

3 capítulo

Motores y cargas

*Introducción a las tecnologías de motores.
Información sobre cargas y comportamiento.*



3.1 Motores de corriente alterna trifásicos asíncronos

3.2 Motores de corriente alterna monofásicos asíncronos

3.3 Motores de corriente alterna síncronos

3.4 Motores de corriente continua

3.5 Operando con motores asíncronos

3.6 Comparativa de motores eléctricos

3.7 Tipos de carga

3.8 Válvulas y husillos

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

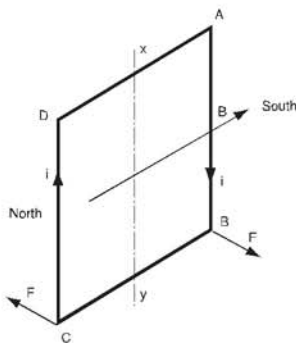
M

3. Motores y cargas

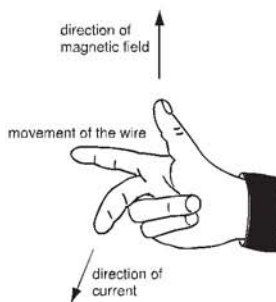
Esta sección describe los aspectos físicos y eléctricos de los motores. El principio de funcionamiento de los tipos de motores más comunes se explica con detalle.

La alimentación, arranque y control de velocidad de los motores se explica brevemente. Para más información, ver la sección correspondiente.

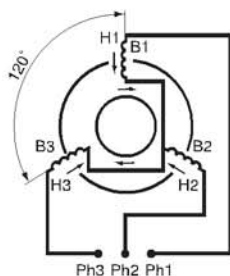
3.1 Motores de corriente alterna trifásicos asíncronos



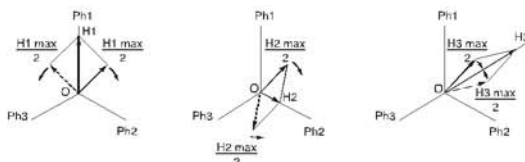
↑ Fig. 1 Una corriente inducida es generada en una espira de sombra cortocircuitada



↑ Fig. 2 Regla de la mano derecha para determinar la dirección de la fuerza



↑ Fig. 3 Principio de los motores trifásicos asíncronos



↑ Fig. 4 Campos generados por las tres fases

La primera parte trata de los motores trifásicos asíncronos, los más usados en maquinaria. Estos motores tienen muchas ventajas destacables que los convierten en la mejor elección para un gran número de usos: están estandarizados, son robustos, fáciles de operar y mantener, y rentables.

■ Principio de funcionamiento

El principio de funcionamiento del motor asíncrono se basa en la creación de una corriente inducida en un conductor cuando éste corta las líneas de fuerza en un campo magnético, de ahí el nombre de "motor de inducción". La acción combinada de la corriente inducida y el campo magnético crea una fuerza que mueve el rotor del motor.

Imaginemos una espira de sombra ABCD en un campo magnético B, rotando alrededor del eje xy (≈ Fig. 1).

Si, por ejemplo, hacemos que el campo magnético gire en el sentido horario, la espira se ve sometida a un flujo variable y se produce una fuerza electromotriz, lo que genera una corriente inducida (Ley de Faraday).

De acuerdo con la Ley de Lenz, el sentido de la corriente es tal que la acción electromagnética contrarresta la causa que la generó. Cada conductor por tanto está sujeto a una fuerza de Lorentz F en sentido opuesto a su propio movimiento en relación al campo de inducción.

Una manera fácil de definir la dirección de la fuerza F para cada conductor se basa en usar de la regla de la mano derecha (acción del campo sobre una corriente) (≈ Fig. 2).

El dedo pulgar señala la dirección del campo inductor. El dedo índice da la dirección de la fuerza.

El dedo medio señala la dirección de la corriente inducida. La espira de sombra está, pues, sujeta a un par que causa su rotación en el mismo sentido que el campo inductor, llamado campo rotativo. La espira de sombra rota y el par electromotriz resultante equilibra el par de la carga.

■ Generación del campo rotativo

Cada uno de los tres devanados a 120° que forman el estátor son alimentados por una de las tres fases de una red trifásica de CA (≈ Fig. 3).

Por cada devanado pasan corrientes de CA de la misma fase, cada uno de los cuales produce un campo magnético variable con forma senoidal. Este campo, que siempre sigue el mismo eje, se encuentra en su pico cuando la corriente del devanado está también en el valor de pico.

El campo generado por cada devanado es el resultante de dos campos rotando en sentidos opuestos, cada uno de los cuales tiene un valor constante igual a la mitad del valor de pico del campo. En cualquier instante t_1 del periodo (≈ Fig. 4), los campos producidos por cada devanado pueden ser representados así:

- el campo H1 se reduce. Sus dos campos tienden a alejarse del eje OH1,
- el campo H2 se incrementa. Sus dos campos tienden a acercarse al eje OH2,
- el campo H3 se incrementa. Sus dos campos tienden a acercarse al eje OH3.

El flujo correspondiente a la tercera fase es negativo, por lo que el campo se mueve en sentido opuesto a la bobina.

3. Motores y cargas

Si sobreponemos los tres diagramas, observamos que:

- los tres campos que giran en sentido antihorario forman 120° y se cancelan entre sí,
- los tres campos que giran en sentido horario se combinan para formar un campo rotativo con una amplitud constante de valor $3H_{max}/2$,
- la velocidad de este campo depende de la frecuencia de la red principal (f) y del número de pares de polos (p). A esta velocidad se la conoce como "velocidad de sincronismo".

■ Deslizamiento

El par sólo puede existir si hay una corriente inducida en la espira de sombra. Su valor depende de la corriente en la espira y existe siempre y cuando haya una variación de flujo en ésta. Por tanto, tiene que existir una diferencia entre la velocidad de la espira de sombra y el campo rotativo. Es por ello que estos motores se denominan "motores asíncronos". La diferencia entre la velocidad de sincronismo (Ns) y la velocidad de la espira de sombra (N) se denomina "deslizamiento" (s) y se expresa como un porcentaje de la velocidad de sincronismo.

$$s = [(N_s - N) / N_s] \times 100.$$

En funcionamiento, la frecuencia de la corriente del rotor se obtiene multiplicando la frecuencia de alimentación por el deslizamiento. La frecuencia de la corriente del rotor al arrancar se encuentra en su máximo y es igual a la del estátor. A medida que el motor coge velocidad, la corriente del estátor reduce su frecuencia.

El deslizamiento en estado estacionario varía de acuerdo con la carga del motor. Dependiendo de la tensión de alimentación, será menor si la carga baja y mayor si el motor es alimentado a una tensión inferior a la nominal.

■ Velocidad síncrona

La velocidad síncrona de los motores trifásicos asíncronos es proporcional a la frecuencia de alimentación e inversamente proporcional al número de pares de polos en el estátor.

Ejemplo: $N_s = 60 f/p$.

Con: N_s : velocidad de sincronismo en rpm
f: frecuencia en Hz
p: número de pares de polos.

La tabla (≅ Fig. 5) da las velocidades del campo rotatorio, o velocidades de sincronismo, dependiendo del número de polos, para frecuencias industriales de 50Hz y 60Hz y para una de 100Hz.

A la práctica, no siempre es posible incrementar la velocidad de un motor asíncrono alimentándolo a una frecuencia superior para la que fue diseñado, aunque la tensión sea la adecuada. Las capacidades mecánicas y eléctricas deben ser garantizadas antes de ello.

Como ya se ha mencionado acerca del deslizamiento, las velocidades de rotación de los motores asíncronos en carga son ligeramente inferiores a las velocidades de sincronismo indicadas en la tabla.

□ Estructura

Un motor trifásico asíncrono de jaula de ardilla consiste de dos partes principales: un inductor o estátor y un inducido o rotor.

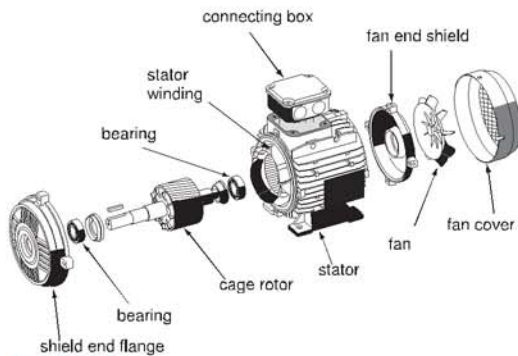
□ Estátor

Ésta es la parte inmóvil del motor. Un cuerpo de acero colado o de una aleación ligera alberga un anillo de finas chapas de acero al silicio (aprox. 0.5mm de grosor). Las chapas están aisladas las unas de las otras por oxidación o mediante un barniz aislante. La "laminación" del circuito magnético reduce las pérdidas por histéresis y por corrientes de Foucault.

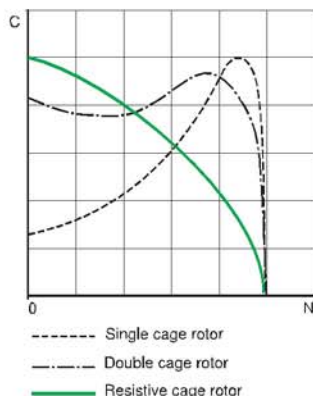
Número de polos	Velocidad de rotación (rpm)		
	50 Hz	60 Hz	100 Hz
2	3000	3600	6000
4	1500	1800	3000
6	1000	1200	2000
8	750	900	1500
10	600	720	1200
12	500	600	1000
16	375	540	750

† Fig. 5 V. de sincronismo en función de los polos y de la frecuencia de la corriente

3. Motores y cargas



† Fig. 6 Motor con rotor de jaula de ardilla



† Fig. 7 Curvas par-velocidad para cada tipo de rotor (tensión nominal)

Las chapas tienen muescas para el devanado estatórico, que producirá el campo rotativo (tres devanados para un motor trifásico). Cada devanado se compone de varias bobinas. La manera de juntar estas bobinas determina el número de pares de polos del motor y por tanto la velocidad de rotación.

□ Rotor

Esta es la parte móvil del motor. Como el circuito magnético del estátor, consiste en chapas apiladas aisladas las unas de las otras, formando en este caso un cilindro solidario al eje del motor.

La tecnología usada para este elemento divide los motores asíncronos en dos familias: rotor de jaula de ardilla y rotor devanado o de anillos rozantes.

■ Tipos de rotor

□ Rotor de jaula de ardilla

Existen diversos tipos de rotores de jaula de ardilla, todos ellos situados en la posición que indica la *figura 6*.

Desde el menos común hasta el más común:

• Rotor resistivo

El rotor resistivo se encuentra normalmente como jaula simple (ver su definición más abajo). La jaula está cerrada por dos anillos resistivos a cada lado (de una aleación especial de acero inoxidable, sección reducida, etc.).

Estos motores tienen un deslizamiento sustancial con par nominal. El par de arranque es alto y la corriente de arranque es baja (⇒ *Fig. 7*).

Su eficiencia es baja debido a las pérdidas en el rotor.

Estos motores están diseñados para usos que requieren un deslizamiento para adaptar la velocidad de acuerdo con el par, como es el caso de:

- motores que mueven trenes de laminación o grúas pórtico (aplicaciones donde se reparte la carga),
- enrolladores/desenrolladores con motores Alquist (ver nota) diseñados para este propósito,
- usos que requieren un gran par de arranque con una corriente de arranque limitada.

Su velocidad puede ser controlada cambiando únicamente la tensión, si bien esta función se está sustituyendo por convertidores de frecuencia. La mayoría de motores de rotor resistivo son "auto-refrigerados" pero algunos necesitan un motor adicional para mover el ventilador.

Nota: estos motores son usados con un controlador de velocidad y su corriente de calado es cercana a su corriente nominal; la curva par/velocidad se desploma rápidamente. Con un suministro variable, esta característica puede ser adaptada para ajustar el par motor a la tracción requerida.

• Rotor de jaula de ardilla simple

En las muescas o ranuras alrededor del rotor (en la parte exterior del cilindro formado por chapas apiladas), hay una serie de conductores unidos en cada extremo por un anillo metálico. El par generado por el campo rotativo se ejerce en estos conductores. Con tal de obtener un par regular, los conductores están ligeramente inclinados respecto del eje del motor. El aspecto de todo ello es el de una jaula de ardilla, de ahí el nombre.

La jaula de ardilla, por norma general, es una única pieza (sólo en el caso de grandes motores se compone de varias piezas). El aluminio es inyectado a presión, y los anillos con las aletas de refrigeración, fundidos en la misma operación, aseguran el cortocircuitado de los conductores del rotor.

Estos motores tienen un bajo par al arrancar, si bien la corriente absorbida en este proceso es mucho mayor que la corriente nominal (⇒ *Fig. 7*).

3. Motores y cargas

Por otro lado, con par nominal su deslizamiento es mínimo. Se utilizan mayoritariamente para mejorar la eficiencia de instalaciones con bombas y ventiladores. Usado en combinación con convertidores de frecuencia para controlar la velocidad, son la solución perfecta para los problemas con el par y la corriente en el arranque.

- **Rotor de jaula de ardilla doble**

En este caso se tienen dos jaulas concéntricas, una exterior, de sección reducida y gran resistencia, y una interior, de gran sección y baja resistencia:

- Al principio del arranque, la frecuencia de la corriente del rotor es elevada y el efecto piel resultante provoca que toda esta corriente circule en la periferia del rotor y, por tanto, en una sección reducida de los conductores. El par en la jaula exterior es elevado y la corriente baja ($\Rightarrow$ Fig. 7).
- Al final del arranque, la frecuencia baja en el rotor, facilitando el paso del flujo a través de la jaula interior. El motor se comporta como si estuviera compuesto por una única jaula no resistiva. En estado estacionario, la velocidad es ligeramente más baja que en el caso de un motor con una única jaula.

- **Rotor de ranuras profundas**

Este es el rotor estándar.

Sus conductores se sitúan dentro de las muescas trapezoidales, con el lado corto del trapecio mirando hacia la parte externa del rotor.

Funciona de una manera similar al motor con rotor de doble jaula: el valor de la corriente del rotor varía inversamente con su frecuencia.

Por tanto:

- al arrancar, el par es alto y la corriente baja,
- en estado estacionario, la velocidad es parecida al caso de los motores con rotor de jaula simple.

- **Anillos rozantes**

En este caso, en las muescas exteriores del rotor se sitúan unos devanados, como ocurre en el estator ($\Rightarrow$ Fig. 8).

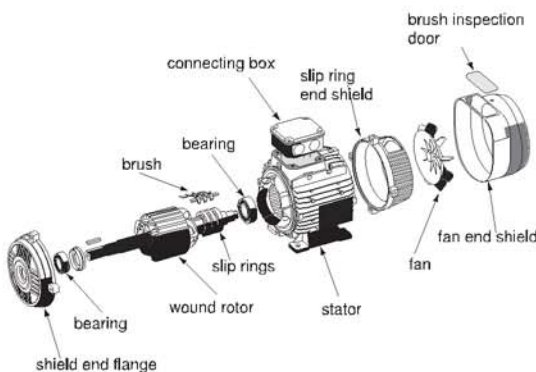
El rotor generalmente es trifásico. Un extremo de cada devanado se conecta a un punto común (conexión en estrella). El otro extremo puede ser conectado a un acoplador centrífugo o bien a tres anillos de cobre aislados contruados en el rotor.

Unas escobillas de grafito conectadas con el dispositivo de arranque frotan estos anillos.

Dependiendo del valor de las resistencias en el circuito del rotor, el motor puede desarrollar un par de arranque de hasta 2.5 veces el nominal.

La corriente de arranque es virtualmente proporcional al par desarrollado en el eje del motor.

Esta solución está dando paso a los sistemas electrónicos combinados con motores estándar de jaula de ardilla, dado que soluciona muchos problemas derivados del mantenimiento (no hay que sustituir escobillas ni ajustar resistencias), reduce la disipación de potencia en las resistencias y mejora radicalmente la eficiencia de la instalación. Es por ello que estos motores se utilizan poco en la actualidad.



↑ Fig. 8 Motor de anillos rozantes

3. Motores y cargas

3.2 Motores de corriente alterna monofásicos asíncronos

El motor monofásico, menos usado en la industria que el trifásico, se utiliza de manera notable en aplicaciones de baja potencia y en edificios con alimentación monofásica a 230V.

■ Motores monofásicos de jaula de ardilla

Para una misma potencia, son menos voluminosos que los trifásicos.

La eficiencia y el factor de potencia son más bajos que en un motor trifásico y varían considerablemente en función de las dimensiones y del fabricante.

En Europa, el motor monofásico es poco usado en la industria, pero en EEUU existen motores monofásicos de hasta alrededor de 10kW.

A pesar de no ser muy usado, un motor monofásico de jaula de ardilla puede alimentarse a través de un convertidor de frecuencia, si bien pocos fabricantes ofrecen este tipo de producto.

□ Estructura

Como en el caso del motor trifásico, el motor monofásico consta de dos partes: el estátor y el rotor.

• Estátor

Con un determinado número de pares de polos; sus bobinas están conectadas a la red de alimentación.

• Rotor

Usualmente, de tipo jaula de ardilla.

□ Principio de funcionamiento

Imaginemos un estátor con dos devanados conectados a la red principal por L1 y N ($\Rightarrow$ Fig. 9).

La corriente monofásica alterna genera un campo H en el rotor -que resulta de la superposición de los campos H1 y H2 del mismo valor rotando en sentidos inversos.

En parada, con el estátor alimentado, estos campos tienen igual deslizamiento en relación con el rotor, por lo que generan dos pares opuestos iguales.

El motor no puede arrancar.

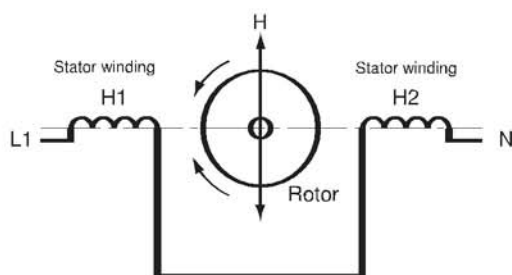
Una acción mecánica sobre el rotor provoca deslizamientos diferentes. Uno de los pares se reduce mientras que el otro aumenta. El par resultante arranca el motor en la dirección que fue movido por la acción mecánica.

Para solucionar este problema durante el arranque, se inserta otra bobina en el estátor a 90°.

Esta fase auxiliar es alimentada por una inductancia o una capacitancia; una vez que el motor ha arrancado, la fase auxiliar puede ser desconectada mediante un contacto centrífugo.

Otra solución consiste en usar espiras cortocircuitadas, alojadas en el estátor, que hacen que el campo se deslice y permiten el arranque del motor. Este tipo de motor solo se encuentra en dispositivos de baja potencia (menos de 100W) ($\Rightarrow$ Fig. 10).

Un motor trifásico (de hasta 4kW) puede ser usado como uno monofásico: la capacitancia de arranque se instala en serie o paralelo con el devanado sin usar. Este sistema solo puede ser considerado como provisional puesto que el rendimiento del motor se reduce considerablemente. Los manuales del fabricante informan sobre cableado, valores capacitivos y "derating".



↑ Fig. 9 Principio de funcionamiento de un motor monofásico asíncrono



↑ Fig. 10 Motor para aplicación de baja potencia

3. Motores y cargas



↑ Fig. 11 Motor monofásico universal

■ Motores monofásicos universales

Estos son los motores más numerosos en el mundo a pesar de ser poco usados en la industria. Se usan en aplicaciones domésticas y en herramientas portátiles.

Su estructura es similar a la de los motores de continua de excitación serie (⇒ Fig. 11). Dado que la unidad se alimenta con corriente alterna, el flujo en la máquina se invierte al mismo tiempo que la tensión, de tal manera que el par siempre está en el mismo sentido.

Tiene un estátor devanado y un rotor también devanado. Para conmutar utiliza un colector y unas escobillas.

Alcanza potencias de hasta 1000W y su velocidad de rotación en vacío llega alrededor de las 10.000 rpm. Son motores diseñados para interiores.

Su eficiencia es baja.

3

3.3 Motores de corriente alterna síncronos

■ Motores síncronos de rotor magnético

□ Estructura

Como en el caso de los motores asíncronos, el motor síncrono consta de un estátor y de un rotor separados por el entrehierro. Se diferencia en el hecho que el flujo en el entrehierro no es debido a la corriente del estátor sino debido a imanes de tipo permanente o a corriente del inductor de una fuente externa de CC que alimenta los devanados del rotor.

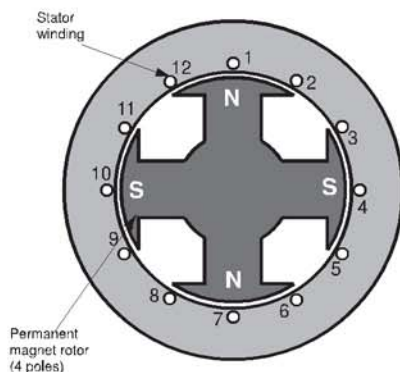
• Estátor

El estátor consta de un cuerpo y de un circuito magnético usualmente construido de chapas de acero al silicio con devanados trifásicos, similar al caso de un motor asíncrono alimentado con CA trifásica, para producir un campo rotativo.

• Rotor

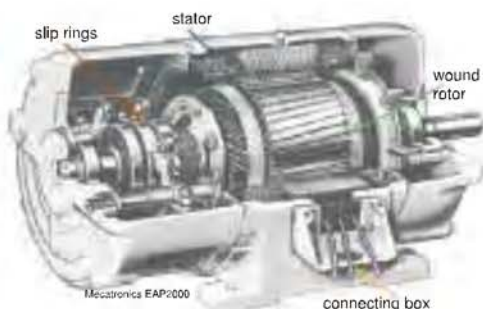
El rotor tiene imanes permanentes o bobinas a través de las cuales circula una CC que crea polos norte-sur intercalados. A diferencia del caso de las máquinas de tipo asíncrono, el rotor gira exactamente a la velocidad del campo rotativo, siendo el deslizamiento nulo.

Así pues, hay dos tipos distintos de motor síncrono: de rotor con imanes de tipo permanente y de rotor devanado.



↑ Fig. 12 Sección de un motor síncrono con 4 polos permanentes

- En el primer caso, el rotor se equipa con imanes permanentes (⇒ Fig. 12), usualmente de tierras raras para producir un campo de gran potencia en un espacio reducido. El estátor tiene devanados trifásicos. Estos motores soportan grandes sobrecorrientes para conseguir una gran aceleración. Generalmente, suelen tener instalado un controlador de velocidad, diseñado específicamente para mercados como el de la robótica o el de las máquinas herramienta donde los motores de dimensiones reducidas, la aceleración y la amplitud de banda son condiciones imprescindibles.
- En el segundo caso, el rotor es devanado (⇒ Fig. 13). Éste se conecta a unos anillos si bien se pueden encontrar otras construcciones como por ejemplo diodos rotativos. Esta máquina es reversible y puede trabajar como generador (alternador) o motor. Durante mucho tiempo, fueron mayoritariamente usados como alternadores – como motores solamente se utilizaban cuando era necesario mover cargas a una velocidad fijada a pesar de las grandes variaciones que se produjeran en el par resistente.



↑ Fig. 13 Motor síncrono de rotor devanado

El desarrollo de los convertidores directos de frecuencia (de tipo cicloconvertidor) o de los convertidores indirectos que conmutan de forma natural, gracias a la habilidad de las máquinas síncronas para generar energía reactiva ha posibilitado producir variadores de velocidad potentes, fiables y muy competitivos comparados con otras soluciones "rivales" cuando la potencia pasa de 1MW.

3. Motores y cargas

Si bien la industria generalmente usa motores asíncronos en el rango de potencia de 150 kW a 5MW, es por encima de 5MW donde los accionamientos con motores síncronos tienen un lugar destacado, combinados con variadores de velocidad.

□ Características de funcionamiento

El par que da una máquina síncrona es proporcional a la tensión que se le aplica mientras que en el caso de una máquina asíncrona es proporcional al cuadrado de esta misma tensión.

A diferencia de un motor asíncrono, puede trabajar con un factor de potencia igual a la unidad o muy próximo a ese valor.

Comparado con un motor asíncrono, un motor síncrono presenta una serie de ventajas en relación con la alimentación del mismo con una red de tensión y frecuencia constantes:

- la velocidad del motor es constante, sea cual sea la carga,
- puede generar energía reactiva y así ayudar a mejorar el factor de potencia de una instalación,
- puede soportar grandes caídas de tensión (del orden del 50%) sin llegar a calarse debido a su capacidad de sobreexcitación.

Sin embargo, un motor síncrono alimentado directamente desde la red principal con tensión y frecuencia constantes tiene dos inconvenientes:

- dificultad en el arranque; si no hay controlador de velocidad, el arranque se debe hacer sin carga, bien de forma directa (para motores pequeños), bien por un motor de arranque que lo lleve cerca de la velocidad de sincronismo antes de conectarlo a la red principal,
- puede calarse si el par resistente supera el par electromagnético máximo y, si ello ocurre, debe repetirse todo el proceso de arranque del motor síncrono de nuevo.

■ Otros tipos de motores síncronos

Para acabar con el panorama de motores industriales, veremos los motores lineales, los motores asíncronos sincronizados y los motores paso a paso.

□ Motores lineales

Su estructura es la misma que la de los motores síncronos de rotación: constan de un estátor ("plate") y de un rotor ("forcer") situados en línea. En general, el "plate" se mueve por una guía a lo largo del "forcer".

Dado que este tipo de motor funciona sin ningún tipo de dispositivo mecánico intermedio para transformar el movimiento, no existe juego alguno.

□ Motores asíncronos sincronizados

Son motores de inducción. En la fase de arranque, el motor trabaja en modo asíncrono y cambia a modo síncrono cuando está cercano a la velocidad de sincronismo.

Si la carga mecánica aumenta hasta hacerse muy elevada, el sistema deja el modo síncrono y vuelve al modo asíncrono.

Esta característica es el resultado de una estructura específica del rotor y está pensada para motores de baja potencia.

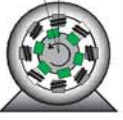
□ Motores paso a paso

Los motores paso a paso funcionan a partir de los pulsos eléctricos que alimentan sus bobinas. Dependiendo de la alimentación, pueden ser:

- unipolar si las bobinas se alimentan siempre con una tensión que está en el mismo sentido;
- bipolar si las bobinas se alimentan primero en un sentido y luego en el otro. Se crean polos norte-sur alternativos.

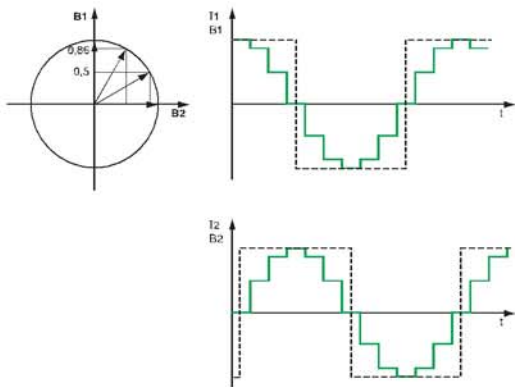
Pueden ser de reluctancia variable, magnéticos o híbrdos (≡ Fig. 14).

El mínimo ángulo de rotación entre dos cambios de pulsos eléctricos se llama "paso". Un motor se caracteriza por el número de pasos por revolución. Los valores más comunes son 48, 100 o 200 pasos por revolución.

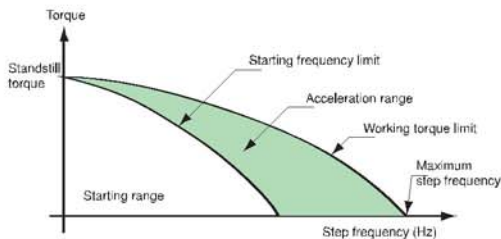
Tipo	Bipolar de imán permanente	Unipolar de reluctancia variable	Bipolar híbrido
Características	2 fases, 4 cables	4 fases, 8 cables	2 fases, 14 cables
Pasos/rev.	8	24	12
Etapas de funcionamiento			
Paso 1			
Paso intermedio			
Paso 2			

↑ Fig. 14 Tipos de motores paso a paso

3. Motores y cargas



↑ Fig. 15 Pasos de corriente en las bobinas del motor para reducir su paso



↑ Fig. 16 Par máximo en función de la frecuencia de los pasos

El motor rota de manera discontinua. Para mejorar la resolución, el número de pasos se puede ampliar electrónicamente (funcionamiento en micropasos). Ello se describe con detalle en la sección dedicada al control electrónico de la velocidad.

Variar la corriente en las bobinas por graduación ($\Rightarrow$ Fig. 15) tiene como resultado un campo que se desliza de un paso al siguiente y que lo reduce.

Algunos circuitos para funcionamiento en micropaso multiplica por 500 el número de pasos en el motor cambiando, por ejemplo, de 200 a 100.000 pasos.

La electrónica puede ser utilizada para controlar la cronología de los pulsos y para contarlos. Los motores paso a paso y sus circuitos de control regulan la velocidad y la amplitud de rotación del eje con gran precisión.

Así pues se comportan de manera similar a los motores síncronos cuando el eje rota constantemente, es decir, con unos límites específicos de frecuencia, par e inercia en la carga ($\Rightarrow$ Fig. 16).

Si estos límites son excedidos, el motor se cala y se para.

El posicionamiento angular preciso es posible sin lazo cerrado. Estos motores, generalmente de potencias inferiores al kW, están diseñados para máquinas pequeñas de baja tensión. En la industria, son usados para aplicaciones de posicionamiento: herramientas de corte, control de válvulas, dispositivos ópticos y de medida, carga y descarga de máquinas-herramienta, etc.

La simplicidad de esta solución la hace especialmente barata (no hay lazo cerrado). Los motores paso a paso de imán permanente tienen además la ventaja de un par en reposo cuando no hay alimentación. Sin embargo, la posición inicial de la parte móvil debe ser conocida e integrada por electrónica para asegurar un control eficiente.

3.4 Motores de corriente continua



↑ Fig. 17 Motor de CC

Los motores de CC de excitación independiente ($\Rightarrow$ Fig. 17) son todavía usados para aplicaciones de velocidad variable, si bien tienen un rival muy competitivo como es el motor asíncrono equipado con convertidor de frecuencia.

Son fáciles de miniaturizar e ideales para máquinas de baja potencia y de baja tensión. Además, permiten un control óptimo de la velocidad hasta varios megavatios con tecnologías electrónicas baratas y de altas prestaciones (rango de variación normalmente desde 1 hasta 100)

También permiten un ajuste preciso del par tanto si trabajan en motor como en generador. Su velocidad de rotación nominal, independiente de la frecuencia de alimentación, es fácil de adaptar a todos los usos durante la fase de fabricación.

Desgraciadamente, no son tan robustos como los motores asíncronos, y los componentes y su mantenimiento son mucho más caros ya que dispone de escobillas y colector.

■ Estructura

Un motor de CC consta de las siguientes partes:

□ Inductor o estátor

El estátor es una parte del circuito magnético fijo, con bobinas en ella situadas para producir un campo; estas bobinas pueden ser sustituidas por imanes de tipo permanente, especialmente en aplicaciones de baja potencia. El electroimán resultante tiene dos cavidades cilíndricas entre sus polos.

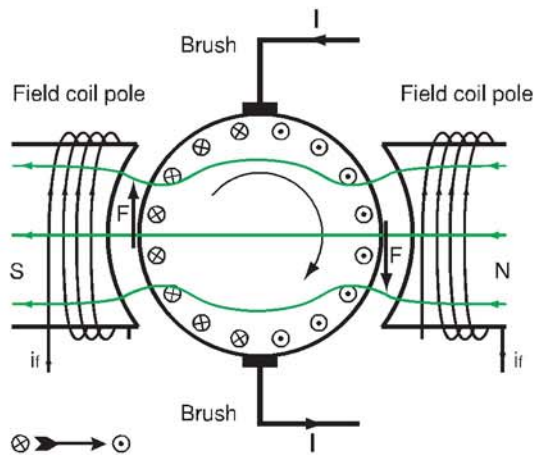
□ Armadura o rotor

El rotor es un cilindro con chapas magnéticas aisladas las unas de las otras y situadas perpendicularmente al eje de dicho cilindro. La armadura es móvil, rota alrededor de su eje y está separada del inductor por el entrehierro. Los conductores están distribuidos regularmente alrededor de ella.

□ Colector y escobillas

El colector se construye con la armadura. Las escobillas son inmóviles y friegan el colector para alimentar los conductores de la armadura.

3. Motores y cargas



↑ Fig. 18 Generación del par en un motor de CC

■ Principio de funcionamiento

Cuando el inductor es alimentado, éste crea un campo magnético (flujo de excitación) en el entrehierro, dirigido por los radios de la armadura. El campo magnético "entra" en la armadura por el lado del polo norte del inductor y "sale" de ella por el lado del polo sur.

Cuando la armadura es alimentada, sus conductores, situados bajo un polo inductor, (en el mismo lado que las escobillas) son cruzados por corrientes en el mismo sentido y, por tanto, sujetas a una fuerza de Lorentz. Los conductores bajo el otro polo están sujetos a una fuerza del mismo valor en sentido contrario. Ambas fuerzas crean un par que provoca la rotación de la armadura del motor o rotor ($\Rightarrow$ Fig. 18).

Cuando la armadura del motor se alimenta con una tensión continua o rectificada de valor U y el rotor está en movimiento, una fuerza contraelectromotriz E se produce. Su valor es $E = U - RI$.

RI representa la caída de tensión por ohm en la armadura. La fuerza de tipo contraelectromotriz E se relaciona con la velocidad y la excitación según $E = k \omega \phi$ donde:

- k es una constante del motor,
- ω es la velocidad angular,
- ϕ es el flujo.

Esta relación muestra que, con excitación constante, la fuerza contraelectromotriz E , proporcional a ω , es una imagen de la velocidad.

El par se relaciona con el flujo del inductor y con la corriente en la armadura según:
 $T = k \phi I$

Cuando el flujo se reduce, el par baja.

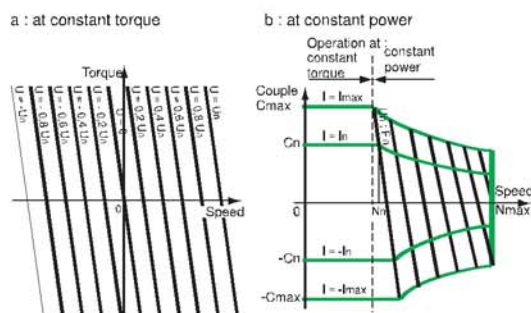
Hay dos maneras de incrementar la velocidad:

- incrementar la fuerza contraelectromotriz E y, por consiguiente, la tensión de alimentación: a esto se le conoce como funcionamiento a "par constante".
- reducir el flujo de excitación y, por consiguiente, la corriente de excitación, y mantener una tensión de alimentación constante: a esto se le conoce como funcionamiento a "potencia constante". Ello requiere que el par se reduzca si la velocidad se incrementa ($\Rightarrow$ Fig. 19).

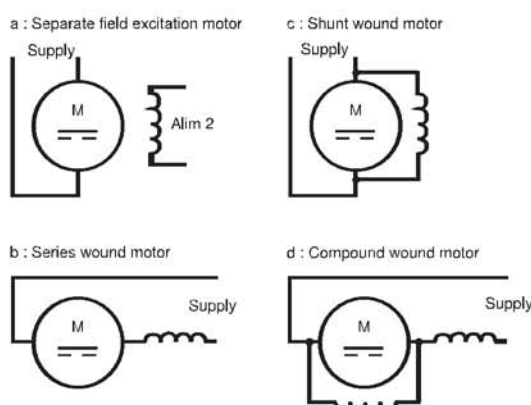
Además, hay que considerar que para valores elevados de "potencia constante" este último modo de funcionamiento requiere motores especialmente adaptados (mecánica y eléctricamente) para evitar problemas de conmutación.

El funcionamiento de estos dispositivos (motores de CC) es reversible:

- si la carga se opone al movimiento de rotación (par resistente), el dispositivo produce un par y opera como un motor,
- si la carga produce el movimiento del eje (par generador), el dispositivo genera energía eléctrica y, por lo tanto, en este caso está actuando como un generador.



↑ Fig. 19 Curvas par/velocidad de un motor de excitación independiente



↑ Fig. 20 Esquemas de diferentes motores de CC

■ Tipos de motores de CC de rotor devanado ($\Rightarrow$ Fig. 20)

• a y c excitación paralelo (independiente y "shunt")

Las bobinas de la armadura y del inductor están conectadas en paralelo o bien alimentadas con dos fuentes diferentes para adaptarse a las características de la máquina (por ejemplo, tensión de la armadura a 400V y del inductor a 180V). El sentido de giro se puede cambiar invirtiendo un devanado, usualmente el de la armadura debido a que sus constantes de tiempo son más bajas. La mayoría de controladores bidireccionales para motores de CC trabajan de esta manera.

• b excitación serie

Esta estructura se parece mucho a la de tipo "shunt". El devanado del inductor se conecta en serie con el devanado de la armadura, de ahí su nombre. El sentido de giro se cambia invirtiendo las polaridades de la armadura o del inductor. Este motor se usa básicamente para tracción; en el ámbito ferroviario, por ejemplo, los trenes más antiguos utilizaban este tipo de motor de CC; en la actualidad, se utilizan mayoritariamente motores asíncronos.

3. Motores y cargas

- **d excitación serie paralelo (compuesta)**

Esta tecnología combina los beneficios de los motores de excitación serie y paralelo. Tiene dos devanados. Uno es paralelo al de la armadura ("shunt") o bien tiene excitación independiente. Por él pasa una corriente débil si la comparamos con la corriente de trabajo. El otro devanado está en serie. El motor tiene un flujo adicional bajo los efectos combinados de los amperios-vuelta de ambos devanados. En caso contrario, tiene un flujo sustractivo, pero este sistema no se utiliza debido a su funcionamiento inestable con grandes cargas.

3.5 Operando con motores asíncronos

3

■ Motores de jaula de ardilla

□ Efectos al variar la tensión

- Efectos en la corriente

El incremento de la tensión tiene dos efectos. Al arrancar, la corriente será superior a la nominal, y en funcionamiento normal la máquina absorberá una corriente que se incrementará bruscamente de tal manera que tendremos un sobrecalentamiento, aunque se trabaje con poca carga. Este incremento es debido a la saturación de la máquina.

- Efectos en la velocidad

Cuando la tensión varía, la velocidad síncrona no se ve alterada, pero cuando el motor está en carga, un incremento de la tensión hace que el deslizamiento se reduzca ligeramente. En la práctica, esta propiedad no puede ser usada debido a la saturación del motor, ya que la corriente se incrementa bruscamente y la máquina se sobrecalienta. Análogamente, si la tensión baja el deslizamiento aumenta y la corriente absorbida aumenta para mantener el par, lo que puede sobrecalentarla.

Además, dado que el par máximo disminuye con el cuadrado de la tensión, hay probabilidad de que el motor se amorre si la tensión baja bruscamente.

□ Efectos al variar la frecuencia

- Efectos en el par

Como en cualquier máquina eléctrica, el par de un motor asíncrono es del tipo que sigue: $T = K I \phi$.

(K = factor constante que depende de la máquina) .

En el esquema equivalente como se muestra ($\Rightarrow$ Fig. 21), la bobina L produce el flujo e I_0 es la corriente de magnetización. Nótese que el esquema equivalente de un motor asíncrono es el mismo que el de un transformador dado que ambas máquinas están caracterizadas por la misma ecuación.

En una aproximación inicial, dejando de lado la resistencia y considerando sólo la inductancia de magnetización (es decir, para frecuencias de escasos Hertz), la I_0 se expresa como: $I_0 = U / 2\pi L f$ mientras que el flujo se expresa de esta manera: $\phi = k I_0$.

Por otro lado, el par desarrollado por la máquina se expresa como:

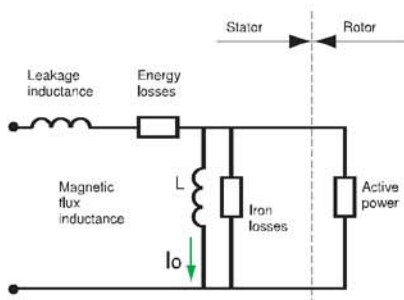
$T = K k I_0 I$. I_0 e I son las corrientes nominales para las que se diseñó el motor.

Para ajustarse a los límites, I_0 debe mantenerse a su valor nominal, que sólo puede ser en caso que la relación U/f se mantenga constante.

Consecuentemente, el par y las corrientes nominales se pueden obtener siempre y cuando la tensión de alimentación U pueda ser ajustada a la frecuencia.

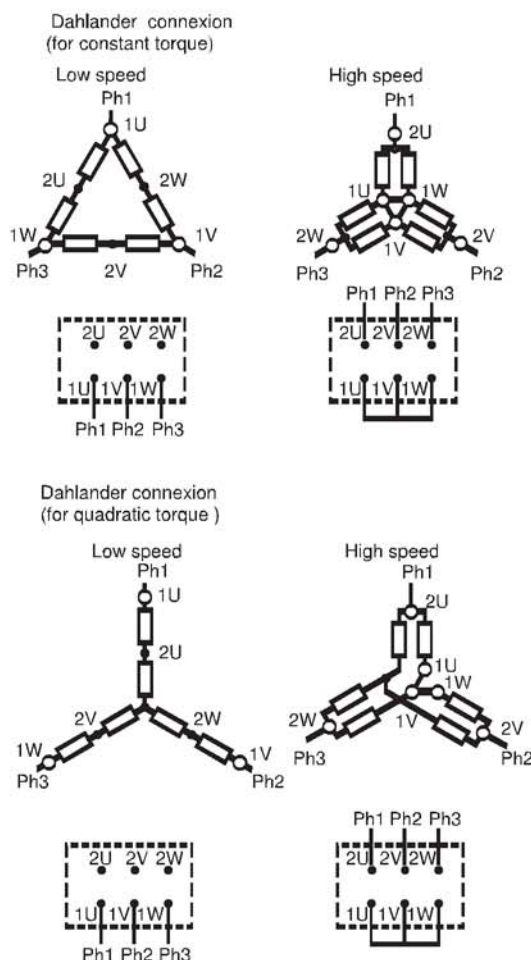
Cuando esto no es posible, la frecuencia puede todavía ser incrementada. Pero la corriente I_0 se reduce al igual que lo hace el par ya que no es posible superar la corriente nominal de la máquina continuamente sin riesgo de producir un sobrecalentamiento.

Para trabajar con un par constante a cualquier velocidad la relación U/F se debe mantener constante. Esto es lo que hace un convertidor de frecuencia.



↑ Fig. 21 Esquema equivalente de un motor asíncrono

3. Motores y cargas



↑ Fig. 22 Tipos de conexión Dahlander

• Efectos en la velocidad

La velocidad de rotación de un motor asíncrono es proporcional a la frecuencia de la tensión de alimentación. Esta propiedad a menudo es utilizada para manejar máquinas especiales a altas velocidades, por ejemplo con una alimentación a 400Hz (rectificadoras, aparatos quirúrgicos o de laboratorio, etc.). La velocidad, pues, se puede variar ajustando la frecuencia, por ejemplo de 6 a 50Hz (cintas transportadoras, montacargas, etc.).

□ Control de velocidad en motores trifásicos asíncronos

Durante mucho tiempo, existieron pocas maneras de controlar la velocidad en los motores asíncronos. Los motores de jaula de ardilla debían ser usados mayoritariamente a su velocidad nominal.

Por entonces, se podían conseguir ciertas velocidades prefijadas cambiando el número de polos o con devanados separados en el estátor, técnicas aún usadas.

Con la llegada de los convertidores de frecuencia, los motores de jaula de ardilla tienen ahora un control de la velocidad, por lo que pueden ser usados para aplicaciones hasta hace poco reservadas a los motores de CC.

□ Motores de acoplamiento de polos

Como ya hemos visto, la velocidad de un motor de jaula de ardilla depende de la frecuencia de alimentación y del número de pares de polos. Así pues, un motor con dos o más velocidades se puede construir combinando los devanados del estátor para hacerlos corresponder con diferentes números de polos.

Este tipo de motor sólo permite relaciones de velocidad de 1 a 2 (4 y 8 polos, 6 y 12 polos, etc.). Consta de seis bornas (⇒ Fig. 22).

Para una de las velocidades, la red se conecta a las tres bornas correspondientes. Para la segunda, dichas bornas están conectadas entre sí y la red se alimenta a las otras tres.

Normalmente el arranque se realiza de manera directa, tanto a alta velocidad (AV) como a baja velocidad (BV).

En ciertos casos, si las condiciones de uso lo requieren y el motor lo permite, el dispositivo de arranque pasa automáticamente a baja velocidad antes de activar la alta velocidad o antes de la parada.

Dependiendo de las corrientes absorbidas durante los acoplamientos a baja velocidad o a alta velocidad, uno o dos relés térmicos pueden encargarse de la protección.

El rendimiento de estos motores y su factor de potencia suelen ser bajos.

□ Motores de devanados estatóricos separados

Estos motores constan de dos devanados estatóricos eléctricamente independientes y permiten obtener cualquier relación de dos velocidades. Dado que los devanados de BV deben soportar las restricciones mecánicas y eléctricas derivadas del funcionamiento del motor a AV, sus características eléctricas dependen de ello. Un motor funcionando a BV puede absorber una corriente superior que en AV.

También es posible obtener motores de tres o cuatro velocidades mediante el acoplamiento de los polos en uno de los devanados estatóricos o en ambos. Esta solución requiere que los devanados dispongan de tomas adicionales.

■ Motores de anillos rozantes

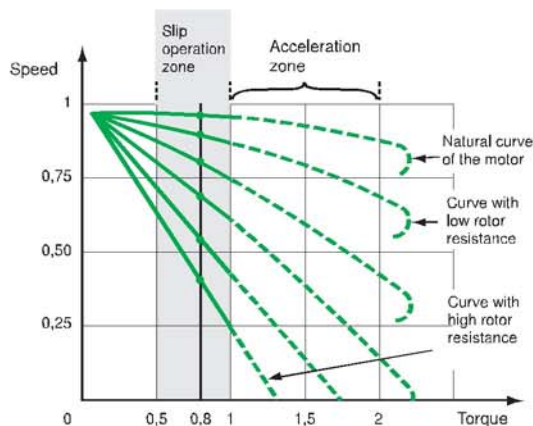
□ Resistencias en el rotor

Una resistencia conectada exteriormente con el circuito del rotor define, en este tipo de motor:

- su par de arranque,
- su velocidad.

Una resistencia permanentemente conectada a los terminales de un motor de anillos rozantes reduce su velocidad y, cuanto más grande sea su valor, mayor será la disminución de la velocidad. Una solución simple para variar la velocidad.

3. Motores y cargas



† Fig. 23 Característica par/velocidad de un motor de anillos rozantes

Regulación de velocidad por deslizamiento

Las resistencias "de deslizamiento" pueden cortocircuitarse en varias posiciones para obtener la regulación discontinua de la velocidad o la aceleración progresiva y el arranque completo del motor. Deben soportar la duración del funcionamiento, especialmente cuando su función consiste en variar la velocidad. Por este motivo, su volumen y su coste pueden ser elevados.

Este proceso es sumamente simple pero cada vez se utiliza con menos frecuencia debido a dos inconvenientes importantes:

- durante la marcha a velocidad reducida, gran parte de la energía tomada de la red se disipa y se pierde en las resistencias,
- la velocidad que se obtiene no es independiente de la carga pero varía con el par resistente que aplica la máquina al eje del motor ($\Rightarrow$ Fig. 23).

Para una resistencia dada, el deslizamiento es proporcional al par. Por ejemplo, la bajada de velocidad que se obtiene mediante una resistencia puede ser del 50% a plena carga y sólo del 25% a media carga, mientras que la velocidad en vacío permanece prácticamente invariable..

Si un operador vigila siempre la máquina, puede modificar el valor de la resistencia para establecer la velocidad de una zona determinada. Esta práctica funciona en el caso de par relativamente importante, pero la regulación resulta prácticamente imposible en el caso de par débil. De hecho, si se inserta una resistencia muy fuerte para obtener un punto "velocidad débil a par débil", la menor variación del par resistente hace aumentar la velocidad a cerca del 100%. Esto es muy inestable.

En el caso particular de las máquinas con variación del par resistente en función de la velocidad, el ajuste puede ser igualmente imposible.

Ejemplo de funcionamiento en deslizamiento. Con una máquina que aplique un par resistente de 0,8 Cn al motor, pueden obtenerse distintas velocidades, que se representan con el signo $\bullet$ en el diagrama ($\Rightarrow$ Fig. 23).

A igualdad de par, la velocidad disminuye cuando la resistencia rotórica aumenta.

Otros sistemas de regulación de la velocidad

Variador de tensión

Este dispositivo es utilizado únicamente en motores asíncronos de baja potencia. Requiere que éstos sean de jaula de ardilla.

La velocidad se controla incrementando el deslizamiento del motor una vez que cae la tensión.

Su uso estaba muy extendido en sistemas de refrigeración, bombas y compresores, dado que la disponibilidad de par daba unos resultados satisfactorios. De forma gradual está siendo sustituido por los convertidores de frecuencia.

Otros sistemas electromecánicos

Los sistemas electromecánicos de regulación de velocidad que se mencionan a continuación son menos utilizados que los variadores electrónicos.

Motores de corriente alterna con colector (Schrage)

Se trata de motores especiales. La variación de velocidad se obtiene modificando la posición de las escobillas del colector con respecto a la línea neutra.

Ralentizador de corrientes de Foucault

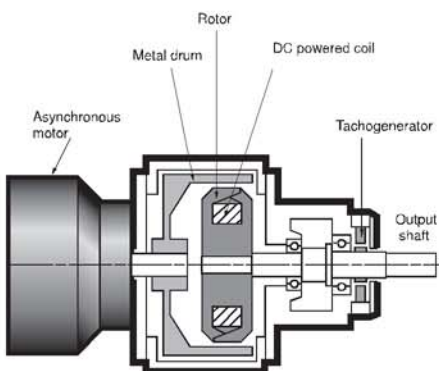
Consiste en un tambor conectado directamente a un motor asíncrono girando a velocidad constante y en un rotor con una bobina alimentada con corriente continua ($\Rightarrow$ Fig. 24).

El movimiento se transmite al eje de salida por acoplamiento electromagnético. El deslizamiento de la unidad puede ajustarse a través de la excitación de la bobina.

Un generador tacométrico interior controla la velocidad con precisión.

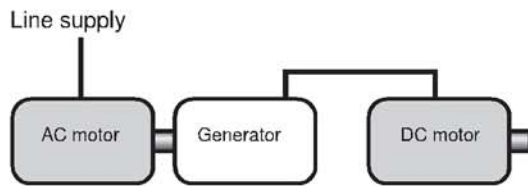
Se utiliza un sistema de ventilación para evacuar la calor producida. Esto era muy utilizado en aplicaciones de elevación de peso, y más en concreto en grúas.

Su estructura hace de éste un sistema robusto que puede ser utilizado para aplicaciones de uso discontinuo con una potencia de hasta 100kW.



† Fig. 24 Ralentizador de corrientes de Foucault

3. Motores y cargas



↑ Fig. 25 Grupo Ward Léonard

- **Grupo Ward Léonard**

Este dispositivo, muy utilizado en otros tiempos, es el precursor de los reguladores de velocidad de motores de CC. Tiene un motor de CA y un generador de CC que alimenta un motor de CC (≈ Fig. 25).

La velocidad se controla regulando la excitación del generador. Una pequeña corriente se usa para controlar una potencia de hasta varios cientos de kW en todos los cuadrantes de par y velocidad. Este tipo de regulación se utilizaba en trenes de laminación.

Este sistema era el más eficiente para regular la velocidad antes de que la aparición del semiconductor lo dejara obsoleto.

- **Reguladores de velocidad mecánicos e hidráulicos**

Los reguladores de velocidad mecánicos e hidráulicos son todavía usados hoy día.

Existen muchos sistemas mecánicos de regulación de velocidad (por polea-correa, por cojinete, por cono, etc.). Los inconvenientes de estos reguladores son la exigencia de un cuidadoso mantenimiento y el hecho de que no se prestan fácilmente al servocontrol. Los convertidores de frecuencia son, pues, una buena alternativa.

Los reguladores de velocidad hidráulicos también son bastante usados.

Tienen buena relación peso-potencia y capacidad para desarrollar un gran par de forma continua a velocidad nula. En la industria, se utilizan mayoritariamente en sistemas de servocomando.

Dado que este tipo de regulación de velocidad no es relevante para esta guía, no se describirá con detalle.

3.6 Comparativa de motores eléctricos

La tabla (≈ Fig. 26) da un resumen de todos los tipos de motores eléctricos disponibles, de sus características principales y de sus campos de aplicación.

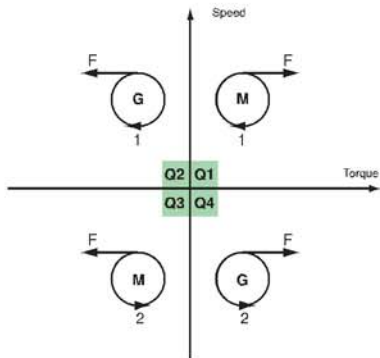
Hay que remarcar que los motores trifásicos asíncronos con rotor de jaula de ardilla son los más usados en la actualidad, debido mayoritariamente al desarrollo de los variadores de velocidad electrónicos, que posibilitan un ajuste perfecto a las exigencias de cada aplicación.

Type of motor	Asynchronous squirrel cage	Asynchronous slip-ring	Synchronous wound rotor	Rare earth rotor	Stepper	Direct current
	3 phases	Single-phase				
Cost of motor	Low	Low	High	High	Low	High
Sealed motor	Standard	Possible	Option, expensive	Option, expensive	Standard	Possible Very expensive
Starting direct on line	Easy	Easy	Special starting device	Impossible after a few kW	Not designed for	Not designed for
Speed control	Easy	Very unusual	Possible	Frequent	Always	Always
Cost of speed control solution	Increasingly cost-effective	Very cost-effective	Cost-effective	Cost-effective	Fairly cost-effective	Very cost-effective
Speed control performance	High to very high	Very low	Average	High to very high	Very high	High to very high
Mode	Constant or variable speed	Mainly constant speed	Constant or variable speed	Constant or variable speed	Variable speed	Variable speed
Industrial use	Universal	For low powers	Decreasing	High powers at medium voltage	High-dynamic machine tools	Open loop positioning for low powers

↑ Fig. 26 Comparativa de motores eléctricos

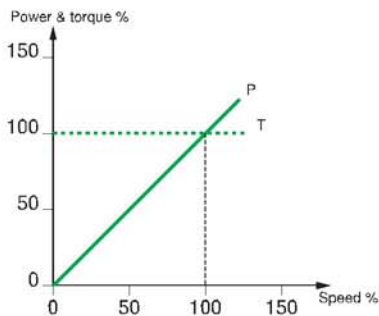
3. Motores y cargas

3.7 Tipos de carga

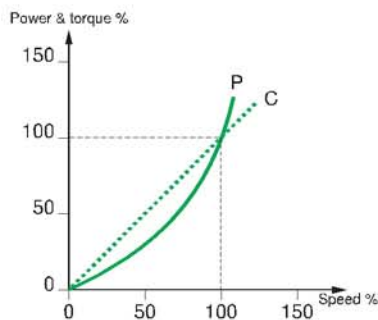


Rotation direction	Mode	Torque T	Speed S	Product TS	Quadrant
1 (clockwise)	Driver	yes	yes	yes	1
	Generator	yes	yes	yes	2
2 (anticlockwise)	Driver	yes	yes	yes	3
	Generator	yes	yes	yes	4

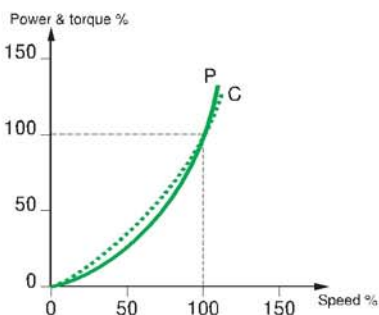
↑ Fig. 27 Las cuatro situaciones posibles para una máquina en un diagrama par-velocidad



↑ Fig. 28 Curva de funcionamiento a par constante



a



b

↑ Fig. 29 a/b Par variable (que se incrementa con v.)

Podemos clasificar las cargas en dos familias:

- las cargas activas que mueven un sólido o un fluido, o que le hacen cambiar de estado (por ejemplo de gas a líquido),
- las cargas pasivas que no generan una fuerza resistente, como es el caso de los sistemas de iluminación y de calefacción.

■ Cargas activas

Cuando hablamos de cargas activas, nos referimos a cualquier sistema que mantiene en movimiento un sólido o un fluido.

El movimiento de un objeto móvil implica cambiar su posición o velocidad, que a su vez implica aplicar un par para superar su oposición al movimiento además de acelerar la inercia de la carga. La velocidad del movimiento está directamente relacionada con el par aplicado.

□ Cuadrantes de funcionamiento

La figura 27 ilustra las cuatro posibles situaciones en el diagrama par-velocidad de una máquina.

Nótese que cuando una máquina trabaja como un generador debe tener una fuerza que lo mueva. Este estado se utiliza en particular para el frenado. La energía cinética del eje o bien se devuelve a la red de alimentación, o bien se disipa en una resistencia o, en caso de baja potencia, en pérdidas en la máquina.

□ Tipos de funcionamiento

• Funcionamiento a par constante

Se habla de funcionamiento a par constante cuando las características de la carga en estado estacionario son tales que el par requerido es más o menos el mismo, independientemente de la velocidad (⇒ Fig. 28).

Este es el modo de funcionamiento de máquinas como cintas transportadoras, machacadoras, etc. Para este tipo de usos, el dispositivo de arranque tiene que posibilitar un gran par de arranque (1.5 veces o más el par nominal) para superar la fricción estática y acelerar la máquina (inercia).

• Funcionamiento a par variable (par que se incrementa con la velocidad)

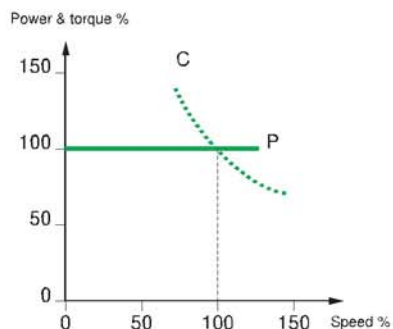
Las características de la carga implican que el par requerido aumenta con la velocidad. Esto particularmente se aplica a bombas helicoidales de desplazamiento positivo, donde el par aumenta linealmente con la velocidad (⇒ Fig. 29a), o a máquinas centrífugas (bombas y ventiladores) donde el par varía cuadráticamente con la velocidad (⇒ Fig. 29b).

La potencia de las bombas de desplazamiento varía con la velocidad al cuadrado.

La potencia de las bombas centrífugas varía con la velocidad al cubo.

Un arrancador para este tipo de uso tendrá un par de arranque menor que en el caso anterior (1.2 veces el par nominal es normalmente suficiente).

3. Motores y cargas



† Fig. 30 Par variable (que se reduce con v.)

• Funcionamiento a par variable (par que se reduce con la velocidad)

Para algunas máquinas, el par requerido se reduce cuando la velocidad aumenta. En particular, esto se aplica en operativas a potencia constante cuando el motor proporciona un par inversamente proporcional a la velocidad angular ($\Rightarrow$ Fig. 30).

Esto ocurre, por ejemplo, en un enrollador, donde la velocidad angular cae a medida que el diámetro del enrollador aumenta en recoger material. También es aplicable a husillos en máquinas-herramienta.

El rango de funcionamiento a potencia constante está limitado, a bajas velocidades, por la corriente disponible del variador de velocidad, y a altas velocidades por el par que el motor puede dar. El par disponible en motores asíncronos y la capacidad de conmutación de los motores de CC deberían ser por tanto comprobados con sumo cuidado.

La tabla ($\Rightarrow$ Fig. 31) da una lista de máquinas comunes con su característica de par en función de la velocidad.

Tipo de máquina	Característica par-velocidad
Cinta transportadora	Constante
Prensa rotativa	Constante
Bomba desp. helicoidal	Par se incrementa linealmente con velocidad
Bomba dosificadora	Constante
Bomba centrífuga	Par se incrementa con velocidad al cuadrado
Ventiladores y calefactores	Par se incrementa con velocidad al cuadrado
Compresor de husillo	Constante
Compresor en espiral	Constante
Compresor de pistón	Constante
Horno de cemento	Constante
Extrusora	Constante ó par se reduce linealmente con velocidad
Prensa mecánica	Constante
Enrollador y desenrollador	Constante ó par se reduce linealmente con velocidad
Pulper	Constante
Cortadora	Constante
Machacadora	Constante
Mezcladora	Par se incrementa linealmente con velocidad
Amasadora	Constante ó par se reduce linealmente con velocidad
Centrífugadora	Par se incrementa con velocidad al cuadrado
Husillo de máq. herramienta	Constante ó par se reduce linealmente con velocidad
Montacargas	Constante

† Fig. 31 Par característico según máquina

Cuando una máquina arranca, normalmente ocurre que el motor tiene que superar un par transitorio, como en una machacadora cuando empieza con la tolva llena. Puede existir además fricción en seco que desaparece cuando una máquina está funcionando, o bien al arrancar en frío quizá se necesite un par superior al normal (cuando está en caliente).

■ Cargas pasivas

Hay dos tipos de cargas pasivas utilizadas en la industria:

- calefacción,
- iluminación.

3. Motores y cargas

□ Calefacción

La calefacción es un elemento costoso en el ámbito industrial. Para mantener este coste bajo, las pérdidas en forma de calor deben ser reducidas; este factor depende del diseño del edificio y se escapa del ámbito de esta guía.

Cada edificio es un caso especial; es por ello que debe ser estudiado de forma separada.

Dicho esto, la gestión adecuada de un edificio puede proporcionar tanto comodidad como ahorros considerables. Para más información, por favor referirse a la *Guía de Instalaciones Eléctricas* de Schneider Electric o el *Cuaderno Técnico 206* disponibles en la página web de Schneider Electric.

Si fuera necesario, la mejor solución puede obtenerse a través de los expertos en equipamiento eléctrico del proveedor.

□ Iluminación

• Iluminación incandescente

La iluminación incandescente (registrada por Thomas Edison en 1879) fue una absoluta revolución y, durante años en adelante, la iluminación se basó en dispositivos con un filamento calentado a elevadas temperaturas para radiar luz visible. Este tipo de iluminación es todavía el más utilizado pero tiene dos grandes inconvenientes:

- eficiencia extremadamente baja, dado que gran parte de la electricidad se pierde en forma de calor,
- el dispositivo de iluminación tiene una vida útil de pocos centenares de horas y tiene que ser cambiado con regularidad. Algunas mejoras han permitido aumentar su vida útil (con el uso de gases nobles y halógenos).

Se da incluso el caso que algunos países (como Escandinavia) planean prohibir la iluminación incandescente.

• Iluminación fluorescente

Esta familia incluye los tubos fluorescentes y las bombillas fluocompactas. La tecnología usada es usualmente la de "mercurio a baja presión".

Tubos fluorescentes

Fueron introducidos en 1938. En estos tubos, una descarga eléctrica provoca que los electrones colisionen con el vapor de mercurio, que excita sus átomos y provoca la radiación ultravioleta.

El material fluorescente, que recubre el interior de los tubos, transforma la radiación en luz visible.

Los tubos fluorescentes disipan menos calor y duran más que la iluminación de incandescencia pero requieren utilizar dos dispositivos extra: uno para el arranque y otro llamado balasto para controlar la corriente del arco una vez encendidos.

Este último dispositivo es usualmente un reactor limitador de corriente en serie con el arco.

Lámparas fluocompactas (⇒ Fig.32)

Su principio es el mismo que el de los tubos fluorescentes. Las funciones de arranque y de balasto las realiza un circuito electrónico de la lámpara, que permite que los tubos sean más pequeños y que puedan ser doblados.

Estas lámparas fueron desarrolladas como una alternativa a las lámparas de incandescencia: ahorran gran cantidad de energía (sólo necesitan 15W en vez de 75W para iluminar con la misma intensidad) y duran mucho más (8.000 horas de media y hasta 20.000 en algunos casos).



↑ Fig. 32

Lámparas fluocompactas

3. Motores y cargas



↑ Fig. 33

Lámparas de descarga

Lámparas de descarga (⇒ Fig.33)

La luz se produce por una descarga eléctrica creada por dos electrodos rodeados de gas en una bombilla de cuarzo. Estas lámparas requieren un balasto, por lo general un reactor limitador de corriente, para controlar la corriente en el arco.

El rango de emisión depende de la composición del gas y se mejora si se incrementa la presión. Diversas tecnologías han sido desarrolladas para cumplir diferentes funciones.

Lámparas de vapor de sodio a baja presión

Tienen la mejor capacidad de iluminación pero un color pobre ya que radian una luz monocromática naranja.

Usos: iluminación de carreteras y túneles.

Lámparas de vapor de sodio a alta presión

En este caso, emiten una luz blanca teñida de naranja.

Usos: iluminación urbana, monumentos.

□ Lámparas de vapor de mercurio a alta presión

La descarga se produce en una bombilla cerámica o de cuarzo a presiones por encima de los 100kPa. Las lámparas de este tipo se conocen como bombillas fluorescentes y se caracterizan por la luz blanca azulada que emiten.

Usos: parkings, supermercados, almacenes.

• Lámparas de halogenuro metálico

Representan la tecnología más reciente. Las lámparas emiten un color con un amplio espectro.

El tubo cerámico aumenta la capacidad de iluminación y la estabilidad del color.

Usos: estadios, tiendas, focos.

• LED (Diodo Electro-Luminiscente)

Esta es una de las tecnologías con más futuro. Los LEDs emiten luz gracias al paso de una corriente eléctrica a través de un semiconductor.

Los LEDs se utilizan para muchas aplicaciones pero el reciente desarrollo de los diodos azules y blancos de gran capacidad de iluminación abre nuevas vías, en particular para señalización (semáforos, pantallas de seguridad o alumbrado de emergencia) e iluminación para vehículos.

Un LED consume una corriente media de 20mA, con una caída de tensión de 1.7 a 4.6V en función del color. Tales propiedades los hacen adecuados para bajas tensiones de alimentación, en particular para baterías.

La alimentación requiere del uso de un transformador, cosa que resulta del todo económicamente viable.

La ventaja de los LEDs es su bajo consumo con el resultado de una temperatura de funcionamiento muy reducida y una vida útil casi ilimitada. En un futuro muy cercano, será posible incorporar tal iluminación en edificios durante su fase de construcción.

Sin embargo, un diodo básico tiene una capacidad de iluminación muy baja. Para conseguir más capacidad hay que conectar varias unidades en serie.

Dado que los LEDs no tienen inercia térmica, se pueden utilizar en aplicaciones innovadoras como la transmisión simultánea de luz y datos. Para realizar esto, la alimentación se modula a alta frecuencia. El ojo humano no puede detectar esta modulación pero un receptor con el interface adecuado puede detectar la señal y utilizarla.

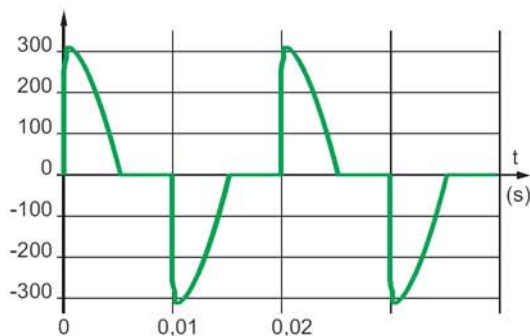
□ Alimentando las lámparas incandescentes

• Restricciones de la alimentación directa

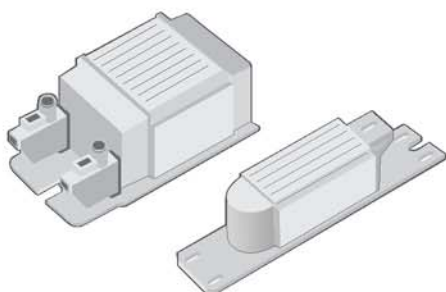
La resistencia del filamento varía ampliamente debido a las altísimas temperaturas (hasta 2500°C) que puede alcanzar durante el funcionamiento.

En frío, la resistencia es baja, con el resultado que la corriente al encender la lámpara, durante milisegundos, puede llegar a ser desde 10 hasta 15 veces el valor de la corriente nominal.

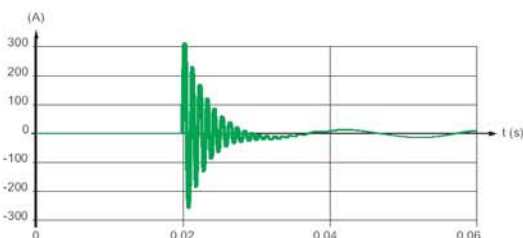
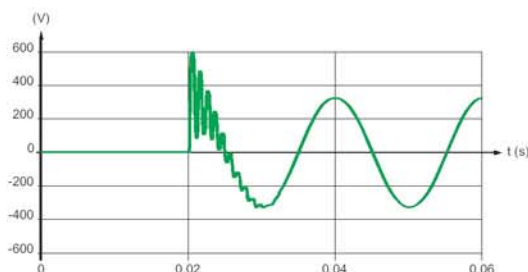
3. Motores y cargas



↑ Fig. 34 Forma de onda de la corriente



↑ Fig. 35 Balasto magnético



↑ Fig. 36 Formas de onda de tensión y corriente



↑ Fig. 37 Balasto electrónico

Esta restricción se aplica de igual modo a lámparas ordinarias y halógenas. Requiere reducir al máximo el número de lámparas que pueden ser alimentadas por el mismo dispositivo como un control remoto, un contactor modular o un relé en un circuito prefabricado.

• Variación de la luminosidad

Esto se puede conseguir variando la tensión eficaz que alimenta la lámpara.

La tensión usualmente se ajusta mediante un triac que varia el ángulo de conducción en el ciclo de la tensión de alimentación.

La forma de onda de la corriente se ilustra en la (⇒ Fig. 34).

La alimentación gradual de la lámpara además reduce, o incluso elimina, la corriente de encendido.

Nótese que al variación de la luminosidad:

- altera el "color" de la temperatura,
- reduce la vida de las lámpara halógenas si se mantiene una tensión baja durante largos periodos de tiempo. El filamento no se regenera de forma tan eficiente a bajas temperaturas.

Algunas lámparas halógenas se alimentan a baja tensión mediante el uso de un transformador. La magnetización del trafo puede producir un aumento desde 50 hasta 75 veces del valor de la corriente nominal durante algunos milisegundos.

Muchas veces se usan convertidores estáticos, que eliminan este inconveniente.

• Alimentando las lámparas fluorescentes y las lámparas de descarga

Los tubos fluorescentes y las lámparas de descarga requieren el control de la intensidad del arco. Esta función la realiza un balasto dentro de la bombilla.

El balasto magnético (reactor limitador de corriente (⇒ Fig. 35)) se utiliza de manera común en aplicaciones domésticas.

Un balasto magnético trabaja conjuntamente con el dispositivo de arranque. Tiene dos funciones: calentar los electrodos del tubo y generar una sobretensión para cebar el tubo.

La sobretensión se induce cebando el contacto (controlado por un dispositivo bimetalico) que corta la corriente en el balasto magnético.

Cuando el arrancador está funcionando (durante aprox. 1 seg.), la corriente que absorbe la luz es aprox. dos veces la nominal.

Dado que la corriente absorbida por el tubo y el balasto juntos es mayoritariamente inductiva, el factor de potencia es muy bajo (entre 0.4-0.5 de media). En instalaciones con varios tubos, debe utilizarse un condensador para mejorarlo.

Este condensador se utiliza generalmente en todos los casos.

Está dimensionado para aumentar el factor de potencia por encima de 0.85.

En el tipo más común, el condensador paralelo, el valor medio de capacidad es de 1μF por cada 10W para todo tipo de lámparas.

El condensador paralelo crea una sobrecorriente.

Esto ocurre debido a que el condensador inicialmente está descargado. Las formas de onda de la tensión y de la corriente se pueden ver en la (⇒ Fig. 36).

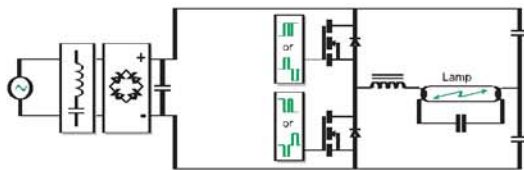
También se produce un pico debido a la oscilación en el circuito inductivo/capacitivo de potencia.

El balasto electrónico (⇒ Fig. 37), introducido en la década de los 80, evita estos inconvenientes.

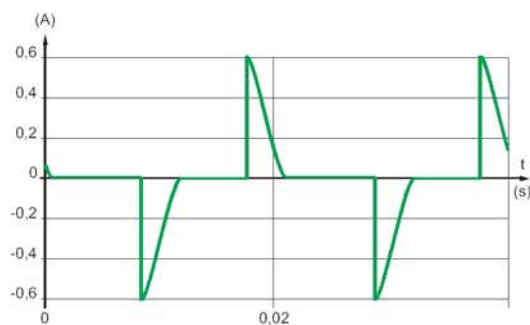
Este dispositivo funciona alimentando el arco de la lámpara a través de un dispositivo electrónico que genera una onda de tensión rectangular.

Hay dispositivos de baja frecuencia e híbridos, con frecuencias que van desde los 50 hasta los 500Hz, y de alta frecuencia con valores que van desde los 20 hasta los 60kHz. El arco es alimentado con tensión a alta frecuencia que elimina de manera completa los efectos de parpadeo y destello.

3. Motores y cargas



↑ Fig. 38 Esquema de un balasto electrónico



↑ Fig. 39 Forma de onda de la corriente de un balasto electrónico

El balasto electrónico es totalmente silencioso. Cuando la lámpara de descarga se está calentando, la alimenta con tensión creciente mientras se mantiene una corriente "virtualmente" constante. En régimen permanente, regula la tensión de la lámpara independientemente de las fluctuaciones en la tensión de alimentación.

Dado que el arco se alimenta en condiciones óptimas de tensión, se ahorra hasta un 5-10% de la energía y la vida útil de la lámpara se incrementa. Además, el rendimiento de un balasto electrónico puede superar el 93%, mientras que en uno de tipo magnético la media es del 85%. El factor de potencia es elevado (> 0.9).

Sin embargo, un balasto electrónico tiene varias restricciones asociadas al circuito usado ($\Rightarrow$ Fig. 38), dado que un puente de diodos combinado con condensadores produce un pico de potencia en el encendido. Durante el funcionamiento, la corriente absorbida tiene un tercer armónico importante ($\Rightarrow$ Fig. 39), resultando un bajo factor de potencia de alrededor del 55%.

El tercer armónico sobrecarga el neutro. Para más información consultar el Cuaderno Técnico 202: Las singularidades del tercer armónico.

Los balastos electrónicos normalmente utilizan condensadores entre las fases conductoras y la tierra. Estos condensadores anti-interferencias inducen una corriente de fuga constante de unos 0.5-1mA por balasto.

Ello limita el número de balastos que pueden ser alimentados cuando un dispositivo de corriente residual (DCR) se instala (ver el Cuaderno Técnico 114 Dispositivos de corriente residual en BT).

3.8 Válvulas y husillos

■ Resumen

Para completar el panorama de cargas industriales que pueden conectarse a dispositivos de automatización, vamos a ver una breve descripción de dos dispositivos muy usados: válvulas y husillos controlados electrónicamente. Muchos procesos requieren que las cargas sean posicionadas y movidas. Esto se realiza mediante husillos neumáticos, hidráulicos e incluso electromecánicos. Éstos se pueden construir en unidades de arranque de motores o conectados a dispositivos de regulación, como en el control de posicionamiento. Las páginas siguientes describen brevemente estos dispositivos de posicionamiento.

Hay un amplio mercado de válvulas para controlar el flujo de fluido. Se usan para:

- detener el flujo de fluido (válvulas de parada),
- cambiar el circuito del fluido (válvulas de canales),
- mezclar productos (válvulas de mezclado),
- control del flujo (válvulas de regulación).

Los fluidos pueden ser tanto líquidos como gases.

■ Husillos eléctricos

Las aplicaciones duras con movimiento lineal requieren husillos eléctricos que sean potentes, rápidos, de larga vida útil y fiables.

Los fabricantes ofrecen una amplia oferta de estos dispositivos para casi todo tipo de requerimiento.

□ Estructura de un husillo eléctrico

Los husillos eléctricos ($\Rightarrow$ Fig. 40) constan de un eje, de una guía y de un motor eléctrico.

La foto muestra un husillo eléctrico de movimiento lineal.

Este movimiento puede usarse para realizar una translación o una rotación.

Para la translación, una sistema de tuerca hace que el eje se desplace en una línea.

Dos de los sistemas más comunes son el husillo de bolas y el husillo trapezoidal.

El husillo trapezoidal se fabrica en acero y su tuerca en plástico.



↑ Fig. 40 Husillo eléctrico

3. Motores y cargas



↑ Fig. 41 Husillo eléctrico de altas prestaciones



↑ Fig. 42 Husillos eléctricos del fabricante SKF

Este diseño relativamente económico tiene grandes propiedades: el plástico y el metal pueden trabajar de manera óptima sin agarrotarse.

El husillo trapezoidal es silencioso, por lo que es útil para oficinas, hospitales, etc.

Otra de sus ventajas es su gran coeficiente de fricción, por lo que este diseño es particularmente adecuado para husillos de aplicaciones donde se requiere autobloqueo, es decir, no-retroceso. Por ejemplo, cuando un husillo es utilizado para ajustar la altura de una mesa, uno trapezoidal permite a la mesa soportar cargas pesadas sin alterar su posición vertical. Ello significa que no se necesita de ningún freno o de cualquier otro sistema de bloqueo para mantener la carga en posición, con lo que el mecanismo se simplifica notablemente.

El husillo de bolas se utiliza para aplicaciones avanzadas (⇒ Fig.41).

El husillo se fabrica de acero, y tiene un conjunto de bolas encerradas entre éste y la tuerca (también de acero).

Este diseño permite tener un coeficiente de fricción muy bajo entre la tuerca y la rosca debido a que el contacto entre ambos elementos no es directo, sino a través de la rodadura de las bolas.

El desgaste es menor que en un husillo trapezoidal, de tal manera que su vida útil es 10 veces superior en condiciones de funcionamiento idénticas. Ello implica que un husillo de bolas resiste cargas pesadas y tiempos de operación largos.

Su bajo coeficiente de fricción hace del husillo de bolas un dispositivo muy eficiente dado que no se calienta en exceso.

Además, es un dispositivo altamente recomendado para situaciones que requieren operaciones a velocidades elevadas durante largos periodos de tiempo.

Finalmente, comentar que un sistema de husillo de bolas tiene poco juego mecánico, por lo que su precisión es significativamente buena en aplicaciones donde la precisión es un elemento crucial.

□ Familia de productos

Los husillos eléctricos se pueden construir con diferentes formas y dimensiones para integrarlos fácilmente en la maquinaria. Los fabricantes ofrecen también unidades de control para facilitar su funcionamiento.

La foto (⇒ Fig.42) da una visión de algunos productos que ofrece el fabricante SKF.

□ Guía de elección

La elección del husillo eléctrico adecuado a menudo requiere de un conocimiento detallado de la aplicación y de diversos cálculos.

Sin embargo, los catálogos de los fabricantes pueden ayudar a escoger en un principio el husillo adecuado según los criterios básicos de carga y de velocidad.

□ Motores usados en los husillos eléctricos

Motores que ofrecen los fabricantes.

Los husillos eléctricos se pueden mover a través de:

- motores de CC,
- motores de CA asíncronos,
- motores de CA síncronos "brushless" (sin escobillas),
- motores paso a paso.

Los motores de CC usados son normalmente de baja tensión (12 o 24V) para fuerzas medias (aprox. 4.000N) y velocidades medias (aprox. 50mm/s). Estos husillos se usan en dispositivos autónomos y móviles que funcionan con baterías.

Un motor asíncrono aumenta considerablemente las prestaciones hasta 50.000N y 80mm/s. En este caso, los husillos se aplican a máquinas instaladas en un lugar fijo.

Los motores de tipo brushless se usan en aplicaciones de grandes prestaciones dinámicas (750mm/s y 30.000N).

Los motores paso a paso se usan en aplicaciones de posicionamiento preciso de la carga donde se quiere evitar el retroceso de la misma.

3. Motores y cargas

■ Partes y variantes

- **Dispositivo de control**

Algunos husillos eléctricos contienen un dispositivo de control. Esto ocurre a menudo en el caso de los husillos con motor brushless, que incluyen un controlador de velocidad conectado al sistema de automatización mediante un bus de campo.

- **Potenciómetro**

El potenciómetro es un sensor de movimiento. Este dispositivo se utiliza para determinar la posición y posicionar una parte móvil con precisión.

- **Dispositivo de protección térmica**

Protege los motores y las unidades de control del sobrecalentamiento.

- **Encoder**

El encoder es un sensor que, cuando se conecta a una unidad de control, se usa para determinar la posición del husillo.

- **Limitadores de par**

Algunos tipos de husillo disponen de un dispositivo mecánico de seguridad similar a un embrague de fricción para proteger el motor y la reductora de cualquier daño físico.

- **Interruptores de límite**

Estos interruptores limitan el movimiento en una dirección dada de un dispositivo mecánico abriendo y cerrando un contacto eléctrico. Los interruptores de límite están disponibles en todas las formas y dimensiones y se pueden instalar tanto en la parte interior como en la parte exterior del husillo.

Estos dispositivos de seguridad son parte del sistema de control y es importante tenerlos en cuenta cuando se opera con husillos en un sistema de automatización o en cualquier otro sistema.

- **Control de fallos mecánicos**

Este dispositivo de seguridad permite parar el husillo en caso de excesiva fuerza resistente. Su objetivo principal es proteger a las personas de posibles daños.

- **Control de fallos eléctricos**

Este sistema es una opción de seguridad en algunos husillos eléctricos.

Corta la corriente del motor si se aplica una fuerza en sentido opuesto al movimiento del husillo.

■ Válvulas

Los sistemas que funcionan con válvulas quedan fuera del alcance de esta guía. Dicho esto, dado que las válvulas pueden ser parte de los sistemas de control industrial como bucles de regulación o controladores de velocidad, es útil tener cierta idea de su estructura y de qué pasa durante su funcionamiento.

■ Estructura de una válvula

Una válvula (*⇒ Fig. 43*) consta de un cuerpo y de un estrangulador que presiona contra un asiento. Este estrangulador, que gobierna el flujo de fluido, se regula a través de un vástago accionado por dispositivos eléctricos o neumáticos.

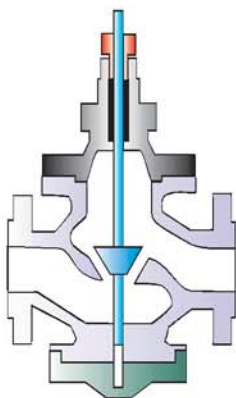
Como se ha comentado, algunas válvulas se controlan neumáticamente y otras eléctricamente (válvulas de solenoide).

Hay muchos diseños de válvula (de mariposa, esférica, de diafragma, etc.) para diferentes tipos de uso, fluido y progresión (salida en relación a la posición del estrangulador o a la señal de control en válvulas de regulación).

El estrangulador normalmente tiene una forma específica para prevenir o mitigar cualquier efecto indeseado como el golpe de ariete o la cavitación.

- **Golpe de ariete**

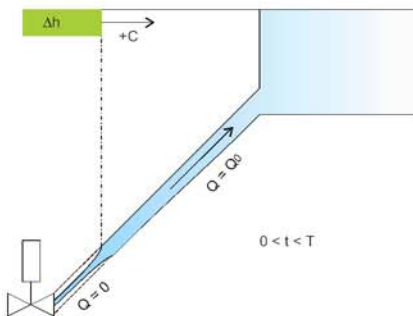
Esto puede ocurrir en tuberías hidráulicas cuando se cierra la válvula. El flujo a través de la tubería se detiene de golpe y causa este fenómeno, que provocará daños en nuestra instalación si no se actúa correctamente.



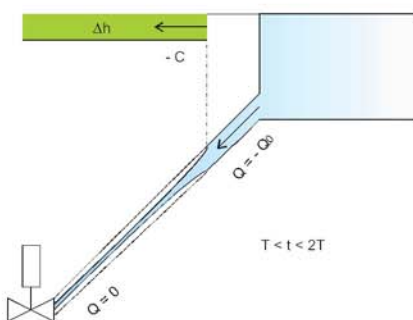
↑ Fig. 43

Sección de una válvula

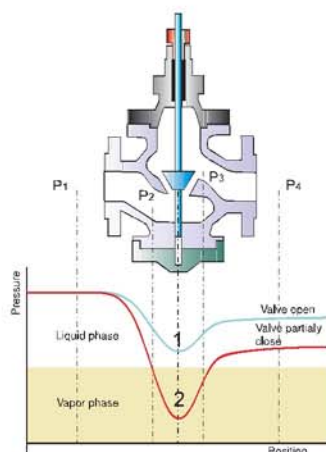
3. Motores y cargas



↑ Fig. 44a Golpe de ariete (inicio)



↑ Fig. 44b Golpe de ariete (desarrollo)



↑ Fig. 45 Fenómeno de la cavitación

A modo de ejemplo ($\approx$ fig. 44a y 44b), se muestra la descripción de una estación de bombeo que suministra agua a un embalse superior.

Cuando la válvula de vaciado se cierra, la columna de agua que se encuentra en la tubería por encima de la estación de bombeo tiende a seguir en movimiento, pero no existe salida.

Este movimiento causa la deformación elástica de la tubería que se contrae en un punto cercano a la válvula.

Este fenómeno mantiene en movimiento la masa de fluido de una manera temporal.

Una vez se genera esta depresión, se transmite a través de la tubería a la velocidad de las ondas elásticas C hasta que toda ella queda afectada una vez ha pasado un tiempo $T=L/c$, donde L es la longitud de la tubería.

El resultado es que la presión donde la tubería nace (en el embalse) es menor que la presión en el propio embalse lo que causa retroflujo. La onda se extiende desde el embalse hasta la estación de bombeo y alcanza el estrangulador de la válvula después de un tiempo $2T$ desde el inicio del fenómeno.

La columna de fluido continua su descenso y golpea la válvula cerrada una vez más, sometiendo la tubería a fatiga mecánica y invirtiendo el movimiento del fluido.

El golpe de ariete puede repetirse indefinidamente si los efectos de la pérdida de carga, presión y sobrepresión no son controlados.

Para superar este fenómeno potencialmente destructivo, la válvula debe ser controlada por un sistema basado en una ley de cierre lenta para contener la sobrepresión y la depresión dentro de unos límites razonables.

Otro procedimiento consiste en aminorar gradualmente la velocidad de la bomba para permitir a la válvula que cierre la tubería.

En el caso de bombas funcionando a velocidad constante, el dispositivo más adecuado es un arranque suave como un Altistart de Telemecanique o un Altivar para bombas con control de velocidad.

• Cavitación

El cierre de una válvula disminuye la sección disponible para el flujo de fluido ($\approx$ Fig. 45). Aplicando el teorema de Bernoulli, la disminución de la sección acelera el flujo y reduce la presión en ese punto.

La caída de presión estática depende de:

- la geometría interna de la válvula,
- el valor de la presión estática aguas abajo de la válvula.

La presión cuando la válvula está abierta se muestra en la ($\approx$ curva 1).

La sección del flujo se estrecha en el punto del estrangulador, causando una caída de la presión y un flujo que se acelera (efecto Venturi);

Cuando la válvula se cierra, el efecto Venturi se incrementa y la curva 1 se deforma gradualmente ($\approx$ curva 2).

Cuando la presión estática del fluido alcanza el valor de la presión de vapor a la temperatura del fluido, se generan inmediatamente burbujas de vapor en la zona donde se reduce la sección.

Cuando la presión estática aumenta de nuevo aguas abajo de la válvula (presión P_2), las burbujas de vapor se condensan y "explotan".

La cavitación genera los siguientes efectos indeseados:

- un ruido inaceptable, como si hubiera piedras repiqueteando en la tubería,
- vibraciones a alta frecuencia que aflojan tuercas y otras partes mecánicas de la válvula,
- rápida destrucción del estrangulador, del asiento y del cuerpo por erosión de partículas metálicas. Las superficies sometidas a cavitación son granuladas,
- el flujo a través de la válvula no es proporcional a su grado de apertura.

Las válvulas de regulación muchas veces trabajan durante largos periodos de tiempo en condiciones con cavitación; su vida útil, pues, se ve reducida de una manera drástica.

La temática sobre las formas de limitar o prevenir la cavitación no entran en el ámbito de esta guía.