

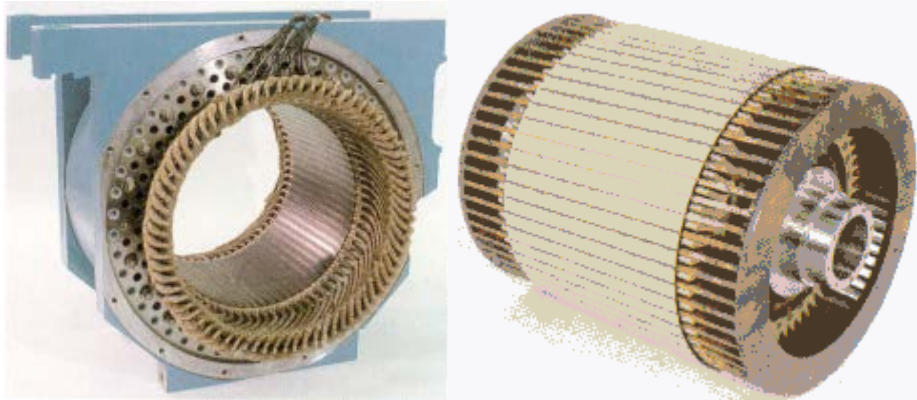
## MOTOR TRIFÁSICO

Estos motores están compuestos por dos armaduras coaxiales: una de ellas es un cilindro giratorio, llamado rotor, que va a transmitir la fuerza a través de un eje.

El rotor puede girar, soportado por cojinetes, en el hueco de un cuerpo fijo, llamado estator.

La separación entre estator y rotor se denomina entrehierro, dado que estator y rotor están constituidos por chapas de acero de elevada permeabilidad magnética, apta para favorecer el establecimiento de un campo magnético intenso.

Los conductores del estator son bobinas ubicadas en ranuras, que forman un devanado trifásico. Este devanado se conecta a la red por medio de bornes agrupados en una caja.

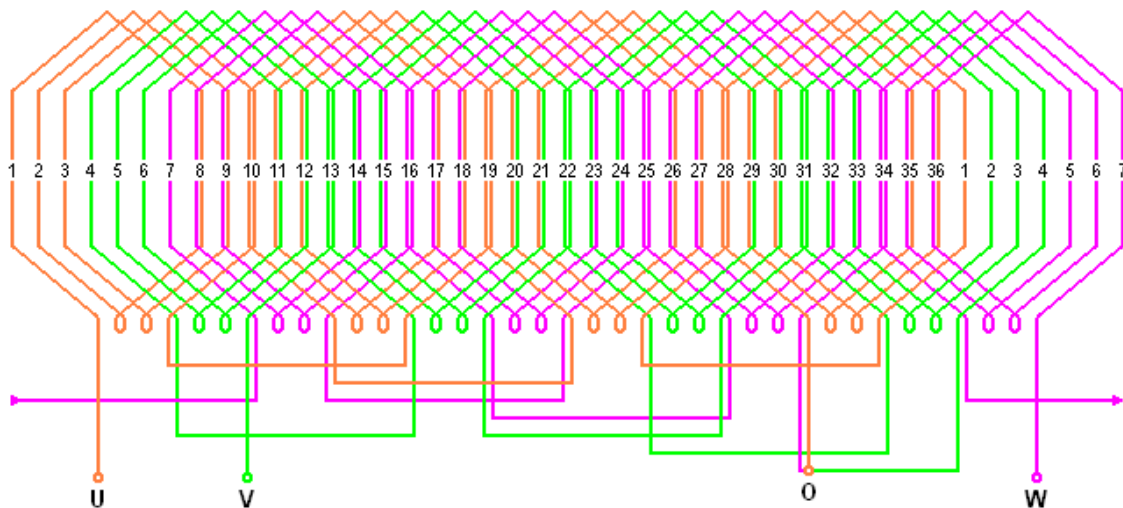


Estator y rotor de un motor de tracción trifásico

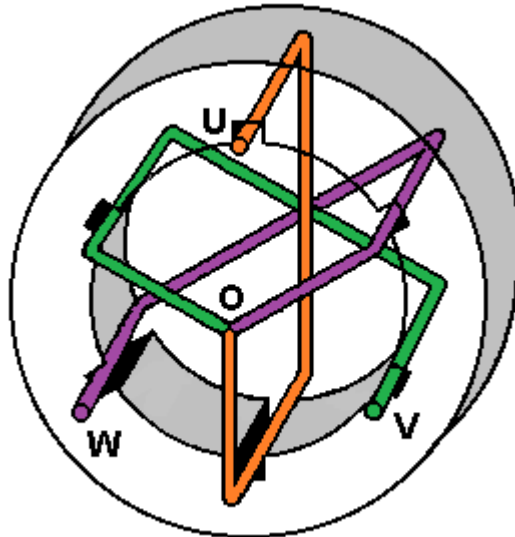
En el rotor, el devanado se sustituye por barras de cobre o de aluminio alojadas en ranuras y unidas en sus extremos por dos anillos del mismo material.

El rotor no está ligado conductivamente a ninguna fuente de energía, ya que la corriente en las barras es inducida por el campo rotante generado por el devanado trifásico del estator.

Las fuerzas se originan por la interacción entre el campo rotante y las corrientes inducidas en los conductores del rotor.



Devanado del estator de un motor de tracción: 3 fases, 4 polos, 3 bobinas por polo, 6 espiras por bobina.



Devanado elemental: cada devanado de fase se representa por una sola espira

### CAMPO ROTANTE

Observando el devanado trifásico de la figura, se ve que las bobinas cubren toda la superficie interior del estator. No obstante, a fin de facilitar la explicación, el devanado real puede reemplazarse por un devanado elemental, compuesto por tres espiras, cuyos lados homólogos (correspondientes a principio y fin de bobina) están ubicados a una distancia de  $1/3$  de la circunferencia interior del estator.

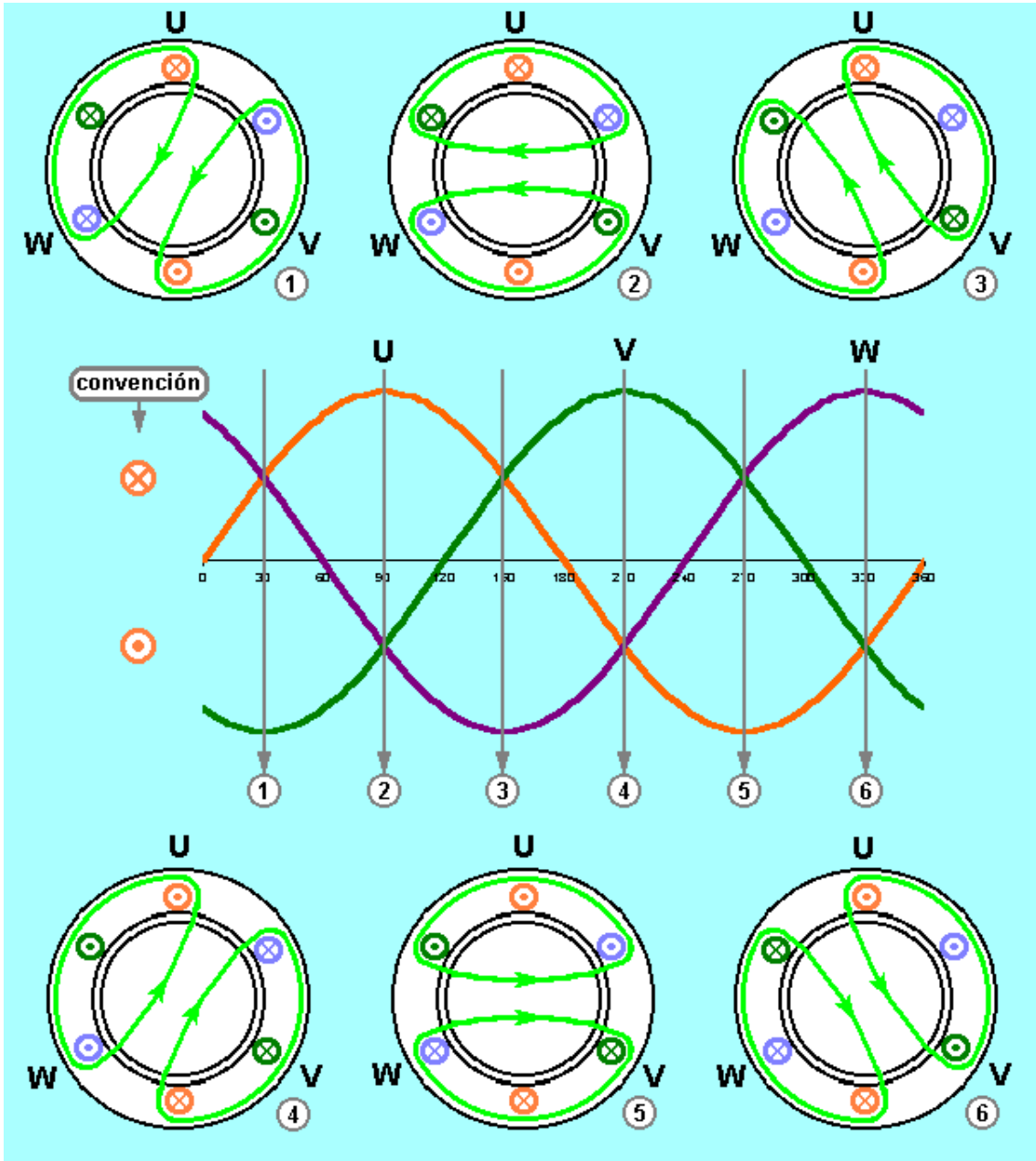
El principio de cada espira está conectado a una de las fases de un sistema de tensiones trifásico. Los fines de espira se unen entre sí, en un punto neutro común a todas.

Al aplicar el sistema de tensiones trifásicas, que están desfasadas en el tiempo  $1/3$  de período, producirán la circulación de corrientes, y por consiguiente, habrá un campo magnético asociado alrededor de cada conductor.

Para determinar el sentido del campo magnético que corresponde a cada circulación de corriente debe utilizarse la regla del tornillo de mano derecha ilustrada en la figura: si el pulgar sigue el sentido de la corriente, los dedos indican el sentido del campo magnético. Este sentido, indicado por la flecha sobre la línea de campo, es el que indicaría el polo norte de una aguja magnética si se ubicara en ese mismo lugar.



Regla del tornillo



Generación de un campo rotante

Ahora puede analizarse lo que ocurre al conectar el motor. La figura, en su parte central representa la variación en el tiempo del sistema de corrientes trifásicas. Es necesario tener en cuenta la siguiente convención: si la corriente tiene un valor positivo, en el principio de bobina la corriente está entrando (cola de flecha). Si la corriente tiene un valor negativo, en el principio de bobina la corriente está saliendo (punta de flecha). Lo contrario ocurre para los fines de bobina (punto neutro).

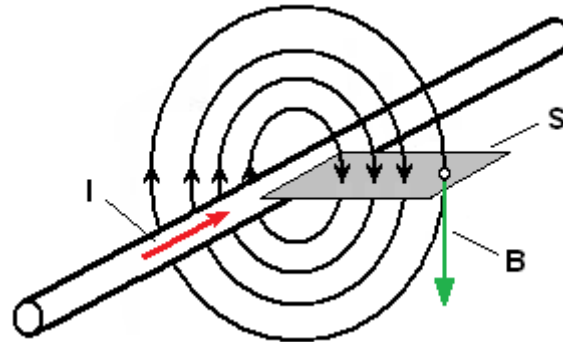
Respetando esta convención para cada instante de tiempo, que arbitrariamente se han elegido del 1 al 6, se marcan los sentidos de las corrientes en las espiras del estator.

De acuerdo a la regla del tornillo de mano derecha se marcan las líneas del campo magnético que rodea a las corrientes de un mismo sentido en cada instante. Se observa que el campo magnético va ocupando posiciones sucesivas como si efectivamente fuera un campo originado por una bobina giratoria.

Un período de la fase U se ve en el esquema de corrientes, y si continuáramos el dibujo del campo magnético en el motor con los mismos intervalos, observaríamos que la posición 7 hubiera coincidido con la 1, completando también un período. Esto nos permite

concluir que para esta máquina bipolar, el campo rotante gira con la misma frecuencia de la tensión de alimentación.

#### Campo magnético originado por una corriente



Cuando circula corriente por un conductor, se origina un campo magnético alrededor del mismo. En la figura se han representado algunas líneas que indican la dirección del campo y dan una idea de la intensidad del mismo: si las líneas están muy cercanas, el campo magnético es fuerte, si están muy separadas, el campo es débil.

#### Densidad de flujo B

Para una evaluación más precisa del campo magnético, se lo define mediante un vector B, que cumple con las siguientes condiciones:

- La dirección del vector B en un punto cualquiera está dada por la tangente a una línea de campo en ese punto.
- La longitud del vector está dada por la mayor o menor densidad de líneas del campo.

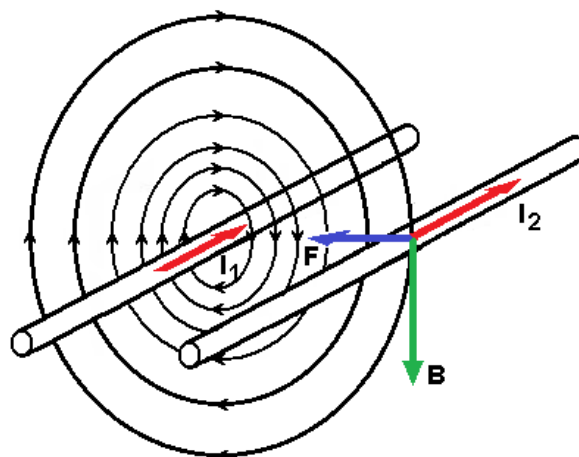
#### Flujo $\Phi$

El flujo del vector B a través de una superficie arbitraria de sección S se define como

$$\Phi = B \cdot S$$

Esta ecuación es válida si B es perpendicular a S.

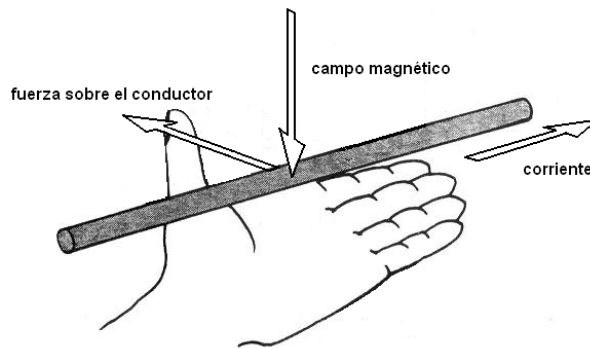
#### Fuerza entre conductores recorridos por corrientes



En la figura se ha representado el campo magnético producido por la corriente que circula por el conductor 1. Este campo magnético, al interactuar con la corriente del conductor 2, dará origen a una fuerza de atracción entre los dos conductores.

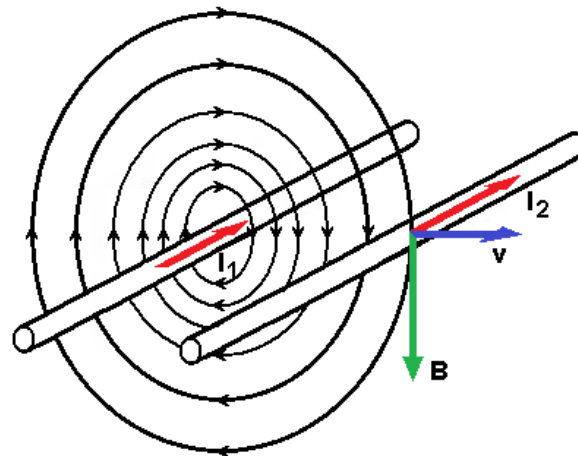
Una forma de recordar la dirección de la fuerza producida por la interacción entre campo y corriente, es utilizar la regla de la mano izquierda: disponiendo la mano de manera

que las líneas de campo penetren en la palma y la punta de los dedos indiquen la dirección de la corriente, el pulgar da la dirección de la fuerza.



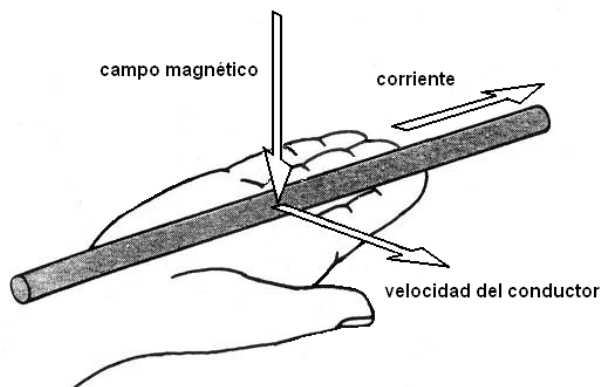
Regla de la mano izquierda

Tensión inducida en un conductor que se mueve respecto al campo magnético



La figura representa el caso de un conductor 2 que se mueve con velocidad  $v$  respecto al campo magnético originado por la corriente en el conductor 1. Debido al movimiento relativo, se inducirá una tensión en el conductor 2 de polaridad tal que hará circular una corriente que trate de atraer a ambos conductores. Es decir, ante la fuerza que tiende a alejar los conductores, la reacción del campo es la de originar una fuerza de atracción.

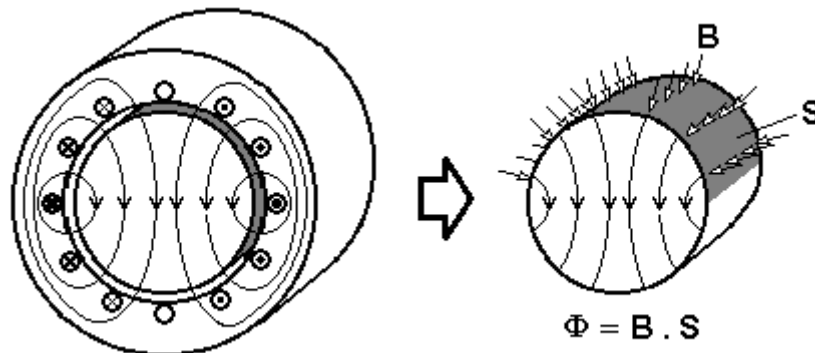
En este caso, la dirección de la corriente que origina la tensión inducida en el conductor 2 está dada por la regla de la mano derecha: disponiendo la mano de manera que las líneas de campo penetren en la palma y el pulgar en el sentido de la velocidad del conductor respecto al campo, la punta de los dedos indica la dirección de la corriente.



Regla de la mano derecha

## TENSIÓN INDUCIDA EN EL ROTOR

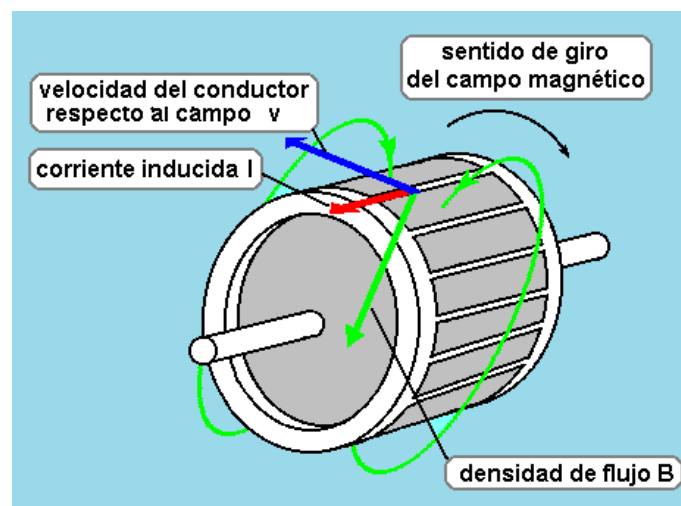
A fin de reforzar la imagen del campo magnético originado por las bobinas del estator, se ha representado en la figura el flujo del vector  $B$  en el entrehierro de la máquina. Dado que se trata de un campo magnético rotante, debe entenderse que el dibujo se refiere a un determinado instante de tiempo.



Como las reglas anteriores se referían a un conductor en movimiento respecto a un campo magnético fijo, debe tenerse en cuenta que en este caso es el campo el que se mueve. En consecuencia, deberá considerarse la velocidad del conductor respecto al campo (de sentido inverso a la velocidad del campo con respecto al conductor).

Cuando el rotor está inmóvil, es recorrido por el campo magnético con la frecuencia de la tensión de alimentación. Por ejemplo, si la frecuencia fuera de 50 ciclos/segundo (Hertz), la velocidad del campo para una máquina bipolar sería de 3000 rpm.

La tensión que se induce en cada una de las barras del rotor, hace circular corriente por las mismas, dado que están unidas por anillos en los extremos del rotor. El sentido de la corriente inducida, debe determinarse con la regla de la mano derecha según la figura.



La tensión inducida es proporcional a la densidad de flujo  $B$  y a la velocidad del campo magnético  $v$ .

$$E \sim B \cdot v$$

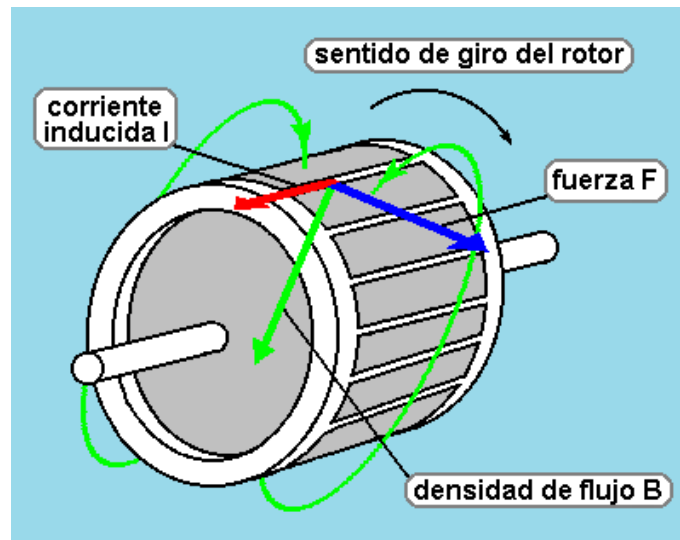
Expresando lo anterior en función de parámetros electrotécnicos, se tiene la expresión equivalente

$$E \sim \Phi \cdot n$$

La tensión inducida es proporcional al flujo y a la velocidad de giro del campo.

## PAR EN EL ROTOR

Ahora bien, se ha originado una circulación de corriente en las barras del rotor, que interactuando con el campo rotante originarán una fuerza, perpendicular al plano de ambas, según la regla de la mano izquierda.



Se observa en la figura que esa fuerza tiende a originar un movimiento que sigue al campo.

La fuerza en un conductor es proporcional a la densidad de flujo  $B$  y a la corriente  $I$ .

$$F \sim B \cdot I$$

Designando con  $T$  al par (fuerza por brazo de palanca) y utilizando el flujo:

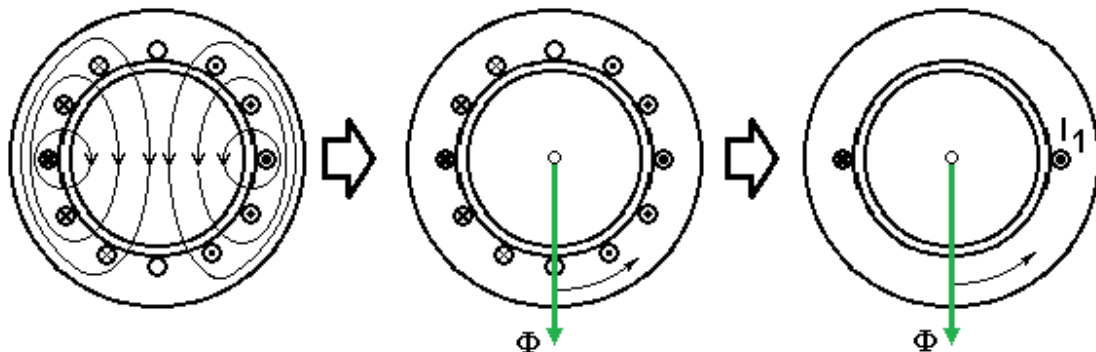
$$T \sim \Phi \cdot I$$

El par es proporcional al flujo y a la corriente.

Resumiendo:

- Bobinas desfasadas  $1/3$  de período en el espacio y tensiones desfasadas  $1/3$  de período en el tiempo originan un campo rotante.
- Este campo induce tensiones, que hacen circular corrientes en las barras del rotor.
- Estas corrientes, al interactuar con el campo, producen fuerzas en el sentido de rotación del campo, que producen el movimiento del rotor.

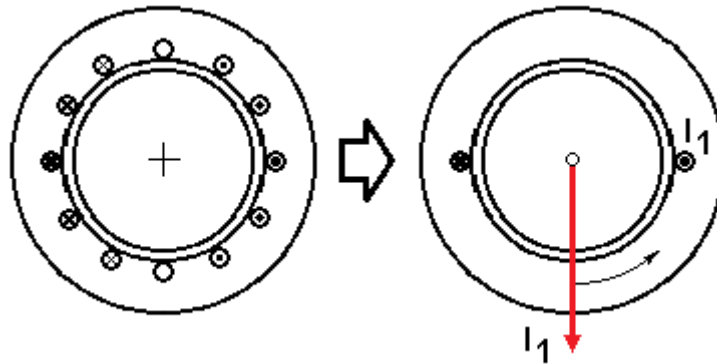
## CONVENCIÓN CON RESPECTO AL FLUJO Y LA CORRIENTE



Si se supone el estator conectado a una red trifásica, las corrientes en el mismo dan origen a un campo magnético rotante, como se explicó anteriormente.

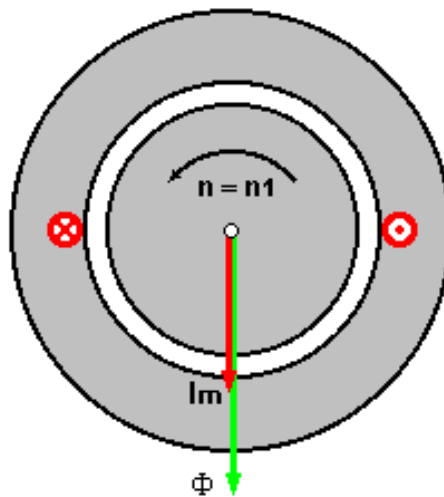
El flujo giratorio y de valor constante puede representarse mediante un vector giratorio en el espacio, con un sentido que corresponda a la aplicación de la regla del tornillo para las corrientes del estator que dan origen al campo en un instante determinado.

Por último, se puede representar la distribución de corrientes en el devanado del estator por una sola espira, cuya corriente sea la que da origen al campo magnético.



De la misma manera, puede representarse la corriente del estator mediante un vector giratorio en el espacio, considerando una sola espira y aplicando la regla del tornillo para determinar su sentido.

#### CURVA DE PAR EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD



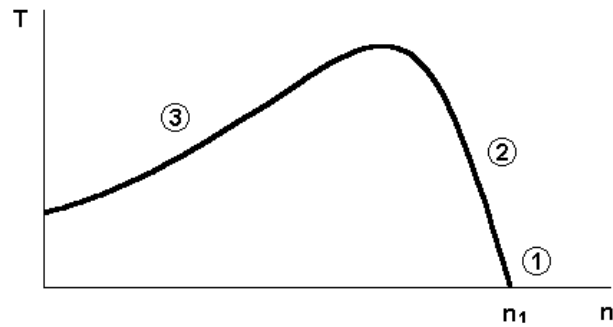
#### Funcionamiento en vacío

Si el rotor gira a la velocidad del campo  $n_1$   
 $n = n_1$

En estas condiciones el campo rotante queda fijo respecto al rotor, no se induce tensión en las barras del rotor y por consiguiente no circulará corriente en el mismo.

Tampoco se originará ninguna fuerza tangencial y el par será nulo (punto 1).



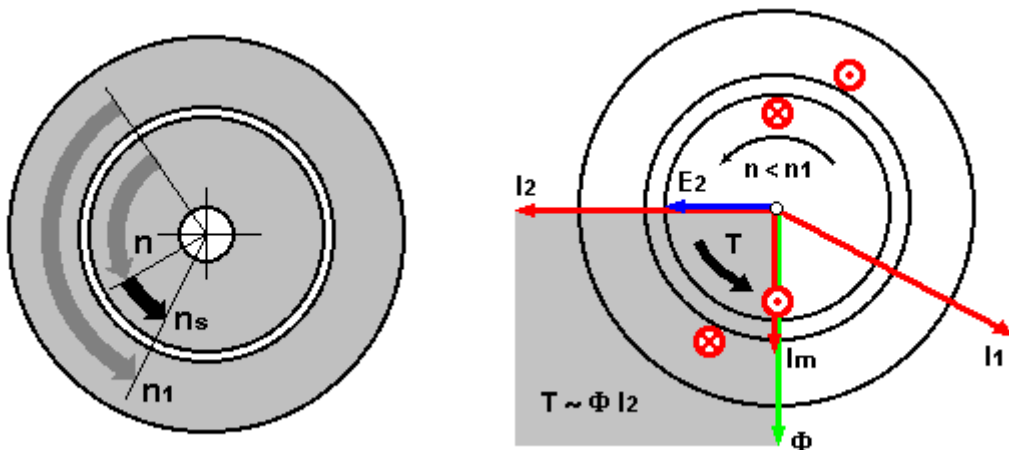


El arrollamiento del estator toma entonces de la red una corriente trifásica  $I_m$  que actúa como corriente de magnetización, para crear el flujo rotante  $\Phi$ .

### Funcionamiento como motor

Si la velocidad de rotación  $n$  es inferior a la del campo  $n_1$ , el flujo  $\Phi$  gira con respecto al rotor a una velocidad relativa  $n_1 - n$ . Esta diferencia de velocidades recibe el nombre de velocidad de deslizamiento  $n_s$ , y su valor referido a la velocidad de sincronismo, deslizamiento  $s$ .

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} 100 \text{ [\%]}$$



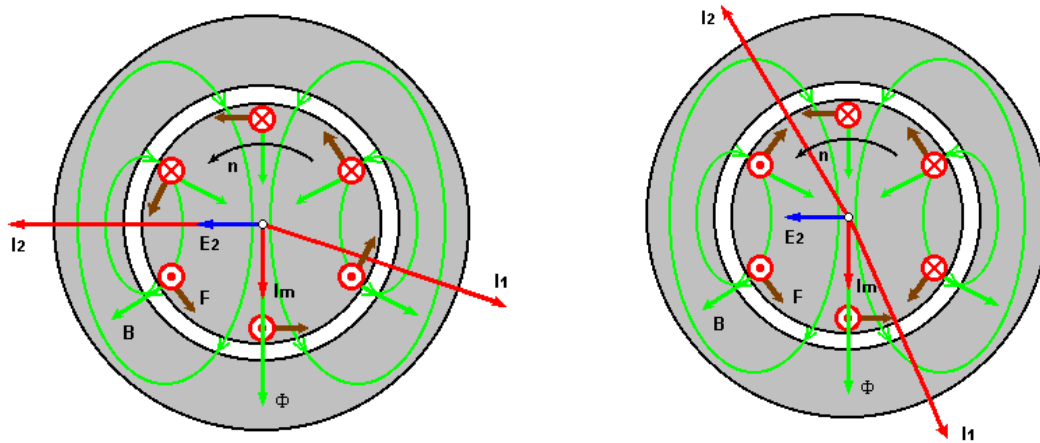
En estas condiciones se inducirán tensiones en las barras del rotor, que de acuerdo a la ley de la inducción, estarán retrasadas en un ángulo de  $90^\circ$  respecto al flujo.

Las tensiones inducidas  $E_2$  harán circular corrientes  $I_2$ , las cuales, si se desprecia la reactancia del rotor, estarán en fase con las tensiones inducidas. Se ha indicado convencionalmente la distribución de las corrientes inducidas mediante un vector en el espacio.

La corriente  $I_1$  que ha de circular por el estator se determina teniendo en cuenta que el flujo  $\Phi$  debe resultar de la acción combinada de  $I_1$  e  $I_2$ , es decir de la suma vectorial de ambas corrientes, y que el valor de  $\Phi$  y por tanto, el de  $I_m$  han de ser aproximadamente iguales en carga que en vacío.

El par originado es proporcional al producto del flujo  $\Phi$  por la corriente secundaria  $I_2$ . Si el deslizamiento aumenta al doble,  $E_2$  e  $I_2$  se duplican y permaneciendo constante  $\Phi$ , el par  $T$  se duplicará. La característica de  $T = f(n)$  es, pues, una recta (zona 2).

Para analizar lo que ocurre cuando sigue incrementándose la carga, representaremos más en detalle las barras del rotor. La primera figura reproduce la condición de carga ya vista. Se ha marcado el sentido del par originado en cada uno de los conductores por la interacción del flujo y la corriente.



Al incrementarse la carga, y con ello el deslizamiento, van aumentando la tensión inducida y la corriente del rotor, y paralelamente, debido al aumento de la reactancia secundaria, originada por el aumento de la frecuencia de deslizamiento del rotor respecto al campo rotante, se va retrasando la corriente  $I_2$  respecto a  $E_2$ .

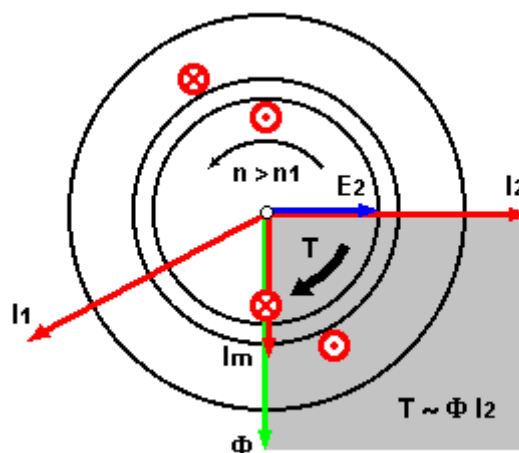
Esto hace que aparezcan conductores de corriente en posición tal respecto al flujo, que el esfuerzo que ejercen es de sentido contrario al de la mayoría restante.

Por el efecto que se ha descrito, a partir de un punto de par máximo, ante todo aumento de carga el par pasa a disminuir hasta la parada del motor (zona 3).

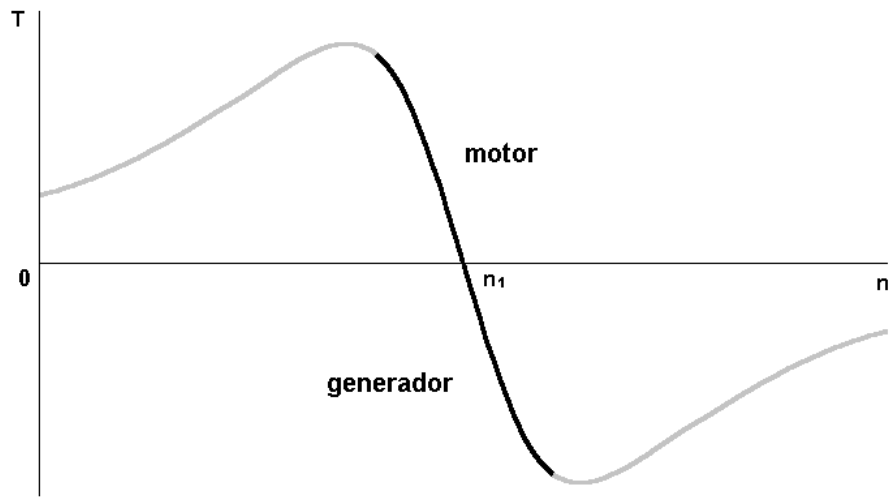
El funcionamiento estable sólo es posible a una velocidad superior a la que produce el par máximo.

En régimen permanente se hace trabajar el motor en la parte estable de la característica, bastante lejos del par máximo, que es el límite de estabilidad, los que da un bajo deslizamiento y un buen rendimiento.

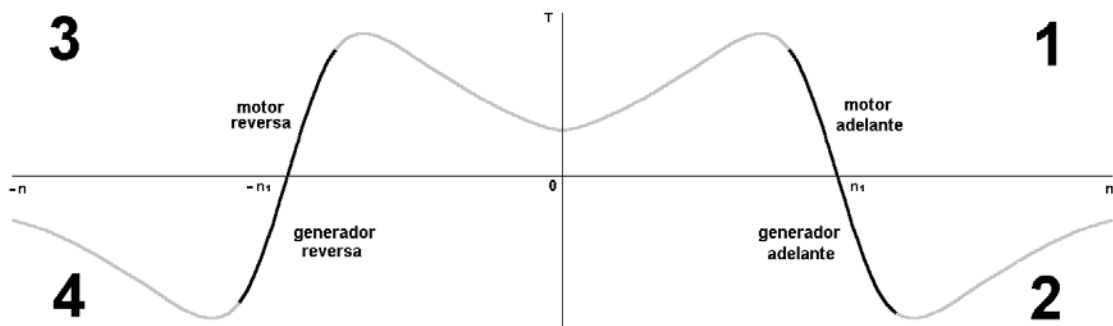
### Funcionamiento como generador



Si la velocidad del rotor es mayor que la del campo rotante ( $n > n_1$ ), el sentido de la tensión inducida en el rotor se invierte respecto al que tenía funcionando la máquina como motor. En consecuencia, se invierten también la corriente inducida en el rotor  $I_2$  y el sentido del par  $T$ . El par actúa entonces contra el sentido de marcha, como par resistente, y es necesario aplicar exteriormente al rotor un par igual y opuesto para que éste continúe girando. Esto equivale a suministrar a la máquina una potencia mecánica que puede transformarse en potencia eléctrica cedida a la red. Por lo tanto, el funcionamiento es el de un generador.



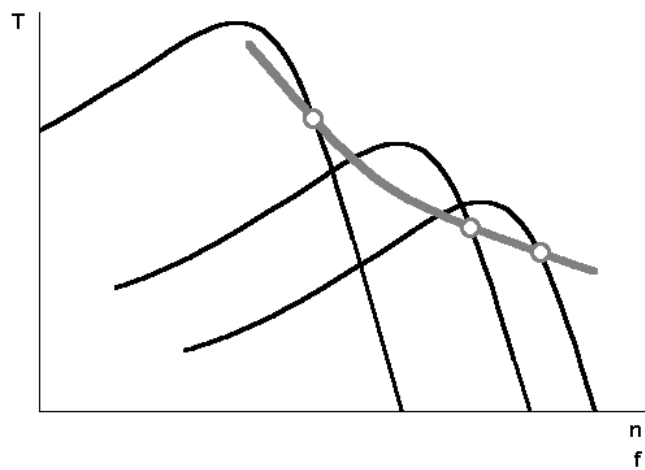
Funcionamiento como motor y como generador



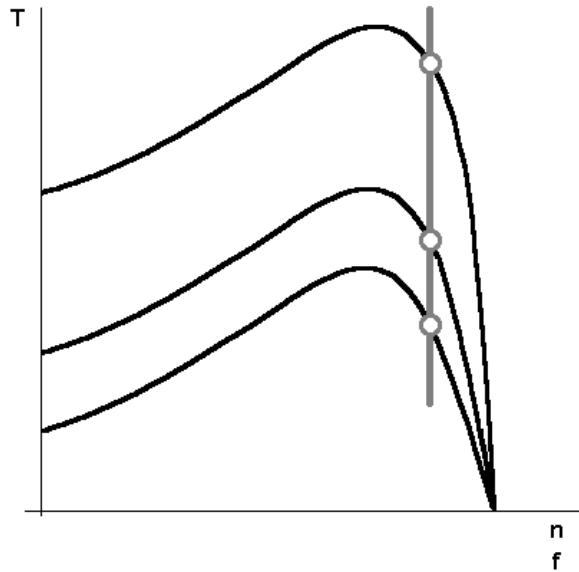
Funcionamiento en los cuatro cuadrantes

**CARACTERÍSTICA PAR-VELOCIDAD**

Si varía la frecuencia, el par varía en forma inversamente proporcional a  $f_2$ .

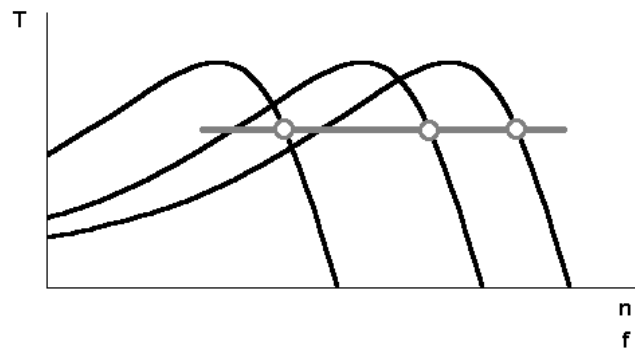


Si varía la tensión aplicada, el par varía en forma directamente proporcional a  $U_2$ .



Si recordamos  $V \sim E \sim f \Phi$ , para que  $\Phi$  permanezca constante, debe cumplirse que la relación  $V/f$  también permanezca constante.

Así, en la parte útil de la curva se obtiene una serie de rectas paralelas.



Para una máquina dada, interesa desarrollar un par motor elevado que tome de la alimentación la menor corriente posible. Se tratará que el flujo sea lo más elevado posible, sin que la corriente magnetizante sea excesiva, por lo que se deberá hacer trabajar el hierro cerca de la saturación magnética y asegurar un flujo máximo constante en los diferentes regímenes de trabajo de la máquina.

Por otra parte, para el caso particular de motores de tracción para vehículos, se requiere generalmente un arranque con aceleración constante, lo que implica par constante.

Si el flujo  $\Phi$  se mantiene constante, y el par también, deberá ser  $I$  también constante, lo que implica que el calentamiento de la máquina será aproximadamente el mismo a diferentes velocidades.