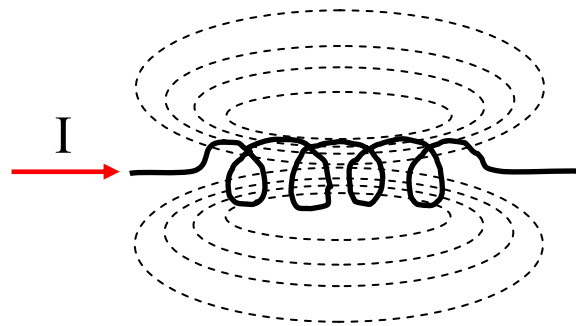


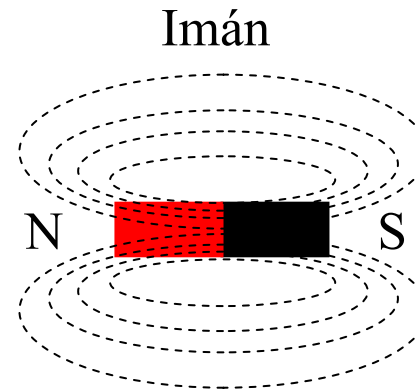
## Notas sobre motores paso a paso (*Stepper motors*)

### Conceptos básicos (previos)

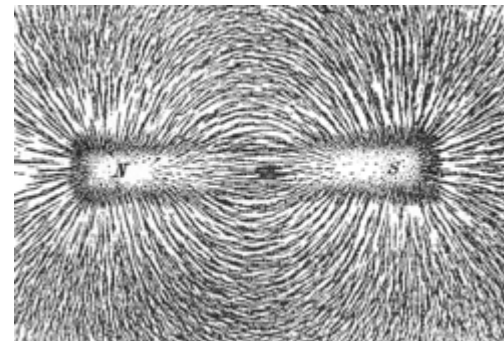
- Si se hace circular una corriente (de electrones) por un conductor tal como se indica en la figura se crea un campo magnético. Si la intensidad de la corriente es constante, entonces el campo magnético creado es como el que crea un imán que está en reposo\*.



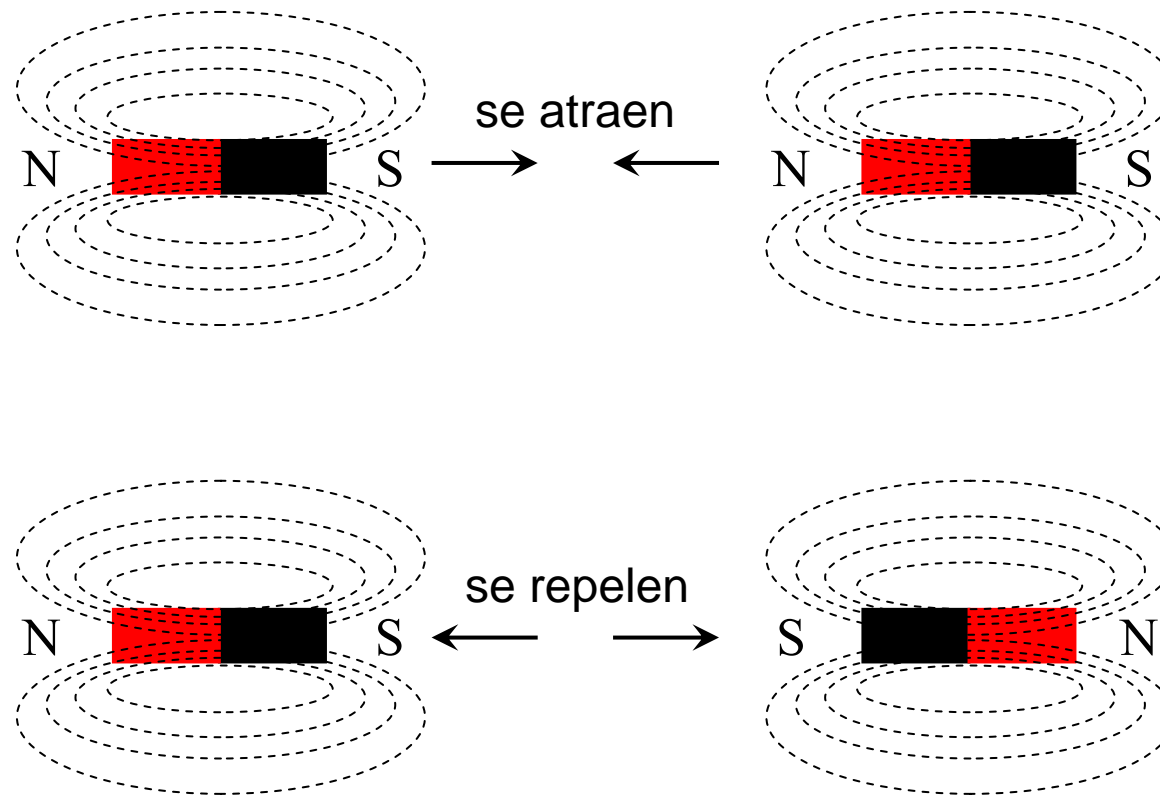
Bobina



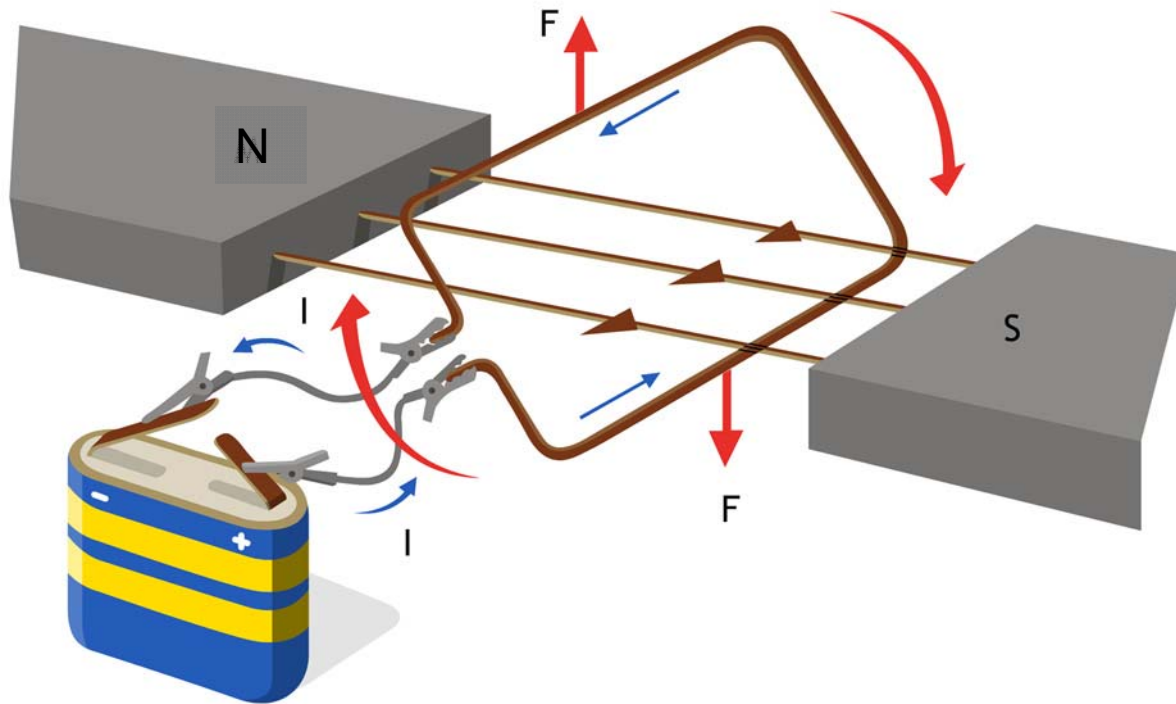
Imán



- Cuanto más acerquemos el polo Norte de un imán al polo Sur de otro imán, mayor es la fuerza con la que se atraen. Análogamente, cuanto más acerquemos el polo Norte de un imán al polo Norte de otro imán, mayor es la fuerza con la que se repelen. Y lo mismo ocurre cuando acercamos los polos Sur de dos imanes.



- La atracción – repulsión también ocurre si uno de los campos lo crea una corriente de electrones. En la siguiente figura, el campo magnético creado por el imán ejerce una fuerza  $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$  (fuerza de Lorentz) sobre las cargas eléctricas que circulan por el conductor.

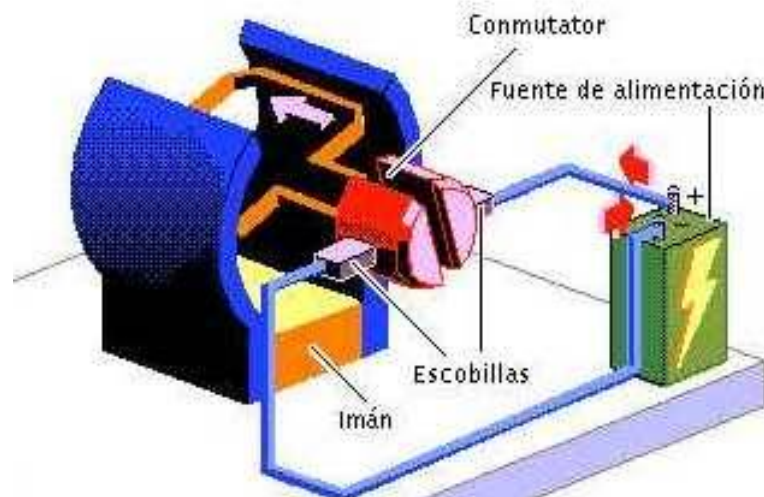


- Los motores constan de dos partes:

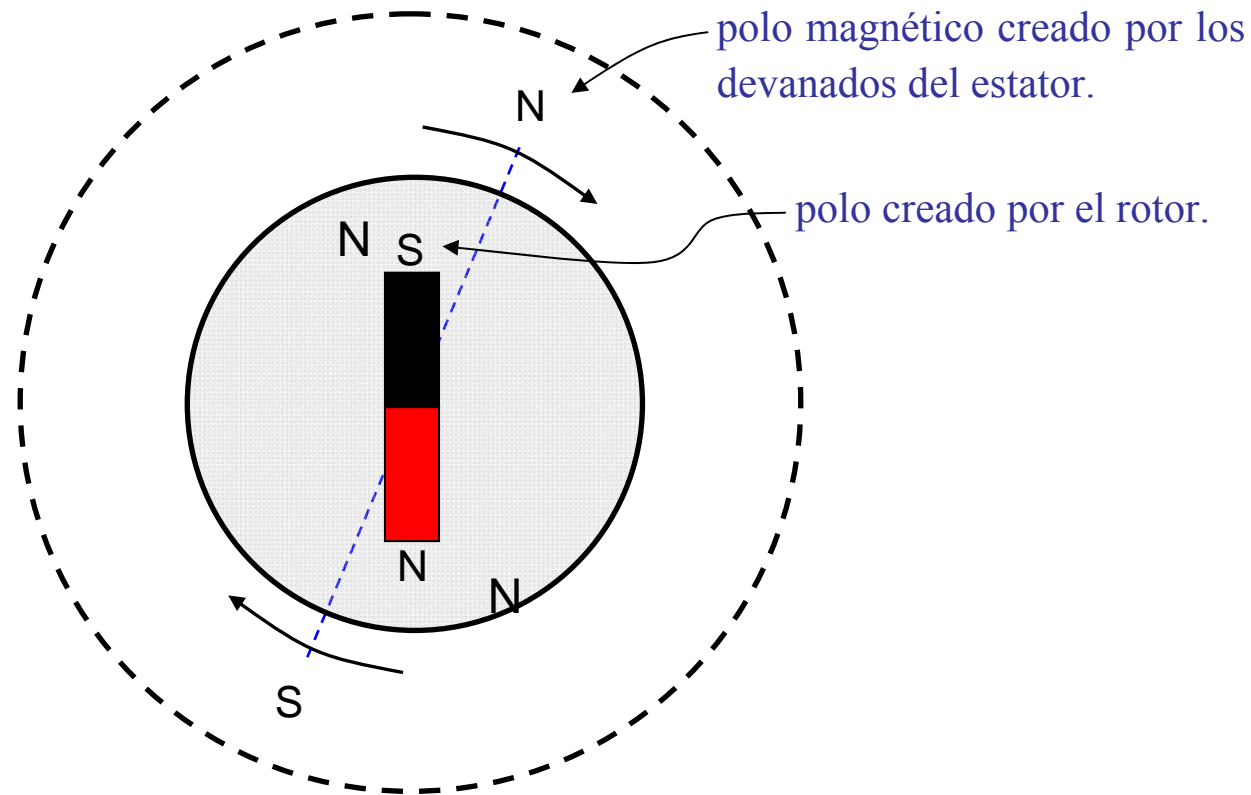
\_ Rotor: es la parte móvil del motor (la que gira). Está formado por imanes o por bobinas que se utilizan para crear campos magnéticos.

\_ Estator: es la parte fija del motor (la que no gira). Está formado por imanes o por bobinas que se utilizan para crear campos magnéticos.

- En el siguiente ejemplo, cuando se hace circular una corriente de electrones (cargas eléctricas) por el rotor, se crea un campo que interactúa con el campo creado por los imanes del estator, provocando así el giro del rotor.



- Según el tipo de motor que se considere, el campo creado por el *estator* o por el *rotor* cambia su orientación con el tiempo ( $\equiv$  los polos magnéticos cambian de posición). Esto hace que la fuerza de atracción-repulsión que experimentan las cargas eléctricas presentes cambie de dirección con el tiempo (fuerza de *Lorentz*), lo cual provoca que el rotor gire siguiendo el cambio de dirección del campo magnético.



## Características de los *motores paso a paso* (*Stepper motors*)

- Los motores *paso a paso* están pensados para que su eje de giro rote un múltiplo de un ángulo (*paso*) dado y a continuación quedarse parado.
- Se puede hacer que un motor *paso a paso* gire de forma continua, pero girará a una velocidad menor de la que lo hace un motor de corriente continua o de corriente alterna.
- Un motor *paso a paso*, de  $n$  pasos, en principio puede dar pasos (realizar giros) de  $360^\circ/n$  grados. Así, por ejemplo, un motor de 48 pasos, puede realizar giros de  $360^\circ/48 = 7,5^\circ$ . Para que el rotor realice un giro de  $360^\circ$  debe dar 48 pasos o lo que es lo mismo, debe realizar 48 giros de  $7,5^\circ$  cada uno.
- Los giros se realizan de *uno en uno* o *paso a paso* (de ahí el nombre)
- Estos motores no utilizan escobillas.
- Su funcionamiento es independiente de la carga conectada a su eje de giro (siempre que ésta no presente un par resistente superior al par que puede generar el motor). El tiempo que le lleva dar un paso sí depende del par resistente que presente la carga a dicho giro.

- El control de la posición angular del eje de giro se realiza en bucle abierto. No es necesario utilizar un sensor para conocer la posición, siempre que la carga no presente un par resistente superior al par máximo que puede crear el motor.
- Los motores paso a paso (al igual que los servomotores) pueden mantener fijo el eje de giro en una posición angular dada (siempre que la carga no aplique un par al eje de giro del motor superior al par máximo que puede crear el motor).
- Los motores paso a paso se utilizan en aplicaciones de control y de medida. Se pueden encontrar en impresoras, máquinas de control numérico, etc.

Fotografía de un motor paso a paso de tipo bidireccional

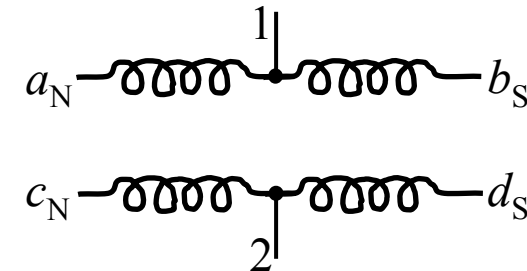




- Hay 3 tipos básicos de motores paso a paso
- ✓ Motores de imanes permanentes (el rotor es un imán y el estator está formado por varias bobinas):
  - \_ Motores unipolares
  - \_ Motores bipolares
  - \_ Motores bifilares
- ✓ Motores de reluctancia variable
- ✓ Híbridos: combinan características de los tipos anteriores

Motores paso a paso *unipolares* de imanes permanentes:

- El *rotor* está formado por imanes permanentes, mientras que el *estátor* está formado por 4 bobinas unidas dos a dos, con toma central (puntos 1 y 2 en la figura de la derecha).



Los puntos 1 y 2 pueden estar conectados entre si dentro del motor y sacarse al exterior mediante un único hilo o bien pueden estar no conectados entre si y estar disponibles en el exterior del motor mediante dos hilos separados. Según sea el caso, los motores unipolares tienen 5 hilos ( $a, b, c, d, 1-2$ ) ó 6 hilos ( $a, b, c, d, 1, 2$ ).

- Independientemente del número de hilos que tenga un motor *unipolar*, todos se controlan de la misma forma: los terminales 1 y 2 se conectan al terminal positivo de la fuente de alimentación (+Vcc) y los terminales  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$  se conectan a masa de forma alternativa. Lo que hace que la corriente por los devanados sólo pueda circular en un sentido  $\Rightarrow$  cada bobina sólo puede crear un campo con una polaridad dada... de ahí su nombre de motores *unipolares*.

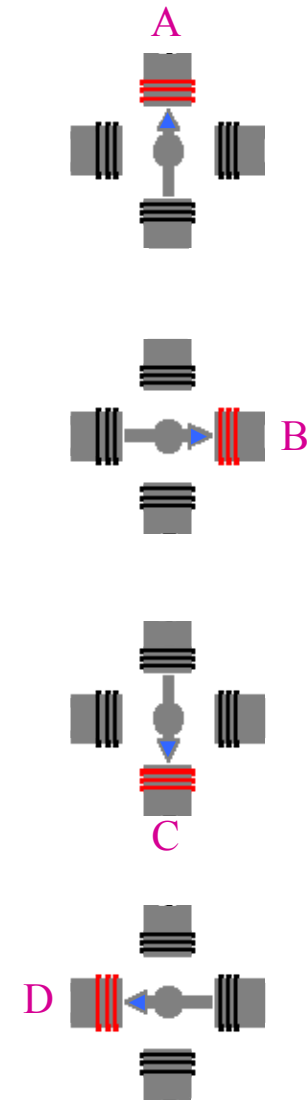
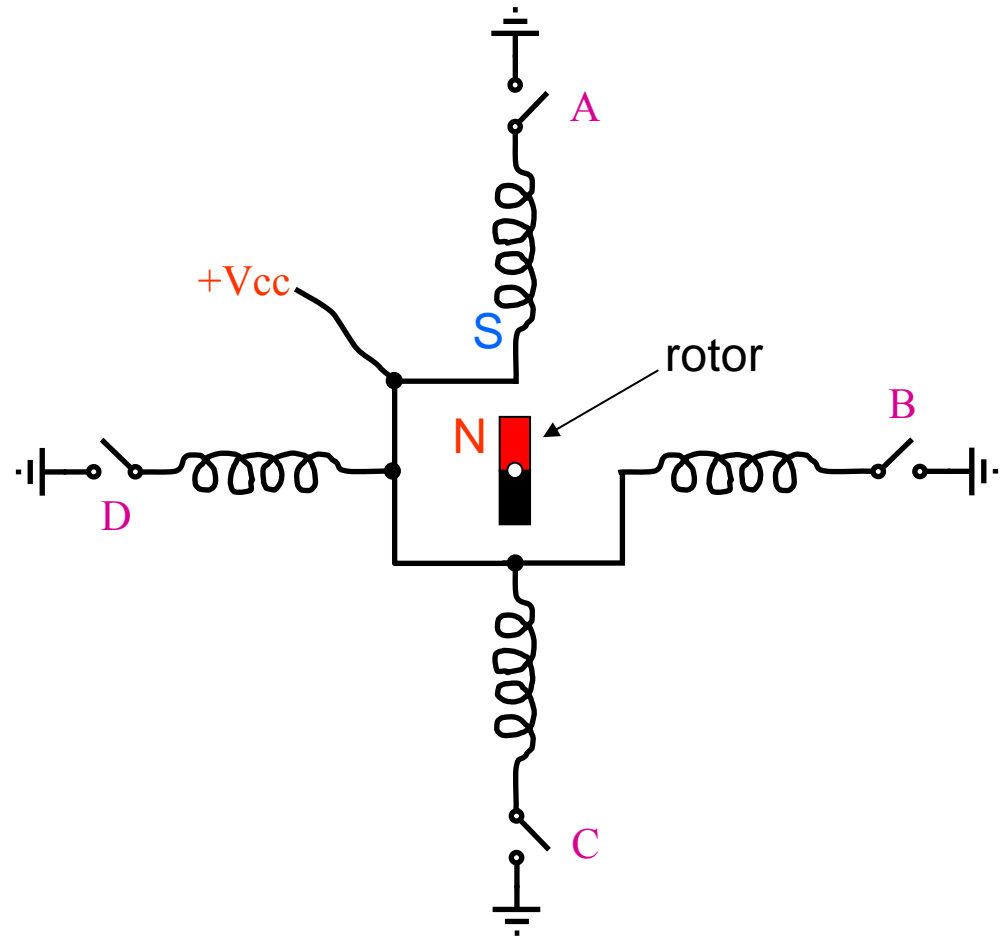
- Se define el *número de pasos* de un motor paso a paso como el número de pasos que debe dar su rotor para realizar un giro de 360°.
- El ángulo, en grados, correspondiente a un paso cumple lo siguiente:

$$\text{ángulo de un paso} = 360^\circ / n^\circ \text{ de pasos}$$

- Se dice que el rotor da un *paso completo (full step)* cuando realiza un giro igual al ángulo de un paso. Y se dice que el rotor da *medio paso (half step)* cuando realiza un giro igual a medio ángulo de paso.

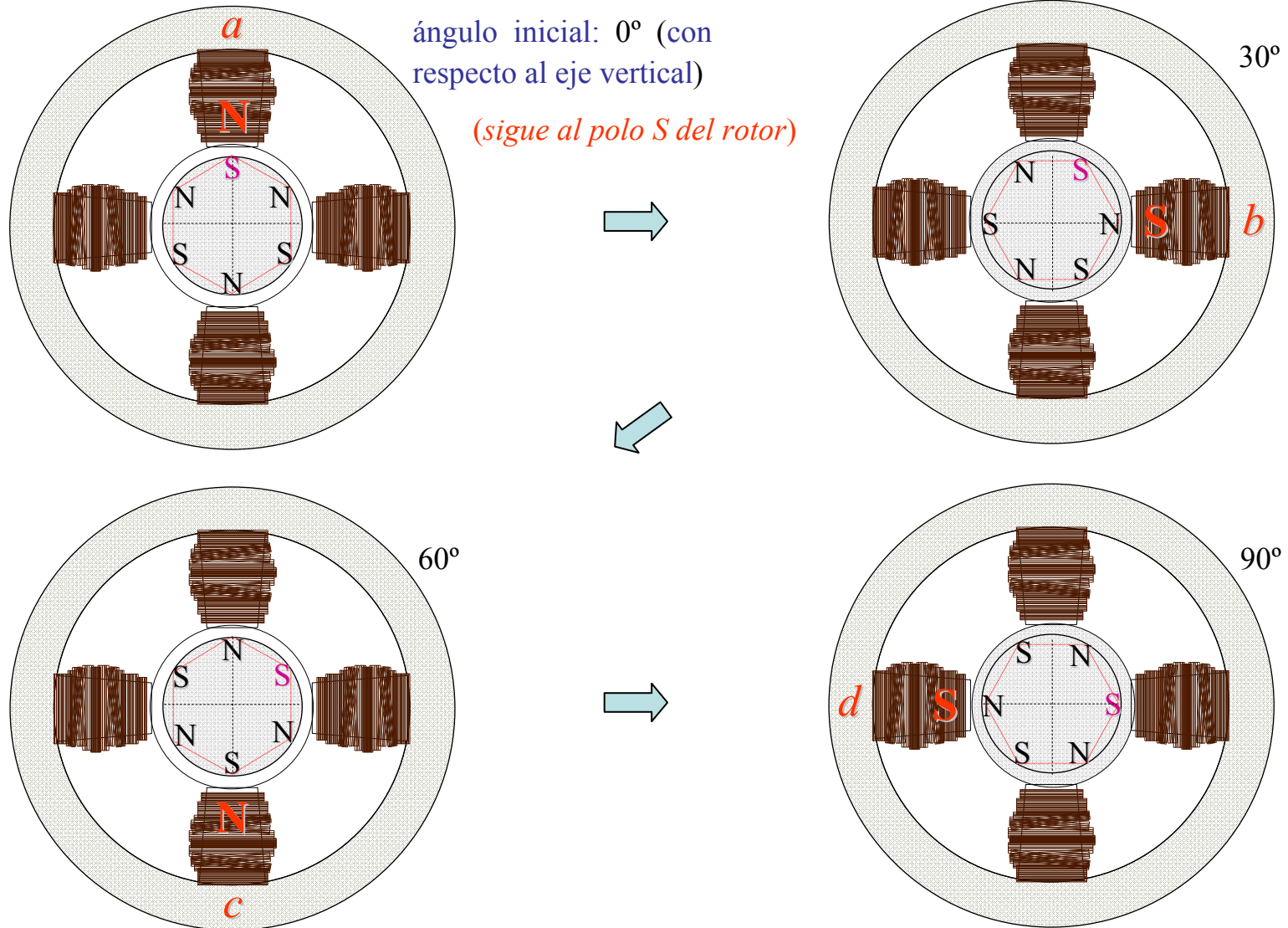
Nota: en las especificaciones del motor se indica el número de pasos del motor o bien el ángulo correspondiente a 1 paso.

*Ejemplo: motor unipolar con un rotor con 1 par de polos y con un estátor con 4 bobinas*  
*( $n^\circ$  de pasos = 4, ángulo de un paso =  $360^\circ/4 = 90^\circ$ )*

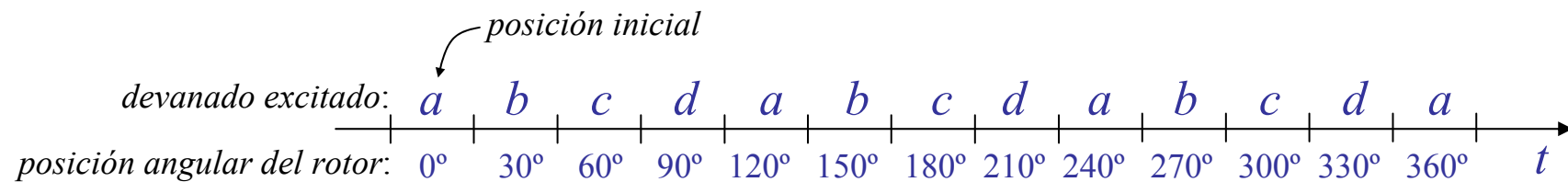


Nota: después de haber estado cerrado el interruptor A (posición inicial), si se cierran los interruptores siguiendo la secuencia: B-C-D-A el rotor realiza un giro de  $360^\circ$

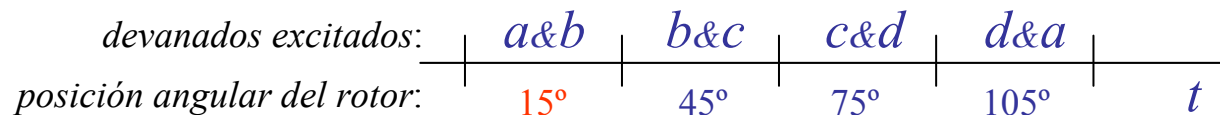
*Ejemplo:* en un motor *unipolar* con un rotor con 3 pares de polos y con un estátor con 4 bobinas, la secuencia de conexión a masa de los devanados para producir un giro de  $3 \times 30^\circ = 90^\circ$  es:  $a - b - c - d$  (*full step*) (pasos de  $30^\circ$ )



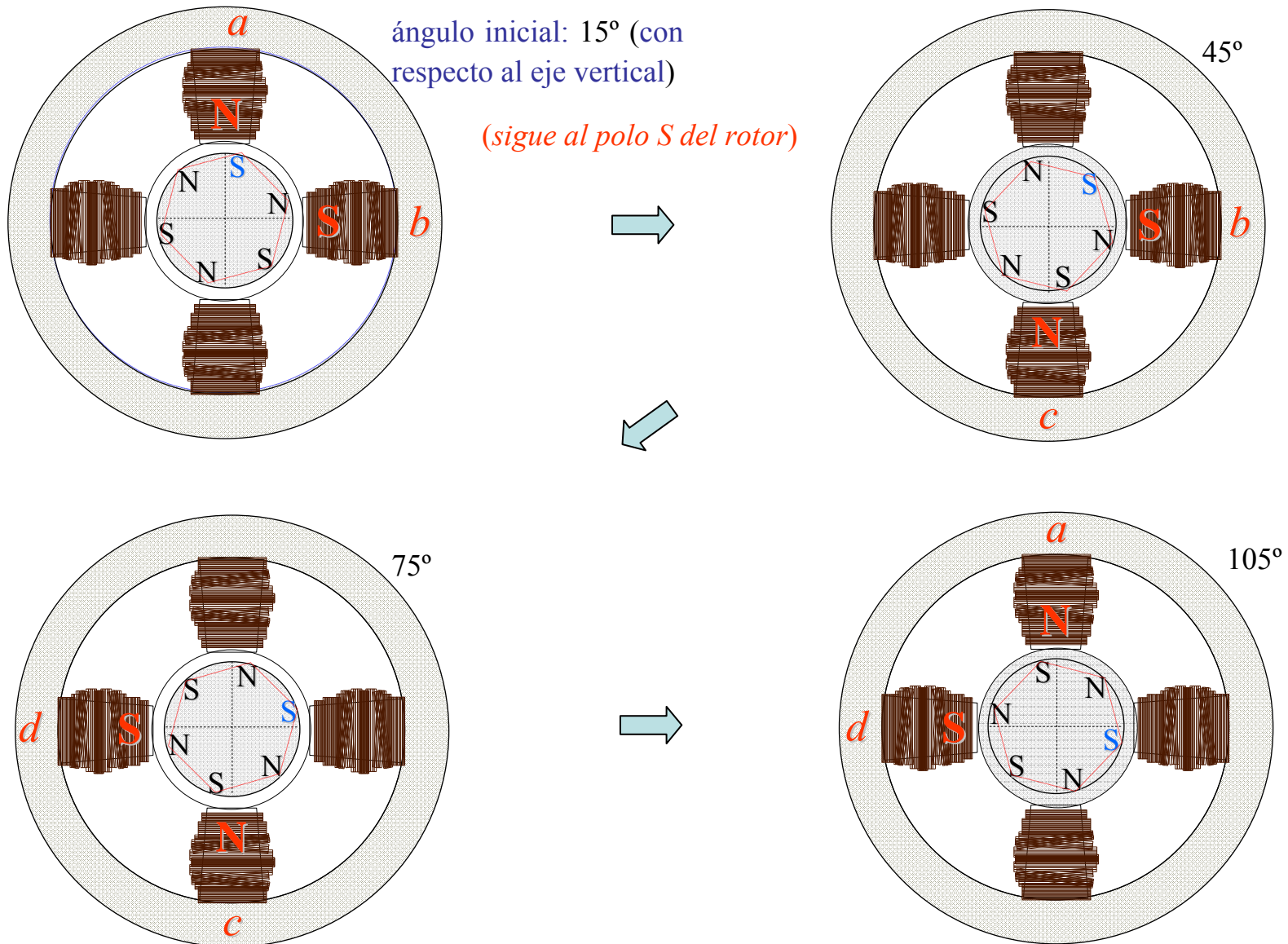
- *Ejemplo:* en un motor con 12 pasos como el indicado en la diapositiva anterior, para que el rotor realice un giro de  $360^\circ$  es necesario aplicar la siguiente secuencia de conexiones a masa de los devanados *a*, *b*, *c*, y *d*:



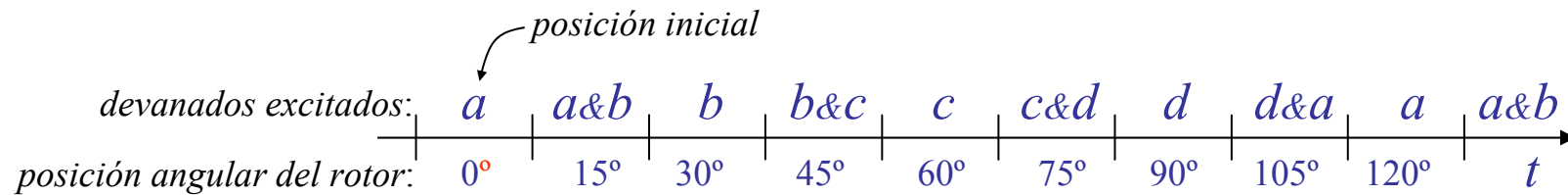
- Se puede conseguir que un motor unipolar genere un par de giro superior al par nominal excitando los devanados de dos en dos, tal como se muestra en el ejemplo indicado en la siguiente diapositiva (Nota: las posiciones estáticas del rotor no son las mismas que en el caso de que los devanados se exciten de uno en uno, aunque el ángulo de paso sí es el mismo)



*Ejemplo de realización de un giro de 90° excitando los devanados de dos en dos (full step):*



- Se puede conseguir que el rotor realice giros de *medio paso (half step)* alternando la excitación individual y por parejas de los devanados. En este caso, hay que tener presente que el par creado por el motor no es constante.



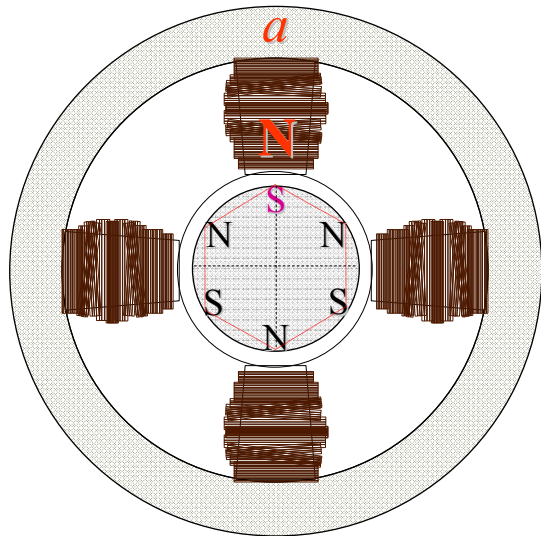
(ver ejemplo en la siguiente diapositiva)



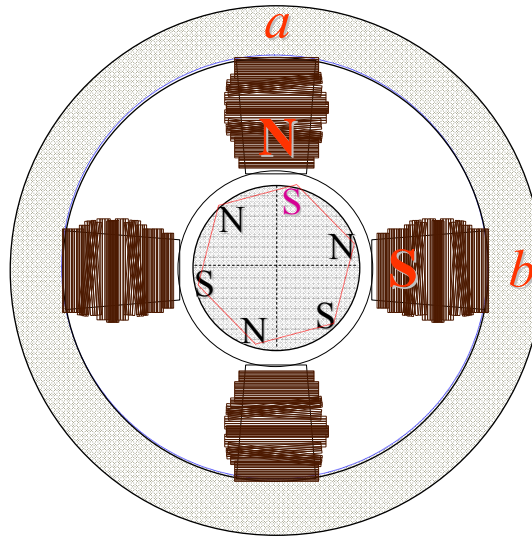
Ejemplo de giro de  $75^\circ$  utilizando *medios pasos* (half steps):

(sigue al polo *S* del rotor)

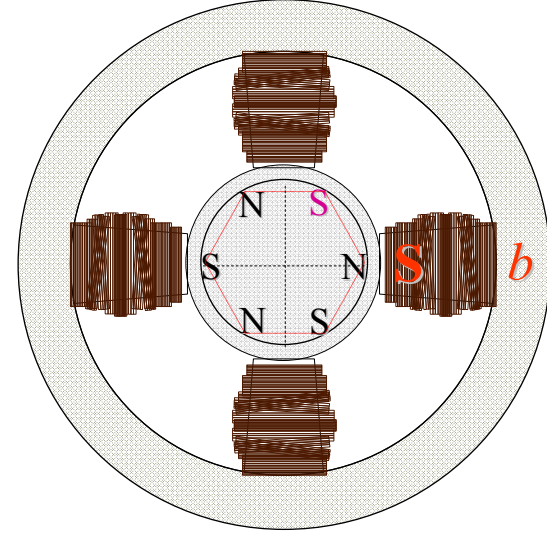
ángulo inicial:  $0^\circ$



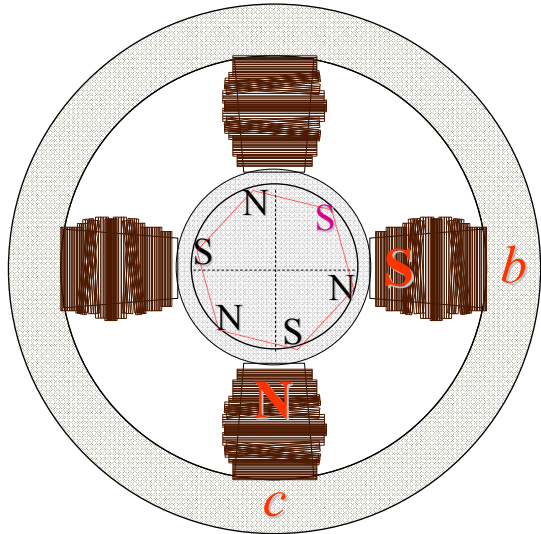
ángulo girado:  $15^\circ$



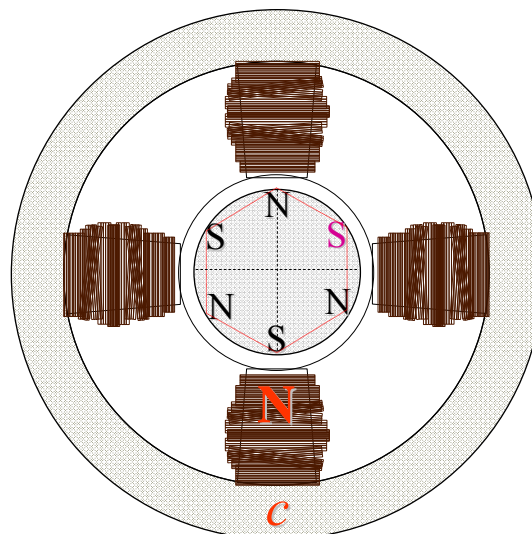
ángulo girado:  $30^\circ$



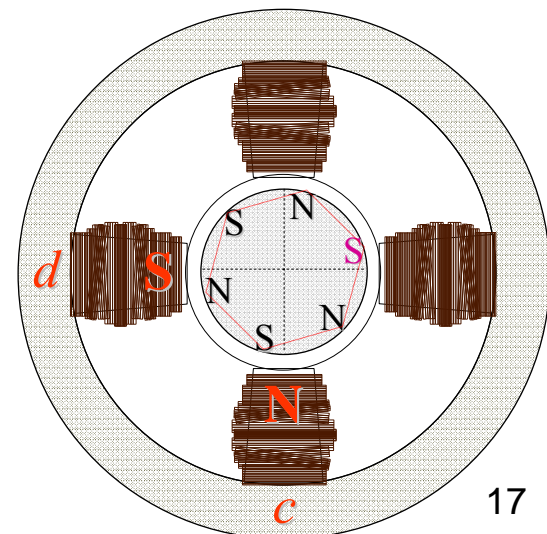
ángulo girado:  $45^\circ$



ángulo girado:  $60^\circ$



ángulo girado:  $75^\circ$

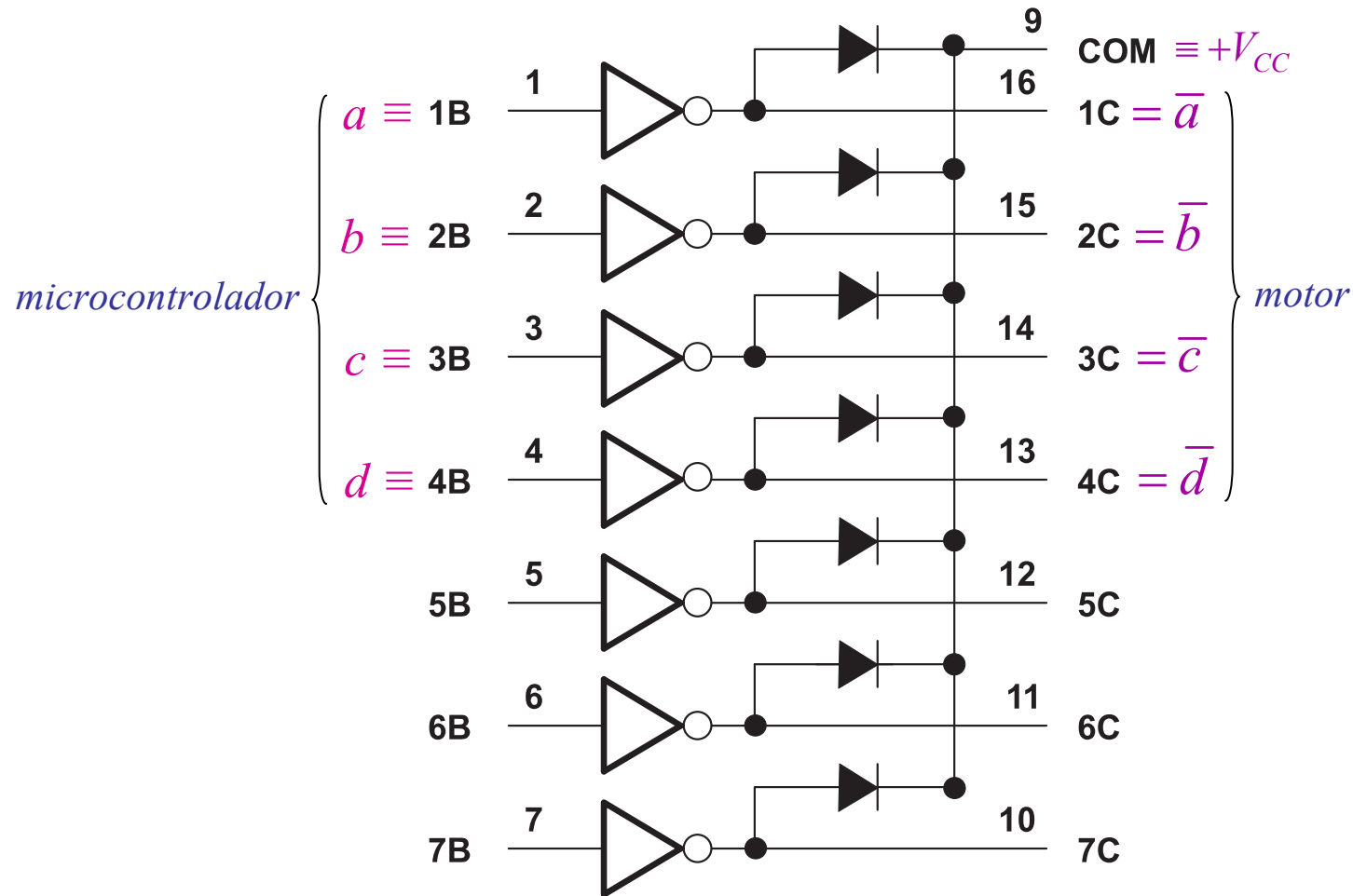


- Para conseguir que un motor paso a paso realice giros (*pasos*) más pequeños de lo que corresponde al número de bobinas de su estátor y al número de pares de polos de su rotor se utilizan las siguientes soluciones (o una combinación de las mismas):

1º: Utilizar engranajes.

2º: Controlar electrónicamente la corriente que circula por los devanados (*microsteps*)

Circuito integrado para alimentar un motor *paso a paso unipolar*: ULN2003A



Nota: con un 1 en una entrada del ULN2003A, la correspondiente salida se pone a masa. Mientras que con un 0, la salida se pone en un estado de alta impedancia.

- Ventajas de los motores paso a paso:

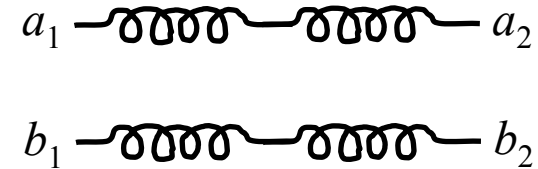
- \_ Son motores de bajo coste
- \_ Son robustos (es difícil que se averíen). No requieren mantenimiento
- \_ Su estructura es sencilla (son fáciles de construir)

Inconvenientes:

- \_ Es necesario utilizar un circuito electrónico para controlar su funcionamiento
- \_ La corriente que circula por los devanados es mayor que en el caso de un motor de corriente continua
- \_ A 'altas' velocidades de giro, el par que crean es menor

Motores paso a paso *bipolares* de imanes permanentes:

- El *rotor* está formado por imanes permanentes, mientras que el *estátor* está formado por 4 bobinas, unidas dos a dos, sin toma central (ver figura de la derecha). Lo que hace que los motores bipolares sólo tengan 4 hilos ( $a_1, a_2, b_1, b_2$ ).



- A diferencia de lo que ocurre en los motores unipolares, en los motores bipolares puede circular corriente por los devanados en ambos sentidos (cada una de las 4 bobinas puede crear tanto un polo N como un polo S... de ahí su nombre).
- Según la polaridad de la tensión aplicada a una pareja de bobinas (terminales  $a_1-a_2$  o bien terminales  $b_1-b_2$ ), una de las bobinas excitadas crea un polo *N* mientras que la otra crea un polo *S*. Esto hace que el rotor se vea atraído por dos polos, y por lo tanto la fuerza que se ejerce sobre el rotor es mayor que en el caso de un motor unipolar ( $\equiv$  *un motor bipolar crea un par mayor que el que crea un motor unipolar del mismo tamaño*)

- Independientemente del número de pares de polos magnéticos que tenga el *rotor* y del número de bobinas (**en paralelo**) que tenga el *estátor*, todos los *motores bipolares* se controlan aplicando la tensión de alimentación con una polaridad o con la contraria a los terminales  $a_1$ - $a_2$  /  $b_1$ - $b_2$ , siguiendo una secuencia determinada en el tiempo.

Nota: el circuito de excitación de un motor *bipolar* es un poco más complicado que el circuito de excitación de un motor *unipolar* (un motor bipolar requiere el uso de dos puentes para excitar los devanados con ambas polaridades). Entre los circuitos integrados disponibles en el mercado cabe destacar:

- \_ L298

- \_ A3967SLB

- \_ A5976, A5977 and A5979 have been designed to operate bipolar stepper motors in full-, half-, quarter-, eight-, (A5977) and sixteenth- (A5976/79) step modes;

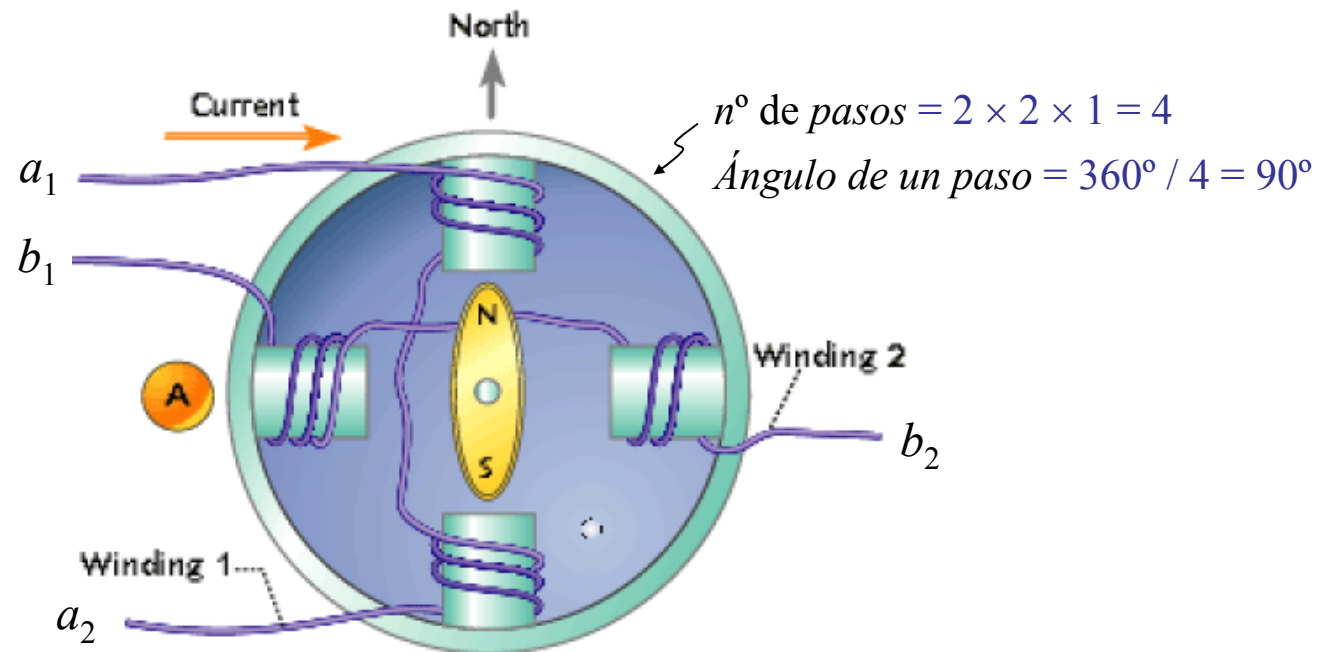
- \_ ver AN235 de ST

- El *número de pasos* de un *motor bipolar* cumple lo siguiente:

$$n^{\circ} \text{ de pasos} = 2 \times n^{\circ} \text{ de pares de bobinas del estátor} \times n^{\circ} \text{ de pares de polos del rotor}$$

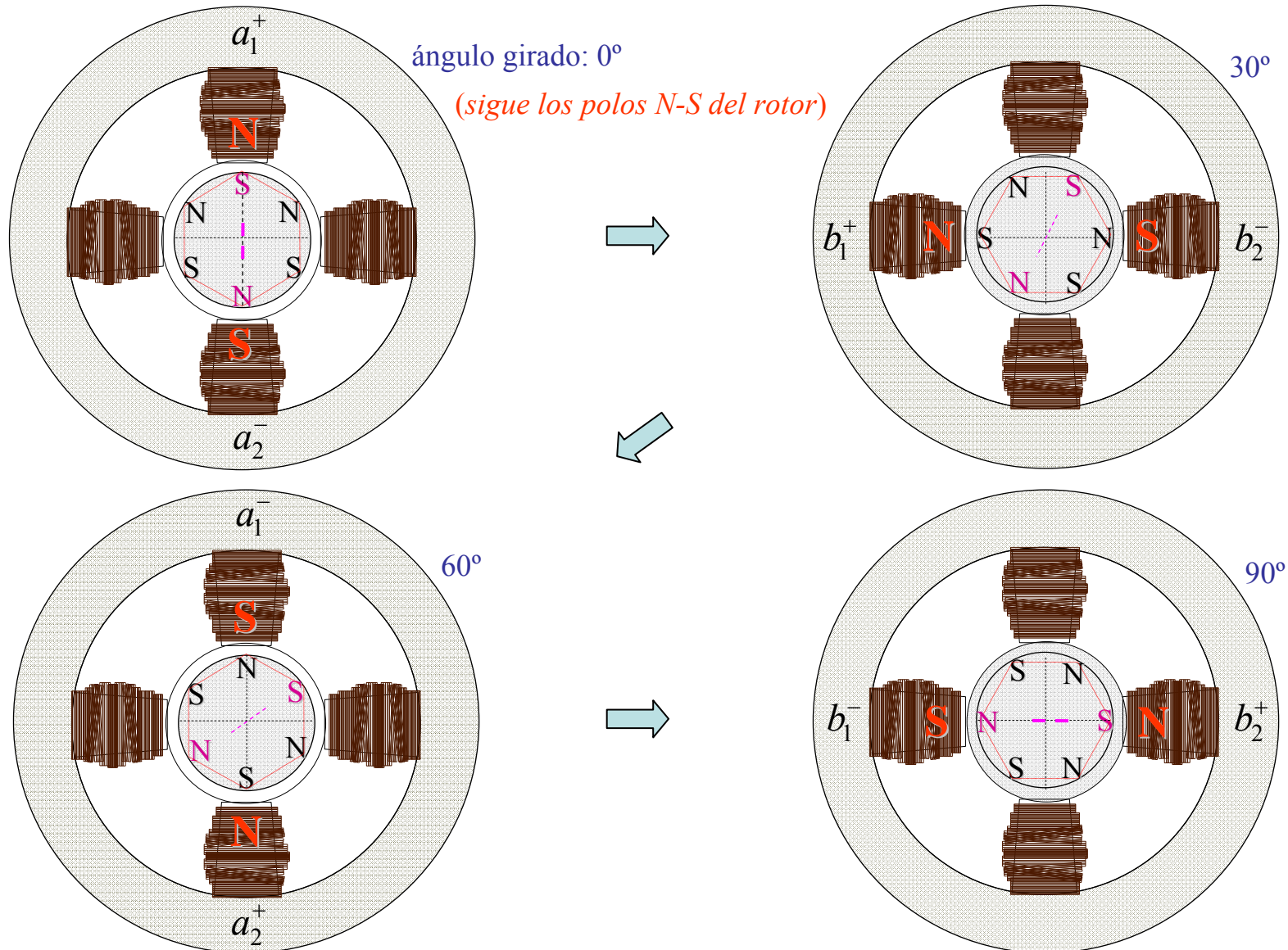
siendo el *ángulo de un paso* =  $360^{\circ} / n^{\circ} \text{ de pasos}$

*Nota: cuanto mayor sea el número de pares de bobinas que tenga el estator y/o mayor sea el número de pares de polos del rotor, más pequeños serán los pasos del motor.*





*Ejemplo:* en un motor bipolar, con un rotor con 3 pares de polos y con un estátor con 2 pares de bobinas, la secuencia de alimentación de las parejas de devanados  $a_1$ - $a_2$  y  $b_1$ - $b_2$  para que dé 3 pasos (gire  $3 \times 30^\circ = 90^\circ$ ) es la siguiente (*full step*):





- *Ejemplo:* en un motor con 12 pasos como el indicado en la diapositiva anterior, para que el rotor realice un giro de  $310^\circ$  es necesario aplicar la siguiente secuencia de excitación de los devanados  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ : (secuencia de excitación que minimiza el consumo de energía)

excitación devanados      posición angular del rotor

$a_1^+$ $a_2^-$ –    –	$0^\circ$
–    – $b_1^+$ $b_2^-$	$+30^\circ$
$a_1^-$ $a_2^+$ –    –	$+60^\circ$
–    – $b_1^-$ $b_2^+$	$+90^\circ$
$a_1^+$ $a_2^-$ –    –	$+120^\circ$
–    – $b_1^+$ $b_2^-$	$+150^\circ$
$a_1^-$ $a_2^+$ –    –	$+180^\circ$
–    – $b_1^-$ $b_2^+$	$+210^\circ$
$a_1^+$ $a_2^-$ –    –	$+220^\circ$
–    – $b_1^+$ $b_2^-$	$+250^\circ$
$a_1^-$ $a_2^+$ –    –	$+280^\circ$
–    – $b_1^-$ $b_2^+$	$+310^\circ$

### Nomenclatura:

$a_1^+$ : se conecta el terminal  $a_1$  al terminal positivo de la fuente de alimentación

$a_1^-$ : se conecta el terminal  $a_1$  al terminal negativo de la fuente de alimentación

– : se deja el correspondiente terminal sin conectarlo a nada.

- Se puede conseguir que un motor bipolar genere un par superior al par nominal excitando todos los devanados a la vez, tal como se indica a continuación:  
(secuencia de excitación que maximiza el par generado)

excitación devanados      posición angular del rotor

$a_1^+ a_2^- b_1^- b_2^+$	+15°
$a_1^+ a_2^- b_1^+ b_2^-$	+45°
$a_1^- a_2^+ b_1^+ b_2^-$	+75°
$a_1^- a_2^+ b_1^- b_2^+$	+105°
$a_1^+ a_2^- b_1^- b_2^+$	+135°
$a_1^+ a_2^- b_1^+ b_2^-$	+165°
$a_1^- a_2^+ b_1^+ b_2^-$	+195°
$a_1^- a_2^+ b_1^- b_2^+$	+225°
$a_1^+ a_2^- b_1^- b_2^+$	+255°
$a_1^+ a_2^- b_1^+ b_2^-$	+285°
$a_1^- a_2^+ b_1^+ b_2^-$	+315°
$a_1^- a_2^+ b_1^- b_2^+$	+345°

$t$

### Nomenclatura:

$a_1^+$ : se conecta el terminal  $a_1$  al terminal positivo de la fuente de alimentación

$a_1^-$ : se conecta el terminal  $a_1$  al terminal negativo de la fuente de alimentación

Nota: las posiciones estáticas del rotor no son las mismas que en el caso de que las parejas de devanados se exciten de una en una.

- Se puede conseguir que un motor bipolar dé *medios pasos (half steps)* alternando la excitación de 2 devanados con la excitación de los 4 devanados, tal como se indica en el siguiente ejemplo:

excitación devanados      posición angular del rotor

$a_1^+ a_2^- - -$	$0^\circ$
$a_1^+ a_2^- b_1^+ b_2^-$	$+15^\circ$
$- - b_1^+ b_2^-$	$+30^\circ$
$a_1^- a_2^+ b_1^+ b_2^-$	$+45^\circ$
$a_1^- a_2^+ - -$	$+60^\circ$
$a_1^- a_2^+ b_1^- b_2^+$	$+75^\circ$
$- - b_1^- b_2^+$	$+90^\circ$
$a_1^+ a_2^- b_1^- b_2^+$	$+105^\circ$
$a_1^+ a_2^- - -$	$+120^\circ$
$a_1^+ a_2^- b_1^+ b_2^-$	$+135^\circ$
$- - b_1^+ b_2^-$	$+150^\circ$
$a_1^- a_2^+ b_1^+ b_2^-$	$+165^\circ$

$t$

### Nomenclatura:

$a_1^+$ : se conecta el terminal  $a_1$  al terminal positivo de la fuente de alimentación

$a_1^-$ : se conecta el terminal  $a_1$  al terminal negativo de la fuente de alimentación

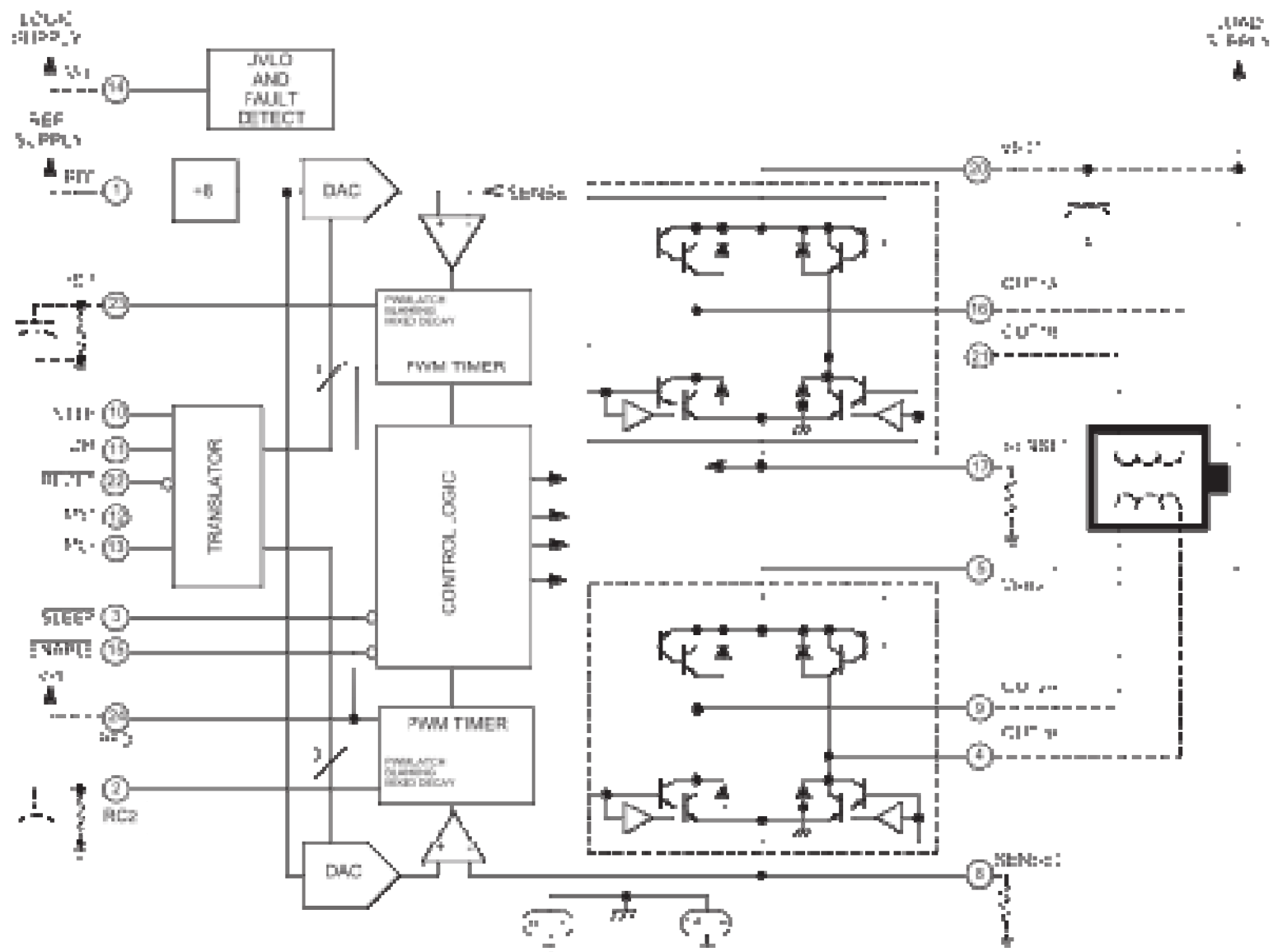
$-$ : se deja el correspondiente terminal sin conectarlo a nada.

Nota: el par generado no es constante. (cuando se excitan todos los devanados el par es mayor).

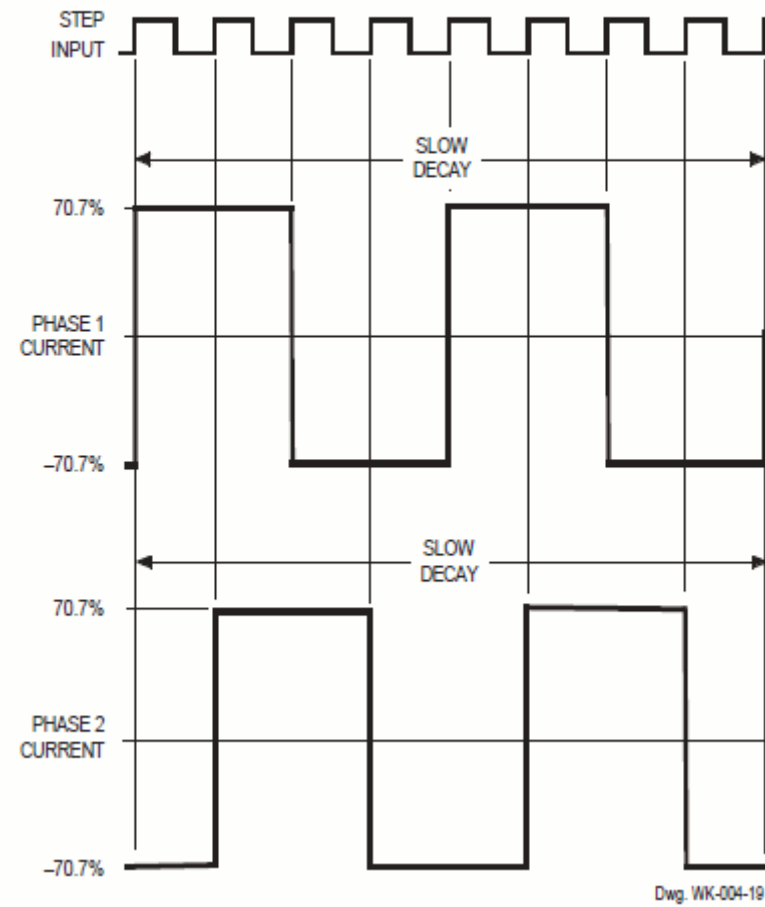
*Comentario:* hoy en día se dispone de circuitos integrados que permiten controlar un motor bipolar de forma muy sencilla. Así, por ejemplo, el circuito A3967SLB dispone de las siguientes entradas para controlar un motor bipolar:

- **STEP:** cada vez que a esta entrada se le aplica un pulso  $\geq 2\mu\text{seg}$ , el rotor gira un ángulo de tamaño 1 step, 1/2 step, 1/4 step o 1/8 step (de acuerdo con los valores aplicados a las entradas MS1 y MS2)
- **DIR:** establece el sentido de giro del rotor
- **MS1 y MS2:** establecen el tamaño del ángulo girado
- **Vcc**  $\in [3.0\text{V}, 5.5\text{V}]$
- Este integrado puede alimentar motores de 30V,  $\pm 750\text{ mA}$

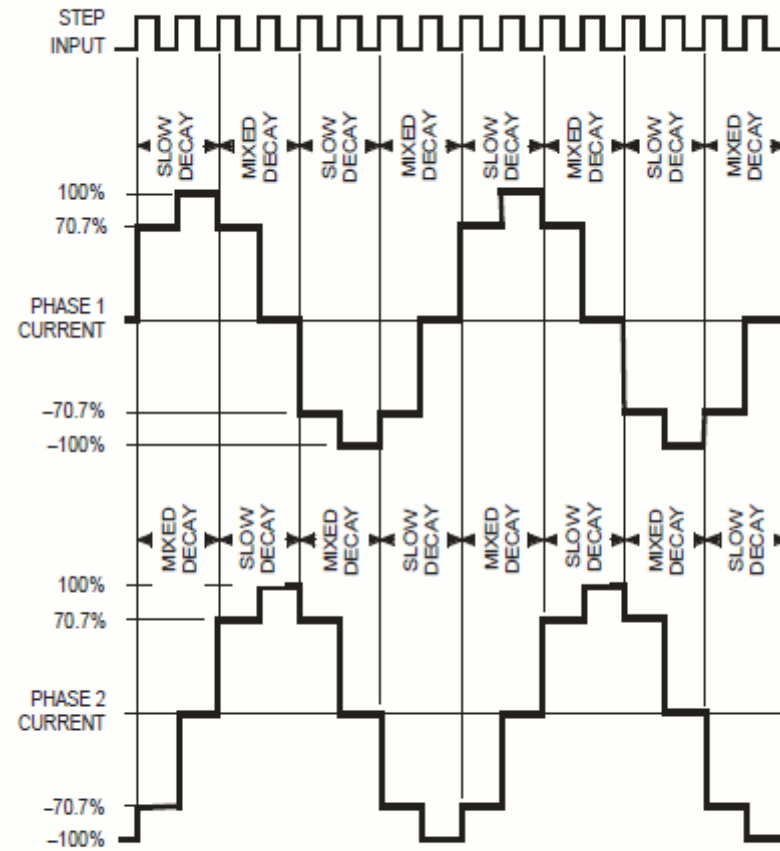
*Pregunta:* ¿crees que es posible utilizar un motor *unipolar* como si fuese un motor *bipolar*?



**Full Step Operation**  
 $MS_1 = MS_2 = L$ ,  $DIR = H$

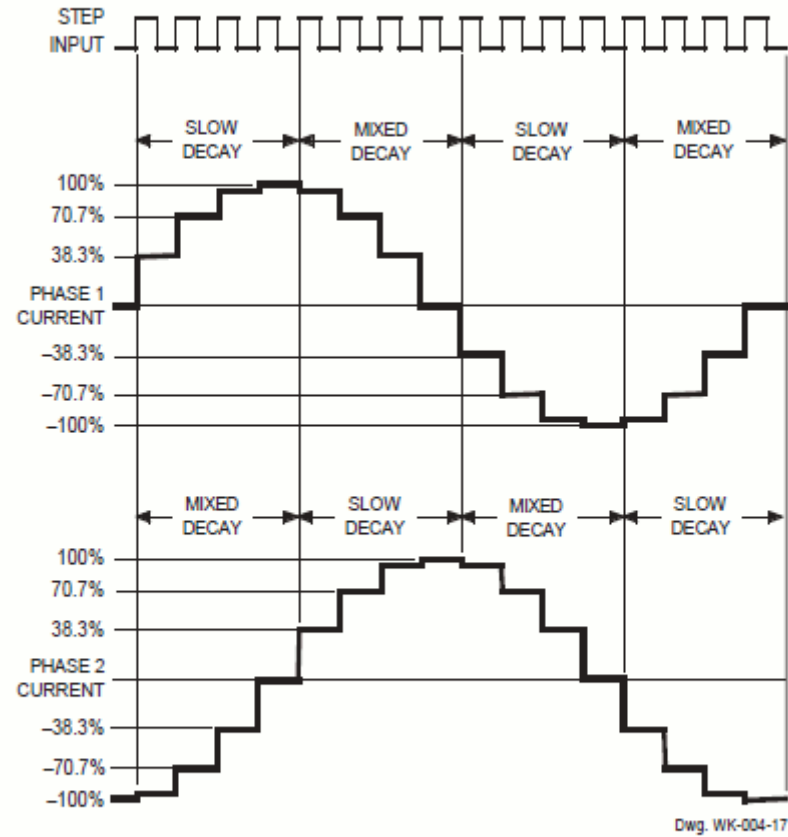


### Half Step Operation MS<sub>1</sub> = H, MS<sub>2</sub> = L, DIR = H



The mixed-decay mode is controlled by the percent fast decay voltage ( $V_{PFD}$ ). If the voltage at the PFD input is greater than  $0.6V_{CC}$  then slow-decay mode is selected. If the voltage on the PFD input is less than  $0.21V_{CC}$  then fast-decay mode is selected. Mixed decay is between these two levels.

**Quarter Step Operation**  
 $MS_1 = L, MS_2 = H, DIR = H$

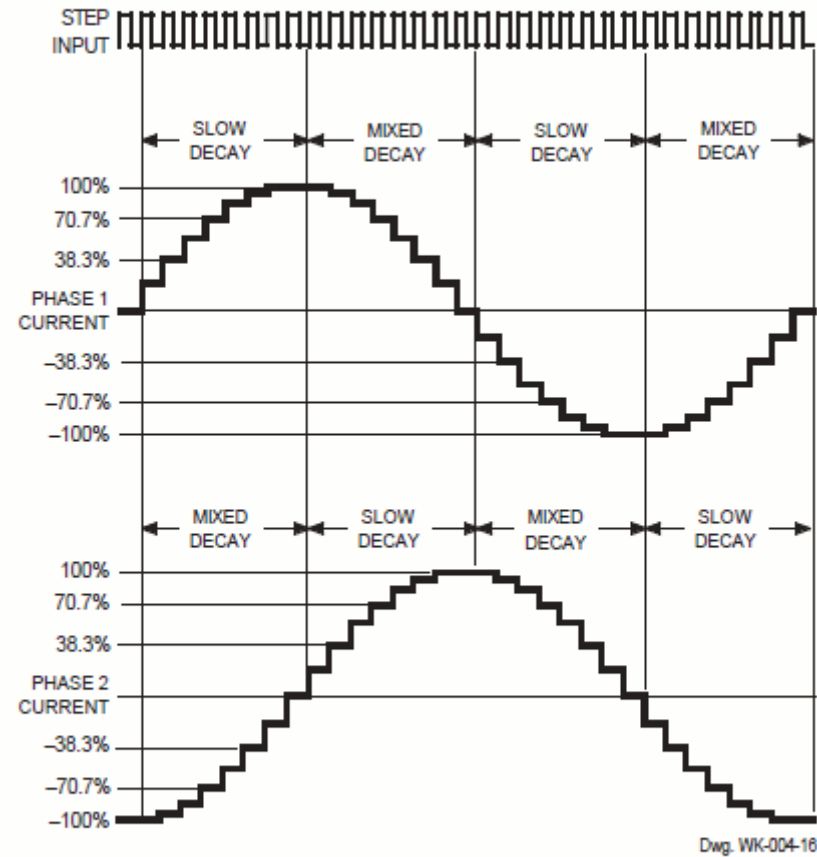


The mixed-decay mode is controlled by the percent fast decay voltage ( $V_{PFD}$ ). If the voltage at the PFD input is greater than  $0.6V_{CC}$  then slow-decay mode is selected. If the voltage on the PFD input is less than  $0.21V_{CC}$  then fast-decay mode is selected. Mixed decay is between these two levels.



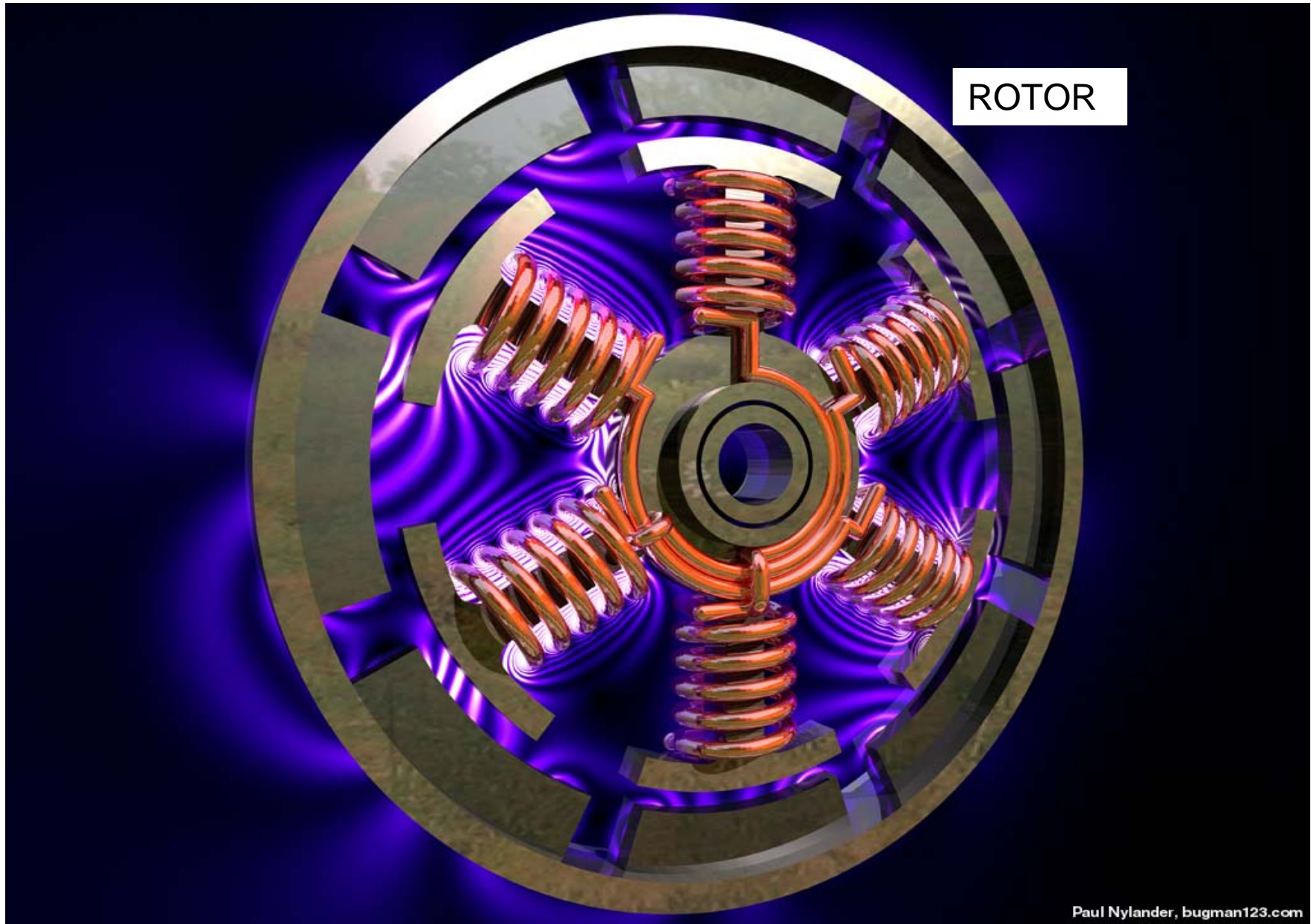
### 8 Microstep/Step Operation

$MS_1 = MS_2 = H$ ,  $DIR = H$

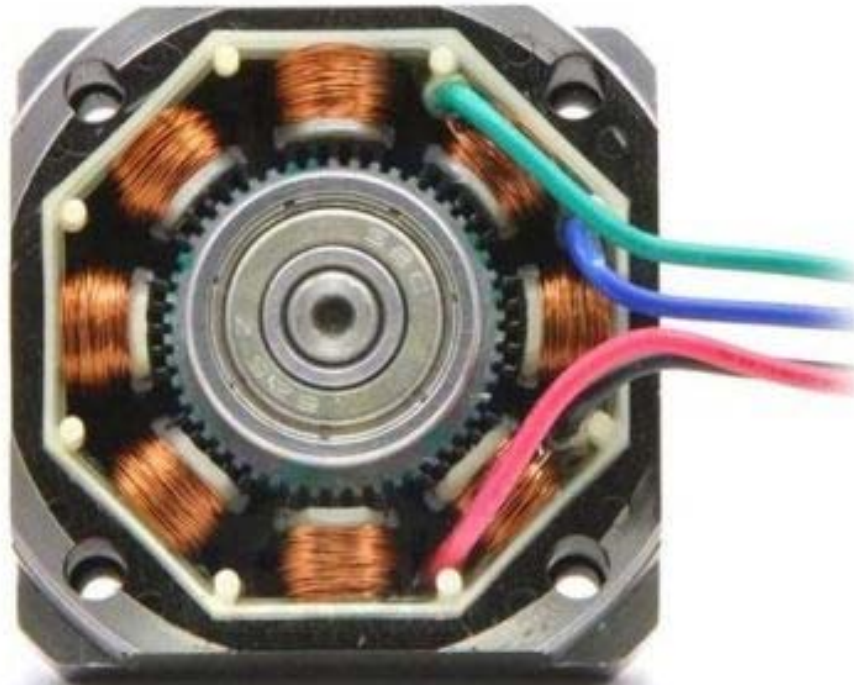


The mixed-decay mode is controlled by the percent fast decay voltage ( $V_{PFD}$ ). If the voltage at the PFD input is greater than  $0.6V_{CC}$  then slow-decay mode is selected. If the voltage on the PFD input is less than  $0.21V_{CC}$  then fast-decay mode is selected. Mixed decay is between these two levels.

<b>MS<sub>1</sub></b>	<b>MS<sub>2</sub></b>	<b>Resolution</b>
L	L	Full step (2 phase)
H	L	Half step
L	H	Quarter step
H	H	Eighth step



ROTOR



[www.pololu.com](http://www.pololu.com)