

Motores eléctricos



La gran mayoría de las instalaciones eléctricas de automatismos industriales tienen como finalidad suministrar energía y poder gestionar el control de máquinas rotativas. Asimismo, existen muchas otras instalaciones en las que los motores eléctricos juegan un papel fundamental, ya que, por ejemplo, cualquier edificio actual dispone de ascensores, montacargas, grupos de bombeo, grupos de presión, puertas eléctricas y otros receptores eléctricos que basan su funcionamiento en un motor. Incluso en las instalaciones domésticas estos dispositivos se encuentran presentes, ya sea una lavadora, nevera, etc.

Dado que los motores eléctricos son posiblemente los receptores más comunes y más importantes de las instalaciones eléctricas, especialmente en el caso de los automatismos industriales, en esta unidad se analizarán sus características fundamentales, así como los métodos de conexionado y configuración.

6

Contenidos

- 6.1. Introducción a las máquinas eléctricas
- 6.2. Motores trifásicos
- 6.3. Motores de corriente alterna
- 6.4. Motores de corriente continua
- 6.5. Dimensionado de instalaciones eléctricas con motores

Objetivos

- Definir el concepto de máquina eléctrica.
- Clasificar los tipos de máquinas eléctricas rotativas.
- Analizar los parámetros técnicos asociados a los motores eléctricos.
- Dar a conocer las características y métodos de conexionado de los motores de corriente alterna monofásicos y trifásicos.
- Definir las características y métodos de conexionado de los motores de corriente continua.
- Aprender a realizar el dimensionado de instalaciones eléctricas con motores.

6.1. Introducción a las máquinas eléctricas

Una máquina es un componente que transforma una determinada energía en otra del mismo o distinto tipo. Las máquinas eléctricas son convertidores electromecánicos capaces de transformar energía desde un sistema eléctrico a un sistema mecánico, o viceversa, basando su funcionamiento en la inducción electromagnética.

Dentro del campo de las máquinas eléctricas pueden distinguirse básicamente dos grandes tipos: las estáticas y las rotativas.

- Las máquinas eléctricas denominadas **estáticas** son todas aquellas en las que no existe movimiento mecánico, al no disponer de partes móviles. Dentro de las máquinas eléctricas estáticas se incluyen, por ejemplo, los transformadores, convertidores, reguladores, inversores, etc.

La máquina estática por excelencia es el transformador de potencia, cuyo cometido es el de convertir energía eléctrica de entrada en energía eléctrica de salida, variando la tensión entre las inductancias del primario y del secundario a potencia constante.

- Las máquinas eléctricas **rotativas**, o **dinámicas**, están provistas de partes mecánicas giratorias, como es el caso de las dinamos, los alternadores y los motores. Dentro de este grupo existe una doble clasificación, ya que los motores consumen energía eléctrica y la convierten en energía mecánica de rotación, mientras que las dinamos y los alternadores (generadores) aprovechan la energía mecánica de rotación para producir energía eléctrica.



Figura 6.1. Clasificación de las máquinas eléctricas.

6.1.1. Máquinas eléctricas rotativas

Las máquinas eléctricas rotativas están constituidas por la combinación de circuitos eléctricos y magnéticos que les permite convertir energía entre un sistema mecánico y un sistema eléctrico. Se trata de componentes extremadamente importantes, ya que, por un lado, los equipos que generan energía eléctrica en grandes cantidades son máquinas eléctricas rotativas, y por otro lado, la mayoría de los receptores eléctricos están basados también en este tipo de equipos.



Figura 6.2. Diagrama funcional de clasificación de las máquinas eléctricas rotativas.

Dada la constitución interna y el principio de funcionamiento de las máquinas eléctricas rotativas, bajo determinadas circunstancias un motor podría funcionar como generador y un generador podría funcionar como motor.



SABÍAS QUE

Si un motor de CC funciona como generador, se le conoce como **dinamo**.

Si un motor de CA funciona como generador, se le conoce como **alternador**.

La **clase de servicio** a la que pueden estar sometidas las máquinas eléctricas es de cuatro tipos:

- Servicio continuo:** la carga es constante durante un tiempo suficientemente largo como para que la temperatura llegue a estabilizarse.
- Servicio continuo variable:** la máquina trabaja constantemente pero la carga es variable.
- Servicio intermitente:** los tiempos de trabajo están separados por tiempos de reposo.

- **Servicio unihorario:** la máquina está una hora en marcha a un régimen constante superior al continuo, pero no se llega a alcanzar una temperatura que ponga en peligro los materiales aislantes.

Si una máquina eléctrica funciona a la potencia nominal, es decir, a su potencia normal de funcionamiento, se dice que funciona a **plena carga**. Los motores y generadores eléctricos pueden trabajar a media carga, a $\frac{3}{4}$ de la carga o incluso por encima de la potencia nominal, en sobrecarga.

6.1.2. Clasificación y composición de los motores eléctricos

Dentro del amplio campo que abarca el estudio de las máquinas eléctricas rotativas, a continuación el desarrollo de la unidad se centrará en los motores eléctricos, puesto que en los entornos industriales son el receptor por excelencia, ya que este tipo de instalaciones son puntos de gran consumo.

La **clasificación** de los motores eléctricos depende de varios factores, tal como puede apreciarse en los siguientes diagramas:

Motores de corriente alterna CA
De inducción (asíncronos) <ul style="list-style-type: none"> Trifásicos <ul style="list-style-type: none"> De rotor bobinado De jaula de ardilla Monofásicos <ul style="list-style-type: none"> De condensador De fase partida De espira de sombra
Universales
Síncronos <ul style="list-style-type: none"> Monofásicos <ul style="list-style-type: none"> De histéresis De reluctancia Trifásicos
Motores de corriente continua CC
<ul style="list-style-type: none"> De excitación <i>shunt</i> De excitación <i>serie</i> De excitación <i>compound</i> De excitación independiente

Figura 6.3. Clasificación de los motores eléctricos.

A los motores de corriente alterna monofásica se les conoce comúnmente como **motores de corriente alterna**. A los motores de corriente alterna trifásica se les conoce comúnmente como **motores trifásicos**.



Figura 6.4. Motores trifásicos. (Cortesía de Siemens.)



Figura 6.5. Motor de corriente continua de alta potencia (1.610 kW). (Cortesía de Siemens.)

En toda máquina eléctrica se pueden distinguir cuatro tipos de materiales constructivos: materiales activos magnéticos (hierro, acero) y materiales activos eléctricos (cobre, aluminio), materiales aislantes y materiales para la lubricación, ventilación y transmisión mecánica. Particularmente, los motores eléctricos están compuestos por partes fijas y partes móviles, así como por circuitos eléctricos y magnéticos.

De cara al funcionamiento, básicamente se pueden distinguir las siguientes partes fundamentales:

- Estator (y caja de bornes).
- Rotor.
- Entrehierro.
- Otros componentes mecánicos.

Estator, bobinado primario o inductor

Es la parte fija del motor. En él se alojan los devanados a los cuales se conectarán la red eléctrica. Es el elemento que recibe la energía eléctrica y crea el campo magnético.



Figura 6.6. Sección en alzado de un estator.

Rotor, bobinado secundario o inducido

Es la parte móvil que gira dentro del estator. Sus devanados reciben la energía magnética del estator y la transforman en mecánica, al inducirse en ellos una fuerza magnetomotriz que genera un par (fuerza giratoria).



Figura 6.7. Rotor.

Entrehierro

Es el espacio de aire que separa el estator del rotor y que permite que pueda existir movimiento. Debe ser lo más reducido posible.

Caja de bornes

Es el lugar donde se realizan las conexiones eléctricas para alimentar a los devanados del estator. Los bornes disponibles dependerán del tipo de motor, de su configuración y de las características de funcionamiento de la máquina. En cualquier caso siempre debe disponer de un borne para la conexión a tierra de las masas metálicas.

Otros componentes mecánicos

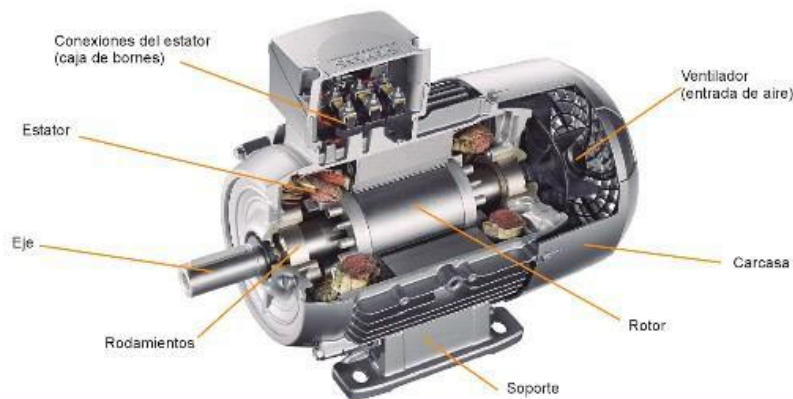
En este grupo se incluyen fundamentalmente:

- El eje (y sus posibles acoplamientos).
- Rodamientos.
- Cojinetes.
- Soportes.
- Carcasa externa, platillos y caperuza.
- Ventilador.



SABÍAS QUE

En la actualidad, numerosas industrias cuentan también con generadores eléctricos, cuya energía consumen o venden al mercado eléctrico. Normalmente, utilizan la energía calorífica sobrante de sus procesos productivos (por ejemplo, el calor que desprende un horno de secado) para generar electricidad por medio de un sistema denominado *cogeneración*.



6.2. Motores trifásicos

Los elementos constitutivos más importantes que definen al motor trifásico son el estator y el rotor. El **estator** está formado por devanados trifásicos distribuidos en ranuras colocadas a 120° . El desfase entre los tres devanados dependerá del número de polos magnéticos de la máquina.



Figura 6.9. Estator de un motor trifásico.

Respecto al **rotor**, existen dos posibles configuraciones:

- **Rotor bobinado:** es accesible desde conexiones exteriores. Los extremos de los devanados se encuentran conectados a anillos colectores montados sobre el propio eje del motor. La conexión eléctrica a través del ensamblaje rotativo se realiza mediante un **colector de anillos** y **escobillas**.

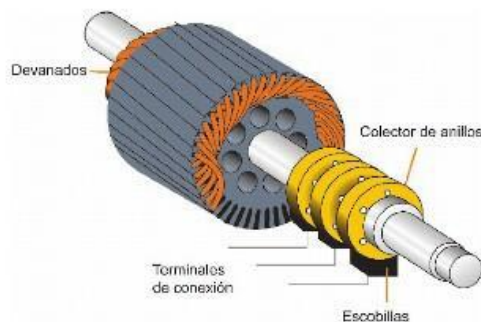


Figura 6.10. Rotor bobinado.

- **Rotor cortocircuitado:** los conductores que forman el rotor se ubican en el interior de una jaula compuesta por barras longitudinales de aluminio o cobre, denominada **jaula de ardilla**, y sus extremos se encuentran cortocircuitados de manera que no resulta posible realizar conexiones eléctricas exteriores sobre el rotor.

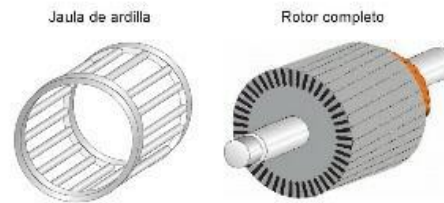


Figura 6.11. Rotor cortocircuitado.

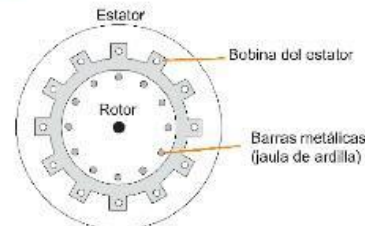


Figura 6.12. Sección transversal del motor trifásico con rotor en cortocircuito.

El **principio de funcionamiento** del motor eléctrico trifásico es fácil de comprender una vez analizada su constitución interna. Al alimentar el estator del motor mediante las tres líneas del sistema trifásico se generan campos magnéticos giratorios desfasados 120° .

Por otro lado, en el rotor, que puede estar alimentado externamente (rotor bobinado) o generar corriente inducida por los campos magnéticos del estator al atravesar sus bobinas (rotor en cortocircuito), se genera otro campo magnético giratorio en sentido contrario; de modo que al chocar ambas fuerzas de magnetismo comienza el movimiento de desplazamiento giratorio en la parte móvil de la máquina.

SABÍAS QUE

Si el eje del motor no se encuentra conectado a ninguna carga, se dice que el motor está girando **en vacío**.

Como ocurre con todos los receptores trifásicos, los motores pueden ser conectados de dos formas distintas, que dependerán de la configuración de los devanados internos del estator: la conexión en estrella y la conexión en triángulo.

Conexión en triángulo (Δ)

Se caracteriza porque la tensión de fase de la red eléctrica es la que alimenta directamente a los devanados internos del motor.

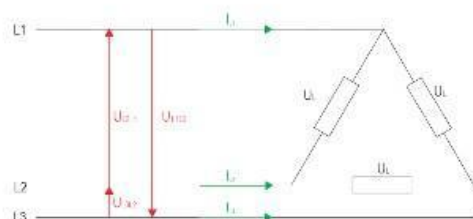


Figura 6.13. Conexión en triángulo.

Conexión en estrella (Y)

Se caracteriza porque a los devanados internos del motor se les suministra la tensión de fase de la red eléctrica dividida entre el coeficiente $\sqrt{3}$.

En la conexión del motor trifásico en estrella, a pesar de existir un punto neutro, este no se debe utilizar. No obstante, en algunos países como Italia sí está permitido utilizar el punto neutro del motor para conectar pequeñas cargas monofásicas de maniobra o protección interna. El peligro que representa esta práctica es evidente: la fase a la que son conectadas las cargas monofásicas desequilibra la carga interna del motor y a la larga puede provocar serios daños a la máquina. Es por este motivo que **ese punto neutro no debe utilizarse**, y las cargas monofásicas se alimentarán directamente desde el cuadro eléctrico.

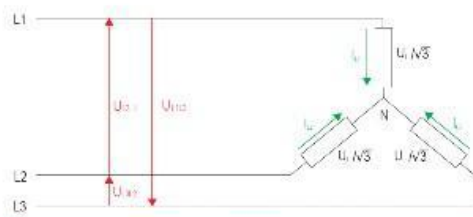


Figura 6.14. Conexión en estrella.

6.2.1. Clasificación de los motores trifásicos

Los motores eléctricos trifásicos pueden ser clasificados en función de dos parámetros fundamentales: el principio de funcionamiento y sus características constructivas.

Según el principio de funcionamiento por el cual se genera el movimiento rotatorio del eje, los motores de corriente alterna se dividen en:

- Motores síncronos.
- Motores asíncronos, o de inducción.

Los **motores síncronos** se caracterizan por girar a la velocidad de sincronismo, es decir, la velocidad máxima teórica a la que puede girar el motor para una frecuencia determinada. Esto se debe a que **se alimenta** con energía eléctrica y de manera independiente, tanto **el estator** como **el rotor**.

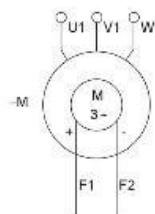


Figura 6.15. Símbolo genérico del motor síncrono.

Este tipo de motores no son muy utilizados en las instalaciones industriales, debido al alto coste tanto de la máquina como de su mantenimiento posterior, ya que al tener que alimentar eléctricamente el rotor el desgaste mecánico es muy elevado. De hecho, la utilización de máquinas síncronas es más frecuente en el campo de la generación eléctrica.



Figura 6.16. Motores síncronos. (Cortesía de Siemens.)

Los **motores asíncronos**, conocidos también como **motores de inducción**, se caracterizan por girar a una velocidad ligeramente inferior a la de sincronismo. En estos motores el rotor está cortocircuitado, de manera que no recibe corriente eléctrica directa, sino que esta es inducida mediante los campos magnéticos generados por el estator en los devanados del rotor.

Los motores asíncronos son los más generalizados y utilizados en las instalaciones industriales, debido fundamentalmente a su simplicidad, su facilidad de mantenimiento (en comparación con los síncronos) y la alta eficiencia que ofrecen.



Figura 6.17. Motor trifásico asíncrono de alta velocidad. (Cortesía de Siemens.)

Dado que los motores asíncronos son los de uso más frecuente en las instalaciones de automatismos industriales, resulta necesario realizar una clasificación más exhaustiva de los más comunes en función de sus características constructivas particulares:

- **Motor asíncrono trifásico con rotor en cortocircuito (o jaula de ardilla) de conexión directa.** El rotor no es accesible y el estator solo tiene tres bornes de conexión.

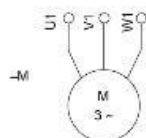


Figura 6.18. Símbolo de motor asíncrono con rotor en cortocircuito.

- **Motor asíncrono trifásico con rotor en cortocircuito (o jaula de ardilla) de conexión estrella-triángulo.** El rotor no es accesible, el estator dispone de seis bornes de conexión para realizar conexión en estrella o triángulo según proceda.

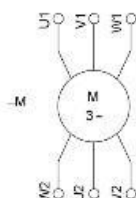


Figura 6.19. Símbolo de motor asíncrono con rotor en cortocircuito de conexión Y-Δ.

- **Motor asíncrono trifásico con rotor en doble jaula.** Es similar a los anteriores, pero el rotor se encuentra en el interior de dos jaulas concéntricas.

- **Motor asíncrono trifásico con rotor de anillos (o rotor bobinado).** Los devanados del rotor se encuentran abiertos, por lo que dispone de tres bornes para conectar este elemento en cortocircuito o a través de resistencias. El estator puede disponer de tres o seis bornes, dependiendo de si existe la posibilidad de conexión Y-A o no.

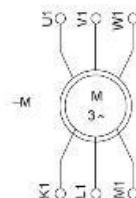


Figura 6.20. Símbolo de motor asíncrono con rotor bobinado.

RECUERDA

El rotor de los motores asíncronos o de inducción no se conecta a ninguna fuente de tensión porque sus corrientes son inducidas por el campo giratorio del estator.

- **Motor asíncrono trifásico de dos velocidades con bobinados independientes.** Dispone de dos grupos independientes de bobinas, en el que cada uno equivale a una velocidad.
- **Motor asíncrono trifásico de dos velocidades tipo Dahlander.** Es un tipo de motor en el que con un solo grupo de bobinas se pueden obtener dos velocidades (una el doble que la otra) a partir de una serie de conexiones específicas.

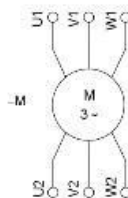


Figura 6.21. Símbolo de motor asíncrono de dos velocidades.

6.2.2. Conexión y caja de bornes del motor trifásico de inducción

En los motores trifásicos se conectan los tres conductores de fase (L1, L2 y L3) y el conductor de puesta a tierra (PE). **Nunca** se conecta el conductor neutro.

La tensión nominal de los devanados del motor debe coincidir con la tensión de línea de la red eléctrica.

La conexión de las fases dependerá del tipo de motor. Cada motor tiene una caja de bornes bien diferenciada, en la que cada borne se identifica con una letra. Es muy importante identificar adecuadamente la nomenclatura de estas conexiones para no cometer errores a la hora de alimentar el motor, ya que podría provocar daños irreversibles en la máquina.



Figura 6.22. Diferentes modelos de cajas de bornes. (Cortesía de Siemens.)

A continuación se muestran y detallan los bornes de conexión de los diferentes tipos de motores trifásicos:

Motor de conexión directa

En este tipo de motores, el fabricante fija la conexión interna de los devanados en forma de estrella o triángulo, no pudiendo variarse dicha configuración posteriormente. La tensión indicada de funcionamiento del motor debe coincidir con la tensión de línea de la instalación eléctrica.

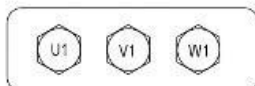


Figura 6.23. Denominación de la caja de bornes de un motor trifásico de conexión directa.



RECUERDA

Es muy importante identificar las letras de los bornes en un motor trifásico para realizar adecuadamente las conexiones.



Figura 6.24. Caja de bornes de un motor de conexión directa. Se pueden apreciar los tres bornes de conexión de los conductores de fase, así como el borne de puesta a tierra. (Cortesía de Siemens.)

Motor de conexión estrella-triángulo

Dado que los devanados del motor pueden ser conectados en estrella o triángulo, lo más habitual es que los fabricantes de motores dejen esa opción de conexionado *abierto*, es decir, que el usuario pueda elegir la conexión del motor. De esta manera **un único motor podrá ser conectado a dos tensiones distintas**, ampliando su funcionalidad.

En los motores en los que es posible elegir entre la conexión en estrella o la conexión en triángulo, la denominación de la caja de bornes es la siguiente:

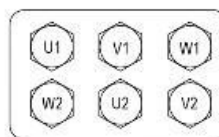


Figura 6.25. Denominación actual de la caja de bornes de un motor trifásico para la conexión estrella o triángulo.

No obstante, en la práctica es posible encontrar algunos motores que todavía siguen utilizando la antigua denominación de bornes, por lo que también resulta muy útil conocerla:

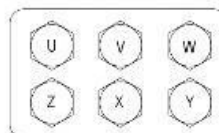


Figura 6.26. Denominación obsoleta de la caja de bornes de un motor trifásico.

El motivo de esta denominación tan particular se basa en la disposición de los devanados internos del motor, que como ya se ha comentado, vienen de fábrica sin conexión definida.

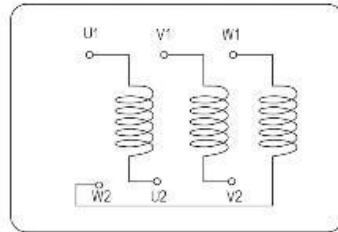


Figura 6.27. Disposición interna de los devanados del motor trifásico para la conexión estrella o triángulo.

Actividad propuesta 6.1

A continuación vamos a verificar la disposición de los devanados internos de un motor trifásico de conexión estrella-triángulo. Con la ayuda de un polímetro, en posición de medida de resistencia, anota los valores que obtengas al realizar mediciones entre los bornes del motor indicados a continuación:

U1-W2	U1-U2	V1-U2	V1-V2
V1-W1	W1-W2	W2-V2	W2-U2

Razona y justifica los resultados obtenidos.

Aunque esta disposición de los devanados parezca algo compleja, tiene una explicación: las conexiones exteriores que el usuario del motor debe realizar van a resultar mucho más intuitivas y sencillas de realizar, tal como se muestra a continuación:

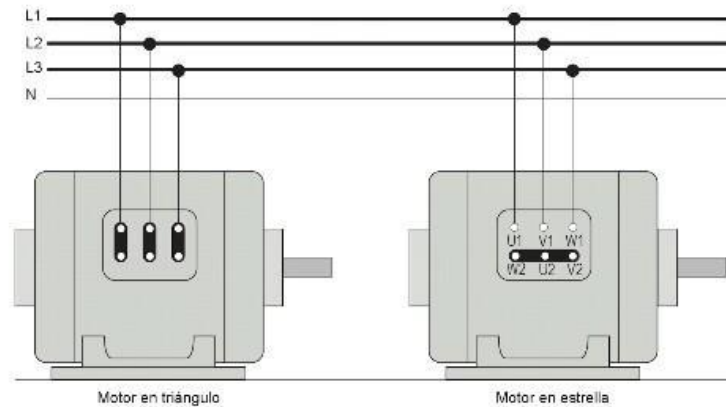
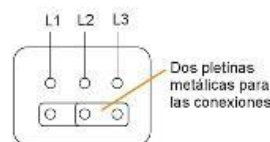
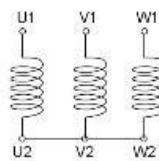


Figura 6.28. Conexión del motor eléctrico trifásico en estrella o en triángulo.

Conexión real de la caja de bornes



Configuración interna equivalente de la conexión



Circuito equivalente

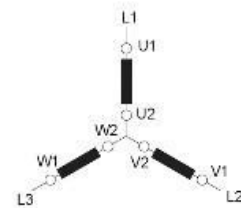
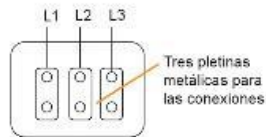
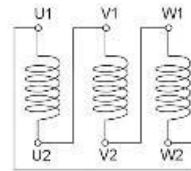


Figura 6.29. Detalle de la conexión en estrella (Y).

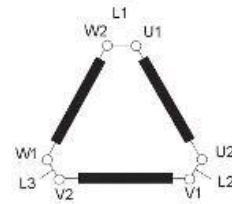
Conexión real de la caja de bornes



Configuración interna equivalente de la conexión



Circuito equivalente

Figura 6.30. Detalle de la conexión en triángulo (Δ).

Gracias a la posibilidad de conexión de un motor eléctrico trifásico en estrella o triángulo, la máquina dispondrá de dos tensiones de funcionamiento. De hecho, **la conexión de la caja de bornes dependerá exclusivamente de la tensión de línea de la instalación eléctrica.**

El fabricante del motor debe indicar las dos posibles tensiones de funcionamiento, que deben guardar una relación matemática en base al factor $\sqrt{3}$. En nuestro país, para motores trifásicos en baja tensión dichas tensiones podrán ser las siguientes:

133/230 V
230/400 V
400/690 V
690/1.200 V

De las dos tensiones ofrecidas, la menor hace referencia a la máxima diferencia de potencial a la que pueden ser

sometidos los devanados del motor trifásico. Por tanto, y en base a esto:

- Si la tensión de la instalación eléctrica a la que va a ser conectado el motor es la menor de las dos, la conexión que debe realizarse será triángulo.
- Si la tensión de la instalación eléctrica a la que va a ser conectado el motor es la mayor de las dos, la conexión que debe realizarse será estrella.
- Si la tensión de la instalación eléctrica no coincide con ninguna de las dos, el motor no podrá ser conectado.

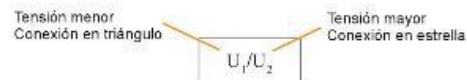


Figura 6.31. Tensiones del motor trifásico para la conexión estrella o triángulo.

Actividad propuesta 6.2

Se dispone de un motor trifásico de tensión 230/400 V.

Determina el tipo de conexión del motor y la tensión existente entre sus bornes si este fuese conectado en una instalación eléctrica trifásica de 230 V_{CA} de tensión de línea. El orden de llegada a la placa de bornes es L1, L2 y L3.

Tipo de conexión del motor (Y o Δ)	Tensión (V)						
	W2 - W1	U2 - V2	V2 - W1	W2 - V2	V1 - W2	W1 - U2	U1 - V1

Realiza la misma actividad suponiendo que el motor fuese conectado a una instalación eléctrica de 230 V_{CA} entre cualquier conductor de la línea y el conductor neutro.

Tipo de conexión del motor (Y o Δ)	Tensión (V)						
	W2 - W1	U2 - V2	V2 - W1	W2 - V2	V1 - W2	W1 - U2	U1 - V1

Motor de dos velocidades

En los motores de dos velocidades, ya sean de devanados independientes o tipo Dahlander, la caja de bornes debe contener las tres conexiones propias de cada una de las dos velocidades.

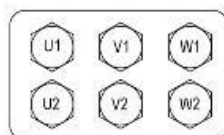


Figura 6.32. Denominación de la caja de bornes de un motor trifásico de dos velocidades.

Las tres fases de alimentación eléctrica se conectarán a un único grupo de bornes del estator (U1V1W1 o U2V2W2) en función de la velocidad que se desee escoger para el eje del motor. Bajo ningún concepto podrán alimentarse ambos grupos de manera simultánea, dado que esto podría ocasionar daños irreversibles en el interior del motor.



RECUERDA

El marcado de la caja de bornes de los motores de dos velocidades y de los motores de conexión estrella-triángulo es muy parecido, y un error en las conexiones podría causar grandes daños en la máquina.

En los motores de dos velocidades solo se conectan la mitad de los bornes, mientras que en los motores estrella-triángulo deben conectarse todos.

Motor de inducción de rotor accesible

En la caja de bornes de los motores de inducción de rotor accesible debe existir un grupo especial de tres conexiones para maniobrar sobre los devanados del rotor, como por ejemplo, si fuese necesario conectar una batería de resistencias de arranque.

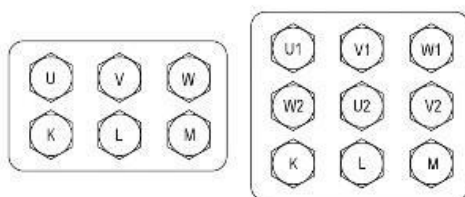


Figura 6.33. Denominación de las cajas de bornes asociadas al motor de inducción de rotor accesible.

Si no fuese necesario realizar maniobras sobre el rotor, los bornes correspondientes K-L-M deberán ser **cortocircuitados**. En caso de no realizar esta maniobra el circuito del rotor quedaría abierto, lo que produciría que en el eje del motor no se obtuviese movimiento giratorio, dado que el estator no podría inducir las corrientes en los devanados del rotor.

6.2.3. Fundamentos técnicos del motor trifásico de inducción

Los parámetros técnicos asociados al funcionamiento de los motores trifásicos se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 6.1. Parámetros característicos de los motores eléctricos trifásicos.

Tensión nominal	Intensidad nominal	Intensidad de arranque	Frecuencia	Factor de potencia
Paros de polos	Potencias	Par motor	Velocidad y deslizamiento	Rendimiento

Tensión nominal (U_N)

Es la diferencia de potencial, expresada en voltios (V), a la que trabaja el motor en condiciones normales. Como ya se ha estudiado, dependiendo del tipo de motor, este podrá disponer de una o varias tensiones de funcionamiento.

Intensidad nominal (I_N)

Es la intensidad de trabajo, aquella para la que el estator del motor está diseñado para funcionar en condiciones normales. Se expresa en amperios (A).

La intensidad nominal de los motores influye directamente en el calibre de los dispositivos de protección, la sección de conductores y canalizaciones, las caídas de tensión, etc.

Intensidad de arranque (I_a)

La intensidad de arranque es la que demanda el motor en el momento en el que es conectado a la red eléctrica. Como será analizado en apartados posteriores, esta intensidad es más elevada que la nominal, por lo que en la mayoría de los casos deberá ser limitada.

La intensidad de arranque puede expresarse en amperios (A) o como un factor de relación con respecto a la intensidad nominal:

$$I_a = n \times I_N$$

■ ■ ■ Frecuencia (f)

Los motores eléctricos están diseñados para ser utilizados a una o varias frecuencias de funcionamiento, expresadas en hercios (Hz). Si, por ejemplo, un motor es conectado a una red eléctrica de frecuencia superior a la que marca el fabricante, su velocidad se verá incrementada y la fuerza que ofrece en el eje se verá reducida. Esto podría ocasionar daños en el equipo, especialmente en motores de gran potencia.

■ ■ ■ Factor de potencia ($\cos \varphi$)

Es la relación entre la potencia activa y la potencia aparente del motor, expresándose siempre mediante un valor numérico comprendido entre 0 y 1. En motores asíncronos el factor de potencia suele estar comprendido entre 0,7 y 0,85, siendo algo más elevado en motores síncronos.

■ ■ ■ Pares de polos (P)

Los puntos de máxima fuerza de atracción magnética del interior del motor se denominan polos. Puesto que un imán o un electroimán siempre van a tener dos polos (norte y sur), estos se contabilizan mediante números pares para simplificar. El número de pares de polos de los que constará un motor dependerá del fabricante.

$$P = \frac{p}{2}$$

Donde:

P = pares de polos

p = polos

■ ■ ■ Potencias

Genéricamente, la potencia puede definirse como la energía desarrollada por unidad de tiempo. En un motor eléctrico se puede distinguir entre dos tipos de potencia:

- **Potencia eléctrica activa (P):** es la que el motor absorbe de la red eléctrica a través del estátor. Generalmente se expresa en kW. Esta potencia también puede ser denominada como potencia nominal, potencia absorbida, potencia de entrada o potencia de red.
- **Potencia eléctrica reactiva (Q):** es la que el motor utiliza para generar los campos magnéticos giratorios que dan el movimiento al rotor. Se mide en kVar.
- **Potencia mecánica (P_{me}):** es la que el motor cede a la carga a través del movimiento de su eje. Generalmente se expresa en caballos de vapor (CV), y en algunas ocasiones en caballos de potencia (HP). La potencia mecánica de un motor puede ser también de-

nominada potencia útil, potencia en el eje, potencia entregada o potencia de salida.

En ocasiones resulta necesario realizar conversiones entre las diferentes unidades de potencia asociadas al motor. Para realizar dicha tarea, es necesario conocer las equivalencias entre las mismas, que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 6.2. Conversión entre unidades de potencia asociadas a los motores.

1 CV = 0,735 kW
1 HP = 0,746 kW
1 HP = 1,01387 CV

Actividad propuesta 6.3

Para familiarizarte con las diferentes unidades de medida de potencia asociadas a los motores eléctricos, completa la siguiente tabla:

	CV	HP	kW	W
a)			1,5	
b)		75		
c)	8			
d)			33	
e)				25.200
f)		4,5		
g)	24			

La potencia eléctrica activa demandada por un motor eléctrico trifásico debe venir siempre indicada por el fabricante. No obstante, si se desconoce dicho valor, será posible obtenerlo a partir de la siguiente fórmula:

$$P_{Me} = \sqrt{3} \times U_L \times I_L \times \cos \varphi = 3 \times U_F \times I_F \times \cos \varphi$$

En lo que respecta a la potencia reactiva, puede obtenerse mediante una ecuación independiente:

$$Q_{Me} = \sqrt{3} \times U_L \times I_L \times \sin \varphi = 3 \times U_F \times I_F \times \sin \varphi$$

O a partir del valor de la potencia activa:

$$Q = P \times \tan \varphi$$

Donde:

- P_{M2} = potencia activa del motor trifásico (W)
 Q_{M2} = potencia reactiva del motor trifásico (VA)
 U_L = tensión de línea (V)
 U_F = tensión de fase (V)
 I_L = intensidad de línea (A)
 I_F = intensidad de fase (A)
 $\cos \varphi$ = factor de potencia

Velocidad y deslizamiento

La velocidad del motor, al basarse en un movimiento giratorio, se expresa en revoluciones por minuto. La velocidad máxima teórica a la que podría girar el motor eléctrico es la velocidad de su campo magnético giratorio. Esta velocidad, denominada **velocidad de sincronismo**, depende de la frecuencia a que se alimenta el estator y del número de polos del motor. Se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$n_s = \frac{60 \times f}{P}$$

Siendo:

- n_s = velocidad de sincronismo (rpm o min^{-1})
 f = frecuencia de la red eléctrica (Hz)
 P = número de pares de polos

La velocidad que puede llegar a alcanzar el rotor de un **motor síncrono** será igual a la **velocidad de sincronismo** ya definida. Sin embargo, en los **motores asíncronos**, la velocidad del rotor será **ligeramente inferior** a la de sincronismo, en función de un parámetro denominado **deslizamiento**.

La velocidad nominal de rotor en los motores asíncronos puede obtenerse a partir de la siguiente ecuación:

$$n_a = \frac{60 \times f}{P} \times (1 - s)$$

Siendo:

- n_a = velocidad nominal del motor (rpm o min^{-1})
 f = frecuencia de la red eléctrica (Hz)
 P = número de pares de polos
 s = deslizamiento

El deslizamiento, por tanto, puede ser definido como la diferencia entre la velocidad del rotor y la velocidad del campo magnético rotativo.

$$s = n_s - n_r$$

Este factor, expresado en valor porcentual, suele oscilar entre el 2 % y el 4 % de la velocidad de sincronismo cuando el motor se encuentra sin carga.

Cuando se aplica carga a un motor, puesto que el par se incrementa y la velocidad del rotor disminuye, el deslizamiento puede alcanzar valores de hasta el 12 %.

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100 \quad [\text{Valor porcentual}]$$

Actividad resuelta 6.1

Calcula la velocidad de sincronismo (en revoluciones por minuto) que tendría un motor de 2 polos funcionando en una red eléctrica de 50 Hz de frecuencia.

Realiza el mismo cálculo si el motor tuviese 4, 6, 8 y 12 polos.

Realiza la misma actividad si el mismo motor funcionase en una red eléctrica de 60 Hz de frecuencia.

Solución:

Número de polos	2	4	6	8	12
Pares de polos	1	2	3	4	6
n_s (rpm) a 50 Hz	3.000	1.500	1.000	750	500
n_s (rpm) a 60 Hz	3.600	1.800	1.200	900	600

Par motor (M)

El par motor, también denominado *torque*, puede definirse de una manera sencilla como la fuerza que el motor es capaz de ejercer sobre su eje. Se expresa en Nm (newtons x metro).

La potencia desarrollada por el par motor es proporcional a la velocidad angular del eje de transmisión, tal como se indica en la siguiente expresión:

$$P = M \times \omega$$

Siendo:

- P = potencia en el eje del motor (W)
 M = par motor (Nm)
 ω = velocidad angular del eje (rad/s)

Dado que la velocidad que puede alcanzar el motor no suele expresarse en rad/s, sino en revoluciones por minuto (rpm), existe otra fórmula equivalente derivada de la anterior mucho más utilizada para hallar el par transmitido por

el eje del motor, teniendo en cuenta que 1 rad/s equivale a 9,5493 rpm:

$$M = \frac{9,5493 \times P}{n}$$

Donde:

M = par motor (Nm)

P = potencia en el eje del motor (W)

n = velocidad del motor (rpm)

■ ■ ■ Rendimiento (η)

La energía eléctrica que el motor absorbe de la red de alimentación no llega íntegramente al eje de rotación, puesto que durante la conversión de esta energía en energía mecánica se producen una serie de pérdidas.

Esta diferencia entre la potencia entrante y la potencia entregada se debe fundamentalmente a los siguientes factores: el calentamiento de los conductores de cobre (efecto Joule), las pérdidas magnéticas en hierro y entrehierro (histéresis, corrientes parásitas, flujo disperso) y las pérdidas mecánicas asociadas a la ventilación y rozamiento.

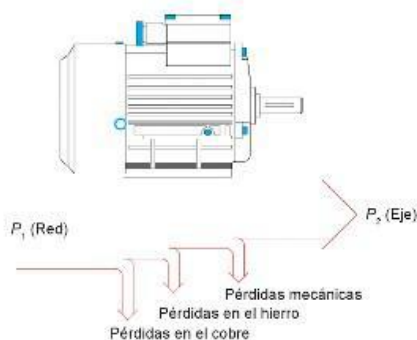


Figura 6.34. Balance de potencias en el motor eléctrico.

La relación entre la potencia de salida y la de entrada es lo que se conoce como rendimiento.

$$\eta = \frac{P_{\text{salida}}}{P_{\text{entrada}}} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{\text{pérdidas}}}$$

Donde:

η = Rendimiento

P_1 = Potencia eléctrica de entrada al estator (W)

P_2 = Potencia mecánica de salida en el eje (W)

ELECTRICIDAD-ELECTRÓNICA

Si se multiplica el resultado de la ecuación por 100 se obtiene este parámetro en valor porcentual.

El rendimiento típico de un motor trifásico suele situarse entre 0,75 y 0,92, dependiendo del fabricante, del tamaño del motor y del número de pares de polos.



RECUERDA

La potencia de entrada al motor también se denomina potencia eléctrica, potencia absorbida o potencia de red. La potencia de salida en el eje también se denomina potencia entregada, potencia útil o potencia mecánica.

■ ■ ■ 6.2.4. Placa de características

La placa de características es una pequeña chapa metálica que se coloca sobre la carcasa externa del motor en un lugar visible. Contiene el conjunto de las condiciones de servicio de funcionamiento normal y los datos técnicos más importantes establecidos por el fabricante.

La placa de características de un motor trifásico suele contener la siguiente información mínima:

- Fabricante y modelo.
- Tipo de motor.
- Tensión/tensiones de alimentación.
- Intensidad/intensidades nominales.
- Potencia activa nominal (absorbida).
- Factor de potencia.
- Velocidad.
- Rendimiento.
- Frecuencia/frecuencias de funcionamiento.
- Fecha de fabricación.
- Norma de construcción y marcado CE.
- Grado de protección IP.
- Peso (en kg).
- Clase de motor (A, B, C, D o F).

ABB Motors									
3-Phase	400V/690V	CL	F	25	100%				
3BAAAC3P000-500P									
IP	03/500			30/12					
U	330-480V	70	140%	1.2	2.3	0.79			
I	220-340A	20	140%	1.2	3.4	0.79			
S	44-680V	80	171%	1.25	3.5	0.79			
I	250-350A	80	171%	1.25	8.1	0.79			
W	10000								
3000	3000								

Schindler									
U	230V	50	100%	1.2	2.3	0.79			
I	220-340A	20	140%	1.2	3.4	0.79			
S	44-680V	80	171%	1.25	3.5	0.79			
I	250-350A	80	171%	1.25	8.1	0.79			
W	10000								
3000	3000								

Figura 6.35. Ejemplo de placa de características de dos motores de distinto fabricante.

6.2.5. Curva característica de par-velocidad de un motor de inducción

La gráfica más característica asociada a un motor es aquella en la que se muestra la denominada curva par-velocidad, que relaciona las variaciones de fuerza (par) que el motor ofrece en su eje en función de la velocidad de rotación y del par resistente, que es la oposición que el propio sistema ejerce al movimiento del mismo, fundamentalmente debido al rozamiento.

Al comenzar el funcionamiento del motor (para lo cual es necesario que el par de arranque sea mayor que el par resistente), el sistema se desplaza hasta un punto de equilibrio entre el par motor y el par resistente. En ese punto, se dice que el motor se encuentra en condiciones de funcionamiento nominales.

La velocidad de funcionamiento del motor, por tanto, viene fijada por el punto para el cual el par que el motor puede suministrar es igual al par que la carga precisa para funcionar.

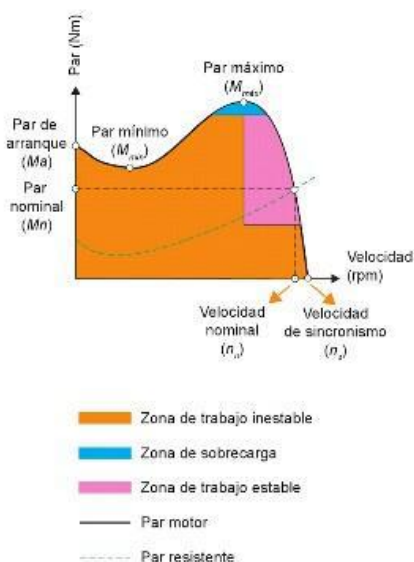


Figura 6.36. Curva característica par-velocidad de un motor.

También resulta posible relacionar esta curva característica del motor con la intensidad de corriente que los devanados del rotor demandan de la red eléctrica, quedando tal como se muestra en la siguiente figura:



Figura 6.37. Curva característica par-velocidad-intensidad de un motor.

Analizando las curvas características del motor, puede establecerse que durante el funcionamiento de la máquina existen varias fases diferenciadas:

- **Régimen nominal:** el motor funciona en condiciones de intensidad nominal, par nominal y velocidad nominal, manteniendo dicha velocidad constante.
- **Aceleración del motor:** es el tiempo que transcurre desde que la máquina comienza su movimiento hasta que alcanza el punto de trabajo nominal.
- **Zona de sobrecarga:** es la zona de trabajo donde el motor puede aportar el máximo par posible (M_{md}), es decir, donde el motor tiene más fuerza. En estas condiciones el motor se encuentra sobrecargado, de manera que si permanece en este estado demasiado tiempo se acabarían quemando los devanados.

Al conectar una carga en el eje de un motor que se encuentre girando en vacío, la velocidad del motor disminuirá, lo que produce que aumente la demanda de corriente eléctrica (sobrecarga) para intentar llevar al motor a su velocidad de funcionamiento nominal. Si la carga es muy pesada y el motor no puede llegar a alcanzar su velocidad normal, permanecerá en estado de sobrecarga.

- **Punto de arranque:** es el momento en el que el motor es conectado a la red eléctrica. En ese instante los devanados deben crear un campo magnético suficientemente grande como para que el eje del motor pueda vencer las fuerzas de rozamiento y de inercia. Por este motivo, es el momento en el que se demanda una mayor cantidad de intensidad. En condiciones normales, puede establecerse por tanto que la intensidad en el arranque del motor es la intensidad máxima demandada por el mismo.

Durante la fase de arranque un motor eléctrico puede llegar a demandar, durante unos pocos segundos, una intensidad entre 2 y 10 veces superior a la intensidad nominal, dependiendo de las características internas y la potencia del mismo.

Esta circunstancia de funcionamiento, conocida como **arranque directo**, supone un gran inconveniente para las instalaciones eléctricas, ya que ese pico de corriente inicial puede producir disparos intempestivos de los dispositivos de conexión, perturbaciones en la red eléctrica, daños en otros equipos y componentes, etc.

De hecho, el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión establece que únicamente podrán ser conectados a la red eléctrica en arranque directo los motores de potencia nominal igual o inferior a 750 W. Para potencias de funcionamiento superiores será necesario y obligatorio que los motores estén provistos de dispositivos o sistemas que limiten la intensidad de arranque. Estos **métodos de arranque** podrán ser:

- Arranques realizados mediante lógica cableada:
 - Arranque estrella-triángulo (Y-Δ).
 - Arranque mediante resistencias estatísticas.
 - Arranque mediante resistencias rotóricas.
 - Arranque por autotransformador.
- Arranques realizados mediante dispositivos electrónicos.

Dada la importancia de los posibles métodos de arranque de los motores eléctricos, estos serán estudiados en detalle en la Unidad 8 del libro, describiendo las características, técnicas y automatismos necesarios para su ejecución.



SABÍAS QUE

Si se produce alguna variación en las condiciones nominales de funcionamiento de una máquina eléctrica, esta puede actuar autocompensándose, se dice entonces que la máquina es **estable**, o alejándose cada vez más del régimen de funcionamiento normal, en cuyo caso se tratará de una máquina **inestable**.

6.3. Motores de corriente alterna

Los motores de corriente alterna monofásica son muy utilizados en mecanismos, aplicaciones y procesos que requieren muy poca potencia para su funcionamiento. La constitución y características de estos motores es muy similar a la de los trifásicos de inducción, con la salvedad de que al no tener un triple campo rotatorio desfasado 120 grados, en su arranque el eje del motor no es capaz de girar por sí mismo simplemente con alimentar los devanados del estator.

ELECTRICIDAD-ELECTRÓNICA

Los motores monofásicos, en consecuencia, precisan de un mecanismo o dispositivo auxiliar para lograr producir un par en el eje que haga que este comience el movimiento giratorio. Los sistemas más empleados en este sentido, mediante los cuales se puede realizar la clasificación de estas máquinas eléctricas, son los siguientes:

- Motor de CA de inducción con bobina auxiliar de arranque, o de fase partida.
- Motor de CA de inducción de arranque por condensador.
- Motor de CA de inducción de arranque por espira de sombra.

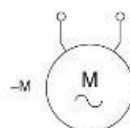


Figura 6.38. Símbolo genérico del motor de CA monofásico. Los bornes pueden nombrarse como U-V o F-N.

6.3.1. Motor de CA con bobina auxiliar de arranque

En el estator de la máquina se disponen dos devanados con un decalado de 90 grados. Al conectar el motor una corriente elevada atraviesa la bobina principal y una corriente de menor magnitud se deriva hacia la bobina auxiliar. De esta

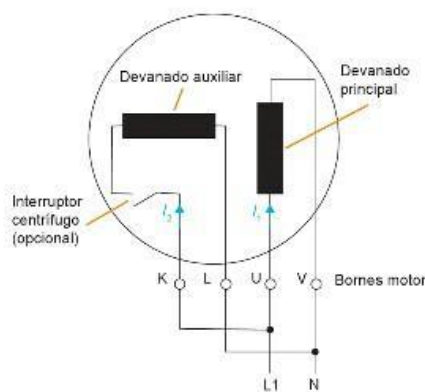


Figura 6.39. Representación interna del motor de CA con bobina auxiliar de arranque.

manera se generan dos campos magnéticos independientes desfasados entre sí, y será este desfase el responsable de generar un par suficiente que comience a mover el eje del motor, siempre que se encuentre conectado en vacío. También resulta posible conectar una resistencia u otra inductancia en serie con el devanado auxiliar para aumentar la impedancia y desfase entre las corrientes.

Una vez el motor se encuentra en funcionamiento, resulta posible mantener conectado el bobinado auxiliar, o desconectar el mismo mediante un interruptor centrífugo que actúa cuando la máquina ha alcanzado el 80 % de su velocidad nominal.

6.3.2. Motor de CA de arranque por condensador

Este es el sistema **más utilizado** en las instalaciones eléctricas que utilizan motores monofásicos. El principio de funcionamiento es similar al del arranque por bobina auxiliar, pero en este caso se conecta también un condensador fijo en el circuito auxiliar.

La diferencia de fase entre el condensador y la inductancia genera un campo magnético giratorio suficiente para mover el eje del motor, con la gran ventaja de que el **par de arranque es muy elevado**. Cuando la máquina ha alcanzado la velocidad suficiente es posible desconectar el circuito auxiliar mediante un interruptor centrífugo, aunque dependiendo de las características y uso del motor puede resultar necesario dejar el condensador conectado. En estos casos suele ser frecuente utilizar dos condensadores en paralelo para el arranque y desconectar uno de ellos durante el funcionamiento permanente del motor.

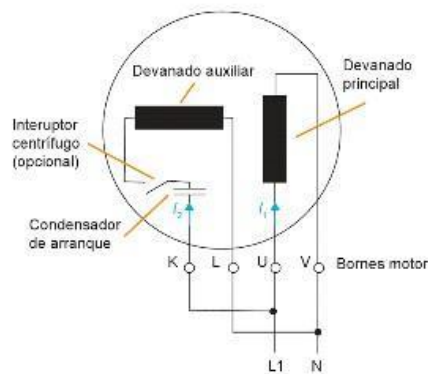


Figura 6.40. Representación interna del motor de CA con condensador de arranque.

SABÍAS QUE

La capacidad del condensador de arranque para un motor de 200 W debe ser aproximadamente de 8 μF .

6.3.3. Motor de CA de arranque por espira de sombra

Para generar el desfase de campo magnético necesario para el arranque, en estos motores se utiliza la denominada bobina o *espira de sombra*, similar a la utilizada en los contactores. La espira de sombra se ubica en una hendidura de los polos del estator y crea un flujo magnético auxiliar desfasado con respecto al principal que produce el movimiento giratorio del eje en el arranque.

Este sistema solo es aplicable en motores monofásicos de potencia no superior a 1 kW, dado su rendimiento.

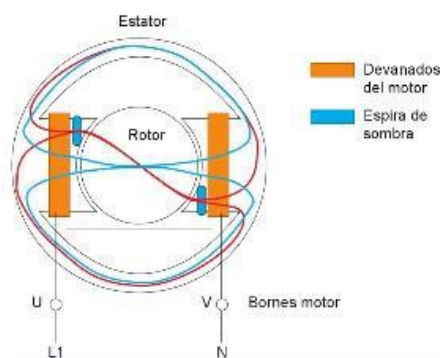


Figura 6.41. Representación interna del motor de CA con espira de sombra.

6.3.4. Motores universales

El motor monofásico universal es un tipo de motor eléctrico capaz de funcionar tanto en redes de corriente continua como de corriente alterna.

El uso de los motores universales para aplicaciones en corriente alterna está muy extendido por las múltiples ventajas que se obtienen con respecto a los motores de CA convencionales:

- Bajo coste.
- Elevado par de arranque.
- Elevada velocidad de rotación.
- Pequeño tamaño.