificador produce la señal de retroalimentación y esto da una señal digital que después de pasar por una conversión de código, se puede alimentar en forma directa al microprocesador. Al igual que en a), el sistema tiene un voltaje analógico sujeto a variación para controlar la velocidad del motor. En la Figura 9.20c) el sistema es completamente digital y la PWM sirve para controlar el voltaje promedio que se aplica a la armadura.

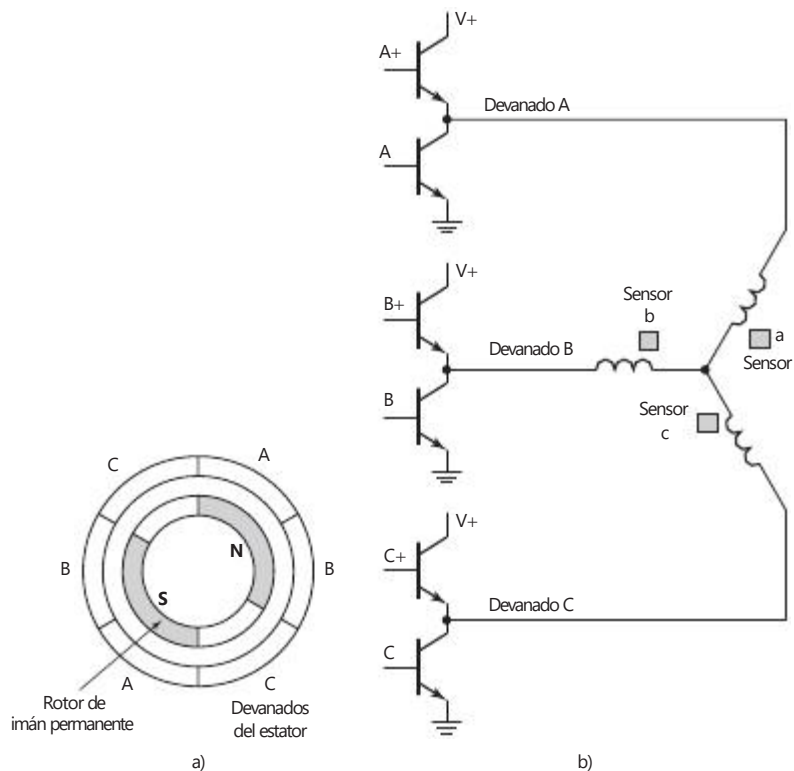


### 9.5.4 Motores de c.d. de imán permanente y sin escobillas

Un problema de los motores de c.d. es que requieren un colector y escobillas para invertir en forma periódica la corriente que pasa por cada uno de los devanados de la armadura. Las escobillas establecen contacto deslizante con el colector; las chispas que saltan entre ambos van desgastando las escobillas. Por ello, las escobillas deben reemplazarse de manera periódica y recubrirse el colector. Para evitar estos problemas se diseñaron **motores sin escobillas**.

En esencia, estos motores consisten en una secuencia de devanados de estator y un rotor de imán permanente. Un conductor por el que pasa corriente eléctrica en un campo magnético experimenta una fuerza; asimismo, como consecuencia de la tercera ley del movimiento de Newton, el imán también experimenta una fuerza opuesta de igual magnitud. En el motor de c.d. convencional, el imán está fijo y los conductores por los que pasa la corriente presentan movimiento. En el motor de c.d. de imán permanente y sin escobillas sucede lo contrario: los conductores por los que pasa corriente están fijos y el imán se mueve. El rotor es un imán permanente de ferrita o cerámica; la Figura 9.21a) muestra la configuración básica de este tipo de motor. La corriente que llega a los devanados del estator se conmuta en forma electrónica mediante transistores en secuencia alrededor de los devanados; la conmutación se controla con la posición del rotor, de manera que siempre haya fuerzas actuando en el imán provocando que rote en la misma dirección. Los sensores de efecto Hall por lo general se usan para detectar la posición del rotor e iniciar la conmutación de los transistores; los sensores se colocan alrededor del estator.

Figura 9.21 a) Motor de imán permanente sin escobillas, b) cambio de transistor.



La Figura 9.21b) ilustra los circuitos de conmutación a transistores que se pueden usar en el motor de la Figura 9.21a). Para conmutar los devanados en secuencia se necesitan señales para activar los transistores de acuerdo con la secuencia requerida. Para ello se utilizan las salidas de los tres sensores del circuito decodificador que dan las corrientes de base adecuadas. Por lo tanto, cuando el rotor está en posición vertical, es decir a  $0^\circ$ , el sensor c produce una salida, mientras a y b no producen una. Esta salida sirve para activar los transistores A+ y B-. Cuando el rotor está en la posición de  $60^\circ$  los sensores b y c producen señales y los transistores A+ y C- están activados. La Tabla 9.1 contiene la secuencia de conmutación completa. La totalidad del circuito que controla este tipo de motores se obtiene en un solo circuito integrado.

Tabla 9.1 Secuencia de la conmutación.

Posición del rotor	Señales del sensor			Transistores activados	
	a	b	c		
$0^\circ$	0	0	1	A+	B-
$60^\circ$	0	1	1	A+	C-
$120^\circ$	0	1	0	B+	C-
$180^\circ$	1	1	0	B+	A-
$240^\circ$	1	0	0	C+	A-
$360^\circ$	1	0	1	C+	B-

Los motores de c.d. de imán permanente y sin escobillas se utilizan cada vez más cuando se necesita un alto rendimiento aunado a gran confiabilidad y poco mantenimiento. Gracias a que no tienen escobillas, estos motores no producen ruido y permiten alcanzar altas velocidades.

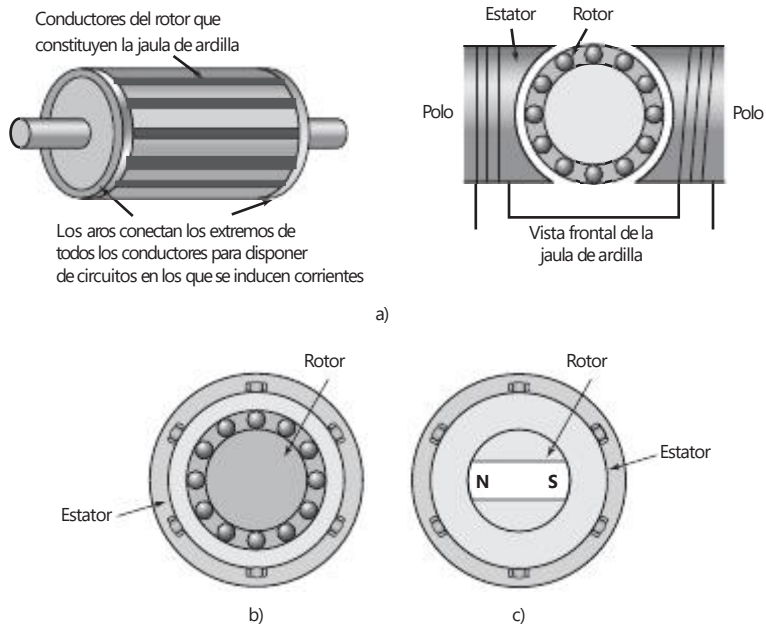
## 9.6

### Motores de c.a.

Los motores de c.a. se pueden clasificar en dos grupos: monofásicos y polifásicos, cada uno se subdivide en motores de inducción y motores síncronos. Existe la tendencia a usar motores monofásicos si la potencia requerida es baja, en tanto los polifásicos se emplean cuando se requiere mucha potencia. Los motores de inducción en general son más baratos que los síncronos, de allí lo popular de su uso.

El **motor de inducción monofásico de jaula de ardilla** consta de un rotor tipo jaula de ardilla, es decir barras de cobre o aluminio insertas en las ranuras de los aros de los extremos para formar circuitos eléctricos completos (Figura 9.22a). El rotor no tiene conexiones eléctricas externas. El motor básico consta de un rotor como el anterior y un estator con varios devanados. Al pasar una corriente alterna por los devanados del estator se produce un campo magnético alterno. Como resultado de la inducción electromagnética, se induce fem en los conductores del rotor y por éste fluyen corrientes. Al inicio, cuando el rotor está en reposo, las fuerzas sobre los conductores del rotor por los que pasa la corriente dentro del campo magnético del estator son tales que el par neto es nulo. El motor no tiene arranque automático. Se utilizan diversos métodos para hacer al motor de arranque automático y darle el ímpetu necesario para el arranque; uno de ellos es usar un devanado de arranque auxiliar, mediante el cual se da el empuje inicial al rotor. Éste gira a una velocidad determinada por la frecuencia de la corriente alterna que se aplica al estator. Al suministrar una frecuencia constante al motor monofásico de dos polos, el campo magnético alterna a la misma frecuencia. La velocidad de

Figura 9.22 a) Motor de inducción de una fase, b) motor de inducción de tres fases, c) motor síncrono de tres fases.



rotación del campo magnético se denomina **velocidad síncrona**. En realidad, el rotor nunca se acopla con esta frecuencia de rotación y, en general, la diferencia es de 1 a 3%. Esta diferencia se conoce como **deslizamiento**. En una frecuencia de 50 Hz la velocidad de rotación del rotor es casi 50 revoluciones por segundo.

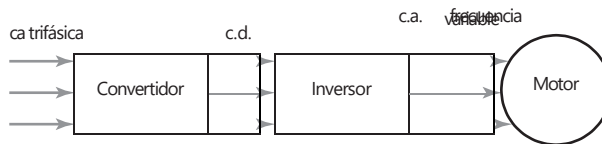
El **motor de inducción trifásico** (Figura 9.22b) es similar al motor de inducción monofásico, sólo que tiene un estator con tres devanados separados  $120^\circ$ , cada uno conectado a una de las tres líneas de alimentación eléctrica. Como estas tres fases alcanzan sus corrientes máximas en diferentes momentos, se puede considerar que el campo magnético gira en torno a los polos del estator, completando una rotación durante un ciclo completo de la corriente. La rotación del campo es mucho más suave que en el motor monofásico. El motor trifásico tiene la gran ventaja sobre el monofásico de tener arranque automático. La dirección de rotación se invierte intercambiando alguna de las dos líneas de conexión, lo que cambia la dirección de rotación del campo magnético.

Los **motores síncronos** tienen estatores similares a los descritos en los motores de inducción, pero el rotor es un imán permanente (Figura 9.22c). El campo magnético que produce el estator gira y el imán gira con él. Al tener un par de polos por fase de alimentación eléctrica, el campo magnético gira  $360^\circ$  durante un ciclo de alimentación, de manera que la frecuencia de rotación, en este caso, es igual a la frecuencia de la alimentación. Los motores síncronos se utilizan cuando se requiere una velocidad precisa. No son de arranque automático y algunos requieren algún sistema de arranque.

Los motores de c.a. tienen la gran ventaja respecto de los motores de c.d. de ser más baratos, robustos, confiables y no necesitar mantenimiento. Sin embargo, el control de la velocidad es más complejo que en los motores de c.d. y, en consecuencia, un motor de c.d. con control de velocidad en general es más barato que uno de c.a. con control de velocidad, aunque la diferencia en sus precios es cada vez menor, debido a los avances tecnológicos y a la disminución

en el precio de los dispositivos de estado sólido. El control de la velocidad de los motores de c.a. se basa en el uso de una fuente de frecuencia variable, dado que la velocidad de estos motores está definida por la frecuencia de la alimentación. El par que genera un motor de c.a. es constante cuando la relación entre el voltaje aplicado al estator y la frecuencia es constante. Para mantener un par constante a diferentes velocidades, cuando varía la frecuencia también es necesario variar el voltaje que se aplica al estator. Para ello, uno de los métodos consiste en rectificar primero la c.a., cambiarla a corriente de c.d. mediante un **convertidor**, y luego invertirla otra vez a c.a., pero a la frecuencia deseada (Figura 9.23). Otro método común para operar motores de baja velocidad es el **cicloconvertidor**. Éste convierte directamente la c.a. de una frecuencia en una c.a. con otra frecuencia, sin la conversión intermedia a c.d.

Figura 9.23 Motor de c.a. de velocidad variable.



## 9.7

### Motores paso a paso

El **motor paso a paso** es un dispositivo que produce una rotación en ángulos iguales, denominados *pasos*, por cada pulso digital que llega a su entrada. Por ejemplo, si en el caso de un motor un pulso produce un giro de  $6^\circ$ , entonces 60 pulsos producirán una rotación de  $360^\circ$ . Existen diversos tipos de motores paso a paso:

#### 1 Motor paso a paso de reluctancia variable

La Figura 9.24 muestra la forma básica del motor paso a paso de reluctancia variable. En este caso, el rotor es de acero dulce, cilíndrico y tiene cuatro polos, es decir menos polos que en el estator. Cuando llega corriente a un par de devanados opuestos, se produce un campo magnético cuyas líneas de fuerza pasan de los polos del estator a través del grupo de polos

Figura 9.24 Motor paso a paso de reluctancia variable.

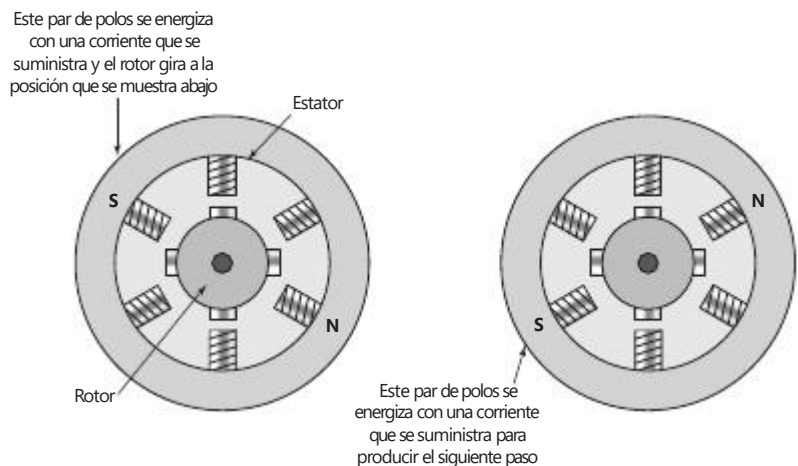
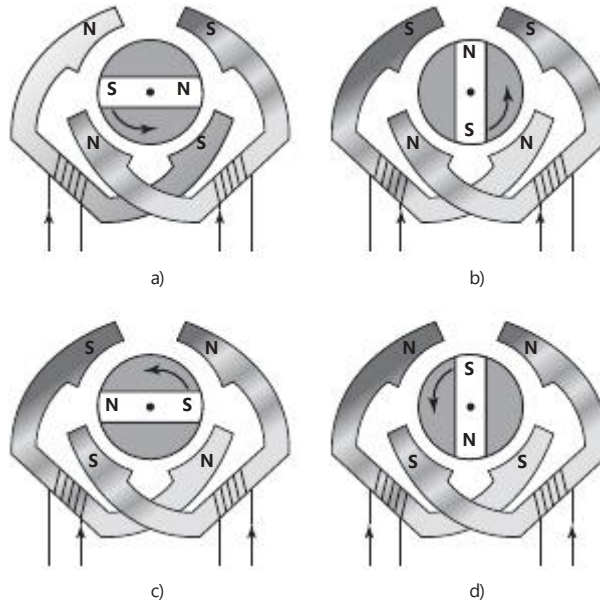


Figura 9.25 Motor paso a paso bifásico de imán permanente con pasos de 90°: a), b), c) y d) muestran las posiciones del rotor magnético a medida que los devanados son energizados en direcciones diferentes.



más cercano al rotor. Dado que las líneas de fuerza se pueden considerar como un hilo elástico, siempre tratando de acortarse, el rotor se moverá hasta que sus polos y los del estator queden alineados. Esto se conoce como posición de reluctancia mínima. Este tipo de movimiento paso a paso en general produce avances en ángulos de 7.5° o 15°.

### 2 Motor paso a paso de imán permanente

La Figura 9.25 ilustra la forma básica de un motor de **imán permanente**. El motor que se muestra tiene un estator con cuatro polos. Cada uno de ellos está enrollado a un devanado de campo y las bobinas en pares opuestos de polos están en serie. Una fuente de c.d. proporciona la corriente a los devanados a través de interruptores. El rotor es un imán permanente, por lo que al conectar una corriente a uno de los pares de polos del estator, el rotor se desplaza hasta alinearse con él. En las corrientes que producen una situación como la que ilustra la figura, el rotor se desplaza hasta la posición de 45°. Si se conecta la corriente de manera que se inviertan las polaridades, el rotor se desplaza otros 45° y queda de nuevo alineado. Así, al conmutar las corrientes a través de los devanados, el rotor gira a pasos de 45°. En este motor los ángulos de avance paso a paso por lo general son de 1.8, 7.5, 15, 30, 34 o 90°.

### 3 Motor paso a paso híbrido

Los motores paso a paso híbridos conjuntan las características de los motores de reluctancia variable y de imán permanente; cuentan con un imán permanente inserto en tapones de hierro dentados (Figura 9.26). El rotor se coloca a sí mismo en la posición de reluctancia mínima cuando se energiza un par de devanados del estator. Los ángulos de paso típicos son de 0.9 y 1.8°. Si un motor tiene fases  $n$  en el estator y  $m$  dientes en el rotor, el número total de pasos por revolución es  $nm$ . Estos motores se usan mucho en aplicaciones que requieren un posicionamiento de alta precisión, por ejemplo en las unidades de disco duro de las computadoras.

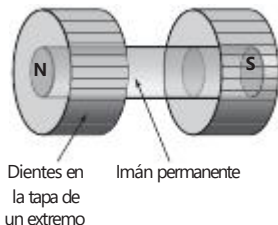


Figura 9.26 Rotor de motor híbrido.

### 9.7.1 Especificaciones del motor paso a paso

Los siguientes son algunos de los términos más utilizados para especificar motores paso a paso:

1 *Fase*

Este término se refiere a la cantidad de devanados independientes del estator, por ejemplo un motor de cuatro fases. La corriente requerida para cada fase, así como su resistencia e inductancia se especifican de manera que también se especifique la salida de conmutación del controlador. Los motores bifásicos, como el de la Figura 9.25, en general se utilizan en aplicaciones que no implican un uso pesado; los trifásicos suelen ser motores paso a paso de reluctancia variable, como el de la Figura 9.24; los motores de cuatro fases en general se usan en aplicaciones que requieren más potencia.

2 *Ángulo de paso*

Se trata del ángulo que gira el rotor durante un cambio de estado en los devanados del estator.

3 *Par de retención*

Es el máximo par que se puede aplicar a un motor energizado sin modificar su posición de reposo y provocar la rotación del eje.

4 *Par máximo de enganche*

Es el par máximo con el que puede arrancar un motor, dada una frecuencia de pulsos, y lograr la sincronización sin perder un paso.

5 *Par máximo de desenganche*

Es el par máximo que es posible aplicar a un motor, trabajando a determinada frecuencia de pasos, sin perder su sincronización.

6 *Frecuencia de enganche*

Es la frecuencia de conmutación máxima a la que un motor de cargado puede arrancar sin perder un paso.

7 *Frecuencia de desenganche*

Es la frecuencia de conmutación en la que un motor de cargado puede mantener su sincronía conforme se reduce la frecuencia de conmutación.

8 *Velocidad de progresión*

Es el rango de frecuencias de conmutación entre el enganche y el desenganche dentro del cual el motor funciona en sincronía, pero no puede ni arrancar ni invertir su giro.

La Figura 9.27 muestra las características generales de un motor paso a paso.

### 9.7.2 Control de un motor paso a paso

Para conmutar la alimentación eléctrica de c.d. entre los pares de devanados del estator se utiliza electrónica de estado sólido. Los motores bifásicos como el de la Figura 9.25, se denominan **motores bipolares** si tienen cuatro cables para conectar señales que generen la secuencia de conmutación (Figura 9.28a). Estos motores se excitan mediante circuitos H (vea la Figura 9.19 y la explicación respectiva); la Figura 9.28b) muestra el circuito correspondiente, y la Tabla 9.2 la secuencia de conmutación necesaria para que los transistores realicen los cuatro pasos; para obtener pasos adicionales se repite la secuencia.

Figura 9.27 Características de un motor paso a paso.

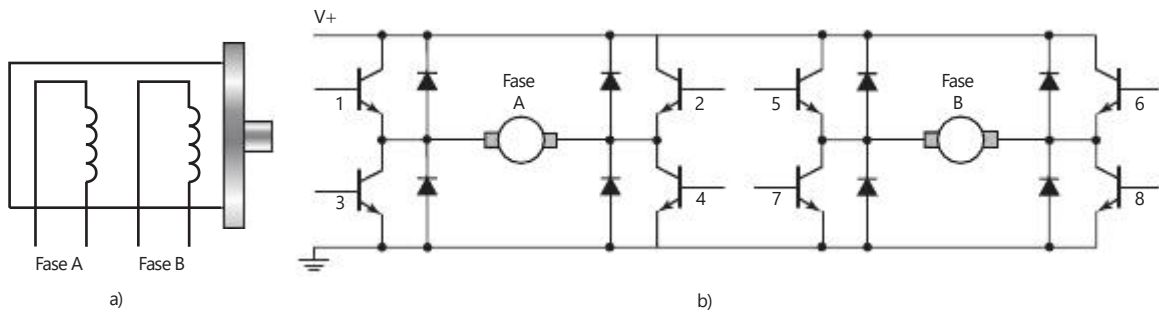
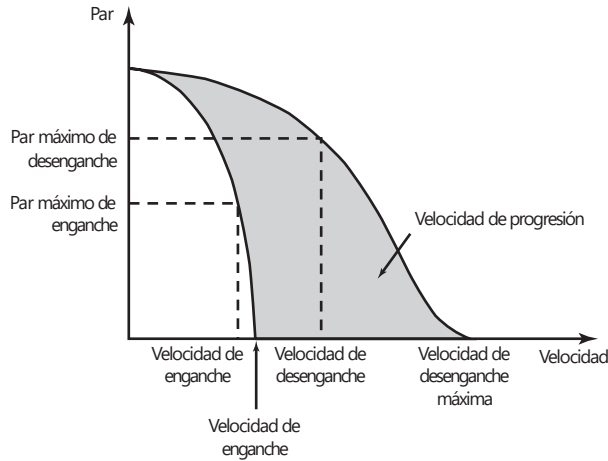


Figura 9.28 a) Motor bipolar, b) circuito H.

Tabla 9.2 Secuencia de conmutación para pasos completos de un motor paso a paso bipolar.

Paso	Transistores			
	1y4	2y3	5y8	6y7
1	Encendido	Apagado	Encendido	Apagado
2	Encendido	Apagado	Apagado	Encendido
3	Apagado	Encendido	Apagado	Encendido
4	Apagado	Encendido	Encendido	Apagado

La secuencia produce una rotación en el sentido de las manecillas del reloj; para obtener un giro en sentido contrario, se invierte la secuencia.

Para obtener la mitad de un paso, es decir una resolución más fina, en vez de la secuencia de pasos completos que se usa para lograr una inversión de polos al ir de un paso al siguiente, las bobinas se conmutan de manera que el rotor se detenga a la mitad del siguiente paso completo. La Tabla 9.3 muestra la secuencia para medios pasos utilizando un motor paso a paso bipolar.

Los motores bifásicos se denominan **unipolares** cuando tienen seis cables de conexión para generar la secuencia de conmutación (Figura 9.29). Cada una de las bobinas tiene una toma o derivación central. Cuando las derivaciones centrales de las bobinas de fase están conectadas entre sí, es posible conmutar un motor paso a paso con sólo cuatro transistores. La Tabla 9.4 muestra

Tabla 9.3 Medios pasos de un motor paso a paso bipolar.

Paso	Transistores			
	1y4	2y3	5y8	6y7
1	Encendido	Apagado	Encendido	Apagado
2	Encendido	Apagado	Apagado	Apagado
3	Encendido	Apagado	Apagado	Encendido
4	Apagado	Apagado	Apagado	Encendido
5	Apagado	Encendido	Apagado	Encendido
6	Apagado	Encendido	Apagado	Apagado
7	Apagado	Encendido	Encendido	Apagado
8	Apagado	Apagado	Encendido	Apagado

Tabla 9.4 Secuencia de conmutación de un motor paso a paso unipolar avanzando pasos completos.

Paso	Transistores			
	1	2	3	4
1	Encendido	Apagado	Encendido	Apagado
2	Encendido	Apagado	Apagado	Encendido
3	Apagado	Encendido	Apagado	Encendido
4	Apagado	Encendido	Encendido	Apagado

Tabla 9.5 Medios pasos de un motor paso a paso unipolar.

Paso	Transistores			
	1	2	3	4
1	Encendido	Apagado	Encendido	Apagado
2	Encendido	Apagado	Apagado	Apagado
3	Encendido	Apagado	Apagado	Encendido
4	Apagado	Apagado	Apagado	Encendido
5	Apagado	Encendido	Apagado	Encendido
6	Apagado	Encendido	Apagado	Apagado
7	Apagado	Encendido	Encendido	Apagado
8	Apagado	Apagado	Encendido	Apagado

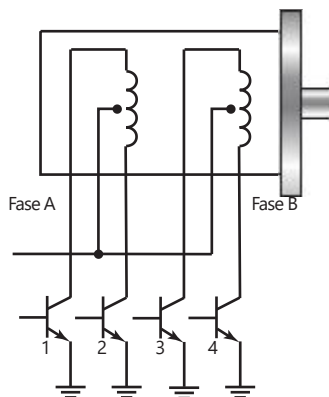


Figura 9.29 Motor unipolar.

la secuencia de conmutación de los transistores a fin de producir pasos en el sentido de las manecillas del reloj; para los siguientes pasos basta repetir la secuencia. Para un giro en sentido contrario a las manecillas del reloj la secuencia se invierte. La Tabla 9.5 muestra la secuencia cuando el motor unipolar avanza medios pasos.

Existen circuitos integrados provistos de todos los elementos electrónicos para lograr la excitación. La Figura 9.30 muestra las conexiones del circuito integrado SAA 1027 para un motor paso a paso de cuatro fases. Las tres entradas se controlan aplicándoles señales altas o bajas. Cuando la terminal para definir la configuración se mantiene a un valor alto, la salida del circuito integrado cambia su estado cada vez que la terminal de disparo pasa de un valor bajo a uno alto. La secuencia se repite a intervalos de cuatro pasos, aunque en cualquier momento es posible restablecer la condición a cero aplicando una señal baja a la terminal de disparo. Cuando la entrada de rotación se mantiene