# Motores de corriente alterna

## Autor: Daniel Sosa

mailxmail.com

# Presentación del curso

Un motor es una máquina motriz, es decir, un aparato que convierte una forma cualquiera de energía en energía mecánica de rotación o par. Un motor eléctrico convierte la electricidad en fuerzas de giro por medio de la acción mutua de los campos magnéticos.

En este curso aprende sobre los motores eléctricos que funcionan con corriente alterna. A lo largo de los capítulos podrás conocer sobre el motor asincrónico trifásico, el funcionamiento de un motor elemental, los aspectos relacionados con la estructura del motor y muchos otros temas que te serán de ayuda para profundizar y ahondar en la materia.

mailxmail.com

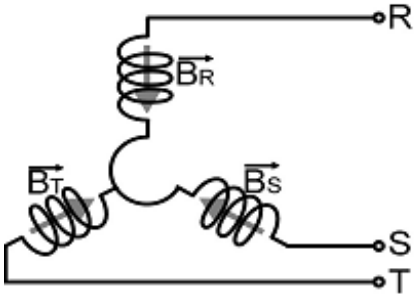
# 1. El motor asincrónico trifásico

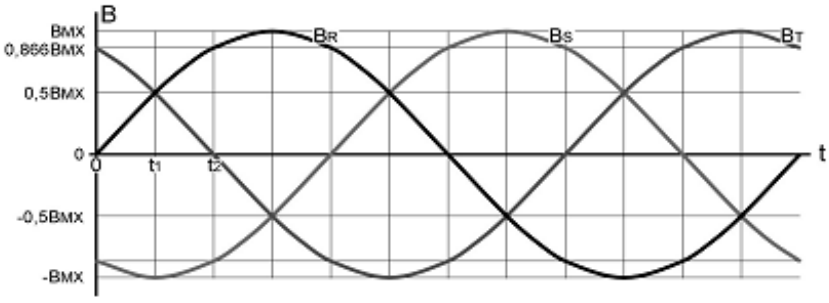
## MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA

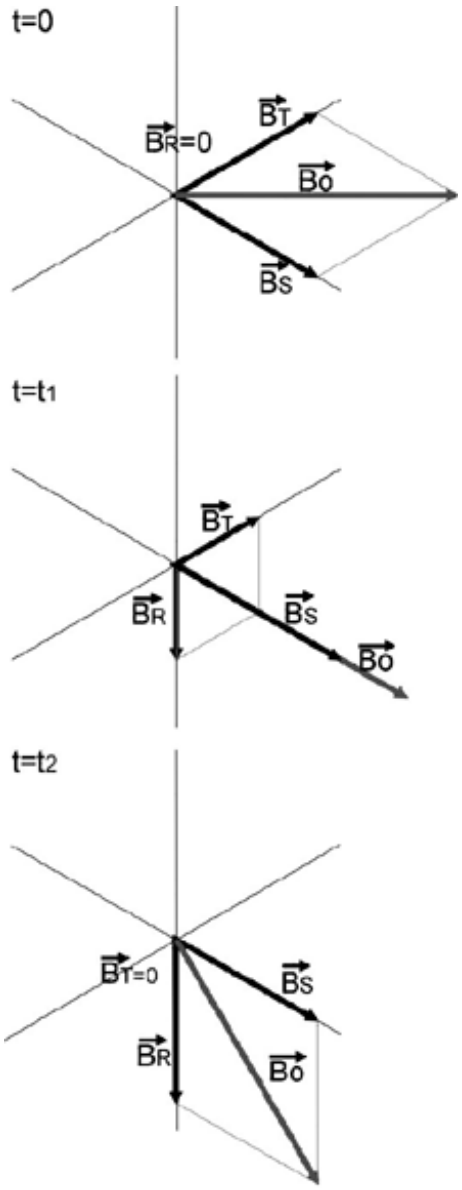
Existen distintos tipos de motores que funcionan en CA que, obviamente, poseen diferentes prestaciones, que los hacen útiles para uno u otro tipo de trabajo. De todos ellos, son los motores asincrónicos, y en particular los trifásicos, los más utilizados cuando se requiere una fuente de propulsión de energía eléctrica. Ello se debe fundamentalmente a su sencillez constructiva, que los hace fáciles de mantener, a su robustez, a su costo relativamente bajo en relación con motores de igual potencia pero de otras tecnologías y su excelente relación entre potencia y tamaño.

## EL CAMPO ROTANTE

Consideremos un conjunto de tres bobinas idénticas colocadas de manera tal que sus ejes forman ángulos de 120º y alimentadas desde una red trifásica, es decir con tensiones desfasadas 120º en el tiempo. Cada una de estas bobinas generará un campo magnético, estos campos, en virtud del desplazamiento espacial de las mismas, se encontrarán desplazados en el espacio y, como consecuencia del desfasaje de las tensiones que les dan origen, también estarán desplazados en el tiempo.






Esta situación se pone de manifiesto en las figuras de más arriba, la de la derecha muestra las tres bobinas conectadas en estrella (aunque el mismo análisis que haremos a continuación podría efectuarse con una conexión en triángulo), se observan también flechas que representan los campos magnéticos, el sentido que se muestra es el que hemos elegido arbitrariamente para representar el campo cuando toma valor positivo. La figura de la izquierda muestra la variación temporal de los tres campos a los que hemos llamado BR, BS y BT en correspondencia con los nombres asignados a las fases del sistema trifásico que los origina

Entonces, en cualquier instante tendremos, en el centro del conjunto de bobinas, un campo magnético Bo resultante de la suma de los tres vectores. Los diagramas de la izquierda muestran estos tres vectores y su suma en tres instantes de tiempo diferentes, sin necesidad de entrar en demasiados detalles es fácil ver que la resultante cambia de posición a medida que transcurre el tiempo aunque su módulo permanece constante, resulta obvio que el vector está girando y que su velocidad angular se corresponde con la frecuencia de la tensión. (Al final de este texto, en el apéndice A se demuestra matemáticamente

lo que acaba de verificarse con el análisis gráfico).

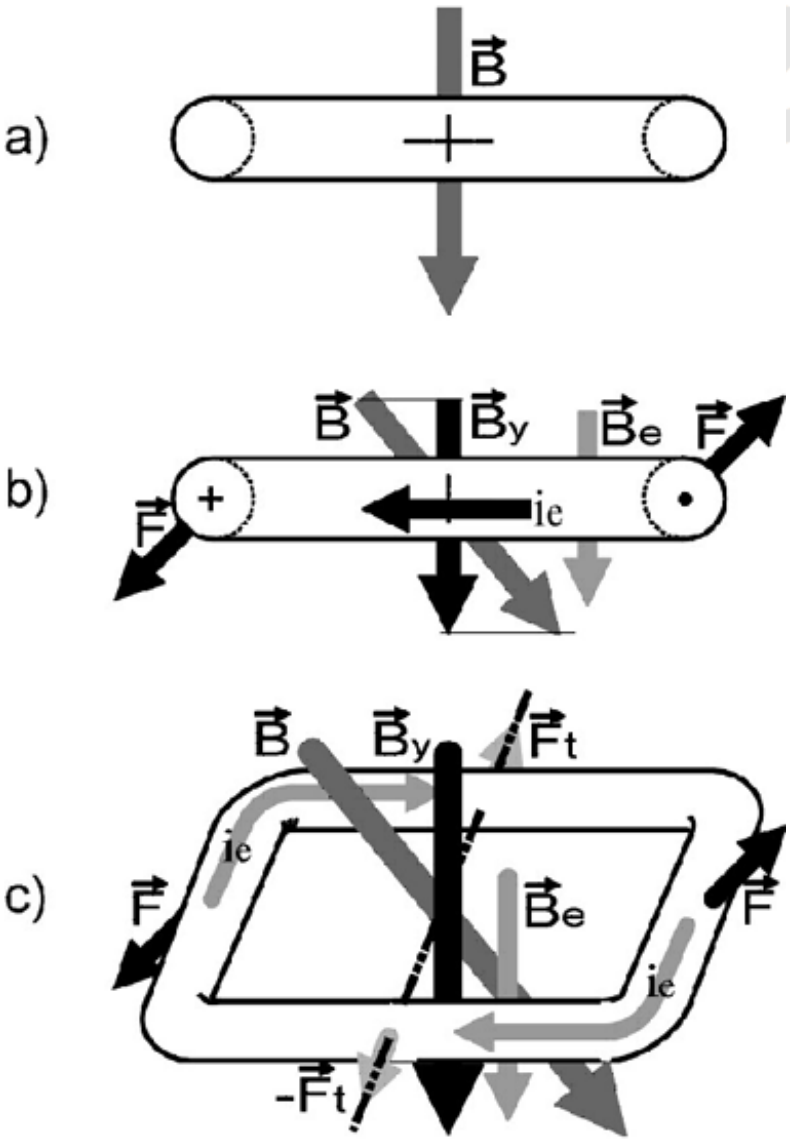
Un simple análisis adicional, similar al anterior, permite verificar que el intercambio entre dos de las fases que alimentan las bobinas da como resultado la inversión en el sentido de giro del campo.

# 2. Funcionamiento de un motor elemental

Supongamos ahora que dentro de este campo magnético rotante colocamos una espira conductora en cortocircuito y que esta espira tiene la posibilidad de girar, verificaremos a continuación que es precisamente esto lo que hará, comenzará a girar siguiendo el movimiento del campo.

En principio, la justificación de este fenómeno surge de la Ley de Lenz que nos dice a grandes rasgos que al aplicar un campo magnético variable a una espira en cortocircuito esta reaccionará de manera tal de oponerse a dicha variación, en este caso en particular, el campo gira y la espira también lo hace.

Un poco más de profundidad en nuestro análisis nos permitirá apreciar la aparición del par que pone en movimiento a la espira, para ello observemos las figuras de la derecha.




En la figura -a- vemos una espira en cortocircuito atravesada por un campo perpendicular a ella. En las figuras -b- y -c- (la inferior presenta la misma situación que la del medio pero en perspectiva) el campo ha girado de manera que el flujo By que atraviesa la espira es ahora menor (By es la proyección de B en sentido perpendicular a la espira), en respuesta a esta disminución del flujo, y en un intento de mantener constante el campo, la espira genera un campo Be, para ello se induce en ella una corriente ie.

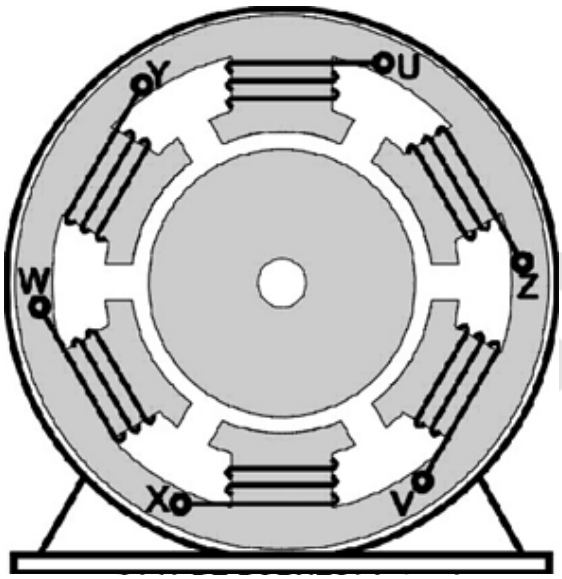
Ahora bien, como sabemos, si un conductor por el que circula una corriente se encuentra sumergido en un campo magnético, aparece sobre él una fuerza cuya dirección es perpendicular al plano formado por el campo y la corriente y su sentido está dado por la regla del tirabuzón *(1)*. Como consecuencia de esto, se originan fuerzas en los cuatro lados de la espira, dos de ellas (que hemos denominado Ft y -Ft) se anulan mutuamente y no tienen mayor efecto en el fenómeno que estamos estudiando, pero las restantes constituyen un par que tiende a hacer girar a la espira alrededor de su eje.

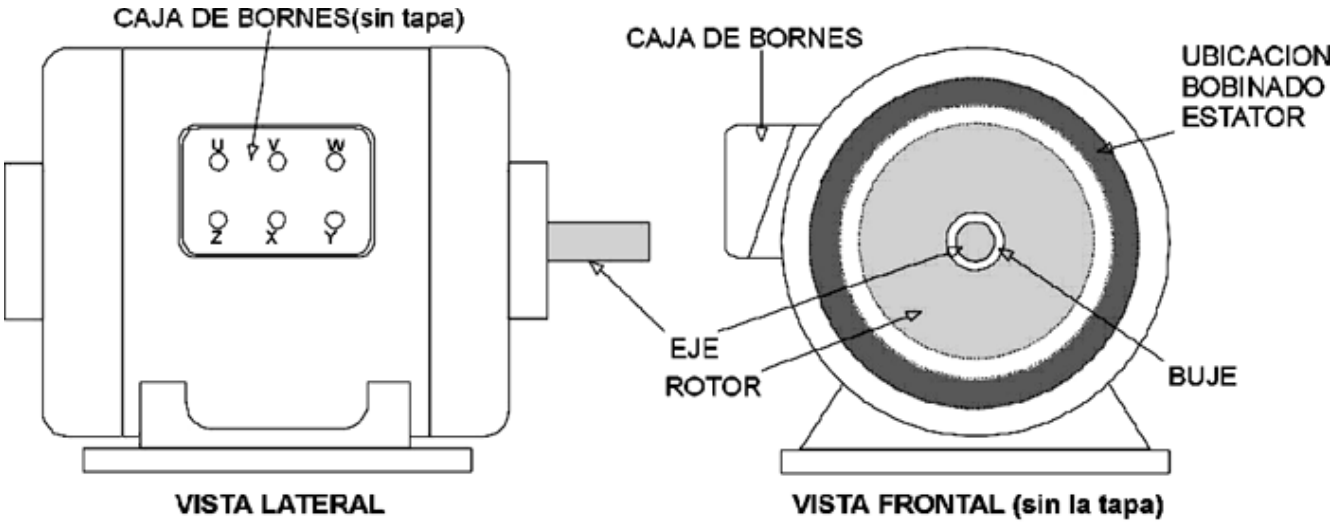
*(1)La expresión matemática para la fuerza que aparece sobre un conductor de longitud l por el que circula una corriente i, sumergido en un campo magnético B es: F= i.l x B*

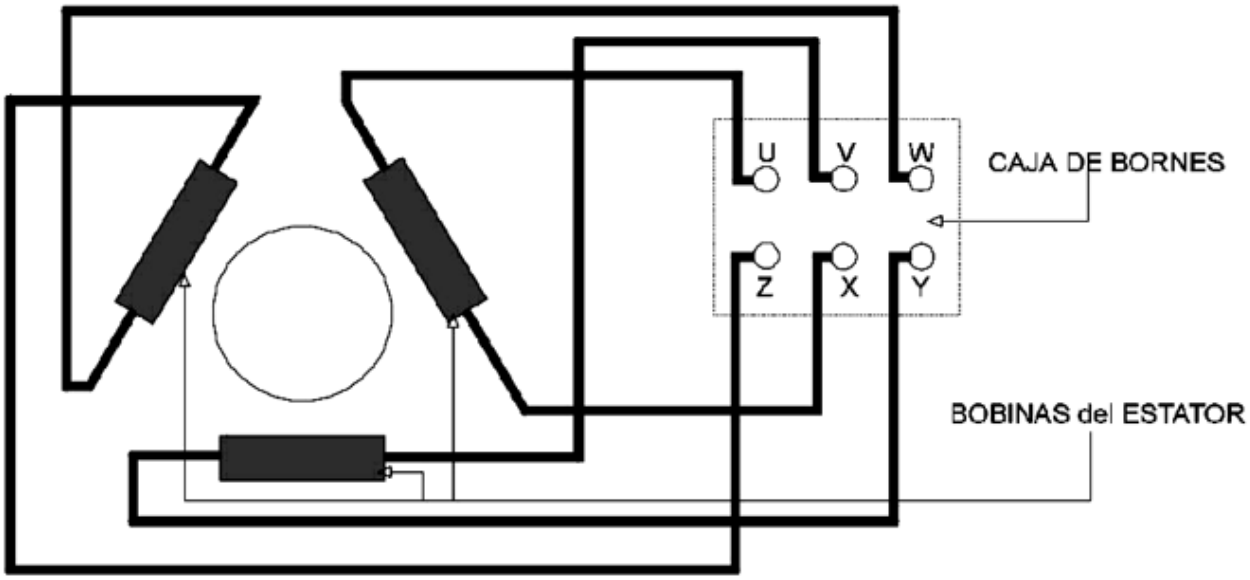
# 3. Aspectos constructivos

Antes de continuar el análisis del funcionamiento del motor veamos algunos aspectos de su estructura. Al igual que un alternador, el motor tiene dos partes principales: el estator y el rotor.

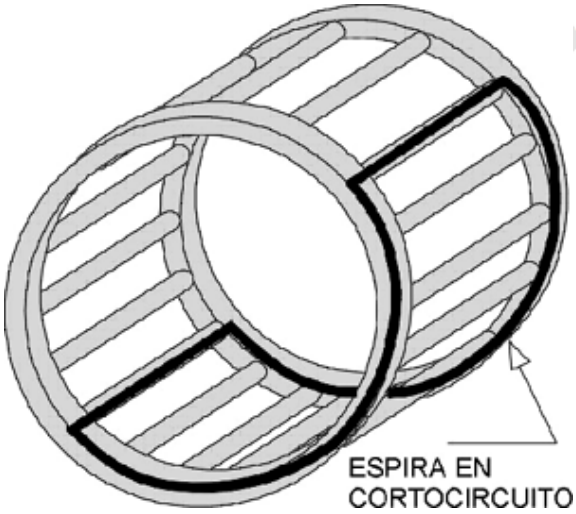
El estator alberga las tres bobinas encargadas de generar el campo rotante, estas tienen sus extremos iniciales denominados U, V y W, y los extremos finales correspondientes denominados X, Y y Z . Los extremos de las bobinas son accesibles desde el exterior del motor en una caja de bornes ubicada en el lateral de la carcaza tal como se puede apreciar en la figura siguiente, esto permite efectuar conexiones en estrella o en triángulo según convenga.



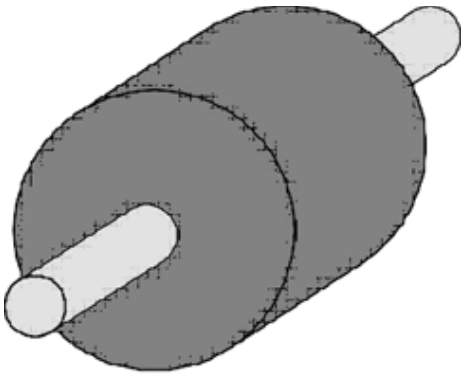


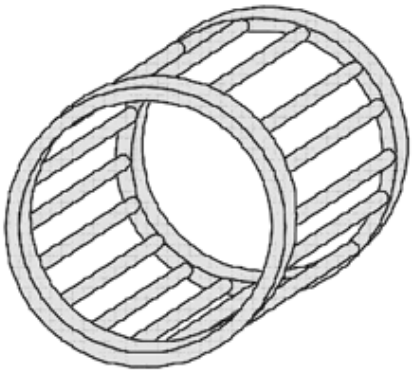

Aunque en el esquema se han representado los bobinados claramente diferenciados, en el motor real se encuentran repartidos dentro del estator de manera de aprovechar mejor el espacio y lograr una mejor distribución del calor.



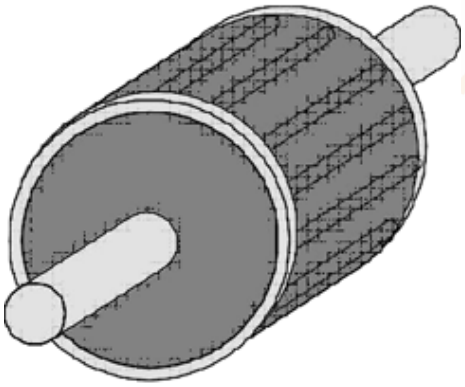

El rotor está constituido por un bloque cilíndrico de material ferromagnético, en su periferia, paralelas al eje del cilindro y aisladas eléctricamente del mismo, se ubican barras de material conductor (cobre o aluminio), estas barras se unen todas entre si, por ambos extremos, con aros del mismo material conductor, la estructura así formada se conoce con el nombre de jaula de ardilla. En las figuras de la izquierda se aprecian las dos partes descriptas y el rotor completo (2)



NUCLEO



JAULA DE ARDILLA



ROTOR COMPLETO

Observando la figura de la jaula de ardilla se aprecia que, entre dos barras conductoras cualesquiera conectadas por los aros de los extremos puede formarse una espira en cortocircuito, cuando el rotor se encuentra dentro del estator donde se ha establecido un campo rotante, esta espira (y todas las demás que forman la jaula) se comportará de la forma que hemos visto más arriba es decir que en cada barra de la jaula de ardilla aparecerá una fuerza que forzará al rotor a girar.

*(2) Existen también rotores bobinados a los cuales hacemos referencia más adelante en relación con el control de velocidad, sin embargo, aunque esa no sea su única ventaja, su tratamiento en detalle queda fuera del alcance de este trabajo.*

# 4. Resbalamiento

De acuerdo a lo que hemos visto, la aplicación de un sistema de tensiones trifásicas con una frecuencia de 50 cps a un conjunto de tres bobinas idénticas desplazadas 120º, dará como resultado un campo magnético rotante cuya velocidad angular será $\omega$=3000 rpm. Sin embargo, lo cierto es que éste es un caso particular y la velocidad del campo depende de la forma en que está bobinado el estator lo que le da a éste un cierto número de pares de polos (P) (que en el motor analizado arriba vale P=1) en función de los cuales la velocidad, denominada velocidad sincrónica, está dada por:

$$n_s = \frac{3000}{P}[rpm]$$

Se explicó anteriormente que el rotor gira porque el campo que lo atraviesa, al girar, cambia de posición, ahora bien, si su velocidad de giro fuera idéntica a la del campo, desde el punto de vista del rotor sería como si el campo estuviera estático y desaparecería la causa que lo mantiene en movimiento, por lo tanto debe ocurrir que el rotor gire a una velocidad distinta de la del campo, tal velocidad, denominada nr es menor que ns, a la diferencia entre ambas velocidades, referida a la sincrónica se la denomina resbalamiento (S):

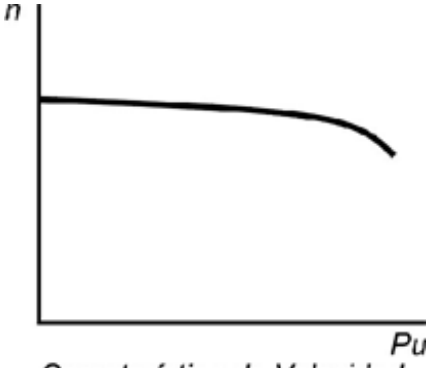
$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad o\ bien \quad S(\%) = \frac{n_s - n_r}{n_s} x100$$

El resbalamiento no es constante sino que depende de la potencia que debe entregar el motor: si el motor debe mover cargas mayores su velocidad disminuye por lo que el resbalamiento aumenta hasta que se llega al punto en que, si la carga es superior a la que es capaz de mover, el motor se detiene y S=100%. Esto se justifica si tenemos en cuenta que el par que mueve al rotor es proporcional a la corriente inducida y esta lo es a la velocidad de variación del campo que atraviesa la espira, tal velocidad de variación está representada por el resbalamiento.

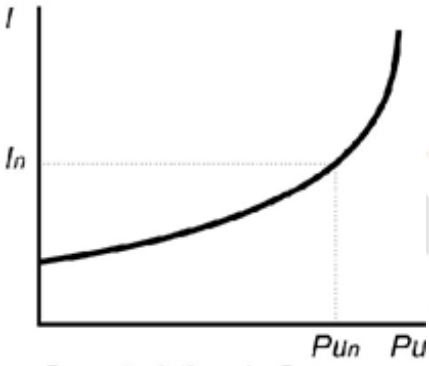
A grandes rasgos, la potencia que absorbe el motor surge del producto entre la tensión en sus bobinados y la corriente que consume. Obviamente, cuanto mayor sea la carga que debe mover el motor mayor será la potencia que requiera y, dado que la tensión es un valor constante, se requerirá un aumento de la corriente absorbida. Esto establece una relación entre el resbalamiento y la corriente que necesita el motor para funcionar: a mayor resbalamiento es mayor la corriente absorbida por el motor.

# 5. Curvas características

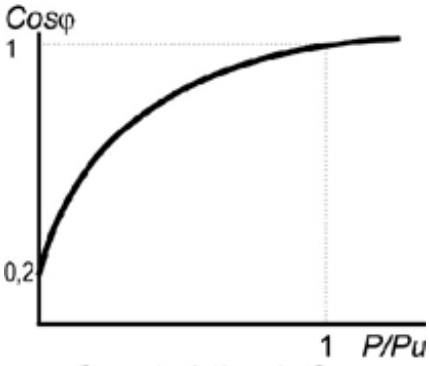
Al igual que en muchas otras máquinas, el comportamiento del motor eléctrico puede ser especificado por medio de sus curvas características. Una correcta interpretación de estas curvas para un determinado motor puede brindar abundante información acerca de su comportamiento en distintas condiciones de funcionamiento. Las curvas más importantes para los motores de inducción son:



Característica de Velocidad



Característica de Consumo



Característica de Cosφ

a) Característica de velocidad. Representa la velocidad en función de la potencia útil manteniendo constantes la tensión de alimentación y la frecuencia ( n=f(PU); U=cte; f=cte). En general se observa que la velocidad se reduce muy poco con la carga, entre un 2% y un 5% de la velocidad de sincronismo, se dice que la característica es dura.

b) Característica de consumo. Representa la intensidad de corriente que la máquina absorbe de la red en función de la potencia útil manteniendo constantes la tensión y la frecuencia (I=f(PU); U=cte; f=cte). La corriente de vacío está comprendida entre 0,25 y 0,50 de la nominal.

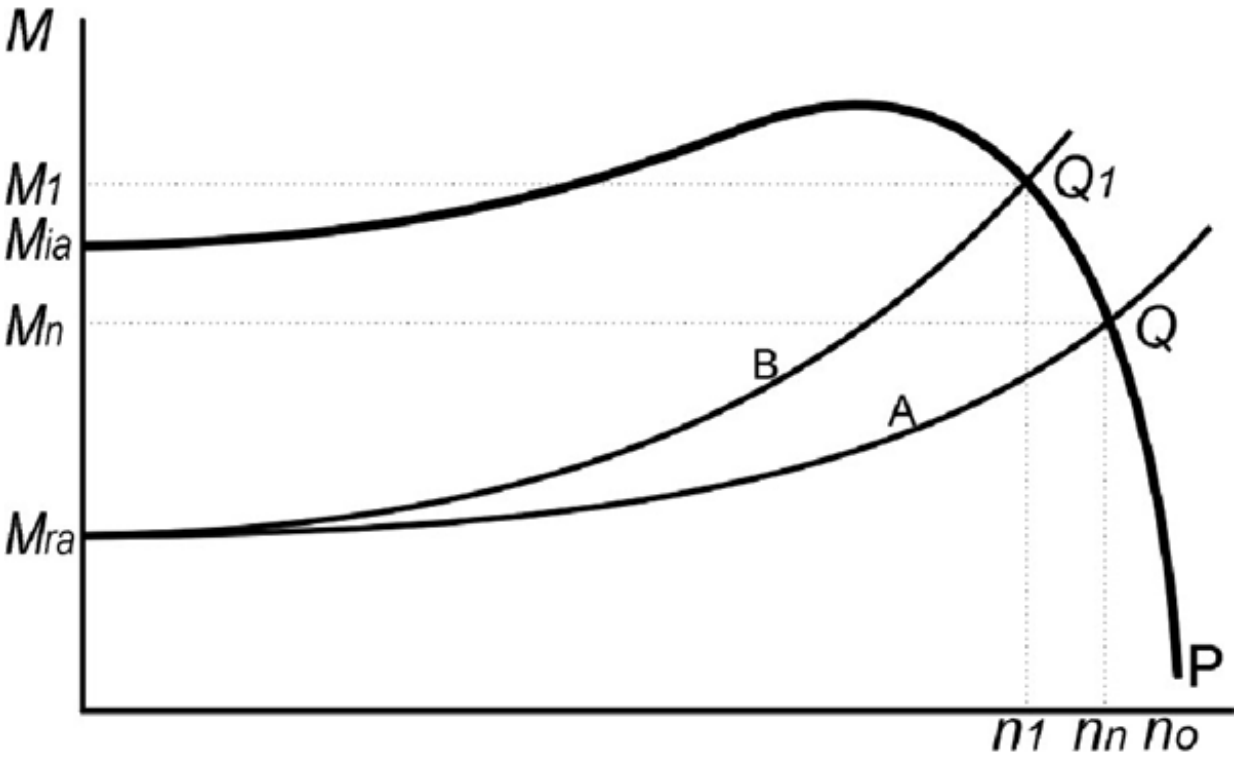
c) Característica del factor de potencia. Representa la variación del factor de potencia en función de la potencia útil.

d) Característica mecánica. También conocida como característica par-velocidad, esta es la curva más importante de un motor y representa la variación del par del motor en función de la velocidad manteniendo constantes la tensión y la frecuencia (M=f(n); U=cte; f=cte). En el punto siguiente analizaremos esta curva con un poco más de detalle.

# 6. Comportamiento del motor según la característica par-velocidad

La velocidad a la que se mueve un motor depende tanto de su propia característica par-velocidad como de la característica par-velocidad de la carga. En la figura se aprecia esta situación, las curvas A y B representan características típicas de cargas, la curva restante corresponde a un motor de inducción.

A continuación, y tomando como referencia estas curvas, analizaremos algunos puntos especialmente como son: el arranque, el funcionamiento en vacío y el estable con carga.




- Arranque
En el momento del arranque la velocidad es cero (n=0). El valor Mra es el par resistente de arranque y corresponde al valor mínimo que debe aplicarse a la carga para ponerla en movimiento, análogamente, Mia es el par interno de arranque del motor, es evidente que para que el sistema se ponga en movimiento debe ser Mia > Mra. Se considera que el par de arranque debe ser entre 1,25 y 2,5 veces el valor del par nominal (Mn), en estas condiciones la corriente en el arranque Ia tomara un valor entre 5 y 8 veces la intensidad nominal In.

-Funcionamiento en vacío
Si el motor arranque en vacío el punto de funcionamiento es el P, en el que el par suministrado es nulo (en realidad debe vencerse un par propio relacionado con los roces internos y el momento de inercia del rotor) y la velocidad de vacío

(n = no) está cercana a la velocidad de sincronismo.

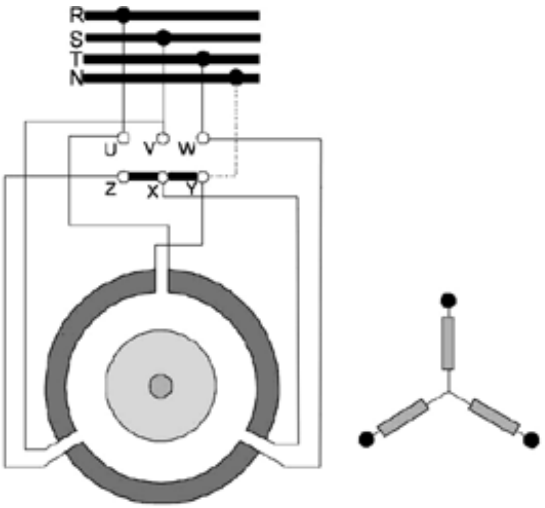
-Funcionamiento estable con carga
Cuando el motor funciona con carga, el punto de funcionamiento (Mn, nn) corresponde a aquel en el que se cortan las curvas características de la carga y del motor (Q), es decir, la velocidad en la que el par motor se iguala al par resistente.

Si modificáramos la carga de manera que el par resistente cambiara (curva B) tendríamos un nuevo punto de funcionamiento estable (Q1) en el cual el motor debería disminuir la velocidad para suministrar un par mayor.

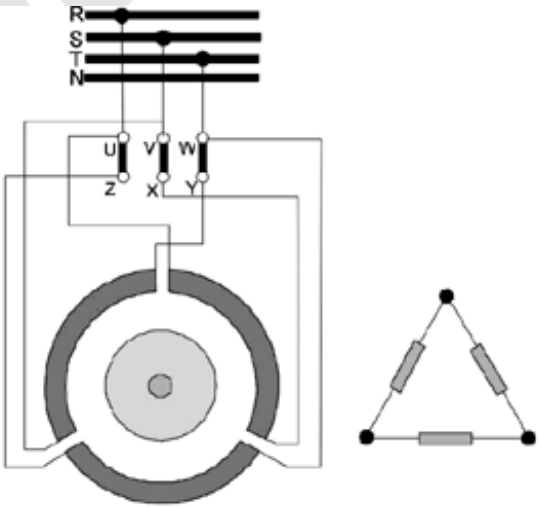
# 7. Arranque estrella - triángulo

El momento del arranque tiene una importancia especial en el funcionamiento del motor: en este momento el rotor se encuentra detenido y le tomará algún tiempo para vencer la inercia y alcanzar su velocidad de funcionamiento normal, por lo tanto el resbalamiento es muy alto (de hecho, en el momento inicial es del 100%) lo que significa que la corriente debe ser mayor que la requerida durante la marcha a velocidad nominal.

Como hemos visto, en un motor típico la corriente de arranque es varias veces mayor que la nominal, si bien esto no es perjudicial para el motor que se encuentra preparado para soportar tales intensidades durante el tiempo que dura el arranque (si por cualquier causa el rotor se bloquea y no se pone en movimiento, la corriente mantiene su alto valor y los bobinados del motor se queman), las altas intensidades puestas en juego pueden perjudicar el normal funcionamiento de la instalación eléctrica de la cual el motor forma parte, y al propio motor cuando se trata de máquinas de mucha potencia y el tiempo de arranque resulta excesivo, en consecuencia se usan distintos métodos para lograr que la corriente de arranque disminuya.




CONEXION ESTRELLA



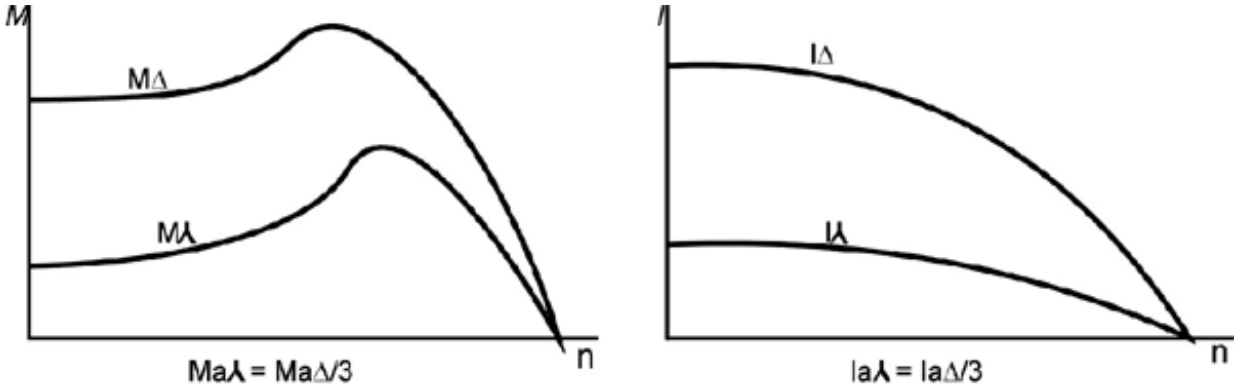

CONEXION TRIANGULO

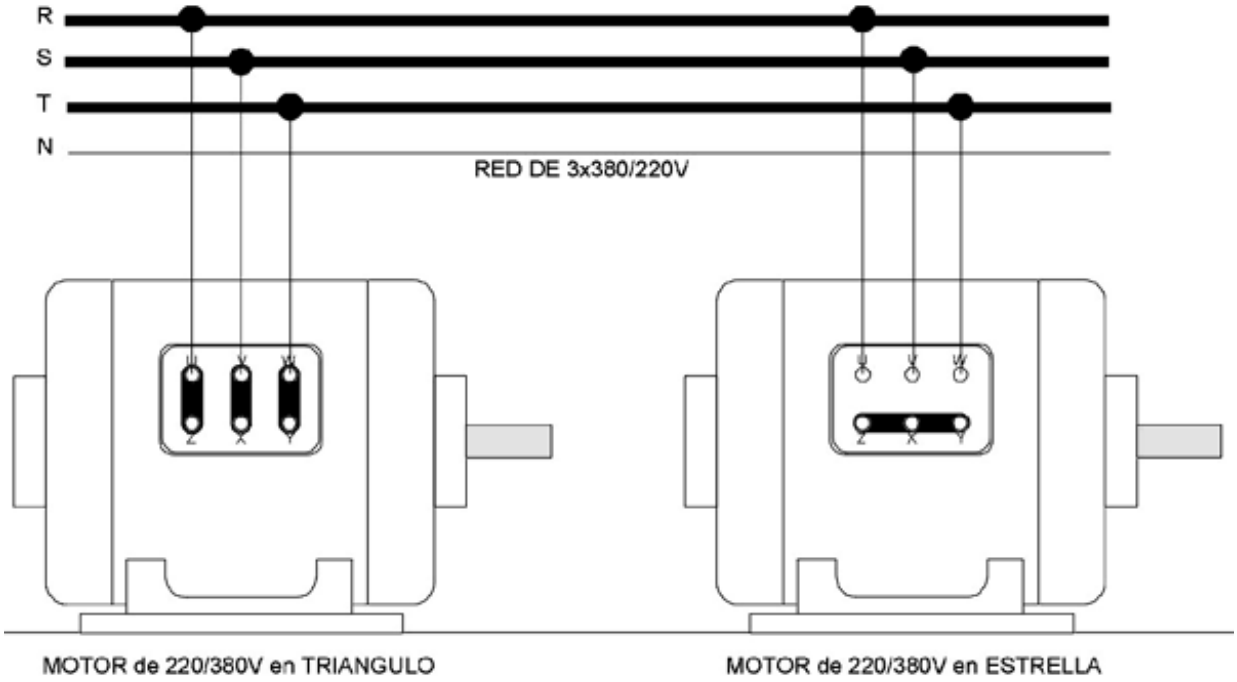
De todos los métodos utilizados estudiaremos únicamente el arranque estrella-triángulo por ser uno de los más conocidos y de más simple implementación. Este tipo de arranque está limitado a motores que fueron diseñados para funcionar con sus bobinados conectados en triángulo y está basado en que las tensiones de fase son "tres raíz cuadrada" veces menores que las tensiones de línea.

Al modificar la tensión aplicada a los devanados también se modifican las características par-velocidad e intensidad-velocidad, las figuras muestran lo que ocurre con ambas cuando las tensiones son la de fase y la de línea.

Por lo tanto, aprovechando que es posible el acceso a los extremos de las bobinas, durante el arranque se conectan entre fase y neutro y, una vez que se ha alcanzado suficiente velocidad se las conecta entre fases, al estar conectadas

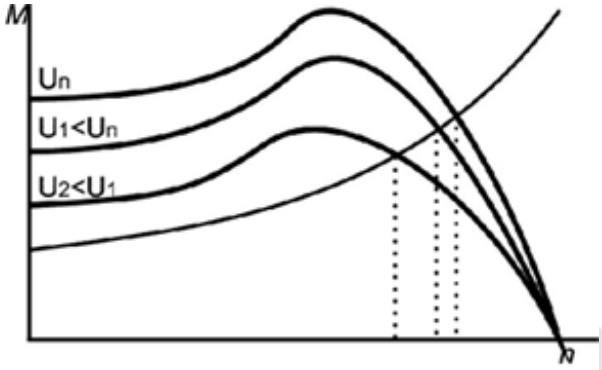
en estrella las bobinas están sometidas a menor tensión y por lo tanto es menor la corriente que circula por ellas. Este sistema, ilustrado en las figuras de más arriba de denomina arranque estrella-triángulo y, habitualmente, se efectúa con sistemas automáticos especialmente diseñados.



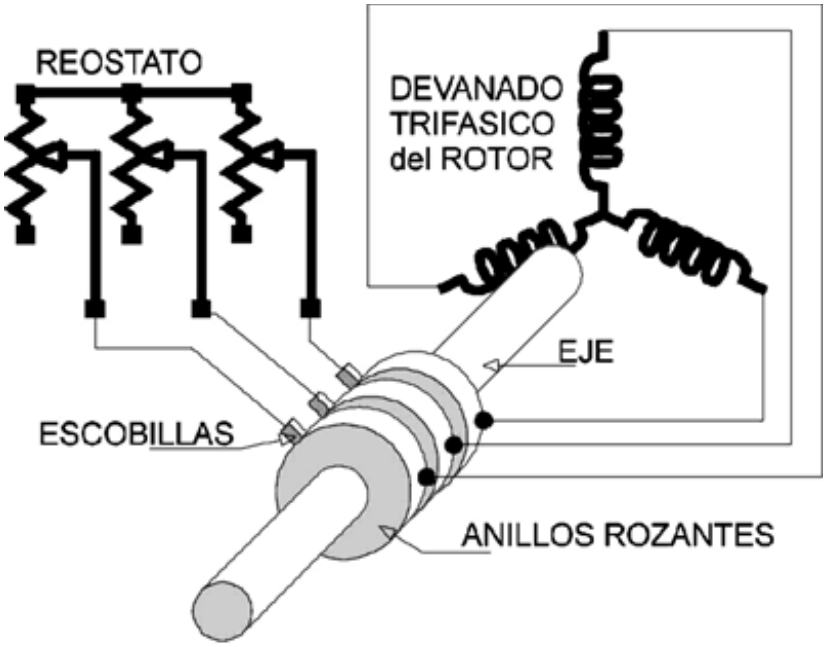



# 8. Regulación de velocidad

Como se ha visto, la velocidad del motor está directamente relacionada con el resbalamiento y este con la potencia que el motor debe desarrollar, al no entrar otras variables en juego se tiene como consecuencia que mientras que se mantenga constante la carga ha de mantenerse constante la velocidad. No obstante hay algunas alternativas que permiten efectuar un control, las cuales buscan disminuir la potencia en el eje con lo cual el motor, para mantener en movimiento la carga, debe aumentar su resbalamiento y, en consecuencia, disminuir su velocidad angular.



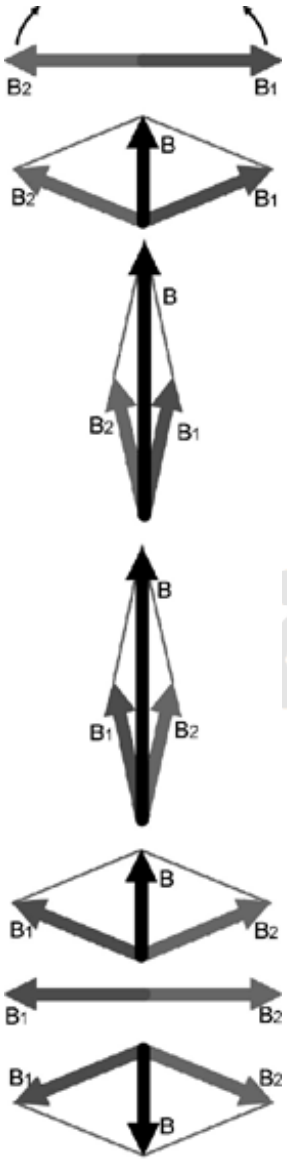

Una de ellas es la tensión de alimentación, como se aprecia en la figura de arriba, al disminuir la tensión cambia la característica par-velocidad del motor y cambia la posición del punto de funcionamiento estable para una determinada carga. Este método es aplicado en particular en motores de rotor jaula en los que no se dispone de otro medio para controlarlos, sin embargo los sistemas para lograr la disminución de la tensión son a menudo complicados y caros, tanto más cuanto mayor es la potencia del motor.




Otra manera de disminuir la potencia en el eje es actuar sobre el rotor para lo cual es necesario disponer de un motor con rotor bobinado. En este tipo de motor, en lugar de gruesas barras cortocircuitadas por sus extremos, se han realizado tres bobinas, estas se encuentran conectadas en estrella y el extremo libre de cada una es accesible desde el exterior por medio de anillos conductores solidarios con el eje pero aislados eléctricamente del mismo, denominados anillos rozantes, tres contactos llamados escobillas permiten conectar a las bobinas un conjunto de resistencias variables (reóstatos) conectadas en estrella, variando el valor de éstas resistencias es posible modificar la resistencia total del circuito rotórico y, por lo tanto, la corriente que circula por el rotor, dado que el par en el eje depende, entre otros factores, de ésta corriente, es fácil ver cómo es posible modificar la velocidad del motor por este mecanismo.

# 9. El motor asincrónico monofásico

Este tipo de motor es similar al trifásico con rotor en cortocircuito con la diferencia que su estator está constituido por una sola bobina por lo que el campo magnético que se produce no es giratorio. El campo de aplicación de estos motores está limitado a pequeñas potencias (excepto en los casos particulares en que se necesitan potencias relativamente grandes en instalaciones monofásicas, en los cuales se deberá recurrir a motores monofásicos de gran potencia). Comparativamente, a igual potencia que un motor trifásico, el monofásico es más costoso y más grande y tiene menor rendimiento.




**PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO**

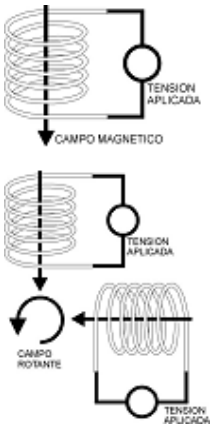
Hemos visto que al colocar una espira en cortocircuito dentro de un campo magnético giratorio, aquella se pone en movimiento y comienza a girar siguiendo al campo, sin embargo, en el motor monofásico solo existe una bobina por lo que el único campo magnético que existirá es un campo alterno, entonces, para comprender cómo funciona un motor de este tipo necesitamos efectuar un paso adicional.

La secuencia de figuras de la derecha muestra a dos vectores giratorios de idéntica magnitud que se mueven con igual velocidad angular pero en sentidos opuestos, si observamos la resultante de estos campos comprobamos que es un vector alterno cuya dirección no cambia (de hecho la demostración matemática de esta situación es muy sencilla). El razonamiento inverso surge de inmediato: un vector alterno puede considerarse como compuesto por dos vectores giratorios que se mueven en sentidos opuestos.

Del análisis anterior surge que un campo alterno B puede ser considerado en realidad como dos campos giratorios B1 y B2 que se mueven en sentidos contrarios, de manera tal que si colocamos un rotor dentro del campo alterno este tendrá la posibilidad de comenzar a girar siguiendo a alguno de ellos. Todo lo que se necesita es un impulso inicial que lo ponga en marcha en uno u otro sentido, tal impulso puede hacerse a mano (lo cual, obviamente, es muy peligroso) o con la ayuda de fuerzas auxiliares creadas por dispositivos que posee el motor a tal efecto. Tal fuerza de arranque es necesaria solo durante el breve lapso de tiempo que necesita el rotor para comenzar a girar por si solo y, en general, se dispone de mecanismos manuales o automáticos que desconectan los sistemas de arranque una vez que el motor está en movimiento.

# 10. Arranque de motores monofásicos

Como hemos visto en un análisis previo, un conjunto de tres bobinas desplazadas 120º en el espacio, al que se le aplica un conjunto de tensiones trifásicas, produce un campo magnético rotante. Sin embargo, este análisis no se limita a conjuntos trifásicos, y es relativamente simple comprobar que, si se aplican dos tensiones desfasadas en el tiempo a dos bobinas desplazadas en el espacio, se obtendrá como resultado un campo giratorio (de hecho, es posible verificar esto experimentalmente poniendo en movimiento un motor trifásico con solo dos fases).

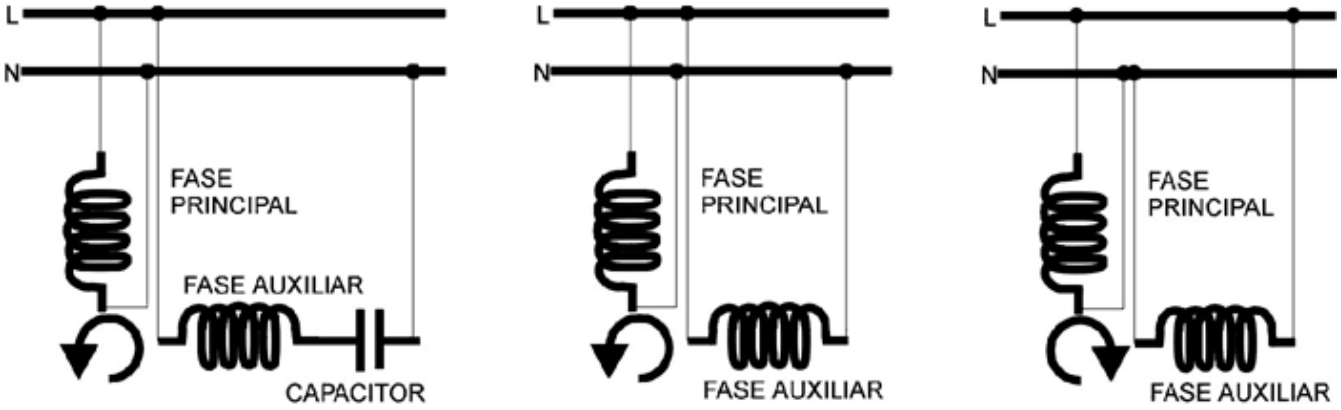



Esto sugiere que será suficiente con agregar una segunda bobina alimentada con una tensión adecuada (desfasada con respecto a la principal) para contar con un pequeño campo giratorio que ponga al rotor en movimiento, siguiendo a uno de los campos rotantes.

Básicamente, todos los motores monofásicos se constituyen de ésta manera: poseen una bobina principal o fase principal encargada de dar toda la potencia que se necesita en el eje, una bobina secundaria o fase auxiliar, orientada de distinta manera que la primera y que, junto a ésta produce la fuerza que pone en marcha al motor y un sistema de arranque que se encarga de producir una tensión distinta de la de la red para la bobina secundaria.

Para comprender el funcionamiento del sistema de arranque debemos considerar que el campo magnético generado por una bobina se encuentra en fase con la corriente y que el ángulo de fase de esta respecto de la tensión dependerá de la impedancia de la bobina o del circuito en el que esta se encuentra. Supongamos que la fase principal es puramente inductiva, en ese caso el campo que ésta genera estará atrasado 90º con respecto a la tensión. Si la fase auxiliar tuviera una impedancia con una importante componente resistiva, el atraso del campo con respecto a la tensión de alimentación sería menor que 90º (de hacho puede ser mucho menor e inclusive próximo a 0º) con lo cual se contaría con las condiciones para la obtención del campo rotante. Otra forma de lograr el desfasaje, muy utilizada porque no introduce componentes resistivos en el circuito, con las pérdidas que estos implican, es el agregado de un capacitor en serie con la fase auxiliar.

La ventaja del arranque por capacitor es su elevada cupla inicial mientras que el otro mecanismo permite, invirtiendo la forma en que se efectúan las conexiones de las fases a la red, invertir el sentido de giro del rotor, las figuras muestran, esquemáticamente, estas conexiones.




Una vez que el motor está en marcha, la fase auxiliar puede desconectarse o no, el mejor funcionamiento se logra cuando se la desconecta puesto que se deja trabajando solo al campo principal que es el que desarrolla la potencia en el eje. Para desconectar la fase auxiliar puede utilizarse un método manual o bien, lo que es más habitual, un método automático, el sistema automático más utilizado es un interruptor que se acciona por fuerza centrifuga el cual se ajusta de manera tal que sus contactos se abren cuando el rotor alcanza la velocidad adecuada (el 75% de la velocidad nominal), otro sistema automático aprovecha el hecho de que la corriente del estator disminuye a medida que el motor aumenta su velocidad (tal como se describió para el motor trifásico), esta corriente actúa sobre un dispositivo electromecánico (relé o contactor) que es el encargado de desconectar la fase auxiliar.