

# Motores de C.A.



## Introducción

*En la actualidad, el motor de C.A. es el que más se utiliza para la mayor parte de las aplicaciones. Esto es debido fundamentalmente a que consiguen un buen rendimiento, bajo mantenimiento y sencillez en su construcción, sobre todo en los motores asíncronos.*

*Seguidamente estudiaremos los siguientes tipos de motores: motor asíncrono trifásico, motor monofásico de inducción de rotor en cortocircuito, motor monofásico con espira en cortocircuito, motor síncrono, motor serie, motor paso a paso y servomotor. Dado que el motor asíncrono trifásico es el de mayor aplicación, lo estudiaremos más detalladamente.*

## Contenido

- *Motor asíncrono trifásico de rotor en cortocircuito.*
- *Sistemas de arranque de los motores asíncronos trifásicos de rotor en cortocircuito.*
- *Inversión de giro de un motor asíncrono trifásico.*
- *Motor asíncrono de rotor bobinado o de anillos rozantes.*
- *Regulación de velocidad de los motores asíncronos trifásicos.*
- *Motor asíncrono monofásico de fase partida.*
- *Motor asíncrono monofásico con condensador de arranque.*
- *Motor monofásico con espira en cortocircuito.*
- *Motor trifásico como monofásico.*
- *Motor universal.*
- *Motor síncrono trifásico.*
- *Motor paso a paso.*
- *Servomotor.*
- *Ensayos de los motores de C.A.*

## Objetivos

- *Clasificar las máquinas eléctricas.*
- *Describir el funcionamiento del motor asíncrono.*
- *Conectar adecuadamente el motor asíncrono.*
- *Seleccionar las características de un motor asíncrono.*
- *Seleccionar el sistema de arranque más adecuado de un motor asíncrono trifásico.*
- *Describir los tipos de ensayos fundamentales y normalizados que se deben realizar con los motores de C.A., identificando las magnitudes que se deben medir y explicando las curvas características que relacionan dichas magnitudes.*

## 22.1 El motor asíncrono trifásico

Al igual que los motores de C.C., el motor asíncrono trifásico de C.A. funciona gracias a los fenómenos de inducción electromagnética. Son los más utilizados en la industria por su sencillez, robustez y fácil mantenimiento. Estos motores consiguen mantener su velocidad bastante estable para diferentes regímenes de carga y poseen un buen par de arranque. Como su velocidad depende de la frecuencia de la C.A. con la que se los alimenta, la única forma de regular su velocidad de giro consiste en alimentarlos a través de variadores electrónicos de frecuencia.

Dependiendo del tipo de rotor que utilicen, existen dos tipos fundamentales: *motores de rotor en cortocircuito o jaula de ardilla* y *motores de rotor bobinado*.

### 22.1.1 Principio de funcionamiento del motor asíncrono trifásico

Los motores de inducción asíncronos trifásicos basan su funcionamiento en la generación de un campo magnético giratorio en el estator, coincidente con la velocidad síncrona, que corta a los conductores del rotor y los hace girar.

Antes de ver cómo se origina el campo giratorio, vamos a estudiar, mediante un sencillo experimento, el principio general de funcionamiento de los motores asíncronos.

Para ello, se dispone de un imán en forma de U, de tal forma que pueda girar por su eje central mediante una manivela (Figura 22.1). Muy próximo a los polos se sitúa un disco de material conductor (cobre o aluminio), de tal forma que también pueda girar. Al girar el imán permanente se puede comprobar que el disco también gira, pero a un poco menos velocidad que el imán.

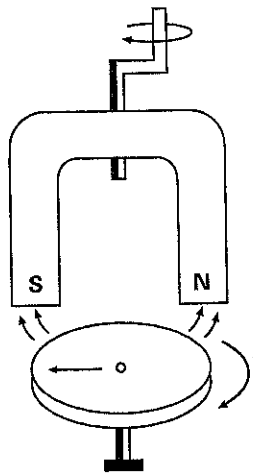


Figura 22.1. Al hacer girar el imán, el disco de material conductor también gira.

¿Por qué gira el disco si es de un material no magnético?

Cuando el imán se pone en movimiento, las líneas de campo que atraviesan el disco, también se ponen en movimiento (movimiento relativo del campo magnético frente a un conductor eléctrico fijo), por lo que según el principio de

inducción electromagnética (ley de Faraday), en el disco se induce una f.e.m.

Al estar el disco encerrado eléctricamente en sí mismo (cortocircuito), aparecen corrientes eléctricas por el mismo. Estas corrientes eléctricas quedan sometidas a la acción del campo magnético del imán, por lo que según la ley de Laplace se originan en el disco un par de fuerzas que ponen el disco en movimiento.

Según la ley de Lenz, el disco gira en un sentido tal que tiende a oponerse a las variaciones del campo magnético que originaron la corriente eléctrica, por lo que el disco gira en el mismo sentido que el campo magnético y que el imán.

El disco nunca puede alcanzar la misma velocidad de giro que el imán, ya que si esto ocurriese, el movimiento relativo de ambos se anularía y el campo magnético dejaría de ser variable respecto al disco, por lo que desaparecería la f.e.m. inducida, la corriente y con ella el par de fuerzas.

### 22.1.2 Campo magnético giratorio

Si conseguimos crear un campo magnético giratorio aprovechando las variaciones de corriente de un sistema de C.A. trifásica, como el desarrollado por el imán de la experiencia anterior, podremos hacer girar al rotor de un motor asíncrono.

El estator de un motor asíncrono trifásico se construye de igual manera que el de los alternadores trifásicos. En él se alojan tres bobinas desfasadas entre sí  $120^\circ$  (Figura 22.2 a). Cada una de estas bobinas se conecta a cada una de las fases de un sistema trifásico, por lo que por cada una de ellas circularán las corrientes instantáneas  $i_1$ ,  $i_2$  e  $i_3$  (Figura 22.2 b). Si analizamos los valores que alcanza el flujo magnético creado por cada una de estas corrientes en cada instante del tiempo, podremos comprobar que se genera un campo magnético de carácter giratorio.

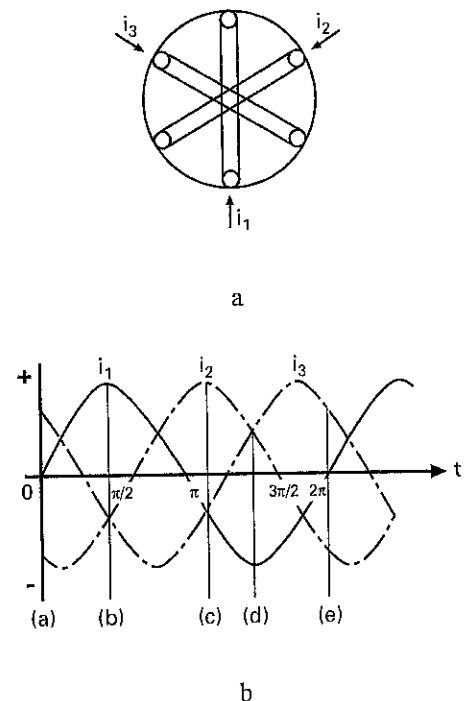


Figura 22.2. Corrientes por las tres bobinas del estator de un motor asíncrono trifásico.

Para el instante (a) la corriente  $i_1$  es cero,  $i_2$  posee un valor positivo e  $i_3$  negativo, lo que provoca un campo magnético instantáneo del sentido marcado por la flecha de la figura 22.3 a (se ha aplicado la regla de sacacorchos para las corrientes salientes y entrantes). En el punto (b), las corrientes  $i_2$  e  $i_3$  son negativas, mientras que  $i_1$  ahora es positiva, por lo que, tal como se puede observar en la Figura 22.3 b, el campo magnético ha avanzado 1/4 de ciclo. Si seguimos estudiando punto por punto, podremos observar cómo se obtiene un campo magnético giratorio, que en este caso avanza a la misma velocidad angular que el de la pulsación de la corriente. En el punto (e) se completa un ciclo y se inicia uno nuevo (Figura 22.3 e).

## 22.2 Motor asíncrono trifásico de rotor en cortocircuito

En el **estator** de estos motores se colocan las bobinas encargadas de producir el campo magnético giratorio. Éstas se alojan en ranuras practicadas en un núcleo formado, por lo general, por paquetes de chapa magnética, tal como se muestra en la Figura 22.4. Las tres bobinas quedan desfasadas entre sí  $120^\circ$  eléctricos, y los 6 terminales de que constan se conectan a la placa de bornes del motor, pudiéndose conectar posteriormente en estrella o en triángulo.

El **rotor** es cilíndrico y en él se sitúan conductores de aluminio alojados en las ranuras del núcleo y cortocircuitados

por sus extremos mediante anillos conductores. A este rotor también se le da el nombre de jaula de ardilla. En motores de pequeña potencia el rotor se construye fundiendo en un bloque integral unas varillas de aluminio junto con los anillos.

El funcionamiento del motor asíncrono trifásico de rotor en cortocircuito es como sigue: al ser recorridas las bobinas del estator por una sistema de corrientes trifásicas, se origina en él un campo magnético giratorio.

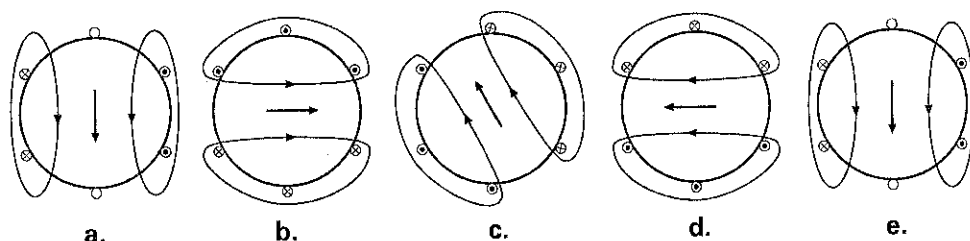


Figura 22.3. Estudio paso a paso de la formación del campo giratorio.

Al igual que ocurría en un alternador, la velocidad síncrona del campo giratorio depende del número de polos con el que se construyan los devanados en el estator y de la frecuencia.

$$n_s = \frac{60 f}{p}$$

$n_s$  = velocidad del campo giratorio (r.p.m.)

$f$  = frecuencia de la red (Hz)

$p$  = número de pares de polos del devanado estático

### Ejemplo: 22.1

Se dispone de un motor asíncrono trifásico de 2 pares de polos. Averiguar la velocidad del campo giratorio para la frecuencia europea de 50 Hz y para la americana de 60 Hz.

Solución:  $n_{s(50 \text{ Hz})} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1.500 \text{ r.p.m.}$

$n_{s(60 \text{ Hz})} = \frac{60 \cdot 60}{2} = 1.800 \text{ r.p.m.}$

Los conductores del rotor, que en un principio esta parado, son barridos por el campo magnético giratorio, por lo que se induce en ellos una f.e.m. Como estos conductores están en cortocircuito, aparece una corriente por los mismos que en unión con el campo magnético del estator da lugar a un par de fuerzas que pone en movimiento el rotor en el mismo sentido que el campo giratorio.

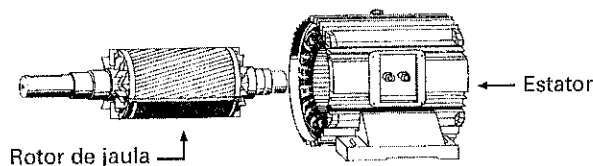


Figura 22.4. Constitución de un motor asíncrono trifásico de rotor en cortocircuito.

La velocidad del rotor nunca puede alcanzar a la del campo giratorio, ya que de ser éstas iguales no se induciría tensión alguna en el rotor, por lo que el rotor siempre gira a una velocidad inferior a la de sincronismo (de ahí viene el nombre de asíncrono). De esta forma, se define el deslizamiento de un motor asíncrono, como la diferencia de estas velocidades expresada en tantos por ciento:

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100$$

$S$  = deslizamiento (%)

$n_s$  = velocidad del campo giratorio

$n$  = velocidad del rotor

**Ejemplo: 22.2**

Un motor asíncrono trifásico de rotor en cortocircuito posee una velocidad síncrona de 3.000 r.p.m. ¿Cuál será el deslizamiento del rotor a plena carga si se mide con un tacómetro una velocidad de 2.850 r.p.m.?

*Solución:*

$$S = \frac{3.000 - 2.850}{3.000} 100 = 5\%$$

El deslizamiento de un motor varía con la carga mecánica que tenga que arrastrar. De esta forma tenemos que, cuando el motor trabaja en vacío, el deslizamiento es mínimo (del orden de un 0,1%). Al arrastrar la carga nominal, el motor tiende a frenarse y el deslizamiento aumenta un poco (del orden del 4%).

Cuando el motor pasa de funcionar en vacío a arrastrar una carga mecánica, el rotor tiende a frenarse. Esto hace que el movimiento relativo del campo magnético giratorio respecto a los conductores del rotor aumente, lo que produce un aumento de la f.e.m. y de la corriente inducida en los mismos. Dado que el par de fuerzas que se desarrolla en el rotor depende de la corriente, se produce un aumento de dicho par que tiende a equilibrar el par resistente con el motor. De aquí se entiende que según aumenta la carga en el motor, también aumenta el deslizamiento, ya que de éste depende el par motor del mismo.

**Arranque:** Al conectar las bobinas del estator de un motor trifásico, permaneciendo el rotor sin movimiento, en un principio, el campo giratorio corta los conductores del rotor, induciendo en los mismos, como si fuese un transformador, una f.e.m. elevada (de la misma frecuencia que la del estator), que, a su vez, producirá una fuerte corriente (puede llegar a ser de cientos de amperios). Estas corrientes, al interactuar con el campo magnético, producen elevadas fuerzas mecánicas que, al actuar sobre el rotor, le proporciona un fuerte par de arranque.

Al igual que ocurría en los transformadores (el estator actúa como el primario y el rotor como el secundario), la fuerte corriente del rotor genera, a su vez, un campo magnético que intenta modificar el flujo común; como éste sólo depende de la tensión aplicada al estator, aparece un incremento de corriente en el mismo que intenta compensar la f.m.m. producida por el rotor. De esta forma, cuando aumenta la intensidad rotórica también lo hace la corriente estática, que corresponde a la corriente tomada de la red por el motor. En el arranque se produce, por tanto, una elevación de la corriente absorbida por el motor de la red, que, como ya veremos más adelante, a veces conviene suavizar.

**Aceleración y carga:** Tan pronto como empieza a circular corriente por el

rotor parado, éste empieza a girar con un movimiento acelerado y en el mismo sentido que el campo giratorio, por lo que el movimiento relativo entre el campo y el rotor disminuye y con él la f.e.m. inducida y la corriente (según disminuye el deslizamiento, la frecuencia del rotor  $f_2$  va también disminuyendo). Si el motor esta en vacío, rápidamente se alcanza una velocidad muy próxima a la de sincronismo. Si se aplica una carga mecánica resistente al eje del motor, el rotor tenderá a perder velocidad hasta alcanzar un equilibrio entre el par motor creado por el mismo y el par resistente ofrecido por la carga.

Si se aplica una carga mecánica resistente que sobrepase el par máximo que puede proporcionar el motor, éste tiende a pararse. Esto siempre debe de evitarse, ya que al estar el rotor bloqueado, tanto las corrientes rotóricas como las estáticas se elevan muchísimo, pudiendo provocar la destrucción del motor si no se desconecta el motor rápidamente.

Se puede decir que el motor intenta desarrollar un par motriz exactamente igual al par opuesto por el resistente de la carga.

## 22.2.1 Característica mecánica de un motor asíncrono trifásico

La característica del motor nos indica la relación entre el par del motor y su velocidad. El par que desarrolla un motor de inducción esta íntimamente relacionado con la velocidad del rotor. Dado que su relación matemática resulta un poco complicada, por lo general, esta relación se expresa gráficamente mediante una curva característica de par-velocidad.

A modo de ejemplo, en la curva de la Figura 22.5 se ha representado la relación par(C)-velocidad(n) de un motor asíncrono trifásico con rotor en cortocircuito. En el eje de abscisas se escriben los valores relativos del par referidos al par nominal  $C_n$  y en el de ordenadas el de la velocidad relativa del rotor expresada en porcentaje (en realidad se expresa el deslizamiento). En esta representación gráfica se ha trazado la evolución del par motor, así como la evolución del par resistente al que se le somete al motor. Este par resistente podría corresponder, por ejemplo, al transmitido por un eje al que se le ha acoplado un montacargas.

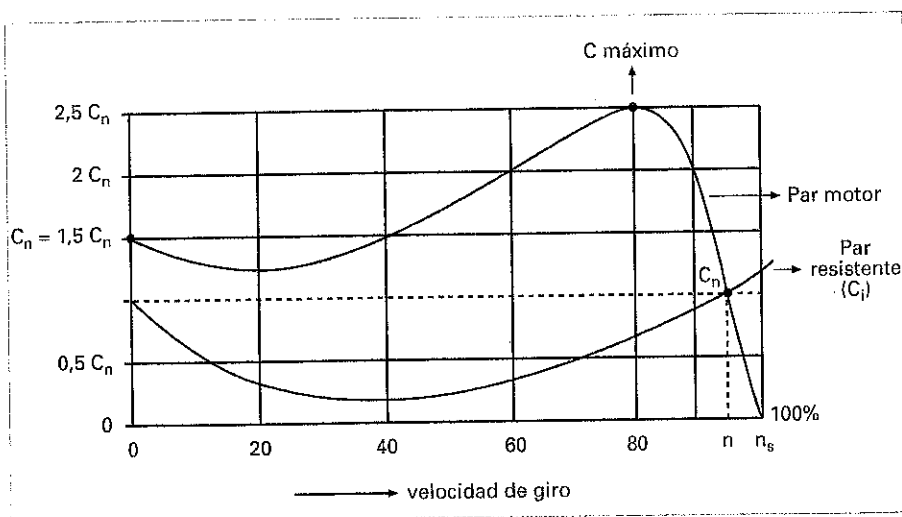


Figura 22.5. Característica mecánica de un motor asíncrono trifásico.

En la curva mostrada como ejemplo en la Figura 22.5 se puede observar que en el momento del arranque del motor ( $n = 0$ ), se obtiene un par de arranque ( $C_n = 1,5 C_n$ ) que es 1,5 veces el par a plena carga.

Si hacemos que este motor arrastre una carga que origine un par resistente  $C_r$ , el motor adaptará su velocidad hasta conseguir desarrollar un par motor  $C_n$  que consiga arrastrar la carga mecánica. Esto se consigue a la velocidad  $n$ . En el caso de que aplicásemos un par resistente mayor, la velocidad disminuiría hasta que se alcanzara el equilibrio entre el par motor y el par resistente.

En el caso de que el par resistente fuese mayor que el par máximo que puede desarrollar el motor (en nuestro ejemplo:  $C_{m\acute{a}x} = 2,5 C_n$ ) el motor se pararía. En nuestro ejemplo esto ocurriría cuando la velocidad se redujese al 80% de la velocidad de sincronismo.

**Ejemplo 22.3**

Un motor asíncrono trifásico posee las siguientes características: potencia eléctrica absorbida de la red = 8 KW; 380 V; 50 HZ;  $\cos \phi = 0,85$ ;  $\eta = 93\%$ ; pares de polos del devanado estatórico = 2; deslizamiento a plena carga = 4%. Calcular el par de rotación del rotor.

*Solución:* Primero calculamos la potencia útil del motor:

$$\eta = \frac{P_u}{P} \cdot 100 \Rightarrow P_u = \frac{P}{100} \eta = \frac{8.000}{100} 93 = 7.440 \text{ w}$$

La velocidad síncrona del campo giratorio, es:

$$n_s = \frac{60 f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1.500 \text{ r.p.m.}$$

La velocidad del rotor la calculamos mediante el deslizamiento:

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} 100 \Rightarrow n = n_s - \frac{S \cdot n_s}{100} =$$

$$1.500 - \frac{4 \cdot 1.500}{100} = 1.440 \text{ r.p.m.}$$

La velocidad angular del rotor es, entonces:

$$C = \frac{2 \pi n}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1.440}{60} = 151 \text{ rad/s}$$

Ahora ya podemos calcular el par útil del motor:

$$C = \frac{P_u}{\omega} = \frac{7.440}{151} = 49 \text{ Nm}$$

## 22.2.2 Características técnicas de un motor asíncrono trifásico

Una buena parte de las características de los motores eléctricos se suele expresar en la propia placa de características del motor, tal como tensiones, potencia, frecuencia, velocidad, nivel de protección, clase de aislamiento, factor de potencia, tipo de servicio, etc. Si queremos obtener otros datos, como el comportamiento en servicio a diferentes regímenes de carga, tendremos que recurrir a las características que se facilitan en las informaciones técnicas que proporcionan los propios fabricantes de los motores.

En la Tabla 22.1 se muestra, a modo de ejemplo, las características técnicas de una gama de motores asíncronos trifásicos con rotor en cortocircuito comerciales de un par de polos y 50 Hz.

| Potencia<br>KW | CV  | TIPO                | Veloc.<br>r/min | In a.<br>380V | Rendimiento |      |      | Factor de Potencia |      |      | Ca<br>Ch | Ia<br>In | Peso<br>Kg | PD<br>Kgm | Cm<br>Cn |
|----------------|-----|---------------------|-----------------|---------------|-------------|------|------|--------------------|------|------|----------|----------|------------|-----------|----------|
|                |     |                     |                 |               | 4/4         | 3/4  | 2/4  | 4/4                | 2/4  | 3/4  |          |          |            |           |          |
| 110            | 150 | WT315S <sub>2</sub> | 2.964           | 208           | 91,5        | 89,5 | 87   | 0,88               | 0,87 | 0,83 | 1,6      | 6        | 900        | 4         | 2,2      |
| 132            | 175 | WT315M <sub>2</sub> | 2.966           | 247           | 92          | 91,5 | 91   | 0,89               | 0,88 | 0,85 | 1,8      | 6,2      | 1.000      | 4,6       | 2,3      |
| 160            | 220 | WT315M <sub>2</sub> | 2.968           | 284           | 93          | 92   | 91   | 0,89               | 0,89 | 0,87 | 1,8      | 6,2      | 1.075      | 5,7       | 2,3      |
| 200            | 275 | WT315M <sub>3</sub> | 2.975           | 363           | 93          | 92   | 90   | 0,9                | 0,89 | 0,87 | 1,5      | 6,5      | 1.150      | 8,3       | 2,2      |
| 220            | 300 | WT355M <sub>2</sub> | 2.982           | 390           | 94,8        | 94,6 | 93,5 | 0,9                | 0,89 | 0,87 | 1,5      | 6,2      | 1.450      | 9,5       | 2,4      |
| 260            | 350 | WT355M <sub>2</sub> | 2.982           | 445           | 95          | 94,8 | 94   | 0,9                | 0,89 | 0,87 | 1,5      | 6,2      | 1.700      | 11        | 2,4      |
| 300            | 400 | WT355M <sub>3</sub> | 2.982           | 510           | 95,4        | 95,2 | 94,5 | 0,9                | 0,89 | 0,87 | 1,6      | 6,2      | 1.775      | 12,8      | 2,4      |
| 330            | 450 | WT355M <sub>4</sub> | 2.982           | 575           | 95,8        | 95,4 | 95   | 0,9                | 0,89 | 0,87 | 1,6      | 6,2      | 1.850      | 14,5      | 2,4      |
| 365            | 500 | WT400L <sub>2</sub> | 2.982           | 630           | 95          | 94,4 | 93,4 | 0,9                | 0,89 | 0,87 | 1,5      | 6,4      | 2.500      | 20        | 2,4      |
| 400            | 550 | WT400L <sub>3</sub> | 2.982           | 695           | 95,5        | 95   | 94,2 | 0,9                | 0,89 | 0,87 | 1,5      | 6,4      | 2.650      | 22        | 2,4      |
| 440            | 600 | WT400L <sub>4</sub> | 2.982           | 760           | 96          | 95,5 | 94,8 | 0,9                | 0,89 | 0,87 | 1,5      | 6,4      | 2.750      | 28,5      | 2,4      |

Tabla 22.1. Características de una gama de motores asíncronos trifásicos comerciales.

La potencia que habitualmente se indica en las características técnicas es la útil, o mecánica, que el motor puede transmitir por el eje. Para calcular la intensidad nominal habrá que tener en cuenta, entonces, el rendimiento del motor.

**Ejemplo: 22.4**

Vamos a comprobar si el motor tipo WT355M<sub>1</sub>-2 absorbe realmente la intensidad que se indica para la potencia nominal (funcionamiento a 4/4): P<sub>u</sub> = 220 KW; η = 94,8%; cos φ = 0,9; V<sub>L</sub> = 380 V. (Nota: El funcionamiento a 4/4 indica que el motor funciona a plena carga, mientras que a 3/4 lo hace a tres cuartas partes de la potencia de carga.)

La potencia que el motor absorbe de la red a plena carga es igual a:

$$P = \frac{P_u}{\eta} \cdot 100 = \frac{220.000}{94,8} \cdot 100 = 232.068 \text{ W}$$

$$I_n = \frac{P}{\sqrt{3} V_c \cos \varphi} = \frac{232.068}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,9} = 392 \text{ A}$$

Valor que coincide con la intensidad indicada en la hoja de características técnicas de la Tabla 22.1.

En estas hojas se muestra cómo el rendimiento y el factor de potencia disminuyen con el régimen de carga. Cuando el motor trabaja en vacío su factor de potencia se hace muy pequeño, debido a que la mayor parte de la corriente que absorbe se dedica a crear el campo magnético, mientras que la potencia activa que absorbe el motor queda muy reducida (la necesaria para alimentar las pérdidas del motor).

C<sub>a</sub>/C<sub>n</sub> = indica la relación entre el par de arranque y el nominal par un arranque directo.

C<sub>m</sub>/C<sub>n</sub> = indica la relación entre el par máximo que puede desarrollar el motor y el nominal.

I<sub>a</sub>/I<sub>n</sub> = indica la relación entre la intensidad de arranque y la nominal para un arranque directo.

PD<sup>2</sup> = indica el momento de inercia del rotor.

**Ejemplo: 22.5**

Se dispone de un motor asíncrono trifásico de rotor en cortocircuito tipo WT315M<sub>2</sub>-2. Averiguar el deslizamiento a plena carga, la intensidad cuando el motor trabaje a 2/4 de su potencia nominal, la intensidad en el arranque, par nominal, par de arranque y par máximo.

**Solución:** Según las características indicadas en las hojas técnicas (Tabla 22.1), este motor es de un par de polos, por lo que su velocidad de sincronismo par 50 Hz será de 3.000 r.p.m. Como su velocidad nominal es de 2.968, el deslizamiento que le corresponde, es:

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 = \frac{3.000 - 2.968}{3.000} \cdot 100 = 1,07\%$$

Para calcular la intensidad cuando el motor trabaje a 2/4 de su potencia nominal (mitad de la carga) tendremos que utilizar los datos que se muestran en las hojas de características para ese punto de trabajo: η = 91%; cos φ = 0,87.

La potencia eléctrica absorbida de la red es en este caso:

$$P = \frac{2/4 P_u}{\eta} \cdot 100 = \frac{2/4 \cdot 160}{91} \cdot 100 = 87,9 \text{ KW}$$

$$= \frac{P}{\sqrt{3} V_c \cos \varphi} = \frac{87.900}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,87} = 154 \text{ A}$$

Según las características técnicas, la intensidad en el arranque es 6,5 veces superior a la nominal; como la intensidad nominal a plena carga es 284 A, tendremos que:

$$I_a = 6,5 I_n = 6,5 \cdot 284 = 1.846 \text{ A}$$

Calcular ahora el valor del par nominal:

$$C_n = \frac{P_u}{\omega} = \frac{160.000}{311} = 514 \text{ Nm}$$

La velocidad angular del rotor la hemos calculado así:

$$\omega = \frac{2 \pi n}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 2.968}{60} = 311 \text{ rad/s}$$

Según las características técnicas, el par de arranque es 1,8 veces superior a la nominal y el par máximo se alcanza al hacerse 2,3 veces mayor que el nominal:

$$\text{Par de arranque: } C_a = 1,8 C_n = 1,8 \cdot 514 = 925 \text{ Nm}$$

$$\text{Par máximo: } C_m = 2,3 C_n = 2,3 \cdot 514 = 1.182 \text{ Nm}$$

## 22.2.3 Conexión de los devanados de un motor trifásico

El devanado trifásico del estator de un motor asíncrono se puede conectar en estrella o en triángulo, dependiendo de la tensión de la red y la que se indique en la placa de características del motor. De esta forma tenemos que los motores trifásicos pueden funcionar a dos tensiones.

Así, por ejemplo, en un motor que en su placa de características aparezcan las tensiones: 380/220 V, nos indica que se puede conectar en estrella a la tensión mayor (380 V, ya que en cada devanado del motor aparecerá V<sub>s</sub> = 380/√3 = 220 V) y en triángulo a la menor (220 V). De tal forma que cada bobina siempre queda sometida a la tensión menor (Figura 22.6).

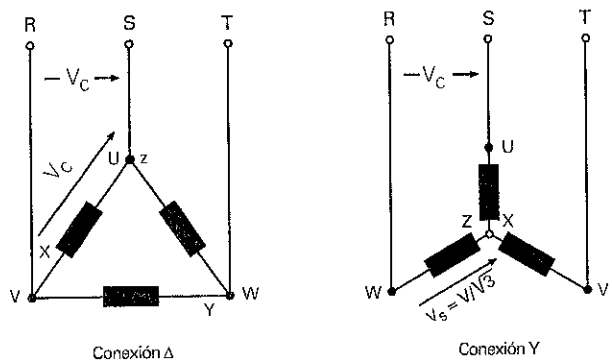


Figura 22.6. Conexiones de los devanados de un motor asíncrono trifásico.

En la caja de bornes de los motores aparecen los seis terminales correspondientes a los tres devanados del motor más el terminal de conexión a tierra. La disposición de los terminales siempre se hace de la misma forma, siguiendo las normas internacionales. Para conseguir la conexión en estrella, basta con unir con unos puentes los finales Z-X-Y. La conexión en triángulo se consigue realizar con facilidad al unir con unos puentes los terminales (U-Z), (V-X), (W-Y) (Figura 22.7).

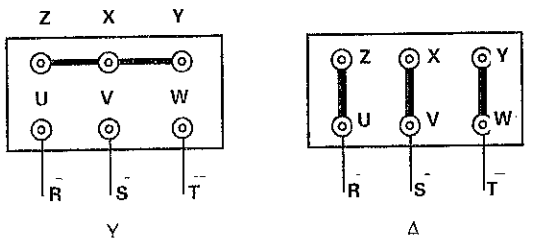


Figura 22.7. Conexiones en la placa de bornes de un motor asíncrono trifásico.

### 22.2.4 Sistemas de arranque de los motores asíncronos trifásicos de rotor en cortocircuito

Cuando se conecta el motor directamente a la red, éste absorbe una intensidad muy fuerte de la línea en el momento del arranque, lo que puede afectar no sólo a la duración de los aparatos de conexión, sino a la líneas que suministran energía eléctrica. Estas fuertes corriente sobrecargan las líneas de distribución, pudiendo producir caídas de tensión y calentamiento en los conductores de las mismas. Por esta razón, las compañías de energía eléctrica editan normas para reducir dichas corrientes de arranque a unos valores que sean aceptables.

Una forma de reducir la corriente de arranque es reducir la tensión aplicada al motor. Con ello también se disminuye el par efectivo de arranque, ya que al disminuir la tensión, el flujo del estator también disminuye y con él la f.e.m. inducida en el rotor y la intensidad rotórica. En conclusión, el par de arranque disminuye con el cuadrado de la tensión.

Existen diferentes métodos para reducir la corriente de arranque disminuyendo la tensión: arranque estrella-triángulo,

arranque con resistencias estáticas y arranque por auto-transformador.

#### 22.2.4.1 Arranque directo

El arranque directo está permitido para motores que posean una potencia inferior a 5,5 Kw. En la Figura 22.8 a se muestra el esquema de fuerza para el arranque directo de un motor asíncrono trifásico de rotor en cortocircuito, y en la Figura 22.8 b el esquema de mando correspondiente.

- F1F** = Fusibles de protección del circuito de fuerza del motor.
- K1M** = Contactor.
- S1A** = Pulsador de marcha del motor.
- S0A** = Pulsador de paro del motor.
- F2F** = Relé térmico trifásico. Protege al motor de las sobrecargas que pudiera sufrir. Cuando aparece una sobrecarga, el conmutador asociado a este dispositivo cambia de posición.

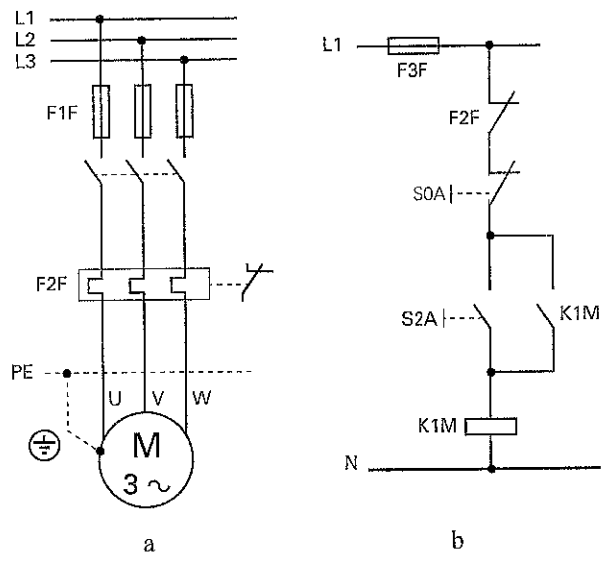


Figura 22.8. Esquema de fuerza y mando para el arranque directo de un motor asíncrono trifásico de rotor en cortocircuito.

Su funcionamiento es como sigue: al apretar el pulsador S1A se cierra el circuito de la bobina del contactor, lo que provoca que tanto los contactos principales como los auxiliares cambien de posición y el motor se ponga en marcha.

En ese mismo instante el contacto auxiliar K1M, normalmente abierto y que esta en derivación con el pulsador, se cierra. Al dejar de pulsar S1A, éste se abre, pero la bobina sigue siendo atravesada por una corriente, que ahora circula por el propio contacto auxiliar K1M del contactor.

El pulsador de paro S10 tiene su contacto normalmente cerrado. Al apretar el botón de dicho pulsador, se abre su contacto y corta la corriente de la bobina, con lo cual el contactor abre sus contactos principales y el auxiliar K1M, y el motor se para.

Para efectuar la parada del motor basta con accionar el pulsador de paro SOQ. En caso de sobrecarga, el contacto del relé térmico F2F desconecta igualmente a los contactores.

## 22.3 Motor asíncrono de rotor bobinado o de anillos rozantes

En estos motores el estator posee las mismas características que el rotor en cortocircuito, pero el rotor se construye insertando un devanado trifásico en las ranuras de un núcleo cilíndrico de chapas magnéticas (véase Figura 22.13). Este devanado se conecta normalmente en estrella y los tres terminales restantes se conectan a tres anillos colectores. Unas escobillas frotan estos anillos y permiten conectar unas resistencias externas en serie con el fin de poder limitar la corriente rotórica.

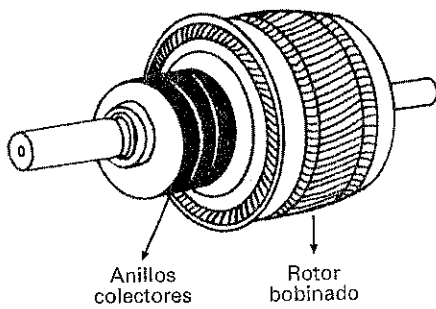


Figura 22.13. Rotor bobinado de un motor asíncrono.

En la placa de características de estos motores aparecen tres nuevos terminales correspondientes al bobinado del rotor, que para no confundirlos con los del estator se indican con las letras minúsculas u, v, w.

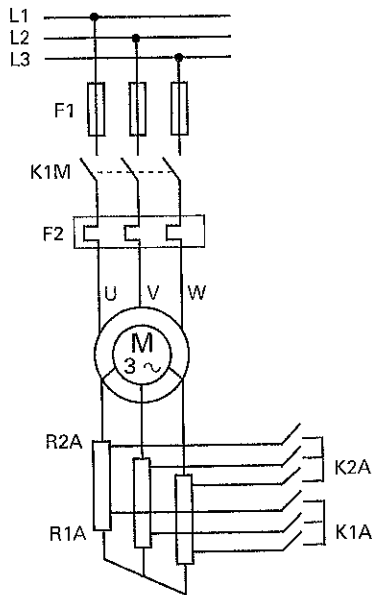


Figura 22.14. Esquema para el arranque de un motor asíncrono de rotor bobinado mediante resistencias rotóricas.

El principio de funcionamiento es exactamente igual que el del rotor en cortocircuito, pero ahora es posible la regulación directa de la corriente rotórica y con ella, la propia corriente del estator. Este sistema tiene la ventaja de que no es necesario disminuir la tensión en el estator para disminuir el flujo y, con él, la corriente rotórica, que siempre trae consigo una reducción del par motor.

En la Figura 22.14 se puede apreciar el circuito de fuerza del arranque de un motor asíncrono trifásico de rotor bobinado mediante resistencias rotóricas.

El arranque se hace en sucesivos escalones, obteniendo un arranque con corriente suave en el estator con un buen par de arranque. Calculando adecuadamente el valor de las resistencias rotóricas, incluso se puede llegar a obtener un arranque con el par máximo.

Al modificar la resistencia del rotor, el deslizamiento se hace mayor y la curva característica par-velocidad se desplaza, tal como se muestra en la Figura 22.15.

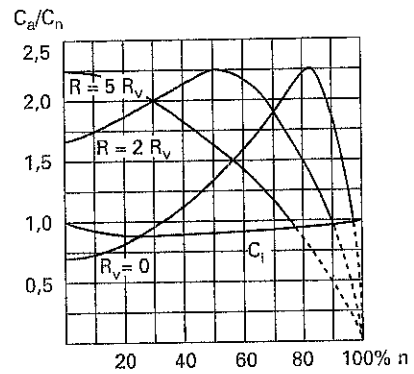


Figura 22.15. Característica mecánica correspondientes al proceso de arranque de un motor de asíncrono trifásico mediante resistencias rotóricas.

El gran inconveniente que presentan estos motores frente a los de jaula de rotor en cortocircuito es que resultan bastante más caros y necesitan de un mayor mantenimiento. En la actualidad el control electrónico de los motores asíncronos de rotor en cortocircuito ha desplazado en casi todas las aplicaciones al motor de rotor bobinado, quedando éste último para casos especiales donde se requiera un par de arranque muy elevado (grúas, instalaciones de media tensión, etc).

## 22.4 Regulación de velocidad de los motores asíncronos trifásicos

La velocidad de un motor asíncrono depende fundamentalmente del número de polos con que está construido y de la frecuencia, por lo que si conseguimos modificar una de estas dos variables habremos conseguido controlar la velocidad.

### 22.4.1 Motores de dos velocidades conexión Dahlander

Estos motores se construyen con un devanado con varias posibles conexiones. Dependiendo de cómo se conecten exte-



riormente estos bobinados, se consigue variar el número de polos y, por lo tanto, la velocidad. La conexión más empleada es la Dahlander.

En el esquema de la Figura 22.16 se ha representado el circuito de fuerza de un motor trifásico de polos conmutables para dos velocidades en conexión Dahlander.

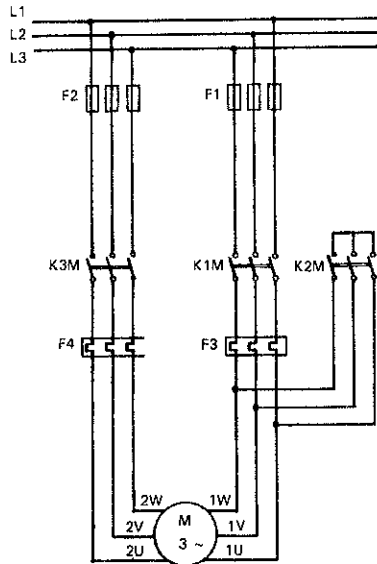


Figura 22.16. Esquema de fuerza de motor de dos velocidades en conexión Dahlander.

La velocidad inferior se obtiene cuando el contactor K1M está únicamente accionado. La velocidad superior se consigue desconectando K1M y accionando en conjunto los contactores K2M y K3M.

### 22.4.2 Motor de dos velocidades con dos devanados separados

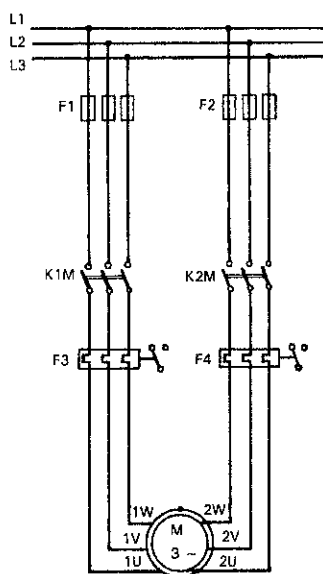


Figura 22.17. Esquema de fuerza de motor trifásico de dos velocidades con devanados separados.

También es posible conseguir dos velocidades de giro diferentes con dos devanados separados. Cada uno de los devanados posee un número de polos acorde con la velocidad deseada. Dependiendo del devanado que se conecte conseguimos una velocidad u otra.

En el esquema de la Figura 22.17 se ha representado el circuito de fuerza de un motor trifásico para dos velocidades de giro con dos devanados separados.

Cuando se acciona el contactor KM1 el motor marcha a velocidad más lenta. Al desconectar KM1 y conectar KM2, el motor funciona a la velocidad más alta.

### 22.4.3 Regulación de velocidad con variadores de frecuencia

Mediante un equipo electrónico especial, a base de tiristores, se puede regular la frecuencia de alimentación del motor. Con ello se consigue modificar entre amplios límites la velocidad de el motor (Figura 22.18).

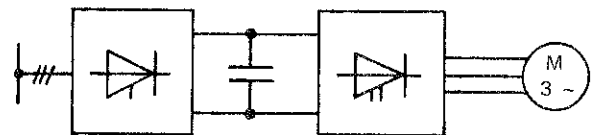


Figura 22.18. Variador de velocidad de un motor asíncrono trifásico a base de modificar la frecuencia de alimentación.

## 22.5 Motores monofásicos

El suministro de C.A. trifásica no siempre esta disponible en todas las instalaciones eléctricas. Así, por ejemplo, las viviendas son alimentadas con C.A. monofásica (fase + neutro). En estos casos, dada la sencillez, robustez, bajo precio y ausencia de chispas, son de gran aplicación los motores asíncronos monofásicos de inducción de rotor en cortocircuito. Para pequeños electrodomésticos (batidoras, molinillos, etc.) la tendencia es utilizar el motor universal. En cualquier caso, la utilización de motores monofásicos será factible para aplicaciones de pequeña potencia.

### 22.5.1 Motor monofásico de inducción de rotor en cortocircuito

Al igual que los trifásicos, están constituidos por un rotor de jaula de ardilla y un estator donde se alojaran los devanados inductores. Su principio de funcionamiento es similar a los asíncronos trifásicos, es decir se basan en las fuerzas que aparecen en los conductores del rotor en cortocircuito cuando es sometido a la acción de un campo giratorio. Aprovechando este principio se pueden construir diferentes tipos de motores, de los cuales estudiaremos los siguientes: *motor monofásico de fase partida*, *motor monofásico de fase partida con condensador de arranque*, *motor monofásico con espira en cortocircuito* y *motor trifásico como monofásico*.

Si en el estator situamos un bobinado monofásico y lo sometemos a una tensión alterna senoidal, el campo magnético que se obtiene no es giratorio. Lo que se produce es un campo magnético alternativo y fijo (el campo cambia de polaridad con la frecuencia de forma alternativa). El motor se comporta como un transformador, induciéndose en los conductores del rotor una f.e.m. y una corriente que no es capaz de provocar un par de arranque efectivo en el rotor (los conductores del rotor desarrollan primero un par de fuerzas en un sentido y cuando cambia el flujo magnético desarrollan el par de fuerzas en sentido contrario, no consiguiendo así poner en marcha el motor) (véase Figura 22.19 a).

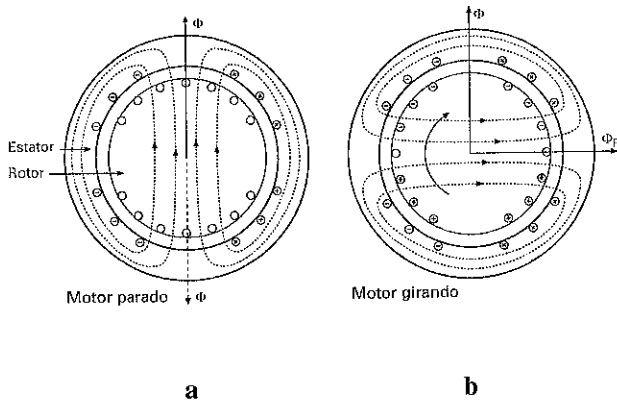


Figura 22.19. Motor monofásico de inducción. a) Al ser el campo generado por el devanado del estator alternativo, el motor no arranca; b) al empujar al rotor, se desplaza el campo magnético y el rotor se pone en movimiento.

Si en estas condiciones empujamos el rotor manualmente en uno de los sentidos, conseguiremos desplazar el eje del campo magnético del rotor y el motor comenzará a girar hasta alcanzar su velocidad nominal (Figura 22.19 b). Hay que tener en cuenta que al ponerse el rotor en movimiento, en los conductores del mismo aparece una nueva f.e.m. inducida debida al giro de los mismos en el seno del campo magnético alternativo producido por el estator. Esta f.e.m. genera unas corrientes que dan lugar a un campo magnético de reacción que queda desfasado un ángulo de 90° respecto al principal del estator. En estas condiciones ya aparece un par de fuerzas sobre el rotor que lo hace girar en el mismo sentido en el que se le haya impulsado inicialmente.

Al igual que los motores asíncronos trifásicos, la velocidad de estos motores depende del número de pares de polos del devanado y de la frecuencia de la red.

### 22.5.2 Motor asíncrono monofásico de fase partida

Por supuesto, no sería muy práctico tener que arrancar los motores asíncronos trifásicos de una forma manual. Para conseguir que el motor arranque automáticamente se inserta en las ranuras del estator un segundo bobinado auxiliar que ocupa 1/3 de las mismas. En la Figura 22.20 se muestra un esquema de la disposición de los dos bobinados para un par de polos en un estator de 12 ranuras. Los terminales marcados con las letras mayúsculas U, X, indican el principio y final del bobinado principal, y los marcados con minúsculas u, x, los del auxiliar.

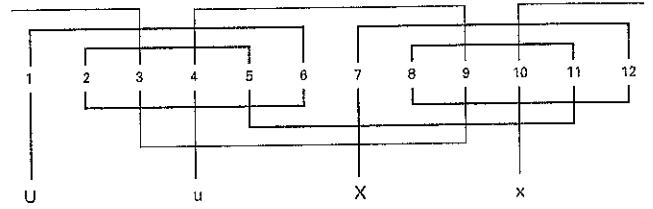


Figura 22.20. Bobinado principal y auxiliar de un motor asíncrono monofásico de fase partida.

Como la impedancia de las dos bobinas es diferente, se produce un ángulo de desfase en la corriente absorbida por el bobinado auxiliar respecto a la del principal. Este ángulo suele ser de adelanto, debido a que el bobinado auxiliar es de menor sección y, por lo tanto, más resistivo. El flujo que produce dicha bobina queda también adelantado al principal, lo que hace que se forme un campo giratorio suficiente para impulsar a moverse al rotor. Dado que el ángulo de desfase entre ambos flujos resulta muy pequeño, el par de arranque también lo es.

En la Figura 22.21 se muestra el esquema de conexiones de un motor asíncrono monofásico de fase partida, donde se puede observar que el devanado auxiliar se conecta en paralelo con el principal. Dada la alta resistencia que posee el devanado auxiliar, es conveniente desconectarlo una vez que el rotor gira a una velocidad cercana al 75% de su velocidad nominal. Para no tener que hacer esta operación de una forma manual, se intercala en el devanado auxiliar un interruptor centrífugo acoplado al eje de giro del motor, de tal forma que una vez arrancado y superado una cierta velocidad, el interruptor se abre y desconecta el devanado auxiliar.

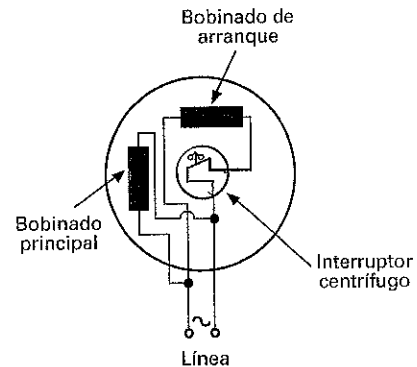


Figura 22.21. Esquema de conexiones de arranque motor asíncrono monofásico de fase partida mediante interruptor centrífugo.

Para invertir el sentido de giro de estos motores basta con invertir las conexiones del devanado auxiliar de arranque.

### 22.5.3 Motor asíncrono monofásico con condensador de arranque

Para aumentar el par de arranque de estos motores se añade un condensador en serie con el bobinado auxiliar, de tal forma

que el ángulo de desfase entre los flujos producidos por ambas bobinas se acerque a 90°. Dado que el desfase entre ambos devanados se consigue fundamentalmente gracias al condensador, es posible aumentar la sección de los conductores del devanado auxiliar, así como su número de espiras.

El par de arranque conseguido por estos motores aumenta con la capacidad del condensador. Sin embargo una capacidad excesivamente elevada puede reducir la impedancia total del devanado auxiliar a valores muy pequeños, lo que trae consigo un aumento de la corriente absorbida por el bobinado auxiliar. Si este devanado no se desconecta una vez arrancado el motor, el calor producido por la fuerte corriente puede llegar a destruirlo. Para que esto no ocurra, una vez que el motor ha alcanzado ciertas revoluciones, se procede a la desconexión del conjunto formado por el condensador y el devanado auxiliar mediante un interruptor centrífugo, tal como se muestra en el esquema de conexiones de la Figura 22.22.

Existen motores donde el condensador y el devanado auxiliar de arranque se mantienen conectados en paralelo y de forma permanente con el devanado principal. De esta forma se evita el uso del interruptor centrífugo, consiguiendo que el motor sea más silencioso. En este tipo de motores la capacidad del condensador debe ser más pequeña, por lo que el par de arranque se ve reducido. En la Tabla 22.2 se muestra, como ejemplo, las características técnicas de una gama de motores monofásicos comerciales con condensador permanente. Aquí podemos comprobar como el par de arranque conseguido es

bastante inferior que el de los motores trifásicos. Observa también como aumenta la capacidad del condensador con la potencia nominal del motor.

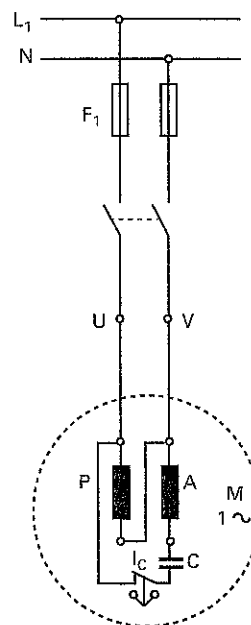


Figura 22.22. Esquema de conexiones de motor asíncrono monofásico con condensador de arranque e interruptor centrífugo.

| Potencia nominal según VDE 0530 |    | Tamaño constructivo | Tipo | Peso neto (kg) | Momento de inercia $J = \frac{GD^2}{4}$ (Kg.m <sup>2</sup> ) | Valores de servicio a potencia nominal |                          |                                    |                        |            | Relación entre:           |                                 | Condensador            |                      |
|---------------------------------|----|---------------------|------|----------------|--|--|--------------------------|------------------------------------|------------------------|------------|---------------------------|---------------------------------|------------------------|----------------------|
| kW                              | CV |                     |      |                |  | Velocidad (r.p.m)                      | Rendimiento ( $\eta\%$ ) | Factor de potencia ( $\cos \phi$ ) | Intensidad a 220 V (A) | Par en N.m | Par de arranque y nominal | Corriente de arranque y nominal | permanente ( $\mu F$ ) | arranque ( $\mu F$ ) |

**3000 r.p.m. (2 polos)**

|      |      |      |                       |             |         |      |      |      |       |      |      |     |    |   |
|------|------|------|-----------------------|-------------|---------|------|------|------|-------|------|------|-----|----|---|
| 0,12 | 0,16 | 63   | <b>1LF3 060-2AJ20</b> | <b>3,8</b>  | 0,00018 | 2685 | 0,47 | 0,97 | 1,20  | 0,43 | 0,90 | 2,3 | 5  | — |
| 0,18 | 0,25 |      | <b>1LF3 063-2AJ20</b> | <b>4,4</b>  | 0,0002  | 2660 | 0,50 | 0,92 | 1,80  | 0,65 | 0,95 | 2,4 | 6  | — |
| 0,26 | 0,33 | 71   | <b>1LF3 070-2AJ20</b> | <b>5,5</b>  | 0,00038 | 2730 | 0,56 | 0,96 | 2,00  | 0,88 | 0,90 | 3,0 | 10 | — |
| 0,37 | 0,50 |      | <b>1LF3 073-2AJ20</b> | <b>7,0</b>  | 0,00045 | 2740 | 0,60 | 0,93 | 3,10  | 1,30 | 0,85 | 3,1 | 12 | — |
| 0,55 | 0,75 | 80   | <b>1LF3 080-2AJ20</b> | <b>8,6</b>  | 0,00085 | 2800 | 0,63 | 0,97 | 4,00  | 1,88 | 0,78 | 3,8 | 20 | — |
| 0,75 | 1,0  |      | <b>1LF3 083-2AJ20</b> | <b>10,4</b> | 0,0011  | 2810 | 0,66 | 0,97 | 5,25  | 2,56 | 0,76 | 4,0 | 25 | — |
| 1,1  | 1,5  | 90 S | <b>1LF3 092-2AJ20</b> | <b>13,1</b> | 0,0018  | 2780 | 0,67 | 0,94 | 8,00  | 3,81 | 0,73 | 4,2 | 40 | — |
| 1,5  | 2,0  | 90 L | <b>1LF3 098-2AJ20</b> | <b>16,8</b> | 0,002   | 2790 | 0,68 | 0,95 | 10,70 | 5,18 | 0,70 | 4,3 | 50 | — |

Tabla 22.2. Características técnicas de una gama de motores monofásicos comerciales con condensador de arranque permanente.

Existe también la posibilidad de dotar a los motores asíncronos monofásicos de un doble condensador, tal como se muestra en el esquema de conexiones de la Figura 22.23. En este caso se conecta un condensador fijo C en paralelo con el devanado principal y otro en serie con el devanado auxiliar de arranque. Aquí sí se incorpora un interruptor centrífugo para la desconexión del devanado auxiliar una vez arrancado el motor.

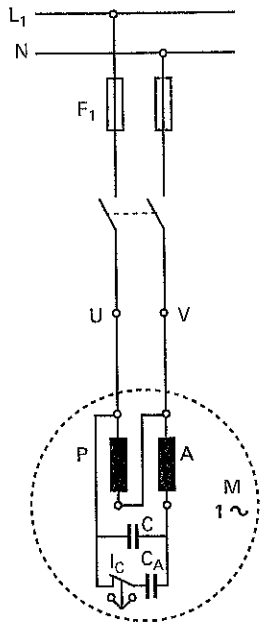


Figura 22.23. Esquema de conexiones de motor asíncrono monofásico de fase partida con doble condensador.

En la Figura 22.24 se muestra el aspecto de un motor con doble condensador.

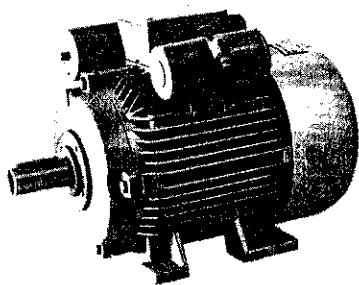


Figura 22.24. Motor asíncrono monofásico de fase partida con doble condensador.

Los motores con condensador poseen un buen factor de potencia y un rendimiento aceptable (es inferior al de los motores trifásicos) y se aplican, por ejemplo, para electrodomésticos, máquinas herramientas, bombas, etc.

En los motores sin condensador el campo de aplicación se ve limitado por su bajo par de arranque, por lo que se emplean, por ejemplo, para ventiladores, bombas centrífugas, etc.

## 22.5.4 Motor monofásico con espira en cortocircuito

Este motor es de muy sencilla construcción y se aplica para motores de pequeñas potencias (hasta 100 o 200 W).

El rotor de estos motores es de jaula de ardilla. El estator es de polos salientes, en el cual se arrolla la bobina principal como si fuese el primario de un transformador. En la parte extrema de cada polo se coloca una espira de cobre en cortocircuito (Figura 22.25). El devanado principal produce un campo magnético alternativo que atraviesa el rotor y las dos espiras en cortocircuito situadas en el estator. En estas espiras se induce una f.e.m. que hace que aparezca una pequeña corriente y un pequeño flujo magnético que queda retrasado respecto al flujo principal, lo que es suficiente para provocar un pequeño par de arranque en el motor.

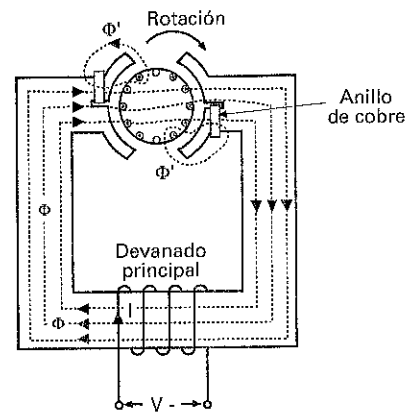


Figura 22.25. Motor monofásico con espira en cortocircuito.

El sentido de giro de estos motores depende de la disposición relativa de las espiras de cortocircuito y de los polos principales.

A pesar de que el par de arranque, el rendimiento y el factor de potencia de estos motores no es muy bueno, la gran sencillez de este motor lo hace ideal para aplicaciones de poca potencia y en los que el par de arranque no sea muy importante.

## 22.5.5 Motor trifásico como monofásico

Existe la posibilidad de hacer funcionar un motor trifásico conectándolo a una red monofásica. Para ello se realiza la conexión de una de sus fases mediante un condensador, tal como se muestra en el esquema de conexiones de la Figura 22.26.

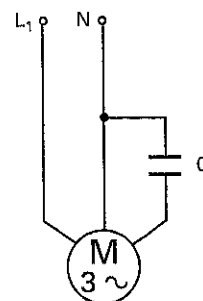


Figura 22.26. Motor trifásico funcionando como monofásico mediante condensador.

Este tipo de conexión sólo conviene realizarla para motores de pequeña potencia. Además la potencia útil que se consigue es inferior a la indicada en sus características nominales. Por otro lado, se reduce el par de arranque.

La capacidad recomendable para el condensador depende de la tensión y potencia del motor: para 125 V y 50 Hz se recomienda 200 µF de capacidad del condensador por cada KW de potencia del motor; para 220 V y 50 Hz, 70 µF por KW, y para 380 V y 50 Hz, 20 µF por KW.

### 22.5.6 Motor universal

El motor universal es un motor monofásico que se puede alimentar igualmente con C.C. o con C.A. En realidad se trata de un motor de C.C. con la excitación conectada en serie con el inducido, tal como se muestra en el esquema de conexiones de la Figura 22.27.

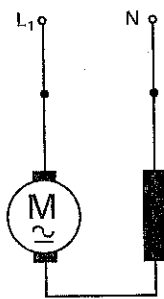


Figura 22.27. Esquema de conexiones de motor universal.

En los motores serie de C.C. el sentido de giro se invierte cuando cambiamos la polaridad de uno de sus dos devanados, el inducido o el inductor. Si invertimos el sentido de la corriente en los dos devanados a la vez, el sentido de giro no cambia. Ésta es la razón de por qué estos motores pueden funcionar también en corriente alterna, ya que en este caso se invierte el sentido de la corriente tantas veces como la frecuencia de la red.

En la práctica los motores diseñados para funcionar en corriente continua no funcionan adecuadamente en alterna, ya que las pérdidas por histéresis y corrientes parásitas provocan fuertes calentamientos en los núcleos de hierro macizos. Además, aparecen fenómenos en los bobinados como la autoinducción, que limitan la circulación de corriente por los mismos. De esta forma, los motores universales se diseñan especialmente para funcionar con C.A., construyendo los núcleos con chapa magnética de hierro al silicio de alta permeabilidad, al igual que se hace con los motores de C.A.

Una de las principales ventajas de estos motores es que pueden funcionar a velocidades muy altas (por encima de las 10.000 r.p.m.). Además se puede regular fácilmente su velocidad, bien modificando la tensión total aplicada al motor, o la aplicada al circuito de excitación. Por contra, estos motores tienen el inconveniente de que al precisar de colector de delgas y escobillas, se producen chispas y desgastes en ambos elementos, que hacen aumentar la tareas de mantenimiento de los mismos.

Al igual que en los motores serie de C.C., la velocidad de estos motores disminuye con la carga aplicada, pudiéndose alcanzar velocidades excesivamente altas cuando trabajan en vacío.

La principal aplicación de estos motores es como elemento motriz de pequeños electrodomésticos y pequeñas máquinas herramientas: batidoras, robots de cocina, molinillos, taladradoras portátiles, etc.

## 22.6 Motor síncrono trifásico

La constitución de un motor síncrono trifásico es exactamente igual a la de un alternador trifásico. Este tipo de motor presenta la ventaja de que gira a una velocidad rigurosamente constante para diferentes regímenes de carga, siempre que se mantenga constante la frecuencia de alimentación.

Sin embargo, y como ya estudiaremos a continuación, estos motores no son capaces de arrancar por sí mismos, siendo necesario utilizar dispositivos auxiliares de arranque.

Cuando aplicamos C.A. al devanado trifásico, situado en el estator, de un motor síncrono, se produce un campo magnético giratorio que gira a la velocidad síncrona. Si hacemos girar a las piezas polares del rotor a una velocidad igual, se produce una especie de acoplamiento entre los polos de distinta polaridad del rotor y los del campo giratorio, produciéndose un arrastre del rotor por parte de dicho campo giratorio (véase Figura 22.28). La velocidad del rotor coincide con la de sincronismo del campo giratorio.

$$n = \frac{60 f}{p}$$

n = velocidad del motor síncrono (r.p.m.)

f = frecuencia de la red (Hz)

p = número de pares de polos del devanado estático

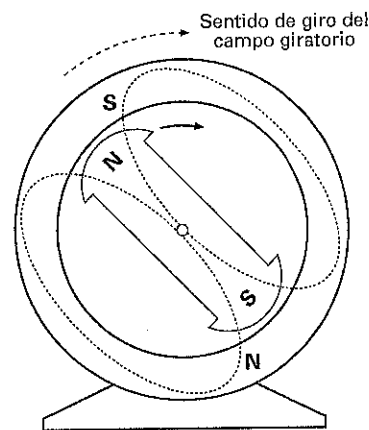


Figura 22.28. Motor síncrono trifásico.

El inconveniente principal de este motor es que necesita ser empujado hasta la velocidad de sincronismo para que pueda funcionar, por lo que se suelen arrancar en vacío. Para ello existen diferentes procedimientos, como son el arranque mediante motor auxiliar de lanzamiento o el arranque como motor asíncrono.

Estos motores necesitan de una fuente de C.C. para la alimentación de la excitación del rotor. Además, no se les puede someter a variaciones bruscas de la carga, ya que esto podría ocasionar la pérdida de la velocidad de sincronismo del rotor, provocando la parada del motor.

Las ventajas fundamentales que presentan estos motores es que desarrollan un factor de potencia muy alto, incluso alimentando adecuadamente a la excitación se puede conseguir que el factor de potencia sea capacitivo. Además, poseen un rendimiento muy bueno.

La utilización de motores trifásicos síncronos de mediana y gran potencia queda limitada a muy pocas aplicaciones. También se pueden construir pequeños motores síncronos monofásicos que consiguen una velocidad constante con una construcción relativamente sencilla. En estos casos el rotor no posee ningún tipo de bobinado y se construye de tal manera que se consigue que se formen polos magnéticos opuestos a los del campo giratorio generado por el estator. Estos pequeños motores son ideales para la construcción de relojes eléctricos, registradores y en todas aquellas aplicaciones en las que es importante mantener una velocidad constante.

## 22.7 Motores especiales

Con la aparición de las nuevas tecnologías se ha hecho necesario el desarrollo de pequeños motores eléctricos capaces de adaptarse en todo momento a las necesidades específicas de cada aplicación. La característica fundamental de estos motores es que poseen un amplio margen de control y regulación de sus características funcionales. Normalmente esta regulación se realiza mediante equipos electrónicos. Entre otros, cabe destacar los siguientes motores: motor paso a paso y *servomotor*.

### 22.7.1 Motor paso a paso

La principal característica de este motor es que podemos hacer que se posicione su eje en una determinada posición de giro; además, es posible tener un control muy preciso de su velocidad de giro.

El estator de estos motores está constituido por varias electroimanes y el rotor por uno o varios imanes permanentes (Figura 22.29). A las diferentes bobinas del estator se alimenta mediante impulsos, proporcionados normalmente por un circuito electrónico, consiguiendo que el rotor se posicione paso a paso según sea el avance de dichos impulsos.

La velocidad de giro del rotor depende de la frecuencia de los impulsos y del número de polos. Se fabrican motores con diferentes ángulos de paso, como por ejemplo, 24 pasos por revolución, 28, 96, 200, etc. De tal forma que si un motor paso a paso posee 24 pasos, su ángulo de paso será  $24 / 360^\circ = 15^\circ$ .

Entre otras, las aplicaciones de estos motores son: impresoras, plotters, teletipos, telefax, cintas magnéticas, equipos médicos, lectores de tarjetas magnéticas, taxímetros, contadores, etc.

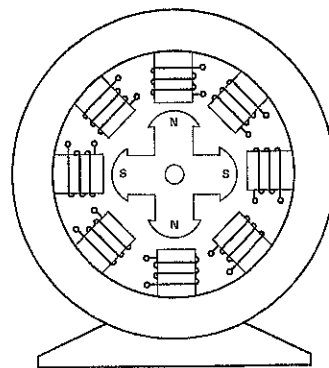


Figura 22.29. Motor paso a paso.

### 22.7.2 Servomotor

Estos motores son muy utilizados en las máquinas herramientas modernas. Su principal ventaja es que con ellos se consiguen movimientos precisos gracias a la regulación y control electrónica que se ejerce sobre ellos.

Se trata de motor de corriente continua de pequeña potencia en el que la excitación se realiza mediante imanes permanentes especiales de tipo cerámico que producen una elevada intensidad de campo magnético. El rotor es similar al de un motor de C.C. y es alimentado, a través de un colector, con C.C. regulada mediante circuitos electrónicos.

## 22.8 Ensayos de los motores de C.A.

De la misma forma que se hacía para los motores de C.C., a los motores de C.A. también se les somete a una serie de ensayos con el fin de determinar sus características y de analizar su comportamiento en diferentes situaciones de funcionamiento. De esta forma, se pueden realizar ensayos para determinar el rendimiento, para evaluar el calentamiento de la máquina para diferentes regímenes de funcionamiento, medición de la resistencia de aislamiento, medición de la rigidez dieléctrica, etc. Además, a través de los ensayos se pueden determinar las características electromecánicas de los motores, las cuáles relacionan la velocidad de rotación (N), el par motor (C), y la corriente absorbida por el motor (I).

Al igual que hacíamos con los motores de C.C., aquí también necesitaremos dispositivos que sean capaces de medir el par motor y que además sean capaces de someter el motor a diferentes regímenes de carga. Para ello es posible utilizar frenos de polvo magnético o dinamo-freno, que acoplados al eje del motor pueden someterlo a diferentes pares de frenado, pudiéndose conocer en todo momento el par resistente aplicado.

# Actividades

1. Observa detenidamente las partes de que consta los diferentes tipos de motores de C.A. que existen en el laboratorio de Electrotecnia y apunta las diferencias que existe entre cada uno de ellos, poniendo especial atención en las diferencias básicas entre un motor de C.C. y otro de C.A. Una vez hecho esto, realiza una clasificación de las máquinas eléctricas.
2. Consigue catálogos comerciales de todo tipo de motores y estudia sus características más relevantes.
3. Consigue los elementos necesarios para realizar el arranque directo de un motor asíncrono trifásico mediante contactores y lleva a cabo el montaje en el entrenador didáctico de los circuitos de fuerza y de mando expuestos en este Capítulo. Una vez comprobado el correcto funcionamiento del circuito, intercala un amperímetro en una de las fases del motor, así como un vatímetro y un voltímetro. Comprueba cómo el motor absorbe más corriente en el arranque. Con las lecturas de los aparatos de medida determina el factor de potencia del motor y calcula los condensadores necesarios para mejorar el factor de potencia a 0,95. Ahora conecta los condensadores y comprueba cómo se reduce la corriente con el factor de potencia mejorado.
4. Consigue los elementos necesarios para realizar la inversión de giro de un motor asíncrono trifásico y lleva a cabo el montaje en el entrenador didáctico de los circuitos de fuerza y de mando expuestos en este Capítulo. Una vez comprobado el correcto funcionamiento del circuito, intercala un amperímetro en una de las fases del motor y contrasta los valores de intensidad obtenidos en los siguientes casos: a) motor en marcha normal; b) motor invirtiendo su giro; c) motor arrancando.
5. Consigue los elementos necesarios para realizar el arranque estrella-triángulo de un motor asíncrono trifásico mediante contactores y lleva a cabo el montaje en el entrenador didáctico de los circuitos de fuerza y de mando expuestos en este Capítulo. Una vez comprobado el correcto funcionamiento del circuito, intercala un amperímetro en una de las fases del motor y contrasta los valores de intensidad obtenidos en los siguientes casos: a) motor en conexión en estrella; b) motor en conexión en triángulo.
6. Vamos a estudiar el comportamiento del motor asíncrono trifásico en vacío y carga. Para ello conectaremos un motor trifásico a la red, tomando medidas de tensión, corriente, potencia y número de revoluciones del rotor mediante una tacodinamo. Una vez tomadas las medidas correspondientes se acoplará al eje del motor un freno de polvo magnético con posibilidad de medida del par motor. Ahora se le someterá al motor a diferentes pares de frenado para estudiar su comportamiento en carga. Toma las lecturas de todos los aparatos de medida para cada uno de los pares de frenado aplicados y con ellas: calcula el deslizamiento, el factor de potencia y traza una curva donde se represente el deslizamiento en función del par motor y otra donde se represente el par motor en función de la corriente.
7. Consigue un equipo para la regulación de velocidad de motores trifásicos de C.A. mediante variación de la frecuencia de alimentación. Estudia el comportamiento de un motor asíncrono trifásico cuando se le somete a diferentes frecuencias. Mide la frecuencia y velocidad del motor en diferentes puntos de funcionamiento y establece una relación entre dichas magnitudes.
8. Consigue un motor monofásico de inducción y conecta únicamente el bobinado principal a la red. Empuja el eje con la mano y consigue que el motor arranque en uno u otro sentido. Ahora conecta el bobinado auxiliar en paralelo con el principal. ¿Has conseguido que el motor arranque por sí solo? Si no es así, conecta un condensador en serie con el bobinado auxiliar y comprueba cómo arranca el motor. Invierte la conexión de una de las bobinas y comprueba cómo se invierte el sentido de giro del motor.
9. Consulta en Internet (<http://www.t2000idiomas.com/electrotecnia>) sobre los temas relacionados con este capítulo e intenta contrastar y ampliar la información obtenida.

Al finalizar cada una de estas actividades deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para una adecuada documentación de las mismas (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados cálculos, medidas, etc.).

## Autoevaluación

- 22
- 1) La velocidad de un motor asíncrono trifásico:
    - a)  Permanece constante con la frecuencia
    - b)  Es siempre algo inferior a la velocidad del campo giratorio
    - c)  Depende exclusivamente de la frecuencia y del número de polos del devanado estatórico
  - 2) ¿Cómo habrá que conectar un motor de 127/220 a una red de 220 V?
    - a)  En estrella
    - b)  En triángulo
  - 3) ¿Cómo se consigue invertir el sentido de giro de un motor asíncrono trifásico de rotor en cortocircuito?
    - a)  Invertiendo la polaridad del devanado rotórico
    - b)  Invertiendo tres de las fases del devanado estatórico
    - c)  Invertiendo dos de las fases del devanado estatórico
  - 4) ¿De qué tensiones tendrá que ser un motor para poder ser arrancado en Y-Δ en una red de 125 V?
    - a)  125 V
    - b)  220/380
    - c)  125/220 V
  - 5) ¿Qué número de pares de polos debe poseer el devanado estatórico de un motor asíncrono trifásico de inducción para conseguir una velocidad síncrona de 750 r.p.m. a 50 Hz?
  - 6) Averiguar la velocidad síncrona de este motor para una frecuencia de 60 Hz.
  - 7) ¿Cuál será el deslizamiento de un motor asíncrono trifásico de rotor en cortocircuito de dos pares de polos a 50 Hz y a plena carga, si se mide con un tacómetro una velocidad de 1.425 r.p.m.?
  - 8) Un motor asíncrono trifásico posee las siguientes características: potencia activa = 6 KW; 220 V; 60 HZ;  $\cos \varphi = 0,89$ ;  $\eta = 91\%$ ; pares de polos del devanado estatórico = 3; deslizamiento a plena carga = 2%. Calcular el par de rotación del rotor.
  - 9) Se dispone de un motor asíncrono trifásico de rotor en cortocircuito tipo WT355M<sub>1</sub>-2. Con la ayuda de las hojas de características, expuestas en la Tabla 6.1, averiguar: a) el deslizamiento; b) la intensidad cuando el motor trabaje a 4/4, 3/4 y 2/4 de su potencia nominal; c) la intensidad en el arranque; d) par nominal, par de arranque y par máximo.
  - 10) Indica cuál de estos motores consigue mantener la velocidad constante para diferentes regímenes de carga.
    - a)  Motor síncrono
    - b)  Motor universal
    - c)  Motor asíncrono
  - 11) Indica cuál de estos motores consigue una más fácil posibilidad de regulación de velocidad
    - a)  Motor universal
    - b)  Motor asíncrono monofásico de fase partida
    - c)  Motor asíncrono trifásico como monofásico
  - 12) Indica cuál de estos motores posee colector de delgas y escobillas
    - a)  Motor paso a paso
    - b)  Motor universal
    - c)  Servomotor
  - 13) Indica cuál de estos motores posee el mejor par de arranque
    - a)  Motor síncrono trifásico
    - b)  Motor de fase partida con condensador
    - c)  Motor monofásico con espira de cortocircuito