

# **Actuadores para robótica**

## Índice

1.	Introducción .....	1
2.	Actuadores eléctricos .....	1
2.1.	Motores eléctricos .....	2
2.1.1.	Motores de corriente continua .....	2
2.1.1.1.	Control de la velocidad .....	4
2.1.1.2.	Modulación de anchura de pulso (PWM) .....	4
2.1.2.	Servomotores .....	5
2.1.2.1.	Funcionamiento interno de un servomotor .....	5
2.1.3.	Motores paso a paso.....	7
3.	Actuadores electromecánicos.....	8
3.1.	Solenoides.....	8
3.2.	Relés .....	8
3.3.	Contactores .....	8
3.4.	Electroválvulas .....	8

## 1. Introducción

Los actuadores tienen por misión generar el movimiento de los elementos del robot según las órdenes dadas por la unidad de control que recibe datos de los sensores acoplados al sistema.

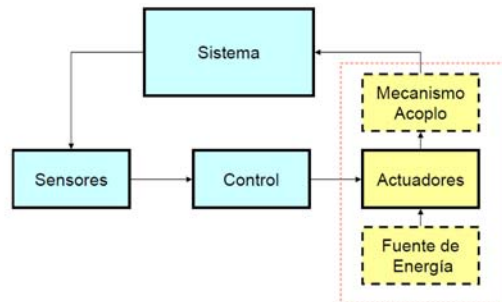


Figura 1. Partes de un motor controlado

Los actuadores utilizados en robótica pueden emplear energía **neumática**, **hidráulica** o **eléctrica**. Cada uno de estos sistemas presenta características diferentes que hay que evaluar a la hora de seleccionar el tipo de actuador más conveniente.

Las características más interesantes en un actuador son: potencia; controlabilidad; peso y volumen; precisión; velocidad; mantenimiento y coste.

En este capítulo nos centraremos en los actuadores eléctricos, que son los más usados en robótica.

## 2. Actuadores eléctricos

Un actuador eléctrico es un transductor que convierte la energía eléctrica en mecánica. Existen muchos tipos de actuadores eléctricos (ver Figura 2).

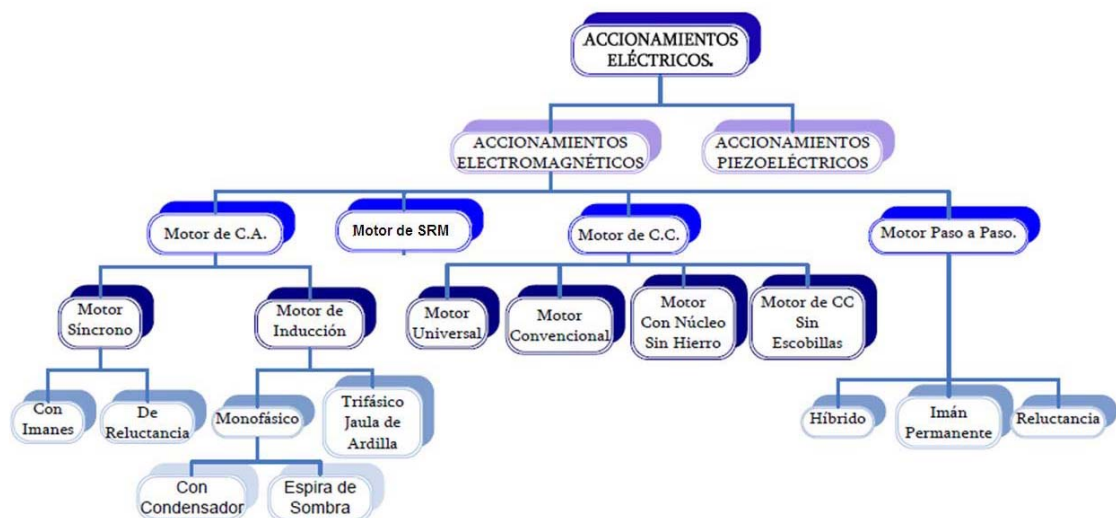


Figura 2. Clasificación de actuadores eléctricos

## 2.1.Motores eléctricos

Las características de control, sencillez y precisión de los accionamientos eléctricos han hecho que sean los más usados en los robots industriales actuales. Dentro de los actuadores eléctricos pueden distinguirse tres tipos diferentes:

- Motores de corriente continua (DC)
- Controlados por inducido
- Controlados por excitación
- Motores paso a paso.
- Motores de corriente alterna (AC)
- Síncronos
- Asíncronos

En este curso vamos a estudiar solamente los motores eléctricos de corriente continua, por ser los más comunes y los de más fácil controlabilidad. Los motores de corriente continua se suelen utilizar de dos formas:

- Controlados por velocidad. Sólo se requiere una fuente de alimentación variable. Para que pueda ser controlado en lazo cerrado debe incluir un encoder para la medida de la velocidad, que será utilizada por el sistema de control para la realimentación.
- Controlados por posición. Además del motor, se requiere un encoder para la medida de la posición, un sistema de control y acondicionadores de señal. Al conjunto se le denomina servomotor.

### 2.1.1. Motores de corriente continua

Son los más usados en la actualidad debido a su *facilidad de control*. Los motores de corriente continua (CC o DC) están constituidos por dos devanados internos, **inductor** e **inducido**, que se alimentan con corriente continua.

**Estator (stator):** es la parte fija y normalmente soporta los materiales que crean el campo magnético. Puede contener imanes permanentes o bobinados

**Bobina inductora (field coil):** parte del stator responsable de generar el flujo magnético

**Rotor:** es la parte giratoria. Puede tener imanes permanentes o bobinados dentro de un material ferromagnético para generar el campo de armadura que interactúa con el campo del stator para producir el par de giro

**Armadura:** es el bobinado situado en el rotor que lleva la corriente e induce el campo magnético del rotor

**Escobilla (brush):** son las partes del motor por las que entra la corriente en la armadura (rotor).

**Conmutador:** es la parte del rotor que está en contacto con las escobillas y se utiliza para controlar la dirección de la corriente de armadura. De esta forma se asegura que el flujo creado por esta corriente siempre tiene la misma dirección. En los motores *brushless* DC y en los motores paso a paso la conmutación se realiza de forma electrónica con transistores

Tabla 1 Terminología usada en motores DC

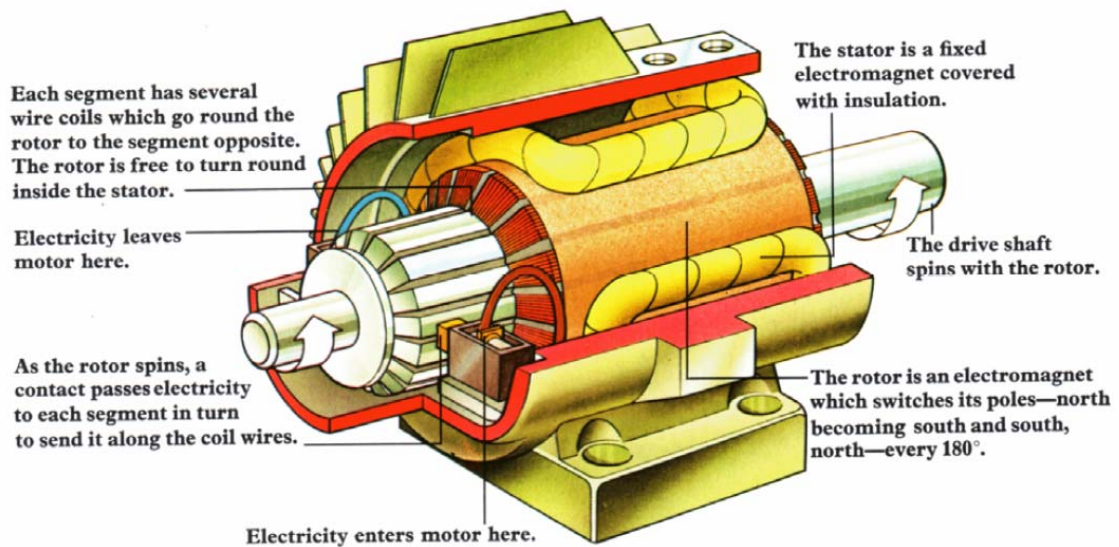


Figura 3. Partes de un motor DC

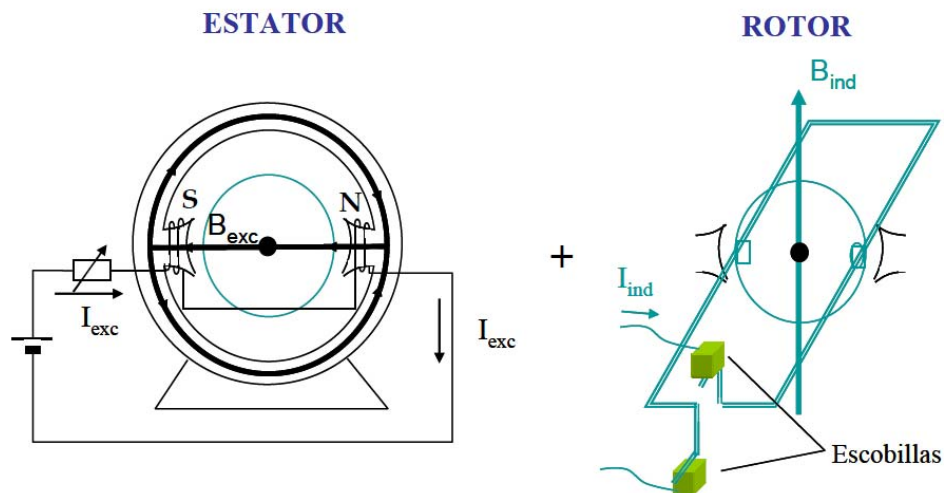


Figura 4. Funcionamiento electromagnético del stator y del rotor

- El inductor, o devanado de excitación, está situado en el **estator** y crea un campo magnético de dirección fija, denominado de **excitación**.
- El inducido, situado en el **rotor**, gira debido a la fuerza de Lorentz que aparece como combinación de la corriente circulante por él y del campo magnético de excitación. Recibe la corriente del exterior a través del **colector de delgas**, en el que se apoyan unas **escobillas** de grafito.



Figura 5 Rotor bobinado y colector de delgas.

### 2.1.1.1. Control de la velocidad

Al aumentar la tensión del inducido aumenta la velocidad del rotor. Pero con tensiones pequeñas (a velocidades pequeñas) el motor pierde potencia.

Si el motor está alimentado a tensión constante, se puede aumentar la velocidad disminuyendo el flujo de excitación. Pero cuanto más débil sea el flujo, menor será el par motor que se puede desarrollar para una intensidad de inducido constante.

En los motores *controlados por excitación* se mantiene constante la tensión del inducido mientras que la intensidad del inductor se utiliza para controlar la velocidad de giro.

En el caso de *control por inducido*, la intensidad del inductor se mantiene constante, mientras que la tensión del inducido se utiliza para controlar la velocidad de giro. En los motores controlados por inducido se produce un efecto estabilizador de la velocidad de giro originado por la realimentación intrínseca que posee a través de la fuerza contra-electromotriz. Por estos motivos, de los dos tipos de motores DC es el controlado por inducido el que se usa en el accionamiento de robots.

Para mejorar el comportamiento de este tipo de motores, el campo de excitación se genera mediante imanes permanentes (de aleaciones especiales como samario-cobalto), con lo que se evitan fluctuaciones del mismo. Las velocidades de rotación que se consiguen con estos motores son del orden de 1000 a 3000 r.p.m., con un comportamiento muy lineal y bajas constantes de tiempo. Las potencias que pueden manejar pueden llegar a los 10 Kw

Como se ha indicado, los motores DC son controlados mediante referencias de velocidad. Éstas normalmente son seguidas mediante un bucle de realimentación de velocidad analógico que se cierra mediante una electrónica específica (accionador del motor). Sobre este bucle de velocidad se coloca otro de posición, en el que las referencias son generadas por la unidad de control (microprocesador) en base al error entre la posición deseada y la real.

El motor de corriente continua presenta el inconveniente del obligado *mantenimiento de las escobillas*. Por otra parte, no es posible mantener el par con el rotor parado más de unos segundos, debido a los calentamientos que se producen en el colector. Para evitar estos problemas, se han desarrollado en los últimos años **motores sin escobillas** (*brushless*). En éstos, los imanes de excitación se sitúan en el rotor y el devanado de inducido en el estator.

### 2.1.1.2. Modulación de anchura de pulso (PWM)

La **modulación por anchura de pulso (PWM, pulse-width modulation)** de una señal es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica, ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga.

El ciclo de trabajo de una señal periódica es el ancho relativo de su parte positiva en relación con el período.

Expresado matemáticamente:

$$D = \tau / T$$

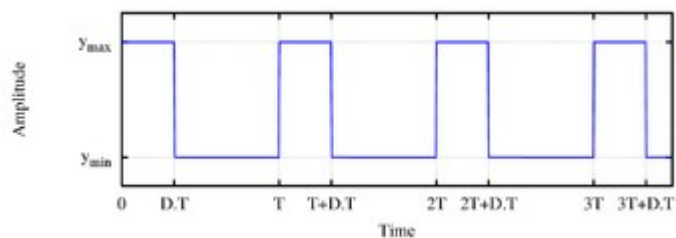
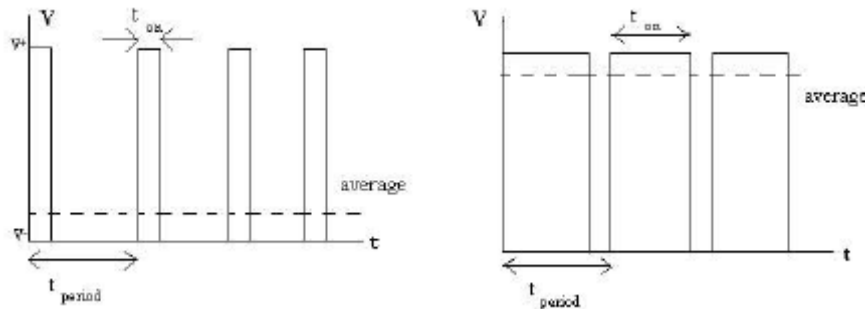


Figura 6 Señal de onda cuadrada de amplitud acotada mostrando el ciclo de trabajo D.

- $D$ : ciclo de trabajo
- $\tau$ : tiempo en que la función es positiva (ancho del pulso)
- $T$ : período de la función

La principal desventaja que presentan los circuitos PWM es la posibilidad de que haya interferencias generadas por radiofrecuencia. Éstas pueden minimizarse ubicando el controlador cerca de la carga y realizando un filtrado de la fuente de alimentación.



**Figura 8 Relación tensión de salida/anchura de pulso**

La Regulación por Ancho de Pulso se usa para controlar la velocidad de motores de corriente continua. Permite controlar la duración  $t$  de los pulsos a la tensión nominal  $V$ . El resto del tiempo, hasta completar el periodo  $T$ , la tensión es 0. De este modo, mantiene el par motor constante y no supone un desaprovechamiento de la energía eléctrica. Al recortar tensión de alimentación en forma de onda cuadrada, la energía que recibe el motor varía de manera proporcional a la relación al periodo de la onda cuadrada. Controlando esta relación se logra variar la velocidad del motor sin que pierda par.

## 2.1.2. Servomotores

Un servomotor es un dispositivo que dispone de: un motor eléctrico con reductor y un circuito electrónico, mediante los cuales puede girar su eje de salida un cierto ángulo  $\alpha$  en base a una señal  $S$  de control generada externamente.

Típicamente, la señal de control que se utiliza para posicionar el servo es un pulso de entre 0.5 ms y 2.5 ms de duración, que se repite cada 20 ms aproximadamente, y se genera mediante PWM. Si se sobrepasa el ancho del pulso el servomotor se bloquea aumenta el consumo y puede llegar a quemarse. Estos valores tienen cierta tolerancia. Para obtener los valores exactos para cada unidad es necesario realizar medidas con ella.

### 2.1.2.1. Funcionamiento interno de un servomotor

La señal de control se transforma en continua y se compara con la señal que llega desde el potenciómetro conectado al eje de salida. A la diferencia entre las dos tensiones se le denomina error. El amplificador da una tensión proporcional al error: si éste es 0, la amplificación será 0 y el motor no se moverá. Si el error es positivo, el motor girará en una dirección a velocidad proporcional al error, hasta que éste sea 0. Si el error es negativo, hará lo mismo en dirección contraria (Ver Figura ).



La anchura del pulso determina la posición o giro del servomotor

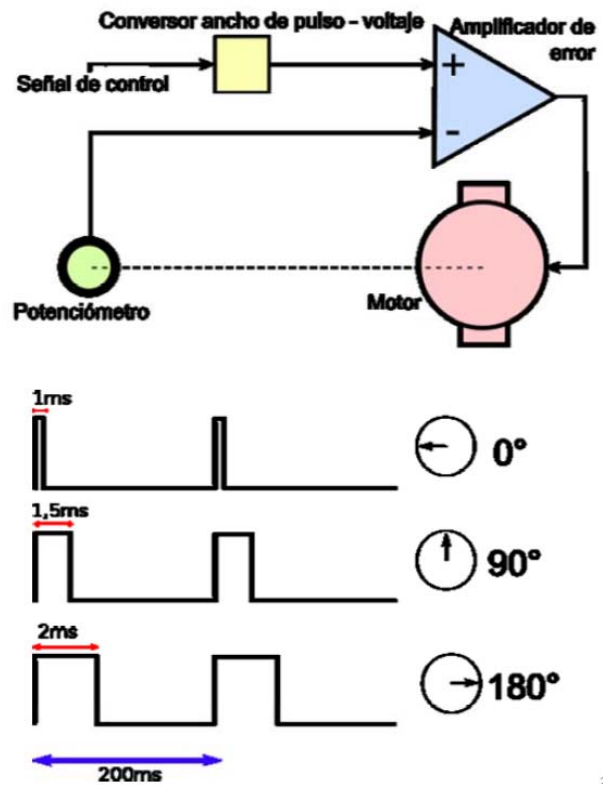


Figura 9 Sevomotor de modelismo

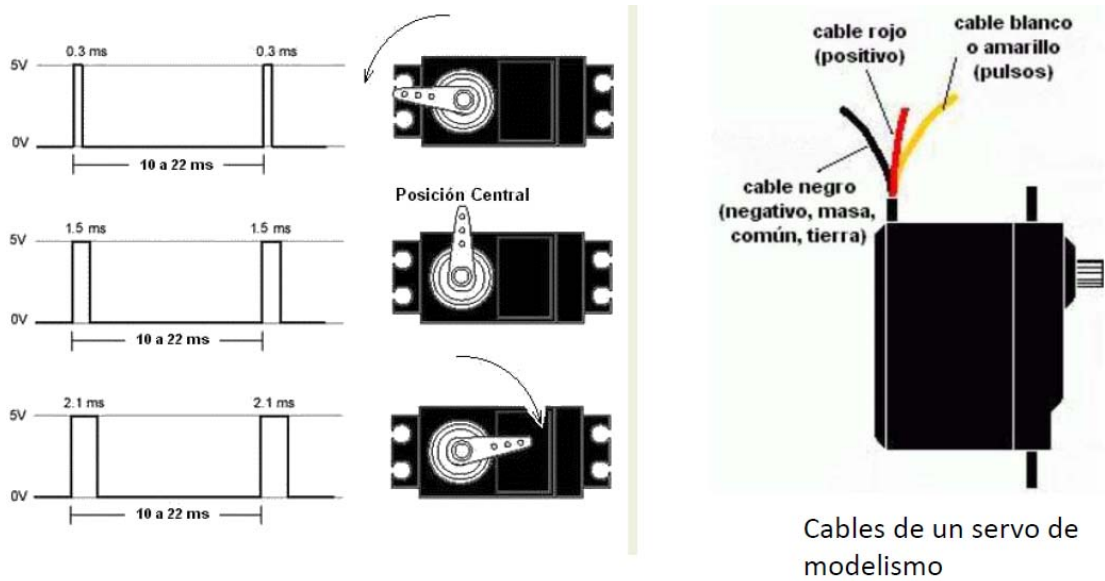


Figura 10 . Relación entre ancho de pulso y ángulo girado



### 2.1.3. Motores paso a paso

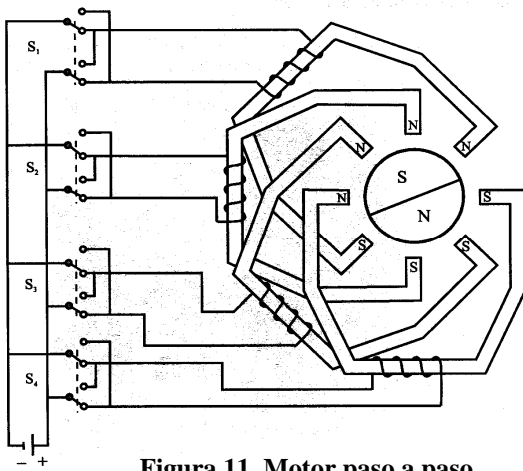


Figura 11. Motor paso a paso.

Hasta hace poco no se habían usado motores paso a paso en accionamientos industriales debido principalmente a que su *pequeño par* y a que los pasos *entre posiciones consecutivas eran grandes*, lo que limitaba su aplicación a controles de posición simples. En los últimos años se han mejorado notablemente sus características técnicas, especialmente en lo relativo a su control, lo que ha permitido fabricar motores paso a paso capaces de desarrollar pares suficientes en pequeños pasos para su uso como accionamientos industriales.

En los motores paso a paso más comunes (de imanes permanentes) el rotor, con polarización magnética constante, gira para orientar sus polos de acuerdo al campo magnético creado por las fases del estator.

La señal de control son trenes de pulsos que van actuando rotativamente sobre una serie de electroimanes dispuestos en el estator. Por cada pulso recibido, el rotor del motor gira un ángulo discreto.

Para conseguir el giro del rotor en un determinado número de grados, las bobinas del estator deben ser excitadas secuencialmente a una frecuencia que determina la velocidad de giro. Las inercias propias del arranque y parada (aumentadas por las fuerzas magnéticas en equilibrio que se dan cuando está parado) impiden que el rotor alcance la velocidad nominal instantáneamente, por lo que ésta, y por tanto la frecuencia de los pulsos que la fija, debe ser aumentada progresivamente.

Para simplificar el control de estos motores existen circuitos especializados que a partir de tres señales (tren de pulsos, sentido de giro e inhibición) generan, a través de una etapa lógica, las secuencias de pulsos que un circuito de conmutación distribuye a cada fase.

Su principal ventaja con respecto a los servomotores tradicionales es su capacidad para asegurar un posicionamiento simple y exacto. Pueden girar además de forma continua, con velocidad variable, como motores síncronos, ser sincronizados entre sí, obedecer a secuencias complejas de funcionamiento, etc. Se trata al mismo tiempo de motores muy ligeros, fiables y fáciles de controlar, pues al ser cada estado de excitación del estator estable, el control se realiza en bucle abierto, sin la necesidad de sensores de realimentación.

Los principales inconvenientes son: funcionamiento no suave a bajas velocidades; peligro de pérdida de una posición por trabajar en bucle abierto; tendencia al sobrecalentamiento trabajando a velocidades elevadas; límite en el tamaño que pueden alcanzar.

Su potencia nominal es baja y su precisión (mínimo ángulo girado) llega típicamente hasta  $1,8^\circ$ . Se emplean para el posicionado de ejes que no precisan grandes potencias (giro de pinza) o para robots pequeños (educacionales); también son muy utilizados en dispositivos periféricos del robot, como mesas de coordenadas.

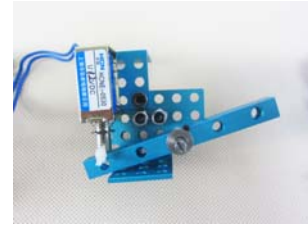
### 3. Actuadores electromecánicos

Interruptores mecánicos controlados eléctricamente, usualmente de dos posiciones, que se usan como dispositivos de conmutación.

#### 3.1.Solenoides



Un solenoide es un dispositivo capaz de convertir la energía eléctrica en energía mecánica lineal. Son útiles para realizar movimientos de pequeño recorrido, por ejemplo, para mover palancas o activar interruptores



#### 3.2.Relés

El relé (relay) es un dispositivo electromecánico compuesto por una bobina y varios contactos que abren o cierran un circuito eléctrico externo. Permite controlar circuitos de salida de mayor potencia que la que entrega el circuito de entrada. Al pasar corriente a través del solenoide 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).

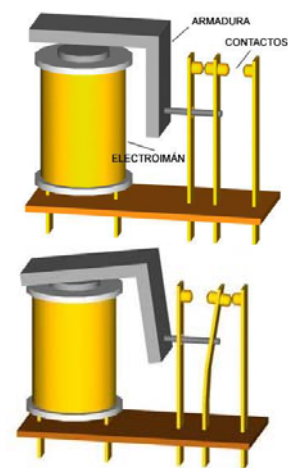
Los relés se suelen utilizar para encender o apagar dispositivos (p.e. motores) que requieren más intensidad que la que da el propio sistema.

Deventajas:

su vida útil es limitada debido al desgaste del sistema mecánico.

la conmutación genera transitorios y sobre-picos que pueden afectar a otros elementos del sistema.

como los relés son inductivos, generan un contra-voltaje que puede dañar el circuito de conexión cuando deja de pasar la corriente por la bobina. Para evitarlo, hay que conectar un diodo que proteja el sistema ante el contravoltaje.



#### 3.3.Contactores

Al igual que los relés sirven para conmutar (abrir o cerrar) circuitos externos siguiendo el control de una señal eléctrica. La diferencia es que los contactores están preparados para soportar potencias mucho mayores. El contactor de la figura puede ser controlado con tensiones de 12v (o 24v) y consume 333mA (o 154mA). Puede controlar circuitos de hasta 40A.



#### 3.4.Electroválvulas

Son dispositivos conmutadores que permiten el corte o el suministro de fluido (gas,

agua, gasoil, etc.) a las diversas instalaciones y equipos que los utilizan.

Se utilizan habitualmente electroválvulas del tipo "normalmente abiertas" para las aplicaciones de larga utilización y baja peligrosidad, y electroválvulas "normalmente cerradas" en aplicaciones donde se requiera cierta seguridad o baja utilización.

Requieren mantenimiento.

Datos de una electroválvula típica:

Alimentación: 12v

Consumo: 15 W (0,13<sup>a</sup>)

Tiempo de maniobra: 10 s

Ángulo de maniobra: 90°

Fuerza de rotación: 75 g/cm



# Apéndice I. Repaso de algunos conceptos de mecánica y electromagnetismo aplicables a motores de CC

## Par de fuerzas

Un par de fuerzas es un sistema formado por dos fuerzas, de igual magnitud, en principio, con la misma dirección y en sentidos opuestos.

## Momento de una fuerza

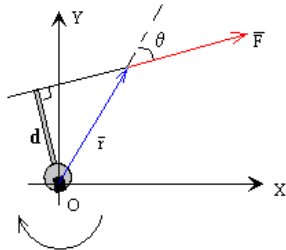
Se denomina momento de una fuerza respecto de un punto, al producto vectorial del vector posición  $\mathbf{r}$  de la fuerza por el vector fuerza  $\mathbf{F}$ .

$$\mathbf{M} = \mathbf{r} \times \mathbf{F}$$

El vector  $\mathbf{M}$  tiene

- Por módulo,  $M = F \cdot r \cdot \sin\theta = F \cdot d$  (Donde  $d$  es el brazo de la fuerza, es decir, la distancia desde el punto O a la recta que contiene a la fuerza)
- Dirección, perpendicular al plano determinado por la fuerza  $\mathbf{F}$  y el punto O.
- Sentido, la aplicación de la regla del sacacorchos

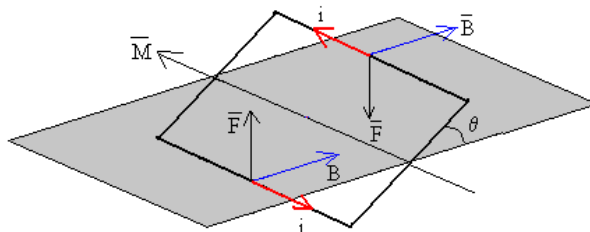
La analogía de la llave y el tornillo, nos ayuda a entender el significado físico de la magnitud momento, y a determinar correctamente el módulo, la dirección y el sentido del momento de una fuerza:



- El módulo es el producto de la fuerza  $F$  por la longitud  $d$  de la llave.  $M = F \cdot r \cdot \sin\theta = F \cdot d$
- La dirección, es la del eje del tornillo, eje Z
- El sentido viene determinado por el avance del tornillo cuando hacemos girar a la llave, (sentido del movimiento de las agujas del reloj, negativo)

## Fuerza sobre cada lado de la espira

[[http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/campo\\_magnetico/momento/momento.htm](http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/campo_magnetico/momento/momento.htm)]



La figura representa una espira rectangular cuyos lados miden  $a$  y  $b$ . La espira forma un ángulo  $\theta$  con el plano horizontal y es recorrida por una corriente de intensidad  $i$ , tal como indica el sentido de la flecha roja en la figura.

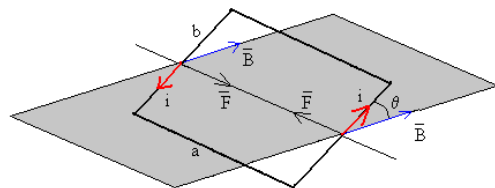
La espira está situada en una región en la que hay un campo magnético uniforme  $B$  paralelo al plano horizontal (en color gris), tal como indica la flecha de color azul en la figura.

Calcularemos la fuerza que ejerce dicho campo magnético sobre cada uno de los lados de la espira rectangular. La fuerza que ejerce un campo magnético sobre una porción  $L$  de corriente rectilínea es:

$$\mathbf{F}_m = i \hat{\mathbf{u}}_t \times \mathbf{B} \cdot L$$

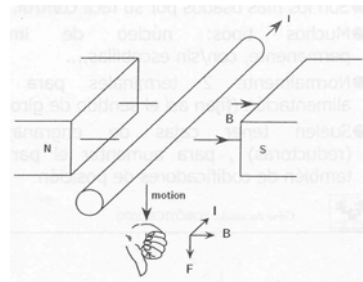
donde,  $\mathbf{u}_t$  es un vector unitario que nos señala la dirección y el sentido en el que se mueven los portadores de carga positivos.

- La fuerza  $F_1$  sobre cada uno de los lados de longitud  $a$ , está señalada en la figura y su módulo vale  $F_1 = i \cdot B \cdot a \cdot \sin 90^\circ = i B a$ .
- La fuerza  $F_2$  sobre cada uno de los lados de longitud  $b$ , es  $F_2 = i \cdot B \cdot b \cdot \sin \theta = i B b \cdot \sin \theta$

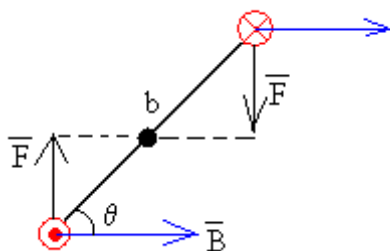


Estas fuerzas tienen la dirección del eje de rotación de la espira, y sentidos opuestos.

La fuerza  $F_2$  es nula cuando la espira está contenida en el plano horizontal  $\theta = 0^\circ$  y es máxima, cuando el plano de la espira es perpendicular al plano horizontal  $\theta = 90^\circ$ .



### Momento de las fuerzas sobre la espira



La fuerza resultante sobre la espira es nula, sin embargo, las fuerzas sobre los lados de longitud  $a$  no tienen la misma línea de acción y forman un par de momento, (véase también la primera figura).

$$M = 2 F_1 \cdot (b/2) \cdot \cos \theta = i a b B \cos \theta = i S B \cos \theta$$

La dirección momento  $\mathbf{M}$  es la del eje de rotación de la espira, y el sentido viene dado por la regla del sacacorchos, tal como se señala en la primera figura.

Definimos una nueva magnitud denominada momento magnético  $\mathbf{m}$  de la espira.

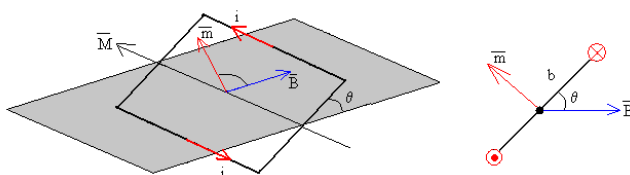
- Cuyo módulo es el producto de la intensidad de la corriente  $i$  por el área  $S$  de la espira.
- Su dirección es perpendicular al plano de la espira.
- Su sentido viene determinado por el avance de un sacacorchos que gire como lo hace la corriente en la espira.

El momento se puede expresar en forma de producto vectorial de dos vectores, el vector momento magnético  $\mathbf{m}$  y el vector campo magnético  $\mathbf{B}$ .

$$\mathbf{M} = \mathbf{m} \times \mathbf{B}$$

Como vemos en la figura

- Su módulo es  $M = m \cdot B \cdot \sin (90^\circ + \theta) = m \cdot B \cdot \cos \theta = I S B \cdot \cos \theta$
- Su dirección es perpendicular al plano determinado por los dos vectores, es decir, el eje de rotación de la espira.
- Su sentido es el del avance de un sacacorchos que gire desde el vector  $\mathbf{m}$  hacia el vector  $\mathbf{B}$  por el camino más corto.



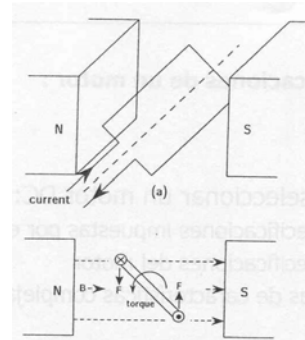
Cuando el vector campo  $\mathbf{B}$  y el vector momento magnético  $\mathbf{m}$  son paralelos, el momento  $\mathbf{M}$  es nulo, esta es una posición de equilibrio. Aunque la fórmula del momento  $\mathbf{M}$  se ha obtenido para una espira rectangular, es válida para una espira.

### Fuerza sobre un conductor en un campo magnético

- El imán permanente establece un campo magnético del polo N al S.
- Un conductor por el que pasa una corriente, situado en ese campo experimenta una fuerza hacia abajo

### Giro de una espira en un campo magnético

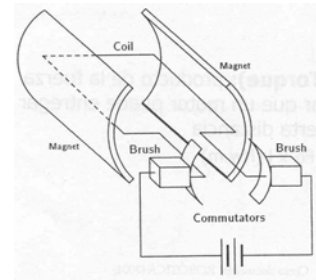
- Una corriente eléctrica atraviesa la espira.
- Las fuerzas opuestas que actúan sobre ambos lados de la espira



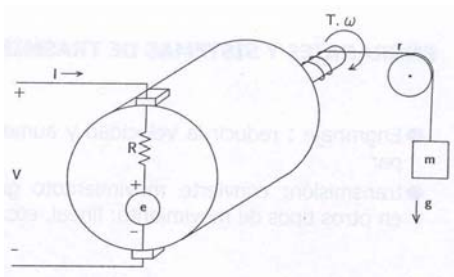
producen un momento sobre el eje de rotación que hace que la espira gire

## Fundamentos del motor eléctrico de continua

- Un sistema de conmutación que usa escobillas permite construir un motor de continua
- Los segmentos del conmutador, las delgas, están unidos a la espira y giran con ella mientras que las escobillas permanecen quietas en contacto con las delgas



## Modelo simple de un motor de corriente continua



Un circuito equivalente que modela el devanado del motor mediante una resistencia  $R$  y una fuerza contraelectromotriz  $e$  que se genera al girar.

- La potencia eléctrica del motor es  $P_e = V I$  (vol x amp = wat)
- La potencia mecánica es el producto del momento por la velocidad angular  $P_m = T \omega$ . (Nw x m x rad/seg = wat)
- $\eta = P_m / P_e$  (Potencia máxima/Potencia efectiva)

## Gráficas características de un motor de continua

Para un voltaje dado un motor de continua

- La velocidad  $N$  decrece linealmente con el momento  $T$
- El momento  $T$  crece linealmente con la corriente
- La potencia de salida  $P$  ( $T \omega$ ) es cuadrática (una parábola)
- La eficiencia máxima ( $\eta_{max}$ ) ocurre a un momento menor que el producido a la máxima potencia
- $N_0$  = velocidad sin carga ( $T=0$ ) y  $T_S$  = par de bloqueo ( $\omega=0$ )

