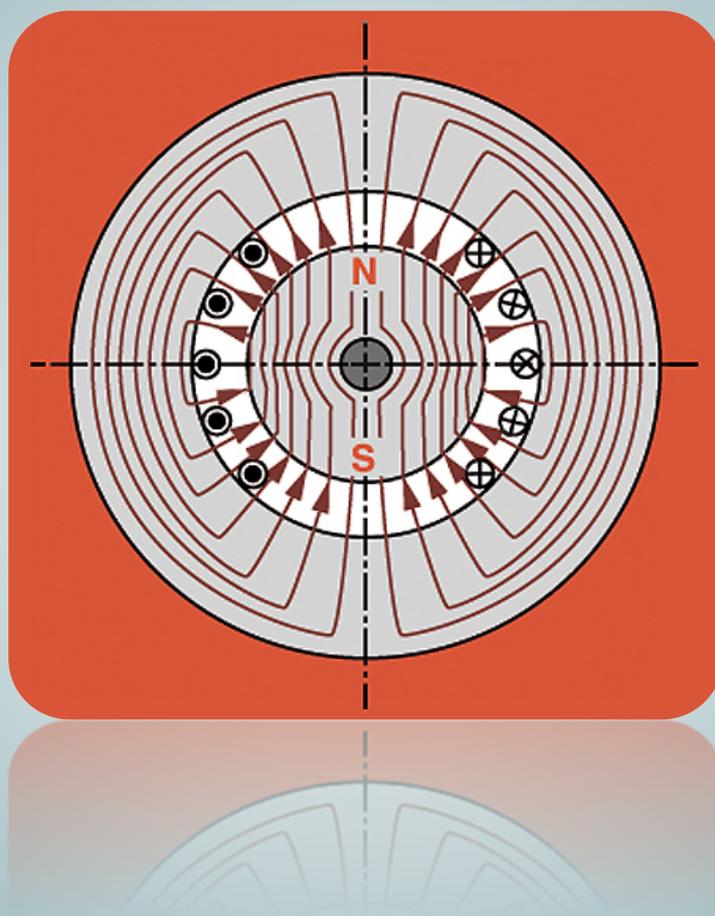


# Máquinas Eléctricas I - G862

## Documentación de la práctica de laboratorio «Máquinas Asíncronas o de Inducción»



**Miguel Ángel Rodríguez Pozueta**

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética

Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

© 2015, Miguel Angel Rodríguez Pozueta

Universidad de Cantabria (España)

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética

*This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/> or send a letter to Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.*



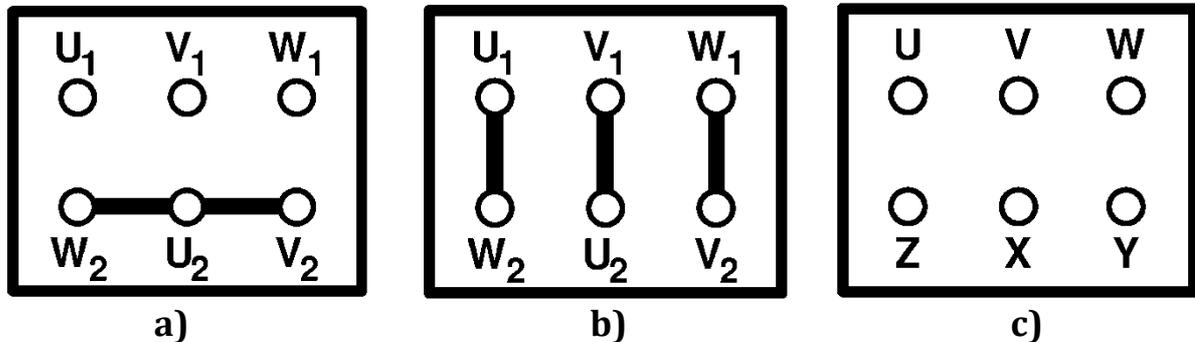
*Está permitida la reproducción total o parcial de este documento bajo la licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Unported que incluye, entre otras, la condición inexcusable de citar su autoría (Miguel Angel Rodríguez Pozueta - Universidad de Cantabria) y su carácter gratuito.*

*Puede encontrar más documentación gratuita en la página web del autor: <http://personales.unican.es/rodrigma/primer/publicaciones.htm>*

## PRÁCTICA DE LABORATORIO: MÁQUINAS ASÍNCRONAS O DE INDUCCIÓN

*Miguel Angel Rodríguez Pozueta*

### 1.- CONEXIONADO DE LOS MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN



*Fig. 1: Caja de bornes de un motor asíncrono trifásico:  
a) Conexión estrella; b) Conexión triángulo; c) Denominación antigua.*

Dependiendo de si se conectan en estrella o en triángulo, los motores asíncronos trifásicos pueden funcionar con dos tensiones diferentes que guardan entre sí una relación de  $\sqrt{3}$ . Así, un motor de 400/230 V es un motor que está calculado para que sus fases funcionen alimentadas a 230 V. Si el motor está conectado en triángulo deberá ser alimentado con una red cuya tensión de línea sea de 230 V. Si el motor está conectado en estrella, cada fase recibe una tensión  $\sqrt{3}$  veces menor (la tensión fase-neutro) que la de línea y el motor deberá ser alimentado por una red cuya tensión de línea sea de 400 V.

La caja de bornes de estos motores está dispuesta de manera que resulte fácil realizar las conexiones estrella o triángulo (Fig. 1). Los principios de los devanados de las tres fases de una máquina asíncrona trifásica se denominan U<sub>1</sub>, V<sub>1</sub> y W<sub>1</sub>, respectivamente, mientras que los finales se llaman U<sub>2</sub>, V<sub>2</sub> y W<sub>2</sub>. En la caja de bornes estos extremos de las fases se disponen en dos filas de tres terminales cada una, desplazando una posición las fases de una fila respecto de la otra. De esta manera, la conexión estrella se realiza mediante puentes horizontales (Fig.1a) y la conexión triángulo mediante puentes verticales (Fig.1b). En ambos casos las tres fases de la red se conectan a los terminales U<sub>1</sub>, V<sub>1</sub> y W<sub>1</sub>. Antiguamente se utilizaban las letras U, V y W para denominar los principios de las fases (en lugar de U<sub>1</sub>, V<sub>1</sub> y W<sub>1</sub>) y las letras X, Y y Z para los finales (en lugar de U<sub>2</sub>, V<sub>2</sub> y W<sub>2</sub>) (véase la Fig. 1c). En muchas figuras de este texto aparece esta denominación antigua.

## 2.- ARRANQUE DE LOS MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN

### 2.1.- Arranque directo

Potencia Nominal del motor	Máximo valor admisible del cociente $I_{cc} / I_{IN}$
0,75 - 1,5 kW	4,5
1,5 - 5 kW	3,0
5 - 15 kW	2,0
más de 15 kW	1,5

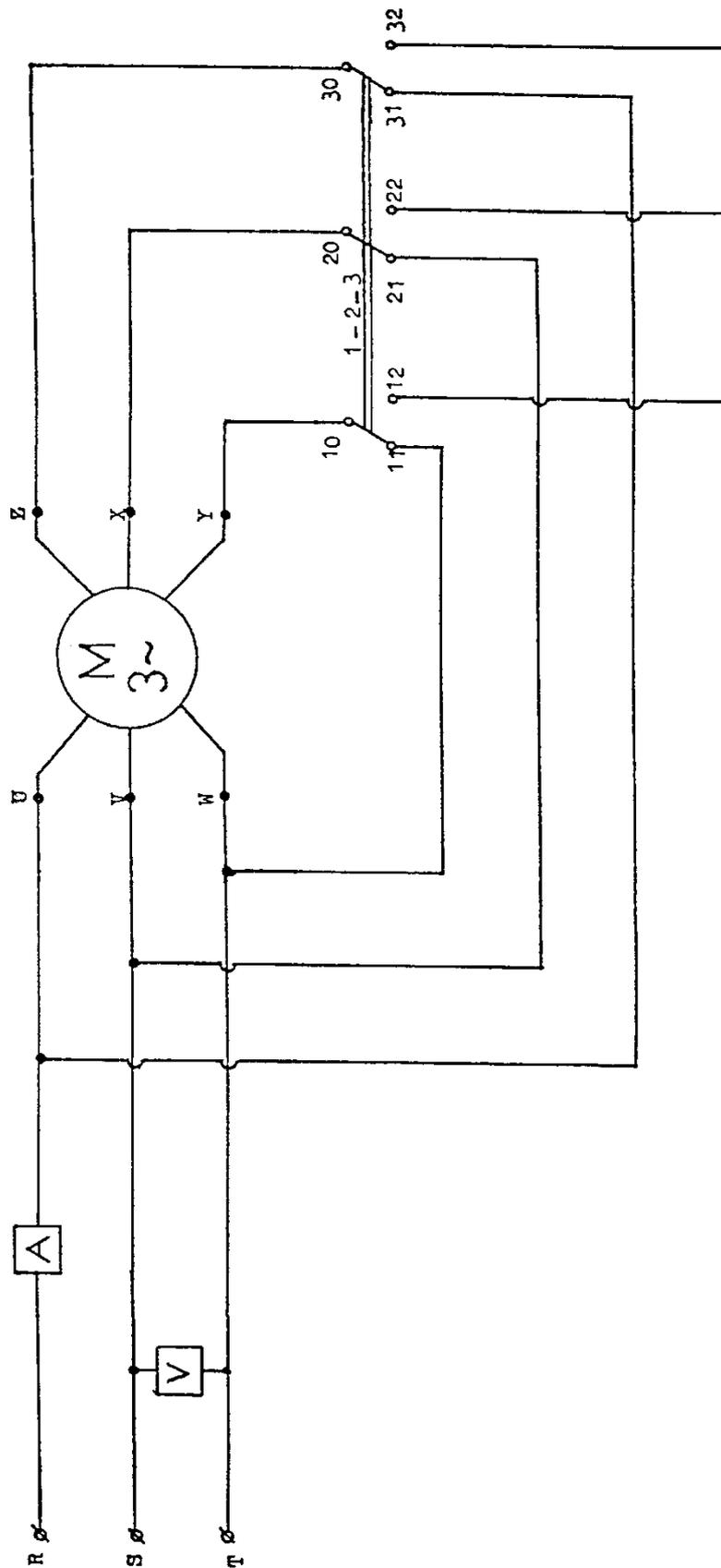
*Tabla 1: Valores máximos admitidos de la corriente de arranque.*

Se puede realizar el arranque de un motor asíncrono trifásico simplemente alimentándolo con su tensión nominal. Este procedimiento se denomina arranque directo y sólo se utiliza para motores de pequeña potencia. Esto es debido a que con este método la intensidad de arranque  $I_{cc}$  es muy grande (hasta 7 veces la intensidad nominal), lo que puede dañar al motor y provocar caídas de tensión en la red que afecten a otros abonados.

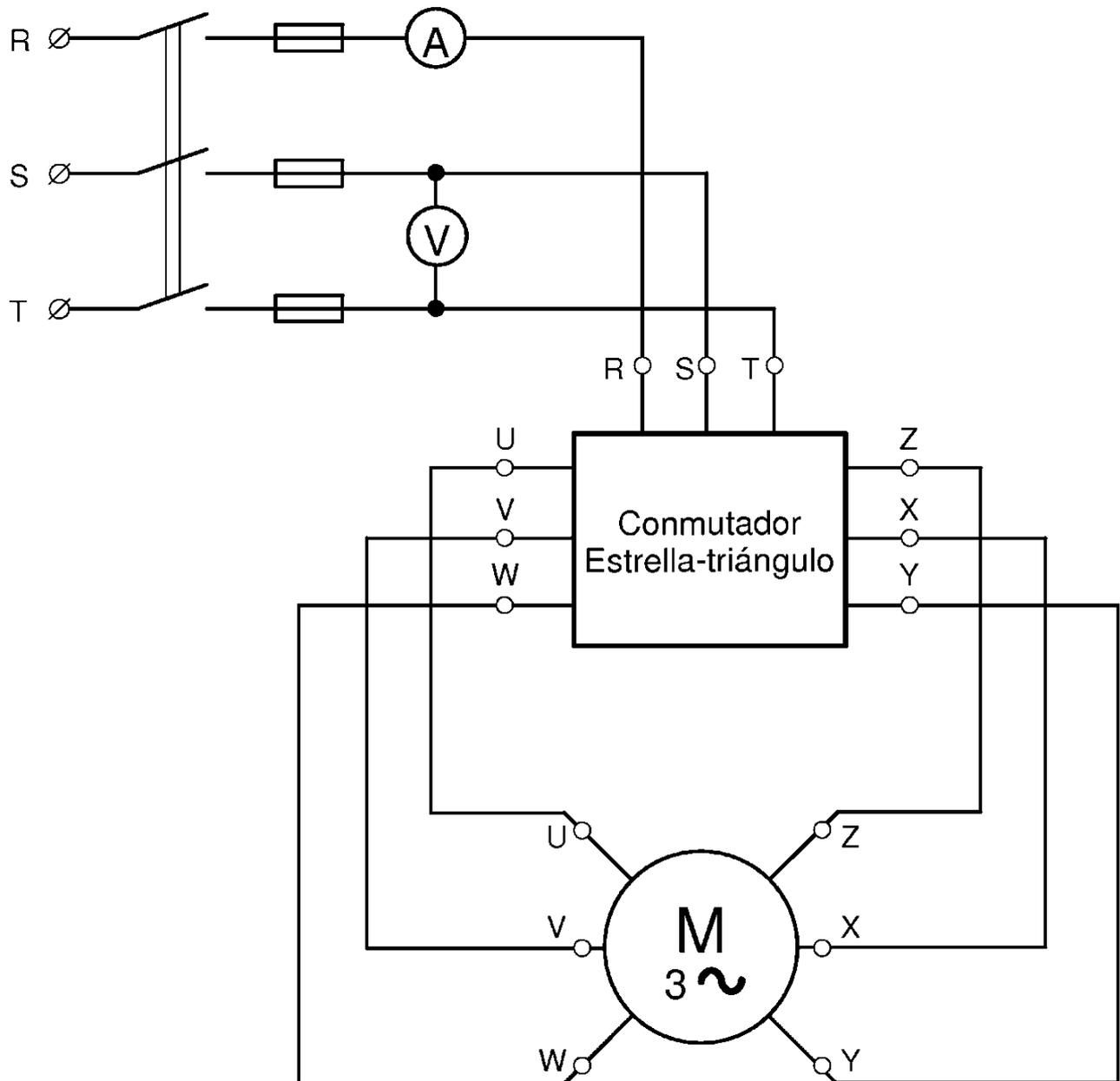
Por esta razón las compañías eléctricas obligan a utilizar métodos de arranque más suaves para motores de potencia superior a 0'75 kW. Así, la instrucción ITC-BT-47 del Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión fija los valores máximos de la relación entre la intensidad de arranque y la de plena carga (Tabla 1).

### 2.2.- Arranque estrella-triángulo

Este sistema de arranque se utiliza con motores que estén preparados para funcionar en triángulo con la tensión de la red. Consiste en arrancar teniendo conectado el motor en estrella y pasarlo después a triángulo. De esta manera cada fase del motor recibe una tensión  $\sqrt{3}$  veces menor que la nominal en el momento del arranque y así consume una corriente menor.



*Fig. 2: Arranque estrella-triángulo mediante un conmutador trifásico.*



*Fig. 3: Arranque estrella-triángulo mediante un conmutador manual especialmente diseñado para esta maniobra.*

Con este sistema se consigue reducir el valor eficaz de la intensidad de arranque a  $1/3$  del de la intensidad de línea en el arranque directo, pero el par de arranque también se reduce a un tercio. Esto puede presentar problemas si el motor debe arrancar en carga.

$$I_{a\lambda} = \frac{I_{aL}}{3} \quad (1)$$

$$M_{a\lambda} = \frac{M_a}{3} \quad (2)$$

La conmutación de la conexión estrella a la conexión triángulo se puede realizar de forma manual mediante el circuito representado en la Fig. 2. El conmutador deja el motor conectado en triángulo cuando está en la posición representada en la figura y lo pone en estrella en la posición opuesta. Otro circuito para realizar la conmutación estrella-triángulo mediante un conmutador especialmente diseñado para esta maniobra se representa en la Fig. 3.

También se puede realizar la conmutación estrella-triángulo de forma automática mediante contactores y relés o mediante autómatas programables.

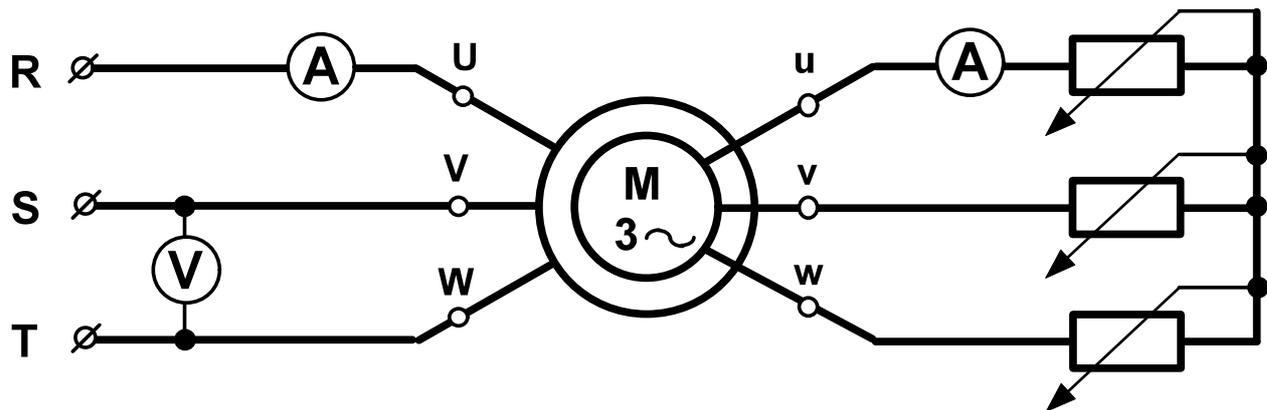
### **2.3.- Arranque por introducción de resistencias en serie con el rotor**

Este sistema de arranque sólo se puede utilizar en motores de rotor bobinado y consiste en conectar una resistencia en serie con cada fase del rotor. Una vez arrancado el motor, se van disminuyendo progresivamente las resistencias puestas en serie con el rotor hasta que éste queda cortocircuitado.

Con este sistema se reduce la intensidad de arranque y se aumenta el deslizamiento en el que se produce el par máximo, pero sin que éste varíe. Incluso se puede obtener el par máximo en el arranque para una determinada resistencia  $R_{adic}$  conectada en serie con el rotor, cuyo valor reducido al estator  $R'_{adic}$  vale:

$$R'_{adic} = \sqrt{R_1^2 + X_{cc}^2} - R'_2 \quad (3)$$

donde  $R_1$  es la resistencia del estator,  $R'_2$  es la resistencia del rotor reducida al estator y  $X_{cc}$  es la reactancia de cortocircuito.



*Fig. 4: Conexión de un motor de rotor bobinado.*

### 3.- MOTORES ASÍNCRONOS MONOFÁSICOS

#### 3.1.- Motor monofásico simple

El teorema de Leblanc dice que un devanado recorrido por una corriente alterna monofásica crea un campo magnético pulsante, el cual equivale a dos campos magnéticos giratorios iguales que rotan en sentidos opuestos.

Un motor de jaula de ardilla cuyo estator posea un único devanado por el que circula una corriente alterna monofásica no podrá, según el teorema de Leblanc, arrancar por sí mismo, pues los dos campos magnéticos giratorios dan lugar a un par resultante nulo.

Si se consigue hacer girar a este motor a una velocidad  $n$  mediante un par externo, el deslizamiento  $s_d$  del campo giratorio directo (el que gira en el mismo sentido que el motor) tiene este valor

$$s_d = \frac{n_1 - n}{n_1} = 1 - \frac{n}{n_1} = s \quad (4)$$

y el deslizamiento  $s_i$  del campo inverso (el que gira en sentido contrario al del eje del motor) vale

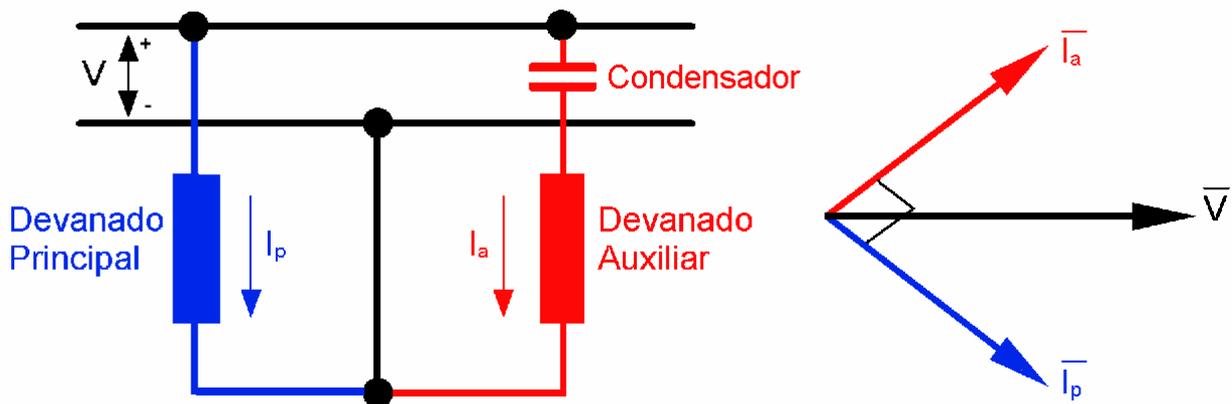
$$s_i = \frac{(-n_1) - n}{(-n_1)} = 1 + \frac{n}{n_1} = 2 - s \quad (5)$$

Las relaciones (4) y (5) indican que si se consigue hacer girar al motor a una velocidad  $n$  los deslizamientos de los dos campos giratorios no son iguales y el par resultante no será nulo. Por lo tanto, una vez arrancado, el motor sigue girando por sí mismo.

### 3.2.- Motores monofásicos de condensador

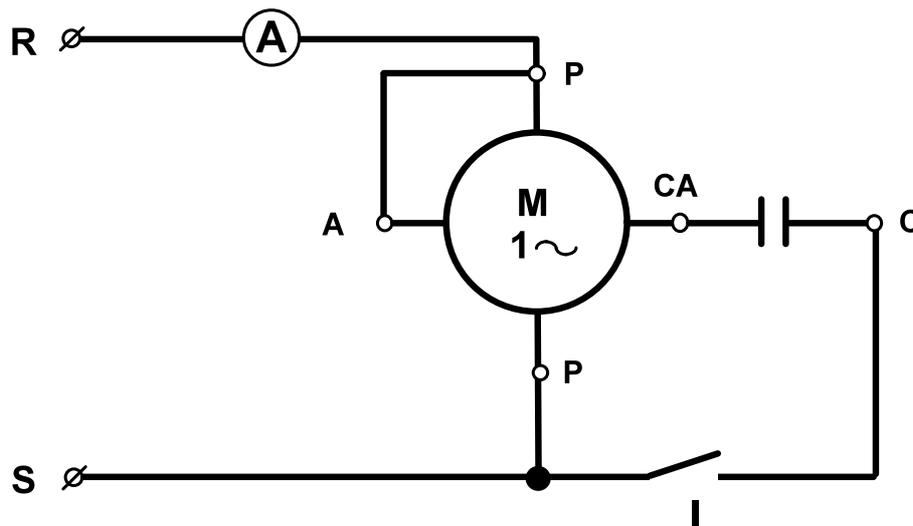
Los motores monofásicos de condensador poseen en su estator dos devanados desfasados entre sí  $90^\circ$  eléctricos en el espacio; uno de ellos se denomina *principal* y usualmente cubre los  $2/3$  de las ranuras del estator y el otro se denomina *auxiliar* y cubre el resto del estator.

En serie con el devanado auxiliar se conecta un condensador de tal manera que las intensidades que circulen por ambos devanados queden desfasadas  $90^\circ$  en el tiempo y sus módulos sean iguales (Figs. 5 y 6).



*Fig. 5: Principio de funcionamiento de un motor monofásico de condensador.*

Al circular unas corrientes de iguales valores eficaces y desfasadas entre sí  $90^\circ$  en el tiempo por unos devanados desfasados  $90^\circ$  eléctricos en el espacio se genera un campo magnético giratorio circular que hace girar al motor.



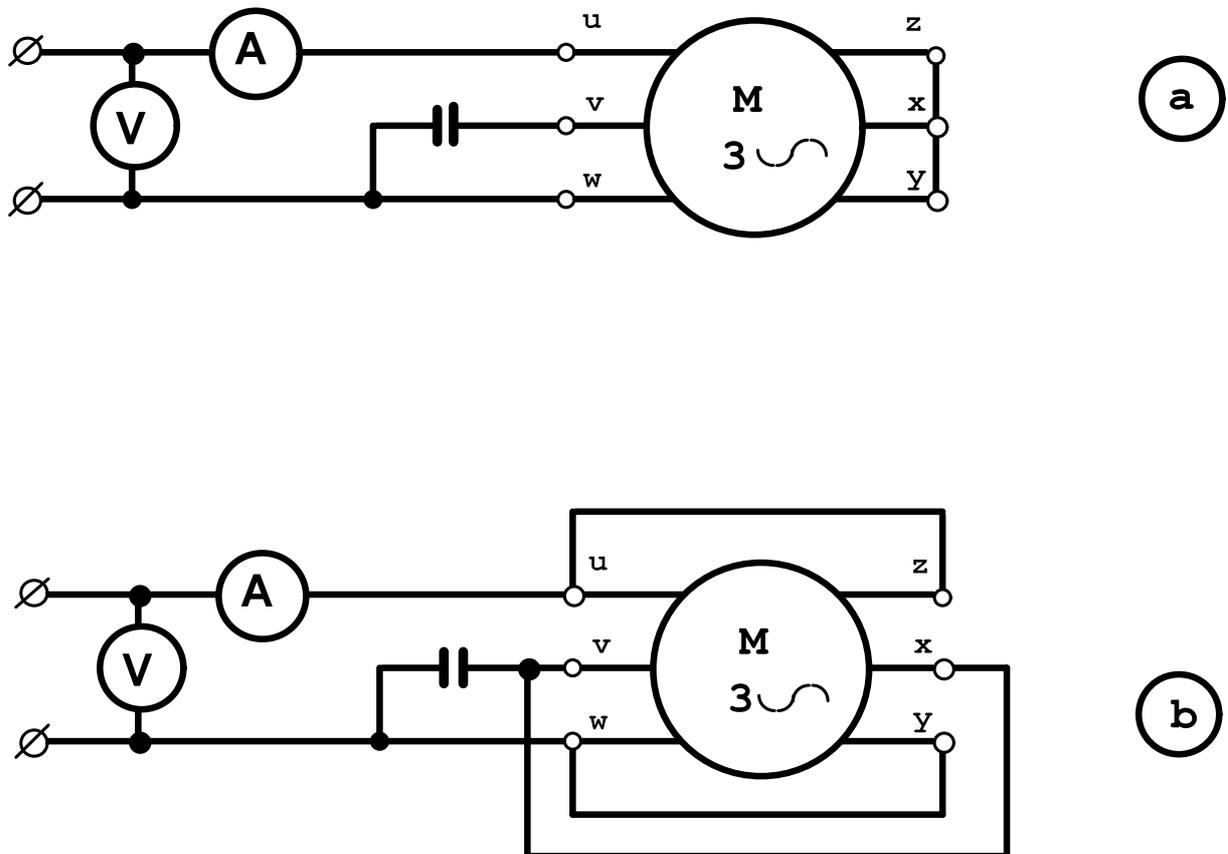
*Fig. 6: Conexión de un motor monofásico de condensador.*

Una vez arrancado el motor, se puede desconectar el devanado auxiliar y el motor seguirá funcionando como monofásico simple o se le puede dejar con el condensador y el devanado auxiliar conectados. En este último caso hay que dimensionar el condensador y el devanado auxiliar para que puedan funcionar conectados a la red no sólo durante el arranque, sino de forma permanente.

#### **4.-CONEXIÓN DE UN MOTOR ASÍNCRONO TRIFÁSICO A UNA RED MONOFÁSICA. CONEXIÓN STEINMETZ**

Si un motor de inducción trifásico con el rotor parado se conecta a una red monofásica, el motor no arranca por sí mismo y consume una corriente elevada que acaba por averiarlo. Esto se debe a que el campo magnético que genera el estator ya no es giratorio, sino pulsante, como en un motor monofásico simple.

Se puede conseguir que un motor trifásico funcione en una red monofásica si se le hace funcionar como si fuera un motor monofásico de condensador mediante la conexión Steinmetz (Fig. 7). Para ello se conectan las tres fases del estator en estrella o en triángulo, de acuerdo con el valor de la tensión de la red monofásica, y los extremos U, V y W (o  $U_1$ ,  $V_1$  y  $W_1$ , según la nueva nomenclatura de los bornes de máquinas eléctricas) de las fases del motor se conectan a la red así:



*Fig. 7: Conexión Steinmetz para un motor de 400/230 V:  
(a) en una red de 400 V.  
(b) en una red de 230 V.*

- Dos de estos extremos se conectan a los dos conductores de la red monofásica.
- El tercer extremo de las fases del motor se conecta a uno cualquiera de los conductores de la red monofásica a través de un condensador.

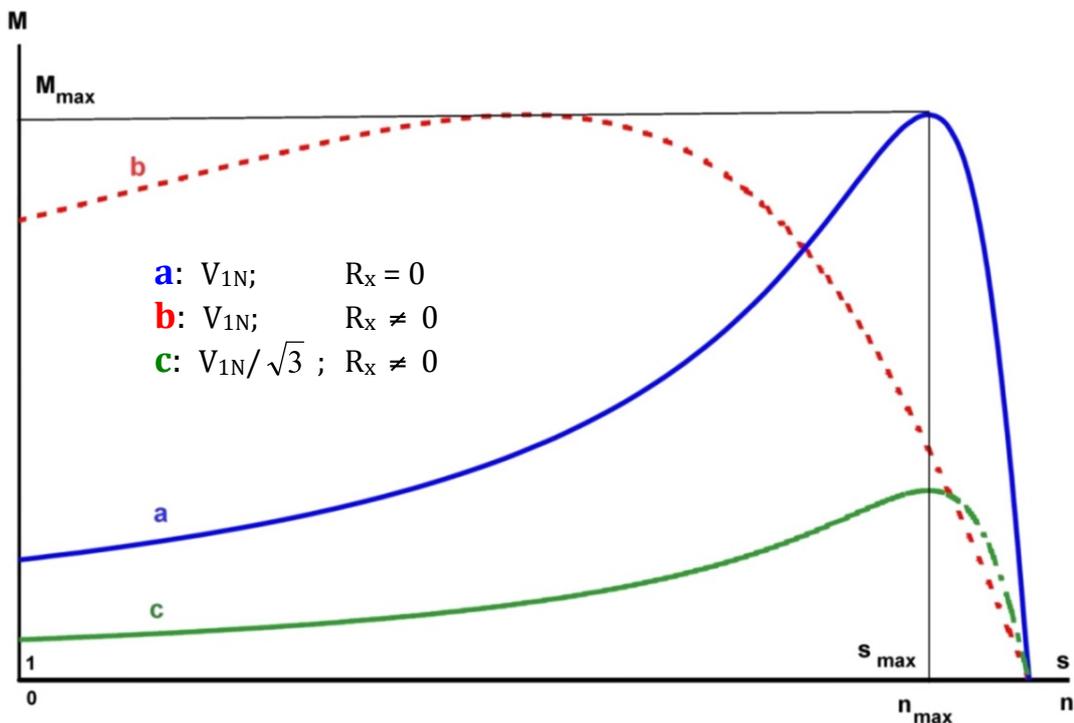
De esta manera se consigue que entre las corrientes de las tres fases del motor exista un cierto desfase, lo cual origina un campo giratorio. Este campo no es circular, sino elíptico, pero basta para que el motor gire. De todos modos, un motor conectado de esta manera (conexión Steinmetz) no tiene un reparto idóneo de campo magnético y corrientes y no se le puede exigir una potencia superior a un 70% de la nominal.

La Fig. 7 representa la conexión Steinmetz para un motor de 400/230 V. En la Fig. 7a el motor se conecta en estrella, pues la tensión de la red es de 400 V, y en la Fig. 7b se conecta en triángulo, pues la red tiene una tensión de línea de 230 V.

En la literatura técnica se recomienda utilizar condensadores de papel metalizado, con una capacidad -en redes de 230 V y 50 Hz- de 60 microfaradios por kilovatio de potencia asignada del motor y cuya tensión nominal sea igual o superior a 1'25 veces el valor máximo de la tensión de la red monofásica.

### 5.- CURVA DEL PAR DE UN MOTOR ASÍNCRONO TRIFÁSICO

La curva del par de un motor asíncrono alimentado por un sistema trifásico de tensiones de valor eficaz y de frecuencia constantes, cuyo devanado estatórico genera un campo magnético giratorio perfectamente circular y que no tiene pérdidas mecánicas es la representada en la curva a de la figura 8.



*Fig. 8: Curva del par de un motor trifásico de inducción.*

Si la tensión de alimentación disminuye (curva c de la Fig. 8), el par máximo que puede suministrar la máquina disminuye, pero no varía la velocidad a la que el motor proporciona dicho par máximo.

Si se conecta una resistencia en serie con cada fase del rotor, el valor del par máximo no varía, pero disminuye la velocidad en la que la máquina suministra dicho par máximo (curva b de la Fig. 8).

Para tener en cuenta las pérdidas mecánicas de la máquina hay que restar al par representado en las curvas de la Fig. 8 el par de frenado producido por dichas pérdidas. Por este motivo, una máquina real, con pérdidas mecánicas, gira a una velocidad ligeramente inferior a la de sincronismo ( $n_1$ ) cuando está en vacío; es decir, cuando proporciona un par útil nulo.

Para obtener experimentalmente la curva de par de un motor asíncrono se acopla su eje al de un freno, el cual puede consistir en una máquina que ejerza un par resistente que se pueda regular a voluntad. Seguidamente se ajusta el freno para obtener varios pares resistentes distintos y con cada carga se miden tanto el par como la velocidad.

ANEXO:

**CURVAS PAR-VELOCIDAD DE UN MOTOR ASÍNCRONO DE ROTOR BOBINADO  
OBTENIDAS EXPERIMENTALMENTE EN EL LABORATORIO**

