

# MOTORES ELÉCTRICOS



## INDICE DE CONTENIDO

1. Introducción.....	3
2. Ley de Faraday.....	3
3. Ley de Lenz.....	4
4. Constitución básica de un motor.....	5
5. Características y parámetros de los motores.....	6
5.1. VELOCIDAD DE ROTACIÓN.....	6
5.2. PAR MOTOR.....	7
5.3. FACTOR DE POTENCIA.....	8
5.4. MONOFÁSICOS Y TRIFÁSICOS.....	8
6. Clasificación de los motores.....	9
6.1. MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA.....	9
6.2. MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA.....	10
6.2.1. Motores asíncronos.....	10
6.2.2. Motores síncronos.....	11
6.3. MOTORES UNIVERSALES.....	11
7. Motores de corriente continua.....	13
7.1. TIPOS Y CONEXIONES DE MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA....	16
7.1.1. Motores que emplean un electroimán para el inductor.....	16
7.1.1.1. Motores serie.....	16
7.1.1.2. Motores en derivación.....	17
7.1.1.3. Motores de excitación compuesta.....	17
7.1.2. Motores con el inductor formado por un imán permanente.....	18
7.1.3. Motores con el rotor sin armadura.....	18
8. Motores de corriente alterna.....	20
8.1. MOTORES DE INDUCCIÓN ASÍNCRONO.....	21
8.1.1. Motores asíncrono trifásico.....	26
8.1.1.1. MOTOR DE JAULA DE ARDILLA SIMPLE.....	26
8.1.1.2. MOTOR DE ROTOR BOBINADO.....	27
8.1.2. Motor asíncrono monofásico.....	27
8.2. MOTOR SÍNCRONO.....	29
8.3. MOTOR UNIVERSAL.....	33
9. Motores paso a paso.....	36
9.1. TIPOS DE MOTORES PASO A PASO.....	37
9.1.1. Motor paso a paso de imán permanente.....	37
9.1.2. Motor paso a paso de reluctancia variable.....	39
9.1.3. Motor híbrido.....	42

## 1. Introducción

El motor es un elemento indispensable en un gran número de equipos eléctricos y electrónicos. El conocimiento de su forma de trabajo y sus propiedades es imprescindible para cualquier técnico o aficionado que emplee estos componentes para el montaje o mantenimiento de dichos equipos electrónicos, con objeto de poder efectuar la elección del modelo más adecuado y así obtener el mejor rendimiento de los mismos, ya que existen una gran variedad de diferentes tamaños y modelos en el mercado comercial.



Conjunto de motores eléctricos de diversos modelos y tipos, normalmente empleados en diversos equipos electrónicos.

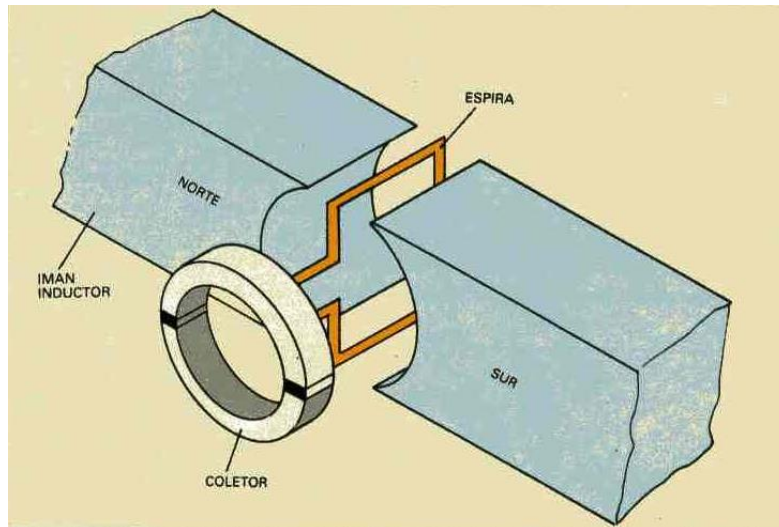
Los motores eléctricos se encuentran dentro del grupo de las máquinas eléctricas y su misión fundamental es la de convertir la energía eléctrica que se le suministra, en una energía mecánica que será la que se emplea para poner en movimiento el mecanismo del equipo en el que se instale.

El funcionamiento de un motor, en general, se basa en las propiedades magnéticas de la corriente eléctrica y la posibilidad de crear, a partir de ella, unas determinadas fuerzas de atracción y repulsión encargadas de actuar sobre un eje y generar un movimiento de rotación.

## 2. Ley de Faraday

El principio de funcionamiento del motor se basa en la ley de Faraday. Un físico inglés que en el año 1831 descubrió que en cualquier conductor que se mueve en el seno del campo magnético de un imán se generará una diferencia de potencial entre sus extremos proporcional a la velocidad de desplazamiento. Si en lugar de un conductor rectilíneo con terminales en circuito abierto se introduce un anillo conductor con los extremos conectados a una determinada resistencia y se le hace girar en el interior del campo, de forma que varíe el flujo magnético abrazado, por la misma se detectará la aparición de una corriente eléctrica que circula por la resistencia y que se cesará en el momento en que se detenga el movimiento.

Normalmente en un motor se emplea un cierto número de espiras devanadas sobre un núcleo magnético de forma apropiada y también en algunas ocasiones se sustituye el imán permanente creador del campo por un electroimán, el cual produce el mismo efecto cuando se le aplica la corriente excitadora. A este último elemento (imán o electroimán) se denomina **inductor** y el conjunto de espiras y núcleo móviles constituyen el **inducido**.



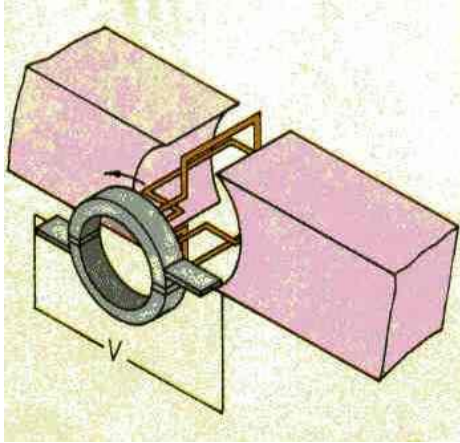
Esquema de principio de la estructura básica de un motor eléctrico, representada por una espira giratoria en el seno de un campo magnético.

### 3. Ley de Lenz

El sentido de la corriente eléctrica que circula por el inducido está definido mediante la **ley de Lenz** que indica que toda variación que se produzca en un campo magnético tiende a crear un efecto en sentido opuesto que compense y anule la causa que lo produjo. Si esta ley se aplica a nuestro caso nos indicará que la corriente inducida creará un campo magnético tal que se oponga al movimiento de la misma, lo que obligará a aplicar una determinada energía para mantener el movimiento, la cual dependerá lógicamente de la intensidad de la corriente generada y del valor de la resistencia de carga, pudiendo calcularse como el producto de la energía consumida en la carga por un número que expresará el rendimiento de la conversión.

Ahora bien, todos los fenómenos expresados corresponden al efecto opuesto a de un motor, es decir, mediante el sistema descrito se genera una corriente eléctrica a partir de un movimiento mecánico, lo que corresponde al principio de funcionamiento de una **dínamo**, sin embargo, al ser dicho efecto reversible, bastará con invertir los papeles y sin en lugar de extraer corriente del **inducido** se le aplica una determinada tensión exterior, se producirá la circulación de una cierta intensidad de corriente por las espiras y éstas comenzará a girar, completándose así el motor.

Es importante considerar que teniendo en cuenta la ley de **Lenz**, mencionada anteriormente, al girar el inducido se creará en el mismo determinada tensión eléctrica, de sentido contrario a la exterior que tenderá a oponerse al paso de la corriente para compensar así las variaciones del flujo magnético producidas, denominada **fuerza contraelectromotriz**.



Al recibir la espira una tensión eléctrica externa comienza a girar. Se observa las posiciones del máximo y del mínimo flujo magnético.

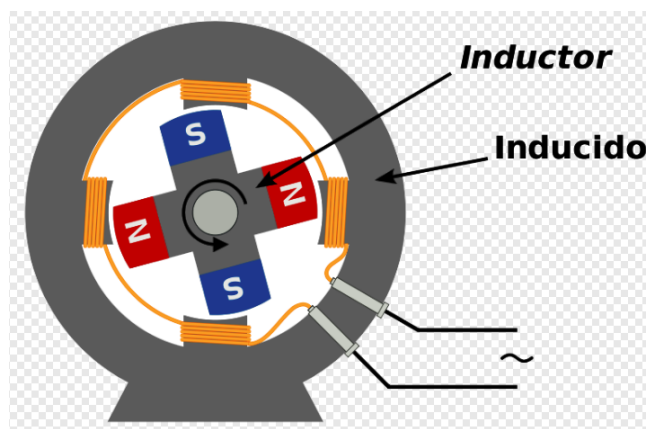


Detalle del inducido o rotor de un motor de corriente continua. En la parte superior se encuentra el colector.

#### 4. Constitución básica de un motor

Todos los motores están formados por un circuito magnético y dos eléctricos. Dentro del circuito magnético debemos tener en cuenta lo que se denomina entrehierro, que es un espacio de aire existente entre las zapatas polares y el rotor del motor.

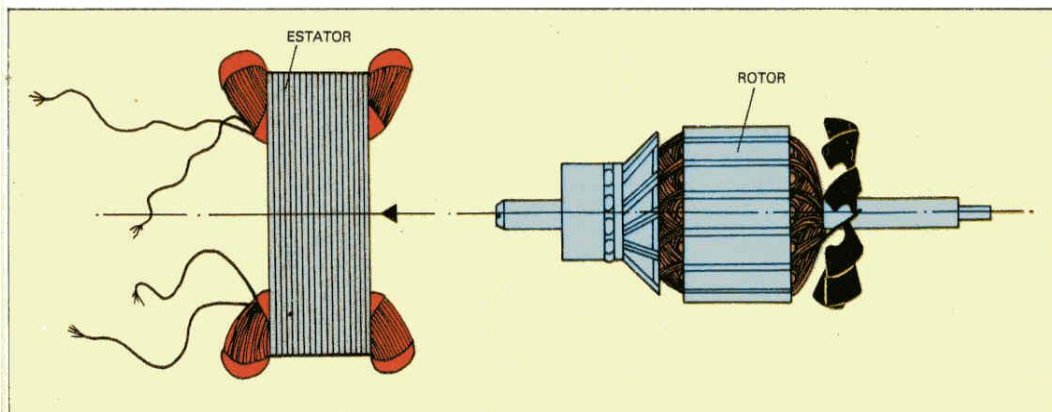
Los circuitos eléctricos se conocen con los nombres de **inductor** e **inducido**. El **inductor** es el circuito eléctrico que va arrollado a los núcleos de los polos del motor. Este circuito también es conocido con el nombre de **circuito de excitación**, ya que cuando le atraviesa una corriente eléctrica (corriente de excitación) genera el flujo que aplica al conjunto del circuito magnético del motor, formando dos polos (N-S). El circuito **inducido** está constituido por el conjunto de bobinas que van colocadas en las ranuras del rotor. Como consecuencia de la corriente de excitación se crea, en éste, otra corriente que se conoce como **inducida**.



Motor con el circuito de excitación (inductor) y el inducido.

A su vez, en todo motor eléctrico debemos distinguir:

- **Estátor.** Es la parte fija o estática del motor. Está formado por una carcasa en la que se fija una corona con ranuras de chapas de acero al silicio, de 0,5mm de espesor. Las chapas quedan aisladas entre sí por oxidación o por barniz aislante.
- **Rotor.** Es la parte móvil o giratoria del motor. Se sitúa en el interior del **estátor** y está compuesto por un grupo de chapas de acero apiladas que forman un cilindro solidario con el eje del motor. En la periferia lleva incorporadas una serie de ranuras en las que se sitúan los conductores conectados por medio de una corona metálica.



Sección esquemática de un motor en la que se observa los dos elementos generadores de movimiento: estator y rotor.

## 5. Características y parámetros de los motores

Normalmente los motores se caracterizan por dos parámetros que expresan directamente sus propiedades. Son los siguientes:

- Velocidad de rotación
- Par motor.

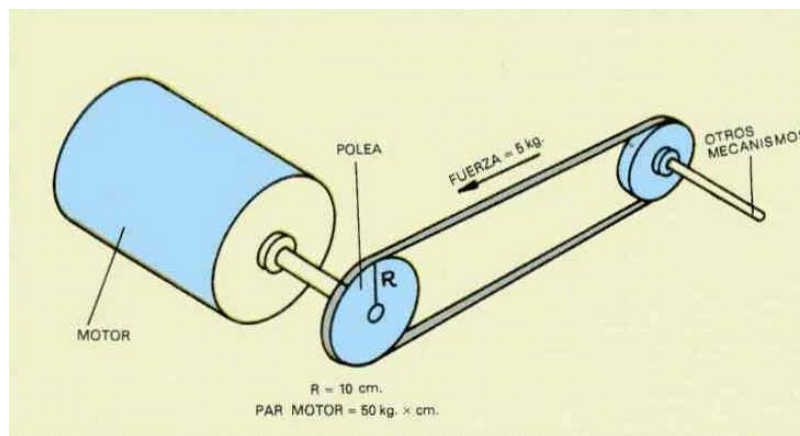
Otro de los parámetros que se suelen utilizar en los motores de mediana y gran potencia es el **factor de potencia**.

### 5.1. VELOCIDAD DE ROTACIÓN

La velocidad de rotación indica el número de vueltas por unidad de tiempo que produce el motor y depende por completo de la forma de construcción del mismo, la tensión de alimentación, así como de la carga mecánica que se acople a su eje, aunque esto último no es aplicable a un tipo especial de motores denominados **síncronos**. Las unidades empleadas son las revoluciones por minuto (r.p.m.) y las revoluciones por segundo (r.p.s.).

## 5.2. PAR MOTOR

El **par** motor expresa la fuerza de actuación de éste y depende lógicamente de la potencia que sea capaz de desarrollar dicho motor, así como de la velocidad de rotación del mismo. El concepto de **par** es importante a la hora de elegir un modelo para una aplicación determinada; se define como la fuerza que es capaz de vencer el motor multiplicada por el radio de giro. Esto significa que no supone lo mismo el mover, por ejemplo, una polea que transmite por correa una fuerza de 10 kilogramos, con un radio de 5 centímetros que con otro radio de 10 centímetros, ya que el **par** motor se da en el segundo caso el doble que el del primero. Las unidades de medida se suelen expresar en Kg x cm (kilogramos por centímetro) o bien en gr x cm (gramos por centímetro).



Uno de los parámetros básicos que caracterizan a un motor es el par que conjuga la fuerza de actuación con la distancia al eje del mismo.

Además de estos factores también se tienen en cuenta otros como son las condiciones de arranque, la potencia absorbida y el factor de potencia. Existe una relación matemática que diga ambos parámetros, ya que como se ha explicado, no son independientes entre sí; dicha relación se expresa por la fórmula siguiente:

$$M = 0,95 \frac{P}{N}$$

donde  $M$  es el **par** motor expresado en Kg x cm (kilogramos por centímetro),  $P$  es la potencia absorbida en vatios, y  $N$  es la velocidad en r.p.m. (revoluciones por minuto).

### 5.3. FACTOR DE POTENCIA

Otro de los parámetros que también deben de ser tenido en cuenta, sobre todo en los motores de potencias medias o elevadas es el denominado **factor de potencia** que expresa la cifra de **potencia reactiva** que el motor emplea durante su funcionamiento.

El **factor de potencia** se expresa como la relación entre la potencia real absorbida por el motor en vatios y la potencia **aparente** que se define mediante el producto de la tensión aplicada por la corriente absorbida. Es decir, que factor de potencia es igual vatios real partido por la potencia aparente:

$$\text{Factor de potencia} = \frac{\text{Vatios reales}}{\text{Potencia aparente}}$$

A este factor también se le denomina **coseno  $\phi$** .

### 5.4. MONOFÁSICOS Y TRIFÁSICOS

Para entender y diferenciar los dos grandes tipos de motores eléctricos que se alimenta de corriente alterna (CA), simplemente con señalar su nombre nos damos cuenta cómo trabajan estos motores: la fuente de energía de los motores eléctricos **monofásicos** tiene una sola fase, mientras que la de los **trifásicos** posee tres fases.

El **motor monofásico** se alimenta de una corriente eléctrica alterna de 120 a 230Vca de solamente una fase y neutro. El **motor trifásico** debe el término a que se alimenta de energía eléctrica alterna con tres fases (trifásica).

Las instalaciones **monofásicas** son más propias de hogares, con tensiones que van de 120 a 230 voltios CA y potencias que quedan por debajo de los 10 Kw. Y las instalaciones **trifásicas** se utilizan en el entorno industrial donde se requieren de tensiones de 380 voltios CA y grandes potencia de más de 10Kw para mover máquinas y elementos de gran potencia.



## 6. Clasificación de los motores

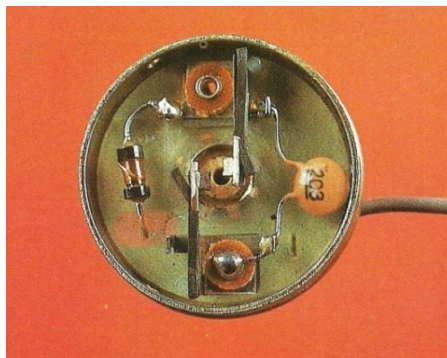
En función de la corriente empleada para la alimentación del motor, que define por completo la característica constructiva del mismo, se pueden clasificar los motores en tres grandes grupos:

- Motores de corriente continua
- Motores de corriente alterna
- Motores universales.

### 6.1. MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA

En los motores de corriente continua, tal como su nombre indica, es necesario aplicar al inducido una corriente continua para obtener movimiento, así como al inductor, en el caso de que éste sea del tipo electroimán, conociéndose a esta última con la denominación de **corriente de excitación**. Su construcción suele estar relacionada mediante un inductor cilíndrico hueco (imán o electroimán) que contiene un cierto número de pares de polos magnéticos (norte y sur), que se conoce también con el nombre de **estátor**. En su interior se encuentra el **inducido** o rotor también cilíndrico sobre el que se encuentra el arrollamiento. El eje está acoplado mediante rodamientos o cojinetes para permitir el giro y dispone de una superficie de contacto montada sobre un dispositivo llamado **colector** sobre el que se deslizan los contactos externos o **escobillas**.

En la siguiente imagen se aprecia el aspecto de los contactos o **escobillas** para proporcionar al **colector** del motor la tensión y corriente de funcionamiento.



Aspecto de los contactos o escobillas que proporcionan al colector del motor la tensión y corriente de funcionamiento.

## 6.2. MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA

Los motores de corriente alterna son los que se alimentan con este tipo de excitación y comprenden dos tipos con propiedades bastante diferenciadas:

- Motores asíncronos
- Motores síncronos

### 6.2.1. Motores asíncronos

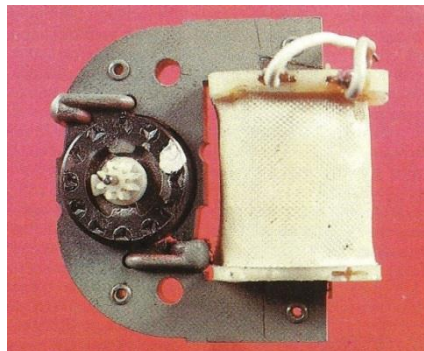
Estos motores son conocidos con el nombre de motores de **inducción**, basan su funcionamiento en el efecto que produce un campo magnético alterno aplicado a un **inductor** o **estátor** sobre un **rotor** con una serie de espiras sin ninguna conexión externa sobre la que se inducen unas corrientes por efecto transformador.

Por lo tanto, en este sistema solo se necesita una conexión a la alimentación, que corresponde al estátor, eliminándose, por lo tanto, el sistema de **escobillas** que se precisa en otros tipos de motores.



Rotor o inducido de un motor de alterna de inducción. Obsérvese que no precisa ningún tipo de contactos de excitación.

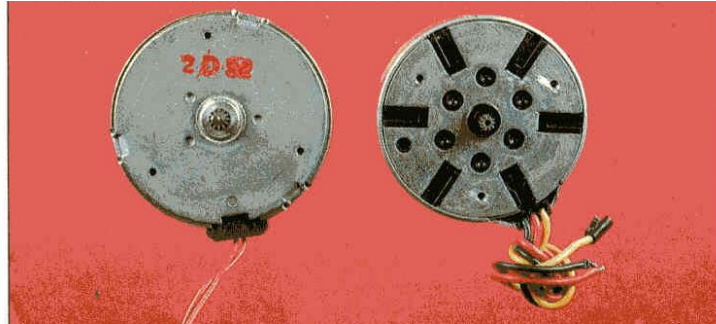
En la siguiente imagen se aprecia un motor de corriente alterna del tipo de **inducción** o **asíncrono**.



Motor de corriente alterna del tipo de inducción o asíncrono.

### 6.2.2. Motores síncronos

Los motores síncronos están constituidos por un **inducido** que suele ser fijo, formando por lo tanto el **estátor** sobre el que se aplica una corriente alterna y por un inductor o **rotor** formado por un imán o electroimán que contiene un cierto número de pares de polos magnéticos. El campo variable del estátor hace girar el **rotor** a una velocidad fija y constante de sincronismo que depende de la frecuencia de la tensión alterna aplicada. De ello deriva su denominación de síncronos.



Motores de corriente alterna del tipo síncrono.

### 6.3. MOTORES UNIVERSALES

Los motores universales son aquellos que pueden recibir alimentación tanto continua como alterna, sin que por ello se altere sus propiedades. Básicamente responde al mismo principio de construcción que los de continua pero excitando tanto al **inductor** como a **inducido** con la misma corriente, disponiendo a ambos **en serie** sobre el circuito de alimentación.

## Recuerda...

1. La misión fundamental de un motor eléctrico es la de transformar la energía eléctrica que recibe por sus conexiones en energía mecánica útil para accionar cualquier mecanismo.
2. El fundamento físico de un motor está basado en la ley de Faraday que indica que sobre todo conductor en circuito cerrado que se mueva en el seno de un campo magnético, variando la cantidad de flujo que le atraviesa, se inducirá una corriente eléctrica. Al ser este fenómeno reversible se obtiene un motor.
3. El motor eléctrico se compone de dos componentes básicos e imprescindible, que son el inductor, que es el elemento generador del campo magnético, y el inducido, que suele ser la parte móvil, siendo el encargado de recibir el flujo del inductor y producir las necesarias variaciones del mismo.
4. La fuerza contraelectromotriz es la tensión eléctrica que se genera en el inducido al girar éste, de sentido contrario a la aplicada exteriormente y que tiende a oponerse al movimiento.
5. El par motor es el producto de la fuerza que desarrolla el motor por la distancia desde el punto de aplicación de la misma hasta el eje o radio de giro.
6. El estátor es el elemento fijo o estático del motor, que en la mayoría de los modelos se corresponde con el inductor. El rotor, por el contrario, es la parte móvil constituida normalmente por el inducido.

## 7. Motores de corriente continua

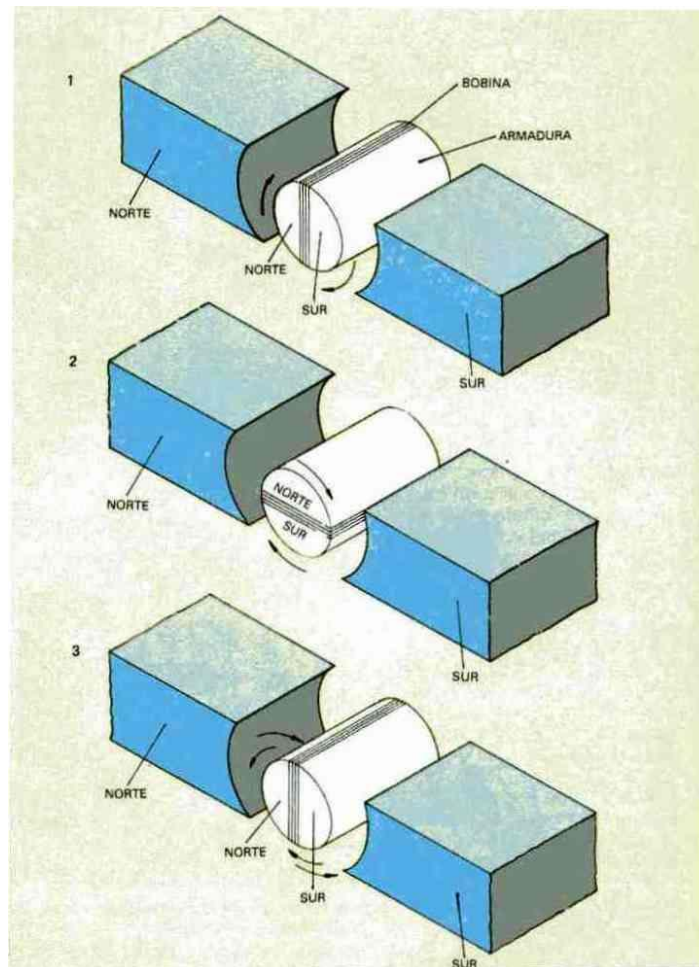
Un motor de corriente continua está compuesto por un imán fijo o electroimán que constituye el inductor o estátor y un bobinado denominado inducido o rotor que es capaz de girar en el interior del primero, cuando recibe una corriente continua de excitación. Seguidamente se va a analizar con mayor detalle la forma en que se origina el movimiento y las diversas fases que compone el mismo.



Interior de un motor de corriente continua. Se observa el imán permanente del inductor que rodea al inducido.

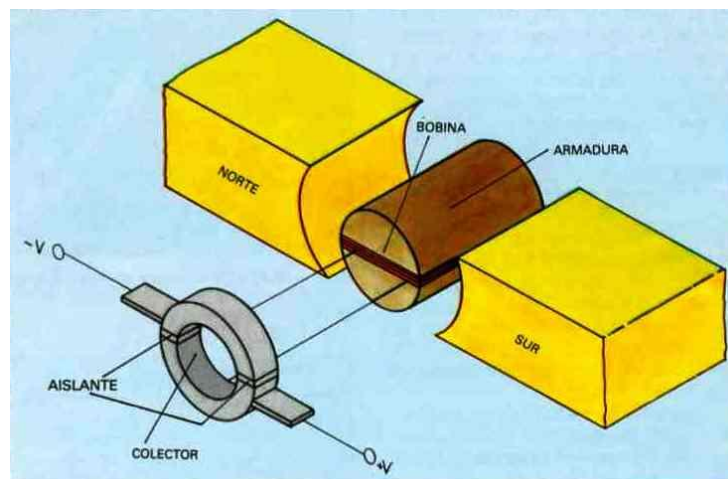
Suponiendo un motor elemental según se encuentra representado las imágenes en la siguiente página, si sobre la bobina se hace pasar una corriente se creará en la misma un campo magnético que la hará girar al crearse unas fuerzas de atracción y repulsión con respecto al imán del estátor. Durante este giro se producen una serie de efectos que condicionan la construcción del motor, el primero de ellos se produce cuando se enfrentan dos polos de distintos signos, momento en que la atracción será máxima y la bobina tiende a detenerse, sin embargo, por inercia pasará de largo pero el sentido de giro se invertirá y volverá hacia atrás deteniéndose al cabo de unas cuantas oscilaciones.

Ahora bien, si en el momento en que los polos opuestos se enfrentan, se invierte el sentido de circulación de la corriente en la bobina, automáticamente se producirá un cambio de signo en los polos magnéticos creados por la misma dando origen a que aparezcan unas fuerzas de repulsión entre ellos que obligarán a aquella a seguir girando otra media vuelta, debiéndose invertir la corriente nuevamente y así sucesivamente.



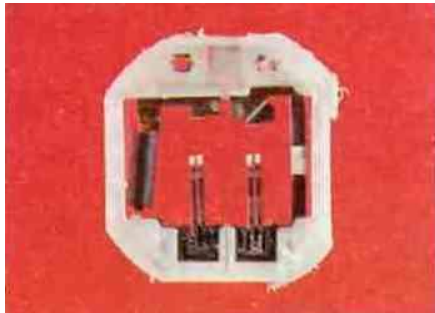
Secuencia de giro del inducido de un motor de corriente continua en ausencia de conmutación de polaridad en el bobinado: 1) La fuerza de repulsión es máxima provocando el giro. 2) El inducido ha girado 90° y se mantiene en rotación. 3) La atracción es máxima, deteniéndose el motor después de unas oscilaciones.

El método empleado para producir estos cambios es el de dividir el anillo **colector**, por el que recibe la bobina la corriente de alimentación, en dos mitades iguales separadas por un material aislante, que giran deslizándose sobre dos contactos eléctricos fijos o escobillas, uno conectado al polo positivo y el otro al negativo.

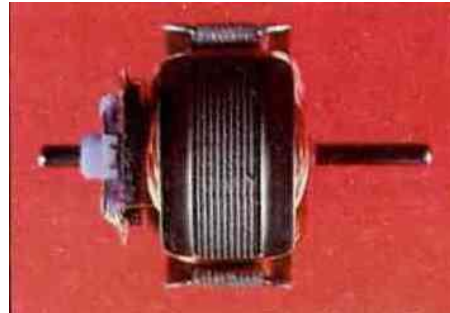


Para conseguir que la rotación se mantenga es preciso dividir el colector en dos partes con objeto de invertir la polaridad en los momentos apropiados.

De esta forma, dichos contactos cruzarán dos veces por cada rotación la división entre los semianillos invirtiéndose así el sentido de circulación de la corriente de la bobina.

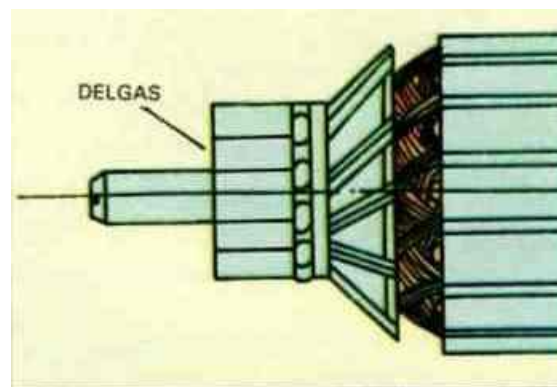


Detalla de los contactos que suministran la tensión y corriente de funcionamiento al colector del motor.



Inducido del motor de continua. El colector se encuentra situado a la derecha.

Un motor compuesto de una sola bobina tendrá un movimiento muy poco uniforme debido a que las fuerzas magnéticas que lo hacen rotar varían con la posición relativa de la bobina y los imanes. Dos veces en cada rotación dará un tirón en el momento en que se invierten las polaridades. Con objeto de aumentar la potencia y para obtener un movimiento más constante, la parte móvil o rotor se compone de varias bobinas de hilo aislado independientes entre sí, devanadas sobre un armazón de hierro dulce denominado armadura y conectadas a dos secciones del colector que estará dividido en un número de partes igual al doble de bobinados que contenga el rotor. Estas superficies conductoras se denominan **delgas**. Además, el número de polos magnéticos existentes en el inductor puede ser superior a dos, a base de colocar imanes adicionales, siendo tetrapolar uno de los más empleados.



Para aumentar la potencia y obtener un movimiento más constante se divide el colector en varias partes enlazadas a diferentes bobinados del rotor.

## 7.1. TIPOS Y CONEXIONES DE MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA

En la actualidad existen una amplia gama de tipos y modelos de motores de corriente continua fabricados a base de distintos diseños de rotor y estátor, presentando cada uno de ellos sus ventajas e inconvenientes. De todos ellos pueden destacarse los siguientes:

- Motores que emplean un electroimán para el inductor
- Motores con el inductor formado por un imán permanente
- Motores con el rotor sin armadura.

### 7.1.1. Motores que emplean un electroimán para el inductor

El primero de los modelos indicados se emplea para aplicaciones en las que se precisa un motor de media o gran potencia y que por las dimensiones del mismo requeriría unos imanes de gran tamaño en el estátor.

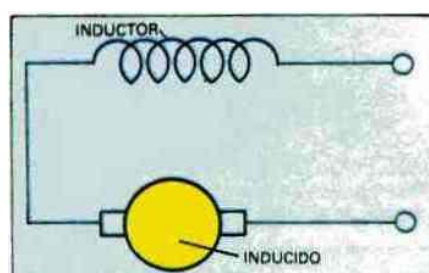
El motor estará compuesto por dos bobinados a los que es necesario suministrar una determinada corriente (electroimán de estátor y rotor) y existen en la práctica tres diferentes sistemas de conexión de estos arrollamientos con los cuales se obtienen diferentes características de funcionamiento, estos son:

- Motores serie
- Motores en derivación
- Motores de excitación compuesta

#### 7.1.1.1. MOTORES SERIE

En este caso los devanados de inductor e inducido se encuentran en serie, estando los extremos libres conectados a la tensión de alimentación. Por lo tanto la corriente será la misma para el inductor que para el inducido.

El principal problema para esta forma de conexión es que en el momento del arranque la intensidad de corriente que circula es muy elevada debido a que al estar el motor parado aún no se creado la fuerza contraelectromotriz y la única resistencia que aparece es la propia del hilo, que suele ser muy baja. Una vez superado el momento inicial, cuando ya el rotor ha comenzado a girar, esta elevada corriente disminuirá hasta alcanzar el valor normal o de mantenimiento.



Conexión de inductor e inducido en la configuración serie



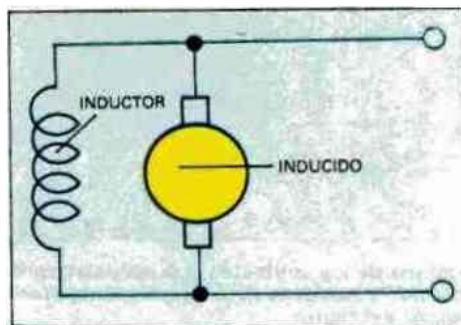
Debido al peligro que supone el fenómeno expuesto, se suelen emplear una resistencia variable o **reóstato** en serie con los devanados que les protege en los primeros momentos y que más tarde se deduce a cero.

Las características más destacadas de este motor son:

- Gran par de arranque
- Velocidad variable con la carga apropiada a su eje
- No se daña fácilmente con sobrecargas

### 7.1.1.2. MOTORES EN DERIVACIÓN

Este tipo de conexión consiste en situar a inductor e inducido en paralelo o en derivación, enlazando ambos a la tensión de alimentación. En este caso, cada devanado trabajará con una tensión constante, lo que hace que el flujo del inductor sea también constante traduciéndose a este efecto en que la velocidad resultante es bastante uniforme aunque varíe la carga mecánica.



Conexiones de inductor e inducido con el motor en derivación

Debido a las mismas razones que en el caso anterior, en el momento del arranque va a circular una elevada corriente por el inducido, empleándose también un reóstato para la puesta en marcha, salvo en pequeños motores en los que el inducido está formado por un gran número de espiras de hilo delgado y su propia existencia evita el problema citado.

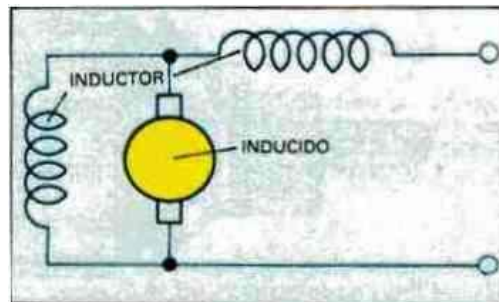
Las características de este sistema son:

- Par de arranque débil
- No soportan bien las sobrecargas
- Velocidad constante casi independiente de la carga.

### 7.1.1.3. MOTORES DE EXCITACIÓN COMPUESTA

En este tipo se tiene una combinación de la excitación serie y de la en derivación, buscando una combinación de las propiedades de ambas.

Para realizar esta conexión se cuenta con un inductor separado en dos arrollamientos, uno de ellos estará en derivación con el inducido y el otro en serie con él, pero situado de tal manera que la corriente que circule por este semidevanado sea de sentido contrario a la que pasa por el otro. De esta forma, se consigue una mayor uniformidad de la velocidad haciendo que sea constante para todas las cargas, con un par de arranque bastante débil.



Conexiones de inductor e inducido en el sistema de excitación compuesta.

### 7.1.2. Motores con el inductor formado por un imán permanente

Los motores construidos con el inductor formado por un imán permanente se comportan de una forma muy parecida a los motores con los devanados en derivación ya que el flujo magnético será constante. La corriente de alimentación circulará únicamente por el inducido produciéndose como en los casos anteriores una elevada intensidad en el instante del arranque. Tanto el par como la velocidad dependerán de la tensión aplicada al inducido estando estos tres factores interrelacionados.

### 7.1.3. Motores con el rotor sin armadura

Los motores sin armaduras se componen de un estátor formado por un imán permanentemente cilíndrico en cuyo interior se encuentra el rotor en forma de una serie de arrollamientos que forman una estructura también cilíndrica sin que en su interior se encuentre ninguna armadura o núcleo metálico.



Dos modelos de motores del tipo de baja inercia cuyo inducido no dispone de armadura.



Otro modelo de motor sin armadura acoplado a un reductor de velocidad.

La principal ventaja de estos motores radica en su baja inercia a no tener que moverse una masa relativamente elevada, además la tensión necesaria para el arranque es también bastante débil lo que le hace especialmente útiles en aplicaciones de servomecanismos en los que los motores utilizados necesitan funcionar en un amplio rango de tensiones de alimentación.

## Recuerda...

1. Es necesario invertir la polaridad de la tensión de alimentación durante el giro del motor para evitar que se detenga en el momento en que queden enfrentados dos o más polos magnéticos de diferente signo.
2. El método que se emplea para conmutar el sentido de circulación de la corriente en el bobinado de un motor y evitar que éste se detenga, para ello se recurre al procedimiento de dividir el anillo colector en dos partes iguales separadas por un material aislante que las mantiene unidas mecánicamente. Los dos contactos eléctricos o escobillas se encuentran apoyados sobre ellas, de forma que al girar el colector producirán una conexión alternativa en cada una de las mitades, invirtiéndose así el sentido de la corriente.
3. Generalmente el número de bobinados que contiene el rotor en los motores utilizados normalmente en la práctica contienen más de un bobinado, con objeto de crear más pares de polos magnéticos para mejorar la uniformidad del movimiento y aumentar la potencia.
4. Un motor conectado en serie es un tipo de conexión que se realiza en aquellos motores cuyo estátor o inductor está formado por un electrolítico y su bobina excitadora se sitúa en serie con la del inducido. De esta forma ambas serán atravesadas por la misma intensidad de corriente.
5. Las propiedades que presenta el conexionado entre inductor e inducido en un motor conectado en derivación radican en la gran constancia de su velocidad de rotación. Sin embargo, su principal desventaja es el débil par de arranque que posee.
6. La principal aplicación de los motores sin armadura, por su baja inercia, son empleados fundamentalmente en servomecanismos.

## 8. Motores de corriente alterna

Como se ha comentado al principio los motores eléctricos son máquinas rotativas capaces de transformar energía eléctrica, que recibe por sus bornes en forma de corriente alterna, en energía mecánica, que trasmite por su eje. Los motores de corriente alterna se dividen en **síncronos** o **asíncrono** según sea la velocidad de rotación de la parte móvil, y dependiendo también de que coincida o no con la velocidad sincrónica correspondiente a la frecuencia de la red de alimentación alterna.

El principio de funcionamiento consiste en aplicar una corriente al bobina estatórico o inductor, que genera un campo magnético giratorio que atraviesa los conductores del rotor, lo que provoca una reacción que hace que se ponga en movimiento; en este caso, esta reacción se produce por inducción, ya que el rotor, al contrario de lo que sucede en los motores de corriente continua, no recibe tensión.

La puesta en marcha del motor de inducción es una secuencia que comienza porque una corriente eléctrica recorre los conductores del rotor, y para que esto ocurra, debe existir una fuerza electromotriz (f.e.m.). Y a su vez, para que esta pueda generarse deben existir conductores que corten las líneas del circuito magnético, para lo cual la velocidad del rotor debe ser inferior a la del campo giratorio.

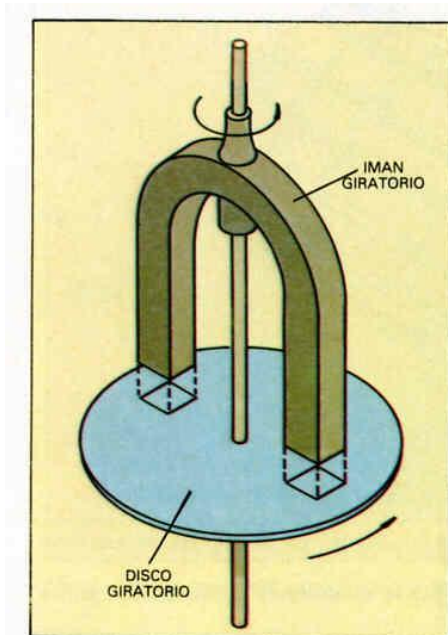
En la siguiente imagen se muestra la clasificación de los motores de corriente alterna.



## 8.1. MOTOR DE INDUCCIÓN ASÍNCRONO

Estos modelos cuentan con un elevado número de aplicaciones, se trata del tipo **asíncrono** excitado por una corriente alterna, también conocido como motor de inducción.

El principio de funcionamiento de estos motores está basado en los experimentos de Ferraris en el año 1885, el cual colocó un imán de herradura, con un eje vertical que le permitía girar libremente, en las proximidades de un disco metálico que también podía girar alrededor del mismo eje. Al hacer girar el imán, observó que, aunque no había contacto el disco metálico también giraba en el mismo sentido que aquel.



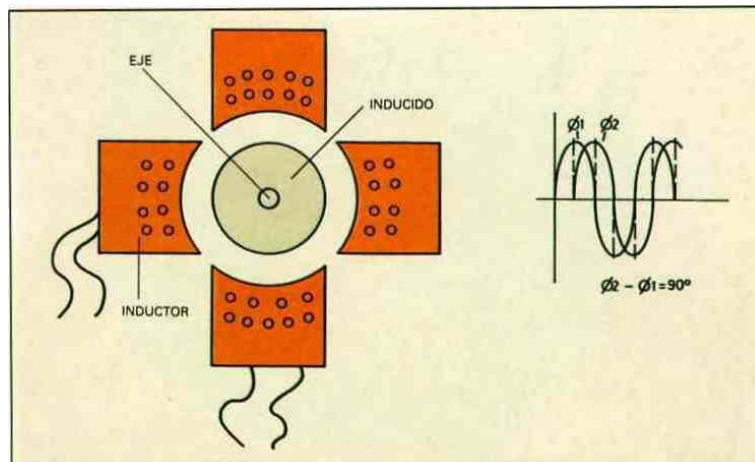
Experimento de Ferraris que sirvió de base para el diseño de los motores de inducción.

Este fenómeno se debe a que al girar el imán se crea un campo magnético giratorio y aparecen sobre el disco unas corrientes eléctricas inducidas, las cuales, recordando la ley de Lenz, tenderán a crear a su vez otro campo magnético que se oponga al inicial; el efecto resultante es el giro del disco, ya que de esta forma, los extremos del imán estarán siempre frente a las mismas zonas de aquel y la situación volverá a ser similar a la inicial, ya que al girar ambos con la misma velocidad el efecto es el mismo que si estuvieran parado.

Sin embargo, en el instante en que el disco alcanza una velocidad exactamente igual que la del imán desaparecerán las corrientes inducidas sobre el mismo, con lo que se retrasará, lo que obligará a que aparezcan de nuevo dichas corrientes. De todo ello se obtiene el resultado de que el disco va siempre algo retrasado con respecto al imán; esto es, su velocidad es algo menor que la del aquel. Debido a ello a este sistema se le denomina **asíncrono** que significa que no existe igualdad de velocidad o sincronismo.

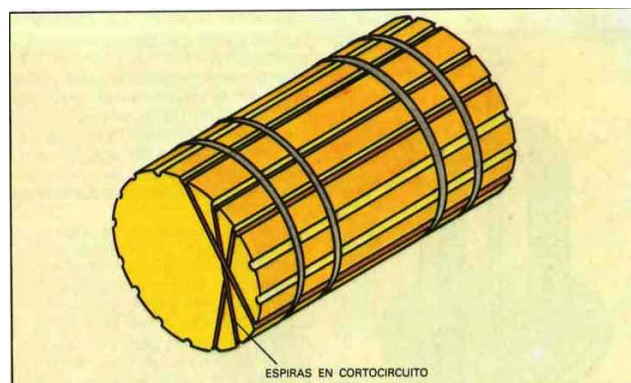
El experimento descrito no se puede convertir directamente en un motor ya que no transforma una energía eléctrica en mecánica, sino que únicamente efectúa un acoplamiento electromagnético por ser necesario tener que mover el imán para hacer girar el disco.

El método empleado para obtener un campo giratorio sin necesidad de tener que mover un imán consiste en emplear dos electroimanes formando un ángulo recto a los que se le aplica a su vez dos corrientes alternas de la misma frecuencia pero con una diferencia de fase entre ellas de  $90^\circ$ . Al emplear una corriente alterna sinusoidal, se obtendrá un campo que varía en la misma forma, que al combinarse con el otro similar a él pero con una magnitud diferente, debido a la diferencia de fase y con otra orientación creada por las distintas situación, se produce el efecto deseado. Este conjunto de dos bobinados constituye el inductor o estátor y provoca sobre el rotor, en el que el disco sea sustituido por otro elemento, una velocidad de giro  $N$  (r.p.s.) =  $f$ , siendo  $f$  la frecuencia de la corriente alterna aplicada.



**Obtención de un campo giratorio mediante el empleo de dos bobinas en ángulo recto alimentadas por corrientes desfasadas  $90^\circ$ .**

El rotor de un motor de inducción suele construirse en base a dos diferentes sistemas, aunque al principio de operación de ambos sea el mismo, que consiste en disponer de un sistema de espiras en cortocircuito devanadas o no sobre un núcleo de material ferromagnético. El objetivo de las espiras es hacer circular a través de ellas las corrientes inducidas, para crear el campo de sentido contrario al producido por el estátor.



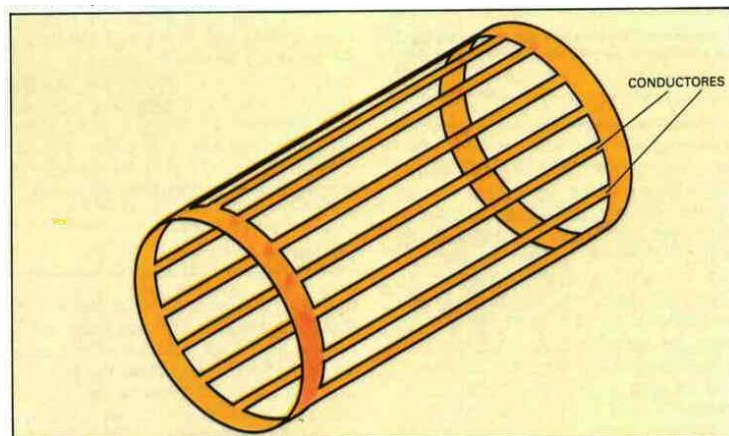
**Rotor constituido a base de varios discos contiguos y espiras situadas en las ranuras exteriores.**

El primer tipo de rotor que se va a considerar consiste en un cilindro formado por discos paralelos contiguos y aislados, provistos de ranuras situadas a lo largo de su superficie exterior sobre las que se encuentran las espiras o bobinados cerrados por sí mismos.



Rotor de un motor de inducción formado por discos contiguos, cortocircuitados en los bordes.

El segundo tipo de rotor está constituido por dos coronas conductoras unidas por barras también conductoras formando un cilindro hueco muy parecido a una jaula de animales, de donde toma su denominación, conociéndose a este tipo de motores como de **jaula de ardilla** y es uno de los modelos más utilizados en la práctica, sobre todo en aplicaciones de pequeñas potencia.



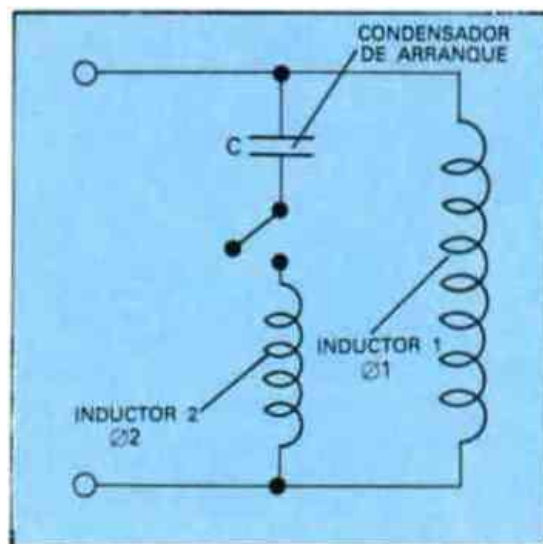
Rotor del tipo de jaula de ardilla formado por barras conductoras cortocircuitadas en los extremos por sendas coronas.

El principio de operación, antes descrito para la generación de un campo giratorio por el estátor, únicamente es aplicable en los casos en que se disponga las dos corrientes desfasadas  $90^\circ$  mencionadas. Esto no sucede en las aplicaciones habituales en las que los motores sean de conectar a la red eléctrica normal, que es monofásica, con lo que no existe campo eléctrico giratorio.

El efecto sería entonces que el motor no arrancarían, aunque si por un sistema mecánico externo se obliga al rotor a iniciar el giro, se observa cómo, después de eliminar la fuerza exterior, se mantendrá la rotación, aumentando la velocidad hasta que alcanza la correspondiente a su régimen normal de funcionamiento. Esto se debe a que el campo monofásico aplicado se descompone en dos campos giratorios de la misma intensidad pero de sentido contrario cuyo efecto resultante se anula; sin embargo, basta con producir un desequilibrio entre ellos para que se acentúe uno y se atenúe el otro, dando lugar a un campo giratorio dominante que se será capaz de hacer girar al inducido.

Con objeto de evitar el sistema mecánico de arranque se suele incluir sobre el estátor un segundo devanado, llamado **devanado de arranque**, situado en una posición que forme un ángulo recto con la del devanado principal. Al hacer pasar por este arrollamiento auxiliar una corriente con una diferencia de fase próxima a  $90^\circ$ , respecto a la que circula por el principal, se comportará el motor como bifásico, produciéndose tal campo magnético giratorio, poniéndose en marcha el rotor, en cuyo momento se puede suprimir dicha corriente auxiliar.

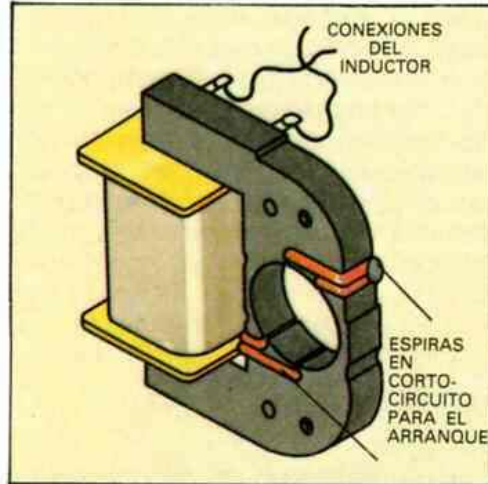
La forma de obtener la corriente de arranque con la diferencia de fase mencionada es utilizando una reactancia (bobina o condensador) en serie con el arrollamiento auxiliar, produciéndose una corriente que aunque no está desfasada exactamente los  $90^\circ$  necesarios, resulta suficiente para el objetivo deseado.



Esquema eléctrico del circuito que puede emplearse para arrancar un motor de inducción monofásico, accionado por el condensador C.

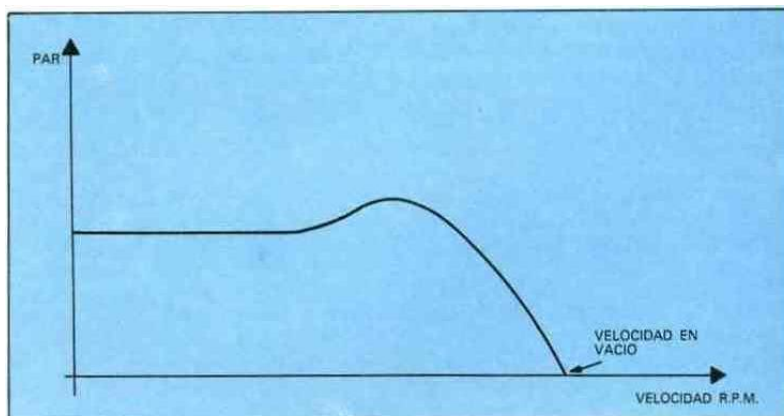


Otro sistema empleado para el arranque de los motores **asíncronos** es el de situar dos grupos de espiras en cortocircuito arrolladas sobre el estátor en una zona próxima al rotor. De ésta forma, se obtiene un desequilibrio de fase del campo magnético que actúa sobre el inducido, que es suficiente para que el motor arranque y se mantenga en rotación.



Estátor de un motor asíncrono monofásico dotado de espiras en cortocircuito para producir el arranque.

Las características de velocidad y par en un motor **asíncrono** están bastante relacionadas y normalmente se representan mediante una curva en la que se puede elegir el punto de funcionamiento más adecuado. Esto es lógico ya que cuando arranca el motor en ausencia de carga la velocidad del rotor tiende a ser igual a la del campo giratorio del estátor, ya que basta con una pequeña diferencia entre ambas para que se creen en el inducido las corrientes necesarias para mantenerlo en rotación y por lo tanto el par desarrollado será muy débil debido a que únicamente será necesario vencer las resistencias de rozamiento del eje.



Curva característica par-velocidad en un motor de inducción.

Sin embargo, en el momento en que se acople una determinada carga mecánica al rotor, será necesario que el par aumente y se iguale al que se precisa para mover dicha carga. Como consecuencia la velocidad disminuirá porque sobre el rotor aumenta las corrientes inducidas y éstas son proporcionales a la diferencia de velocidad entre los campos del inductor y del inducido. A esta diferencia de velocidad se la denominada **deslizamiento**.

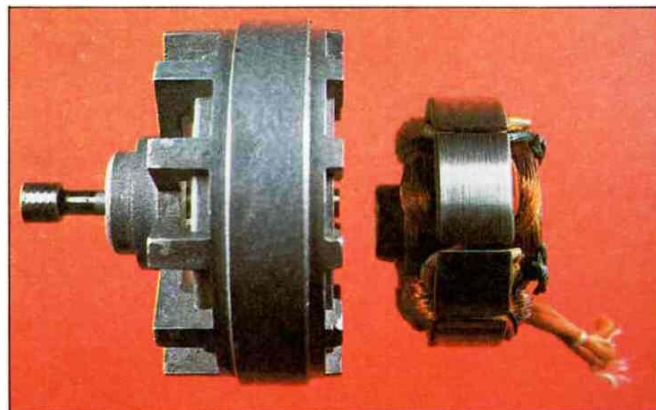
### 8.1.1. Motor asíncrono trifásico

Se denomina motores asíncronos trifásico si el campo giratorio es generado por un sistema de tres fases, las cuales se encuentran desfasadas  $120^\circ$ .

Este tipo se considera como el motor ideal en la mayoría de las aplicaciones por su precio, robustez y fácil mantenimiento. Tiene como inconveniente que absorbe gran intensidad de corriente en el momento del arranque, cuando se le aplica directamente la tensión de la red. Esto es debido a que la resistencia del rotor de jaula de ardilla es muy pequeña. Por ello, en motores con una potencia superior a 3 kW se recurre a reducir dicha tensión.

#### 8.1.1.1. MOTOR DE JAULA DE ARDILLA SIMPLE

Como se había comentado anteriormente estos motores poseen unas ranuras dispuestas hacia el exterior del cilindro que forma el rotor, y paralelamente a su eje, se colocan los conductores. Estos conductores son barras de cobre que se sueldan a dos anillos o coronas del mismo material, creando un circuito totalmente cerrado. El conjunto así formado tiene el aspecto de una jaula de ardilla, de ahí el nombre de este tipo de rotor. Hoy, su forma constructiva ha cambiado y está compuesto por un conjunto de chapas prensada que se sitúan en un molde, a que se le inyecta aluminio fundido que, al enfriar, constituye el conjunto del rotor.



Detalle del estátor y del rotor, según el tipo de jaula de ardilla.

Se considera el motor ideal para aquellas aplicaciones en las que la velocidad se mantiene constante. Soporta puntas de corrientes elevadas sin deteriorarse. Tiene un aspecto robusto y es fácil de reparar. En cambio, no se presta a la regulación de velocidad, si exceptuamos determinados tipos. El par de arranque de estos motores es relativamente débil y la corriente que se absorbe durante la puesta en tensión es muy elevada respecto a la nominal.

### 8.1.1.2. MOTOR DE ROTOR BOBINADO

Es otro tipo de motor asíncrono de inducción, cuya característica más destacada es que lleva, en las ranuras del rotor, unos devanados trifásicos realizados en cobre, o aluminio, que se conectan en estrella por uno de sus lados. Los otros extremos que quedan libres, uno de cada fase, están unidos a tres anillos de cobre aislados y solidarios con el rotor formando un colector de anillos.

Sobre los anillos van colocadas unas escobillas de grafito que van conectadas al exterior, formando parte del dispositivo de arranque.

En función del valor de las resistencias que se acoplen en el circuito rotórico, el motor puede alcanzar un par de arranque que se eleve a 2,5 veces el par nominal, mientras que la punta de intensidad en el arranque es prácticamente igual a la del par. Normalmente, el rotor, al igual que el motor, es trifásico.

El estátor de estos motores es similar al de los de jaula de ardilla. El inconveniente que presentan, si lo comparamos con estos últimos, es su coste y el hecho que necesitan más tareas de mantenimiento al ser más frecuentes las averías.

### 8.1.2. Motor asíncrono monofásico

El continuo tecnológico y el desarrollo industrial han afectado de manera notoria a todos los niveles de la sociedad, y el ámbito doméstico ha sido uno de ellos. Así, se ha impulsado la fabricación de motores capaces de funcionar en redes monofásicas, que son las que se utilizan en este ámbito.

Los **motores monofásicos** son muy parecidos a los **trifásicos**, pero su rendimiento y el factor de potencia son bastante inferiores. Además, a igualdad de potencia, son más voluminosos que los trifásicos, y su coseno  $\phi$  es mucho peor que en el caso de motores trifásicos.

Por esta razón puede decirse que los motores asíncronos monofásicos solo se utilizan cuando no es posible usar sus homólogos trifásicos. La industria no desprecia su fabricación, ya que representan una parte importante del mercado.

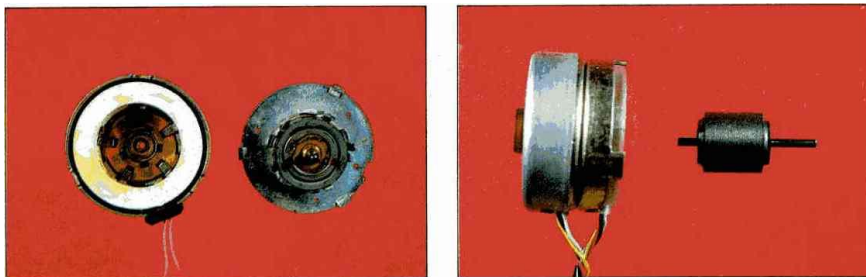
## Recuerda...

1. El principio de funcionamiento de los motores de inducción es la aparición de unas corrientes inducidas sobre un rotor creadas por la acción de un campo magnético giratorio producido por el estátor, cuyo efecto es el de producir a su vez otro campo de sentido contrario al de éste.
2. El que sea imposible que el motor alcance en la práctica una velocidad igual a la del campo del inductor es debido a que en el momento en que el rotor llegara a tener exactamente la misma velocidad que el campo giratorio del estátor, desaparecería el efecto de inducción ya que la velocidad relativa de aquel sería nula y el efecto final es el mismo que si tanto el rotor como el campo estuvieran inmóviles.
3. El método que se emplea para crear un campo magnético giratorio en el estátor sin necesidad de tener que hacer girar un imán es mediante la acción combinada de dos electroimanes situados en ángulo recto, a los que se les aplica dos corrientes alternas de la misma frecuencia pero desfasadas  $90^\circ$ .
4. Un motor de jaula de ardilla es un motor asíncrono cuyo rotor está formado por dos anillos o coronas metálicas unidas por barras conductoras cuyo aspecto externo es el de un cilindro hueco.
5. El termino de deslizamiento expresa la diferencia entre la velocidad de rotación del campo y la que posee el rotor.
6. No puede arrancar por si solo un motor de inducción excitado por una corriente monofásica ya que el efecto producido por dicha corriente es el de dos campos magnéticos giratorios iguales pero con orientaciones contrarias. Por lo tanto, será necesario impulsar inicialmente al rotor en uno u otro sentido para que pueda comenzar a funcionar.

## 8.2. MOTOR SÍNCRONO

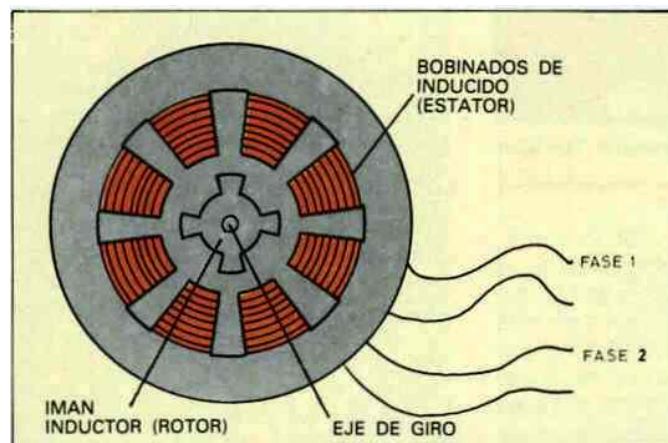
Los motores **síncronos** constituyen otro de los modelos más destacados del grupo de los de corriente alterna. Como su nombre indica, su característica más destacada es la del **sincronismo**, es decir, que su velocidad de rotación será constante y uniforme y estará regulada directamente por la frecuencia de la corriente de alimentación de alterna.

Normalmente este tipo de motores está formado por un inductor móvil o rotor y un inducido fijo o estátor, intercambiándose sus funciones con respecto al resto de modelos en los que la parte móvil corresponde casi siempre al inducido.



Dos modelos de motores síncronos cuyo inductor está formado por un imán permanente con forma cilíndrica. Se observa también, los bobinados del inducido.

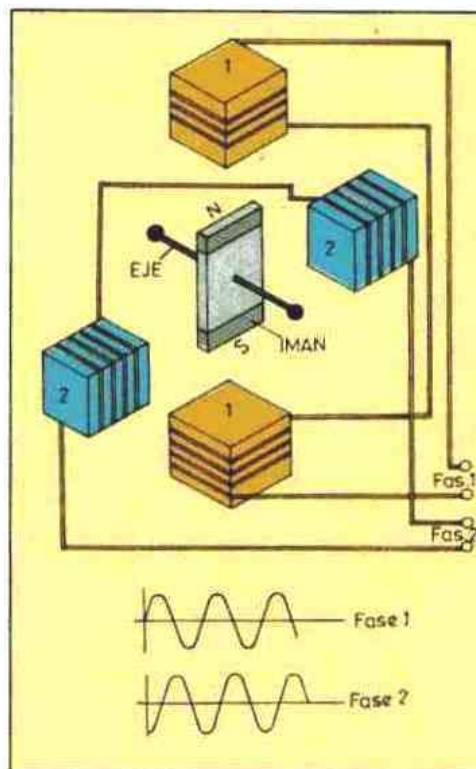
El principio de funcionamiento es bastante simple y consiste en los efectos combinados del campo magnético constante del inductor, creado por un electroimán alimentado por corriente continua o bien por un imán permanente y del inducido que contiene una serie de bobinados a los que se le aplica una corriente alterna.



Sección esquemática de un motor síncrono de dos pares de polos.

Supongamos una estructura elemental, como la representada en la imagen de la siguiente página, constituida por dos pares de devanados sobre núcleos magnéticos representado por 1 y 2 y un imán permanente situado sobre un eje giratorio que se encuentra en el centro geométrico de los elementos anteriores en una dirección perpendicular al plano formado por éstos.

Al aplicar una tensión alterna a la pareja de bobinas 1 se creará en ellas un campo magnético que variará de intensidad y de sentido según la alternancia de la corriente. En un determinado instante el campo será máximo entre ambas, creándose un polo norte en la zona superior de la bobina superior, un sur en la zona inferior, otro norte en la cara superior de la bobina inferior y otro sur en la cara inferior; en este momento el imán permanente será fuertemente atraído por ellas orientándose en sentido vertical.

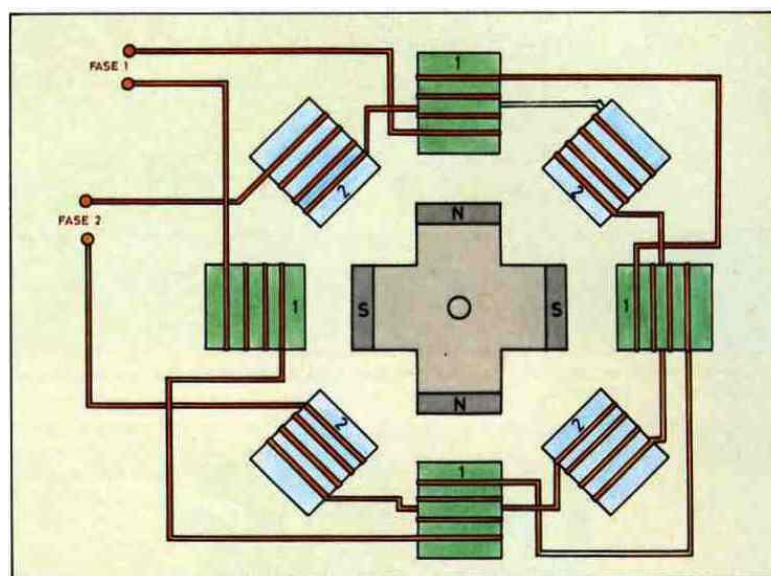


**Estructura elemental de un motor síncrono, en la que se representa a un imán que forma el estátor en el centro geométrico de los devanados del inducido.**

Si al mismo tiempo se aplica una segunda corriente alterna a la pareja de bobinas 2 cuya fase esté retrasada  $90^\circ$  respecto a la anterior, el campo será nulo en el instante considerado debido a que la corriente pasa por el valor cero y no ejercerá ninguna influencia. Sin embargo, comenzará a crecer seguidamente y a decrecer el producido por las bobinas 1, haciendo que el imán gire hasta situarse en posición horizontal, alineado con los bobinados 2; el proceso continua al disminuir este segundo campo y comenzar a crecer el primero pero en sentido contrario al inicial, ya que la alternancia de la corriente es ahora negativa, con lo que se invertirán entre sí los polos magnéticos señalados al comienzo. Ello hace que el imán continúe girando hasta ponerse de nuevo vertical, pero con el norte hacia abajo y el sur hacia arriba. El paso siguiente corresponde a las bobinas 2 que también han invertido en su campo, atrayendo otra vez al imán y manteniendo el giro. Esta secuencia se repetirá sucesivamente y el resultado obtenido es, como puede deducirse, la transformación de una energía eléctrica en otra mecánica de rotación, propiedad fundamente de cualquier motor.

En nuestro caso, el imán permanente o rotor dará una revolución por cada ciclo completo de la corriente, por lo tanto la velocidad de giro coincidirá con la frecuencia, ya que si esta es, por ejemplo, 50 Hz, producirá 50 ciclos completos en un segundo y como consecuencia el rotor dará 50 vueltas en el mismo tiempo, o lo que es equivalente, 50 revoluciones por segundo (50 r.p.s.).

Si en lugar de emplear un imán para el rotor se empleara dos situados en ángulo recto y unidos solidariamente al mismo eje y en vez de dos pares de bobinas con corrientes desfasadas emplearemos cuatro, el efecto resultante también sería una rotación, pero la velocidad de giro resultante sería la mitad de la anterior.



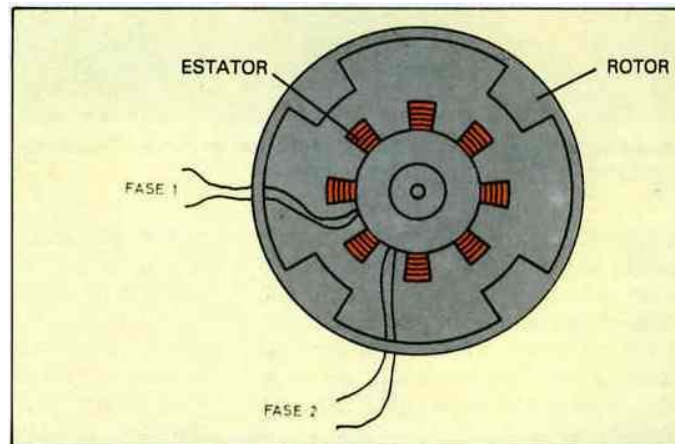
Partiendo de la estructura anterior, se puede construir esta otra, en la que el inductor se compone de dos pares de polos, con lo que la velocidad se reduce a la mitad.

Por lo tanto, puede definirse la velocidad de rotación de un motor síncrono por la fórmula:  $N = f / P$ , donde  $N$  representa dicha velocidad en revoluciones por segundo (r.p.m.),  $f$  es la frecuencia de la corriente alterna en Hz y  $P$  el número de pares de polos que posee el inductor; así en el caso anterior, como el imán tiene dos pares de polos, la velocidad resultante será de 25 r.p.s.

Número de polos	Frecuencia (Hz)	
	50	60
2	3.000	3.600
4	1.500	1.800
6	1.000	1.200
8	750	900
10	600	720
12	500	600

Tabla de velocidades en r.p.m. de un motor síncrono en función del número de polos y de la frecuencia.

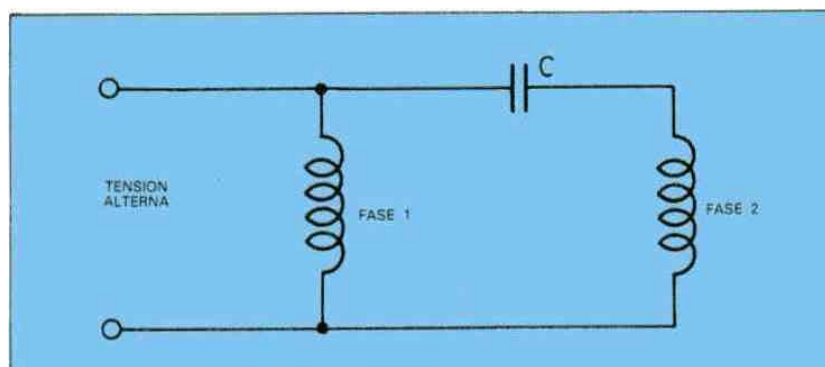
Algunos modelos de motores síncronos contienen el inducido situado en el interior del inductor, con lo que la parte móvil será la exterior, siendo el principio de funcionamiento similar al descrito anteriormente.



Algunos modelos de motores síncronos contienen el inducido situado en el interior del inductor.

En ocasiones, y para algunos tipos de motores, se sustituyen los imanes permanentes del estátor por unos electroimanes, en este caso es necesario aplicar a los bobinados una corriente continua de excitación con objeto de poder crear todos los pares magnéticos que se precisan. Además y dado que estos electroimanes constituyen el rotor, siendo por lo tanto móviles, se requiere contar con un dispositivo capaz de producir los contactos eléctricos para el paso de dicha corriente durante la rotación, como en el caso de los motores de corriente continua. Para ello se emplean dos anillos colectores que resbalan sobre sendas escobillas de forma que el polo positivo permanezca siempre aplicado a uno de ellos y el negativo al otro.

Para crear las dos fases que se necesitan para el arranque y funcionamiento del motor se suele utilizar un condensador situado en serie con uno de los dos grupos de devanados. De esta forma la corriente se retrasará en  $90^\circ$  aproximadamente al circular por éste y alcanzará a las bobinas en las condiciones requeridas. Si en lugar de situar el condensador en los bobinados mencionados se cambiara a los otros, el efecto sería el de invertirse el sentido de rotación, manteniéndose el resto de características sin ninguna variación.



Esquema eléctrico del conexionado necesario para crear el desfase que se precisa para el funcionamiento del motor.



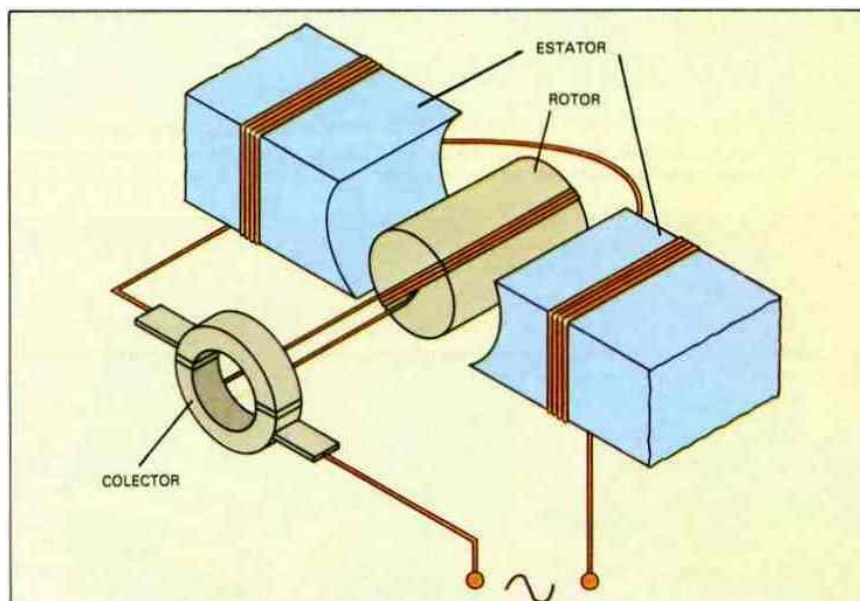
La principal propiedad de los motores síncronos es, en resumen, su velocidad rigurosamente constante dentro de los límites de carga que permite su par motor. Ello da lugar a un número muy amplio de aplicaciones entre las que pueden citarse la de accionamiento de la cinta magnética en los casetes de alta calidad, actuando como cabrestante. Otra interesante característica de estos motores, sólo en el caso de poseer el rotor a base de imanes permanentes, es la derivada de no tener necesidad de ningún contacto eléctrico deslizante, del tipo escobillas o similar para obtener el movimiento, aumentando de esta forma su vida útil.

En el caso de que la carga aplicada a su eje sobrepasara el valor límite, el motor ya no podría seguir las alternancias de la corriente en el estátor, desacoplándose, con lo que el rotor podría inmovilizarse rápidamente. En este caso, la corriente del inducido podría aumentar alcanzando unos valores de intensidad peligrosos para los arrollamientos.

### 8.3. MOTOR UNIVERSAL

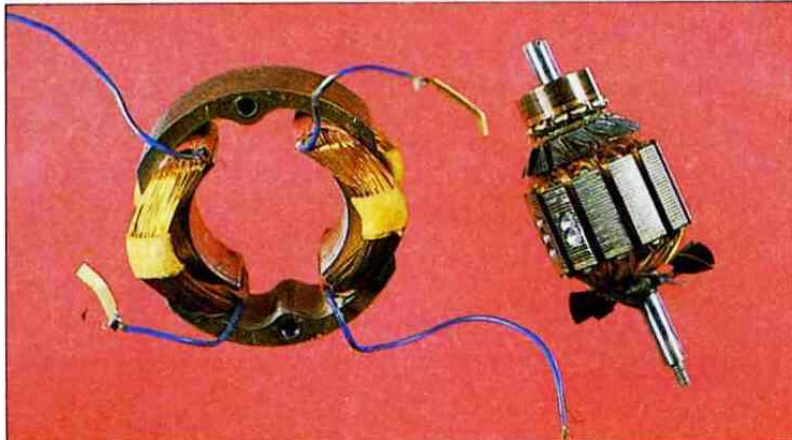
Existe un tercer tipo de motor que puede trabajar en corriente alterna y que cuenta con numerosas aplicaciones debido a su sencillez de funcionamiento y a su reducido coste. Se trata del **motor universal** o de **colector**, además presenta la particularidad de poder trabajar con tensiones continua en lugar de alternas, aunque en esta forma de funcionamiento no suele utilizarse.

Su estructura es muy similar a la de un motor de corriente continua con los devanados de inductor e inducido conectados en serie.

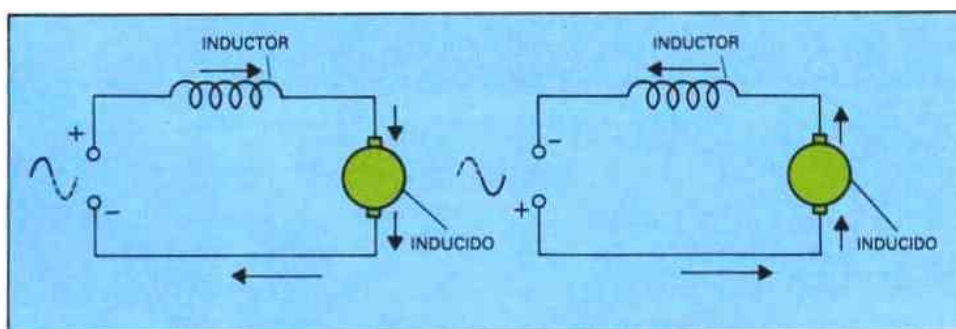


Esquema del conexionado de un motor universal con el inductor e inducido situados en serie con la corriente de alimentación.

En la siguiente imagen se muestra un motor universal en el que se puede observar a la izquierda el **estátor** y a la derecha el **rotor**, por separado. El colector se encuentra situado en la zona superior de éste.



La forma de trabajo de un motor de continua, según se recordará, consistía en aplicar una corriente a un electroimán inductor que creaba un campo magnético sobre un rotor formado por un bobinado devanado sobre un cilindro de material magnético acoplado a un eje. Las conexiones de este devanado se realizan a través de un anillo colector dividido en dos partes aisladas, en contacto con dos escobillas enlazadas a los polos positivos y negativos de la alimentación. La corriente se invertía dos veces por cada vuelta para mantener el giro. Si ahora se conectan en serie las escobillas con el devanado del inductor y a los extremos se aplica una tensión alterna, en el semiperiodo en que dicha tensión es positiva la corriente circulará por ambos devanados produciendo las condiciones de campo necesarias para el giro. Al llegar el semiperiodo negativo la corriente cambiará su sentido de circulación, pero lo hará en **ambos devanados** simultáneamente, no variando, por lo tanto, las condiciones relativas entre ellos con lo que el movimiento del rotor no se alterará. Este efecto es lógico, ya que si el mismo motor alimentado con continua se detiene y se invierte las polaridades de las conexiones de las escobillas, arrancándole de nuevo se observará que girará en el mismo sentido que antes, no “dándose por enterado” del cambio efectuado.



Circulación de corrientes en un motor universal alimentado en alterna: a) Con semiciclo positivo. b) Con negativo. En ambos casos el sentido de giro es el mismo.

Ahora bien, en la práctica es necesario tener en cuenta algunos factores que implican ciertas modificaciones de la estructura para obtener los resultados previstos. En primer lugar, en los núcleos macizos para continua, se producirán unas elevadas pérdidas al ser recorridos por campos magnéticos alternos debido a las corrientes inducidas en los mismos o de Foucault, lo que obliga a sustituirlo por otros realizados a base de chapas delgadas separadas por finas capas de papel o barniz.

El segundo inconveniente que se presentan es la gran pérdida de energía en el hierro del núcleo por efecto de la histéresis, lo que obliga a disminuir todo lo posible el volumen de aquel tanto en el inductor como en el inducido.

Este tipo de motor equipa a la gran mayoría de los aparatos eléctricos o electrónicos domésticos: aspiradores de polvo, ventiladores, máquinas de coser y de afeitarse, secadores de cabello, etc.

## Recuerda...

1. El nombre del motor síncrono se debe a su característica más destacada que es la del sincronismo con la frecuencia de la corriente alterna de alimentación. Esto supone una elevada uniformidad y constancia de su velocidad de rotación.
2. El motor síncrono se compone de un inductor, generador del campo magnético de excitación y un inducido recorrido por la corriente alterna de alimentación. El primero es el elemento móvil o rotor y el segundo se corresponde con el estátor.
3. La velocidad de rotación de un motor síncrono depende de la frecuencia del número de pares de polos magnéticos que contenga el inductor y se calcula dividiendo entre sí ambos factores. El resultado se obtiene en revoluciones por segundo (rps).
4. El número de pares de polos magnéticos que puede tener el imán inductor de un motor síncrono no es fijo y depende del modelo de motor de que se trate. Sin embargo, son normales todos los comprendidos entre dos y doce pares de polos.
5. El principio de funcionamiento de un motor universal es el mismo que el de un motor de corriente continua, con los arrollamientos de inductor e inducido conectados en serie. De esta forma, el movimiento obtenido no dependerá de la polaridad de la tensión de alimentación y el motor podrá ser utilizado tanto para corriente alterna como para corriente continua.

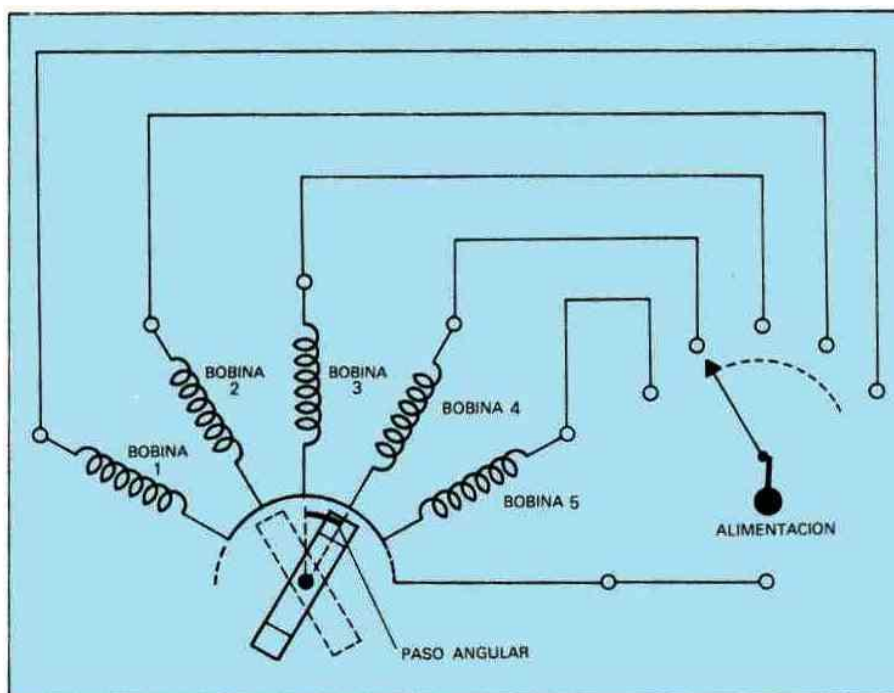
## 9. Motores paso a paso

Los motores paso a paso vienen a cerrar la descripción dedicada a este amplio conjunto de dispositivos capaces de transformar la energía eléctrica en mecánica. Este tipo de motor, a pesar de tener una concepción bastante antigua, únicamente ha podido emplearse en la práctica a partir del momento en que la tecnología de semiconductores ha permitido el desarrollo de circuitos de actuación y control suficientemente rápidos y adecuados.

En definitiva, las aplicaciones fundamentales de éste tipo de motor son aquellas en las que se precisa un sistema de posicionamiento seguro y fiable sin tener que recurrir a otros sistemas más complejos del tipo de servomecanismo. Además soluciona con relativa sencillez otros casos en los que la exigencia en cuanto a velocidad de accionamiento en determinados movimiento discontinuo exigirían complicados montajes a base de motores ordinarios asociados a sistemas de frenado de gran seguridad y de muy problemática ejecución práctica.

El principio de funcionamiento está basado en un estátor constituido por varios arrollamientos independientes devanados sobre un material ferromagnético y rotor que puede girar libremente en el seno del estátor.

Estos diferentes bobinados son alimentados uno a continuación del otro y causan un determinado desplazamiento angular que se denomina paso angular y que es la principal característica del motor. El sentido de rotación estará definido por la secuencia en la que se han excitado los diferentes arrollamientos.



Principio de funcionamiento de un motor paso a paso. Al hacer circular impulsos de corriente por las bobinas, el rotor se desplazará en forma discontinua a base de varios pasos angulares.

## 9.1. TIPOS DE MOTORES PASO A PASO

Lógicamente existen numerosos tipos de motores paso a paso para cubrir ésta amplia gama de aplicaciones entre los que existe diferencias en cuanto a su principio de funcionamiento, además de las lógicas derivadas del tamaño y potencia más adecuados para cada caso concreto.

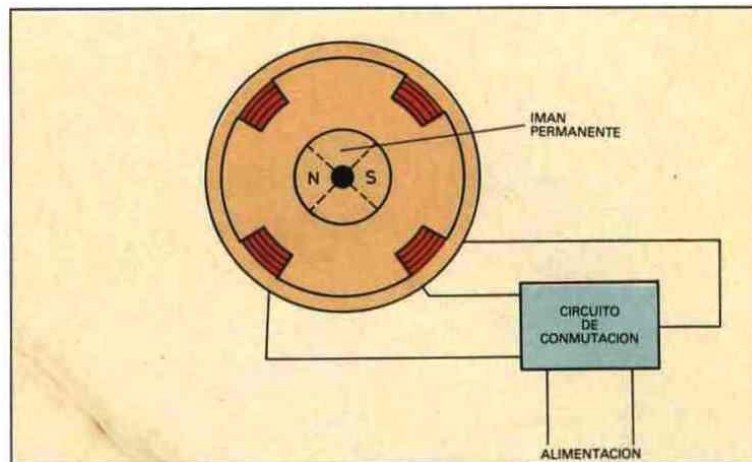
Existen dos tipos básicos de motores paso a paso. El primero de ellos funciona por el efecto de reacción que se produce entre un campo electromagnético y un imán permanente; por éste se le denomina **motor paso a paso de imán permanente**. El segundo funciona mediante la acción de un campo electromagnético sobre un rotor de hierro dulce, el cual, como es sabido, presenta un magnetismo remanente muy débil. A este tipo se le conoce como **motor paso a paso de reluctancia variable**.

En ambos casos se precisa de un circuito o equipo externo que distribuya la alimentación en forma secuencial a todos los arrollamientos del estátor, de forma que únicamente se encuentre excitado uno cualquiera de ellos en cada momento. En consecuencia, el sistema de alimentación no será una corriente continua o alterna como en los tipos tratados con anterioridad, sino que estará formado por impulsos de tensión y corriente. Suponiendo una secuencia constante y uniforme de impulsos de excitación que se envían a los devanados con una frecuencia  $f$  y que el motor contiene un número de bobinas  $n$ , se obtendrá una velocidad de giro  $V = f / n$  revoluciones por segundo (r.p.s.), bien entendido que cada vuelta recorrida por el rotor se compondrá de tantos saltos como bobinas diferentes existan en el estátor, cantidad que en este caso sea definido como  $n$ . El desplazamiento angular obtenido de cada paso se calculará dividiendo los  $360^\circ$  correspondientes a una vuelta por el número de arrollamientos  $n$ , es decir, que  $D = 360 / n$ .

### 9.1.1. Motor paso a paso de imán permanente

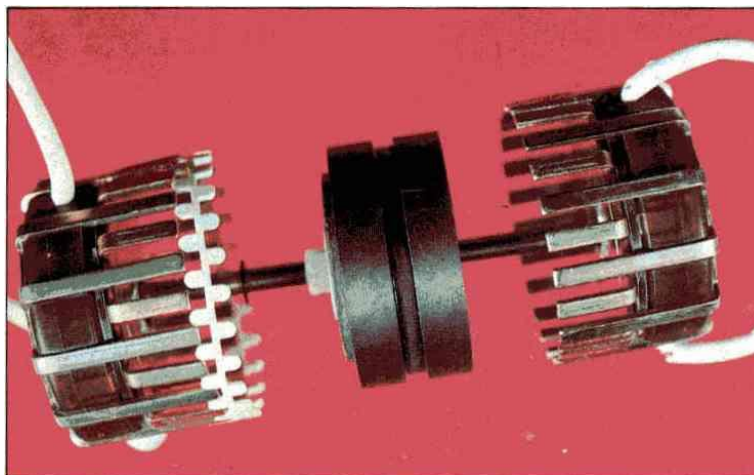
El motor **paso a paso de imán permanente** está formado por un estátor de forma cilíndrica con un cierto número de bobinados alimentados en secuencia que crean un campo magnético giratorio de manera discontinua. El rotor concéntrico con el estátor y situado sobre el eje contiene un imán fuertemente magnetizado que en cada instante tenderá a alinearse con el campo magnético creado por la correspondiente bobina del estátor. Como puede observarse, su modo de operación no podría ser más simple, ya que está basado en las fuerzas de atracción desarrolladas entre dos imanes, uno permanente y el otro temporal.

Normalmente y a diferencia de los motores síncronos, el imán del rotor es bipolar y los polos norte y sur se encuentran en los extremos opuestos de uno de los diámetros del cilindro del rotor.



**Esquema simplificado de un motor paso a paso de imán permanente, compuesto por dos bobinas y con un paso angular de 90°.**

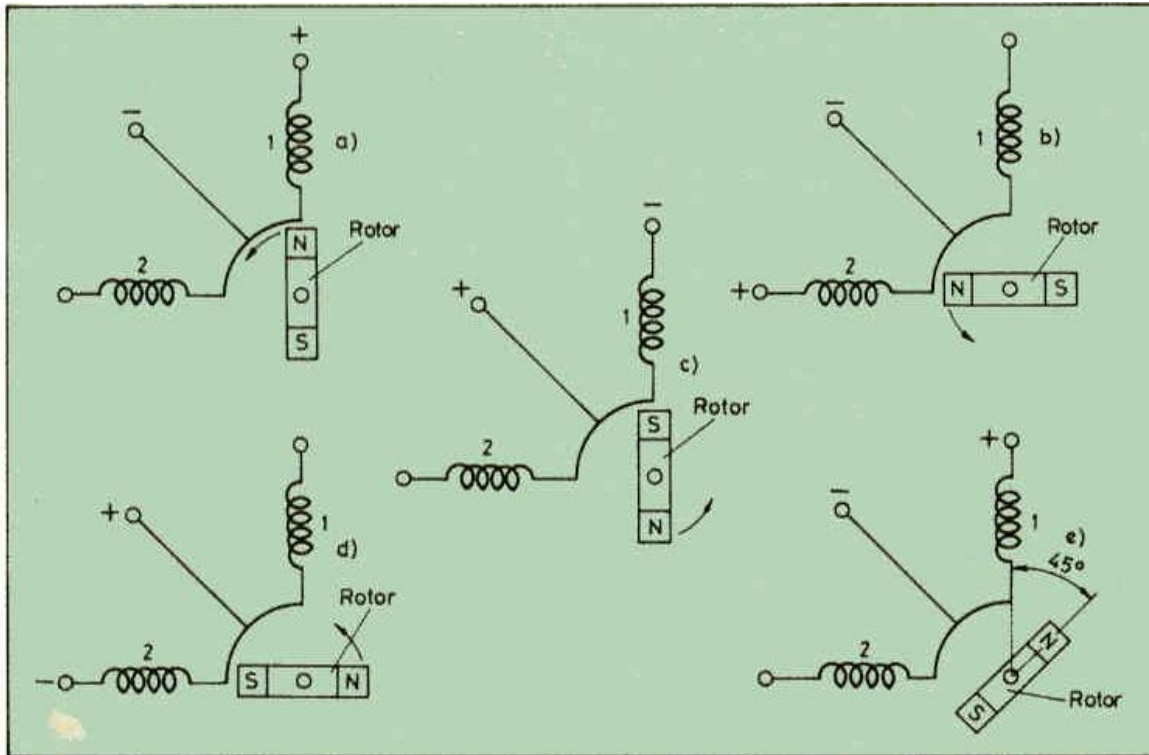
El número de bobinados de que dispone en el estátor este tipo concreto suele ser de dos o cuatro, con los que se obtienen cuatro pasos por cada vuelta, y el desplazamiento angular será de 90°. Las frecuencias de trabajo empleadas suelen ser bajas y el par motor elevado debido a la presencia del imán. Sin embargo, es conveniente tener en cuenta algunas consideraciones acerca del máximo par de accionamiento que puede ofrecer este motor.



**Motor paso a paso de imán permanente cuyo estátor se compone de dos bobinados situados en ambos extremos de la imagen.**

Supongamos un cierto modelo construido por dos bobinados a los que se aplican impulsos con doble polaridad, según la secuencia que se puede observar en las ilustraciones. Cuando la alimentación alcanza al bobina 1, el imán permanente se va a alinear con el campo creado, de forma que justo en el momento en que ambos campos se encuentran exactamente en línea, el par motor se anulará. Si el motor está acoplado a algún mecanismo externo, ésta situación no podrá alcanzarse, ya que el par desarrollado deberá ser igual al necesario para mover la carga, por lo tanto se formará un cierto ángulo entre los dos campos. Este par será máximo cuando el

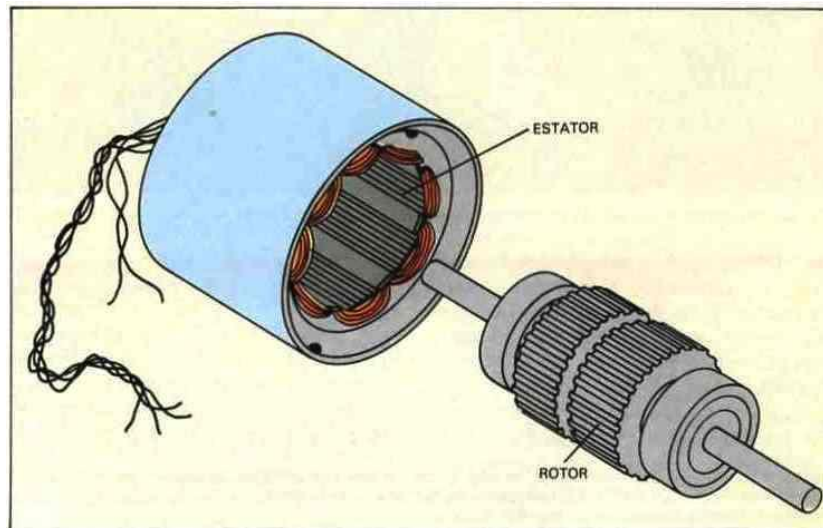
ángulo citado sea de  $90^\circ$ , pero al llegar la excitación al segundo bobinado (2) el nuevo ángulo formado será de  $180^\circ$ , con lo que el par se anulará. Por lo tanto se deduce que en un motor de este tipo no deberá ser nunca ser cargado con mecanismos que requieran un par cuyo ángulo de mantenimiento supere los  $45^\circ$ , aunque en la práctica se reduce este valor a  $30^\circ$  aproximadamente.



Secuencia de funcionamiento de un motor de imán permanente de dos bobinados: a) Excitación del bobinado 1. b) Excitación del bobinado 2. c) Nueva excitación del 1 con polaridad invertida. d) Nueva excitación del 2 con polaridad invertida. e) Ángulo que formará el rotor al cargar el motor con el máximo con el máximo par.

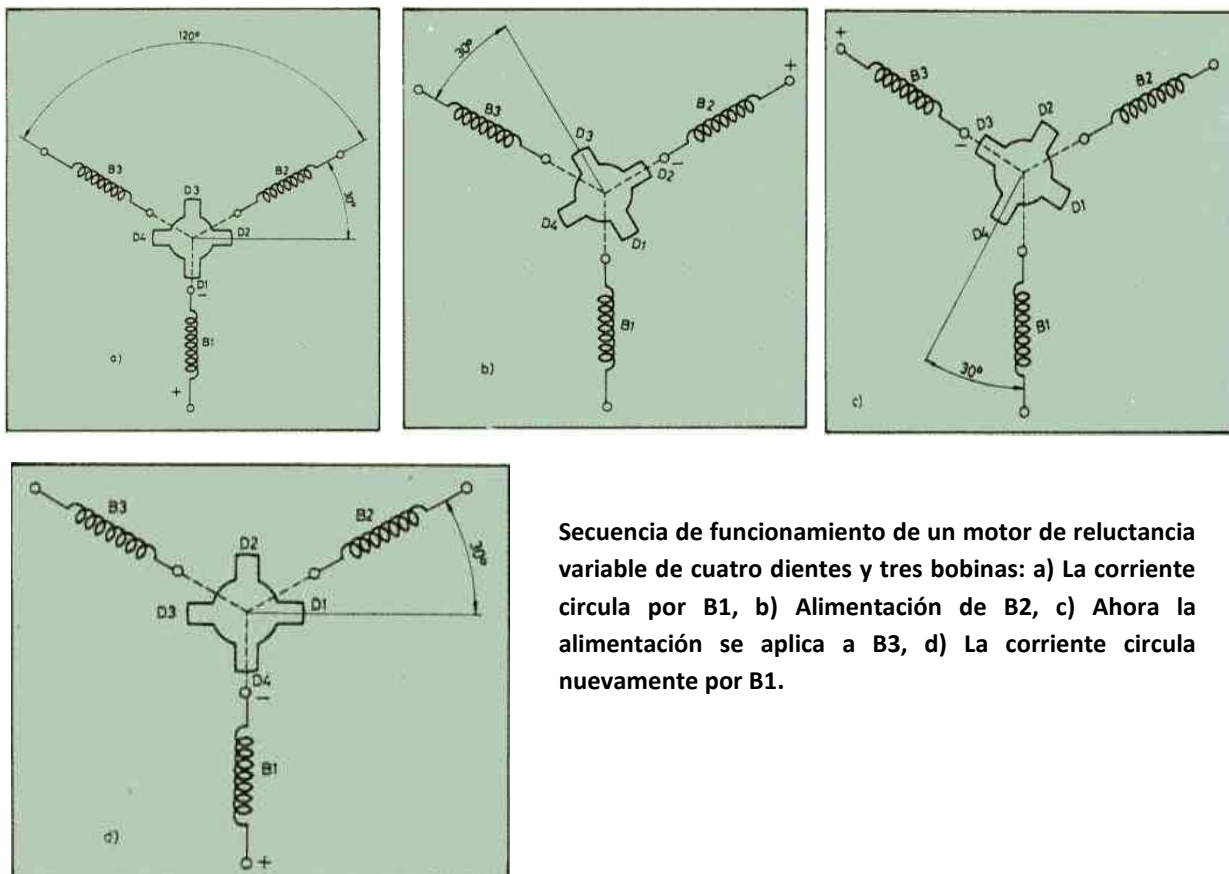
### 9.1.2. Motor paso a paso de reluctancia variable

El motor **paso a paso de reluctancia variable** se desarrolló con objeto de poder conseguir unos desplazamientos angulares más reducidos que en el caso anterior, sin que por este motivo haya de aumentarse considerablemente el número de bobinados. El estátor presentará la forma cilíndrica habitual conteniendo generalmente un total de tres devanados distribuidos de tal forma que existirá un ángulo de  $120^\circ$  aproximadamente entre cada dos de ellos. El rotor está formado por un núcleo de hierro dulce de estructura cilíndrica pero con una cierta cantidad de dientes tallados longitudinalmente a lo largo de su superficie lateral.



**Motor paso a paso de reluctancia variable. Cada uno de los dientes del rotor da lugar al avance del paso angular.**

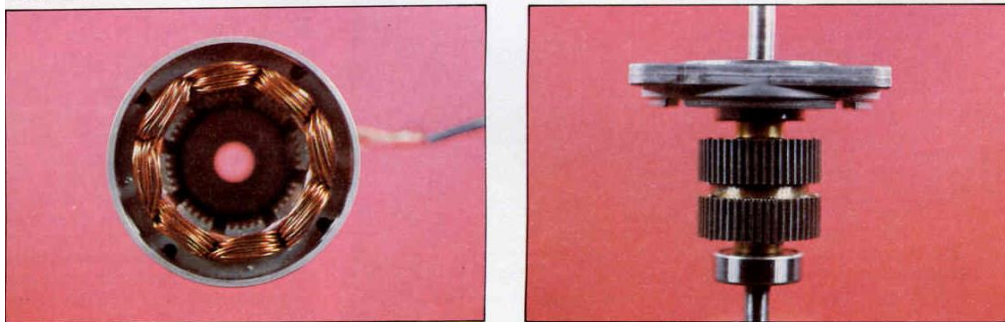
Para analizar su modo de operación se va a suponer un motor constituido por tres devanados, B1, B2 y B3, excitados secuencialmente y un rotor con cuatro dientes, D1, D2, D3 y D4. Cuando el primer arrollamiento B1 recibe la alimentación atraerá al rotor hasta que el diente más cercano se alinee con el campo, por ejemplo, D1; a llegar la excitación a B2, el diente D2 será el más próximo, con lo que el rotor girará  $30^\circ$ , de la misma forma, con el siguiente impulso aplicado a B3 será el diente D3 el alineado, con un segundo paso de  $30^\circ$  y al volver la alimentación a B1 será atraído D4, avanzando un ángulo igual a los anteriores.





Como fácilmente puede deducirse, en este caso y a diferencia de lo anterior, la polaridad o sentido de circulación de la corriente en cada devanado es indiferente, ya que al no estar imantado el rotor siempre se desplazará hasta la posición en que la reluctancia del circuito magnético del estátor sea mínima.

Para obtener desplazamiento angulares de  $15^\circ$  será necesario aumentar el número de dientes del rotor hasta 8 y esta cifra se hará tanto mayor cuanto más reducido sea el avanza de cada paso.



Detalle del estátor y del rotor de un motor paso a paso de reluctancia variable.  
Consta de cuatro bobinados de excitación y el paso angular es de 1,8 grados.

En este tipo de motores son también aplicables las consideraciones que sobre el par de accionamiento han sido expuestos anteriormente.

La principal característica de estos motores de **reluctancia variable** es la elevada velocidad de accionamiento que permiten, siendo normal la cifra de 1200 pasos por segundo.

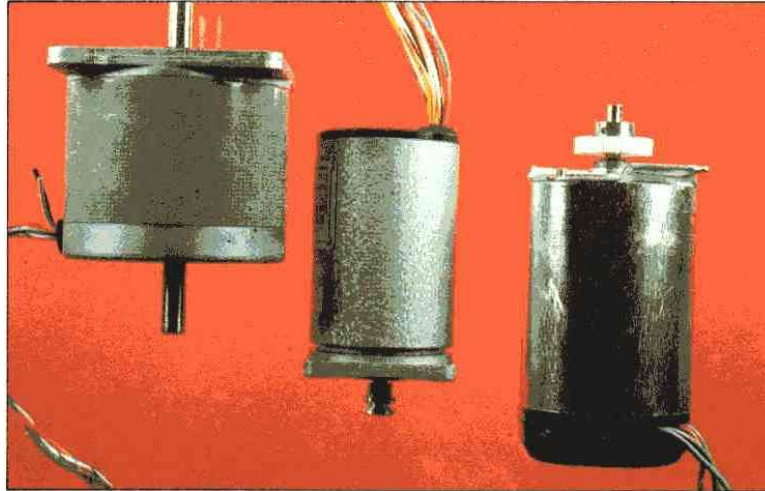
Otra forma constructiva para éste tipo de motor es la de efectuar un agrupamiento de varios conjuntos rotor-estátor, alimentando a estos últimos secuencialmente. Los pasos se obtienen por el posicionado de los bobinados de cada estátor, alineando los tres rotores y constituyendo un rotor único.



Otro modelo de motor constituido por varios conjuntos rotor-estátor alineados sobre el mismo eje.

### 9.1.3. Motor híbrido

Existe, por ultimo un tercer tipo de motor paso a paso, denominado **motor híbrido**, que combina los diseños de ambos, obteniéndose importantes pares de accionamiento, un gran número de pasos por vuelta y una frecuencia bastante elevada de trabajo.



Conjunto de tres motores de ambos tipos. Puede verse su aspecto externo y sus tamaños comparativos.

## Recuerda...

1. El funcionamiento de un motor paso a paso es discontinuo ya que su movimiento de rotación está compuesto por una serie de saltos según la secuencia de impulsos de alimentación que se aplican a los bobinados del estátor.
2. El paso angular es el desplazamiento que sufre el rotor como consecuencia de la excitación de uno de los devanados del estátor.
3. Las partes de que consta un motor paso a paso de imán permanente es de un estátor con cierto número de devanados independientes, que se alimentan en secuencia y un rotor, concéntrico con el anterior, compuesto por un imán permanente fuertemente magnetizado.
4. El motor del tipo de reluctancia variable se compone de un estátor que puede ser incluso similar al del motor paso a paso de imán permanente, aunque el número de devanados suele ser de tres, incluyendo en su interior un rotor de hierro en forma de un cilindro con una cierta cantidad de dientes tallados longitudinalmente.
5. La principales diferencias entre los modelos anteriores la principal es la forma de accionamiento del rotor, que para el caso de imán permanente se origina como consecuencia de la reacción de dos campos magnéticos, y en el de reluctancia variable se produce por el efecto de atracción del estátor sobre uno de los dientes del rotor con objeto de disminuir la reluctancia del correspondiente circuito magnético.
6. El motor híbrido es un modelo de motor paso a paso en el que se combinan las características de los tipos de imán permanente y los de reluctancia variable, con ello se aprovechan las ventajas de ambos en lo referente a número de pasos por vuelta, par motor y frecuencia de trabajo.