

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

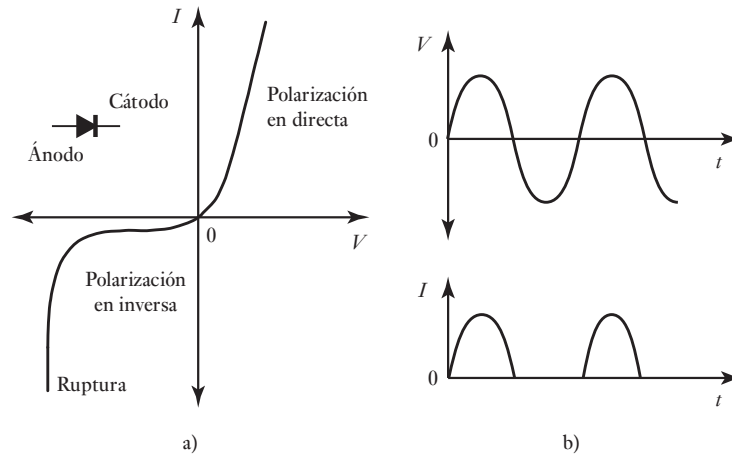
Para realizar la conmutación electrónica de los circuitos se utilizan diversos dispositivos de estado sólido. Entre éstos figuran los siguientes:

1. Diodos
2. Tiristores y triacs
3. Transistores bipolares
4. MOSFETs 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 rectificadas 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 20Ω (Figura 9.4b)), se tiene una resistencia muy alta antes de la ruptura en serie con los 20Ω 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 $300 - 2 = 298 \text{ V}$ en el resistor de 20Ω , 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.

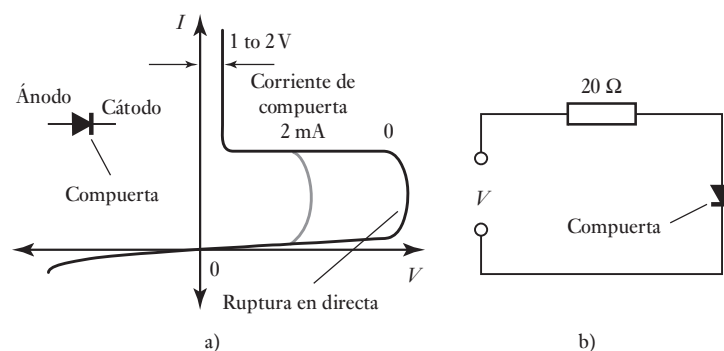
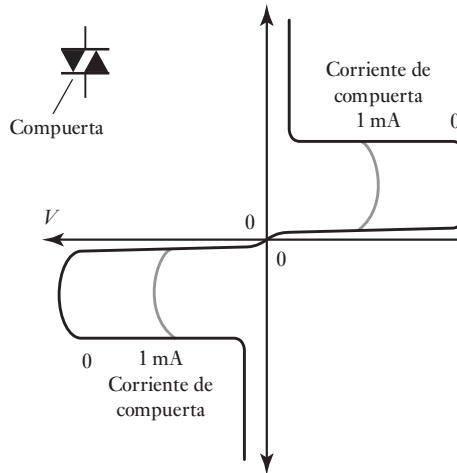


Figura 9.5 Características de un triac.

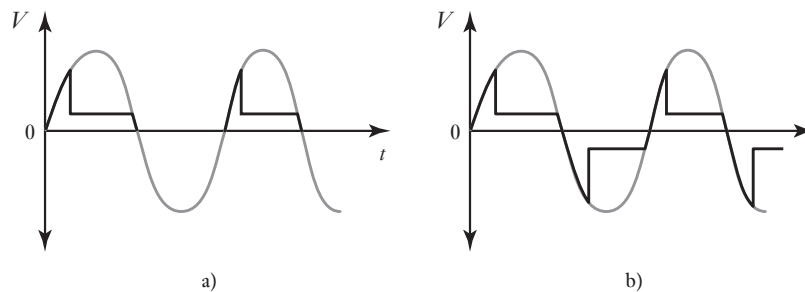


voltaje máximo sin riesgo de disparo de 400 V y una corriente máxima de disparo en la compuerta de 0.2 mA.

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.

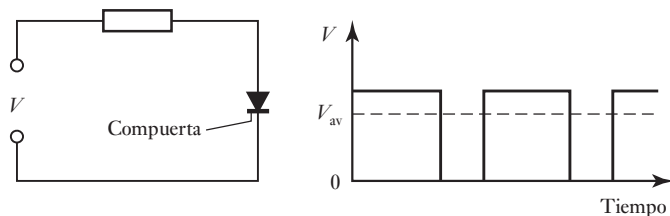
La Figura 9.6 muestra el efecto que se produce al aplicar un voltaje alterno senoidal en: a) un tiristor y b) un triac. La ruptura en sentido directo ocurre cuando el voltaje aumenta hasta el valor de ruptura; a partir de ese momento, el voltaje en el dispositivo permanece bajo.

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.



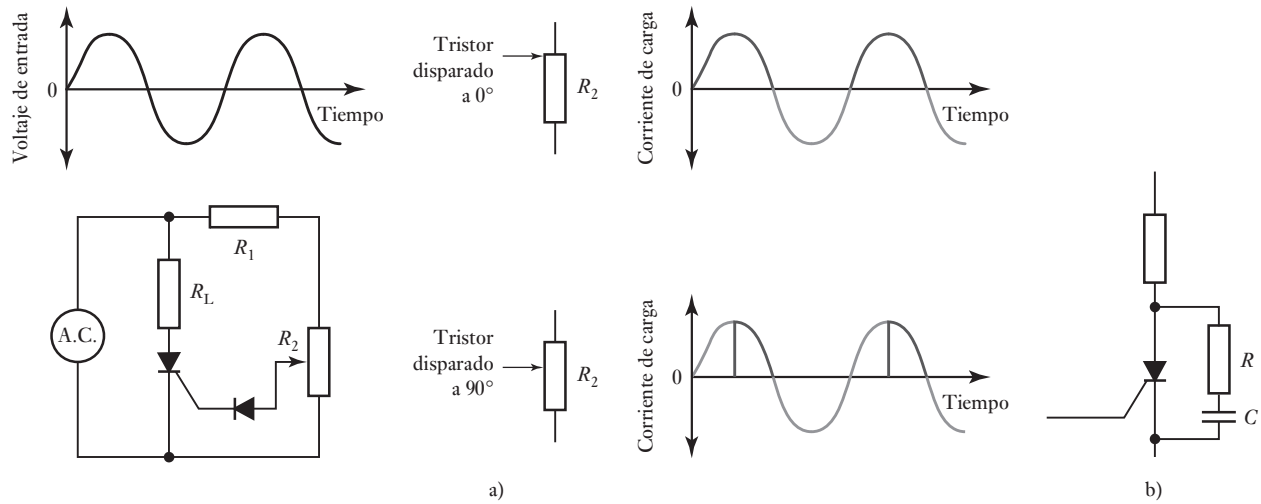


Figura 9.8 a) Circuito para control de fase, b) circuito amortiguador o de frenado (*snubber*).

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° y 90° durante el semiciclo positivo del voltaje alterno aplicado. Cuando el tiristor se dispara cerca del inicio del ciclo, es decir, cerca de 0° , 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 $50 \text{ V}/\mu\text{s}$. 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

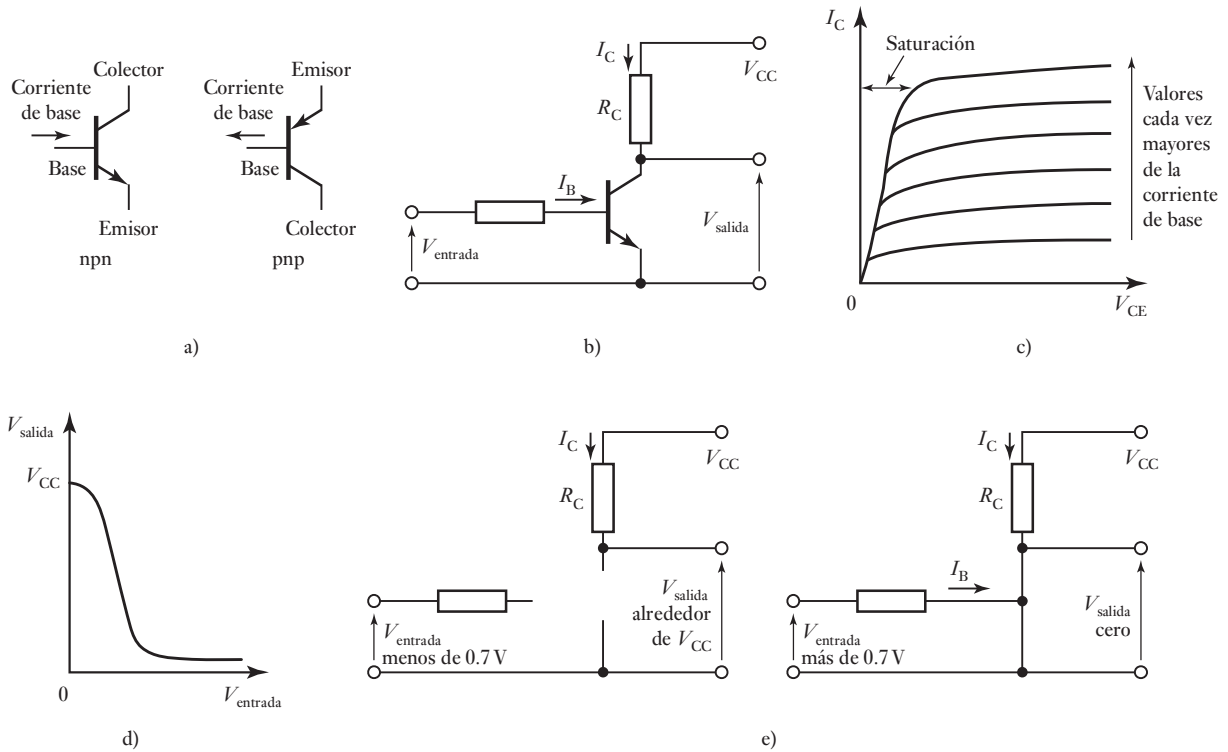


Figura 9.9 a) Símbolos de los elementos de un transistor: b), c), d), e) interruptor del transistor.

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:

$$I_C = h_{FE} I_B$$

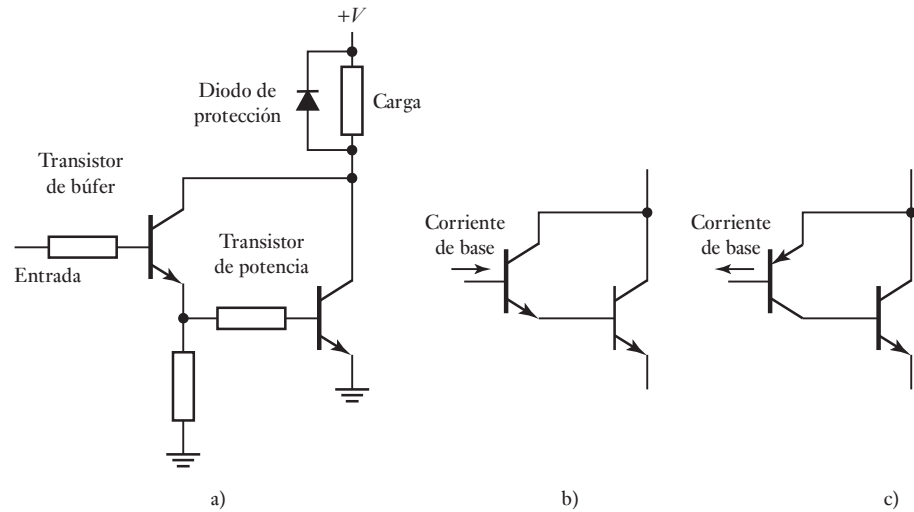
donde h_{FE} es la **ganancia de corriente** . En condiciones de saturación, la corriente del colector $I_{C(sat)}$ es:

$$I_{C(sat)} = \frac{V_{CC} - V_{CE(sat)}}{R_C}$$

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

$$I_{B(sat)} = \frac{I_{C(sat)}}{h_{FE}}$$

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 $R_C = 10 \Omega$ y $V_{CC} = 5$ V, la corriente de base debe aumentar por lo menos a 8 mA.

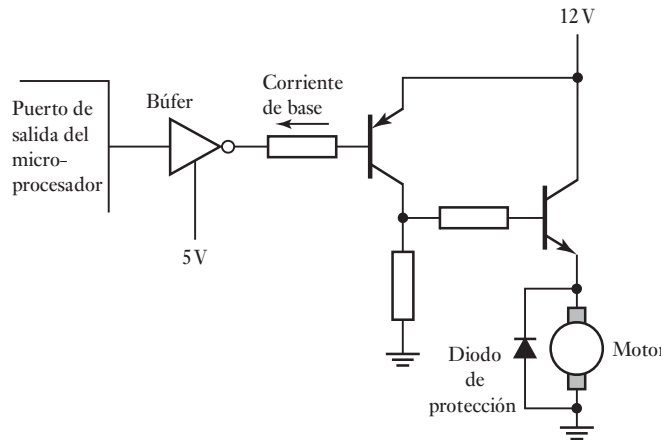
Debido a que la corriente de base necesaria para excitar un transistor de potencia bipolar es bastante grande, es frecuente la necesidad de un segundo transistor para activar la conmutación mediante corrientes relativamente pequeñas, por ejemplo, la corriente que proporciona un microprocesador. Por lo 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 con el 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.

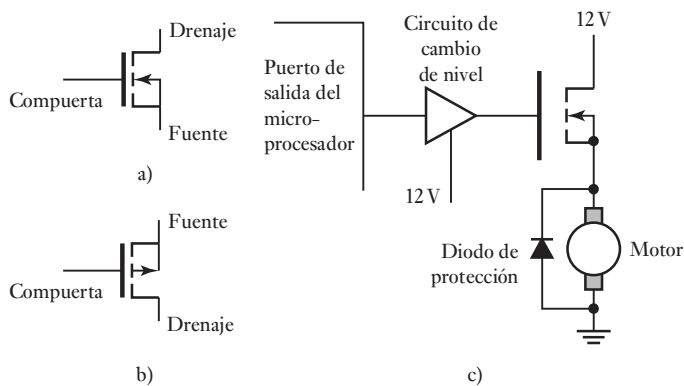
Figura 9.11 Control de un motor de c.d.



9.3.4 MOSFETs

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 MOSFETs:
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 MOSFETs 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.

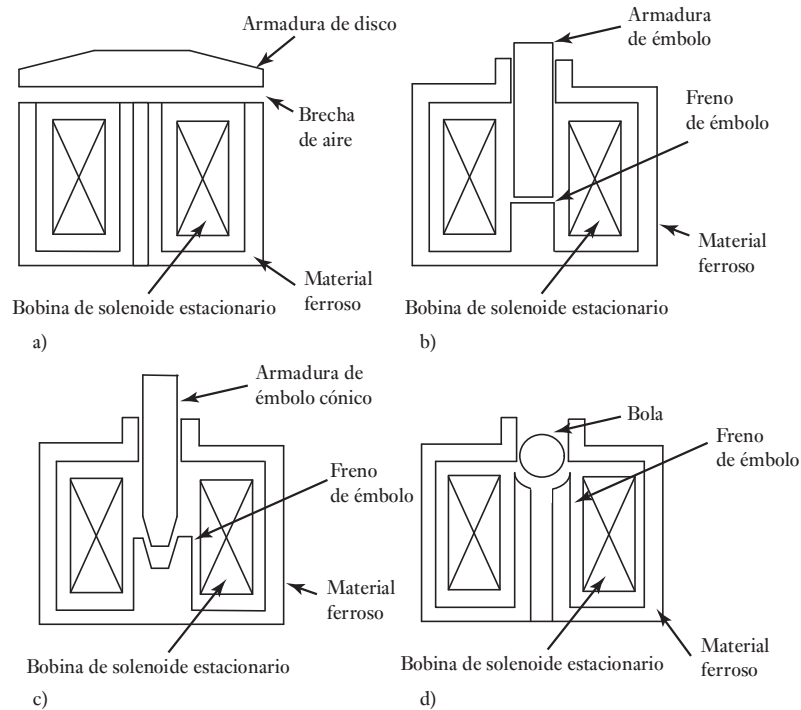
9.4

Solenoides

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

utilizar para proporcionar actuadores operados por electricidad los cuales tienen un amplio uso en dispositivos de carrera corta, por lo general de hasta 25 mm.

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.

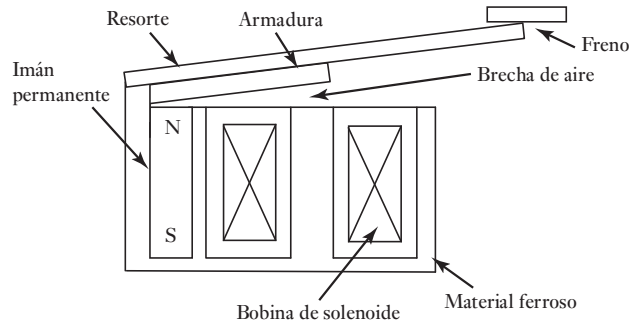


La Figura 9.13 presenta cuatro ejemplos de solenoides lineales con diferentes formas de armadura. La forma de la armadura, el conjunto de piezas y el tubo central dependerán del uso para el que se diseñe el actuador. Las armaduras de disco son útiles donde se requiere distancias cortas de viaje y rapidez 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 impelida 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.