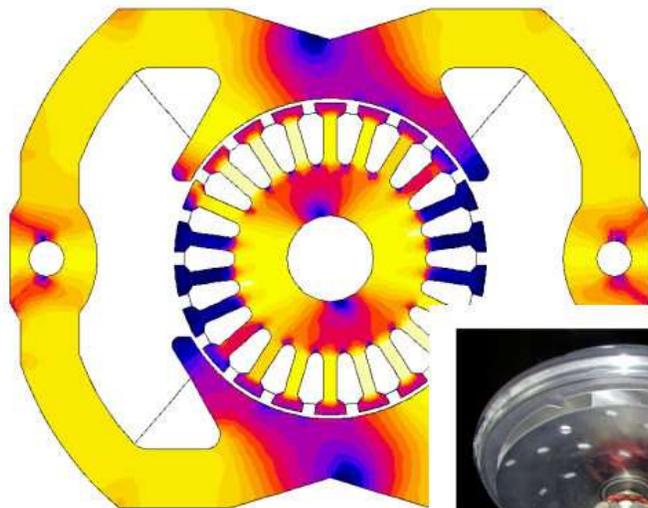




## Conceptos Básicos de Motores Monofásicos



Recopilación: Profesor Marino A. Pernía C

San Cristóbal octubre 2011

# Contenido

## 1. MOTORES MONOFASICOS DE INDUCCION:

### A. Motores de fase partida:

*a. Motor de arranque por resistencia*

*b. Motor de arranque por capacitor*

*c. Motor de fase partida y capacitor permanente de un valor.*

*d. Motor de capacitor de dos valores.*

### B. Motor de inducción de arranque por reluctancia

### C. Motor de inducción de polos sombreados.

## 2. MOTORES MONOFASICOS CON CONMUTADOR

### A. Motor de Repulsión

### B. Motor serie de corriente alterna

### C. Motor universal

## 3. MOTORES MONOFASICOS SINCRONOS

### A. Motor de reluctancia.

### B. Motor de histéresis

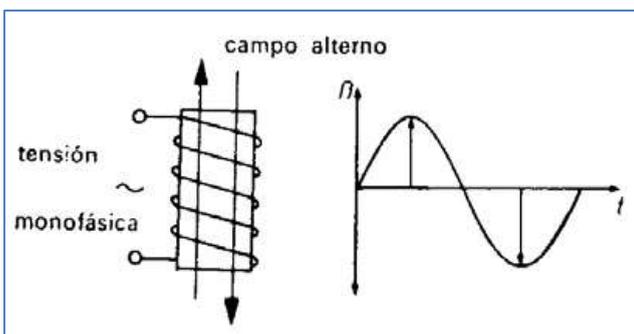
### C. Motor subsíncrono

# 1. MOTORES MONOFÁSICOS DE INDUCCIÓN

## Introducción.

La necesidad del motor de inducción monofásico se explica de la siguiente forma: existen muchas instalaciones, tanto industriales como residenciales a las que la compañía eléctrica sólo suministra un servicio de ca monofásico. Además, en todo lugar casi siempre hay necesidad de motores pequeños que trabajen con suministro monofásico para impulsar diversos artefactos electrodomésticos tales como máquinas de coser, taladros, aspiradoras, acondicionadores de aire, etc.

La mayoría de los motores monofásicos son “motores pequeños” de “caballaje fraccionario” (menos de 1 hp). Sin embargo, algunos se fabrican en tamaños normales de caballaje integral: 1.5, 2, 3, 5, 7.5 y 10 hp tanto para 115 V como para 230 V en servicio monofásico y aun para servicio de 440 V entre los límites de 7.5 a 10 hp. Los tamaños especiales de caballaje integral van desde varios cientos hasta algunos miles de hp en servicio de locomotoras, con motores de serie monofásicos de ca.



Campo magnético producido por una corriente monofásica



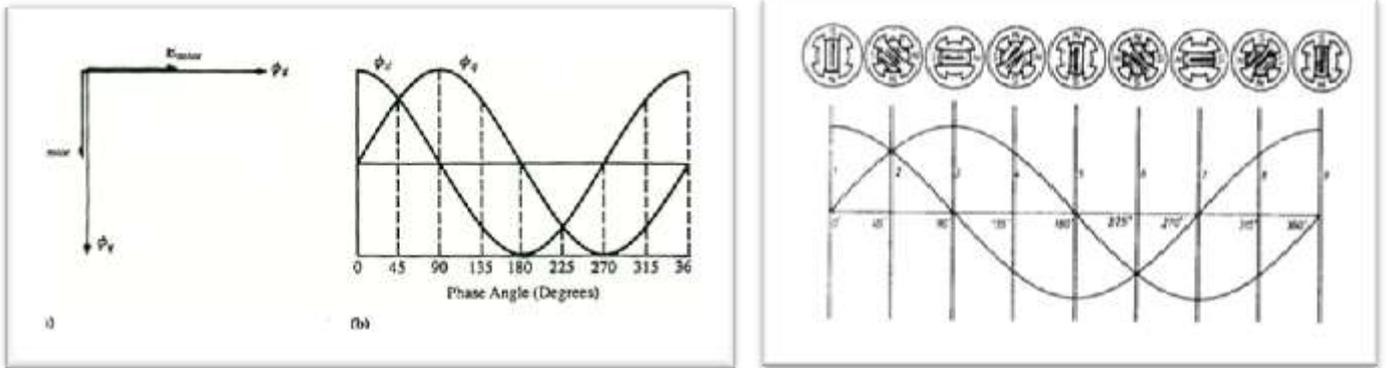
Diversos motores monofásicos de inducción

Para todos los efectos debemos demostrar que al aplicar una fuente monofásica a un devanado de una máquina eléctrica de inducción con rotor en jaula de ardilla, no se producirá ninguna f.m.m. giratoria neta y por lo tanto, tampoco se podrá desarrollar ni contar con un par mecánico que le permita a la máquina iniciar su giro.

El campo magnético producido por una corriente monofásica en una bobina está siempre sobre el eje de la misma (es decir no se produce un campo magnético giratorio), si bien variará su valor y sentido. Para que se produzca un campo alterno giratorio tienen que haber por lo menos dos bobinas desfasadas entre sí  $90^\circ$ .

Para que se produzca un campo giratorio en el estator es condición necesaria que haya un decalaje en el tiempo entre la corriente del arrollamiento auxiliar y la corriente del arrollamiento principal. Los campos alternos que se producen en el arrollamiento principal y arrollamiento secundario están decalados entre sí en el espacio y en el tiempo, y forman un campo giratorio común. Ese campo giratorio permite autoarranque. Los motores de inducción monofásicos pueden ahora arrancar solos.

La velocidad del campo giratorio viene dada, igual que en los motores trifásicos, por el número de polos y por la frecuencia de la red. La figura muestra la formación del campo giratorio en los instantes 1 y 2 para unas corrientes de arrollamiento según la figura.



El desfase entre las corrientes del arrollamiento principal y del arrollamiento secundario se consigue mediante el efecto de una capacidad, de una resistencia activa o por la mayor inductividad del arrollamiento auxiliar. Si se intercala una capacidad, una resistencia activa o una inductancia en el arrollamiento auxiliar de los motores de inducción monofásicos, se obtiene un campo giratorio. Los motores monofásicos con inductancia se utilizan poco, por su reducido par de arranque.

## Aspectos constructivos

Fundamentalmente los motores monofásicos de inducción cuentan con un estator construido de material ferromagnético (por ejemplo, chapas de hierro al silicio) sobre el que se colocan las bobinas principales, tantas como polos tenga el motor. En la figura se puede ver, además, un rotor de características similares al estator, rodeado de barras conductoras cortocircuitadas en los extremos por anillos formando una “jaula de ardilla” típica de los motores de inducción.

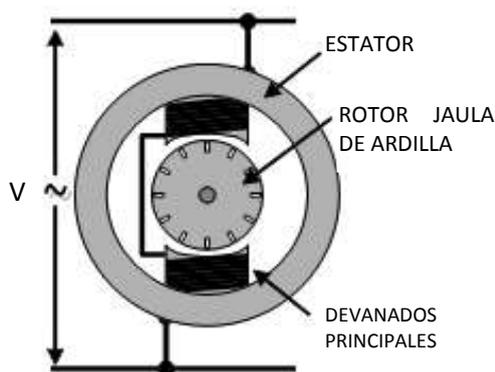
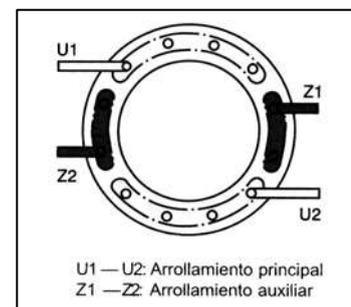


Figura (1) Esquema de un motor monofásico de inducción



devanados principal U1\_U2 devanado auxiliar Z1-Z2

Estas sencillas máquinas conservan la propiedad fundamental de no poseer contactos eléctricos rozantes lo que les confiere una durabilidad muy alta y muy bajo mantenimiento.

Los motores de inducción monofásicos llevan un estator en cuyo paquete de chapas van alojados dos bobinados de Cobre. El bobinado principal, que suele denominarse arrollamiento principal va colocado en 2/3 de las ranuras del estator y sus conexiones llevan las designaciones U1, U2. El arrollamiento auxiliar (bobinado auxiliar) Z1, Z2 va alojado en el tercio restante de ranuras, desfasado en el espacio 90°.

En cuanto a la construcción del motor monofásico de inducción, hay que señalar que el rotor de cualquier motor monofásico de inducción es intercambiable con algunos polifásicos de jaula de ardilla. No hay conexión física entre el rotor y el estator, y hay un entrehierro uniforme entre ellos.

## Principio de funcionamiento

Los motores monofásicos de inducción experimentan una grave desventaja. Puesto que sólo hay una fase en el devanado del estator, el campo magnético en un motor monofásico de inducción no rota. En su lugar, primero pulsa con gran intensidad, luego con menos intensidad, pero permanece siempre en la misma dirección. Puesto que no hay campo magnético rotacional en el estator, un motor monofásico de inducción no tiene par de arranque.

Si pensamos en un motor de un solo par de polos, podemos ver fácilmente que el campo generado por el devanado principal al conectarse a una fuente de tensión alterna, tiene una dirección fija y un signo cambiante en forma sinusoidal. Los motores de inducción requieren un campo magnético rotante para inducir las corrientes adecuadas en el rotor y producir un par mecánico.

Si el campo magnético es fijo en el espacio y alterno en el tiempo y el rotor se halla detenido (por ejemplo al intentar arrancarlo) el circuito electromagnético resultante se asemeja mucho al de un transformador en cortocircuito, donde el rotor haría las veces de secundario. Para comprender el funcionamiento de éstas máquinas debemos imaginar que el campo magnético alterno es en realidad la composición de dos campos de módulos constantes pero rotantes en sentidos opuestos. En la figura se esquematiza esta construcción abstracta en la que ahora se tiene el equivalente a dos motores trifásicos conectados en secuencias opuestas y unidos por su eje.

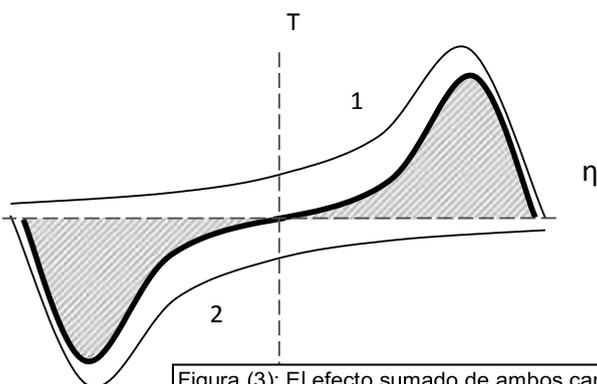


Figura (3): El efecto sumado de ambos campos rotantes no deja par de arranque sobre el rotor.

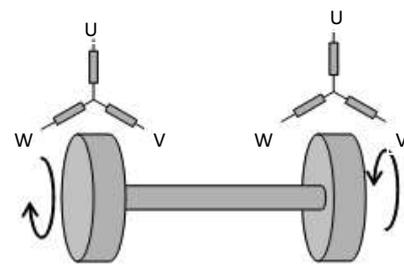


Figura (2): Construcción de un motor monofásico a partir de dos motores trifásicos

Si por algún medio, en cambio, se impulsara el rotor en un sentido cualquiera se induciría instantáneamente un par en el eje que aceleraría la máquina hasta alguna velocidad de equilibrio con el par resistente (en vacío, las pérdidas mecánicas propias). Entonces el motor monofásico puede

pensarse como dos motores trifásicos opuestos en los que uno prevalece sobre el otro al definirse externamente un sentido de giro.

De ésta forma los rotores no giran ya que en un caso ideal los momentos inducidos a cada lado del eje son iguales y opuestos. Como ya se conoce de la teoría de motores trifásicos, los campos magnéticos rotantes inducen un momento en los rotores que varía con la velocidad de éstos últimos. La curva de torques que generan el campo 1 y 2 se ilustra en la figura (3) donde se puede ver que al sumarse los efectos (zona sombreada) no se obtiene ningún par resultante con el rotor detenido. Así llegamos a la característica principal de los motores de inducción monofásicos: no pueden arrancar por sí solos.

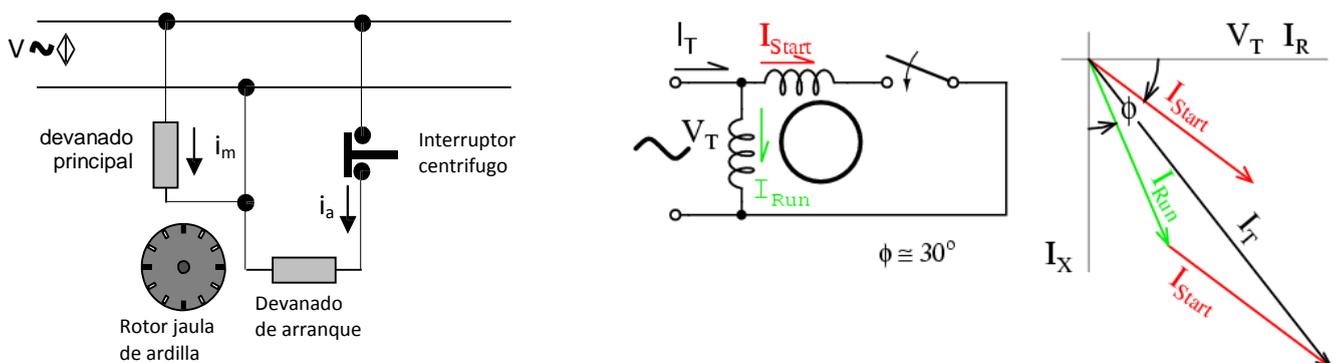
## A. Motores monofásicos de fase partida

### a. Arranque por resistencia:

Se basa en colocar un bobinado auxiliar desplazado físicamente  $90^\circ$  del principal. Además se lo construye de conductor más fino y suele tener diferente cantidad de vueltas. Así se le otorga una impedancia diferente al del devanado principal por lo que la su corriente está desfasada. El devanado de arranque tiene menos vueltas y consiste en alambre de cobre de menor diámetro que el devanado de marcha. Por lo tanto, el devanado de arranque tiene alta resistencia y baja reactancia. A la inversa, el devanado de marcha, con más vueltas de alambre más grueso, tiene baja resistencia y alta reactancia; pero debido a su impedancia total menor, la corriente en el devanado de marcha es en general mayor que la correspondiente en el devanado de arranque.

Al sumar los campos principal y auxiliar se tiene un vector giratorio que describe una elipse. No es un campo rotante de magnitud constante pero alcanza para impulsar por sí sólo al rotor en el arranque.

El diagrama esquemático de este tipo de motores se muestra en la figura. El bobinado auxiliar se diseña con una razón  $R_a/L_a$  mayor que la del bobinado principal o de marcha ( $\frac{R_a}{X_a} \gg \frac{R_m}{X_m}$ ), con ello se logra desfasar la corrientes según muestra la figura. Esta mayor razón  $R_a/L_a$  normalmente se logra usando alambre de menor sección (mayor  $R_a$ ). Ya que el devanado auxiliar es de sección pequeña, no puede funcionar por mucho tiempo. Se recurre a un interruptor centrífugo que desconecta el circuito auxiliar una vez que el rotor alcanza aproximadamente el 70% de la velocidad asignada. Este sistema se aplica en potencias entre 50W y 500W.

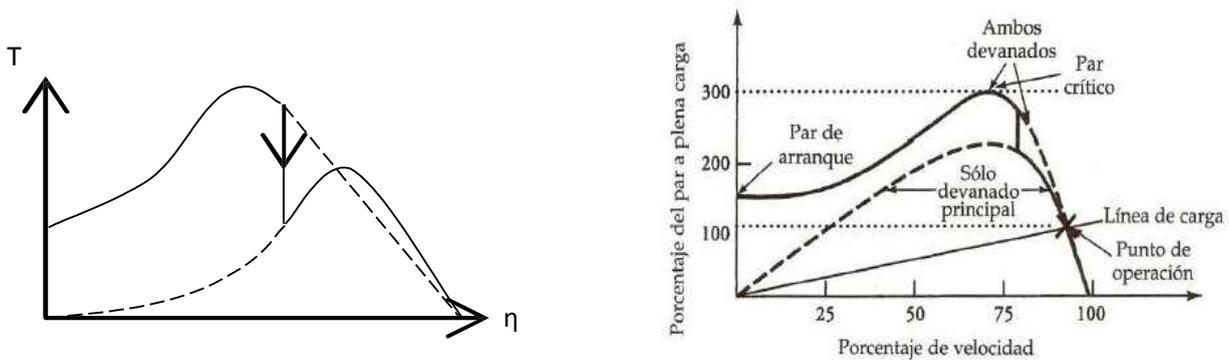


Motor monofásico de fase partida por resistencia

El campo giratorio se forma si se conecta una resistencia activa en serie con el bobinado auxiliar. La resistencia activa necesaria se puede formar también enrollando el arrollamiento auxiliar con un hilo resistente. Pero generalmente se ejecuta el arrollamiento auxiliar como arrollamiento bifilar. Para ello se enrolla un tercio del número de espiras de la bobina en sentido contrario a las espiras restantes.

En el arrollamiento auxiliar bifilar se anula en parte el efecto inductivo, pero se mantiene su resistencia activa. Su par de arranque corresponde aproximadamente al par nominal.

La característica de torque-velocidad típica de estos motores es la mostrada en la figura.



Característica de torque-velocidad de un motor 1F de arranque por resistencia

Este tipo de motor tiene un bajo a moderado torque de partida el que depende de las corrientes y su desfase entre ellas. Se utilizan en el caso de escasa frecuencia de arranque, por ejemplo para compresores de frigoríficos o como motores para quemadores de fuel, en pequeñas bombas centrífugas, quemadores de aceite, sopladores y en cualquier otro tipo de cargas que requieran un moderado par de arranque a una velocidad bastante constante.

Este tipo de motor es normalmente de caballaje fraccionario y como su rotor es pequeño, tiene poca inercia hasta cuando está conectado con la carga. Sin embargo, las principales desventajas del motor son: 1) su bajo par de arranque y 2) que, cuando tiene mucha carga se produce un par elíptico o pulsante que hace que el rotor emita ruidos preocupantes. Por este motivo, el motor de fase partida se usa en aparatos electrodomésticos para impulsar cargas que producen ruido, como por ejemplo, quemadores de aceite, pulidoras, lavadoras de ropa, lavadoras de vajillas, ventiladores, sopladores de aire, compresores de aire y bombas de agua pequeñas.



Motor de lavadora electrolux



devanados del estator

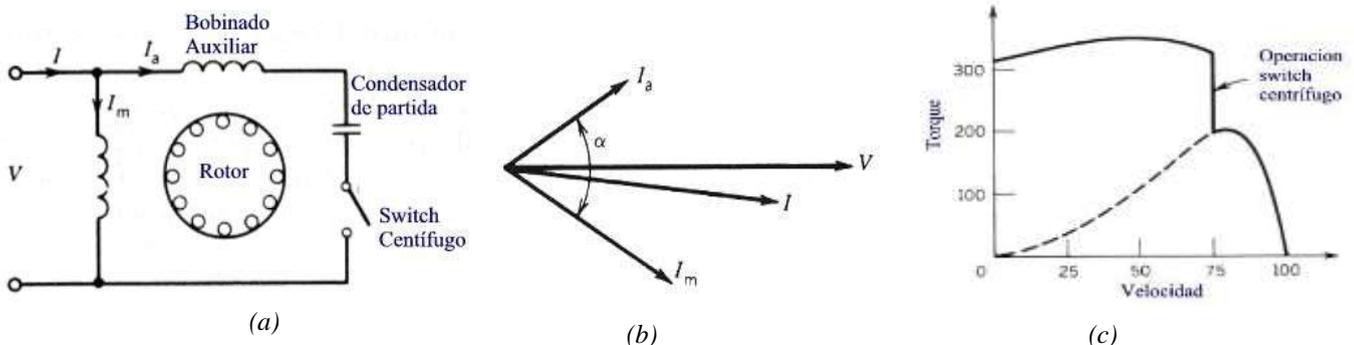
El control de la velocidad de estos motores es relativamente difícil porque la velocidad síncrona del flujo rotatorio del estator queda determinada por la frecuencia y el número de polos desarrollados en el devanado de marcha del estator ( $\eta = 120f/p$ ). Se debe hacer notar que todos los cambios de velocidad se deben llevar a cabo en límites mayores al que trabaja el interruptor centrífugo y por lo tanto menores que la velocidad sincrónica; obteniendo un rango muy limitado para el control de velocidad.

La capacidad del devanado de arranque se basa sólo en trabajo intermitente. Si el interruptor centrífugo se descompone y no puede abrir, por lo general debido a que se pegan los contactos, el calor excesivo que produce el devanado de arranque, de alta resistencia, aumentará de tal manera la temperatura del estator, que finalmente se quemarán ambos devanados.

Los motores de fase partida de mejor diseño tienen relevadores térmicos interconstruidos, conectados en serie con la terminal de la línea, para desconectar el motor del suministro siempre que la temperatura sea muy elevada.

### b. Motor de fase partida arranque por capacitor

Como medio de mejorar el par relativamente bajo del motor de fase partida por resistencia se agrega un capacitor al devanado auxiliar para producir una relación casi real de  $90^\circ$  entre las corrientes de los devanados de arranque y de marcha, en lugar de aproximadamente  $30^\circ$ , elevando el par de arranque a los límites normales del par nominal. La figura muestra el diagrama de conexiones del motor de arranque por capacitor, cuya diferencia implica la adición de un capacitor en el devanado auxiliar. Se puede advertir también a partir de la figura, el mejoramiento del torque de partida debido a la inclusión del capacitor.



Motor monofásico con condensador de partida. (a) Esquemático, (b) desfase de corrientes (c) característica de torque

Debido a su mayor par de arranque, que es de 3.5 a 4.5 veces el par nominal, y a su reducida corriente de arranque para la misma potencia al instante del arranque, el motor de arranque por capacitor se fabrica hoy en tamaños de cabalaje integral hasta de 7.5 hp.

El condensador suele ir montado en la carcasa del motor. Si el arrollamiento auxiliar no es de tipo dividido, el condensador se conecta antes del arrollamiento auxiliar, y en el caso de arrollamiento auxiliar partido, va situado entre sus bobinas parciales.

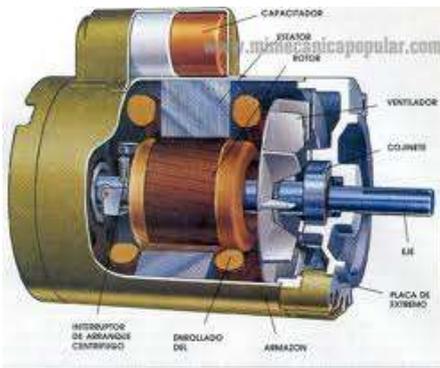


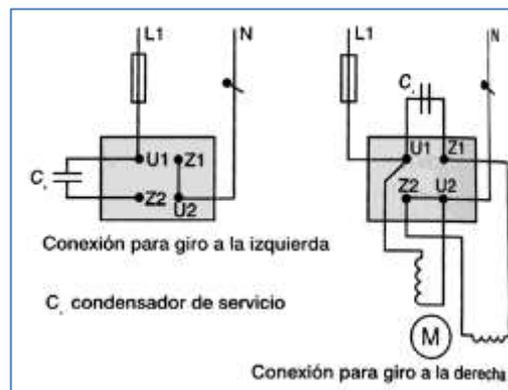
Fig. Motor con capacitor de arranque

capacitores electrolíticos

interruptor centrífugo

En virtud de su mayor par de arranque, los motores de fase partida y arranque por capacitor se emplean para bombas, compresores, unidades de refrigeración, acondicionadores de aire y lavadoras grandes, en los que se necesita un motor monofásico que desarrolle alto par de arranque bajo carga y cuando se requiere un motor reversible.

Para cambiar el sentido de giro del motor, es necesario invertir la polaridad de la corriente del arrollamiento auxiliar. Esto se hace cambiando la conexión del condensador en la placa de bornes como se indica en la figura



Cambiar el sentido de giro del motor

El condensador y la inductividad del arrollamiento auxiliar forman un circuito oscilante en serie. Por eso la tensión aplicada al condensador es superior a la tensión de la red. La máxima tensión en el condensador aparece cuando el motor gira en vacío.

Los capacitores para el motor de condensador tienen que estar dimensionados para la máxima tensión que se pueda producir. En la tabla se muestran algunos valores comerciales usados

Tensión red (V)	Condensador C	Tensión condensador $U_C$
220 V	~ 70 $\mu$ F/kW	~ 250 V
110 V	~ 240 $\mu$ F/kW	~ 125 V
380 V	~ 22 $\mu$ F/kW	~ 430 V

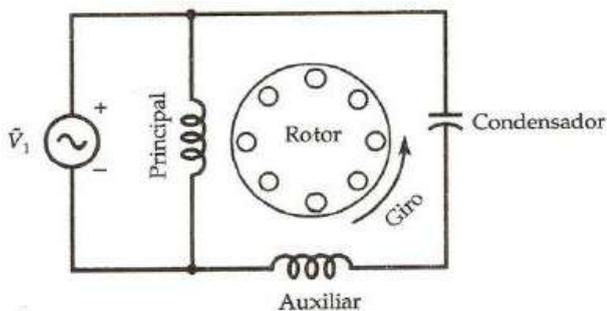
Capacitores comerciales para el motor de arranque con condensador

### c. Motor de fase partida y capacitor permanente de un valor.

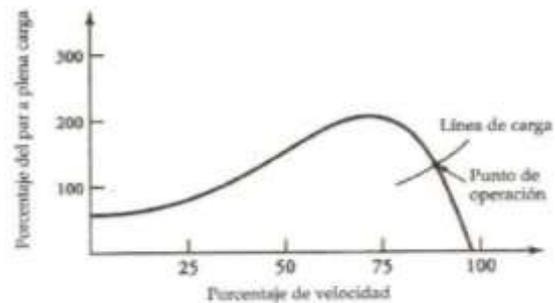
Este tipo de motor tiene dos devanados permanentes que, en general, se arrollan con alambre del mismo diámetro y el mismo número de vueltas; es decir, los devanados son idénticos. A este motor también se le conoce como motor de capacitor dividido permanente, es una versión menos cara que la del motor de arranque por capacitor y capacitor de marcha.

Ya que trabaja en forma continua como motor de arranque por capacitor no se necesita interruptor centrífugo. Los motores de este tipo arrancan y trabajan en virtud de la descomposición de la fase de cuadratura que producen los dos devanados idénticos desplazados en tiempo y espacio. En consecuencia, no tiene el alto par de marcha normal que producen los motores ya sea de arranque por capacitor o de arranque por resistencia. El capacitor que se usa se diseña para servicio continuo y es del tipo de baño de aceite. El valor del capacitor se basa más en su característica de marcha óptima que en la de arranque. Al instante de arranque, la corriente en la rama capacitiva es muy baja.

El resultado es que estos motores, a diferencia de los de arranque por capacitor, tienen par de arranque muy deficiente, de entre 50 a 100 por ciento del par nominal, dependiendo de la resistencia del rotor.



(a)



(b)

Motor monofásico con capacitor de marcha. (a) Esquemático, (b) característica torque-velocidad

En este tipo de motor el condensador del bobinado auxiliar permanece conectado todo el tiempo. Esto simplifica en construcción y reduce el costo ya que no es necesario el switch centrífugo además el factor de potencia, torque y eficiencia resultan mejorados ya que el motor opera como motor bifásico. La operación continua del condensador requiere ciertas características constructivas y se debe comprometer el torque de partida frente al torque de la marcha.

Este tipo de motor se presta al control de velocidad por variación del voltaje de suministro. Se usan diversos métodos para ajustar el voltaje aplicado al estator y producir el control deseado de velocidad, como transformadores con varias salidas, variacs, potenciómetros y resistencias o reactores con varias salidas.

Debido a su funcionamiento uniforme y a la posibilidad de controlar la velocidad, las aplicaciones de este motor pueden ser ventiladores de toma y descarga en máquinas de oficina, unidades de calefacción o aire acondicionado. Se recomienda utilizarlos cuando se requiere accionar cargas con mínimo par de arranque.

#### d. Motor de fase partida por condensador de arranque y de marcha

El motor produce un par de arranque elevado si se utiliza un condensador de arranque  $C_A$  y un condensador de servicio  $C_m$ . Mediante la capacidad de ambos condensadores se puede incrementar el par de arranque hasta un valor que sea 2 a 3 veces superior al par nominal. Por este motivo el motor puede arrancar en carga. Una vez que se haya acelerado, se desconecta el condensador de arranque quedando sólo el condensador de servicio o de marcha. Es necesario efectuar esta desconexión ya que, debido a la elevada capacidad total del condensador de arranque y del condensador de servicio, pasa gran intensidad a través del arrollamiento auxiliar. En régimen permanente, esto daría lugar a sobrecalentamiento. La desconexión se realiza mediante relés térmicos o en función de la intensidad o por un interruptor centrífugo. El motor de capacitor de arranque y de marcha, combina las ventajas de funcionamiento casi sin ruido y de control limitado de velocidad del capacitor de marcha con el alto par de arranque del motor de arranque por capacitor.

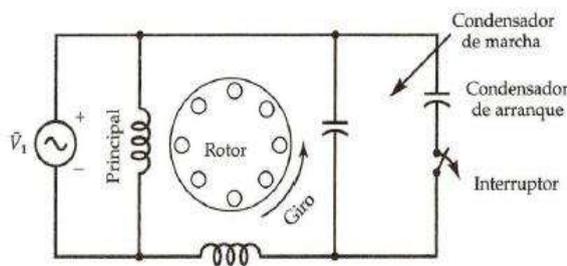


Figura 5.23 Representación esquemática del motor con capacitor de arranque y capacitor de marcha, B.S. Guri, *Electric Machinery and transformers*, pág.581.

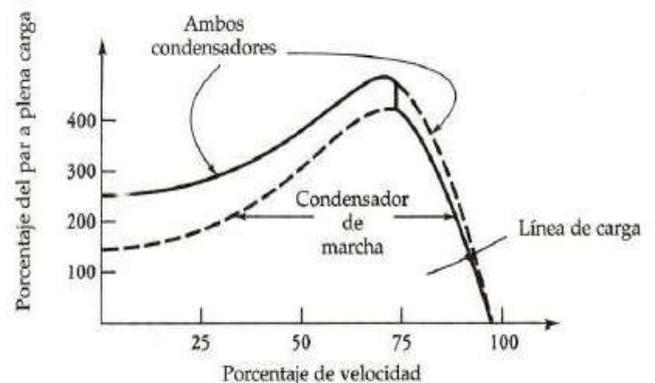


Figura 5.24 Característica velocidad-par de un motor de arranque por condensador y marcha por condensador, B.S. Guri, *Electric Machinery and transformers*, pág.581.

Se emplean dos capacitores durante el período de arranque. Uno de ellos, el capacitor electrolítico de arranque, semejante al que se usa para el trabajo intermitente del motor de arranque por capacitor, tiene una capacitancia bastante alta, de 5 a 6 veces el valor del capacitor de marcha y se saca del circuito mediante un interruptor centrífugo al alcanzar el 75 % de la velocidad sincrónica y con ello produce el par de arranque necesariamente alto. Entonces el motor continúa acelerando como motor de capacitor permanente. El condensador de servicio debe presentar una potencia reactiva de 1,3 kvar por cada kW de potencia del motor.



Motor monofásico con condensador de partida y de marcha

Los motores de condensador con potencia nominal hasta unos 2 kW se emplean para el accionamiento de máquinas electrodomésticas, máquinas herramientas y máquinas para la construcción, por ejemplo para frigoríficos y lavadoras.

Este tipo de motor combina el funcionamiento silencioso y el posible amplio control de velocidad del motor con capacitor de marcha ( $C_m$ ), con el elevado  $T_{arr}$  del motor con capacitor de arranque ( $C_{arr}$ ). El  $C_m$  es generalmente de aceite y trabaja en forma continua permaneciendo conectado en serie con cualquiera de los dos devanados estáticos idénticos con que cuenta este motor.

Al mantener las características del motor de  $C_m$ , este motor se considera reversible, pues cuando  $s = 25\%$  durante el proceso de inversión, el IC se cierra proporcionando un par máximo de frenado, de tal forma que al llegar a velocidad cero, invierte su sentido de giro y el IC se abre de nuevo al ser  $s = 25\%$ . Este motor es muy usado a nivel industrial y en los compresores de los aires acondicionados comerciales.

Al usar doble capacitor se eleva el rendimiento, el factor de potencia y el par máximo o par de desenganche. Al igual que para el caso anterior, este motor funciona como un motor bifásico desequilibrado y por ende, desarrolla un par más uniforme, siendo mucho más silencioso y más eficiente que aquellos que funcionan como monofásicos puros (en operación usan un sólo devanado).

## B. Motor de inducción de arranque por reluctancia

Otro motor de inducción que emplea un estator con entrehierro no uniforme es el motor de arranque por reluctancia.\* Su rotor es el clásico de jaula de ardilla que desarrolla par una vez iniciada la rotación por el principio de reluctancia. Debido a los entrehierros desiguales entre el rotor y los polos salientes no uniformes, sobre el flujo de excitación principal se produce un efecto de barrido.\*

Las normas ASA definen el motor de reluctancia como un motor síncrono similar en construcción al motor de inducción, en el cual el miembro que lleva el circuito secundario tiene polos salientes, sin excitación de CC (rotor). Arranca como un motor de inducción pero funciona normalmente a la velocidad síncrona.

\*El motor de arranque por reluctancia es un motor de inducción cuyo arranque es iniciado por el principio de reluctancia. No es igual que el motor de reluctancia (motor síncrono no excitado). El motor de reluctancia monofásico, el motor de histéresis y el motor subsíncrono son, desde luego, motores monofásicos.

### Construcción y principios de funcionamiento:

Se basa en la propiedad del motor síncrono con rotor de polos salientes, en que es capaz de producir un par motor y girar a la velocidad síncrona, sin excitación del campo con CC.

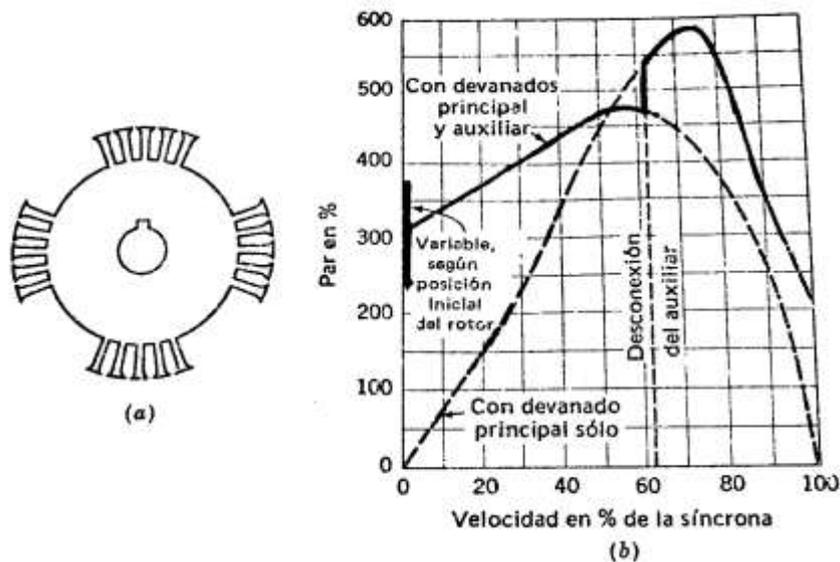
El reducido motor de reluctancia, está concebido a partir del motor de inducción, por lo que al rotor de jaula de ardilla, se le han suprimido algunos dientes (por sectores) con el objeto de lograr los polos salientes. Dado que este motor síncrono arranca como motor de inducción, los anillos que cierran las barras del rotor deben estar completos en toda la periferia, conservándose así, el arrollamiento

amortiguador en jaula de ardilla, utilizado no solo para el arranque, sino que también, proporciona suficiente estabilidad contra las oscilaciones cuando se alcanza la velocidad sincrónica.

Al igual que para los motores síncronos excitados con CC, la puesta en sincronismo se facilita cuando la velocidad alcanzada como motor de inducción es tan elevada como sea posible. Para ello, es importante hacer baja la resistencia del rotor. También mejora ésta situación, cuanto menor sea el  $WR^2$  de la masa giratoria del rotor (rotor + carga acoplada al eje)

El estator del motor de reluctancia puede ser del tipo de fase auxiliar, del tipo de condensador y del tipo bobina pantalla (espira sombra).

La figura, representa una de las láminas dispuestas para un rotor destinado a un motor de reluctancia de cuatro polos en el estator. El motor arrancará como un motor de inducción y se irá acelerando hasta una velocidad de escaso deslizamiento (carga ligera). El par de reluctancia nace de la tendencia del rotor a situarse por sí mismo en la posición de mínima reluctancia respecto al campo giratorio (a la onda de flujo) que gira en el entrehierro a la velocidad sincrónica.



Figuras: a) Chapa troquelada para el rotor de un motor síncrono de reluctancia de cuatro polos.  
b) Características de arranque

En la figura b está representada la curva característica par-velocidad de un motor de reluctancia monofásico de fase partida. El alto valor del par de éste motor, está basado en la necesidad de obtener características satisfactorias. Para ello, se hace necesario construir el motor de reluctancia, con una estructura equivalente a un motor de inducción de 2 a 3 veces mayor la potencia que el síncrono.

Ranuras barreras de flujo se practican en las chapas del rotor de los motores de reluctancia para aumentar el par motor sincronizante, ya que el mismo, es función de la diferencia entre la reactancia axial  $X_a$  y la reactancia en cuadratura  $X_c$

Las muescas, los achatamientos y las protuberancias hechas en el rotor generan áreas igualmente espaciadas de alta reluctancia, que son llamadas polos salientes y cuyo número debe coincidir con el número de polos estatóricos.

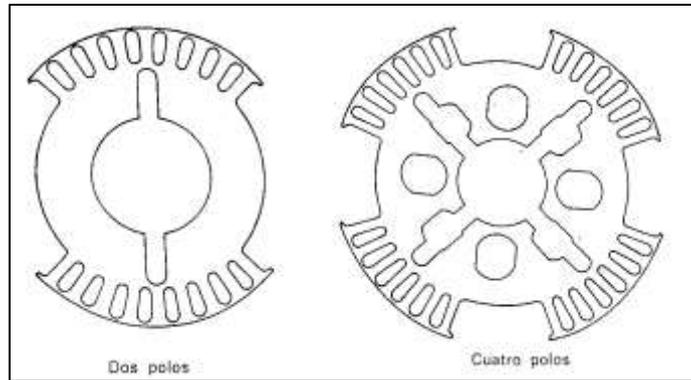


Figura: chapas de rotor para motores de reluctancia polifásicos, con representación de las ranuras “barreras de flujo”.

El funcionamiento de este motor se basa en que la reluctancia del entrehierro sea una función de la posición angular del rotor con respecto al eje del devanado estático, generando un par de reluctancia cuando el rotor gire a velocidad sincrónica ( $n_s$ ) (este motor se considera sincrónico, pese a que arranca como motor de inducción). Si a un rotor jaula de ardilla tradicional se le quitan algunos dientes, dejando intactas las barras y los anillos extremos, tal y como se muestra en la figura adjunta y si se usa cualquiera de los sistemas estáticos de cualquiera de las máquinas antes descritas, el motor arrancará por sí solo como un motor de inducción y en presencia de bajas cargas, se acelerará hasta alcanzar un bajo valor de deslizamiento.

Una vez que el estator se energiza, el rotor acelera como motor de inducción jaula de ardilla con un deslizamiento muy bajo, pues el flujo rotativo del estator arrastra lentamente los polos salientes del rotor. A una velocidad crítica, las trayectorias de baja reluctancia dadas por los polos salientes hacen que estos polos entren en sincronismo con el flujo rotante del estator, haciendo que el deslizamiento sea nulo y desapareciendo la acción de inducción, pues el rotor es empujado por la simple atracción magnética llamada torque o par de reluctancia ( $T_{rel}$ ).

En la Fig. No.11, se muestra diferentes tipos de rotores con sus polos salientes y en Fig. No. 12 se muestran las condiciones de reluctancia que se presenta en el rotor para distintas condiciones de carga (vista estroboscópica). Las diferentes condiciones de carga son presentadas, para operación en sincronismo, de tal forma que en vacío y despreciando las pérdidas rotacionales, la línea polar del rotor coincide totalmente con la línea central de los polos estáticos, pero al aumentar la carga, los polos salientes del rotor tienden momentáneamente a quedarse atrás con respecto al estator.

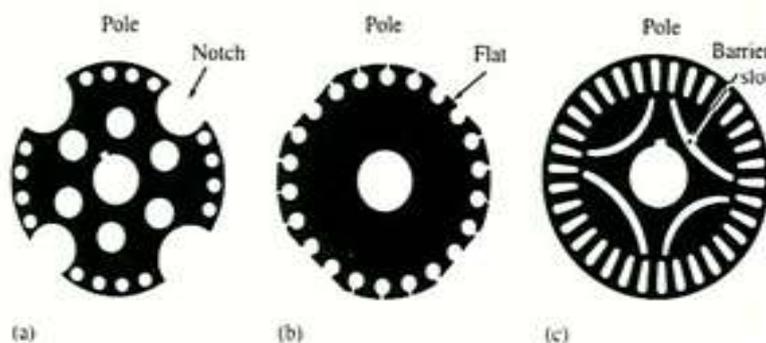


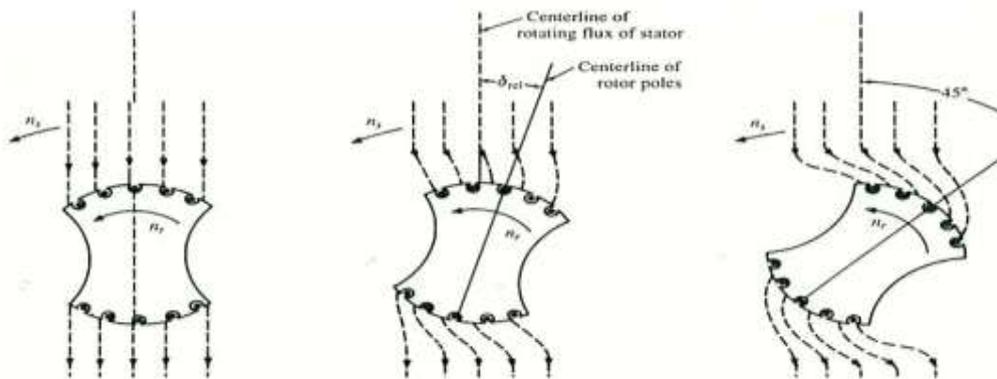
Fig. No. 11. Tipos de laminaciones rotóricas usados en los motores de reluctancia variable

Este retraso momentáneo se representa mediante un desplazamiento angular conocido como ángulo de torque o de reluctancia ( $\delta_{rel}$ ). Una vez que finaliza el fenómeno transitorio de aumento de carga, el rotor recupera el sincronismo a un valor de  $\delta_{rel}$  correspondiente al nivel de carga solicitado en el eje del motor. El aumento en el torque de reluctancia causado por el aumento en  $\delta_{rel}$ , balancea justamente el nuevo torque de carga más las pérdidas. El  $T_{rel}$  crece al crecer el  $\delta_{rel}$ , alcanzando su valor máximo cuando  $\delta_{rel} = 45^\circ$  (límite de desenganche). Para valores de  $\delta_{rel}$  mayores de  $45^\circ$ , la trayectoria del flujo entre las líneas centrales de los polos estáticos y rotóricos crece y por lo tanto, crece la reluctancia y el flujo decrece y la atracción magnética del rotor por parte del campo variable del estator disminuye. Bajo estas condiciones el rotor se sale de sincronismo y el motor empieza a funcionar como motor de inducción con el deslizamiento correspondiente al nivel de sobrecarga. El valor promedio del par de reluctancia ( $T_{rel}$ ), puede ser calculado mediante el uso de la siguiente ecuación:

$$T_{rel} = K (V / f)^2 \cdot \sin (2 \delta_{rel}), \text{ en donde:}$$

$V$  y  $f$  son el voltaje y la frecuencia de la fuente aplicada al motor,

$K$  es la constante constructiva que toma en cuenta la reluctancia, el número de vueltas del devanado y las unidades.



Vistas estroboscópicas de los diferentes niveles de carga al operar un motor de reluctancia variable

### C. Motor de polos sombreados.

Todos los motores monofásicos que se describieron anteriormente emplean estatores con entrehierros uniformes con respecto a sus devanados de rotor y estator, que están distribuidos uniformemente por la periferia del estator. Los métodos de arranque se basan en general en el principio de la fase partida de producir un campo magnético rotatorio para iniciar el giro del rotor.

Una manera fácil de proporcionar el par de arranque de un motor monofásico es integrar un corte en cada polo de los  $30^\circ$  al  $60^\circ$  al bobinado principal. Por lo general  $1/3$  de los polos está rodeado por una cinta de cobre desnudo. Estas bobinas de sombra producen un flujo amortiguado quedando una separación de  $30^\circ$  a  $60^\circ$  desde el campo principal. Este flujo amortiguado con el componente principal no amortiguado, produce un campo giratorio con un par de arranque pequeño que inicia el giro del rotor.



construcción general de un motor de polos sombreados (dos polos salientes).

La figura muestra la construcción general de un motor de polos sombreados (dos polos salientes). Las piezas polares especiales se forman con laminaciones y una bobina de sombreado en cortocircuito, o bien un anillo de cobre macizo de una sola vuelta, alrededor del segmento más pequeño de la pieza polar. La bobina de sombreado está separada del devanado principal de CA y sirve para proveer una división de fase del flujo principal del campo, demorando el cambio de flujo en el segmento menor.

El motor de polos sombreados es, en general, un motor pequeño de potencia fraccionaria que no es mayor de 1/10 hp, aunque se han producido motores hasta de 1/4 hp. La gran ventaja de este motor estriba en su extrema simplicidad: un devanado monofásico, rotor con jaula de ardilla vaciada y piezas polares especiales. No tiene interruptores centrifugos, capacitores, devanados especiales de arranque ni conmutadores. En la figura se puede observar su curva característica velocidad-par, en donde se puede apreciar cómo su par de arranque es muy limitado comparado con los motores anteriormente descritos.

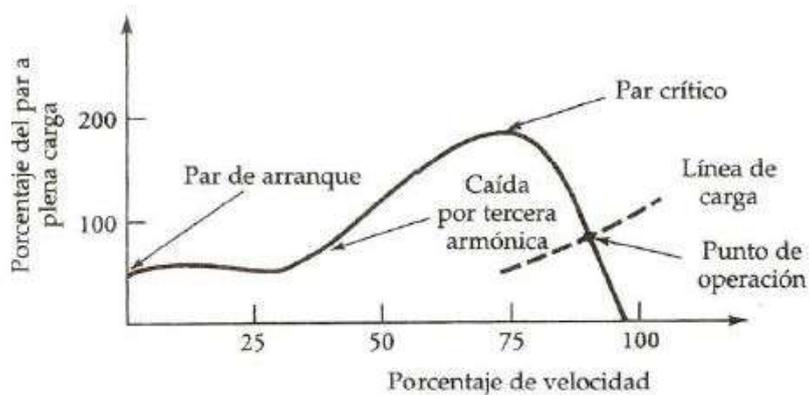


Figura 5.32 Característica velocidad-par de un motor de polos sombreados, B.S. Guru, *Electric Machinery and transformers*, pág.601.

El flujo en el segmento del polo sombreado siempre está en retraso al correspondiente en el segmento principal, tanto en tiempo como en espacio físico, aunque no existe entre ellos una verdadera relación de  $90^\circ$ . El resultado es que se produce un campo magnético rotatorio, suficiente para originar un pequeño desbalanceo en los pares del rotor, tal que el par en el sentido de las manecillas del reloj es mayor que el contrario, o viceversa, y el rotor siempre gira en la dirección del campo rotatorio.

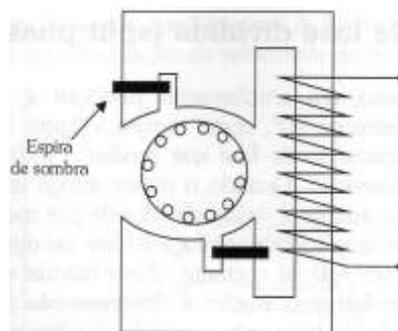
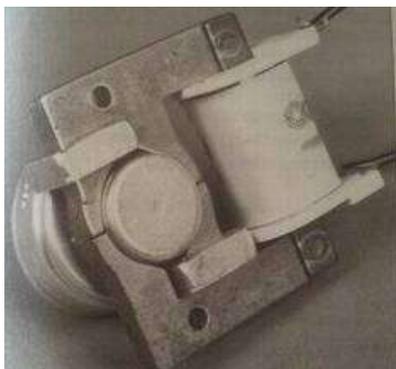


Figura 1.8 - Motor de polos sombreados.



El motor de polos sombreados es robusto, barato, pequeño y necesita de poco mantenimiento. Desafortunadamente tiene bajo par de arranque, baja eficiencia y bajo factor de potencia. Tratándose de un motor pequeño, las últimas dos consideraciones no son serias. Su bajo par de arranque limita su aplicación a motores económicos de tornamesas, proyectores de cine, asadores eléctricos, ventiladores y fuelles pequeños, máquinas expendedoras, tornamesas de exhibición en escaparates, sintonizadores de TV de control remoto y otras cargas relativamente ligeras de servomecanismos. Su rango de potencia está comprendido en valores desde 0.0007 HP hasta 1/4 HP, y la mayoría se fabrica en el rango de 1/100 a 1/20 de HP.

## 2. MOTORES MONOFÁSICOS CON COLECTOR

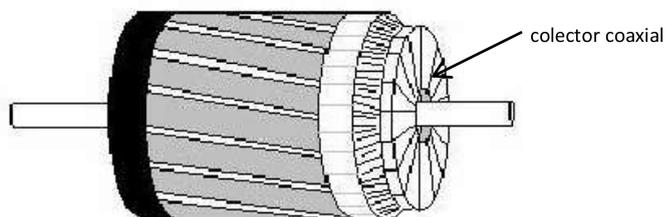
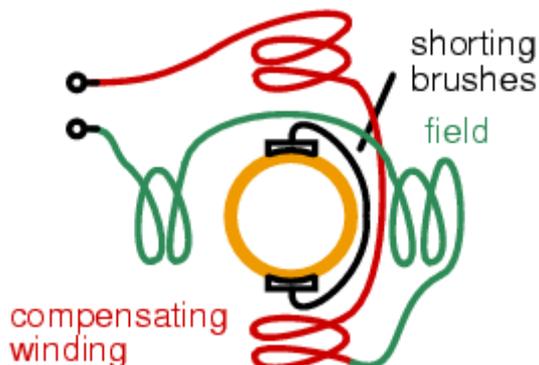
Los motores descritos hasta ahora han sido todos de inducción con rotor jaula de ardilla monofásicos con rotores fundidos, cuyas variantes se diferencian principalmente en el principio de arranque. Existe otro grupo de motores denominados motores monofásicos con colector debido a que el rotor bobinado de este tipo de motor está equipado con un colector y escobillas. Este grupo consta de dos clases: 1. Aquellos que funcionan según el principio de repulsión (motores de repulsión) en los que la energía se transfiere inductivamente desde el devanado de excitación estático monofásico hasta el rotor, y 2. Aquellos que funcionan según el principio del motor serie, en los que la energía es transportada por conducción, tanto al inducido rotórico como a la excitación estática monofásica conectada en serie.

### A. Motor de repulsión

Un motor de repulsión consta de un devanado de campo directamente conectado a la tensión de red y un par de escobillas en corto con desplazamiento de 150 a 250 desde el eje del campo. El campo induce un flujo de corriente en la armadura en cortocircuito que se opone al flujo principal. La velocidad puede ser controlada por la rotación de las escobillas con respecto al eje del campo. Este motor tiene la conmutación por encima de la

velocidad de sincronismo, Corriente de arranque bajo produce un elevado par.

Las partes esenciales son: Un núcleo laminado del estator con un devanado similar al de la fase partida. El estator tiene generalmente, cuatro, seis u ocho polos, un rotor con ranuras en la que va colocado un devanado, similar al de un motor de c.c. El colector es de tipo axial.

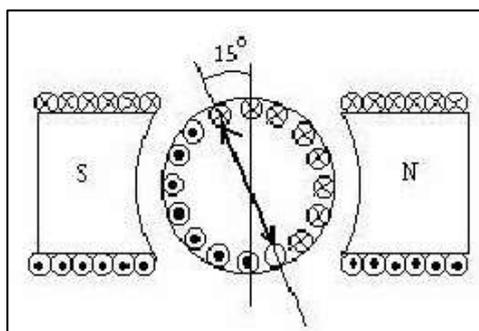


Rotor devanado de un motor de repulsión

Las escobillas de carbón, conectadas entre sí por medio de alambres de cobre relativamente gruesos. El porta escobillas es desplazable, dos escudos en los extremos de hierro colado, que alojan los cojinetes y sujetos al bastidor del motor, dos cojinetes que sostienen el eje del inducido centrado, pueden ser lisos o de bolas.

### Principio de Funcionamiento:

Al conectarse a la corriente monofásica se crea un campo magnético en el estator y se induce otro campo en el inducido. Si estos dos campos están descentralizados unos  $15^\circ$  eléctricos, entonces, se crea un par de arranque que hace que el inducido del motor gire, Así pues, la aplicación el principio de que polos iguales se repelen da al motor su nombre de motor de repulsión. Para invertir el sentido de rotación se desplazan las escobillas a unos  $15^\circ$  eléctricos del centro de los polos del estator en el sentido contrario al original.



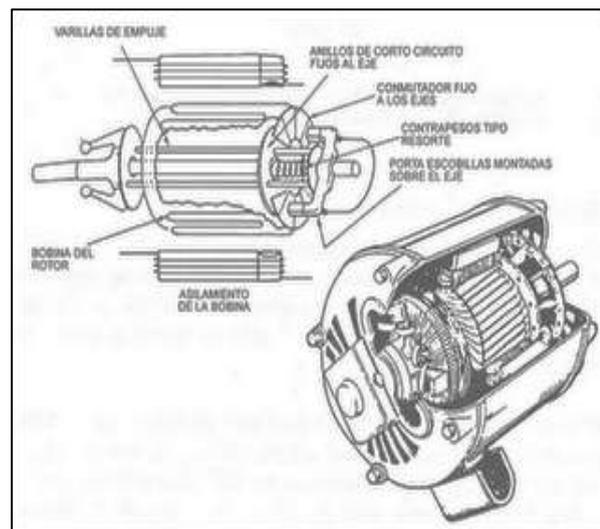
Desplazamiento de las escobillas para cambio de giro en un motor de repulsión

El motor de repulsión posee buen par de arranque, mala regulación de velocidad, esta se puede controlar, variando el voltaje aplicado al motor. Se le utiliza en prensas de

impresión en las que se desea una regulación de la velocidad del miembro impulsor.

### a. Motor de arranque por repulsión y marcha por inducción

Existen dos tipos: El de levantamiento de escobillas y el de escobillas rodantes. El estator y el rotor son iguales al de un motor de repulsión. Se diferencia en que tiene un mecanismo centrífugo que funciona al 75% de la velocidad de régimen. En el tipo de levantamiento de escobillas al llegar al 75% de la velocidad de régimen, levanta las escobillas y el motor sigue funcionando por inducción. En el tipo de escobillas rodantes, el mecanismo centrífugo cortocircuita las delgas del colector al llegar el inducido al 75% de la velocidad de régimen y sigue funcionando por inducción.



Motor de repulsión inducción con mecanismo centrífugo de cortocircuito

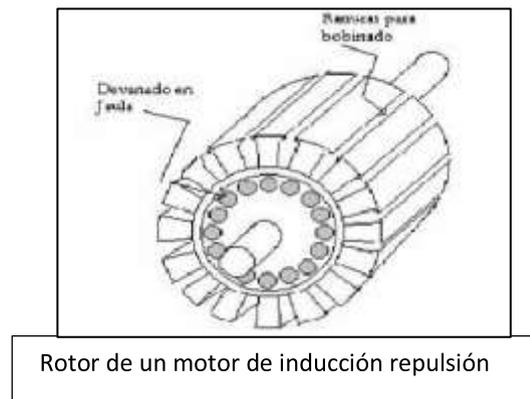
El motor de repulsión-inducción se utiliza cuando se presenta una carga difícil de arranque como un compresor. Cerca de la velocidad sincrónica un mecanismo centrífugo cortocircuita las delgas del colector, dando el efecto de un rotor jaula de ardilla. Las escobillas también pueden ser levantadas para prolongar su vida útil y la del colector. El Par de arranque es de 300% a 600% en comparación con menos de 200% para un motor de inducción puro.

El motor de repulsión inducción posee: fuerte par de arranque, buena regulación de la velocidad. La rotación se invierte de la misma forma que para el motor de repulsión. Se utiliza en: Refrigeradores, compresores, bombas.

### b. motor de inducción-repulsión sin mecanismo centrífugo

El funcionamiento es igual al de un motor de arranque por repulsión y marcha por inducción, sin embargo, no tiene mecanismo centrífugo. Este motor tiene un devanado en jaula de ardilla debajo de las ranuras del inducido.

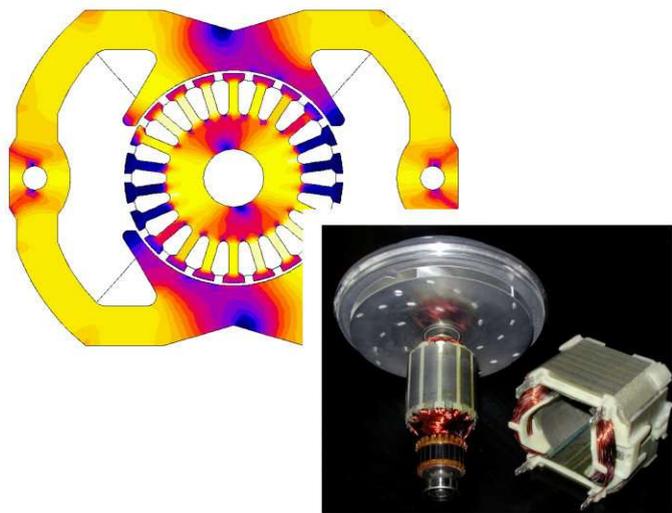
Posee: Buen par de arranque, Buena regulación de la velocidad. Debido a que no tiene mecanismo centrífugo tiene poco mantenimiento. - Actualmente es el más utilizado de los motores de repulsión. Tiene aplicaciones similares al de los otros motores de repulsión



## **B. Motor serie de Corriente alterna**

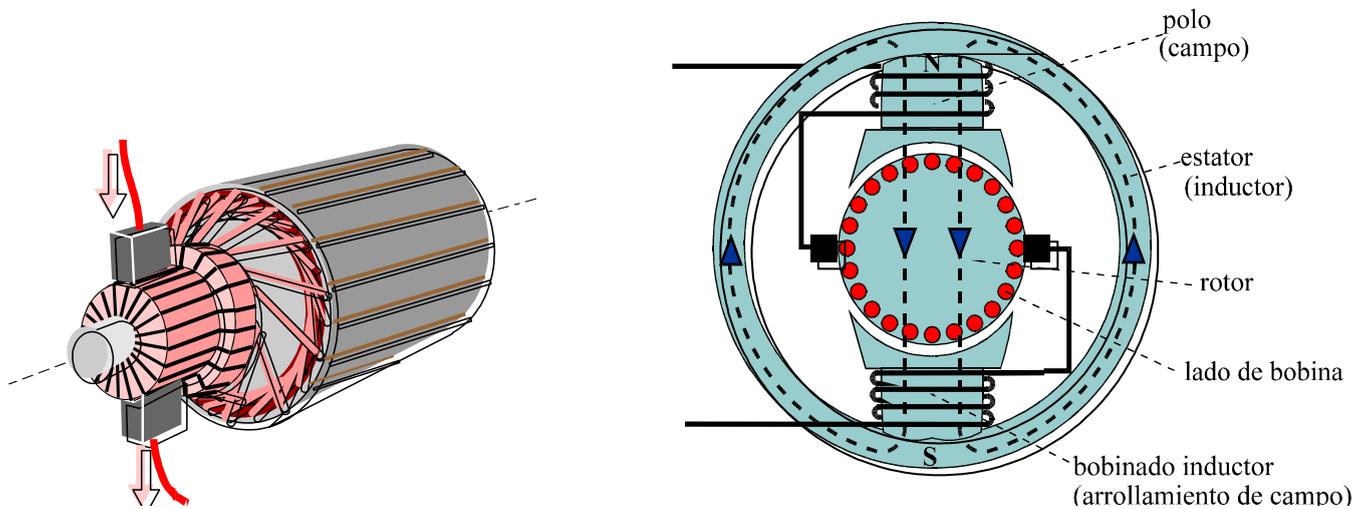
Si un motor de CC serie con “núcleo laminado” equipado con un devanado de campo es conectado a la red AC, la reactancia de la bobina de campo, reduce considerablemente el campo actual. Si bien este motor va a girar, la operación es marginal. Mientras se inicia, la bobinas de armadura conectada a las delgas del colector está cortocircuitada por las escobillas produciendo un efecto transformador en cortocircuito. Esto se traduce en un considerable arco y chispas en las escobillas de la armadura mientras comienza a girar. Este es un problema que disminuye a medida que aumenta la velocidad.

Motores de corriente alterna con colector, al igual que los motores de corriente continua resultan comparables, tienen un mayor par de arranque y mayor velocidad que los motores de inducción AC. El motor AC serie, opera muy por encima de la velocidad de sincronismo de un motor convencional de corriente alterna.



Motor serie de Corriente Alterna

Puesto que un motor con colector puede operar a una velocidad mucho mayor que la de un motor de inducción, se puede dar salida a más potencia que un motor de inducción de tamaño similar. Sin embargo, los motores con colector no son tan libres de mantenimiento como los motores de inducción, debido al roce de las escobillas y el desgaste del colector.

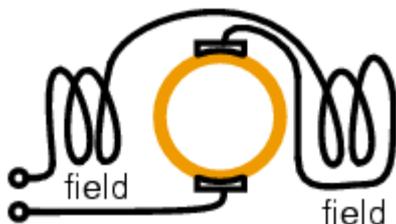


### a. Motor serie monofásico compensado

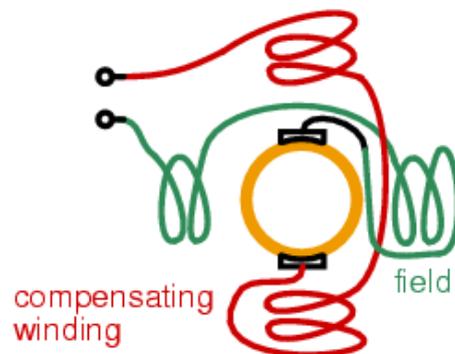
Para limitar los inconvenientes que se presenta en los motores monofásicos de colector, excepto los de pequeña potencia, están provistos de un arrollamiento compensador. El arrollamiento compensador crea una f.m.m que neutraliza la reacción del inducido. Su conexión se puede realizar de dos formas:

- Espiras en cortocircuito coaxiales con el eje de la línea de escobillas.
- En serie con el inducido.

Para mejorar el factor de potencia, se emplea un entrehierro menor, con la correspondiente disminución del flujo inductor, reduciéndose de esta forma la tensión reactiva en el inducido.



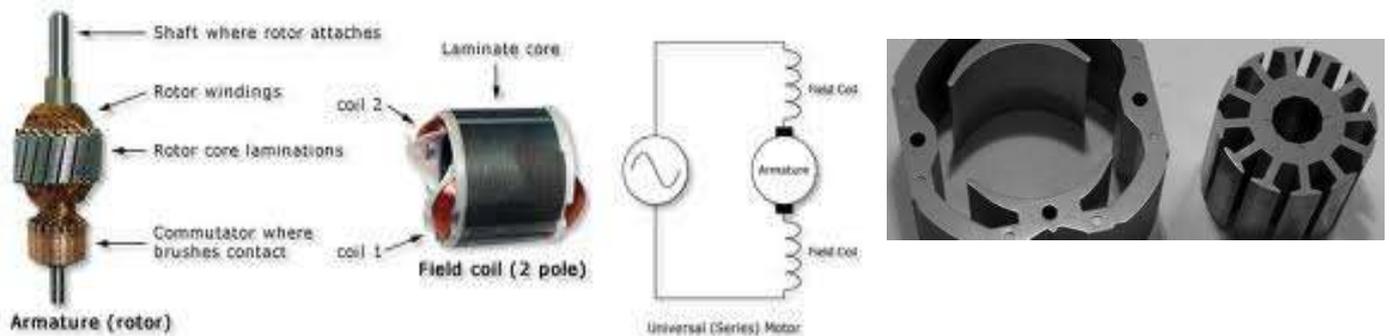
Motor serie de CA sin compensación



Motor serie de CA con devanado de compensación

## C. El motor universal

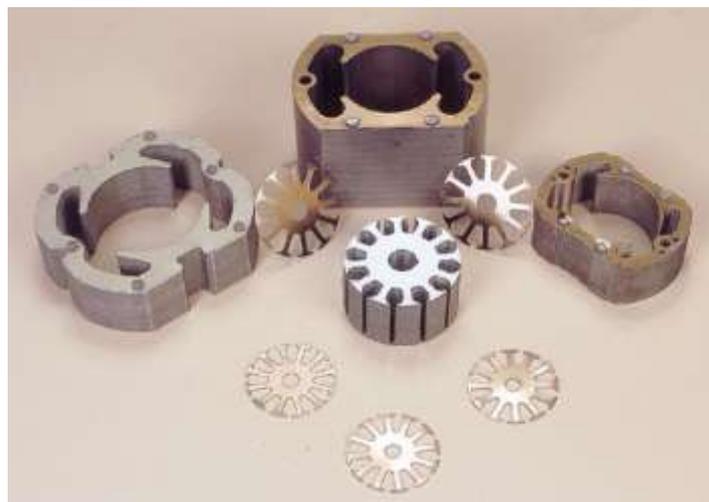
Funcionan con c.a. y c.c. y son de fracción de 1 hp y son usados principalmente en aparatos electrodomésticos. El inducido es igual al de un motor de c.c. funciona a la misma velocidad con c.c. o c.a. La velocidad se puede regular por medio de reóstatos y bobinas de tomas múltiples devanadas en torno del campo. Como es un motor serie, la carga siempre debe estar conectada al motor.



Partes constructivas de un motor universal

El motor universal es el mismo motor serie de c.c. en el cual se ha alterado el diseño básico: Las pérdidas por histéresis se reducen empleando hierro al silicio laminado de alta permeabilidad; las pérdidas por corrientes parásitas se reducen al mínimo construyendo los circuitos magnéticos (estator, núcleo) con láminas de hierro - silicio especial; la reactancia del bobinado de campo se reduce empleando núcleos de polos cortos y bobinados de pocas vueltas; la reactancia del inducido se reduce utilizando bobinas compensadoras que se montan en el núcleo del estator. Se usan en: Licuadoras, aspiradoras, batidoras, etc.

En el caso de funcionar con alterna hay que tener en cuenta que tanto el estator como el rotor deben ser de hierro laminado. También es importante tener en cuenta que en corriente alterna aparece el efecto de la reactancia de los bobinados, por lo tanto la tensión aplicada en alterna es mayor que la tensión aplicada en continua.



Núcleo de hierro de un motor serie CA o motor universal

Un motor universal es un motor capaz de funcionar en corriente alterna como en corriente continua. Consta de al menos dos electroimanes, uno montado en el eje y otro en la carcasa. El efecto de imán móvil se consigue mediante el colector de delgas, en este caso con el colector conseguimos que el electroimán del eje gire respecto del propio eje (no solidariamente) de forma que siempre este enfrente de la polaridad del electroimán de la carcasa.



*Motor Universal*



*Colector de delgas*

En su funcionamiento como motor de continua tenemos que el electroimán de la carcasa es un imán fijo, y el electroimán del eje está también siempre orientado en la misma dirección, independientemente del giro del eje.

En su funcionamiento como motor de alterna en el electroimán de la carcasa tenemos un campo magnético (imán) que cambia su polaridad constantemente (conforme a la red eléctrica) y el electroimán del eje también cambia constantemente de forma que su campo eléctrico siempre se opone al del imán de la carcasa.

Para identificar este motor lo podemos hacer observando si tiene colector de delgas y si lo usamos conectado a la corriente alterna directamente. La construcción del motor universal es semejante a la del motor de corriente continua de excitación derivación.

Cuando el motor universal se conecta a tensión alterna, cambian al mismo tiempo el sentido de la corriente de excitación y del inducido. De esta manera, el par de giro que se produce actúa siempre en el mismo sentido.

La rotación se puede invertir cambiando la dirección de la corriente ya sea en el circuito de campo o en el inducido.



*Motores monofásicos*

Los motores universales son los motores pequeños más utilizados. Alcanzan velocidades superiores a los motores asíncronos monofásicos, y de esta manera se obtiene una potencia de accionamiento grande para un tamaño pequeño. Como su inducido generalmente va unido fijo al ventilador y al reductor, apenas existe peligro de que se embale. Las interferencias de radio debidas al chisporroteo de las escobillas se eliminan mediante condensadores antiparasitarios. Los motores universales se utilizan, por ejemplo, para accionamiento de máquinas electrodomésticas y pequeñas herramientas eléctricas.

Sus características principales no varían significativamente, sean alimentados con CA o CD. Por regla general, se utilizan con corriente alterna. También se les denomina motor monofásico en serie.

Este tipo de motor se puede encontrar tanto para una máquina de afeitar como para una locomotora, esto da una idea del margen de potencia en que pueden llegar a ser construidos. Los bobinados del estator y del rotor están conectados en serie a través de unas escobillas. El par de arranque se sitúa en 2 ó 3 veces el par normal.

La velocidad cambia según la carga. Cuando aumenta el par motor disminuye la velocidad. Se suelen construir para velocidades de 3000 a 8000 r.p.m., aunque los podemos encontrar para 12000 r.p.m. Para poder variar la velocidad necesitamos variar la tensión de alimentación, normalmente se hace con un reóstato o resistencia variable.

El cambio de giro es controlable, solo tenemos que intercambiar una fase en el estator o en el rotor, nunca en los dos, lo cual es fácilmente realizable en la caja de conexiones o bornes que viene incorporado con el motor. Cuando el motor es alimentado, se produce que las corrientes circulan en el mismo sentido, tanto el estator como en el rotor, pero en el cambio de ciclo cambia el sentido en los dos, provocando el arranque del motor.

### **Bobinado de Compensación**

Los motores universales son motores en serie de potencia fraccional, de c. a., diseñados especialmente para usarse en potencial ya sea de c.c. o de c. a.. En general, los motores universales pequeños no requieren arrollamientos compensadores por el hecho que el número de espiras de su armadura es reducido y por lo tanto, también lo será su reactancia de armadura. Como resultado, los motores inferiores al 50% de caballo ( $\frac{1}{2}$  hp) generalmente se construyen sin compensación. El coste de los motores universales no compensados es relativamente bajo por lo cual su aplicación es muy común en aparatos domésticos ligeros, por ejemplo aspiradoras, taladros de mano, licuadoras, etc.

Los motores universales grandes tienen algún tipo de compensación. Normalmente se trata del devanado compensador del motor de serie o un devanado de campo distribuido especialmente para contrarrestar los problemas de la reacción de armadura.

Si el motor serie de c. a. tendrá aplicaciones tanto con c. a. cómo con c.c., el arrollamiento compensador se conecta siempre en serie con la armadura y se dice que el motor está compensado conductivamente. Si el devanado compensador está conectado en corto circuito sobre si mismo, se llama que el motor está compensado inductivamente.