

3. Motores de corriente continua

1. Principios básicos

Tipos de máquinas eléctricas

Generador: Transforma cualquier clase de energía, normalmente mecánica, en eléctrica.

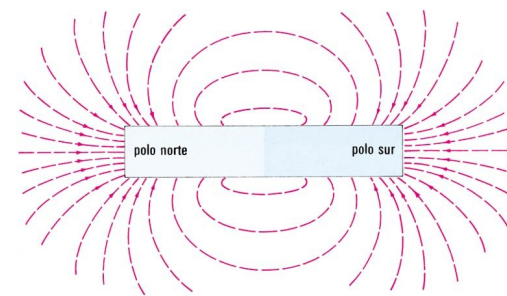
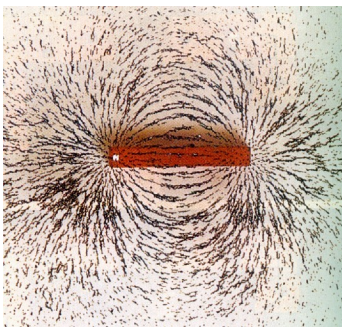
Transformador: Modifica alguna de las características de la energía eléctrica (normalmente, tensión, intensidad de corriente o potencia)

Receptor: Convierte cualquier tipo de energía la energía eléctrica que reciben.
Ejemplo: motores.

1. Si la energía mecánica se transforma en eléctrica hablamos de generador.
2. Si la energía eléctrica se transforma en energía mecánica hablamos de motor.

A. Campo magnético

Un imán o una corriente eléctrica perturba el espacio que le rodea dando origen a un campo magnético. El campo magnético se representa por líneas de fuerza.



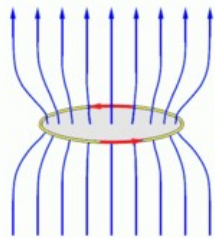
Las líneas de campo magnético permiten estimar en forma aproximada el campo magnético existente en un punto dado, tomando en cuenta las siguientes características

- Las líneas de fuerza de campos magnéticos son siempre lazos cerrados que van de norte a sur por fuera del imán y de sur a norte por dentro del imán.
- Los lazos magnéticos nunca se entrecruzan
- Las líneas del mismo sentido se atraen y las de sentido opuesto se repelen

A las líneas de fuerza se les denomina líneas de inducción para el campo magnético. La intensidad del campo magnético se define como una magnitud vectorial, análoga a la

intensidad del campo eléctrico (**E**), que se denomina **inducción magnética (B)**, cuya unidad internacional es el Tesla (T)

Una carga en movimiento produce un campo magnético a su alrededor, luego, una corriente eléctrica (cargas en movimiento) produce también un campo magnético a su alrededor.



Definición: Se define al flujo magnético como al número de líneas de inducción magnética que atraviesa una sección de superficie. Se representa por la letra Φ

$$d\Phi = B \cdot dS$$

B. Fuerza electromotriz inducida

La experiencia demuestra que

- Si un conductor se mueve en un campo magnético, cortando las líneas de fuerza del campo, se crea una **fuerza electromotriz inducida (fem)**, es decir, una tensión

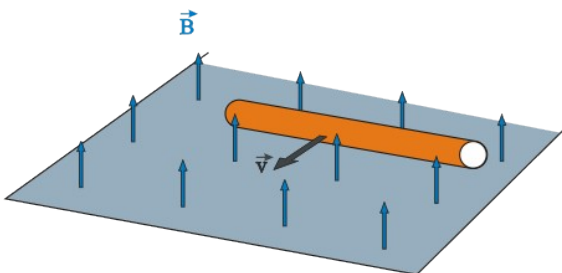
$$E = - \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{Se mide en voltios}$$

esta expresión representa la variación del flujo a lo largo del tiempo.

Esta afirmación también se puede decir como...

- Si se varía el flujo magnético a través de un circuito cerrado se origina una fem.

Sabiendo que el flujo (Φ) es el número total de líneas de inducción que atraviesa una determinada superficie, se puede deducir (no voy a demostrarlo) una expresión que nos diga el valor de la fem inducida en un conductor de longitud (l) que se mueve a velocidad (v) dentro de un campo de inducción magnético (**B**).



$$E = - B \cdot l \cdot v$$

Entre los extremos de conductor de longitud (l) aparece una tensión, es la **fuerza electromotriz (fem)**. Este es el principio de funcionamiento de los generadores.

- E = fem inducida (en voltios)
- B = inducción magnética (en tesla)
- l = longitud del conductor (en m)
- v = velocidad de desplazamiento (en m/s)

El circuito cerrado donde se origina la corriente recibe el nombre de **inducido** y el cuerpo que crea el campo magnético se llamada **inductor**.

C. Fuerza electromagnética ejercida sobre un cable conductor

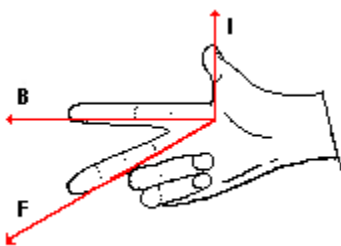
Si un cable conductor recorrido por una corriente eléctrica de intensidad (I) está en presencia de un campo magnético (B), aparece una fuerza sobre el conductor cuyo valor es...

$$F = B \cdot l \cdot I \cdot \text{sena}$$

- B = Inducción magnética (Tesla)
- l = longitud (en m) del conductor
- I = Intensidad de la corriente eléctrica que recorre el conductor (Amperios)
- α = ángulo que forma el conductor y la dirección del campo magnético
- F = Fuerza a la que está sometido el conductor (en Newton)

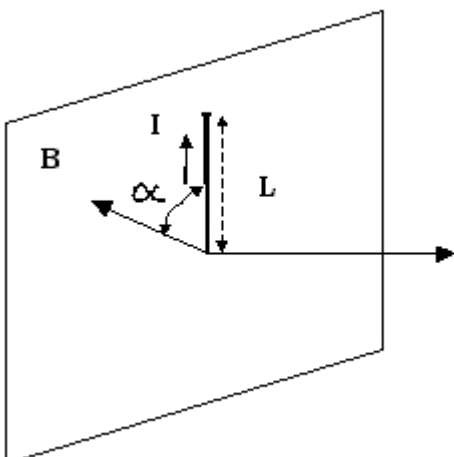
como $\text{sen } 0 = 0$, se puede deducir que si la dirección de las líneas del campo magnético el sentido de la corriente, la fuerza es nula.

Para conocer el sentido de la fuerza, usamos la regla de la mano derecha.



Primera ley de la mano derecha

Si por el cable circula una corriente (I) en el sentido que muestra en dedo **pulgar** en la figura y el campo magnético (B) tiene el sentido que muestra el dedo **índice**, se ejercerá sobre el cable que conduce la corriente (I) una fuerza (F) que tiene la dirección mostrada por el dedo medio.



En la imagen de la izquierda se puede apreciar el sentido de la fuerza electromagnética **F** que aparece sobre el conductor de longitud **L** que es recorrido por una corriente **I**. Aplicando la regla de la mano derecha (I, pulgar; B índice), se aprecia que la dirección y sentido de **F** es hacia fuera del plano

que contiene el campo y el cable conductor.

Si la dirección del campo **B** coincidiese con la de la corriente (**I**), la fuerza sería nula, pues $\text{sen}0 = 0$.

En el caso que que hubieran **N** cables en presencia de un campo magnético, la fuerza magnética inducida será la fuerza en un cable multiplicado por **N**, la fórmula será entonces:

$$F = N \cdot B \cdot I \cdot L \cdot \text{sena}$$

es el caso de un solenoide.

Supongamos que los conductores se hallan en un cilindro (inducido) a modo de solenoide, de radio **r**, el momento de fuerzas (**M**) o par-motor de giro será...

$$M = F \cdot r = N \cdot B \cdot I \cdot L \cdot r \cdot \text{sena}$$

Si el campo es perpendicular al plano que corta al solenoide, $\text{sena} = \text{sen} 90 = 1$ y la fórmula será

$$M = N \cdot B \cdot I \cdot L \cdot r$$

A este par-motor se le denomina **par electromagnético interno** y en realidad se representa como M_i , con lo cual...

$$M_i = N \cdot B \cdot I \cdot L \cdot r$$

La potencia electromagnética interna de un motor está relacionada con el par electromagnético interno a través de la velocidad de giro...

$$P_i = M_i \cdot \omega_i$$

siendo P_i la potencia electromagnética interna (en Vatios)

M_i momento de fuerzas o par-motor electromagnético interno (en N·m)

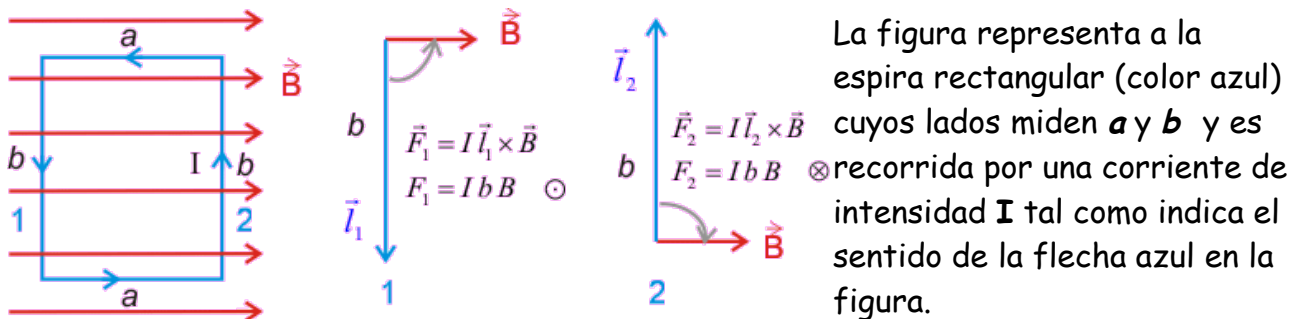
ω_i velocidad angula (en rad/s)

D. Fuerza electromagnética ejercida sobre una espira rectangular

En las máquinas eléctricas, aparecen bobinas formadas por un determinado número de espiras. Ya hemos visto cómo es la fuerza que aparece sobre un hilo conductor recorrido por una corriente **I**, que está presente en un campo **B**, pero... ¿Cómo será en una espira?

Sea **B** un campo de inducción magnético que actúa sobre una espira que es recorrida

por una corriente eléctrica de intensidad (I). ¿Qué pasará? Teniendo en cuenta el capítulo anterior, es de esperar que surjan fuerzas sobre la espira, pero, ¿Cómo serán? Recurriremos a la expresión anterior ($F = B \cdot I \cdot L \cdot \text{sen}\alpha$).



La espira está situada en una región en la que hay un campo magnético uniforme B que está en el mismo plano que la espira (en color rojo), 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, como si fuesen cuatro conductores diferentes.

Lados a : Como la dirección de campo (B) coincide con la dirección del conductor, ambas magnitudes forman un ángulo nulo (0). La longitud del conductor es $L=a$. Como $\text{sen } 0^\circ = 0, \dots$

$$F_a = B \cdot I \cdot L \cdot \text{sen}\alpha = B \cdot a \cdot I \cdot \text{sen}0 = 0$$

Lados b : Como la dirección del campo (B) es perpendicular a la dirección del conductor, ambas magnitudes forman un ángulo de 90° . La longitud del conductor es $L=b$. Como $\text{sen}90^\circ = 1, \dots$

$$F_b = B \cdot I \cdot L \cdot \text{sen}\alpha = B \cdot b \cdot I \cdot \text{sen}90 = B \cdot b \cdot I$$

Las fuerzas de los lados b , son de igual valor y... empleando la regla de la mano derecha, se puede comprobar, son de sentido contrario (una hacia dentro del papel y otra hacia fuera del papel). Constituyen, pues, un par de fuerzas que hará que la espira gire alrededor de un eje imaginario paralelo a los lados b de la espira.

El momento de fuerzas es:

$$M = I \cdot S \cdot B \cdot \text{sen}\theta$$

M = momento de fuerzas o par-motor ($N \cdot m$)

I = Intensidad de corriente (A)

S = Superficie de la espira (m^2)

B = Inducción del campo magnético (T)

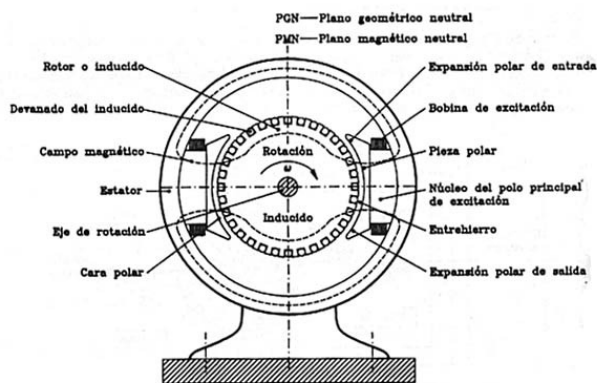
θ = ángulo formado por el vector S , perpendicular a la superficie de la espira y las líneas de fuerzas del campo.

Si en lugar de una espira tenemos una bobina formada por N espiras, el par-motor

será

$$M = N \cdot I \cdot S \cdot B \cdot \text{sen}\theta$$

E. Clasificación y constitución de las máquinas eléctricas



Desde el punto de vista **mecánico**, un motor está constituido por:

- **Estator:** parte fija.
- **Rotor:** Parte móvil o giratoria.

El rotor es una pieza giratoria cilíndrica, un electroimán móvil, con varios salientes laterales, que llevan cada uno a su alrededor un bobinado de hilo de cobre por el que pasa la corriente eléctrica. El estator, situado alrededor del rotor, es un

electroimán fijo, cubierto con un aislante. Al igual que el rotor, dispone de una serie de salientes con bobinados eléctricos por los que circula la corriente.

Desde el punto de vista del tipo de corriente eléctrica generada pueden ser:

- **de corriente continua**
- **de corriente alterna:** síncronos y asíncronos

Para permitir el movimiento del rotor, entre rotor y estator, existe un espacio de aire llamado **entrehierro**, que debe ser lo más reducido posible para evitar pérdidas del flujo magnético.

Desde el punto de vista electromagnético se pueden considerar constituidos por

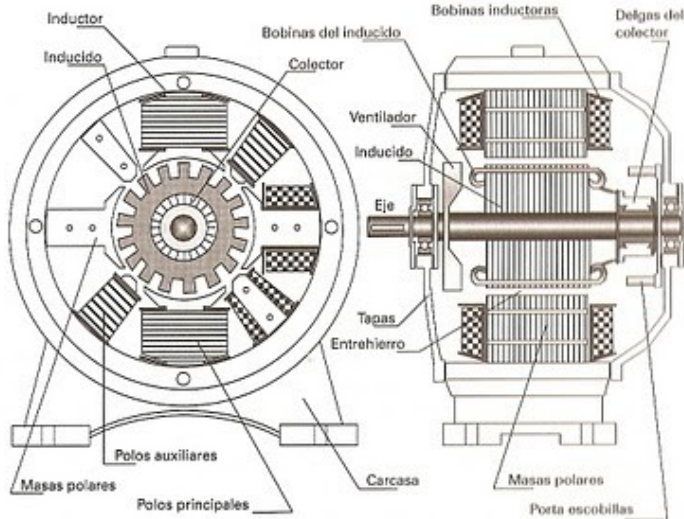
- Un conjunto magnético.
- Dos circuitos eléctricos: uno en el rotor y otro en el estator.

Definición: **Devanado o bobinado:** hilo de cobre arrollado que forma parte de los circuitos eléctricos de las máquinas.

Uno de los devanados de uno de los circuitos eléctricos produce el flujo que se establece en el conjunto magnético cuando es recorrido por la corriente eléctrica, es el **devanado inductor o excitador**. En el otro devanado, perteneciente al segundo circuito eléctrico se induce una fuerza que provoca un par-motor en el caso de un motor eléctrico, este es el **devanado inducido**.

En resumen, los devanados pueden ser:

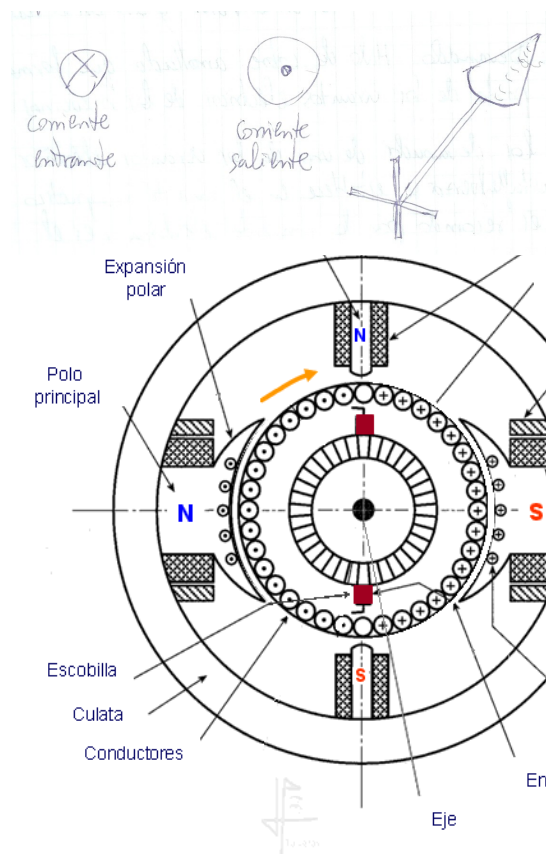
- **Devanado (o bobinado) inductor:** Es el devanado (circuito eléctrico) que genera el campo magnético de excitación en una máquina eléctrica. Se sitúa en el interior del estator en número par en unos salientes llamados polos.
- **Devanado (o bobinado inducido)Inducido:** Es el devanado sobre el que se inducen las fuerzas electromotrices. Se sitúa en unas ranuras del rotor.



Los devanados inductores forman los **polos** del motor, es decir, se sitúan en el estator... En todo circuito magnético, como sabes se distinguen los polos norte, de donde salen las líneas de fuerza del campo de inducción magnética (**B**), y los polos sur, por donde entran dichas líneas. Siguiendo el circuito magnético de los motores de corriente continua se observan núcleos de hierro rodeados por bobinas (devanados) que se

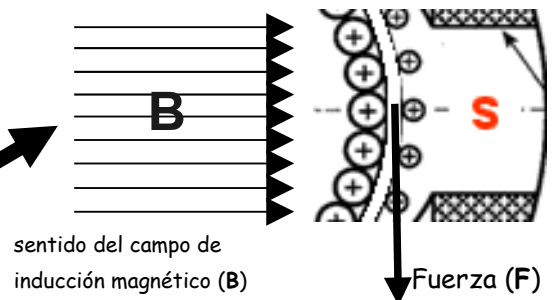
conocen como polos, que van incrustados por uno de sus extremos en una pieza de hierro llamada **culata**, de manera que queda libre sólo el extremos de cada uno de ellos, que es precisamente el que da nombre al polo. En definitiva, los polos generan un campo magnético cuando circula corriente por ellos, un campo magnético inductor.

Antes de pasar a ver cómo es un motor de corriente continua por dentro, debo aclarar una NOTACION

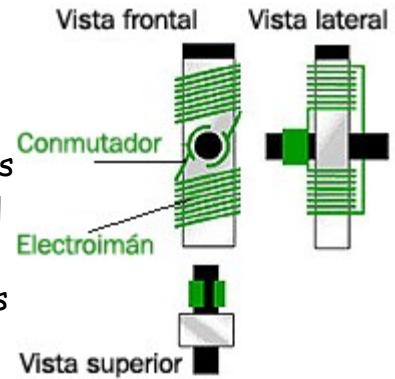


Las intensidades que recorren los conductores son perpendiculares al plano de papel en el que se dibuja el conductor. Se representan del siguiente modo.

Representación de un motor

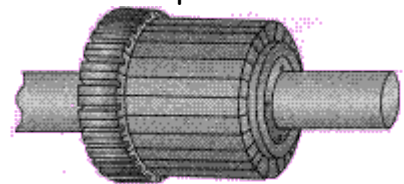


En la imagen superior se aprecia el polo sur que forma parte del estator. A la izquierda del polo sur, entre el rotor y el estator, se aprecia el entrehierro. Tanto los conductores del rotor, como los estator están recorridos por corrientes eléctricas cuyo sentido es entrante en el plano del papel. Si se aplica la **regla de la mano derecha**, se comprueba que el campo magnético ejerce fuerzas del mismo sentido (hacia abajo). Esto hace girar el motor en sentido de las agujas del reloj. Para que se sumen todas las fuerzas individuales de todos los conductores, es preciso que todos hagan girar el motor en el mismo sentido. Para ello, los conductores situados junto al polo sur han de ser opuestos al que recorren los conductores colocados junto al polo norte.



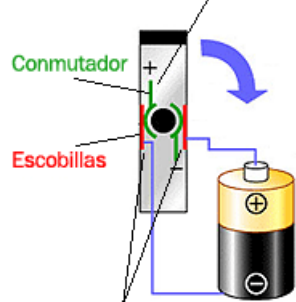
Rotor visto desde diferentes ángulos

Otro elemento importante y fundamental del motor eléctrico de corriente continua es el **colector de delgas**, que es un conjunto de láminas de cobre, aisladas entre sí y que giran solidariamente con el rotor. Las delgas están conectadas eléctricamente a las bobinas del devanado inducido y por medio de ellas dicho devanado se puede conectar a la fuente de energía eléctrica del exterior. Cada delga está unida eléctricamente al punto de conexión de dos bobinas del devanado inducido, de tal forma que habrá tantas delgas como bobinas simples posea el devanado. Al colector de delgas también se le conoce como **conmutador**.



Escobillas: Las **escobillas** permanecen fijas al estator, sin realizar movimiento alguno, y están en contacto permanente sobre la superficie del colector de delgas. Esto permite el paso de corriente eléctrica desde el exterior hasta el devanado inducido del rotor. Las escobillas y el colector de delgas permiten la conmutación de corriente cada media vuelta del rotor. Ver imagen inferior.

El conmutador gira libremente entre las escobillas



Las escobillas permanecen fijas

F. Funcionamiento del motor

El rotor recibe la corriente a través del contacto establecido entre las escobillas y el conmutador. Las escobillas permanecen fijas, mientras que el conmutador (colector de delgas) puede girar libremente entre ellas siguiendo el movimiento del rotor.

Esquema de un motor de corriente continua

La corriente llega al devanado del rotor a través del contacto

entre las escobillas con el conmutador (colector de delgas).

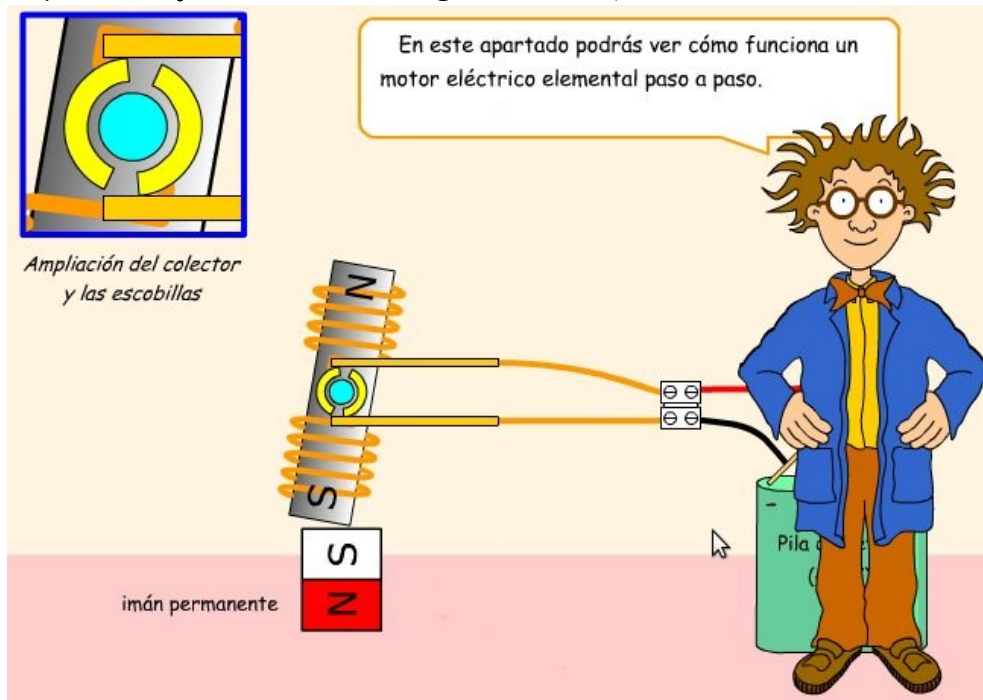
Cuando la corriente pasa a lo largo del devanado del rotor, sus polos son atraídos y repelidos por los polos del devanado del estator, de modo que el rotor se moverá hasta que el polo norte del devanado del rotor quede mirando al polo sur del estator. Pero tan pronto como los polos del rotor quedan "mirando" a los polos del estator, se produce un cambio en el sentido de la corriente que pasa por el rotor.

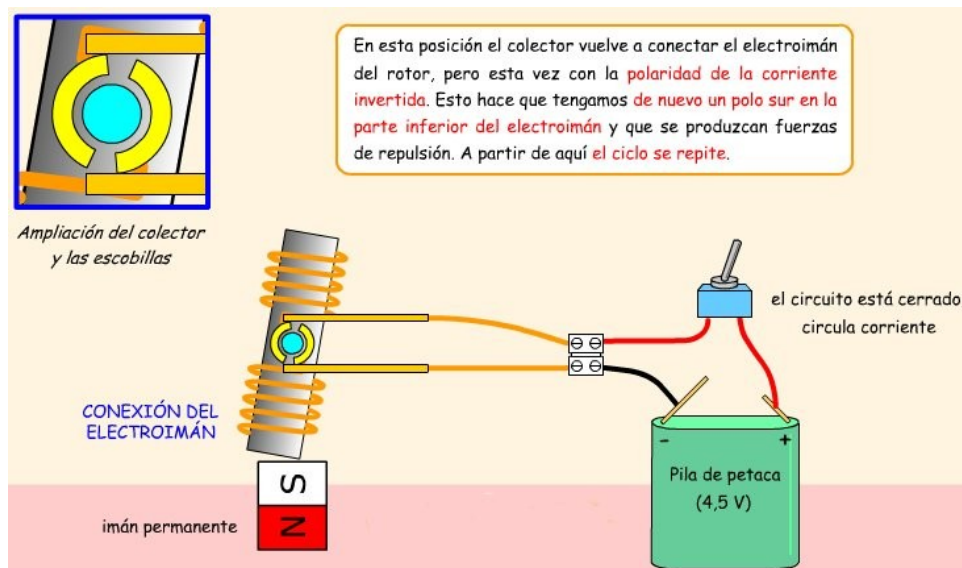
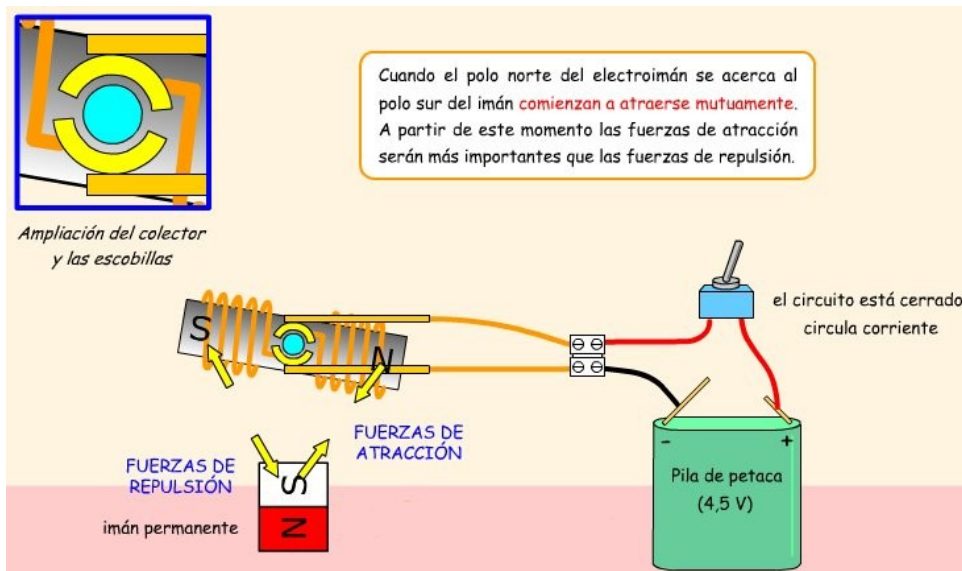
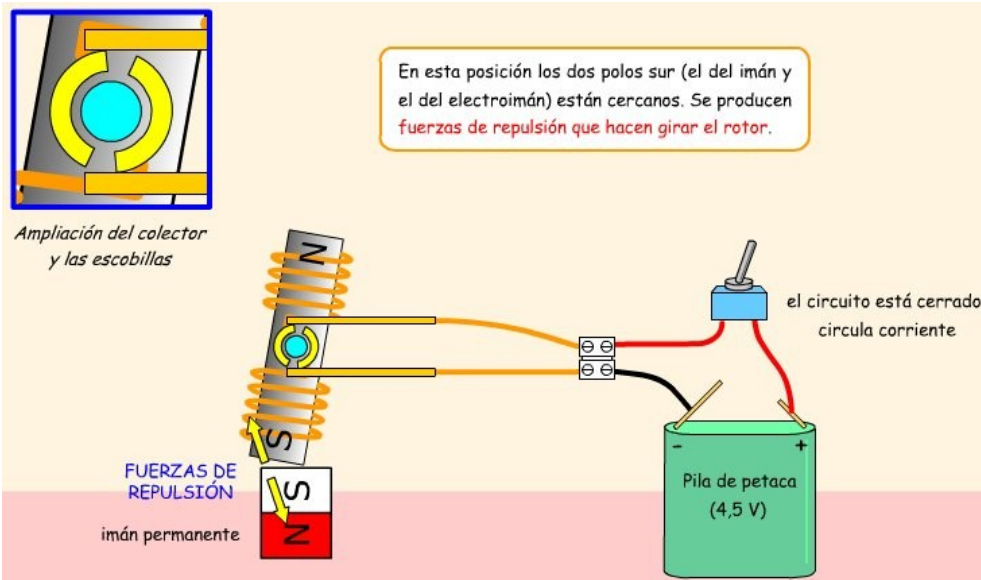
Este cambio es debido a que el conmutador, al girar, modifica los contactos con las escobillas e intercambia el modo en que el devanado del rotor recibe la corriente de la pila. Es decir, se invierte la polaridad.

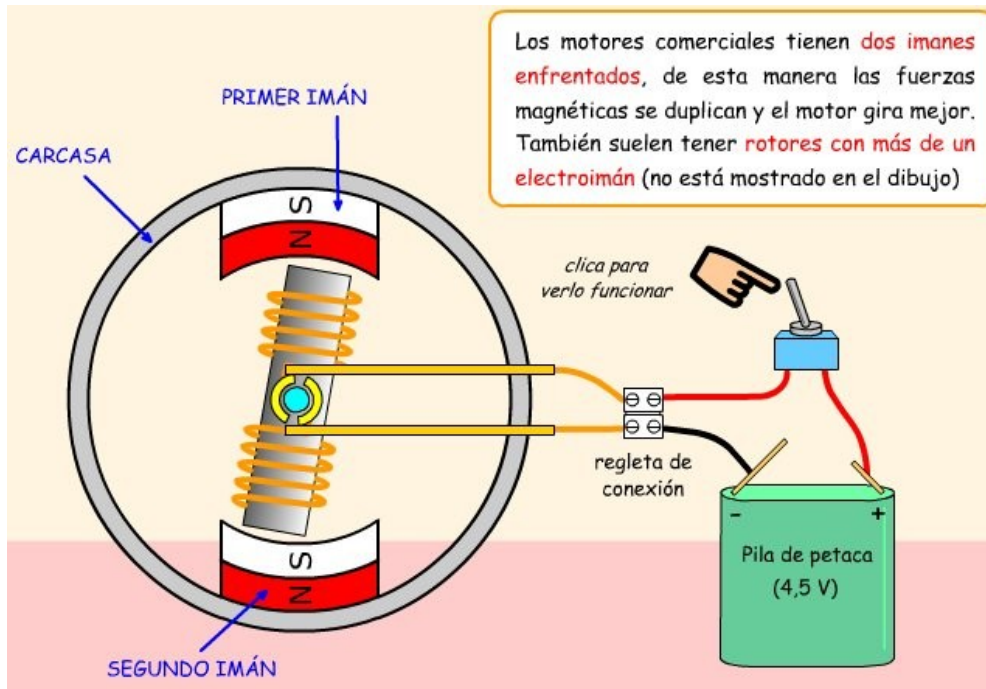


Al modificarse el signo de los polos del devanador del rotor, los polos del rotor resultarán repelidos por los polos del estator fijo, pues en esta nueva situación estarán enfrentados polos de igual signo, con lo cual el rotor se ve obligado a seguir girando.

Nuevamente, cuando los polos del devanado del rotor estén alineados con los polos opuestos del estator fijo, el contacto entre escobillas y conmutador modificará el sentido de la corriente, con lo cual el rotor será forzado a seguir girando. Si no lo has entendido muy bien, fíjate bien en los siguientes esquemas







G. Principio de reversibilidad

Los generadores de corriente continua son reversibles porque pueden transformar la energía en los dos sentidos, es decir, si le aportamos energía mecánica, obtenemos energía eléctrica por los bornes (**generador**) y si absorben energía eléctrica de la red, nos aportan energía mecánica por su eje (**receptor**).

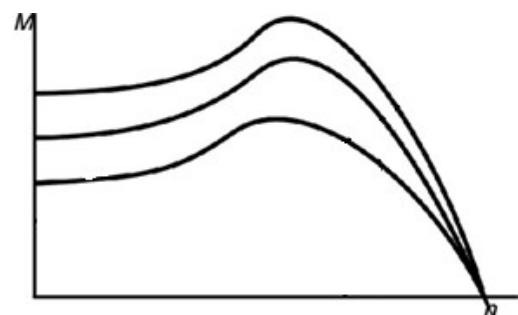
Al generador de corriente continua se le llama **dinamo** y al receptor rotativo se le llama **motor**.

Para invertir el **sentido de giro** de los motores, es necesario invertir el sentido de la corriente en las bobinas inducidas, aunque no en las inductoras, ya que si se variase también el sentido de la corriente en éstas, el sentido de giro no cambia.

En la dinamo, la escobilla o borne positivo corresponde a la salida de corriente del inducido, mientras que en el motor es por donde entra la corriente.

H. Característica par-velocidad de un motor

Un motor en marcha se define de forma que su velocidad y su par-motor (es decir, su momento de fuerzas, M) está determinado por la llamada característica de carga o característica par-velocidad, un gráfica donde en ordenadas se representa el par-motor (M) y en abscisas la velocidad (n)



A la curva en cuestión se le denomina característica nominal. En la gráfica de la derecha se representa la curva característica de tres motores distintos.

RECUERDA: el par-motor o momento de fuerzas se define como el producto de la fuerza que interviene en el giro y la distancia desde el eje hasta el punto de aplicación de la fuerza

Hay que diferenciar dos tipos de par-motor en el funcionamiento de un motor eléctrico:

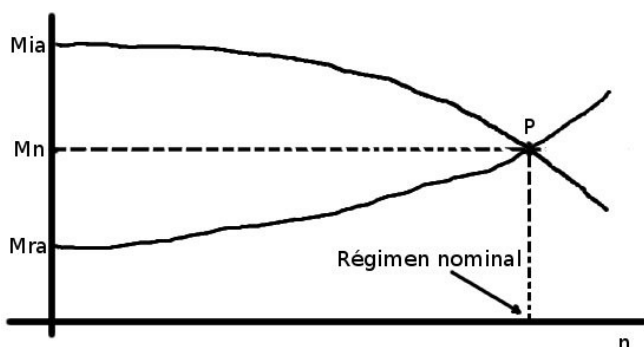
- **Par interno (M_i):** Se debe a la carga que el motor absorbe. Las fuerzas magnéticas inducidas sobre los conductores que forman el inducido (valga la redundancia) hacen girar el rotor de la máquina. Pues bien, cada una de estas fuerzas determina su correspondiente momento y, dado que todas las fuerzas deben ejercer su acción en el mismo sentido, el momento de rotación de la máquina vendrá dado por la suma de todos esos momentos elementales.
- **Par resistente (M_r):** Se debe a la fuerza resistente que se opone al movimiento del motor, son fuerzas de oposición al arrastre del motor.

En el funcionamiento de un motor con carga, se distingue tres fases:

1. **Arranque o puesta en marcha:** Es el momento de conexión del motor a la red eléctrica de alimentación. Para que el motor pueda arrancar, es preciso que venza la resistencia que ofrecen los rozamientos. El momento de fuerzas de rotación desarrollado por el motor en ese instante recibe el nombre de par interno de arranque (M_{ia}) que debe ser mayor que el par resistente (M_{ra}) que se da en el mismo momento. De no ser así, el motor no se pondría en marcha.
2. **Aceleración:** Es el periodo que sigue a la puesta en marcha. Durante ese tiempo, la velocidad aumenta por lo que se exige al motor el máximo par que es capaz de dar, ya que debe vencer el par resistente y contrarrestar el par interno.
3. **Marcha de régimen o régimen nominal:** Esta fase se alcanza cuando su velocidad bajo la carga nominal es constante ($n=\text{constante}$). En estas condiciones, el par motor (M_i) desarrollado es igual y de signo contrario al par resistente de la carga, y el motor se encuentra en el punto P.

En ese momento $M_i = M_r$

Definimos pues: **valor nominal** como el valor en el que normalmente funciona la máquina. En ese momento el motor a velocidad constante.



En la gráfica de la izquierda, se observa como en el instante inicial ($n=0$) el par interno de arranque es muy superior al par resistente de arranque. Esto provoca que la velocidad del motor aumente. A medida que aumenta, el par resistente de arranque va disminuyendo, mientras que el par resistente de arranque aumenta. En el

momento que sean iguales (punto P). Se alcanza una situación estable en la que la se alcanza el régimen nominal y la velocidad se mantiene.

I. Estabilidad de funcionamiento

El funcionamiento de un motor puede ser **estable** o **inestable**. Un motor tiene un régimen estable cuando al variar su velocidad, el desequilibrio provocado por una perturbación desaparece porque el motor tiende a volver a su valor inicial.

Si la velocidad tiende a aumentar, el par motor debe ser inferior al par resistente, pero si la velocidad disminuye, el par motor debe ser superior al par resistente.

Una máquina eléctrica es inestable cuando frente a una variación de los valores característicos de su régimen nominal, responde automáticamente con una acción que refuerza esa alteración, alejándola aún más del régimen nominal.

La alteración puede ser:

- Disminuye la velocidad ($\Delta n < 0$): En un motor estable debe aumentar el par motor interno para que sea superior al resistente. ($\Delta M_i > \Delta M_r$).
- Aumenta la velocidad ($\Delta n > 0$): En un motor estable debe disminuir el par motor interno para que sea inferior al resistente. ($\Delta M_i < \Delta M_r$).

J. Pérdidas en las máquinas eléctricas.

Una fracción de la energía eléctrica suministrada se pierde en forma de calor: son las pérdidas. Las hay de tres tipos:

- **Pérdidas mecánicas:** Aquellas originadas por el rozamiento del aire, los cojinetes y diversos elementos mecánicos.
- **Pérdida en los conductores:** Aquellas que ocurren solamente en los devanados que son recorridos por la corriente. Las pérdidas se dan en forma de calor por el efecto **Joule**.
- **Pérdidas en el hierro:** Son de tipo magnético y se deben a la variación del flujo.

Destacan:

- **Corrientes de Foucault:** corrientes inducidas en materiales metálicos que reaccionan contra el campo que las induce y tiende a oponerse a la variación de flujo
- **Histéresis:** Se debe a la imanación que permanece provocada previamente por otro campo magnético. Ejemplo: una aguja de acero bajo un campo magnético se comporta como un imán aunque desaparezca el campo magnético que lo imanó. Son estos procesos de imanación y desimanación los que se dan en un motor eléctrico y provocan pérdidas.