

# Principios de mecatrónica

## Clase 26

SDI-11561-004, SDI-11561-002

### Drivers eléctricos

Los accionadores eléctricos utilizados para el movimiento de traslación directa son, en primer lugar, electroimanes y accionamientos lineales y generalmente son los electroimanes los que se emplean como actuadores.

**Un electroimán** es un tipo de imán en el que el campo magnético se produce mediante el flujo de una corriente eléctrica, desapareciendo en cuanto cesa la corriente. Los electroimanes generalmente consisten en un gran número de espiras de alambre, muy próximas entre sí que crean el campo magnético. Las espiras de alambre a menudo se enrollan al rededor de un núcleo magnético hecho de un material ferromagnético o ferrimagnético (e.g; cerámicos); el núcleo magnético concentra el flujo magnético y hace un imán más potente.

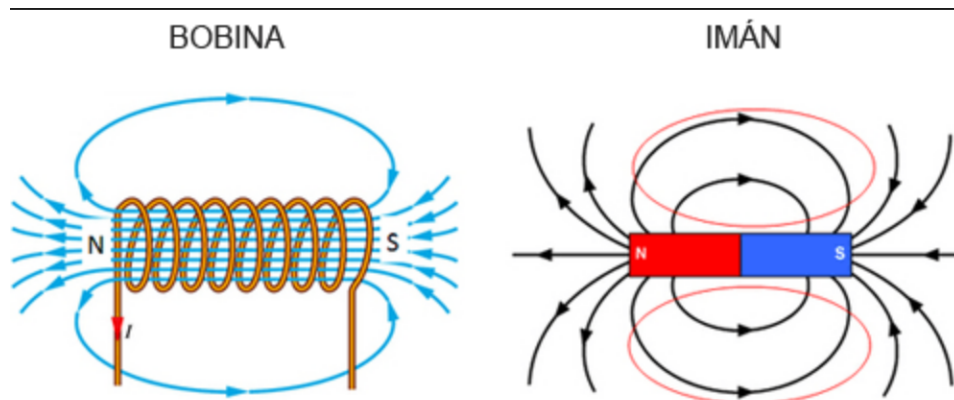


Figura 1: La corriente ( $I$ ) fluyendo por un cable produce un campo magnético ( $B$ ) en torno a él. El campo se orienta según la regla de la mano derecha.

**La principal ventaja de un electroimán sobre un imán permanente, es que el campo magnético se puede cambiar de**

forma rápida mediante el control de la cantidad de corriente eléctrica en el devanado. Sin embargo, a diferencia de un imán permanente que no necesita de alimentación, un electroimán requiere de una fuente de alimentación para mantener los campos.

En general, los electroimanes se pueden dividir en los siguientes:

- Imanes DC
- Imanes de CA
- electroimanes polarizados

Dependiendo del diseño del **cuerpo magnético de la armadura y de la bobina excitadora**, se puede distinguir entre diferentes diseños básicos. **Los accionadores lineales electromagnéticos se incorporan principalmente para la conversión directa de energía eléctrica en movimiento de traslación**, como por ejemplo- en sistemas de transporte de levitación magnética, en vías ferreas.

**Los accionamientos eléctricos para la generación directa de movimientos de rotación son motores eléctricos**, para los que existe una gran variedad de diseños. Se puede distinguir entre motores de potencia pequeña de hasta 75 W, motores fraccionales de potencia de caballos (motores FHP) hasta 750 W y motores de gran potencia hasta aproximadamente 100 MW. Los motores de pequeña potencia y los motores FHP son los accionamientos dominantes para actuadores con ajustes de potencia pequeños. Sin embargo, también se utilizan como generadores de potencia y, por lo tanto, como unidades de pequeña potencia. Algunos ejemplos son los electrodomésticos, las transmisiones de alimentación en máquinas herramientas y robots y los dispositivos de comunicaciones.

**Para los sistemas mecatrónicos, el interés está en los accionamientos eléctricos de pequeña potencia por ejemplo de hasta unos 30 kW.**

**Las máquinas eléctricas más utilizadas tienen en común el hecho de que los conductores eléctricos se mueven en un campo magnético. Según la ley de Faraday, la cual enuncia que el voltaje inducido en un circuito cerrado resulta directamente proporcional a la velocidad con que cambia en el tiempo el flujo magnético que atraviesa una dada superficie con el circuito.**

Muchas maquinas eléctricas pueden ser usadas como accionadores y generadores.

Los más importantes tipos de motores eléctricos pueden ser divididos como sigue:

I) Motores de corriente continua

- motores de bobina en serie;
- motores de derivación en paralelo (shunt-wound)
- motores de campo permanente.

II) Motores trifásicos de CA

- motores de inducción (motores asíncronos);
- motores síncronos.

III) Motores monofásicos de CA

- motores conmutadores (motores universales);
- motores de jaula de ardilla.

**Motores de corriente directa**

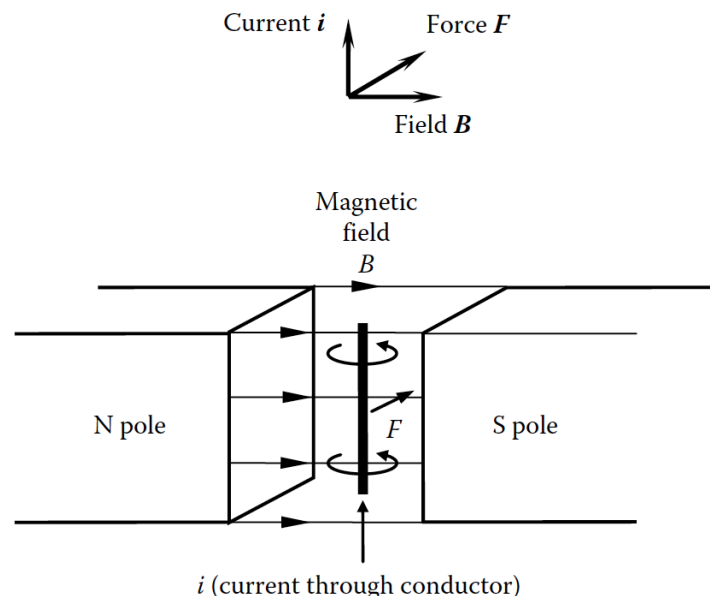
**Un motor de corriente continua convierte la energía eléctrica de corriente continua en energía mecánica de rotación.**

Una parte importante del par generado en el rotor (armadura) del motor está disponible para impulsar una carga externa. El motor de corriente

continua es probablemente la forma más antigua de motor eléctrico. Debido a las características tales como alto par, control de la velocidad en un amplio rango, portabilidad, buenas características de velocidad y par, un modelado más sencillo y preciso, y adaptabilidad a varios tipos de métodos de control, los motores de corriente continua todavía se usan ampliamente en numerosas aplicaciones de ingeniería, incluyendo manipuladores robóticos, vehículos, mecanismos de transporte, unidades de disco, mesas de posicionamiento, máquinas herramienta, dispositivos biomédicos y actuadores de servoválvulas. En vista de las técnicas de control efectivas que se han desarrollado para los motores de corriente alterna, se están volviendo populares en aplicaciones donde los motores de corriente continua han dominado. Sin embargo, el motor de corriente continua es la base del rendimiento de un motor de CA que se juzga en tales aplicaciones.

- Principio de funcionamiento

El principio de funcionamiento de un motor de corriente continua se ilustra en la siguiente figura.



Considere un conductor eléctrico colocado en un campo magnético constante en ángulo recto con respecto a la dirección del campo. La densidad de flujo  $B$  se supone constante. Si se pasa una corriente continua a través

del conductor, el flujo magnético se forma debido a los bucles de corriente alrededor del conductor, como se muestra en la figura. Esto genera una fuerza magnética de desequilibrio  $F$  en el conductor, normal al plano paralelo a la dirección del flujo del imán. Esta fuerza (la fuerza de Lorentz) está dada por la ley de Lorentz:

$$F = Bil. \quad (1)$$

dónde  $B$  es la densidad de flujo del campo original  
 $i$  es la corriente a través del conductor  
 $l$  es la longitud del conductor.

Alternativamente, en la representación vectorial de estas tres cantidades, el vector  $F$  puede interpretarse como el producto cruzado de los vectores  $i$  y  $B$ . Específicamente,  $F = i \times B$ . **Si el conductor es libre de moverse, la fuerza generada lo mueve a alguna velocidad  $v$  en la dirección de la fuerza.** Como resultado de este movimiento en el campo magnético  $B$ , se induce un voltaje en el conductor. Esto se conoce como la fuerza contra electromotriz o back e.m.f., y está dado por

$$v_b = Blv. \quad (2)$$

De acuerdo con la ley de Lenz, el flujo debido a la e.m.f.  $v_b$  se opone al flujo debido a la corriente original a través del conductor, tratando de detener el movimiento. Esta es la causa de la amortiguación eléctrica en los motores. La ecuación (1) determina el par de armadura (par motor) y la ecuación (2) gobierna la velocidad del motor.

De esta forma, dado que una carga eléctrica en movimiento induce un campo magnético, podemos considerar a esta carga como un imán. Pues bien, al igual que cuando aproximamos dos imanes comprobamos que entre ellos existe una fuerza (de repulsión si aproximamos polos homólogos y de atracción si los polos son opuestos), una carga eléctrica que se desplaza en las proximidades de un imán (en el seno de un campo magnético) también

experimentará ese tipo de fuerzas. El valor de esta fuerza depende del valor de la carga eléctrica en movimiento, la intensidad del campo magnético y de la velocidad a la que se desplaza la carga; todo esto es formalmente establecido e, la Ley de Lorentz. La cual nos dice que: cuando una partícula cargada eléctricamente se mueve dentro de un campo magnético experimenta una fuerza perpendicular a la dirección de ese movimiento y perpendicular, a su vez, a la dirección del flujo del campo magnético.

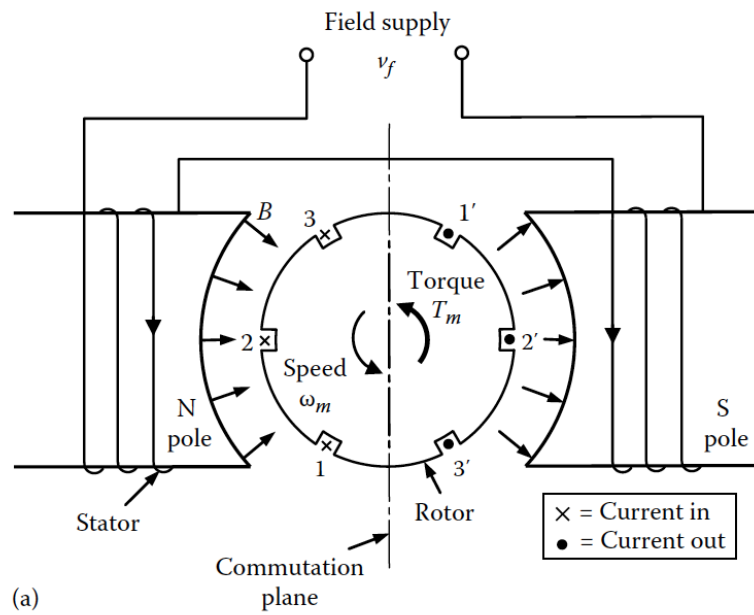
- Rotor y estator

Un motor de corriente continua tiene un elemento giratorio llamado **rotor o armadura**. El eje del rotor se apoya en dos cojinetes en la carcasa del motor. El rotor tiene ranuras separadas en su periferia. Estas ranuras llevan los devanados del rotor, como se muestra en la figura (a). Suponiendo que el flujo de campo está en la dirección radial del rotor, la fuerza generada en cada conductor estará en la dirección tangencial, generando así un par (fuerza  $\times$  radio), que impulsa el rotor. El rotor es típicamente un cilindro laminado hecho de un material ferromagnético. Un núcleo ferromagnético ayuda a concentrar el flujo magnético hacia el rotor. La laminación reduce el problema de la histéresis magnética y limita la disipación asociada (pérdida de energía por generación de calor) dentro del material ferromagnético.

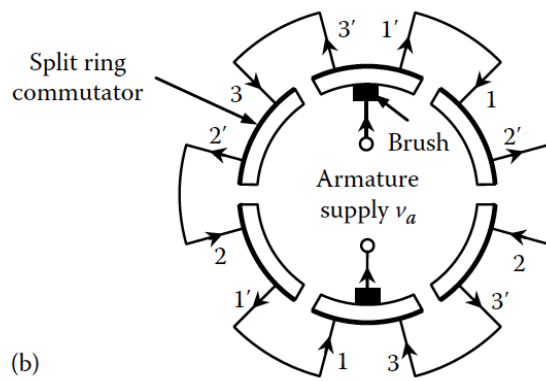
Los motores de CC más avanzados utilizan rotores de núcleo de hierro en polvo en lugar de la variedad de núcleo de hierro laminado, lo que restringe aún más la generación y conducción o disipación de corrientes de Foucault <sup>1</sup> y reduce varias no linealidades como la histéresis. Los devanados del rotor (devanados del inducido) están alimentados por la tensión de alimentación  $v_a$ . El campo magnético fijo, que interactúa con la bobina del rotor y genera el par del motor, es proporcionado por un conjunto de **polos magnéticos fijos alrededor del rotor**. Estos polos forman el estator del motor. El estator puede consistir en dos polos opuestos de un

---

<sup>1</sup>Estas corrientes disipan energía en el metal en forma de calor



(a)



(b)

imán permanente (PM). Sin embargo, **en los motores industriales de corriente continua, el flujo de campo generalmente se genera no por un imán permanente sino eléctricamente en los devanados del estator, por un electroimán, como se muestra esquemáticamente en la figura (a).** Los polos del estator se construyen a partir de láminas ferromagnéticas (es decir, una construcción laminada). Los devanados del estator son alimentados por la tensión de alimentación  $v_f$ , como se muestra en la figura (a).

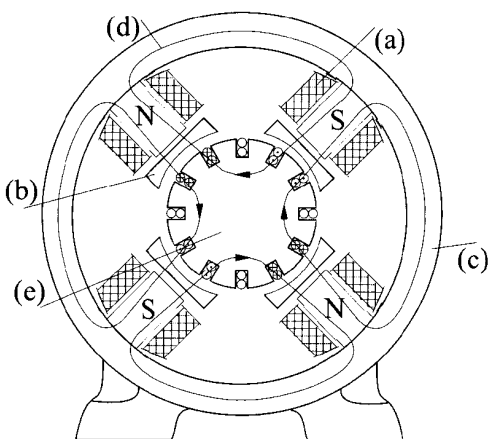
El rotor en un motor de corriente continua convencional se denomina armadura (el suministro de voltaje a los devanados de la armadura se denota por  $v_a$ ). Esta nomenclatura es particularmente adecuada para generadores eléctricos porque los devanados dentro de los cuales se induce (genera) el voltaje útil se denominan devanados de inducido. De acuerdo con esta nomenclatura, los devanados de armadura de una máquina de corriente alterna se ubican en el estator, no en el rotor. Los devanados de estator en un motor de corriente continua convencional se denominan devanados de campo. En un generador eléctrico, la armadura se mueve en relación con el campo magnético de los devanados de campo, generando la salida de voltaje útil. Un motor de CC puede tener más de dos polos de estator y muchas más ranuras de conductores de lo que se muestra en la figur(a). Esto permite que el estator proporcione un campo magnético más uniforme y radial. Por ejemplo, algunos rotores llevan más de 100 ranuras de conductor.

## **Motores de corriente directa**

El estator de motores de corriente continua, diseñado para una mayor potencia, lleva varias bobinas de campo con 1 hasta “n” pares de polos magnéticos norte y sur, con el fin de producir uno o más campos magnéticos estacionarios. Las armaduras del devanado se colocan en 2 o hasta “m” ranuras de rotor axial que forman varias bobinas. **Las bobinas del**



rotor se alimentan con corriente de la armadura por medio de las escobillas (contactos deslizantes).



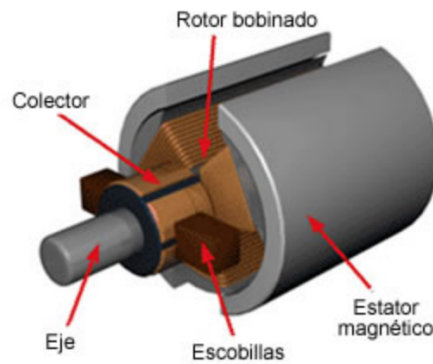
**Figure 5.15.** DC motor with four poles: (a) excitation coils; (b) pole shoe; (c) yoke; (d) magnetic flux; (e) rotor

Las partes más relevantes que permiten conmutar la polaridad en el rotor son los colectores y escobillas.

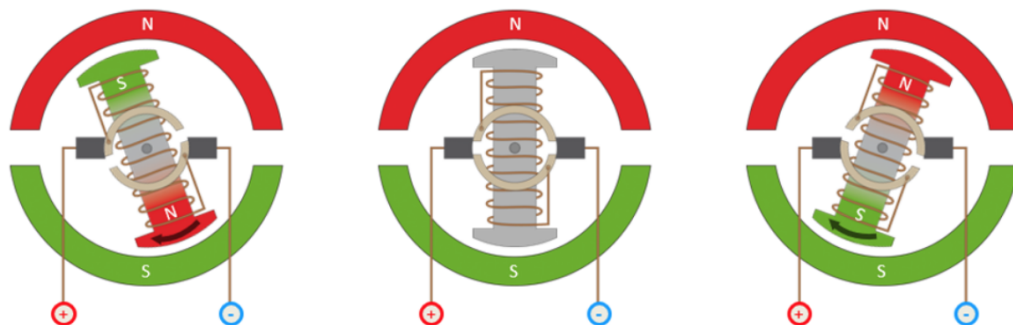
**Colector o conmutador.** Situado en uno de los extremos del eje del rotor, se compone de un anillo deslizante seccionado en dos o más segmentos. Generalmente el colector de los pequeños motores comunes de C.C. se divide en tres segmentos.

**Escobillas.** Representan dos contactos que pueden ser metálicos en unos casos, o compuesto por dos piezas de carbón en otros. Las escobillas constituyen contactos eléctricos que se deslizan por encima de los segmentos del colector mientras estos giran. Su misión es suministrar a la bobina o bobinas del rotor a través del colector, la corriente eléctrica directa necesaria para energizar el electroimán.

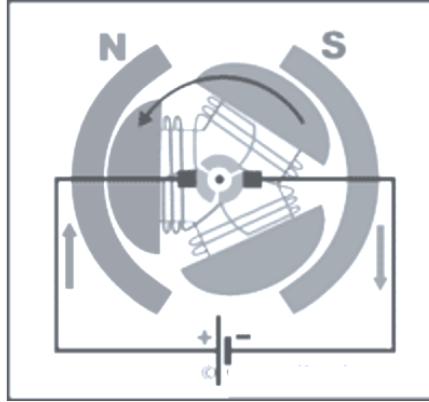
En el caso de girar el rotor a través del campo magnético constante producido por los devanados del estator, se inducen voltajes alternos en las bobinas de la armadura según la ley de inducción de Faraday. Esto se debe a que las bobinas de la armadura cambian su inclinación (ángulo de rotación)



**con respecto al campo magnético, pasando alternativamente un polo norte o un polo sur.** Para conseguir una tensión rectificada, la polaridad del contacto entre el conector y el devanado parcial de la armadura debe invertirse cada vez que cambie el signo de la tensión inducida. Esto es conseguido por el conmutador, que por lo tanto consta del mismo número de pares de cepillos como los pares de devanados de la armadura. En este caso, la posición angular de las escobillas es equivalente a la de los polos de campo. Así, los cepillos adyacentes dan alternativamente polos positivos y negativos.



Motor de corriente directa C.D. con rotor formado por tres polos (rotor tripolar) y colector seccionado en tres partes o segmentos es el tipo de más empleado en los motores de corriente directa de pequeño tamaño.



## Tipos de motores

Los principales tipos de construcción de motores de corriente continua de pequeña potencia se pueden distinguir principalmente considerando el modo de excitación. Si la excitación electromagnética se realiza por medio de una bobina de campo en el estator, puede suministrarse independientemente (motor de corriente continua excitado por separado) o en forma de circuito paralelo (motor de derivación) o una conexión en serie con la bobina de la armadura (Motor en serie). Por encima de todo, las configuraciones de circuito especificadas dan lugar a diferentes curvas de velocidad-par.

motor	DC shunt-wound motor	DC series-wound motor	three-phase asynchronous motor	three-phase synchronous motor (DC excitation of rotor)	single-phase (universal motor)	single-phase asynchronous motor with condensator	single-phase asynchronous motor (Ferraris motor)
circuit diagram							
torque-speed characteristics							

En el caso de la conexión en paralelo de la armadura y las bobinas de campo y las bobinas de campo excitadas por separado, **el par producido disminuye a voltaje de armadura constante linealmente con la velocidad angular**. La velocidad se puede controlar en un amplio rango de velocidad variando el voltaje del inducido. Para los motores DC excitados por separado, la disminución de la corriente de excitación (debilitamiento del campo) produce un aumento de velocidad adicional si ya se alcanza la tensión nominal del inducido. Este tipo de motor se puede emplear como un variador de velocidad variable en una multitud de aplicaciones, tales como máquinas y herramientas, robots y accionamientos (servo-accionamientos). Con la conexión en serie de la armadura y las bobinas de campo, el campo magnético resultante depende de la carga. **La curva de velocidad-par** muestra un par de torsión grande para la velocidad pequeña, mientras que con velocidad más alta el par disminuye rápidamente. En vista del gran par de arranque, este tipo de máquina se utiliza, por ejemplo, como motor de arranque para motores de combustión. Los motores DC excitados permanentemente, empleando ferritas o imanes Al-Ni-Co, cumplen con motores DC excitados por separado con excitación constante y muestran características equivalentes. Este tipo de construcción se utiliza a menudo para motores de baja potencia.

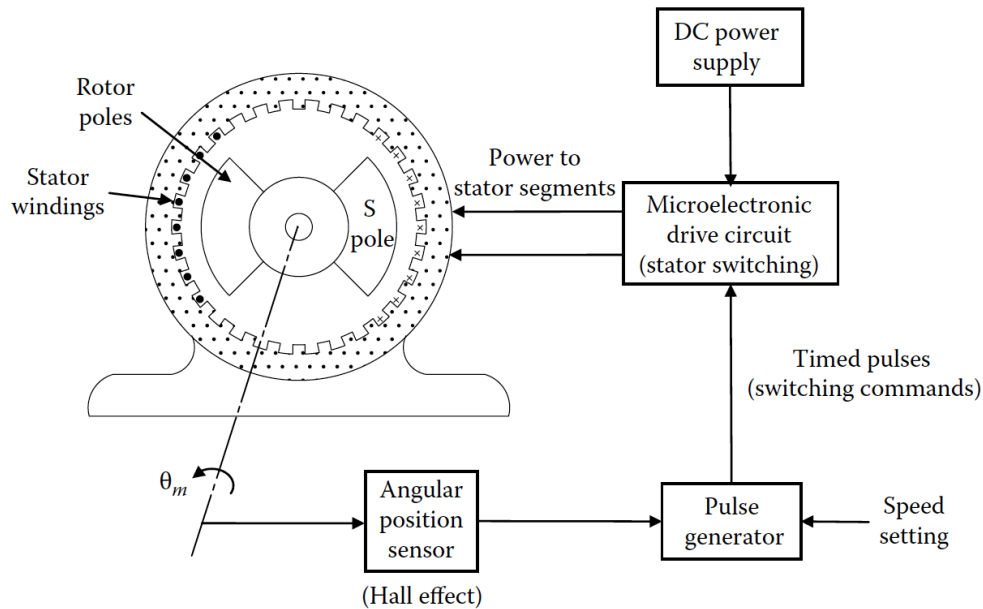
## **En resumen**

Los motores con escobillas de corriente directa, como indica su nombre, utilizan escobillas conectadas a un colector para realizar el cambio de polaridad en el rotor. Estas escobillas son, por lo tanto, las encargadas de conmutar mecánicamente la corriente de las bobinas del motor. Por su parte, los motores sin escobillas o brushless no incorporan colector ni escobillas para cambiar la polaridad en el rotor; la conmutación de las bobinas se realiza electrónicamente a través de un controlador de motor

## Motores de CC sin escobillas (conmutación electrónica)

La figura muestra esquemáticamente un motor de CC sin escobillas y un circuito de conmutación asociado. El rotor es un imán permanente multipolo. Los imanes convencionales de ferrita y los imanes de aluminio (aluminio-níquel-cobalto) o de cerámica son económicos, pero su relación campo-fuerza / masa es relativamente baja en comparación con los imanes de compuestos más costosos. Por lo tanto, para una clasificación de torque dada, la inercia del rotor se puede reducir utilizando materiales costosos para el rotor de un motor de CC sin escobillas. Ejemplos de materiales magnéticos costosos son el samario cobalto y el neodimio-hierro-boro, que pueden generar niveles de energía magnética que son 10 veces más altos que los de los imanes de cerámica-ferrita, para una masa determinada. Esto es particularmente deseable cuando se requiere un par alto, como en los motores de torque. El popular diseño de rotor de dos polos consiste en un imán cilíndrico diametralmente magnetizado, como se muestra en la figura. Los devanados del estator se distribuyen alrededor en grupos de devanados. **Cada segmento de bobinado tiene un cable de suministro separado.** La figura muestra un estator de cuatro segmentos. Dos segmentos diametralmente opuestos están conectados entre sí de manera que transportan corriente simultáneamente pero en direcciones opuestas. **La conmutación se logra energizando cada par de segmentos diametralmente opuestos secuencialmente**, en instantes de tiempo determinados por la posición del rotor. Esta conmutación podría lograrse a través de medios mecánicos, utilizando un interruptor de contacto múltiple accionado por el propio motor. Sin embargo, tal mecanismo anularía el propósito, ya que tiene la mayoría de los inconvenientes de la conmutación regular con anillos y cepillos partidos. Los motores sin escobillas modernos utilizan paquetes de circuitos integrados (IC) dedicados como sus controladores, con conmutación microelectrónica de estado sólido integrada. También, se pueden usar microcontroladores para este

propósito. Por lo general, los sensores de efecto Hall se utilizan (que detectan el campo magnético) para determinar la posición del rotor para la conmutación.

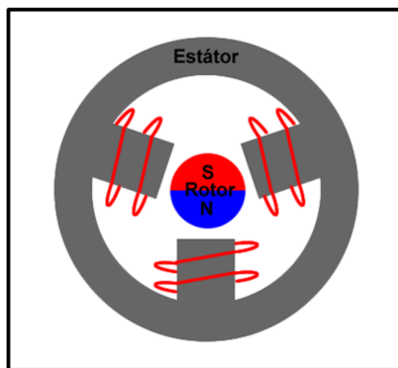


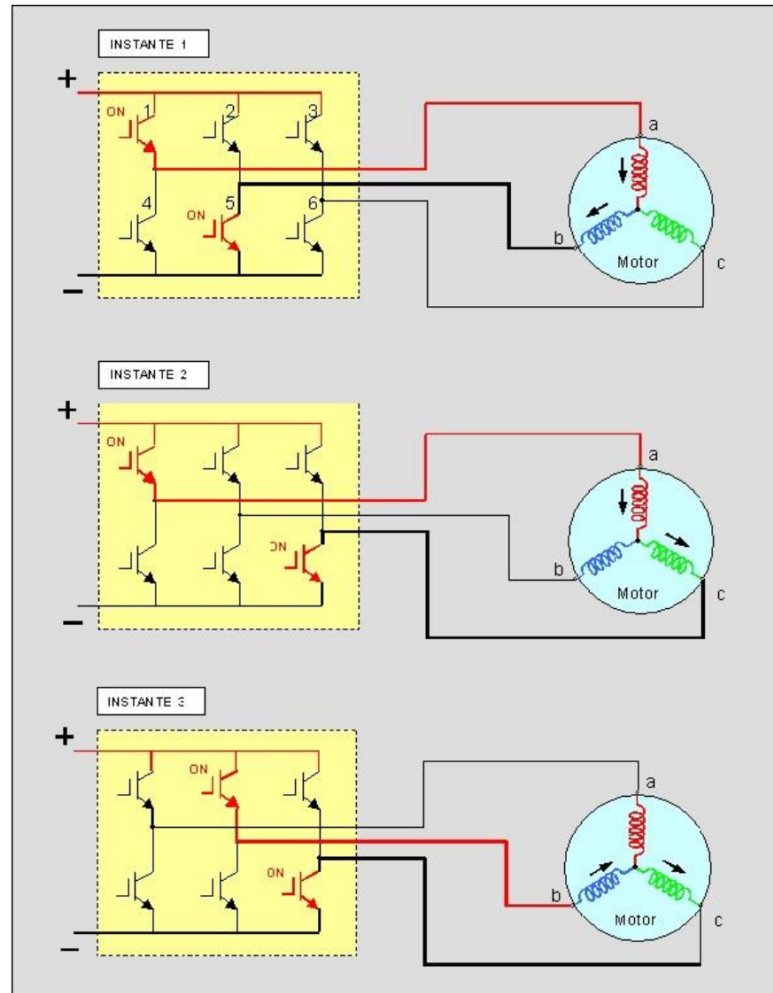
De esta forma, al energizar una bobina, esta crea un campo magnético. El rotor que tiene un campo magnético constante, detecta la variación y tiende a alinear el campo creado por el estator y el propio haciendo girar el rotor ya que es la parte móvil del motor. Para lograr que el rotor siga girando, antes de que se alinee por completo la bobina energizada con el rotor, se energiza la bobina que le sigue y a la anterior se la deja de alimentar. Esto provoca que el campo magnético del rotor siga al campo magnético del estator, que va variando en el tiempo, haciendo que el rotor gire.

Las ventajas de los motores de corriente continua son que la velocidad angular se puede controlar en un amplio rango de velocidad ajustando la tensión de alimentación de CD y que los motores se suministran con corriente continua (baterías). Por otra parte, surgen desventajas debido al empleo de la conmutación mecánica, ya que la esperanza de vida de la construcción cepillos / conmutadores está restringida. Además, los conmutadores mecánicos conducen a pérdidas e incertidumbres de contacto

a pequeñas tensiones y pueden causar perturbaciones eléctricas (chispas) y ruido de funcionamiento. Por lo tanto, se han desarrollado motores de corriente continua sin escobillas. **Dichos motores consisten en un rotor de imán permanente y varios devanados del estator que se pueden conmutar electrónicamente dependiendo de la posición del rotor.** El ángulo del rotor se puede medir, por ejemplo, mediante sensores Hall, sensores de posición inductivos u ópticos. La corriente que fluye por lo menos en dos bobinas del estator es suministrada por transistores. Por lo tanto, se genera un campo giratorio cuya frecuencia de rotación depende de la velocidad angular. Por lo tanto, los motores de corriente continua conmutados electrónicamente combinan la robustez mecánica de los motores polifásicos con las buenas propiedades de control de velocidad de los motores de corriente continua. Otras ventajas son: buen funcionamiento, alta durabilidad, buen comportamiento de arranque (sin resistencia al cepillo), mayor rendimiento, sin chispas (supresión de interferencias de radiofrecuencia, protección contra explosiones). Las curvas de velocidad-par se corresponden con las de los motores de derivación de CC. Los motores tienen un rango de potencia de 0,5 a 300 W.

En la siguiente figura se representa el funcionamiento del motor al transmitir la serie de pulsos por las fases. Los pulsos que envía el micro controlador sirven para encender o apagar los transistores del puente en H de tal forma que la tensión en cada una de las tres bobinas del motor varíe creando un campo magnético giratorio con una velocidad determinada por la frecuencia de los pulsos que se alimenta cada fase.



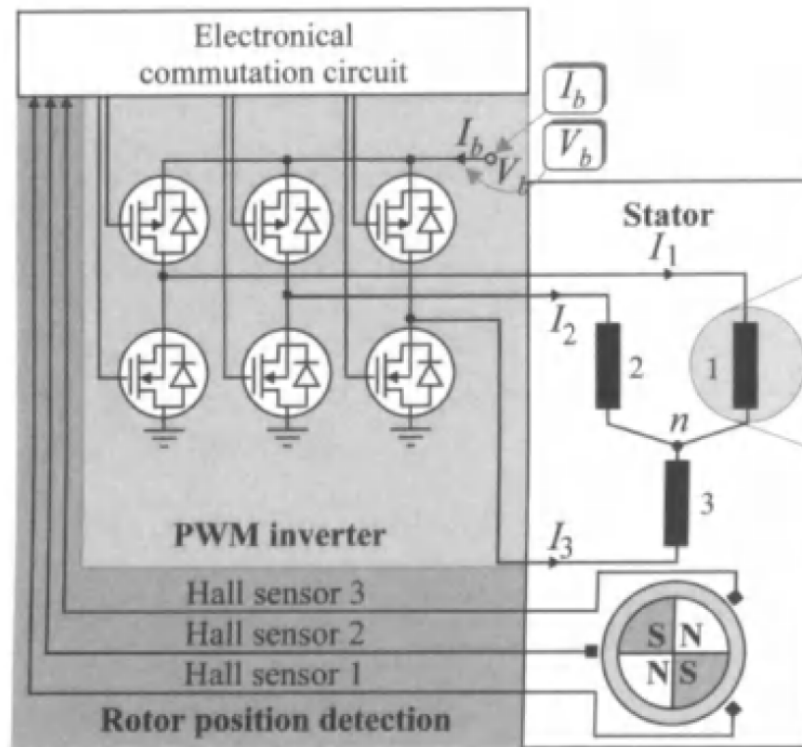


Si se desea que el motor gire a una velocidad definida, se alimentan las fases del motor a una frecuencia determinada. Para alimentar de forma correcta las fases, se deben crear una serie de pulsos para cada fase que serán iguales pero con un desfase de  $120^\circ$  con respecto al anterior.

Como ya se ha mencionado, a diferencia de un motor de escobillas de corriente continua, la conmutación de un motor sin escobillas se controla electrónicamente. Para girar el motor, los bobinados del estator deberían estar activados en una secuencia. Es importante conocer la posición del rotor para poder entender cómo deben ser activadas las bobinas según la secuencia de activación. La posición del rotor se detecta mediante sensores de efecto Hall integrándose en el estator. La mayoría de los motores tienen tres sensores Hall integrados en el estator en el extremo opuesto al rotor

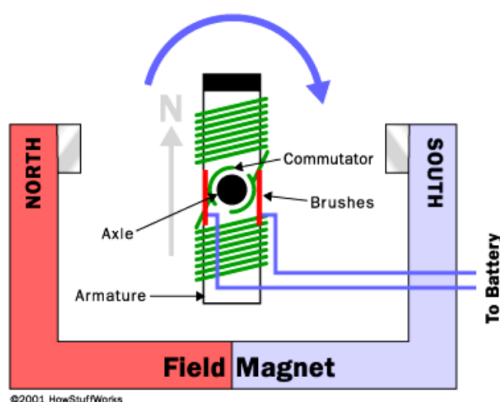


del motor. Cada vez que los polos magnéticos del rotor pasan cerca de los sensores Hall, dan una señal de alto o bajo, lo que indica el polo N o S está pasando cerca de los sensores. Basado en la combinación de estas tres señales del sensor Hall, la secuencia exacta de conmutación se puede determinar.

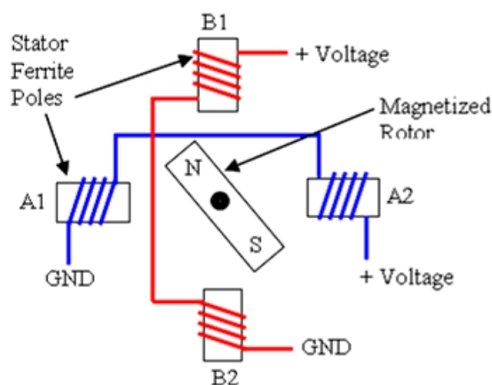


## Motores a pasos

Los motores a pasos son utilizados para el desarrollo de mecanismos que requieren de una alta precisión. Este tipo de motores poseen la cualidad de poderlos mover desde un paso hasta una secuencia interminable de pasos dependiendo de la cantidad de pulsos que se les aplique. Este paso puede ir desde pequeños movimientos de  $1.8^\circ$  hasta de  $90^\circ$ . Es por eso que este tipo de motores son muy utilizados, ya que pueden moverse a deseo del usuario según la secuencia que se les indique a través de un microcontrolador. Estos motores poseen la habilidad de quedar enclavados en una posición si una o más de sus bobinas está energizada o bien totalmente libres si no existe corriente alguna circulando por sus éstas. Los motores paso a paso consisten en un estator con bobinas a las que



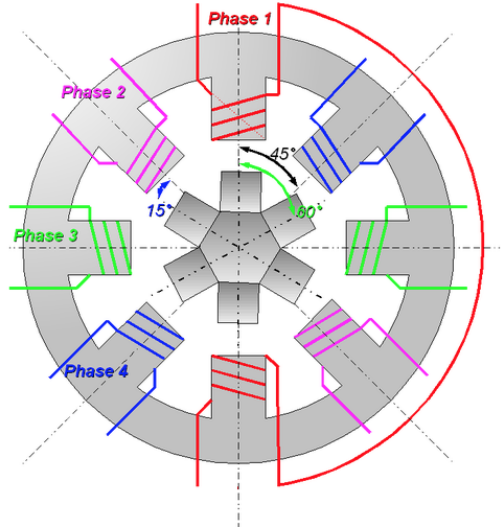
Motor de corriente directa



Motor de pasos

se les pueden suministrar voltaje individualmente. Los rotores contienen imanes permanentes y trabajan sobre la base del principio de reluctancia (la reluctancia es la resistencia de un circuito magnético al paso de un flujo cuando es influenciado por un campo magnético) empleando polos o engranajes dispuestos en forma de estrella. Cambios del ángulo de rotación puede realizarse suministrando a ciertas bobinas del estator impulsos de corriente continua.

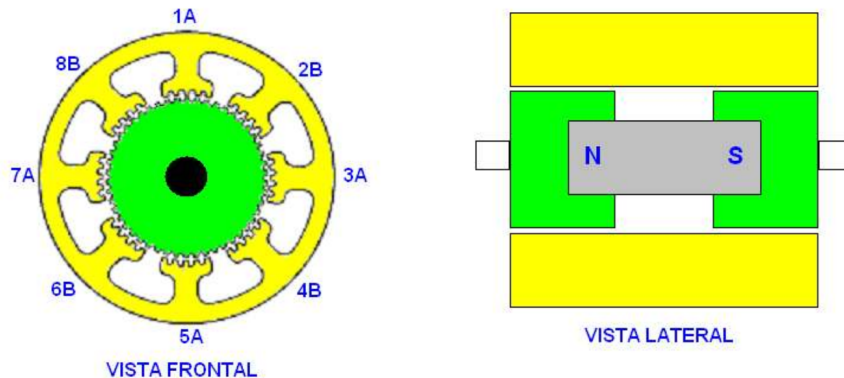
Si durante el proceso de arranque y la eliminación, respectivamente, no se pierden los pasos, el cambio de ángulo se define por el número de



impulsos de disparo de acuerdo con una cadena de control abierta (rejilla magnética). Denotando el ángulo de paso por  $\alpha$ , el número de pulsos o pasos por  $v$  y el ángulo de rotación por  $\psi$ , así se puede especificar la siguiente relación:

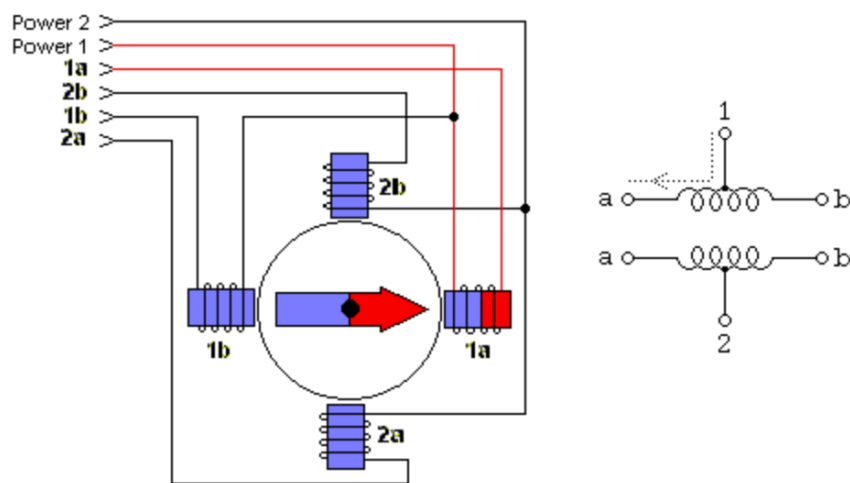
$$\psi = \alpha v$$

De esta forma, el principio de funcionamiento de los motores paso a paso es el siguiente; cuando una barra de hierro o acero se suspende (es libre de rotar) dentro de un campo magnético, esta se alinea con el campo de manera que la reluctancia total del circuito sea la mínima posible. Si cambiamos la dirección del campo la barra girará con un determinado par.



## Motores unipolares

Estos motores cuentan con dos bobinas con un punto medio de los cuales salen los cables hacia el exterior; estos cables se conectan a la fuente mientras que los extremos de las bobinas son aterrizadas para cerrar el circuito; dependiendo del tipo de motor, las líneas comunes pueden ser independientes o no. Esta configuración puede ser vista de las siguientes formas: que el motor tiene dos bobinas pequeñas conectadas a un punto en común, o que una bobina está dividida en dos por medio de un punto común. Ahora, y dependiendo de qué media bobina se energice, se puede tener un polo norte o un polo sur; si se energiza la otra mitad, se obtiene un polo opuesto al otro. En la Ilustración se muestra un esquema representativo del motor a pasos unipolar.



## Motores bipolares

Cuentan con dos bobinas sin ningún punto medio donde salga un cable, por lo que se tienen cuatro cables y cada par corresponde a las terminales de una bobina. Dada la configuración de la bobina, la corriente puede

fluir en dos direcciones, necesitando un control bidireccional o bipolar. En general, con respecto al sentido de giro de los motores a pasos bipolares, vale la pena recordar que el sentido de giro depende de la dirección del flujo de la corriente por las bobinas ya que ésta induce en el embobinado un campo magnético que genera un polo magnético norte y sur, de ahí que el rotor se mueva para que uno de los polos del rotor sea opuesto al de la bobina localizado en el estator, como se muestra en la Ilustración.

