

MAQUINAS ELECTRICAS

Conceptos generales de las máquinas eléctricas.

Las máquinas eléctricas son el resultado de una aplicación inteligente de los principios del electromagnetismo y en particular de la ley de inducción de Faraday. Las máquinas eléctricas se caracterizan por tener circuitos eléctricos y magnéticos entrelazados. Durante todo el proceso histórico de su desarrollo desempeñaron un papel rector, que determinaba el movimiento de toda la ingeniería eléctrica, merced a su aplicación en los campos de la generación, transporte, distribución y uso de la energía eléctrica. Las máquinas eléctricas realizan una conversión de energía de una forma a otra, una de las cuales, al menos, es eléctrica. En base a este punto de vista, estrictamente energético, es posible clasificarlas en tres tipos fundamentales:

1. **Generador:** transforma la energía mecánica en eléctrica. La acción se desarrolla por el movimiento de una bobina en un campo magnético, resultando una f.e.m. inducida que al aplicarla a un circuito externo produce una corriente que interacciona con el campo y desarrolla una fuerza mecánica que se opone al movimiento. En consecuencia, el generador necesita una energía mecánica de entrada para producir la energía eléctrica correspondiente.

2. **Motor:** transforma la energía eléctrica en mecánica. La acción se desarrolla introduciendo una corriente en la máquina por medio de una fuente externa, que interacciona con el campo produciendo un movimiento de la máquina; aparece entonces una f.e.m. inducida que se opone a la corriente y que por ello se denomina fuerza contra electromotriz. En consecuencia, el motor necesita una energía eléctrica de entrada para producir la energía mecánica correspondiente.

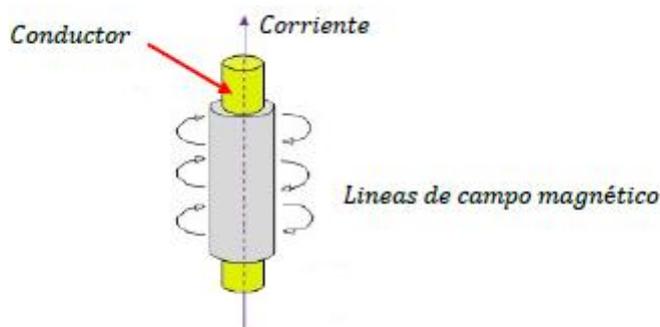
3. **Transformador:** transforma una energía eléctrica de entrada (de CA) con determinadas magnitudes de tensión y corriente en otra energía eléctrica de salida (de CA) con magnitudes diferentes.

Los generadores y motores tienen un acceso mecánico y por ello son máquinas dotadas de movimiento, que normalmente es de rotación; por el contrario, los transformadores son máquinas eléctricas que tienen únicamente accesos eléctricos y son máquinas estáticas.

Cada máquina en particular cumple el principio de reciprocidad electromagnética, lo cual quiere decir que son reversibles, pudiendo funcionar como generador o como motor (en la práctica, existe en realidad alguna diferencia en su construcción, que caracteriza uno u otro modo de funcionamiento)

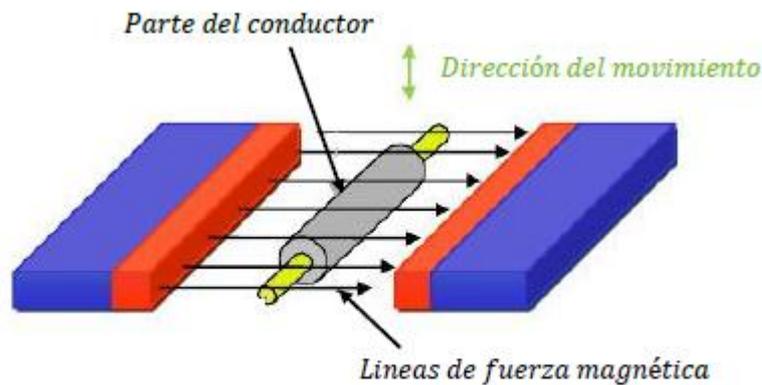
Conceptos generales de los generadores eléctricos

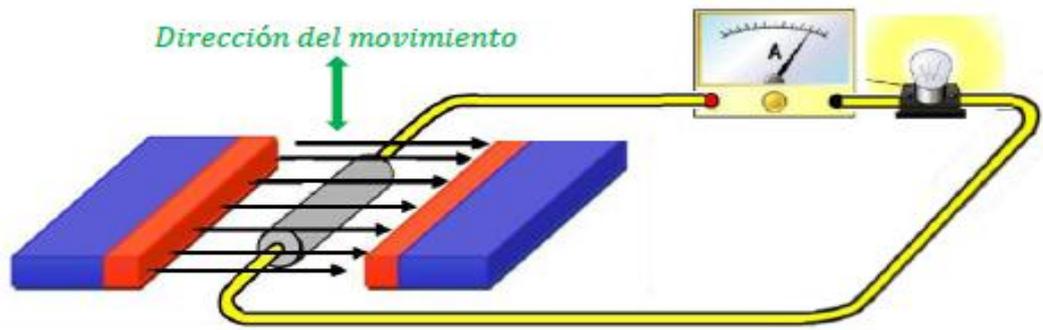
- **Fundamentos de Magnetismo:** Un imán puede ser permanente o temporal. Si una pieza de hierro o de metal se



magnetiza y retiene el magnetismo se le conoce como imán permanente, este se usa en motores de pequeño tamaño. Cuando una corriente circula a través de una bobina, se crea un campo magnético con un polo norte y sur, como si se tratara de un imán permanente. Sin embargo, cuando la corriente se interrumpe, desaparece el campo magnético. A este tipo de magnetismo temporal se le conoce como electromagnetismo. Cuando una corriente eléctrica circula a través de un conductor, las líneas de fuerza magnética (flujo magnético) se crean alrededor del mismo. Cuando la sección de un conductor se hace pasar a través de un campo magnético, se dice que se induce un voltaje y se crea la electricidad en el conductor o alambre si el circuito está cerrado. De esta manera puede comprobarse la relación entre el magnetismo y la electricidad.

- **La inducción electromagnética:** Si el alambre conductor se mueve dentro de un campo magnético, de manera que el conductor corte las líneas de dicho campo, se origina una fuerza electromotriz producida en dicho conductor. Induciendo la fuerza electromotriz, mediante el movimiento relativo entre el conductor y el campo magnético, se presenta lo que se conoce como la inducción electromagnética, se inducirá un voltaje en este conductor. Cerrando el circuito, mediante el uso de un medidor puede comprobarse que circula corriente por el conductor, como se muestra en la figura.





En 1831 Joseph Faraday hizo uno de los descubrimientos más importantes del electromagnetismo que actualmente se conoce como: La ley inducción electromagnética de Faraday, que relaciona fundamentalmente el voltaje y el flujo magnético en el circuito. El enunciado de la ley es:

Si se tiene un flujo magnético que rodea a una espira y, además, varía con el tiempo, se induce un voltaje entre los terminales. El valor del voltaje inducido es proporcional al índice de cambio del flujo.

Por definición y de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades, cuando el flujo varía en 1 weber por segundo, se induce un voltaje de 1 volt entre sus terminales; en consecuencia, si el flujo varía entre una bobina de N espiras, el voltaje inducido se da por la

$$E = N \frac{d\Phi}{dt}$$

Dónde: $E = \text{voltaje inducido en volts}$

$N = \text{número de espiras}$

$d\Phi = \text{cambio de flujo de la espira}$

$dt = \text{intervalo de tiempo en que el flujo cambia}$

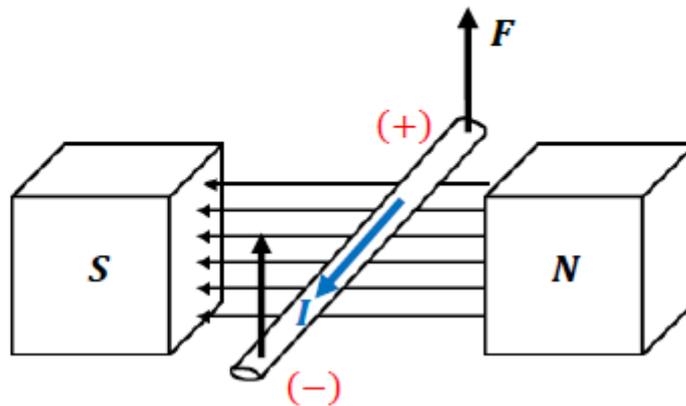
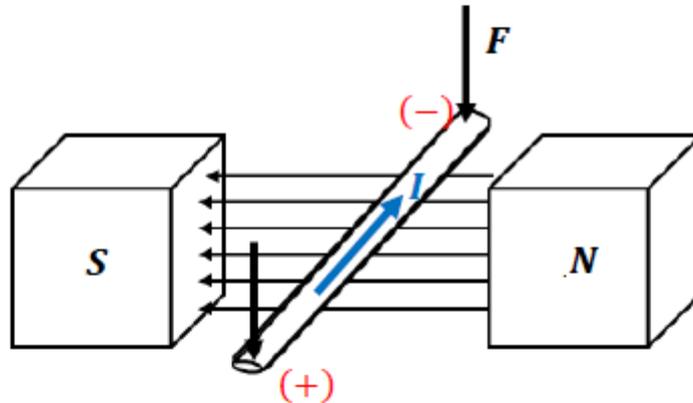
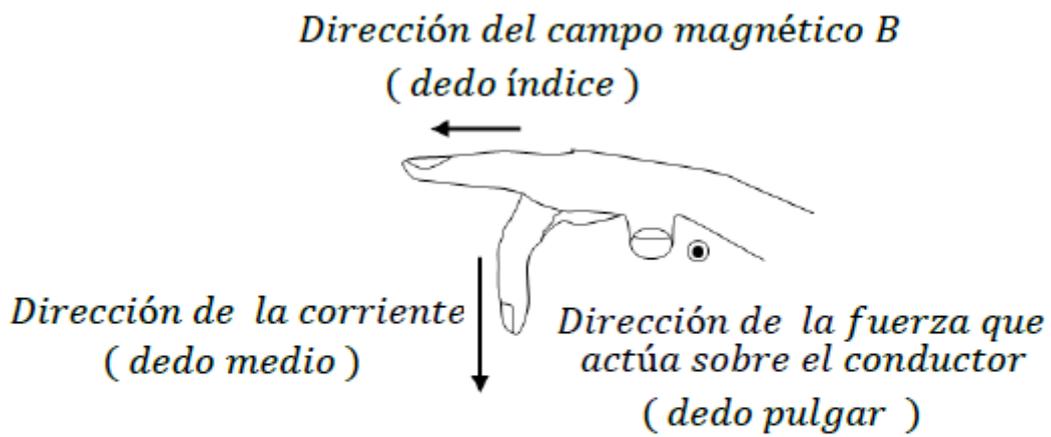
expresión:

La ley de Faraday establece las bases para las aplicaciones prácticas en el estudio de transformadores, generadores y motores de corriente alterna.

Dirección de la f.e.m. regla de Fleming

- La relación entre las direcciones de la f.e.m. inducida, campo magnético y movimiento del conductor se puede representar mediante la regla de Fleming en esta se emplea una corriente convencional para determinar la dirección de la f.e.m., esta regla también es conocida como la regla de la mano derecha.

Esta regla señala que se usa el pulgar para representar el movimiento del conductor sobre el campo, el cual es un movimiento perpendicular hacia arriba, el índice representa la dirección del campo magnético y el dedo representa la dirección de la f.e.m.

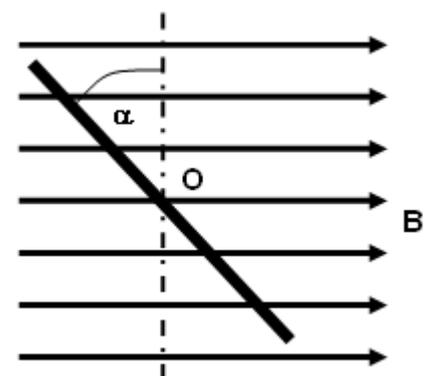
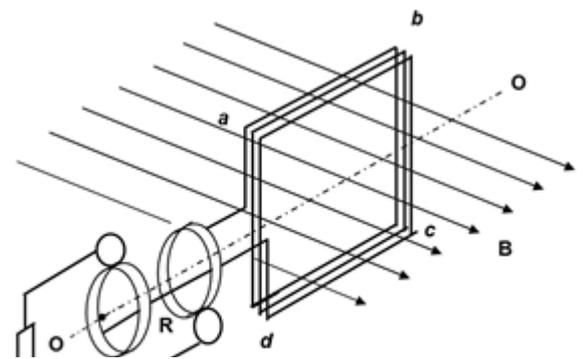


Mientras se mantenga el movimiento del conductor habrá, por consiguiente, una corriente. Por ello el conductor móvil se comporta como un generador de fuerza electromotriz.

En consecuencia, será necesaria una fuerza exterior suministrada por algún dispositivo que produzca trabajo para mantener el movimiento del conductor.

Tal trabajo generalmente se hace de distintas maneras como ser con un motor acoplado al eje del generador o en forma hidráulica en donde los alabes de la turbina son movidas por la fuerza del agua.

Aplicando la ley de Faraday Lenz en la siguiente figura. Se observa un cuadro rectangular *abcd* compuesto por un arrollamiento de *N* espiras que gira alrededor de un eje *OO*. Cada extremo del cuadro está



conectado a sendos anillos rozantes R concéntricos con el eje del cuadro y que pueden girar con él, pero aislados entre sí. Mediante dos escobillas apoyadas a los anillos se conecta, a por ejemplo una resistencia.

El cuadro gira en el sentido de las agujas del reloj y en la figura se analiza el instante en que el cuadro forma un ángulo con la normal al campo. El flujo que atraviesa la bobina estará dado por:

$$\Phi = A \cdot B \cdot \cos \alpha$$

Dónde: $A = \text{área abarcada por la bobina}$

$B = \text{campo magnético}$

Reemplazando en la expresión de Faraday Lentz queda:

$$E = -N \frac{d\Phi}{dt} = -N \frac{d(A \cdot B \cdot \cos \alpha)}{dt} = -N \cdot A \cdot B (-\text{sen } \alpha) \cdot \frac{d\alpha}{dt}$$

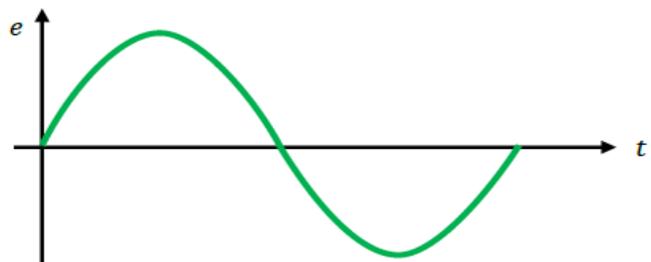
Como $\alpha = \omega \cdot t$ se llega a:

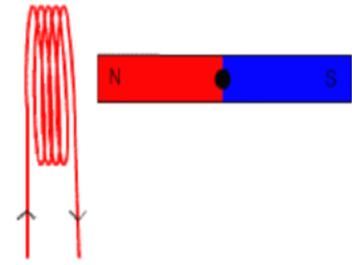
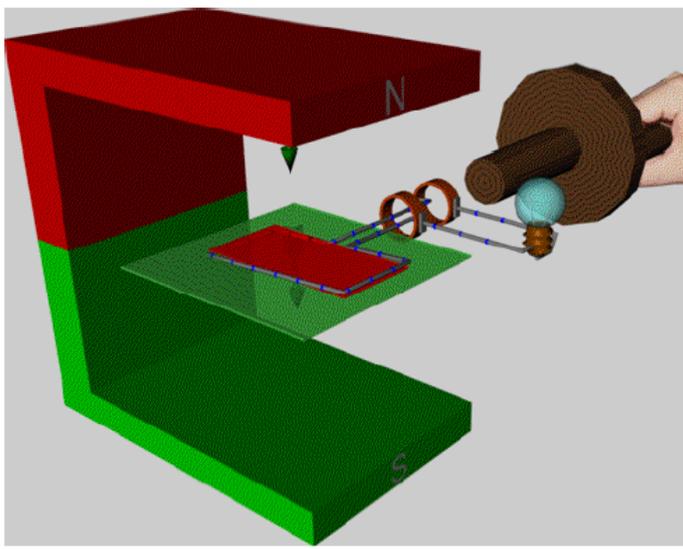
$$E = N \cdot A \cdot B \text{sen } \omega t \cdot \frac{d(\omega t)}{dt} = N \cdot A \cdot B \text{sen } \omega t \cdot \omega$$

Siendo $E_{\max} = N \cdot A \cdot B \cdot \omega$, con lo cual queda:

$$E = E_{\max} \cdot \text{sen } \omega t$$

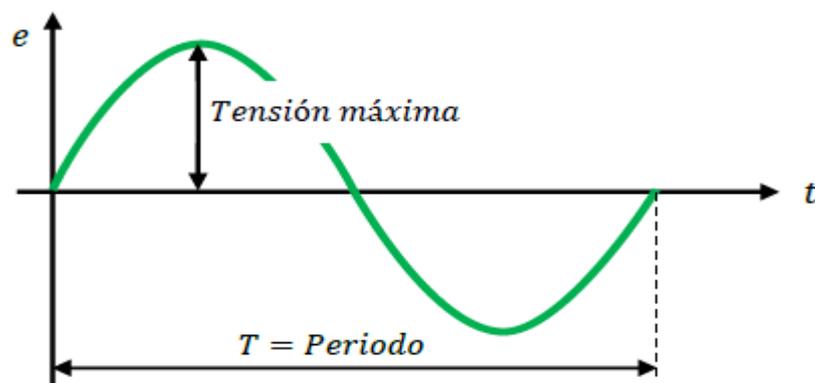
La fem generada tiene la forma:





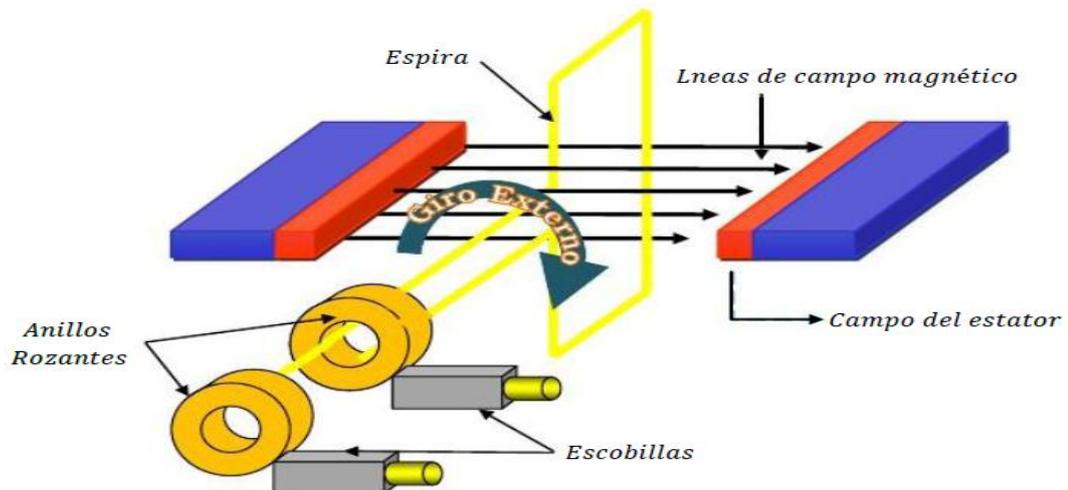
Se pueden identificar en ella los siguientes parámetros: la tensión máxima, tanto para el semiciclo positivo como para el negativo y el período T. Por otro lado, la inversa

del período permite obtener la frecuencia de la corriente alterna cuya unidad es el Hz.



La forma de funcionamiento básica de un generador monofásico se muestra en la siguiente figura, la forma de la onda de voltaje o corriente que se obtiene es

de tipo senoidal, con la mitad de la onda positiva y la mitad negativa, debido a la inversión de la corriente durante la mitad del giro de la espira dentro del generador, este tipo de onda se muestra en la figura anterior.

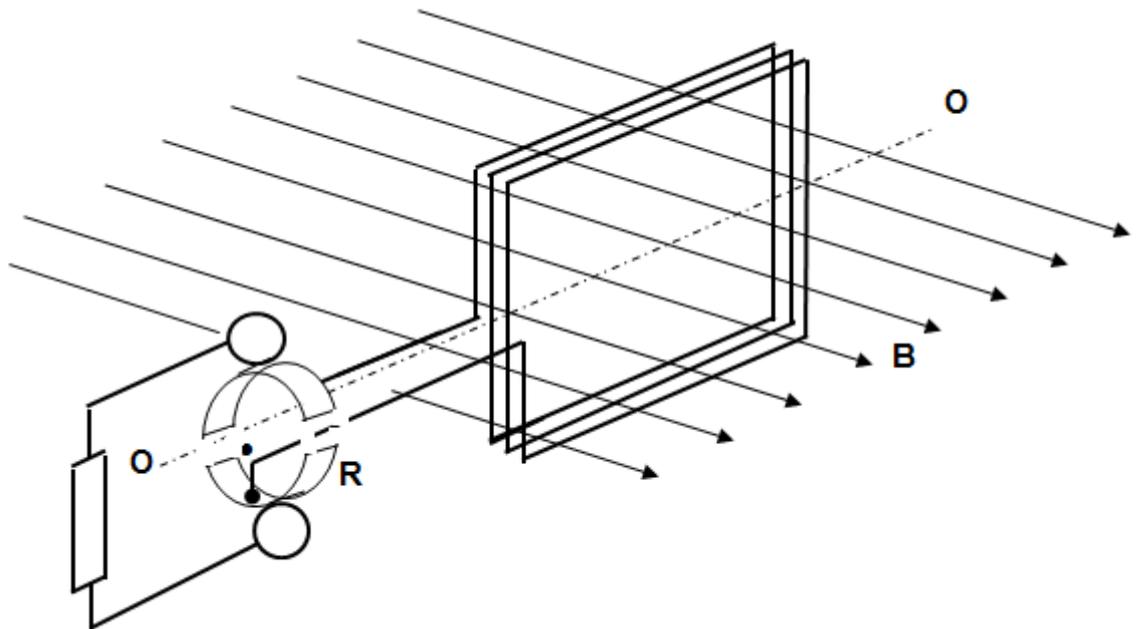


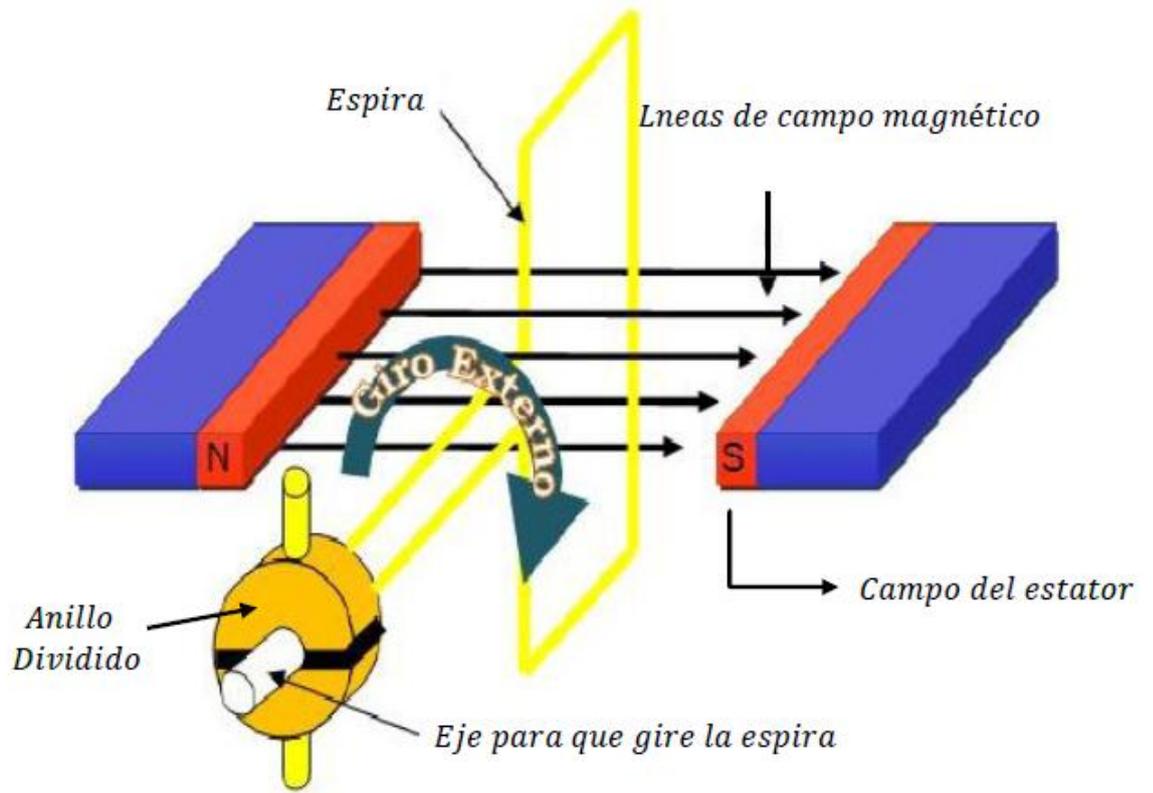
Corriente Continua

La generación de corriente se hace de manera que se obtiene una onda senoidal, lo que no es conveniente para máquinas eléctricas que trabajen con CC.

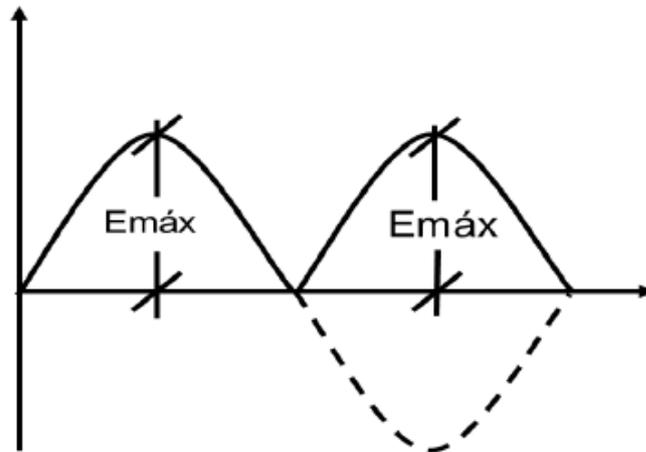
Si una bobina gira entre dos polos magnéticos fijos, la corriente en la bobina circula en un sentido durante la mitad de cada revolución, y en el otro sentido durante la otra mitad.

Para producir un flujo constante de corriente en un sentido, o corriente continua, en un aparato determinado, es necesario disponer de un medio para invertir el flujo de corriente fuera del generador una vez durante cada revolución. En los generadores antiguos esta inversión se llevaba a cabo mediante un conmutador, un anillo de metal partido montado sobre el eje de una bobina. Las dos mitades del anillo se aislaban entre sí y servían como bornes de la bobina. Las escobillas fijas de metal o de carbón se mantenían en contacto con el conmutador, que al girar conectaba eléctricamente la bobina a los cables externos. Cuando la armadura giraba, cada escobilla estaba en contacto de forma alternativa con las mitades del conmutador, cambiando la posición en el momento en el que la corriente invertía su sentido dentro de la bobina. Así se producía un flujo de corriente de un sentido en el circuito exterior al que el generador estaba conectado. En algunas máquinas más modernas esta inversión se realiza usando rectificadores de diodos semiconductores o tiristores. En la figura se muestra un generador de corriente directa.



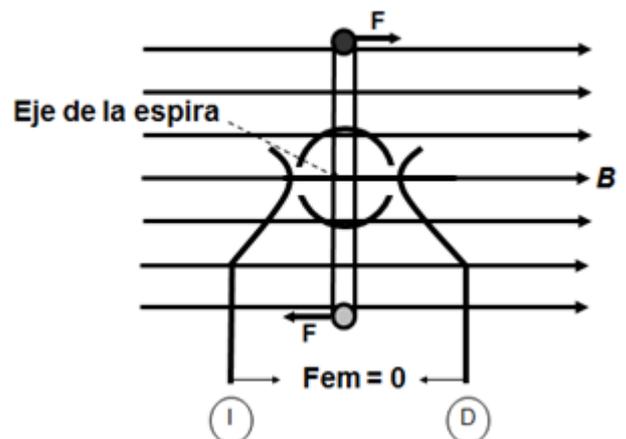


La fem que se obtiene es de un solo sentido, pero pulsante:

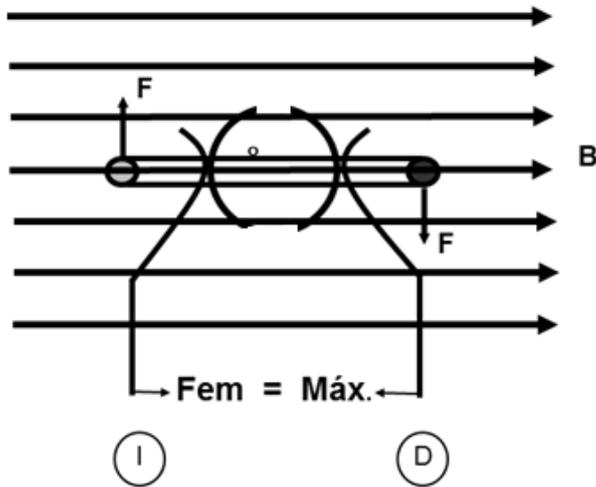


La conmutación para que los semiciclos tengan siempre el mismo sentido, se produce cuando la fem inducida se invierte. Para demostrarlo, recuérdese la expresión obtenida de la fem inducida:

$$e = E_{máx} \text{ sen } \omega t$$

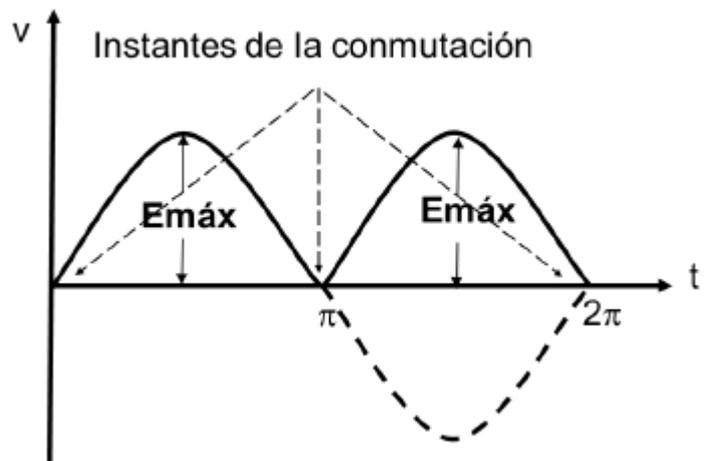


En ella, cuando el ángulo que forman la fuerza y el campo magnético es nulo, es decir $\omega t = 0^\circ$, la tensión es nula.

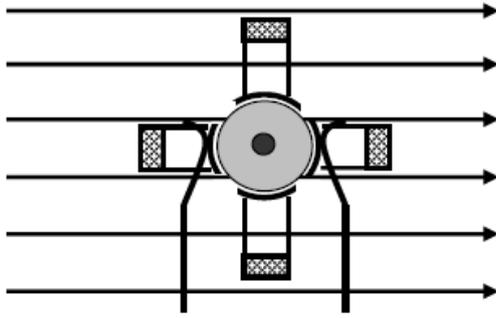


Cuando el ángulo que forman la fuerza y el campo magnético es de 90° , es decir $\omega t = 90^\circ$, la tensión es máxima

Del análisis de las figuras precedentes, se observa que cuando la espira es perpendicular al campo B , las escobillas reciben 0 Volt, denominando a esta operación conmutación porque se produce la inversión de la función en el instante en que la tensión es nula, y un pequeño ángulo después la escobilla (I) (izquierda), queda conectada a la mitad superior y la (D) (derecha) a la mitad inferior y esto hace que la tensión senoidal salga en el mismo sentido que la anterior, entregando una corriente continua y pulsante



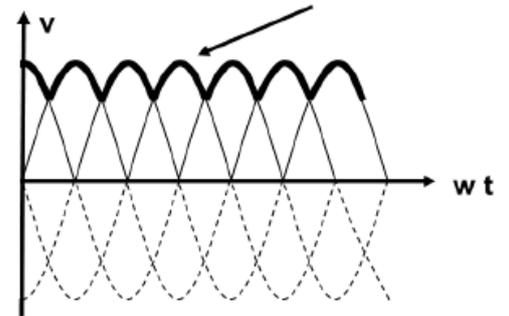
En los generadores reales, se colocan varias bobinas de caladas algunos grados entre ellas, y cada extremo de cada una va conectada a dos porciones de anillo colocados a 180° entre sí



En esta figura se han colocado solamente dos bobinas a 90°. Al dispositivo que soporta a los semianillos, se lo denomina colector y a los semianillos delgas.

En la siguiente figura se expone la salida del generador elemental con dos cuadros o bobinas decaladas 90°, la envolvente es la CC. Nótese que por cada vuelta del conjunto de bobinas se generan dos senoides decaladas a 90° cada una, o sea que en los 360° mecánicos se generan dos ciclos completos, observando que por la disposición del colector la salida es la corriente continua pulsante

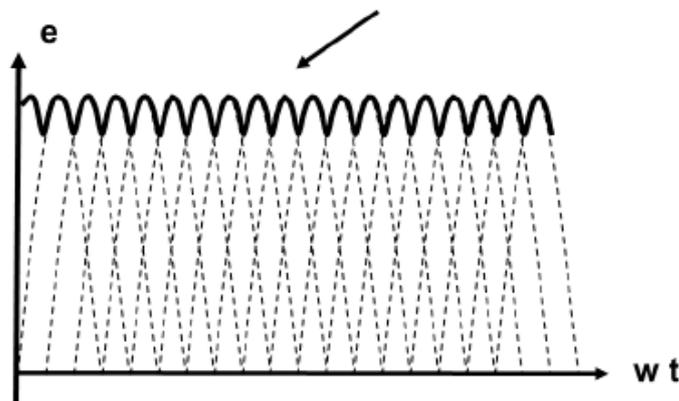
La envolvente es la salida que se obtiene entre las escobillas.



Si se colocaran más bobinas la envolvente es prácticamente una corriente continua ideal. En realidad, lo que hace el colector es rectificar a la corriente alterna.

En la siguiente figura, se observa la salida del generador conformada por la envolvente que se corresponde con los máximos de cada semi-senoide, ya que cuando cada bobina es paralela al campo magnético, la tensión en ella es máxima y ese valor es el que toman las escobillas. La tensión que generan estas máquinas, denominadas dínamo, es prácticamente una corriente continua pura.

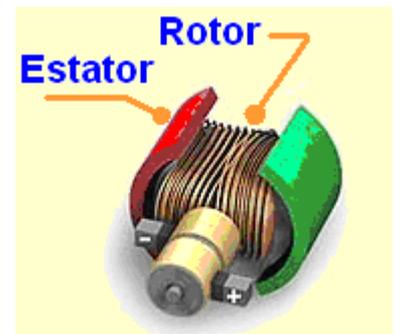
La envolvente es la salida que se obtiene entre las escobillas.



Componentes del generador.

En cualquier caso, de generadores grandes o pequeños se distinguen dos partes principales, las cuales a su vez involucran a más piezas, y son: **Rotor** y **Estator**.

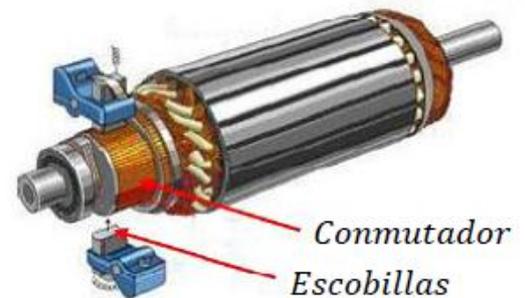
El denominado **Rotor**, es la parte en movimiento y se le denomina también armadura. Cuando se trata de máquinas pequeñas esta es la parte que se encarga de producir la energía eléctrica, mientras que para las máquinas de grandes proporciones es la que se encarga de producir el campo magnético.



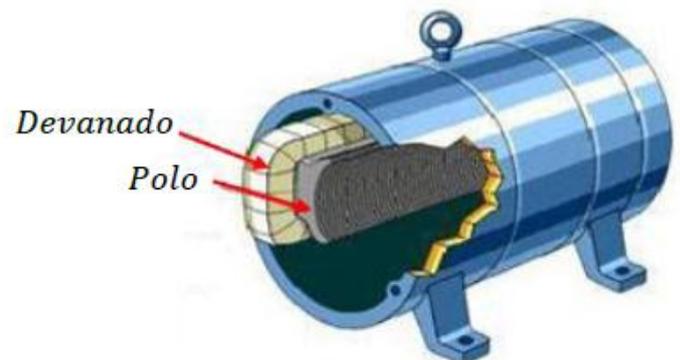
El denominado **Estator** es la parte “quieta”, estática de la máquina. Cuando se trata de máquinas pequeñas esta es la parte que se encarga de producir el campo magnético, mientras que para máquinas de grandes proporciones es la que se encarga de producir la energía eléctrica.

Cabe mencionar que para máquinas pequeñas el campo magnético puede ser creado por un imán natural (hierro magnético) mientras que para máquinas grandes el campo magnético se crea artificialmente arrollando conductor de cobre en hierro magnético haciendo pasar una corriente eléctrica por él.

- Inducido o rotor: es el rotor con sus arrollamientos y el colector.

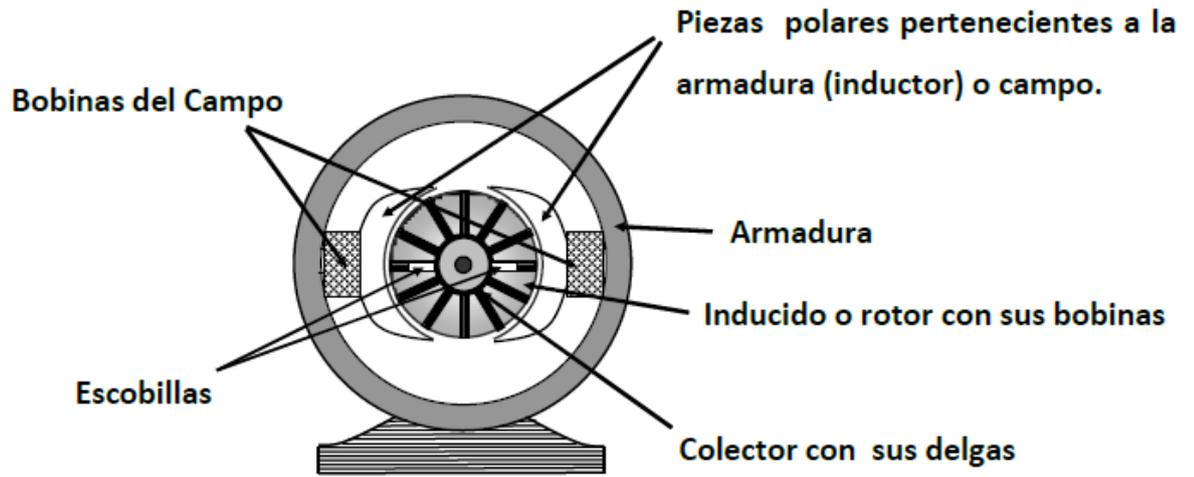


- Inductor, campo o excitación y también en algunos casos, estator: es el campo magnético, que en todos los generadores se produce mediante una CC.



Ahora bien, para que el campo magnético sea efectivo en el inducido, los arrollamientos se ubican sobre un núcleo de hierro dulce laminado, de tal forma que el campo esté obligado a seguir un camino de baja permeabilidad magnética y así aumentar el rendimiento del generador.

En la figura se esquematiza un generador



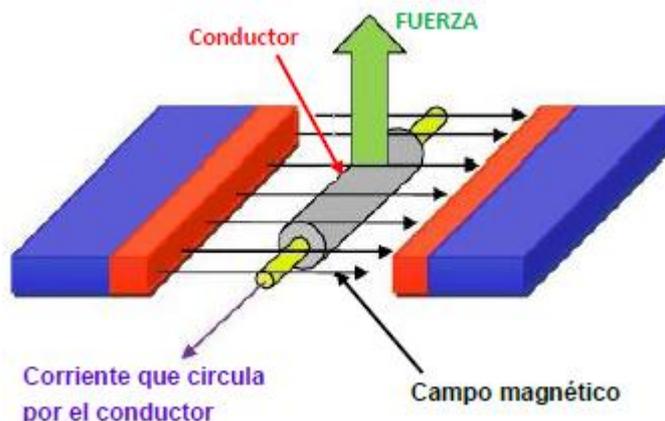
Motores

El motor eléctrico es la máquina más utilizada para transformar energía eléctrica en energía mecánica, pues combina las ventajas de la utilización de energía eléctrica (bajo costo, facilidad de transporte, limpieza y simplicidad de comando) con su construcción simple y robusta a bajos costos con gran versatilidad de adaptación a los más variados tipos de cargas.

- Los motores de corriente continua son motores con costo más elevado pues necesitan de una fuente de corriente continua, o de un dispositivo que convierta la corriente alterna en corriente continua. Este tipo de motor se utiliza en casos especiales.
- Los motores de corriente alterna son los más utilizados, porque la distribución de energía eléctrica es hecha en corriente alterna.

Conceptos generales de los motores eléctricos.

Los motores eléctricos operan bajo el principio de que un conductor colocado dentro de un campo magnético experimenta una fuerza cuando una corriente circula por el mismo como se ve en la figura. El principio de funcionamiento de un motor se basa en la ley de Laplace.



La magnitud de la fuerza varía directamente con la intensidad del campo magnético y la magnitud de la corriente que circula por el conductor, de acuerdo con la expresión:

$$F = B * I * L$$

Fuerza electromagnética ejercida sobre un cable conductor.

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

$$F = B * l * I * \text{Sen } \alpha$$

Donde:

- F = fuerza en Newtons
- I = corriente en circulación
- B = flujo magnético Weber/m² o Tesla
- L = longitud del conductor en metros
- α = ángulo que forma el conductor y la dirección del campo magnético

En el caso que hubiera 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:

$$F = N * B * l * I * \text{sen } \alpha$$

En la figura siguiente se ve la regla de la mano izquierda que permite determinar el sentido de la fuerza que actúa sobre el conductor.



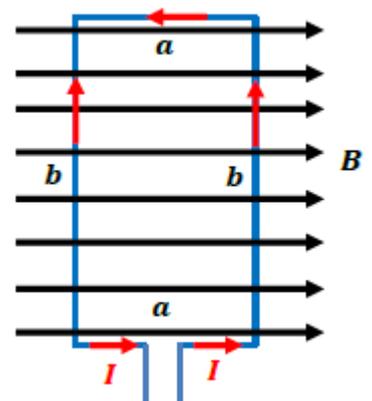
Ya hemos visto cómo es la fuerza que aparece sobre un hilo conductor recorrido por una corriente I, que está presente en un campo B, pero... ¿Cómo será en una espira?

Sea B un campo de inducción magnético que actúa sobre una espira que es recorrida por una corriente eléctrica de intensidad I . ¿Qué pasará? Es de esperar que surjan fuerzas sobre la espira, pero ¿Cómo serán? Recurriremos a la expresión:

$$F = B * L * I * \text{sen } \alpha$$

La figura representa a la espira rectangular (color azul) cuyos lados miden "a" y "b" 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" que está en el mismo plano que la espira,



tal como indica la flecha de color negro 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, en un lado tiene el mismo sentido y en el otro sentido contrario, (no es lo mismo la dirección que el sentido), ambas magnitudes forman un ángulo nulo (0°) o 180° . La longitud del conductor es $L = a$. Por ello la fuerza en ambos lados “a” es:

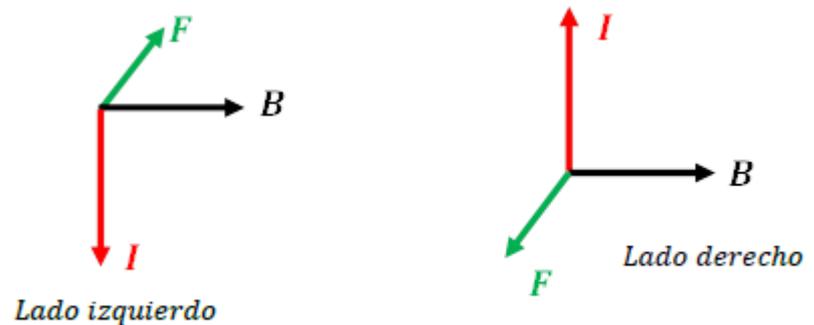
$$F = B * a * I * \text{Sen } \alpha = B * a * I * \text{Sen } 180^\circ = 0$$

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 $L = b$. Por ello la fuerza en ambos lados “b” es:

$$F = B * b * I * \text{Sen } \alpha = B * b * I * \text{Sen } 90^\circ = B * b * I$$

$$F = B * b * I * \text{Sen } \alpha = B * b * I * \text{Sen } 180^\circ = B * b * I$$

Las fuerzas en los lados “b”, son de igual valor y empleando la regla de la mano derecha se puede comprobar que son de sentido contrario. 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:

$$M = I * S * B * \text{sen } \alpha$$

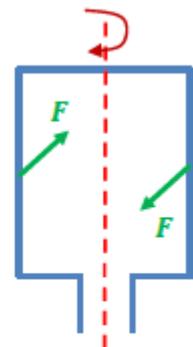
Dónde $M =$ momento de fuerzas o par motor (Newton . metro)

$I =$ intensidad de corriente (A)

$S =$ Superficie de la espira (m^2)

$B =$ Inducción de campo magnético (Tesla)

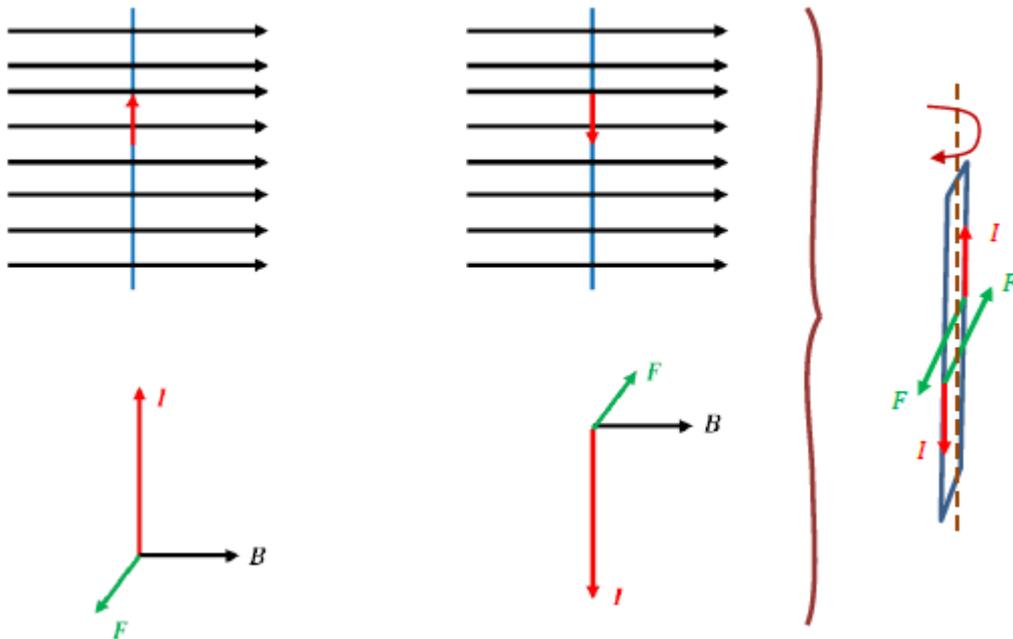
$\alpha =$ ángulo formado por la superficie de la espira y las líneas de campo magnético



En general el rotor de un motor eléctrico queda dentro del campo magnético creado por el estator. Se induce una corriente dentro del rotor y la fuerza resultante (y por lo tanto el par) produce la rotación.

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

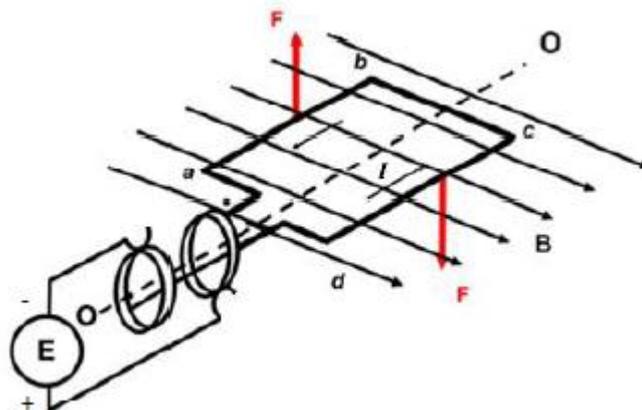
$$M = N * I * S * B * \text{sen } \alpha$$



Cuando la espira gira un ángulo próximo a 90° ambas fuerzas siguen existiendo ya que la corriente y el campo magnético no han cambiado. Lo que sí ha disminuido es la distancia entre ambas fuerzas disminuyendo el par.

En el instante en que la espira ha girado 90° ambas fuerzas tienen la misma dirección (están sobre la misma recta de acción) por lo que el par se anula (distancia cero).

En la siguiente figura se observa una espira que gira sobre un eje O - O adentro de un campo magnético B. En dicha bobina se introduce una corriente I mediante el generador E de CC.

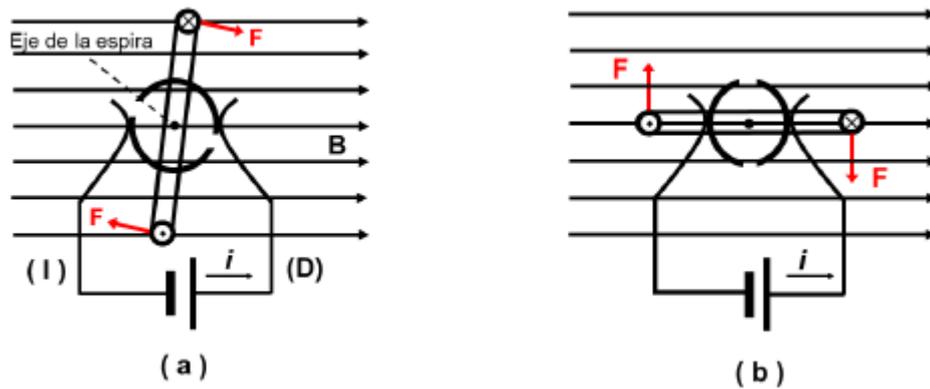


Un extremo del cuadro va conectado a un anillo conductor (delga) y el otro a otro anillo. Sobre ellos apoyan sendas escobillas que van conectadas a un generador de CC, con las polaridades que se observan en el dibujo.

Las espiras al dar media vuelta encuentran que el sentido de la corriente es inverso por lo que aparecerá una cupla inversa, imposibilitando a este motor elemental a continuar girando.

Se debe lograr que en la rama “d- c” de la derecha siempre la corriente suba y en el lado “b -a” de la izquierda la corriente baje. Para ello se coloca un solo anillo seccionado en dos similar al generador. Con ello cada vez que el cuadro de media vuelta, se encuentra

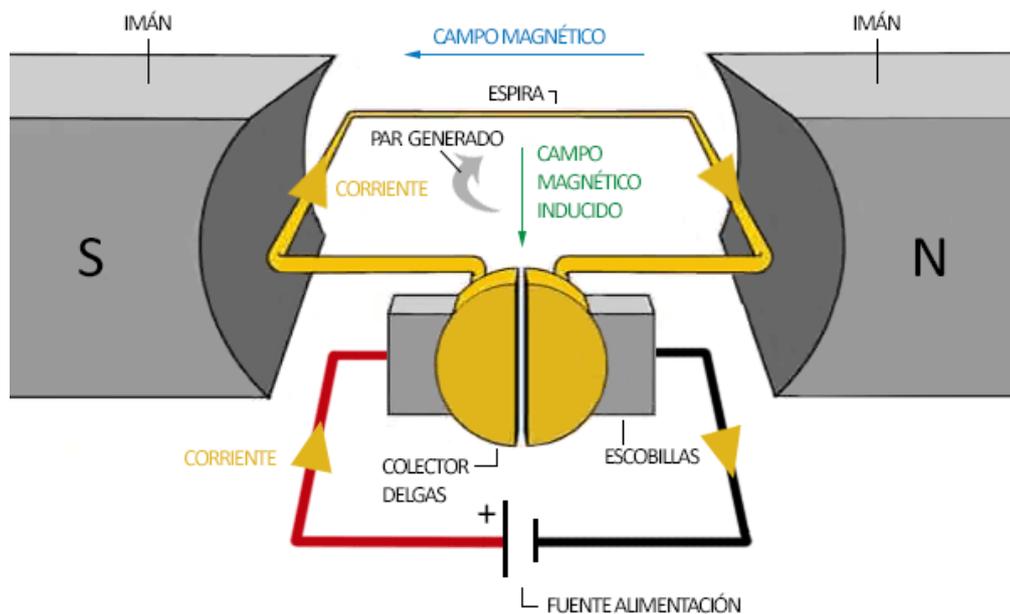
nuevamente con el mismo sentido de la corriente y la cupla posee también la misma dirección por lo que el cuadro comienza a girar. La inercia que trae la bobina hace que siga girando en el mismo sentido.



En la figura se ha esquematizado la posición de las delgas (semi anillos) y además se indica la circulación de la corriente. En el esquema (a) se observa que la delga superior (D) ha comenzado a rozar la escobilla correspondiente al lado superior del cuadro y la corriente que circula por dicha espira de tal forma que se observa en el corte de ella la corriente que se dirige en forma perpendicular al papel, hacia adentro, representada por la cola de una flecha indicadora del sentido de esta. En la otra mitad de la espira se puede observar que la corriente sale.

En el cuadro, inmediatamente sale de la posición perpendicular al campo, aparece una cupla que lo obliga a girar, figura (a).

Dicha cupla es máxima en la posición paralela del cuadro al campo figura (b). Por influencia de la fuerza, el cuadro continúa girando hasta llegar al instante anterior al representado en la figura (a). Por inercia, el cuadro continúa girando y se produce la conmutación que hace que la corriente tenga el sentido que se expone en ella.



Potencia y par de un motor eléctrico.

La potencia mecánica de los motores se expresa en caballos de fuerza (HP) o Kilowatts, medidas que cuantifican la cantidad de trabajo que un motor eléctrico es capaz de realizar en

un periodo específico de tiempo. Dos factores importantes que determinan la potencia mecánica en los motores son: el par y la velocidad de rotación.

El par es una medida de la fuerza que tiende a producir la rotación, se mide en Newtonmetro o Libras-pie. La velocidad del motor se establece comúnmente en revoluciones por minuto (RPM). La relación entre la potencia, el par y la velocidad se da por la siguiente expresión:

$$\text{Potencia} = \text{Velocidad} * \text{Par}$$

A menor velocidad existe mayor par para entregar la misma potencia, entonces los motores de baja velocidad necesitan componentes más robustos que los de alta velocidad para igual potencia nominal.

CUESTIONARIO

1. ¿Qué tipo de corriente se obtiene en un generador básico?
2. ¿En qué elemento se extrae la corriente en el generador?
3. ¿Qué es el rotor y qué el estator?
4. ¿Cómo se obtiene CC en un generador? Explique cómo se logra.
5. ¿Con cuál mano se determina el sentido de circulación de la corriente en la espira? Explique.