

# 20 Máquinas eléctricas de corriente alterna

## Contenidos

- 20.1. El alternador trifásico
- 20.2. El motor asíncrono trifásico
- 20.3. Motor asíncrono de rotor bobinado o de anillos rozantes
- 20.4. Arrancadores estáticos (electrónicos)
- 20.5. Inversión de giro de un motor asíncrono trifásico
- 20.6. Regulación de velocidad de los motores asíncronos trifásicos
- 20.7. Motores monofásicos
- 20.8. Motor síncrono trifásico
- 20.9. Motores especiales
- 20.10. El alternador asíncrono de inducción
- 20.11. Ensayos de los motores de C.A.

## Objetivos

- Describir el funcionamiento del alternador trifásico.
- Analizar la constitución del alternador trifásico.
- Describir el funcionamiento del 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.

La producción de energía eléctrica en grandes cantidades se realiza en las centrales eléctricas mediante el alternador trifásico. Los alternadores son máquinas eléctricas que presentan mayores ventajas que las dinamos, como por ejemplo, la ausencia de colectores de delgas y escobillas para la extracción de la energía del generador.

Por otro lado, 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 trifásicos.

## 20.1. El alternador trifásico

Al igual que las dinamos, los alternadores basan su funcionamiento en el principio general de la inducción electromagnética. Cuando estudiábamos la dinamo pudimos comprobar que cuando se ponen a girar conductores en el seno de un campo magnético lo que se produce es una f. e. m. inducida de carácter senoidal que se podía conectar a un circuito exterior mediante dos anillos colectores y un par de escobillas. En la práctica es mucho más interesante hacer girar las piezas polares que producen el campo magnético **inductor** y dejar fijos los conductores del **inducido**.

En la Figura 20.1 se muestra el aspecto de un alternador trifásico elemental de inductor móvil e inducido fijo. El inducido, situado en el estator, lo forman tres devanados independientes y separados entre sí  $120^\circ$ . El inductor, situado en el rotor, está formado por un electroimán que es alimentado por una corriente continua de excitación.

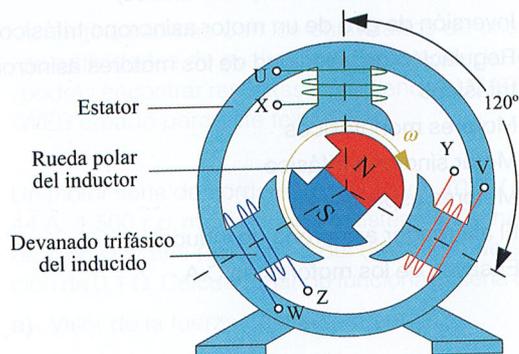


Figura 20.1. Alternador trifásico.

Al disponer los devanados del inducido en el estator se evita la utilización de los correspondientes tres anillos colectores y escobillas para la extracción de la C.A. trifásica generada. Además, hay que pensar que las tensiones y corrientes con las que trabaja un alternador industrial son bastante elevadas (del orden de 10 a 20 kV y cientos de amperios), lo que complicaría aún más la utilización de colectores.

### 20.1.1. Constitución de un alternador de inducido fijo

Al igual que la dinamo, el alternador consta de un circuito inductor y un circuito inducido (Figura 20.2).

El **circuito inductor** está constituido por un cierto número de electroimanes, cuyo bobinado se realiza de tal forma que los polos presenten alternativamente una polaridad norte y sur, y cuyo número total es siempre par. La alimentación de los devanados del inductor se realiza con corriente continua a través de dos anillos colectores y un par de escobillas.



Figura 20.2. Aspecto de un pequeño alternador.

En la Figura 20.3 se muestra el aspecto de un alternador, donde se ha situado en el rotor un sistema inductor consistente en cuatro piezas polares (2 pares de polos) a las que se alimenta con C.C. desde una fuente de energía exterior y a través de un par de anillos colectores.

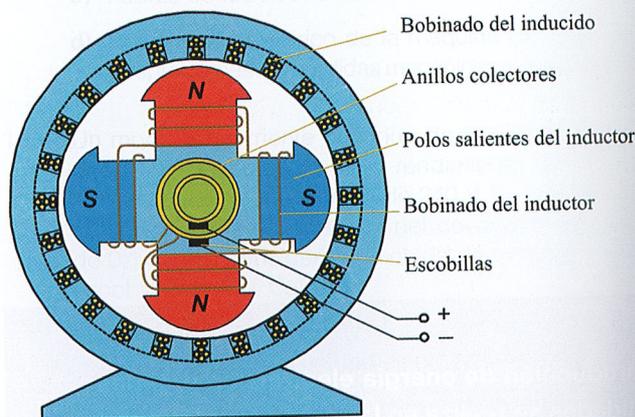


Figura 20.3. Constitución de un alternador de inducido fijo de un par de polos.

Dado que el alternador no genera C.C. es imposible llevar a cabo un sistema de autoexcitación como ocurría con las dinamos. Existen diferentes métodos para alimentar de C.C. el devanado inductor para la generación del campo magnético; indicaremos aquí los dos más importantes.

- a) Mediante una dinamo **excitatriz** acoplada al eje del alternador, tal como se muestra en el esquema de conexiones de la Figura 20.4. En este esquema los terminales K-J se corresponden con el devanado inductor del alternador; la dinamo excitatriz posee una autoexcitación *shunt* y la tensión continua que proporciona la dinamo se conecta al devanado inductor a través de un reostato de regulación.

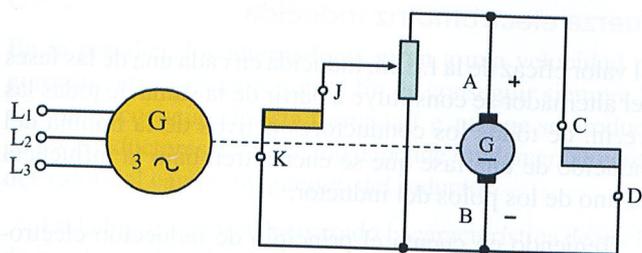


Figura 20.4. Excitación de un alternador mediante excitatriz.

- b) Mediante alternador auxiliar acoplado al eje del alternador (Figura 20.5). En este caso se monta un pequeño alternador de inducido móvil en el mismo eje que el alternador principal. El devanado inductor (K-J) del alternador auxiliar se alimenta a través de un rectificador monofásico conectado a los bornes de salida del alternador principal. Hay que pensar que las piezas polares del alternador principal poseen un cierto magnetismo remanente, por lo que al ponerse en movimiento producen una pequeña f. e. m., pero suficiente para comenzar con el ciclo de cebado. El alternador auxiliar produce C.A. trifásica que, al ser convertida a C.C. mediante un puente rectificador trifásico, sirve de alimentación al devanado inductor del alternador principal.

La ventaja que presenta este tipo de excitación es que si acoplamos el puente rectificador trifásico al eje del alternador no se hace necesario el uso de colectores y escobillas para la alimentación del circuito inductor.

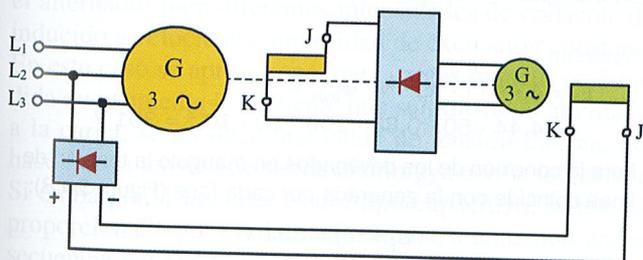


Figura 20.5. Alternador excitado mediante pequeño alternador de inducido móvil.

El **circuito inducido** está constituido por tres bobinas situadas  $120^\circ$  una de otra y alojadas en ranuras practicadas en un núcleo cilíndrico y hueco de chapas magnéticas (Figura 20.3). La conexión del devanado trifásico suele ser en estrella, conectando el neutro a tierra.

El devanado de cada fase del inducido del alternador se compone de varias bobinas, conectadas de tal forma que la fuerzas electromotrices generadas en cada uno de los conductores que las componen se sumen.

En la Figura 20.6 se muestra el aspecto del bobinado del inducido de un alternador con 24 ranuras en el estator.

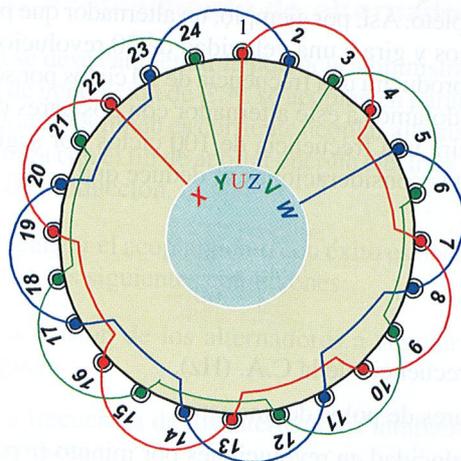


Figura 20.6. Bobinado del inducido de un alternador de 24 ranuras.

En la Figura 20.7 se ha dibujado el mismo bobinado en representación esquemática.

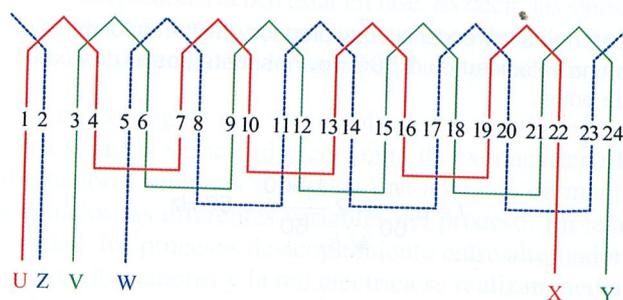


Figura 20.7. Esquema del bobinado del inducido de un alternador de 24 ranuras.

### 20.1.2. Magnitudes características de un alternador

Dentro de las magnitudes características de un alternador, destacaremos la frecuencia y la fuerza electromotriz inducida.

#### Frecuencia del alternador

Para que un alternador produzca una C.A. de frecuencia fija, como corresponde al funcionamiento normal de un alternador, debe girar a una velocidad constante, conocida con el nombre de **velocidad sincrona**.

La frecuencia o número de ciclos por segundo que produce un alternador es directamente proporcional a la velocidad del alternador y al número de pares de polos del circuito inductor. Hay que pensar que cuando los conductores del inducido son cortados por un polo norte, del rotor en movimiento, se induce un semiciclo de tensión positiva, y que al ser cortados por un polo sur consecutivo se induce un semiciclo de tensión negativa. Esto indica que cada vez que un conductor pasa frente a un par de polos se produce un

ciclo completo. Así, por ejemplo, un alternador que posee un par de polos y gira a una velocidad de 50 revoluciones por segundo, producirá una frecuencia de 50 ciclos por segundo. Ahora, si dotamos a este alternador con dos pares de polos se producirá una frecuencia de 100 ciclos por segundo. A raíz de estas consideraciones se deduce que:

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

$f$  = Frecuencia de la C.A. (Hz).

$p$  = Pares de polos del inductor.

$n$  = Velocidad en revoluciones por minuto (r. p. m.).

### Actividad resuelta 20.1

Determina la frecuencia que produce un alternador que gira a una velocidad de 1.500 r.p.m. si este posee dos pares de polos.

**Solución:**

$$f = p \frac{n}{60} = 2 \frac{1.500}{60} = 50 \text{ Hz}$$

### Actividad resuelta 20.2

¿A qué velocidad deberá girar un alternador con cuatro pares de polos para producir una frecuencia de 50 Hz?

**Solución:**

De la expresión general tenemos que la velocidad síncrona de un alternador es:

$$n = \frac{60 f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{4} = 750 \text{ r.p.m.}$$

### Actividad resuelta 20.3

Para el accionamiento de un alternador se dispone de una turbina hidráulica de baja velocidad. Determina el número de pares de polos de que deberá disponer el alternador para conseguir una frecuencia de 50 Hz si la turbina gira a 375 r.p.m.

**Solución:**

$$p = \frac{60 f}{n} = 8$$

### Fuerza electromotriz inducida

El valor eficaz de la f. e. m. inducida en cada una de las fases del alternador se constituye a partir de la suma de todas las f. e. m. de todos los conductores activos de la bobina del inducido de una fase que se encuentren bajo la influencia de uno de los polos del inductor.

Teniendo en cuenta el principio de inducción electromagnética, para un alternador con  $N$  espiras por bobina y fase, al girar cortando un campo magnético de flujo máximo igual  $\Phi_{\text{máx}}$ , a una frecuencia  $f$ , el valor eficaz de la f. e. m. se puede expresar así:

$$E_f = 4,44 \cdot f \cdot K_w \cdot N \cdot \Phi_{\text{máx}}$$

$K_w$  es el coeficiente de forma del devanado. Este coeficiente es menor que la unidad y depende de la configuración del devanado de las fases del inducido. Hay que tener en cuenta que, en los alternadores trifásicos, el campo magnético que corta a los conductores del inducido nunca llega a ser senoidal puro, por lo que es necesario aplicar un factor de corrección para tener en cuenta este fenómeno.

### Actividad resuelta 20.4

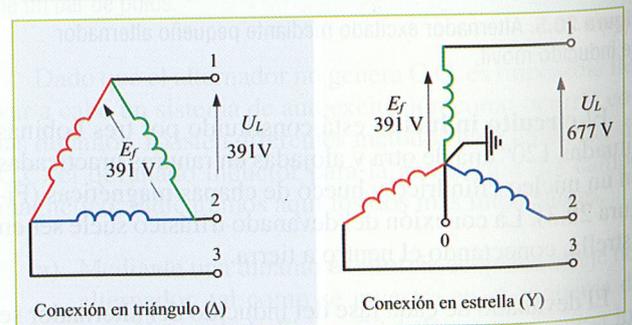
Un alternador tetrapolar a 50 Hz posee un bobinado inducido con un coeficiente de devanado de 0,88 y 200 espiras por fase. Si el flujo máximo producido por los polos del inductor es de 10 mWb, calcula la f. e. m. eficaz por fase. ¿Cuál sería la tensión de línea en vacío si sus devanados se conectan en triángulo? ¿Y si se conectan en estrella?

**Solución:**

$$E_f = 4,44 \cdot f \cdot K_w \cdot N \cdot \Phi_{\text{máx}} = 4,44 \cdot 50 \cdot 0,88 \cdot 200 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 391 \text{ V}$$

Para la conexión de los devanados en triángulo la tensión de línea coincide con la generada por cada fase (Figura 20.8):

$$U_L = E_f = 391 \text{ V}$$



**Figura 20.8.**

Al conectar los devanados en estrella la tensión que se obtiene en la línea aumenta en:

$$U_L = \sqrt{3} \cdot E_f = \sqrt{3} \cdot 391 = 677 \text{ V}$$



### Característica de vacío

En la práctica, los alternadores giran a una velocidad rigurosamente constante, con el fin de conseguir siempre la misma frecuencia. De esta forma la f. e. m. que se produce en los conductores del inducido depende fundamentalmente del valor del campo magnético del inductor.

En la Figura 20.9 se ha trazado la característica de vacío de un alternador, donde se relaciona la f. e. m. obtenida en vacío en función de la intensidad de corriente de excitación que alimenta a los devanados de los polos inductores. Esta curva se puede obtener mediante un procedimiento similar al de una dinamo y su forma es muy semejante a la de la curva de magnetización.

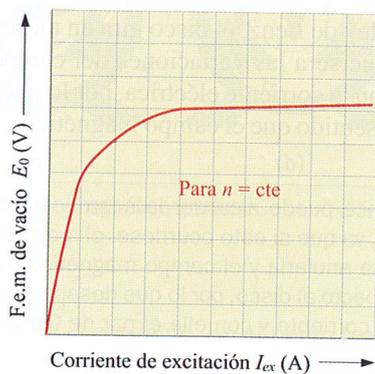


Figura 20.9. Característica de vacío.

### Característica externa

Nos suministra información de la tensión que proporciona el alternador para diferentes intensidades de corriente del inducido a velocidad e intensidad de excitación constante. En este caso se aprecia que, para cargas inductivas, a medida que aumenta la corriente que suministra el alternador a la carga, se produce una caída de tensión interna, que hace que la tensión de salida disminuya con la intensidad. Si embargo, si la carga es del tipo capacitivo, la tensión proporcionada por el alternador tiende a aumentar a consecuencia del efecto magnetizante del flujo magnético de reacción (Figura 20.10).

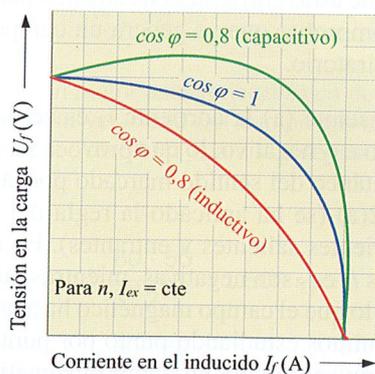


Figura 20.10. Característica externa de un alternador.

### 20.1.3. Acoplamiento de alternadores

Cuando se desea aumentar la potencia suministrada por un sistema de generación de C.A. se acoplan en paralelo varios alternadores. También es corriente acoplar alternadores a la red eléctrica con el fin de aportar energía eléctrica al sistema general de producción.

Para realizar el acoplamiento con éxito es necesario que se cumplan las siguientes condiciones:

- La tensión de los alternadores a acoplar debe ser igual.
- La frecuencia de los alternadores también debe ser la misma.
- El orden de sucesión de fases de los alternadores debe ser igual.
- En el momento de la conexión las tensiones de los alternadores deben estar en fase. Es decir, las sinusoides que representan a las tensiones de cada uno de los alternadores deben superponerse exactamente.

Para conseguir que se cumplan estas condiciones se actúa sobre la velocidad y corriente de excitación de los alternadores mientras se siguen con aparatos de medida adecuados las diferentes variables del proceso. En la actualidad, los procesos de acoplamiento entre alternadores o entre alternadores y la red eléctrica se realizan mediante dispositivos automáticos e informatizados de sincronización.

Los alternadores deben funcionar a una velocidad rigurosamente constante para conseguir mantener la frecuencia a un valor fijo. Cuando se le exige una mayor potencia eléctrica al alternador, este reacciona proporcionando una mayor resistencia al movimiento, por lo que la tendencia es perder velocidad. Si la velocidad llegara a descender se perdería el sincronismo con la red a la que está acoplado y habría que desconectar automáticamente el generador de la red. Para evitar esto, se dota al conjunto de alternador y grupo motor, que le impulsa, de un sistema de regulación automático de velocidad.

Así, por ejemplo, imaginemos un alternador que es movido por una turbina de vapor. En el caso de que se le exija, por parte de la carga, una mayor potencia eléctrica al alternador, se le proporciona a la turbina un mayor caudal de vapor con el fin de mantener la velocidad estable.

Dado que el alternador también debe proporcionar una cierta cantidad de potencia reactiva a los receptores que lo requieran, se lo dota de un sistema que controla automáticamente la corriente de excitación del inductor, produciéndose una mayor potencia reactiva al aumentar dicha corriente de excitación.

## 20.2. 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.

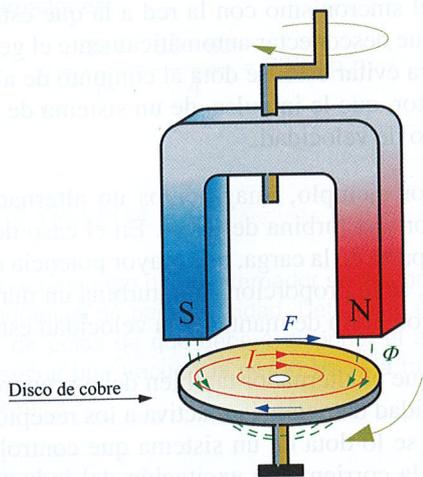
Dependiendo del tipo de rotor que utilicen, existen dos tipos fundamentales: *motores de rotor en cortocircuito o jaula de ardilla* y *motores de rotor bobinado*.

### 20.2.1. 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 modo que pueda girar por su eje central mediante una manivela (Figura 20.11). 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 20.11.** 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 él. 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 este 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.

### 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  $120^\circ$ . 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 20.12). 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.

Para el instante (a) la corriente  $i_1$  es cero,  $i_3$  posee un valor positivo e  $i_2$  negativo, lo que provoca un campo magnético instantáneo del sentido marcado por la flecha de la Figura 20.12(a) (se ha aplicado la regla del 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 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

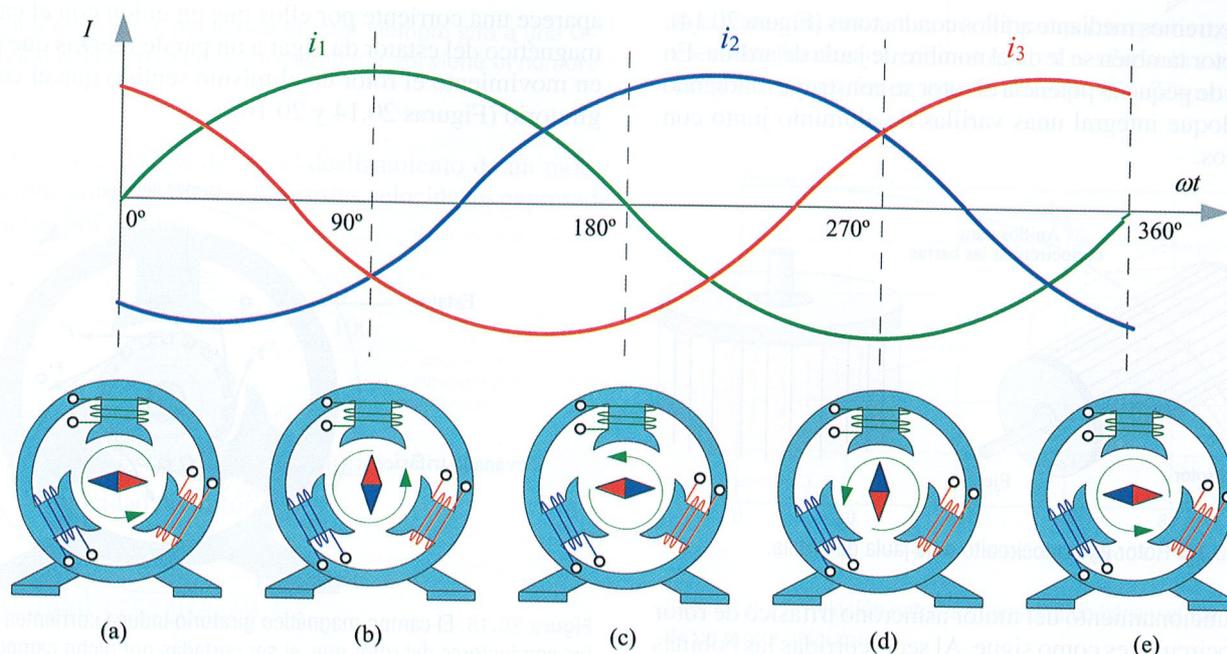


Figura 20.12. Campo magnético giratorio.

de la pulsación de la corriente. En el punto (e) se completa un ciclo y se inicia uno nuevo.

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:

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

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

$f$  = Frecuencia de la red (Hz).

$p$  = Número de pares de polos del devanado estático.

### Actividad resuelta 20.5

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

**Solución:**

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

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

### 20.2.2. Motor asíncrono trifásico de rotor en cortocircuito

En el **estator** de estos motores se colocan las bobinas encargadas de producir el campo magnético giratorio. Estas se alojan en ranuras practicadas en un núcleo formado, por lo general, por paquetes de chapa magnética, tal como se muestra en la Figura 20.13. 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, pudiendo conectarse posteriormente en estrella o en triángulo.

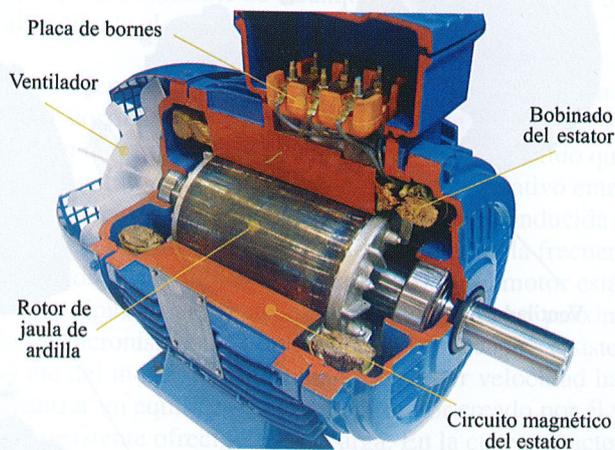


Figura 20.13. Constitución de un motor asíncrono trifásico de rotor en cortocircuito.

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 (Figura 20.14). 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.

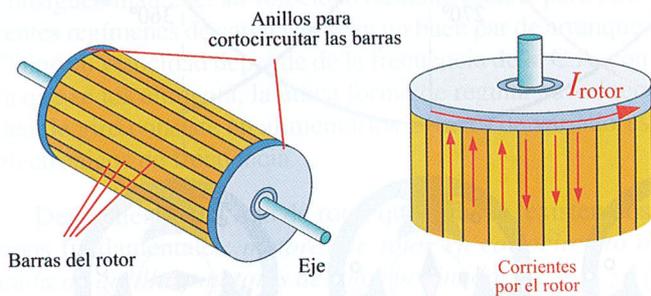


Figura 20.14. Rotor en cortocircuito o de jaula de ardilla.

El funcionamiento del motor asíncrono trifásico de rotor en cortocircuito es como sigue. Al ser recorridas las bobinas del estator por un sistema de corrientes trifásicas, se origina en él un campo magnético giratorio. Los conductores del rotor, que en un principio está 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 ellos 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 (Figuras 20.14 y 20.16).

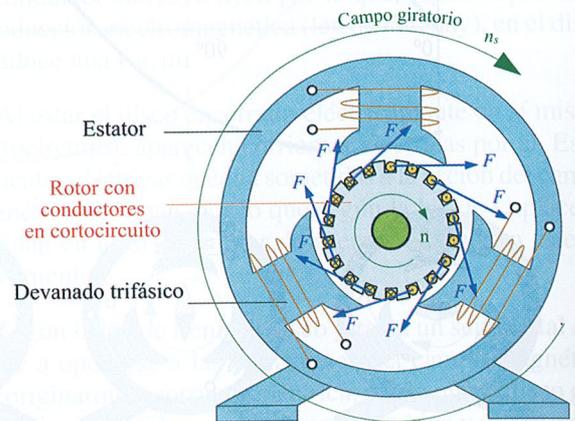


Figura 20.16. El campo magnético giratorio induce corrientes en los conductores del rotor que, al ser cortados por dicho campo, desarrollan fuerzas mecánicas que hacen que gire el rotor.

La velocidad del rotor nunca puede alcanzar a la del campo giratorio, ya que de ser estas iguales no se induciría tensión

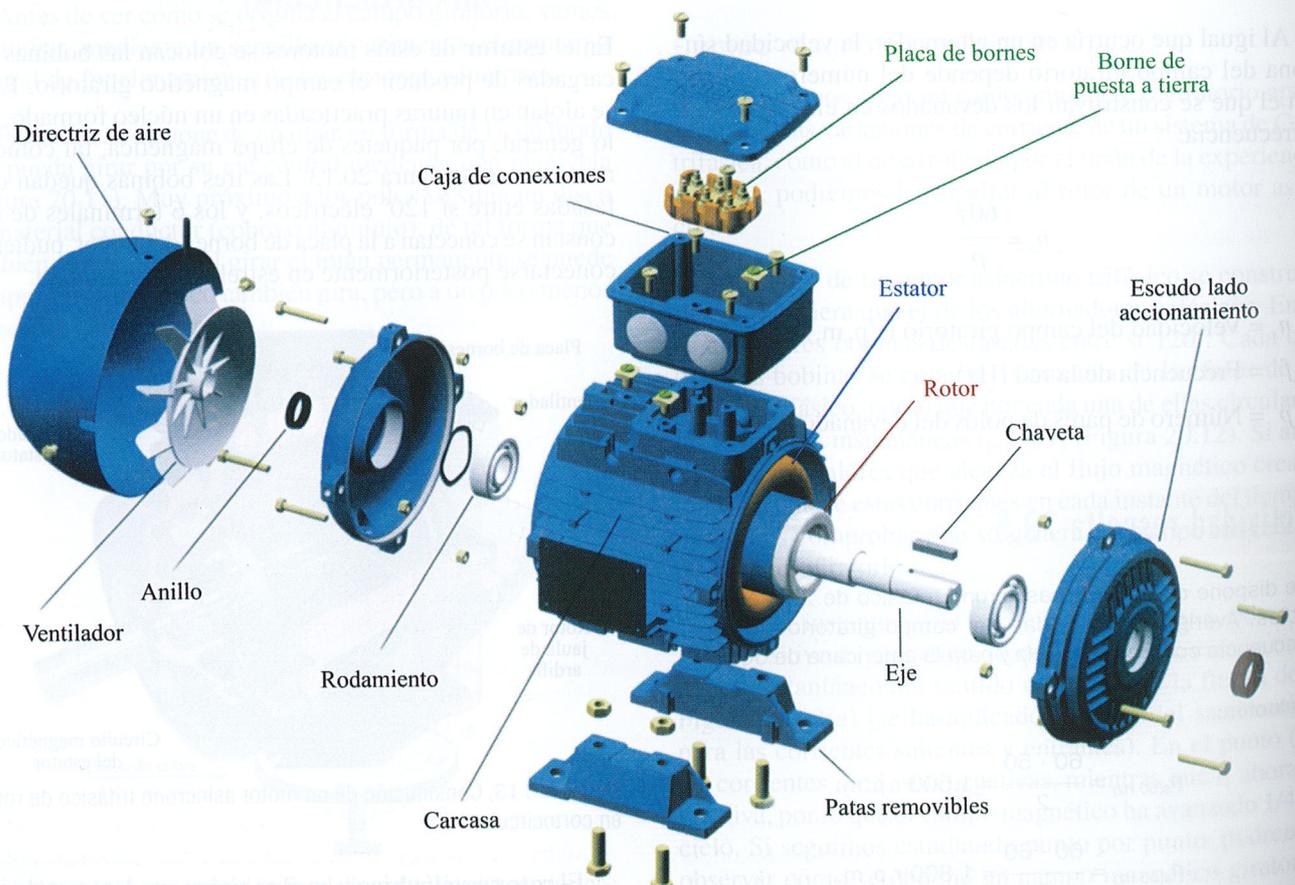


Figura 20.15. Vista de conjunto de un motor asíncrono trifásico. (Cortesía de WEG.)



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.

### Actividad resuelta 20.6

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:**

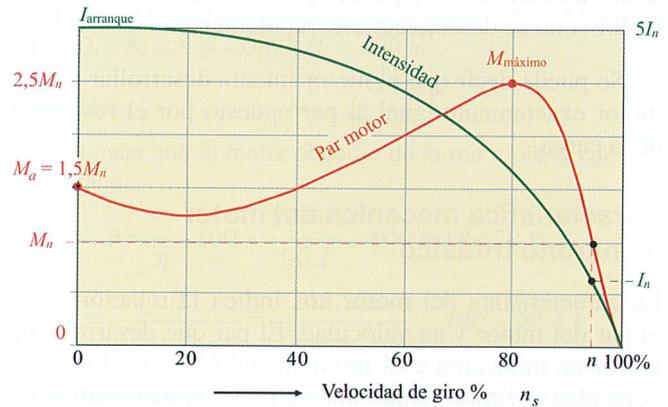
$$S = \frac{3.000 - 2.850}{3.000} \cdot 100 = 5\%$$

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 conductores. 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 este 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 e induce en ellos, 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 en el rotor (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  $M_a$  (Figura 20.17).



**Figura 20.17.** Relación entre la intensidad de línea y el par de un motor asíncrono.

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 este solo depende de la tensión aplicada al estator, aparece un incremento de corriente en él que intenta compensar la fuerza magnetomotriz 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 veremos más adelante, a veces conviene suavizar. En la Figura 20.17 se observan las curvas características de un motor asíncrono, donde se puede comprobar cómo, en este ejemplo, la corriente de arranque es muy fuerte ( $I_a = 5 I_n$ ), al igual que el par de arranque ( $M_a = 1,5 M_n$ ).

**Aceleración y carga:** tan pronto como empieza a circular corriente por el rotor parado, este 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 está 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 él y el par resistente ofrecido por la carga. En la curva característica de la Figura 20.17 se observa cómo la corriente que absorbe el motor disminuye según aumenta la velocidad de giro del motor, hasta que se alcanza la velocidad nominal  $n$ . En este punto de funcionamiento el motor desarrolla el par nominal  $M_n$  y por él fluye la corriente nominal  $I_n$ .

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

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

### Característica mecánica del 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 está 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 20.18 se ha representado la relación par ( $M$ )-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  $M_n$  y en el de coordenadas 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 lo somete al motor. Este par resistente podría corresponder, por ejemplo, al transmitido por un eje al que se le ha acoplado un montacargas.

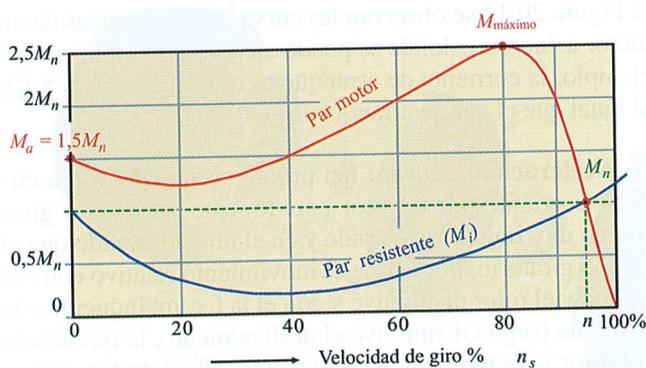


Figura 20.18. Característica mecánica de un motor asíncrono trifásico.

En la curva mostrada como ejemplo en la Figura 20.18 se puede observar que en el momento del arranque del motor ( $n = 0$ ) se obtiene un par de arranque ( $M_a = 1,5 M_n$ ) que es 1,5 veces el par a plena carga.

Si hacemos que este motor arrastre una carga que origine un par resistente  $M_r$ , el motor adaptará su velocidad hasta

conseguir desarrollar un par motor  $M_n$  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:  $M_{m\acute{a}x} = 2,5 M_n$ ) el motor se pararía. En nuestro ejemplo esto ocurriría cuando la velocidad se redujese al 80 % de la velocidad de sincronismo.

### Actividad resuelta 20.7

Un motor asíncrono trifásico posee las siguientes características: potencia eléctrica absorbida de la red = 8 kW; 400 V; 50 Hz;  $\cos \varphi = 0,85$ ;  $\eta = 93 \%$ ; pares de polos del devanado estático = 2; deslizamiento a plena carga = 4 %.

Calcula el par de rotación del rotor. ¿Cuál sería el par de arranque y el par máximo de este motor si su característica mecánica es la que se muestra en la Figura 20.17?

#### Solución:

Primero calculamos la potencia útil del motor:

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

La velocidad síncrona del campo giratorio es:

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

La velocidad del rotor la calculamos mediante el deslizamiento:

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

La velocidad angular del rotor es, entonces:

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

Ahora ya podemos calcular el par útil del motor:

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

Según la característica mecánica de este motor:

$$M_a = 1,5 M_n = 1,5 \cdot 49 = 73,5 \text{ Nm}$$

$$M_{m\acute{a}x} = 2,5 M_n = 1,5 \cdot 49 = 122,5 \text{ Nm}$$



### Características técnicas del 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 20.1 se muestran, a modo de ejemplo, las características técnicas de una gama de motores asíncronos trifásicos comerciales con rotor en cortocircuito de un par de polos y 50 Hz.

**Tabla 20.1.** Características de una gama de motores asíncronos trifásicos comerciales

kW	r. p. m.	$\eta$	FP	$I_n$	$\frac{I_a}{I_n}$	$\frac{M_a}{M_n}$	$\frac{M_{m\acute{a}x}}{M_n}$
1,1	2.880	83,8	0,77	2,5	4,8	3,6	3,6
1,5	2.880	84,1	0,80	3,2	8,1	3,6	4,0
2,2	2.860	85,6	0,85	4,4	8,5	3,5	3,7
3	2.920	86,7	0,84	5,9	12,3	4,2	6,3
4	2.940	89,9	0,86	7,5	12,5	4,3	4,5
5,5	2.920	88,6	0,88	10,1	8,9	3,0	3,2
7,5	2.900	89,5	0,90	13,5	7,9	3	3,5
11	2.930	90,7	0,86	20,4	7,3	2,4	3,1
15	2.930	91,6	0,86	27,5	7,6	2,5	3,1
18,5	2.930	92,0	0,86	33,5	7,9	2,8	3,4

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.

$M_a/M_n$  = Indica la relación entre el par de arranque y el nominal para un arranque directo.

$M_{m\acute{a}x}/M_n$  = Indica la relación entre el par máximo que puede desarrollar el motor y el nominal.

$I_a/I_n$  = Indica la relación entre la intensidad de arranque y la nominal para un arranque directo.

### Actividad resuelta 20.8

Vamos a comprobar si el motor de 11 kW del catálogo comercial de la Tabla 20.1 absorbe realmente la intensidad que se indica para la potencia nominal:  $P_u = 11$  kW;  $\eta = 90,7$  %;  $\cos \varphi = 0,86$ ;  $U_L = 400$  V.

#### Solución:

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

$$P = \frac{P_u}{\eta} \cdot 100 = \frac{11.000}{90,7} \cdot 100 = 12.128 \text{ W}$$

$$I_n = \frac{P}{\sqrt{3} U_L \cos \varphi} = \frac{12.128}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,86} \cdot 100 = 20,4 \text{ A}$$

Valor que coincide con la intensidad indicada en la hoja de características técnicas de la Tabla 20.1.

### Actividad resuelta 20.9

Se dispone de un motor asíncrono trifásico de rotor en cortocircuito de 5,5 kW. Averigua el deslizamiento a plena carga, la intensidad en el arranque, par nominal, par de arranque y par máximo.

#### Solución:

Según las características indicadas en las hojas técnicas (Tabla 20.1), este motor es de un par de polos, por lo que su velocidad de sincronismo para 50 Hz será de 3.000 r.p.m. Como su velocidad nominal es de 2.920, el deslizamiento que le corresponde es:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 = \frac{3.000 - 2.920}{3.000} \cdot 100 = 2,67 \%$$

Según las características técnicas, la intensidad en el arranque es 8,9 veces superior a la nominal; como la intensidad nominal a plena carga es 10,1 A, tendremos que:

$$I_a = 8,9 I_n = 8,9 \cdot 10,1 = 89,9 \text{ A}$$

Ahora calculamos el valor del par nominal:

$$M_n = \frac{P_u}{\omega} = \frac{5.500}{305,8} = 18 \text{ Nm}$$

La velocidad angular del rotor la hemos calculado así:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 2.920}{60} = 305,8 \text{ rad/s}$$

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

Par de arranque:  $M_a = 3 M_n = 3 \cdot 18 = 54 \text{ Nm}$

Par máximo:  $M_{m\acute{a}x} = 3,2 M_n = 3,2 \cdot 18 = 57,6 \text{ Nm}$

### Actividad propuesta 20.1

Del motor de 15 kW de la Tabla 20.1 se desea averiguar: a) número de polos del bobinado del estator, b) deslizamiento a plena carga, c) corriente de arranque, d) par nominal y par de arranque, e) característica de la batería de condensadores conectada en triángulo para mejorar el factor de potencia del motor hasta 0,95.



La solución a esta Actividad propuesta la puedes encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto.

### Conexión de los devanados del 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, un motor cuya placa de características registre las tensiones 400/230 V, nos indica que se puede conectar en estrella a la tensión mayor (400 V, ya que en cada devanado del motor aparecerá  $U_f = 400/\sqrt{3} = 230$  V) y en triángulo a la menor (230 V). De tal forma que cada bobina siempre queda sometida a la tensión menor (Figura 20.19).

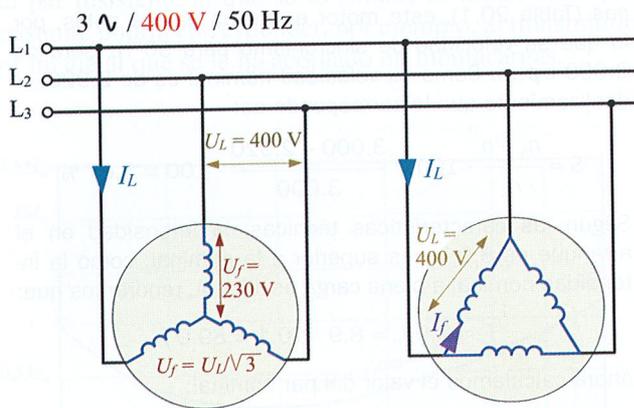


Figura 20.19. Conexiones de los devanados de un motor asíncrono trifásico.

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 20.20).

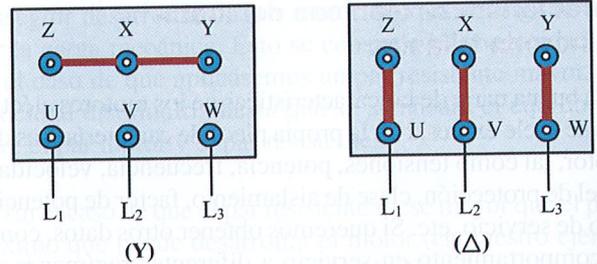


Figura 20.20. Conexiones en la placa de bornes de un motor asíncrono trifásico.

### 20.2.3. Sistemas de arranque de los motores asíncronos trifásicos de rotor en cortocircuito

Cuando se conecta el motor directamente a la red, este absorbe una intensidad muy fuerte de la línea en el momento del arranque, lo que puede afectar no solo a la duración de los aparatos de conexión, sino a la línea que suministra energía eléctrica. Estas fuertes corrientes sobrecargan las líneas de distribución, por lo que pueden producir caídas de tensión y calentamiento en los conductores de tales líneas. Por esta razón, al igual que se hacía para los motores de C.C., el REBT establece normas para reducir dichas corrientes de arranque a valores que sean aceptables. En la instrucción técnica ITC-BT 47 se establece la relación máxima entre la corriente de arranque y la de plena carga para motores de C.A. (Tabla 20.2).

Tabla 20.2. Relación máxima entre la corriente de arranque y la de plena carga en función de la potencia nominal para motores de C.A.

Potencia nominal del motor	Relación máxima entre la corriente de arranque y la de plena carga
De 0,75 kW a 1,5 kW	4,5
De 1,5 kW a 5,0 kW	3,0
De 5,0 kW a 15,0 kW	2,5
De más de 15,0 kW	1,5



Consulta en el REBT la Instrucción Técnica ITC-BT 47 relativa a instalación de motores.

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.



En la Figura 20.21 se muestra el efecto que produce una reducción de la tensión aplicada al devanado del estator en el par motor. Así, por ejemplo, cuando reducimos la tensión en un 50 % (1/2), el par se reducirá en  $(1/2)^2 = 1/4$ . En el ejemplo de la Figura 20.21 cuando se reduce la tensión un 50 % el par de arranque pasa de ser del 200 % del nominal a ser del 50 %.

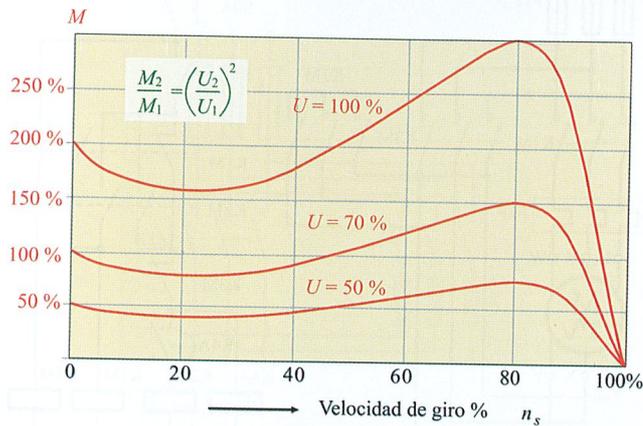


Figura 20.21. Relación entre el par del motor y la tensión aplicada.

### Actividad propuesta 20.2

Calcula el par de arranque que tendrá el motor trifásico de 4 kW de la Tabla 20.1 si le aplican al bobinado del estator las siguientes tensiones: **a)** 400 V; **b)** 300 V; **c)** 200 V; **d)** 100 V; **e)** 50 V.



La solución a esta Actividad propuesta la puedes encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto.

Existen diferentes métodos para reducir la corriente de arranque disminuyendo la tensión: arranque estrella-triángulo, arranque con resistencias estatóricas, arranque por autotransformador y arrancadores estáticos.

#### Arranque directo

El arranque directo está permitido para motores de pequeña potencia cuya relación  $I_a/I_n$  sea igual o inferior a 4,5. En la Figura 20.22(a) se muestra el esquema de fuerza para el arranque directo de un motor asíncrono trifásico de rotor en cortocircuito, y en la Figura 20.22(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 y desconecta el contactor K1M y el motor.

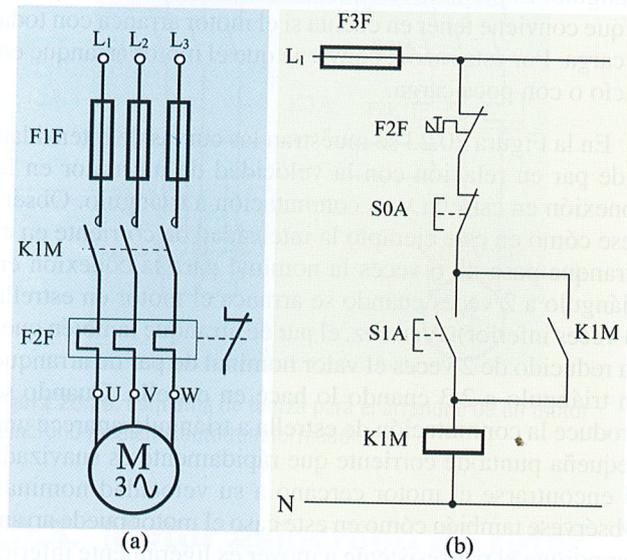


Figura 20.22. Esquema de fuerza y mando para el arranque directo de un motor asíncrono trifásico de rotor en cortocircuito.

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 está en derivación con el pulsador, se cierra. Al dejar de pulsar S1A, este 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.

#### Arranque estrella-triángulo

Es uno de los métodos más conocidos con el que se pueden arrancar motores de hasta 11 kW de potencia. Consiste en conectar el motor primero en estrella para, una vez arrancado, conmutar a la conexión en triángulo. Para que esto se pueda llevar a cabo se debe utilizar un motor que esté preparado para funcionar a la tensión inferior conectado en triángulo. Así, por ejemplo, un motor de 230/400 V podrá ser arrancado con este sistema en una red de 230 V y uno de 400/700 V en una red de 400 V.

Si a un motor de las características indicadas se lo conecta primero en estrella, cada una de las bobinas del motor quedará sometida a una tensión  $\sqrt{3}$  veces inferior que si hubiese sido conectado en triángulo. Con ello se consigue que la intensidad en el arranque quede disminuida a la tercera parte respecto al arranque directo en conexión en triángulo. El par también queda reducido a la tercera parte, lo que conviene tener en cuenta si el motor arranca con toda la carga. Por esta razón, conviene que el motor arranque en vacío o con poca carga.

En la Figura 20.23 se muestran las curvas de intensidad y de par en relación con la velocidad de un motor en la conexión en estrella y su conmutación a triángulo. Obsérvese cómo en este ejemplo la intensidad de corriente en el arranque pasa de 6 veces la nominal para la conexión en triángulo a 2 veces cuando se arranca el motor en estrella (3 veces inferior). A su vez, el par de arranque también queda reducido de 2 veces el valor nominal de par de arranque en triángulo a  $2/3$  cuando lo hace en estrella. Cuando se produce la conmutación de estrella a triángulo aparece una pequeña punta de corriente que rápidamente es suavizada al encontrarse el motor cercano a su velocidad nominal. Obsérvese también cómo en este caso el motor puede arrancar porque el par resistente a mover es ligeramente inferior al par de arranque del motor en estrella; en el caso de que este par resistente fuese algo más fuerte el motor no tendría fuerza suficiente para comenzar a girar y habría que recurrir a otros sistemas de arranque para el motor.

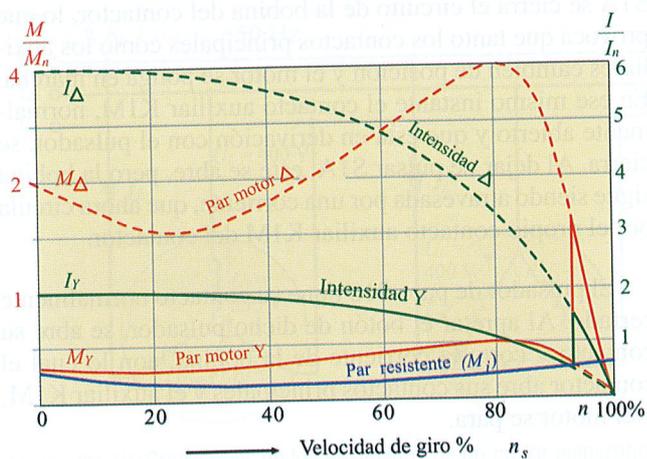


Figura 20.23. Curva mecánica y de corriente del arranque de un motor de inducción en conexión estrella-triángulo.

En un arrancador estrella-triángulo automatizado, el proceso de conmutación se realiza mediante contactores y un relé temporizado. En la Figura 20.24 se muestra el esquema de fuerza y de mando de un arrancador estrella-triángulo mediante contactores.

- K1M** = Contactor de línea.
- K2M** = Contactor de conmutación a estrella.

**K3M** = Contactor de conmutación a triángulo.

**K4A** = Relé de tiempo.

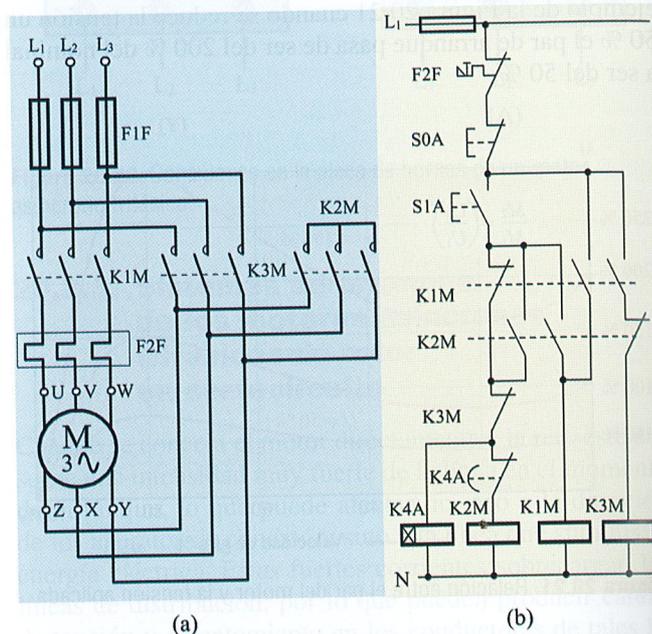


Figura 20.24. Esquema de fuerza (a) y de mando (b) para el arranque en estrella-triángulo de un motor asíncrono trifásico de rotor en cortocircuito.

Su funcionamiento es como sigue. Al accionar el pulsador de marcha S1A, se pone en funcionamiento el contactor de estrella K2M y el relé temporizado (comienza a contar tiempo desde ese momento). El contacto (NA) de K2M hace que también se ponga en marcha el contactor de línea K1M, por lo que el motor queda alimentado y arranca en estrella. Un contacto de realimentación (NA) de K1M hace posible el funcionamiento aunque se deje de pulsar S11A. El relé de tiempo ha sido regulado a un tiempo determinado, transcurrido el cual, el contacto del mismo K4A (NC) se abre y hace que se desconecte el contactor de estrella K2M. El contacto (NC) del K2M vuelve a su posición de reposo, conectando el contactor de triángulo K3M. El motor ha quedado ahora conectado en triángulo.

Para parar el motor se acciona el pulsador de paro S0A. Con él se desconecta el contactor de línea K1M y, con este, el contactor K3M. En caso de sobrecarga, el contacto F2F del relé térmico desconecta igualmente la instalación.

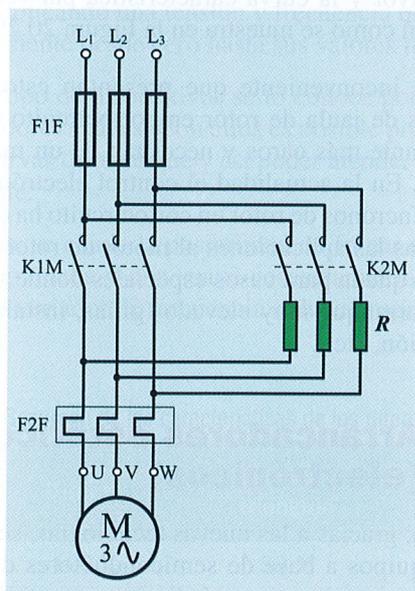
### Arranque por resistencias estáticas

Consiste en reducir la tensión que producen las resistencias conectadas en serie con el estator. Este sistema tiene el inconveniente de que se consigue disminuir la corriente en función lineal de la caída de tensión producida. Sin embar-



go, el par queda disminuido con el cuadrado de la caída de tensión, por lo que su aplicación se ve limitada a motores en los que el momento de arranque resistente sea bajo.

En el esquema de la Figura 20.25 se muestra el circuito de fuerza de este arranque.



**Figura 20.25.** Esquema de fuerza para el arranque de un motor asíncrono trifásico mediante resistencias estáticas.

Primeramente se conecta el motor a través del contactor K2M y a través de las resistencias conectadas en serie con el estator. Una vez alcanzada cierta velocidad se procede a conectar K1M y a desconectar el K2M.

### Arranque por autotransformador

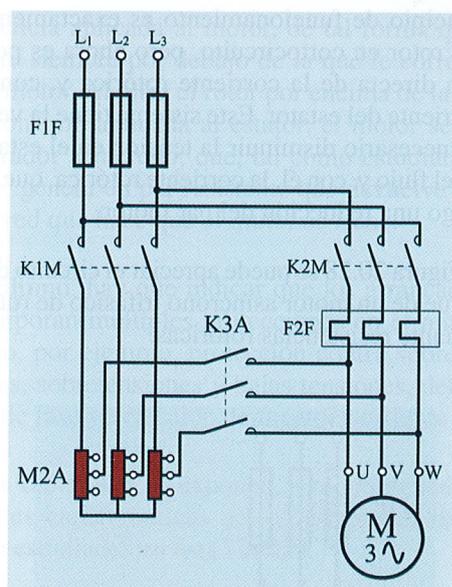
Consiste en conectar un autotransformador trifásico en la alimentación del motor. De esta forma se consigue reducir la tensión y con ella la corriente de arranque.

El par de arranque queda reducido en este caso en la misma proporción que la corriente, es decir, al cuadrado de la tensión reducida.

Este sistema proporciona una buena característica de arranque, aunque posee el inconveniente de su alto precio.

En la Figura 20.26 se muestra el circuito de fuerza de este sistema de arranque.

Primero se conectan los contactores K1A y K3A que alimentan al motor con una tensión reducida a través del autotransformador. Una vez alcanzada una cierta velocidad se conecta el contactor K2M y se desconectan K1A y K3A.

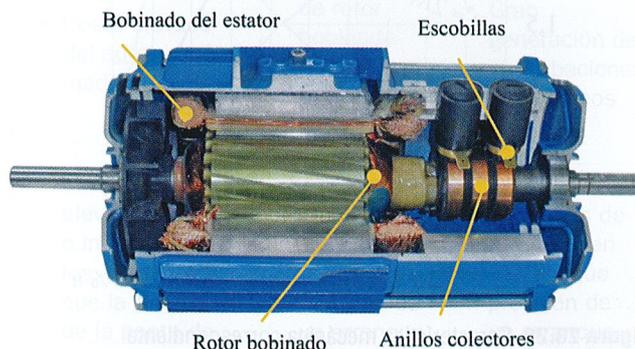


**Figura 20.26.** Esquema de fuerza para el arranque de un motor asíncrono mediante autotransformador.

## 20.3. 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 (Figura 20.27). 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.

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 20.27.** Rotor bobinado de un motor asíncrono.

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 20.28 se puede apreciar el circuito de fuerza del arranque de un motor asíncrono trifásico de rotor bobinado mediante resistencias rotóricas.

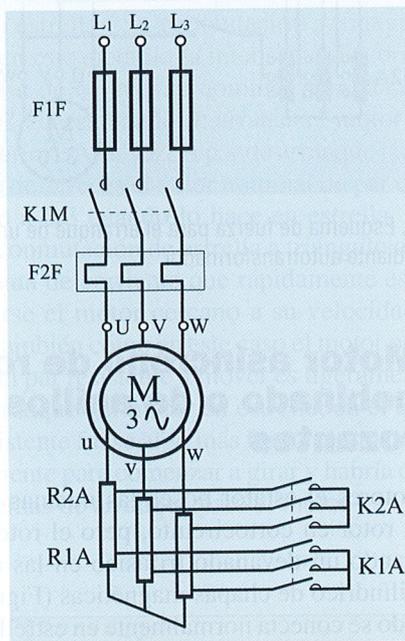


Figura 20.28. Esquema para el arranque de un motor asíncrono de rotor bobinado mediante resistencias rotóricas.

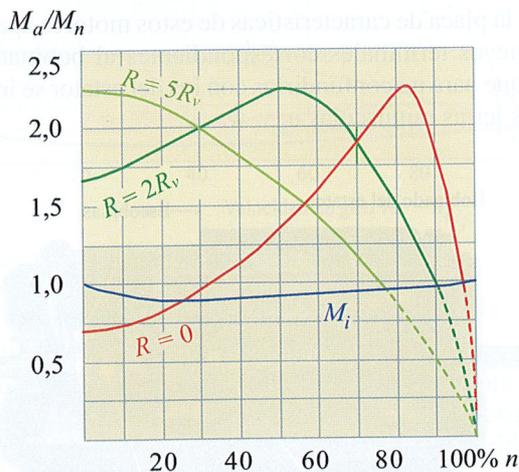


Figura 20.29. Característica mecánica correspondiente al proceso de arranque de un motor de asíncrono trifásico mediante resistencias rotóricas.

El arranque se hace en sucesivos escalones, y se obtiene un arranque con corriente suave en el estator con un par de arranque excelente. 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 20.29.

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; este último queda para casos especiales donde se requiera un par de arranque muy elevado (grúas, instalaciones de media tensión, etc.).

## 20.4. Arranadores estáticos (electrónicos)

Hoy en día, gracias a las nuevas tecnologías, se han desarrollado equipos a base de semiconductores de potencia (tiristores) que son capaces de limitar y controlar en todo momento la intensidad de corriente y el par en el periodo de arranque. Con estos equipos, además de limitar la corriente de arranque según nuestras necesidades, se evitan los esfuerzos bruscos a los que se somete a los componentes mecánicos del motor, tales como correas, engranajes, acoplamientos mecánicos (Figura 20.30).

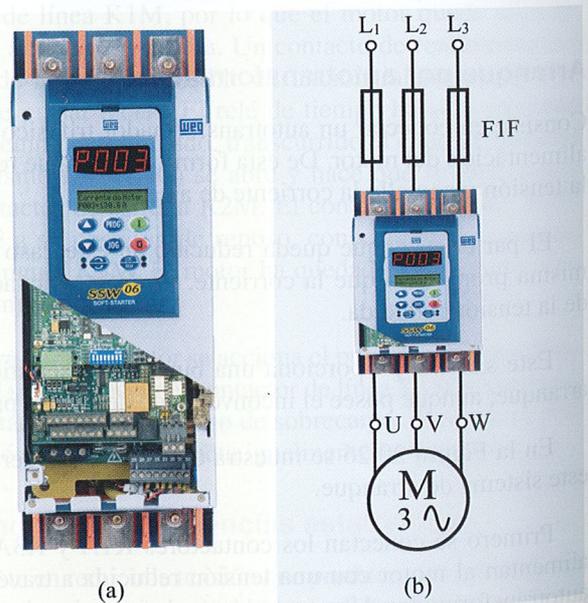


Figura 20.30. Arranador estático. (a) Arranador suave marca WEG. (b) Esquema de fuerza.



Estos arrancadores consiguen limitar la intensidad de corriente y hacer que el motor desarrolle el par motor adecuado a la carga mecánica a cualquier velocidad gracias a un convertidor de frecuencia que aplica al motor una tensión y frecuencia variables. De tal forma que, si lo que se desea es mantener el par constante, se le aplica al motor una relación constante de tensión/frecuencia. El arranque se realiza aplicando una tensión y frecuencia que aumenta progresivamente desde cero hasta sus valores nominales.

A este tipo de dispositivos se lo conoce por el nombre de arrancadores suaves. Con ellos es posible programar diferentes curvas de arranque y así poder atender a cargas de tipo variable.

Además, se añade la posibilidad de frenar el motor de forma programada y una suave desaceleración. Para conseguirlo, el variador de frecuencia reduce progresivamente

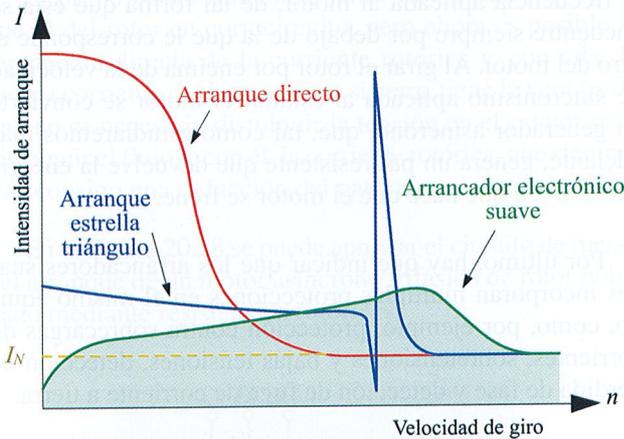
la frecuencia aplicada al motor, de tal forma que esta se encuentre siempre por debajo de la que le corresponde al giro del motor. Al girar el rotor por encima de la velocidad de sincronismo aplicada al estator, el motor se convierte en generador asíncrono, que, tal como estudiaremos más adelante, genera un par resistente que devuelve la energía hacia la red que hace que el motor se frene.

Por último, hay que indicar que los arrancadores suaves incorporan múltiples protecciones en el mismo equipo, como, por ejemplo, protección contra sobrecargas de corrientes, sobretensiones y bajas tensiones, detección de pérdida de fase y detección de fuga de corriente a tierra.

En la Tabla 20.3 se exponen, a modo de resumen, las principales características de los diferentes sistemas de arranque estudiados en esta Unidad.

**Tabla 20.3.** Resumen de las características de los diferentes sistemas de arranque para motores asíncronos trifásicos

	Directo	Estrella/triángulo	Resistencias estáticas	Autotransformador	Resistencias/Rotor bobinado	Estático electrónico
$%I_a$	100 %	33 %	70 %	40/65/80 %	70 %	Regulable
$I_a/I_b$	4 a 8 $I_n$	1,3 a 2,6 $I_n$	4,5 $I_n$	1,7 a 4 $I_n$	<2,5 $I_n$	Regulable
$%M_a$	100 %	33 %	50 %	40/65/80 %	100 %	Regulable
$M_a/M_n$	0,6 a 1,5 $M_n$	0,2 a 0,5 $M_n$	0,6 a 8,5 $M_n$	0,4 a 0,85 $M_n$	<2,5 $M_n$	Regulable
<b>Ventajas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Simple y económico</li> <li>Par de arranque elevado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Económico</li> <li>Buena relación par/corriente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Posibilidad de ajustar valores en el arranque</li> <li>Arranque progresivo sin cortes de corriente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Buena relación par/corriente</li> <li>Posibilidad de ajustar valores en el arranque</li> <li>Arranque progresivo sin cortes de corriente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Excelente relación par/corriente</li> <li>Posibilidad de ajustar valores en el arranque</li> <li>Arranque progresivo sin cortes de corriente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Programable para cualquier ciclo de arranque</li> </ul>
<b>Inconvenientes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Punta de corriente excesiva</li> <li>Arranque brusco</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Par de arranque débil</li> <li>Corte de corriente en el cambio Y/<math>\Delta</math> que produce transitorios</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>No se reduce suficientemente la punta de corriente</li> <li>Resistencias muy voluminosas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Coste elevado del autotransformador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Motor de rotor bobinado más caro</li> <li>Necesita resistencias</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gran generación de perturbaciones y armónicos</li> </ul>
<b>Aplicaciones</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Máquinas de poca potencia</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Máquinas que arrancan en vacío o con poca carga</li> <li>Compresores, ventiladores, bombas, etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Máquinas de elevada inercia, sin problemas especiales de par ni de corriente de arranque</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Máquinas de elevada potencia o inercia y en los casos en los que la reducción de la punta de corriente sea un factor importante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Máquinas de arranque en carga y que precisen de un arranque progresivo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Máquinas de arranque en carga y que precisen de un arranque progresivo</li> </ul>

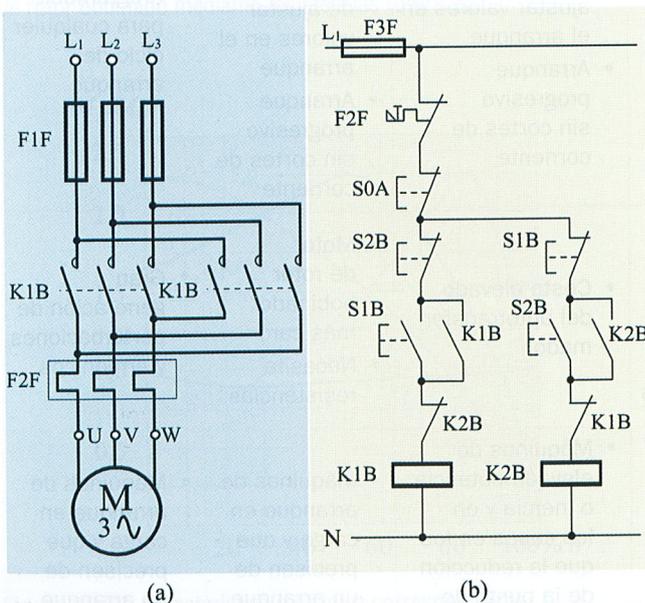


**Figura 20.31.** Comparativa de las curvas de corriente para diferentes sistemas de arranque.

## 20.5. Inversión de giro de un motor asíncrono trifásico

Para conseguir invertir el sentido de giro del motor es necesario invertir también el sentido del campo giratorio. Esto se consigue invirtiendo la conexión de dos de las fases del motor. Esta maniobra se realiza normalmente utilizando automatismos a base de contactores.

Los esquemas de fuerza y de mando del circuito de inversión de giro podrían quedar tal como se exponen en la Figura 20.32.



**Figura 20.32.** Esquema de fuerza y mando para la inversión de giro de un motor asíncrono trifásico.

Cuando se acciona el contactor  $K1B$ , el motor gira hacia la izquierda. Al accionar el  $K2B$ , se invierten dos fases del motor y este invierte, a su vez, su sentido de giro. Por supuesto, nunca podrán permanecer conectados los contactores a la vez, ya que esto produciría un cortocircuito.

Al accionar el pulsador doble de marcha izquierda ( $S1B$ ), se alimenta a la bobina del contactor  $K1B$ , todos sus contactos cambian de posición y el motor arranca hacia la izquierda. El contacto abierto  $K1B$  se cierra (esto se hace para que la bobina quede alimentada aunque dejemos de pulsar  $S1B$ ). El contacto  $K1B$  cerrado se abre e impide la puesta en marcha del contactor  $K2B$  (esto se hace para evitar el cortocircuito por una posible conexión de ambos contactores).

Si ahora accionamos el pulsador doble de marcha derecha ( $S2B$ ), el contactor  $K1B$  se desconecta a través del contacto normalmente cerrado de dicho pulsador y el  $K2B$  se conecta a través del contacto normalmente abierto del mismo, siempre y cuando el  $K1B$  esté totalmente desconectado. El motor se frenará y girará hacia la derecha.

Para efectuar la parada del motor basta con accionar el pulsador de paro  $S0A$ . En caso de sobrecarga, el contacto del relé térmico  $F2F$  desconecta igualmente a los contactores.

## 20.6. 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.

Al igual que se hacía con los arrancadores estáticos, 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 del motor.

### 20.6.1. Motores de dos velocidades en conexión Dahlander

Estos motores se construyen con un devanado con varias posibles conexiones. Dependiendo de cómo se conecten exteriormente estos bobinados, se consigue variar el número de polos y, por tanto, la velocidad. La conexión más empleada es la Dahlander.

En el esquema de la Figura 20.33 se ha representado el circuito de fuerza de un motor trifásico de polos conmutables para 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.

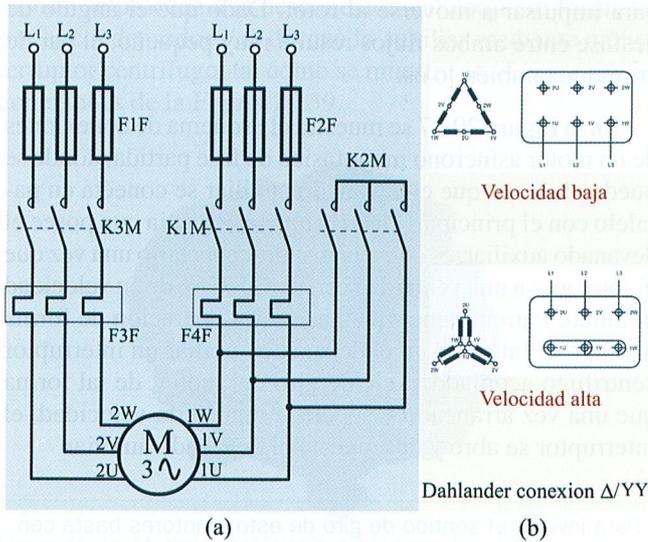


Figura 20.33. (a) Esquema de fuerza de motor de dos velocidades en conexión Dahlander. (b) Conexión de los bobinados para  $\Delta/YY$ .

### 20.6.2. Motor de dos velocidades con dos 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 20.34 se ha representado el circuito de fuerza de un motor trifásico para dos velocidades con dos devanados separados.

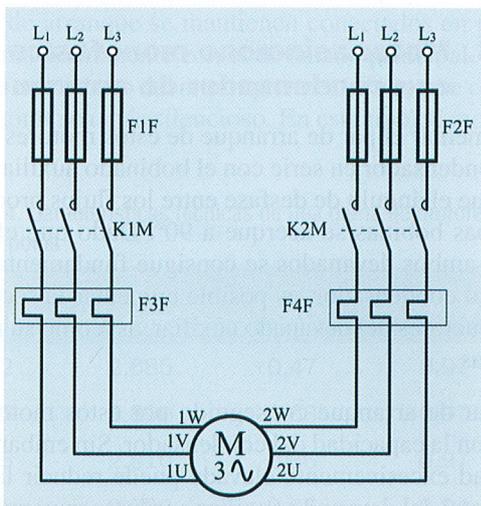


Figura 20.34. Esquema de fuerza de motor trifásico de dos velocidades con devanados separados.

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.

## 20.7. Motores monofásicos

El suministro de C.A. trifásica no siempre está 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.

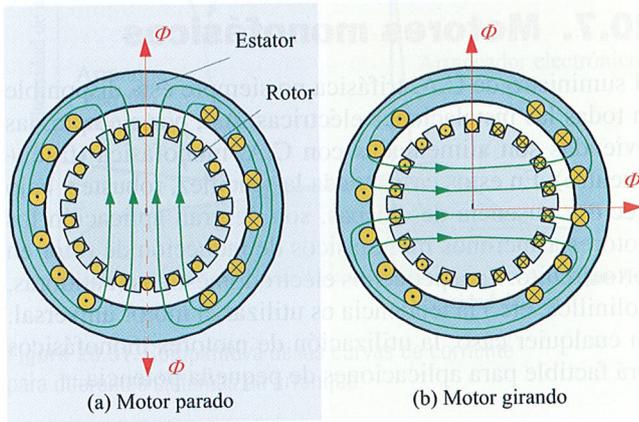
### 20.7.1. Motor monofásico de inducción de rotor en cortocircuito

Al igual que los trifásicos, están constituidos por un rotor de jaula de ardilla y un estator donde se alojarán 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, con lo que no consiguen poner en marcha el motor) [Figura 20.35(a)].

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 20.35(b)]. Hay que tener en cuenta que al ponerse el rotor en movimiento, en los conductores de este aparece una nueva f. e. m. inducida debida al giro de aquellos 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  $90^\circ$  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 lo haya impulsado inicialmente.

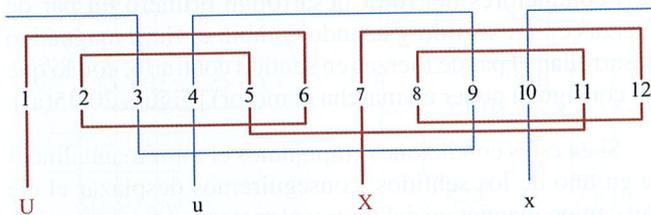


**Figura 20.35.** Motor monofásico de inducción. (a) Al ser el campo generado por el devanado del estator alternativo, el motor no arranca. (b) Al empujar al rotor, se desplaza el campo magnético y el rotor se pone en movimiento.

Al igual que sucede con 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.

### 20.7.2. Motor asíncrono monofásico de fase partida

Por supuesto, no sería muy práctico tener que arrancar los motores asíncronos trifásicos de 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 dichas ranuras. En la Figura 20.36 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.



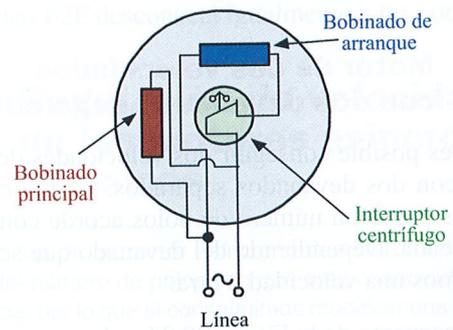
**Figura 20.36.** Bobinado principal y auxiliar de un motor asíncrono monofásico de fase partida.

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 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 20.37 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 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 superada una cierta velocidad, el interruptor se abre y desconecta el devanado auxiliar.

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



**Figura 20.37.** Esquema de conexiones de arranque de un motor asíncrono monofásico de fase partida mediante interruptor centrífugo.

### 20.7.3. 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 desconec-



ta 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 20.39.

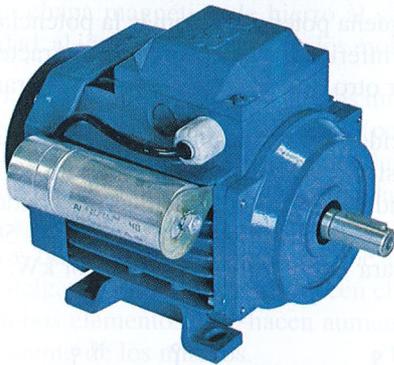


Figura 20.38. Motor monofásico con condensador (ABB).

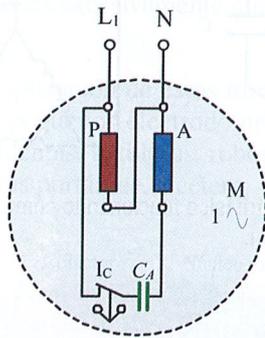


Figura 20.39. Esquema de conexiones de motor asíncrono monofásico con condensador de arranque e interruptor centrífugo.

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 y se consigue 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 20.4 se muestran, como ejemplo, las características técnicas de una gama de motores monofásicos comerciales con condensador permanente. Aquí podemos comprobar como el par de arranque conseguido y el rendimiento es bastante inferior al de los motores trifásicos. Observa también como aumenta la capacidad del condensador con la potencia nominal del motor.

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 20.40. 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.

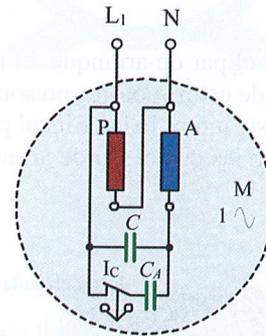


Figura 20.40. Esquema de conexiones de motor asíncrono monofásico de fase partida con doble condensador.

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, etcétera.

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, etcétera.

Tabla 20.4. Características técnicas de una gama de motores monofásicos comerciales con condensador de arranque permanente para 230 V y un par de polos

$P$ (kW)	$n$ (r. p. m.)	$\eta$ (%)	$\text{Cos } \varphi$	$I_n$ (A)	$M_n$ (Nm)	$M_a/M_n$	$I_a/I_n$	$C$ ( $\mu\text{F}$ )
0,12	2.685	0,47	0,97	1,15	0,43	0,90	2,3	5
0,55	2.800	0,63	0,97	3,82	1,88	0,78	3,8	20
0,75	2.810	0,66	0,97	5	2,56	0,76	4,0	25
1,1	2.780	0,67	0,94	7,65	3,81	0,73	4,2	40
1,5	2.790	0,68	0,95	10,23	5,18	0,70	4,3	50

### 20.7.4. 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, y en él 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 20.41). 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.

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 son muy buenos, la gran sencillez de este motor lo hace ideal para aplicaciones de poca potencia en las que el par de arranque no sea muy importante.

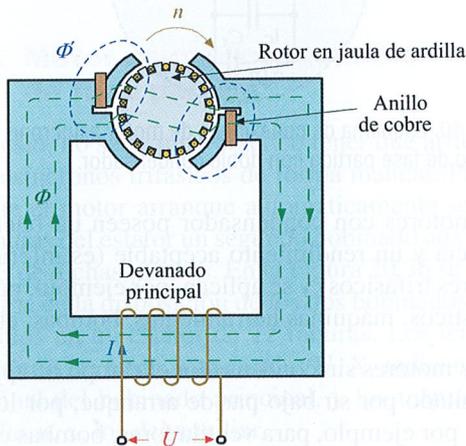


Figura 20.41. Motor monofásico con espira en cortocircuito.

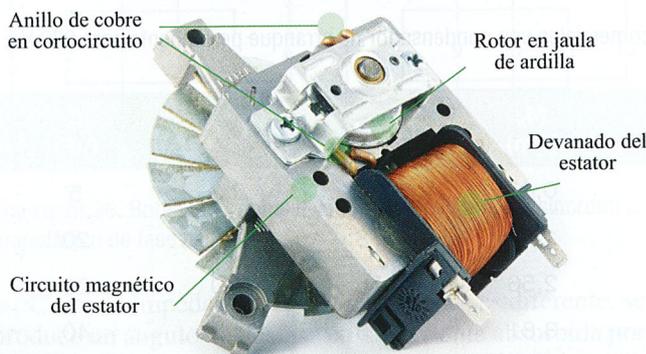


Figura 20.42. Motor monofásico con espira en cortocircuito.

### 20.7.5. 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 20.43.

Este tipo de conexión solo 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  $\mu\text{F}$  de capacidad del condensador por cada kW de potencia del motor; para 230 V y 50 Hz, 70  $\mu\text{F}$  por kW, y para 400 V y 50 Hz, 22  $\mu\text{F}$  por kW.

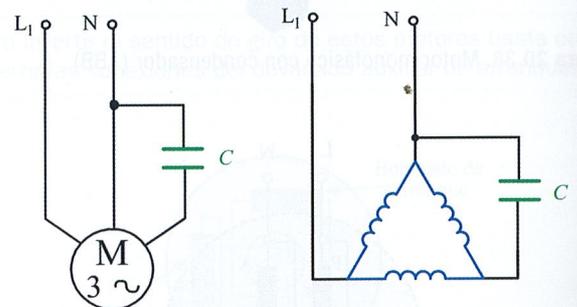


Figura 20.43. Motor trifásico funcionando como monofásico mediante condensador.

### 20.7.6. 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 20.44.

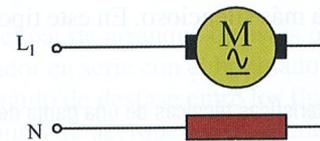


Figura 20.44. Esquema de conexiones de motor universal.

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. Esta 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 ellos. 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 motor de pequeños electrodomésticos y pequeñas máquinas herramientas: batidoras, robots de cocina, molinillos, taladradoras portátiles, etcétera.

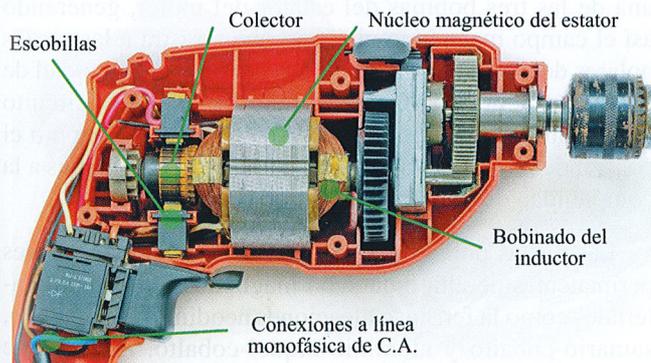


Figura 20.45. Aplicación práctica de un motor universal.

## 20.8. 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, como estudiaremos a continuación, estos motores no son capaces de arrancar por sí mismos, por lo que es 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, de modo que se produce un arrastre del rotor por parte de dicho campo giratorio (Figura 20.46). La velocidad del rotor coincide con la de sincronismo del campo giratorio.



Figura 20.46. Motor síncrono trifásico.

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

$n$  = Velocidad del motor síncrono (r.p.m.).

$f$  = Frecuencia de la red (Hz).

$p$  = Número de pares de polos del devanado estatórico.

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 arrancarlos existen diferentes procedimientos, tales como 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 los puede someter a variaciones bruscas de la carga, ya que esto podría ocasionar la pérdida de la velocidad de sincronismo del rotor, lo que provocaría 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.

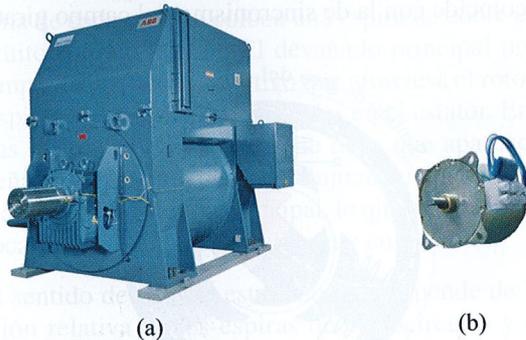


Figura 20.47. Motor síncrono: (a) de gran potencia (ABB); (b) pequeño motor.

### 20.8.1. Motor Brushless con síncrono

Aunque los motores asíncronos trifásicos son unas máquinas con excelentes prestaciones, resulta que para su uso en redes con disponibilidad de solo dos fases, los motores monofásicos presentan una merma en estas prestaciones. Estos motores poseen un par de arranque muy bajo y su par máximo es bastante limitado, resultando de ello, que para ciertas aplicaciones, como por ejemplo máquinas herramientas portátiles, resultan inútiles, ya que tienden a detener su giro cuando la demanda de par es alta. Así, por ejemplo, si una taladradora eléctrica viniese equipada con un motor monofásico, se bloquearía en el momento de exigir la máxima potencia.

De esta forma, el motor que se ha incluido para este tipo de aplicaciones ha sido siempre el motor universal serie, que aunque en un principio es una máquina de C.C., puede funcionar también con C.A. gracias a la conexión serie de los devanados del inductor e inducido. Estos motores tienen un excelente par de arranque y cuando tienden a reducir su velocidad, por una mayor exigencia del par resistente, presentan un par motor elevado que evitan su parada.

Aunque el motor universal serie ha sido hasta ahora el más utilizado en aplicaciones donde se requiere un buen par mecánico y en las que solo está disponible una red monofásica para su alimentación, tienen un punto débil: su colector de delgas y escobillas. El colector de delgas desprende chispas al contacto con las escobillas, lo que le hace peligroso para su uso en ambientes explosivos. Además, se produce un alta emisión de ruido electromagnético que puede llegar a interferir en el funcionamiento de equipos electrónicos de radiocontrol.

Por otro lado, las escobillas frotan de forma continua el colector, produciendo su desgaste, además de un ensuciamiento de las delgas del colector. Estas circunstancias hacen que este motor requiera de un mantenimiento periódico, en el que se deben sustituir las escobillas y limpiar el colector. La solución a estos inconvenientes viene de la mano de los motores sin escobillas o Brushless para la conexión en redes monofásicas.

Estos motores en realidad constan de un motor síncrono trifásico al que se le alimenta mediante un circuito electrónico de conmutación (Figura 20.48).

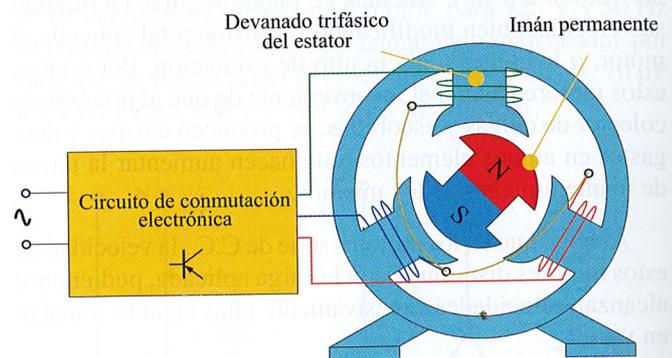


Figura 20.48. Motor Brushless con síncrono trifásico.

Dado que no vamos a disponer de una red trifásica para su conexión, el circuito electrónico de conmutación es capaz de ir alimentando de forma secuencial y sincronizada a cada una de las tres bobinas del estator del motor, generando así el campo magnético giratorio que arrastra a las piezas polares del rotor y produce el giro del eje. La velocidad de giro dependerá de la frecuencia producida por el circuito de conmutación. Tanto la secuencia de arranque, como el control de la velocidad de este motor se realiza gracias a la complejidad del circuito electrónico de control.

Las piezas polares del rotor se construyen con imanes permanentes de alta inducción magnética, utilizando materiales como la ferrita, o aleaciones neodimio-hierro-boro, samario-cobalto y aluminio-níquel-cobalto. Además, se pueden construir con diferente número de polos.

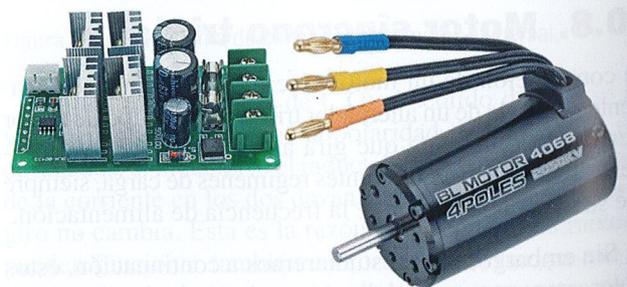


Figura 20.49. Motor sin escobillas con controlador electrónico.



### 20.8.2. Motor síncrono para el vehículo eléctrico

Con la llegada del coche eléctrico la búsqueda del motor eléctrico más idóneo no ha hecho más que empezar.

Los primeros motores que se han ido implementando para su uso en la automoción ha sido el motor trifásico asíncrono de inducción por su simplicidad y reducido precio. Sin embargo, la tendencia actual es la incorporación del motor síncrono trifásico con la inclusión de piezas polares de múltiples pares fabricados con imanes permanentes de alta inducción.

El control y la generación del campo giratorio del motor síncrono se realiza mediante un convertidor electrónico que, alimentado por la batería, hace que el rotor gire a una velocidad más precisa y exacta, pudiendo incluso prescindir de la caja de cambios.

Dado que el motor síncrono está constituido de la misma forma que un alternador, es muy sencillo hacer trabajar a esta máquina eléctrica como generador. Esto resulta de vital importancia para la recuperación de energía eléctrica en los tramos de la vía descendentes y en el uso de los frenos regenerativos. De esta forma se consigue recargar la batería eléctrica del vehículo en marcha y aumentar así su autonomía.

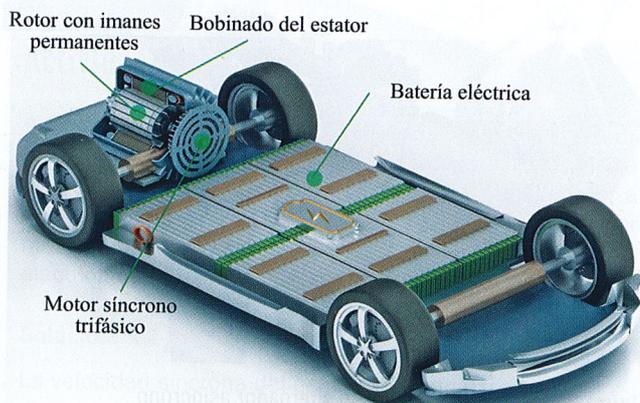


Figura 20.50. Motor síncrono para el vehículo eléctrico.

## 20.9. 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*.

### 20.9.1. 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 varios electroimanes y el rotor por uno o varios imanes permanentes (Figura 20.51). A las diferentes bobinas del estator se alimenta mediante impulsos, proporcionados normalmente por un circuito electrónico, y se consigue que el rotor se posicione paso a paso según sea el avance de dichos impulsos.

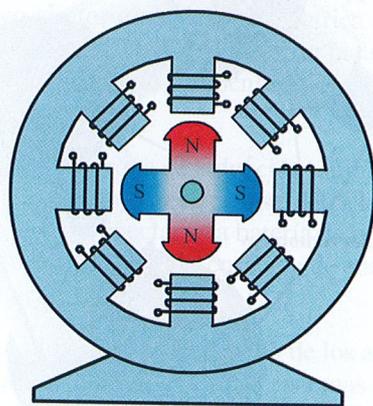


Figura 20.51. Motor paso a paso.

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 igual a:  $360^\circ/24 = 15^\circ$ .

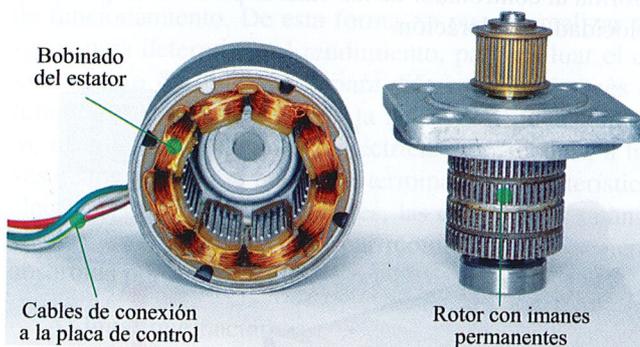


Figura 20.52. Partes de un motor paso a paso.

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

### 20.9.2. Servomotor

Cuando en ciertas aplicaciones se hace necesario un control preciso de la posición angular exacta del eje del motor, su aceleración y velocidad, se utiliza el servomotor.

Estos motores se utilizan en infinidad de aplicaciones, como por ejemplo, el control de brazos robóticos, puertas automáticas, impresoras, máquinas herramientas, automoción, drones, timones de aviones y barcos, sistemas de posicionamiento de paneles solares, etcétera.

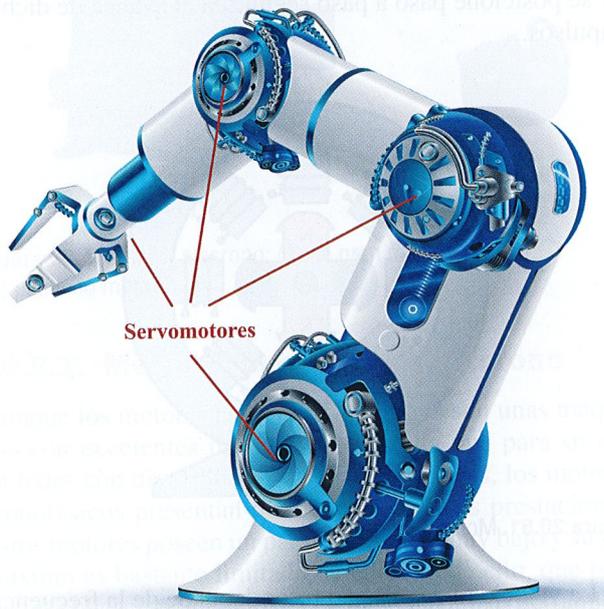


Figura 20.53. Servomotores en robótica.

Estos motores necesitan de un controlador electrónico y de un sensor de posición en su eje, también llamado **encoder**, que produce una señal de retroalimentación que, informa al controlador de los valores precisos de posición, velocidad y aceleración.

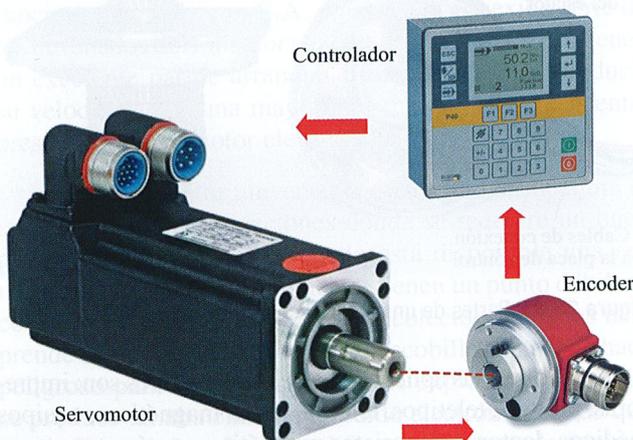


Figura 20.54. Circuito de control de un servomotor.

Dependiendo de la aplicación, hoy en día, los servomotores pueden utilizar diferentes tipos de motores tanto en corriente continua como alterna. De esta forma es posible encontrar servomotores contruidos con: motores de C.C. tanto con escobillas como sin ellas, motores paso a paso y motores de C.A. tanto asíncronos como síncronos.

### 20.10. El alternador asíncrono de inducción

En la actualidad se está extendiendo el uso de este generador de energía eléctrica, sobre todo para hacerse funcionar como aerogenerador en las turbinas eólicas que se conectan directamente a la red eléctrica (Figura 20.55).

Un generador de inducción o alternador asíncrono se construye exactamente igual que un motor asíncrono de inducción. Para hacerlo funcionar como generador se lo conecta a la red eléctrica, y se le hace girar por encima de su velocidad de sincronismo. Esto se consigue al aplicársele al eje un par motor mediante una turbina que consigue que la potencia mecánica aplicada se convierta en energía eléctrica.

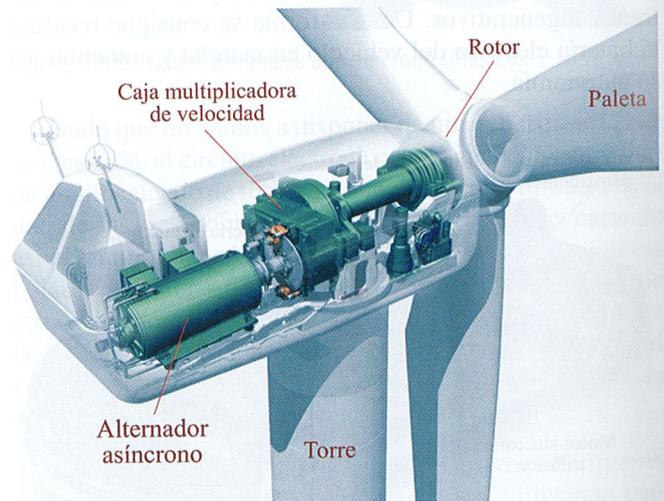


Figura 20.55. Turbina eólica con alternador asíncrono (Nordex-1.500 kW).

El generador asíncrono se puede construir con rotor bobinado o con rotor en jaula de ardilla, aunque este último es más utilizado debido a su bajo coste económico y reducido mantenimiento.

Al conectarse la máquina asíncrona a la red eléctrica, primero funciona como motor y gira a una cierta velocidad en función del número de polos del estator. En el momento en que la turbina eólica hace girar el rotor por encima de la velocidad de sincronismo  $\omega_s$ , tal como se muestra la Figura 20.56, las corrientes del rotor producen un campo magnetizante que, al cortar en su giro a los conductores del bobinado del estator, inducen fuerzas electromotrices en



este último bobinado un poco más elevadas que la tensión de línea aplicada por la red trifásica. Esto hace que el bobinado del estator entregue una cierta potencia eléctrica a la red que dependerá de la diferencia que exista entre la velocidad de giro del rotor  $\omega$  y la de sincronismo  $\omega_s$ , algo inferior.

Si el par mecánico aplicado al rotor es  $M$ , la potencia eléctrica generada será igual a:

$$P = M(\omega - \omega_s)$$

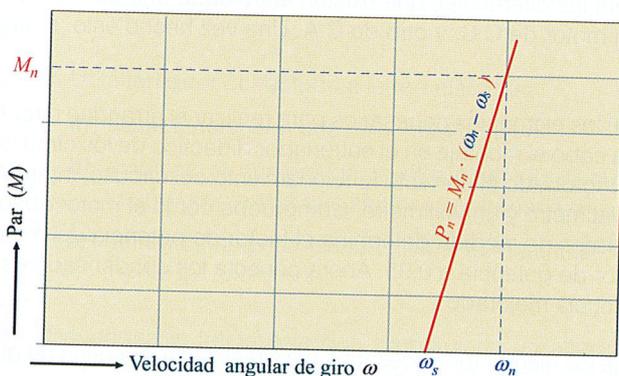


Figura 20.56. Potencia entregada por un generador asíncrono cuando se supera la velocidad de sincronismo.

### Actividad resuelta 20.10

Se dispone de un motor asíncrono trifásico de jaula de ardilla de 10 pares de polos. Se le conecta a una red trifásica de 50 Hz y se le hace girar mediante un aerogenerador a una velocidad de 308 r.p.m. gracias al aplique de un par mecánico de arrastre de 20.000 Nm. Calcula la potencia eléctrica que hipotéticamente será entregada a la red.

#### Solución:

La velocidad síncrona del campo giratorio es:

$$n_s = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{10} = 300 \text{ r.p.m.}$$

$$\omega_s = \frac{2\pi n_s}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 300}{60} = 31,42 \text{ rad/s}$$

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot 308}{60} = 32,25 \text{ rad/s}$$

$$P = M(\omega - \omega_s) = 20.000(32,25 - 31,42) = 21.800 \text{ W}$$

Lo habitual es que el deslizamiento sea pequeño, del orden del 2 % para generadores en torno a 100 kW de potencia y del 0,5 % para grandes generadores de MW.

La maniobra de conexión de un aerogenerador asíncrono suele consistir en esperar a que la velocidad de giro del rotor, con el estator desconectado de la red eléctrica, supere ligeramente la velocidad de sincronismo, para posteriormente conectarlo a la red. En estas circunstancias el generador aporta energía a la red de una frecuencia igual a la de la línea. La potencia eléctrica entregada a la red aumenta con la velocidad, la cual se debe limitar para que no se supere la potencia nominal del alternador. En caso contrario se producirían corrientes de sobrecarga que podrían dañar el devanado del estator.

Uno de los inconvenientes que presentan los alternadores asíncronos es que necesitan absorber la potencia reactiva (que alimenta al bobinado del estator para producir el campo magnético giratorio) de la línea eléctrica a la que se los conecta, lo que hace que se produzca un factor de potencia muy bajo que es necesario compensar mediante la conexión de condensadores.

La máquina asíncrona de inducción también puede funcionar como generador sin estar conectado a la red eléctrica; para ello basta con conectar una batería de condensadores, como la utilizada para la compensación de energía reactiva, al devanado del estator.

En la actualidad, en torno al 90 % de los aerogeneradores comerciales se construyen con sistemas de velocidad constante con alternadores asíncronos.

## 20.11. 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 los 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 cuales relacionan la velocidad de rotación ( $n$ ), el par motor ( $M$ ) 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, pudiendo conocerse en todo momento el par resistente aplicado.



## Comprobación práctica en el laboratorio

- 20.1. Constitución de un alternador.** Consigue un alternador trifásico, analiza sus partes, prestando especial atención a la constitución del devanado inducido, al inductor y al conjunto formado por el par de anillos colectores y las escobillas que alimentan al circuito inductor con C.C.
- 20.2. Constitución de un motor de C.A.** Observa detenidamente las partes de que constan los diferentes tipos de motores de C.A. que existen en el laboratorio de Electrotecnia y apunta las diferencias que existen 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.
- 20.3. Arranque directo de un motor asíncrono trifásico.** 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 esta unidad. 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.
- 20.4. Inversión de giro de un motor asíncrono trifásico.** 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 esta unidad. 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 en arranque.
- 20.5. Arranque estrella-triángulo de un motor asíncrono trifásico.** 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 esta unidad. 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.
- 20.6. Ensayo de un motor asíncrono trifásico.** 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 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.
- 20.7. Regulación de velocidad de un motor asíncrono trifásico.** 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 lo somete a diferentes frecuencias. Mide la frecuencia y velocidad del motor en diferentes puntos de funcionamiento y establece una relación entre dichas magnitudes.
- 20.8. Arranque de un motor monofásico de inducción.** 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. A continuación 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.

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.).



## Actividades de comprobación

- 20.1.** La frecuencia de la C.A. que proporciona un alternador depende:
- Exclusivamente de la velocidad del rotor.
  - De la velocidad del rotor y del número de polos del circuito inductor.
  - Del número de polos y de la corriente de excitación.
- 20.2.** Un alternador conectado a la red eléctrica:
- Debe funcionar a una velocidad constante.
  - Modifica el número de revoluciones por minuto según la potencia que se desea entregar a la red.
  - Entrega más potencia reactiva al aumentar la corriente de excitación.
- 20.3.** Averigua la frecuencia que proporciona un alternador de un par de polos si gira a una velocidad de 3.600 r. p. m.
- 20.4.** ¿Cuántos pares de polos deberá poseer un alternador que gira a 450 r. p. m. para producir una frecuencia de 60 Hz?
- 20.5.** Se desea producir una frecuencia de 60 Hz con un alternador de 3 pares de polos. Averigua la velocidad a que debe girar.
- 20.6.** La velocidad de un motor asíncrono trifásico:
- Permanece constante con la frecuencia.
  - Es siempre algo inferior a la velocidad del campo giratorio.
  - Depende exclusivamente de la frecuencia y del número de polos del devanado estatórico.
- 20.7.** ¿Cómo habrá que conectar un motor de 133/230 V a una red de 230 V?
- En estrella.
  - En triángulo.
- 20.8.** ¿Cómo se consigue invertir el sentido de giro de un motor asíncrono trifásico de rotor en cortocircuito?
- Invirtiendo la polaridad del devanado rotórico.
  - Invirtiendo tres de las fases del devanado estatórico.
  - Invirtiendo dos de las fases del devanado estatórico.
- 20.9.** ¿De qué tensiones tendrá que ser un motor para poder ser arrancado en Y-Δ en una red de 400 V?
- De 400 V.
  - De 230/400 V.
  - De 400/693 V.
- 20.10.** ¿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?
- 20.11.** Averigua la velocidad síncrona de este motor para una frecuencia de 60 Hz.
- 20.12.** ¿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.?
- 20.13.** Un motor asíncrono trifásico posee las siguientes características: potencia activa = 6 kW; 230 V; 60 Hz;  $\cos \varphi = 0,89$ ;  $\eta = 91 \%$ ; pares de polos del devanado estatórico = 3; deslizamiento a plena carga = 2 %. Calcula el par de rotación del rotor.
- 20.14.** Se dispone de un motor asíncrono trifásico de rotor en cortocircuito de 4 kW correspondiente a la gama comercial de la Tabla 20.1. Averigua:
- El deslizamiento.
  - La intensidad nominal.
  - La intensidad en el arranque.
  - Par nominal, par de arranque y par máximo.
- 20.15.** Indica cuál de estos motores consigue mantener la velocidad constante para diferentes regímenes de carga:
- Motor síncrono.
  - Motor universal.
  - Motor asíncrono.
- 20.16.** Indica cuál de estos motores consigue una más fácil posibilidad de regulación de velocidad:
- Motor universal.
  - Motor asíncrono monofásico de fase partida.
  - Motor asíncrono trifásico como monofásico.

**20.17.** Indica cuál de estos motores posee colector de delgas y escobillas:

- a) Motor paso a paso.
- b) Motor universal.
- c) Servomotor.

**20.18.** 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.

## Actividades de evaluación resueltas



A continuación se dan los enunciados de una serie de actividades de evaluación. Estas actividades las podrás encontrar resueltas accediendo al MATERIAL WEB creado para este texto.

**20.1.** A una red trifásica de 380 V de tensión de línea se conecta un motor de inducción trifásico, en cuya placa de características figuran los siguientes datos: (380/660 V;  $f = 50$  Hz;  $P = 50$  kW;  $\cos \varphi = 0,77$ ;  $\eta = 80$  %). Funcionando en condiciones normales, determina:

- a) Tipo de conexión que hay que realizar en el motor. Justifica la respuesta.
- b) Intensidad de corriente absorbida por el motor.

c) Potencia reactiva y capacidad de la batería de condensadores, conectados en estrella, que son necesarios para elevar el factor de potencia del motor a 0,9 (inductivo).

**20.2.** Se dispone de un motor asíncrono trifásico de 25 kW, 220/380 V,  $\cos \varphi = 0,82$  a plena carga, 4 polos y deslizamiento a plena carga del 4 %. Halla:

- a) Conexión del motor si se conecta a una red trifásica de 220 V de línea y 50 Hz.
- b) Corriente a plena carga absorbida de línea cuando la máquina se conecta a la red anterior sabiendo que el rendimiento del motor es del 85 %.
- c) Par a plena carga en el eje del motor.

## Actividades de ampliación



**20.1.** Con el fin de conseguir una mayor profundización en la materia, se han incluido los enunciados de una serie de «**actividades de evaluación propuestas de ampliación (20)**» para esta unidad que podrás encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto. Selecciona alguna de estas actividades y encuentra su solución.

**20.2.** Consigue en internet catálogos comerciales de todo tipo de motores y estudia sus características más relevantes.

**20.3.** Busca en internet información sobre los nuevos alternadores de inducción utilizados como generador eólico.