



UNIVERSIDADE
DE VIGO

MÁQUINAS ASÍNCRONAS

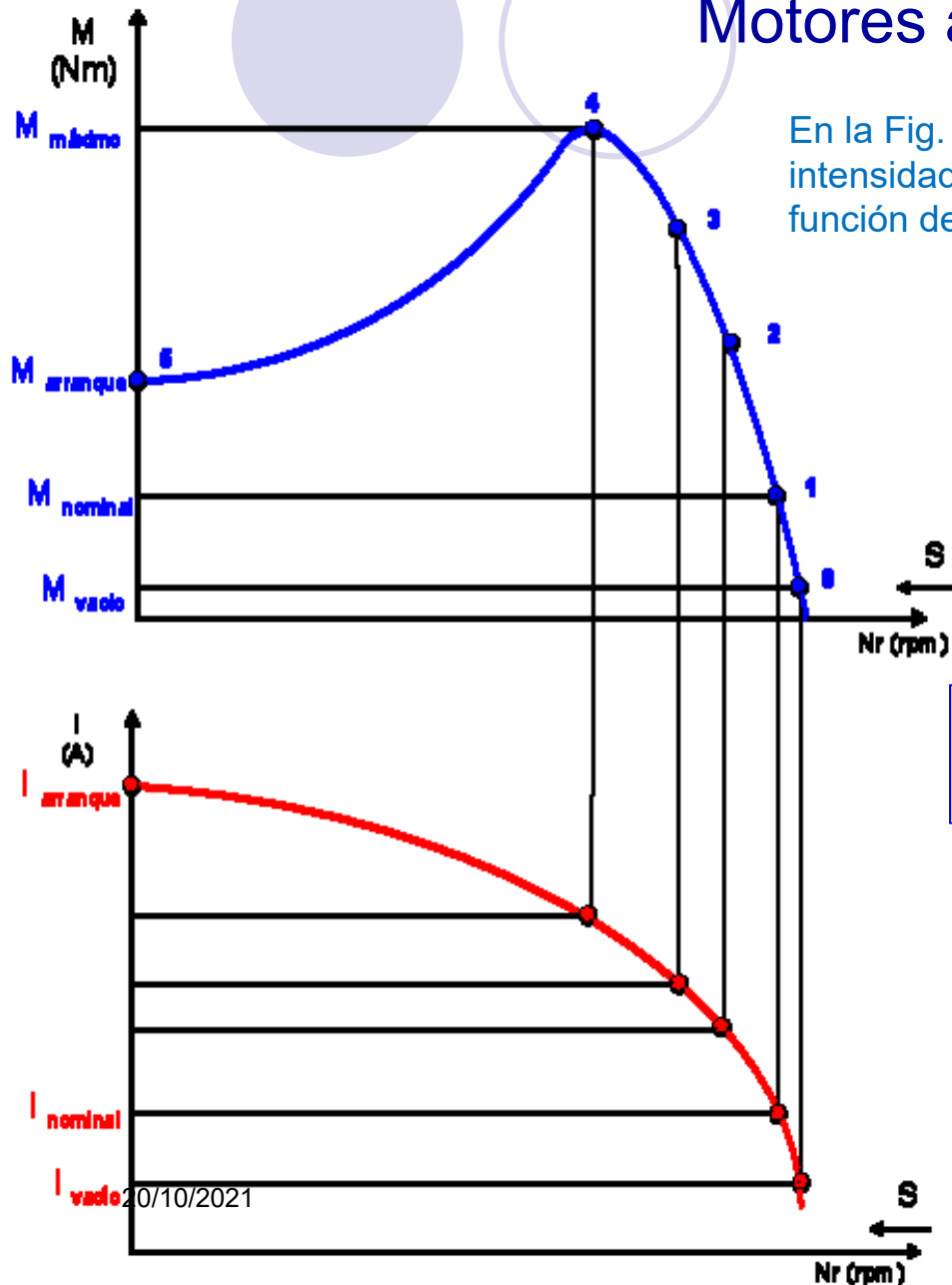
Arranque

Manuel Pérez Donsión

Departamento de Ingeniería Eléctrica

Universidad de Vigo

Motores asíncronos. Arranque



En la Fig. se puede ver la curva del par motor (M) y la de la intensidad (I) (intensidad estática absorbida de la red), en función de la velocidad del motor (N_r).

Punto 5: es el punto de arranque, cuando el motor está conectado a la red pero la velocidad del rotor aún es cero

En el **arranque** ($N_r=0$), **punto 5 de la figura**, el deslizamiento vale 1 (100%):

$$S_{\text{arranque}}(\%) = \frac{N_s - N_r}{N_s} * 100 = \frac{N_s - 0}{N_s} * 100 = 100\%$$

La **intensidad** en el arranque (I_{arrq}) es la **máxima** del motor. Los valores de esta intensidad y del par de arranque (M_{arrq}) dependen del tipo de motor.

Motores asíncronos. Arranque

El comportamiento dinámico del motor en el período transitorio de arranque, viene dado por la siguiente expresión:

Donde:

M_m = Par motor

M_r = Par resistente

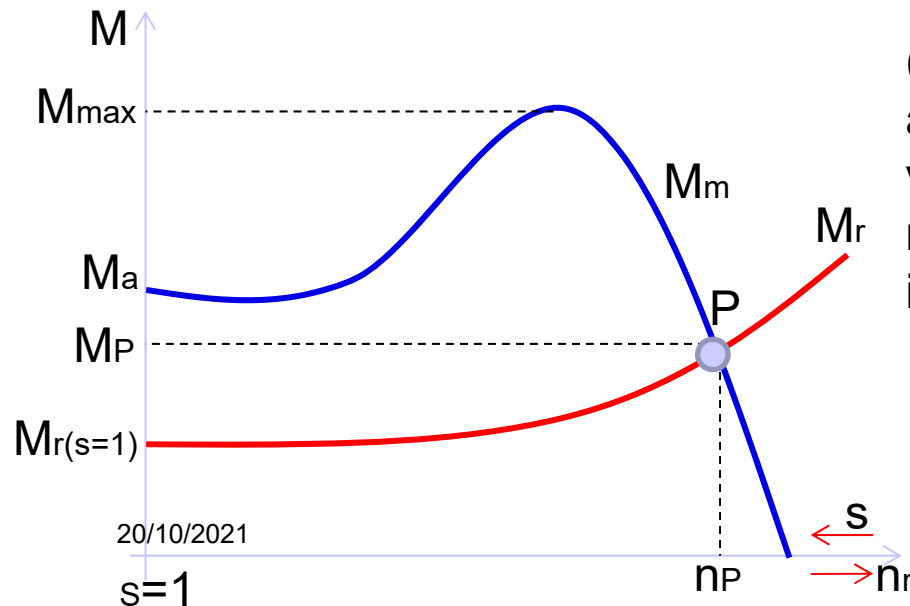
J = Momento de inercia de las partes giratorias

w = Velocidad angular del rotor

$$M_m - M_r = J \frac{dw}{dt}$$

Ecuación del movimiento

Para que se produzca el arranque del motor es necesario que el par de arranque del motor (M_a) sea superior al par resistente de la carga ($M_{r(s=1)}$).

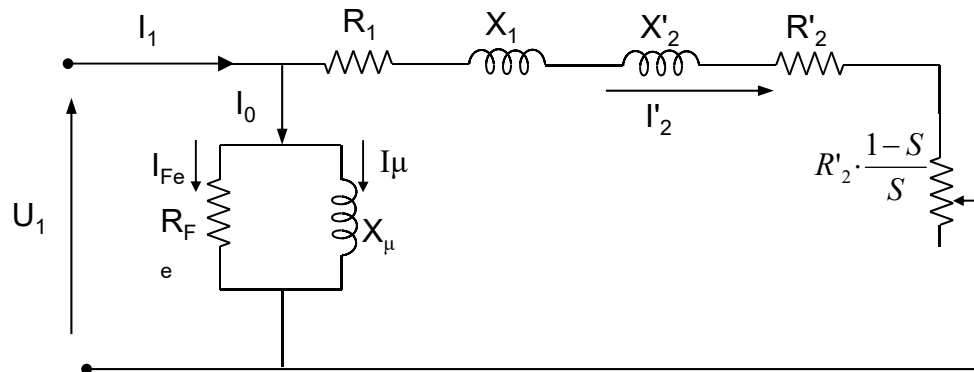


($M_a > M_{r(s=1)}$) Se produce entonces una aceleración que hace girar el motor a una velocidad cada vez mayor, hasta llegar al régimen permanente (punto P) cuando se igualan el par motor y el resistente ($M_m = M_r$).

Punto P $\left\{ \begin{array}{l} \text{Par} = M_P \\ \text{Velocidad} = n_P \end{array} \right.$
 $M_m = M_r$

Motores asíncronos. Arranque

En el arranque se produce una corriente elevada (I_a) que es preciso reducir. En el circuito equivalente la resistencia de carga $R'_c = 0$ puesto que $s=1$ (cortocircuitada).



P_n	I_a/I_n
De 0,75 kW a 1,5 kW	4,5
De 1,5 kW a 5,0 kW	3
De 5,0 kW a 15 kW	2
De más de 15 kW	1,5

Constante de proporcionalidad I_a/I_n permitida en función de la potencia del motor P_n

Acción sobre U_1

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{cc}^2}}$$

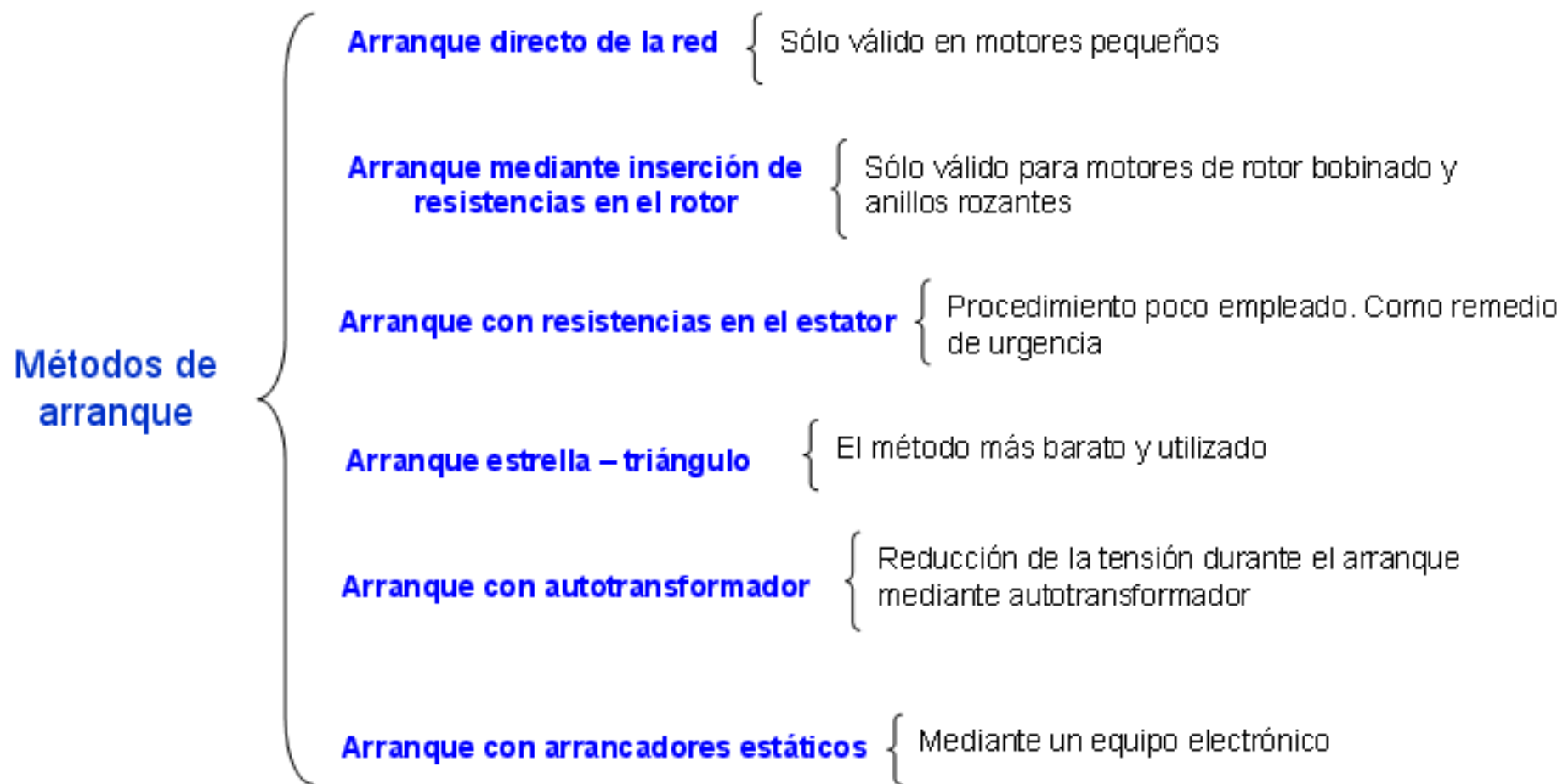
$$M_i = \frac{3 \cdot \frac{R'_2}{s} \cdot U_1^2}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n_1}{60} \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{cc}^2 \right]}$$

Acción sobre R_1 o $R'_2(*)$

(*) Solamente en motores de rotor bobinado

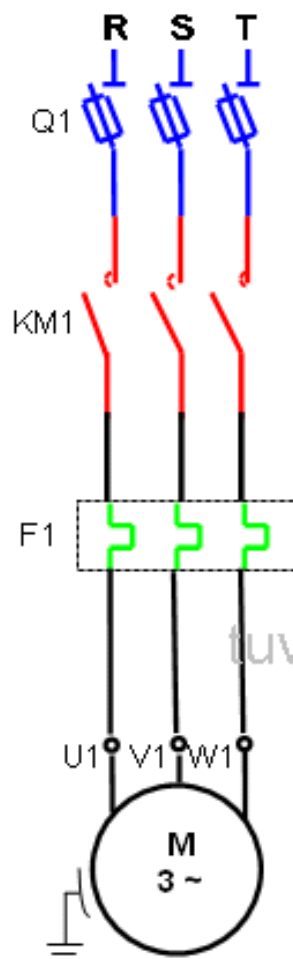
Para reducir las corrientes de arranque se emplean diferentes métodos que se estudiarán a continuación. Es preciso tener en cuenta que al reducir la corriente de arranque también se reduce el par.

Motores asíncronos. Arranque



Motores asíncronos. Arranque

Arranque directo



Circuito de Potencia



Seccionador



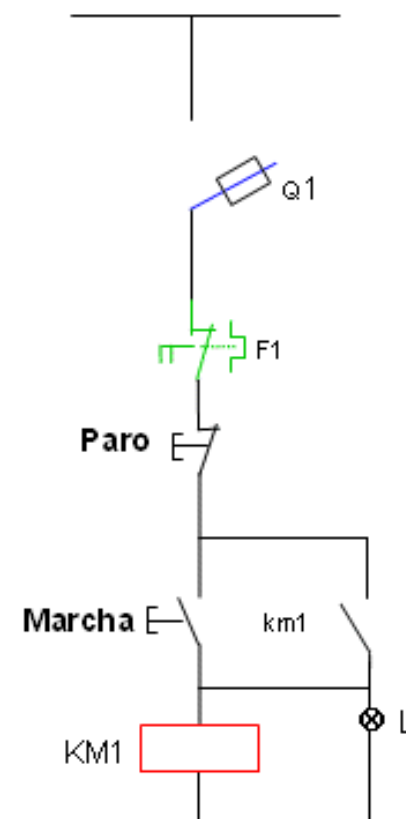
Contactor



Relé Térmico



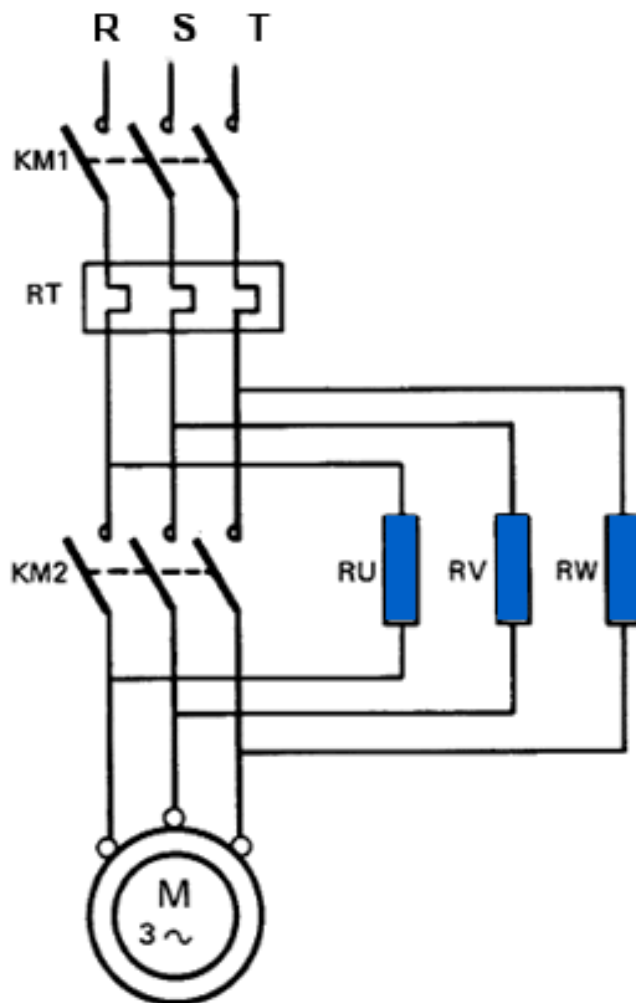
Motor



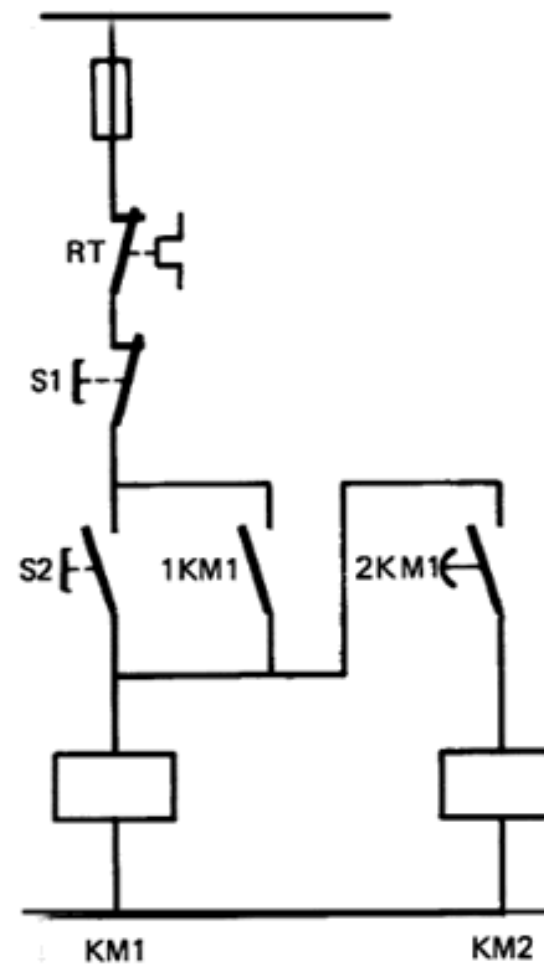
Circuito de Mando

Motores asíncronos. Arranque

Arranque por resistencia intercalada en el estator



Circuito de Potencia



Circuito de Mando

Motores asíncronos. Arranque

Arranque por resistencia intercalada en el estator

$$a = \frac{I_a}{I_n}$$

$$P_{an} = K \frac{I_n^2}{S_n}$$

P_{an} = Potencia interna nominal (Min "V-s")

$$P_{aa} = K \cdot I_a^2$$

P_{aa} = Potencia interna en arranque (Mia "V-s")

considerando: $(I_0 = 0) \Rightarrow I'_2 = I_1$

$$\frac{P_{aa}}{P_{an}} = S_n \frac{I_a^2}{I_n^2} = S_n \cdot a^2$$

I_a es la corriente máxima de arranque admitida en la red

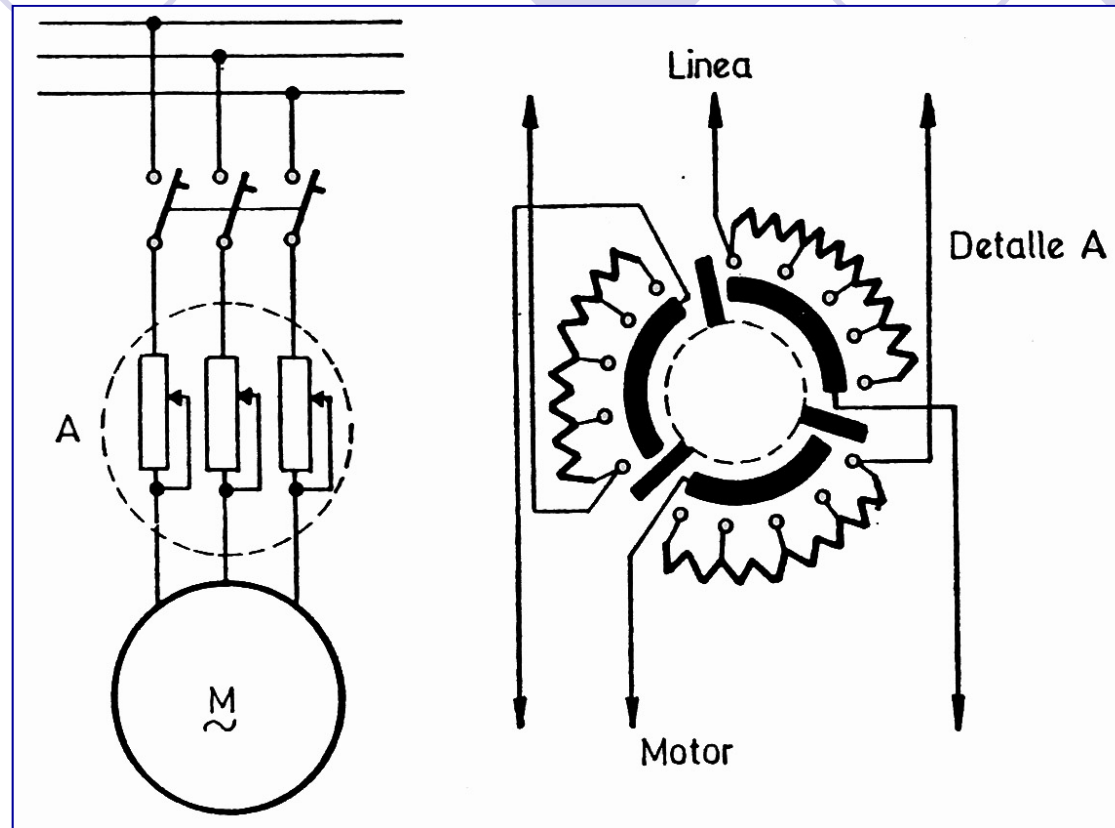
Arranque directo: $\vec{Z}_{ccf} = R_{cc} + jX_{cc} = \left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right) + j(X_1 + X'_2)$

$$\vec{I}_{af} = \frac{\vec{U}_{1f}}{\vec{Z}_{ccf}}$$

$$I_{af} = \frac{U_{1f}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}}$$

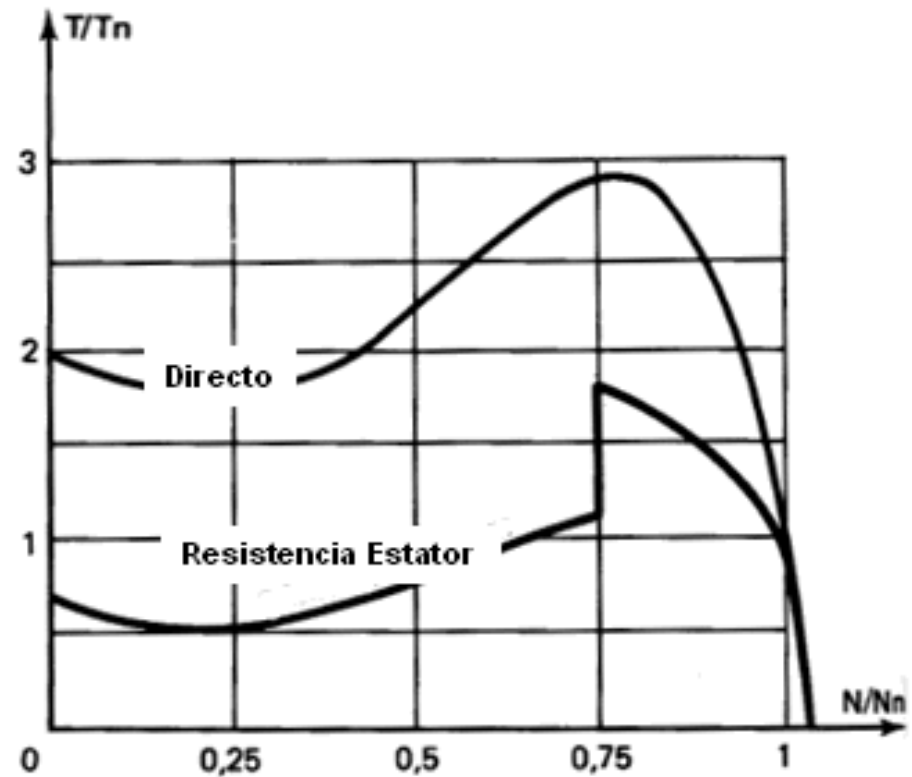
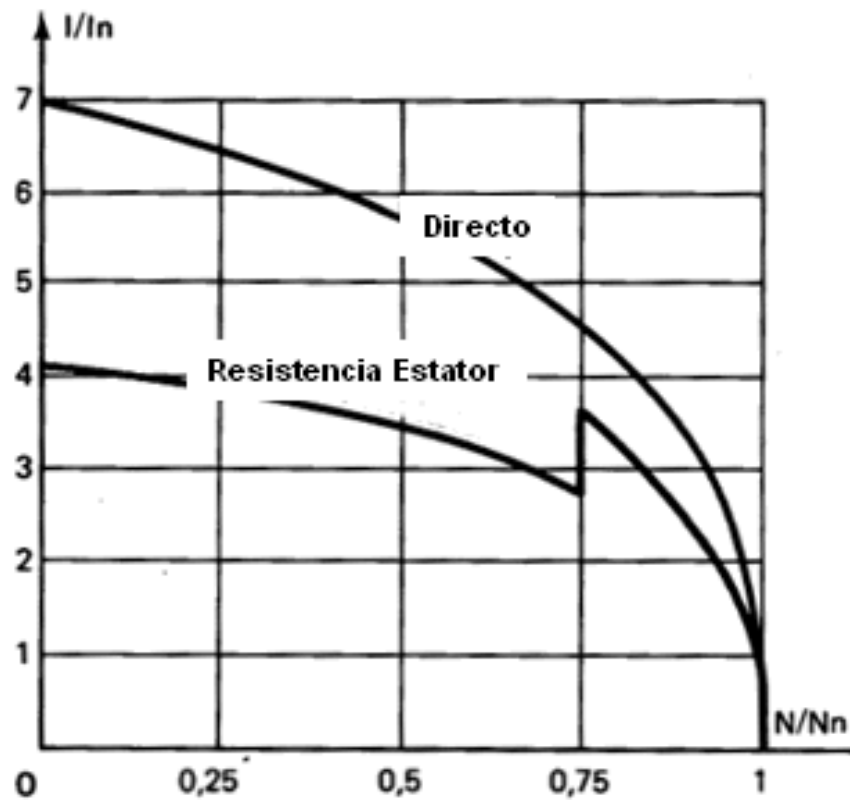
arranque $\Rightarrow s = 1$
 $I_{af} = I_{ccf}$

$$\left\{ \begin{array}{l} 1 \Rightarrow Y \Rightarrow I_{af} = I_{aL} = I_a \\ 1 \Rightarrow Y \Rightarrow U_{1f} = U_{1L} / \sqrt{3} \end{array} \right.$$



Motores asíncronos. Arranque

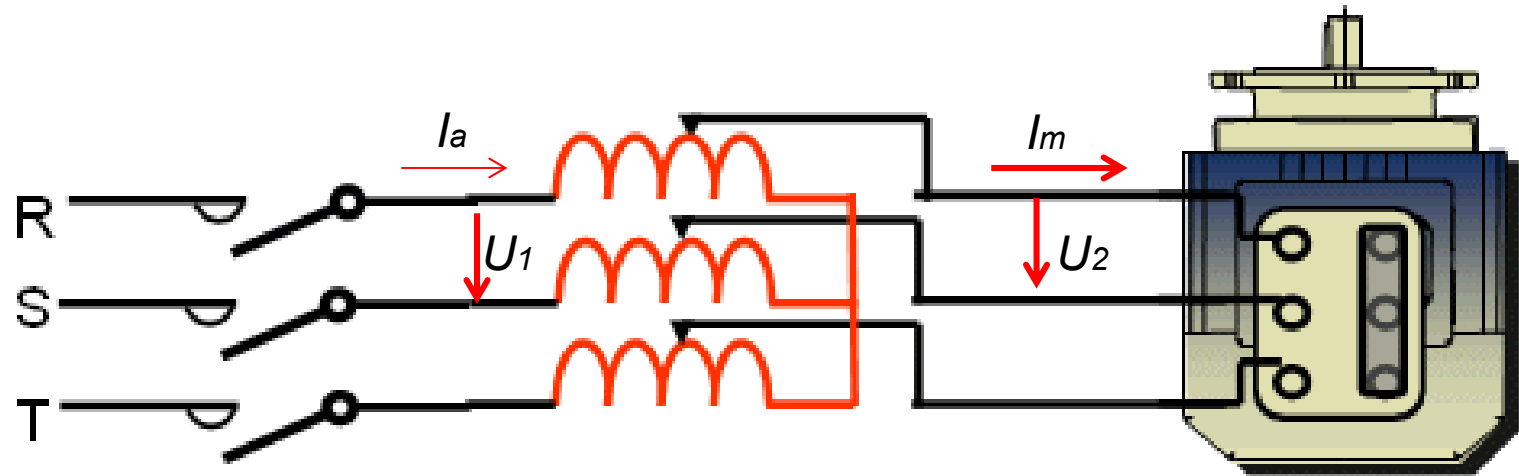
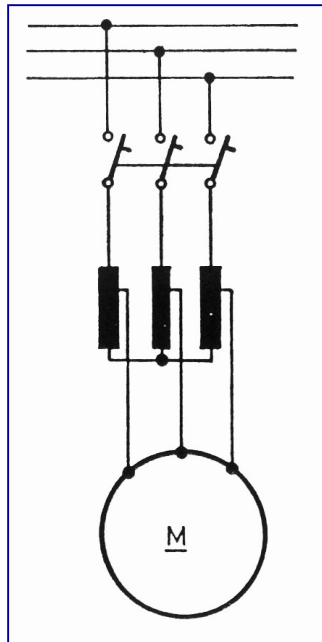
Arranque por resistencia intercalada en el estator



Motores asíncronos. Arranque

$$a = \frac{I_a}{I_n}$$

Arranque por autotrafoformador



I_a es la corriente máxima de arranque que se permite que el motor, en función de su potencia, absorba de la red

Parado

$$I_m = r \cdot I_a$$

$$\frac{P_{aa}}{P_{an}} = s_n \frac{r^2 \cdot I_a^2}{I_n^2} = s_n \cdot a^2 \cdot r^2$$

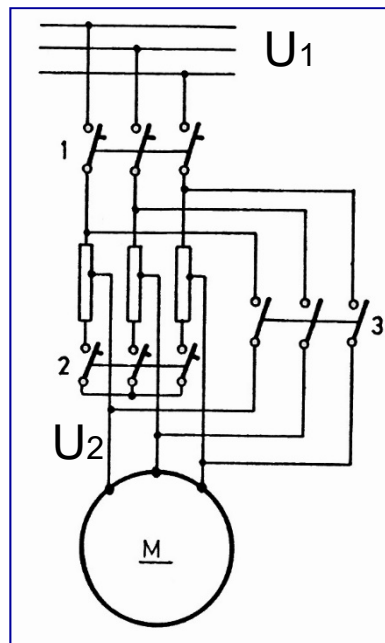
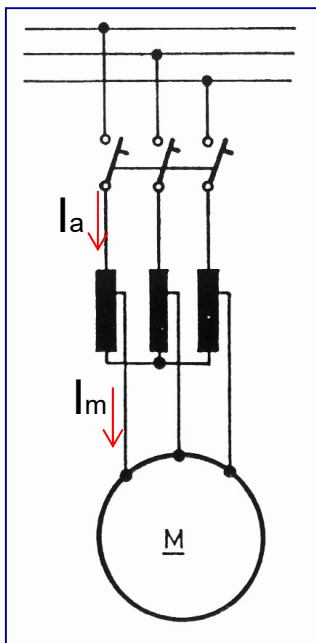


En el arranque por transformador, con la misma relación a que en el arranque por resistencias, el par de arranque el r^2 veces superior

$$U_2 = \frac{U_1}{r}$$

Motores asíncronos. Arranque

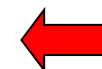
Arranque por autotransformador



$$U_2 = \frac{U_1}{r}$$

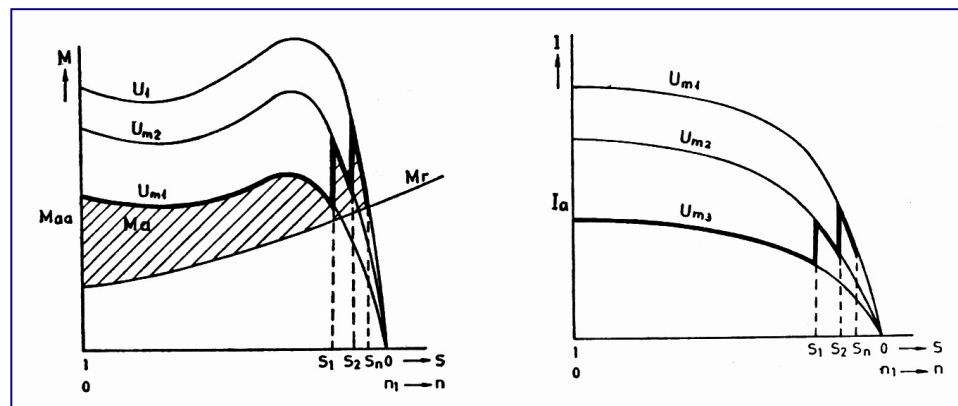
$$I_m = r \cdot I_a$$

$$\frac{P_{aa}}{P_{an}} = s_n \frac{r^2 \cdot I_a^2}{I_n^2} = s_n \cdot a^2 \cdot r^2$$



Conexión Kormdorfer

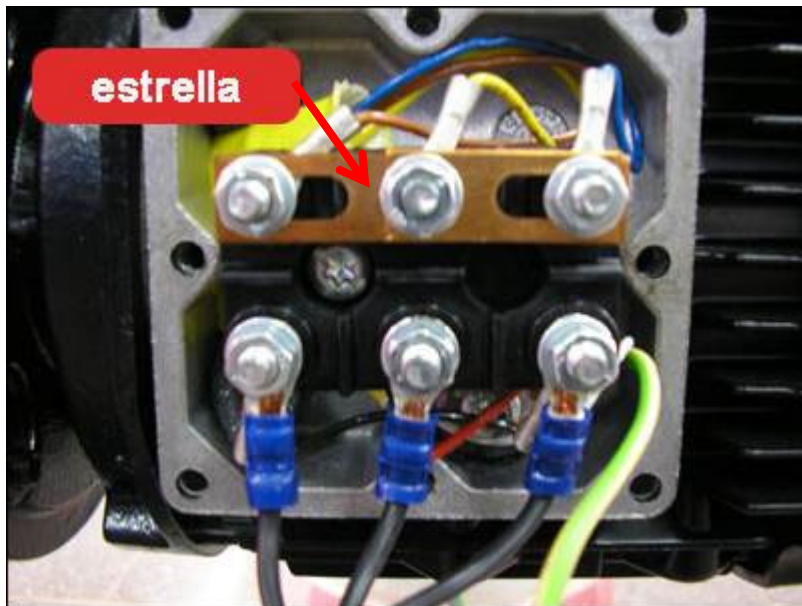
Arranque por autotransformador en tres tiempos



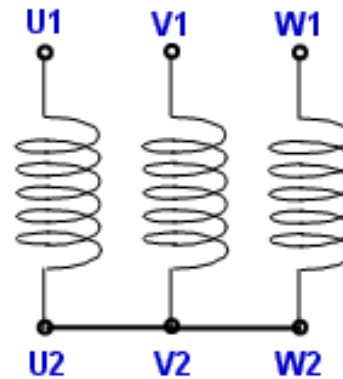
Motores asíncronos. Arranque

Arranque estrella-triángulo

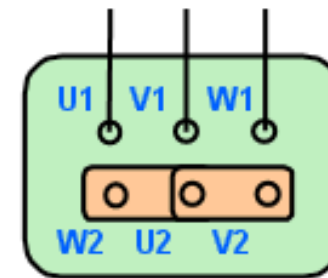
Placa de bornes



Conexión en Estrella

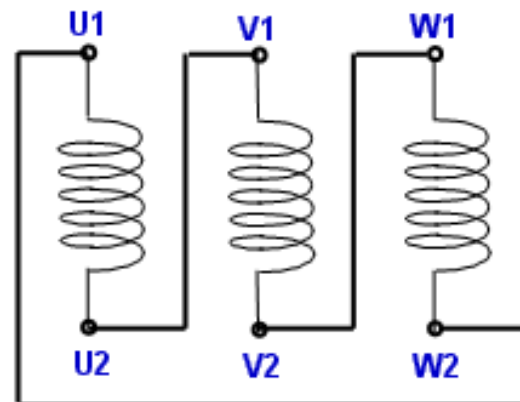


Devanados del motor

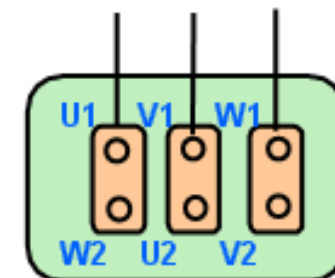


Caja de conexiones

Conexión en Triángulo



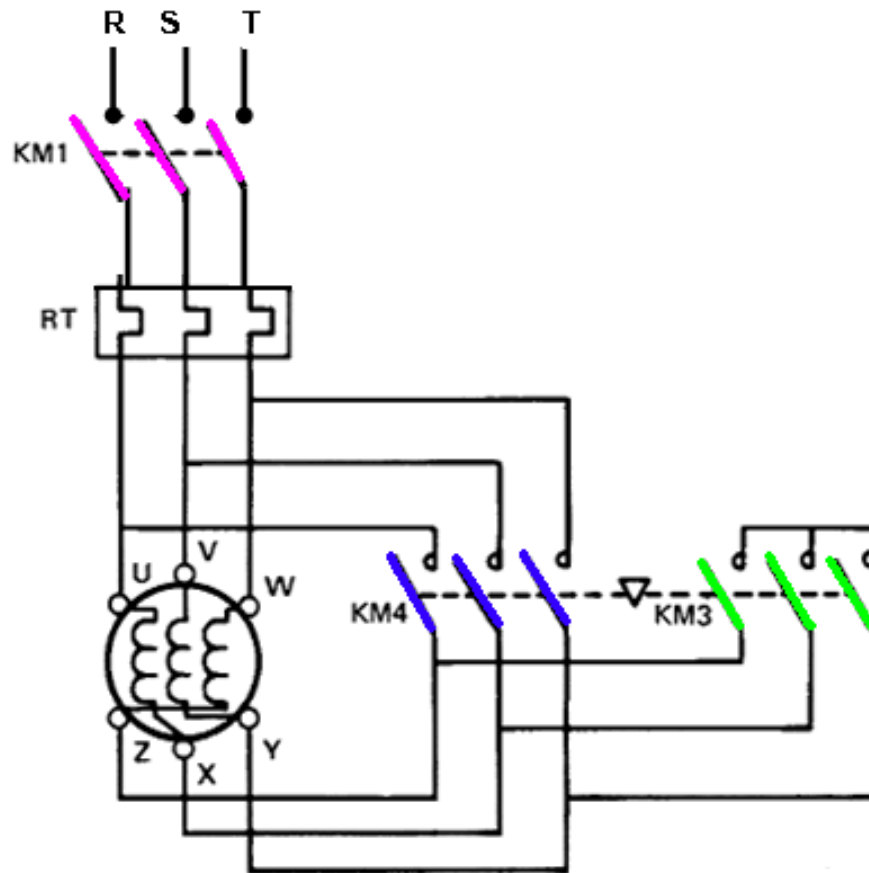
Devanados del motor



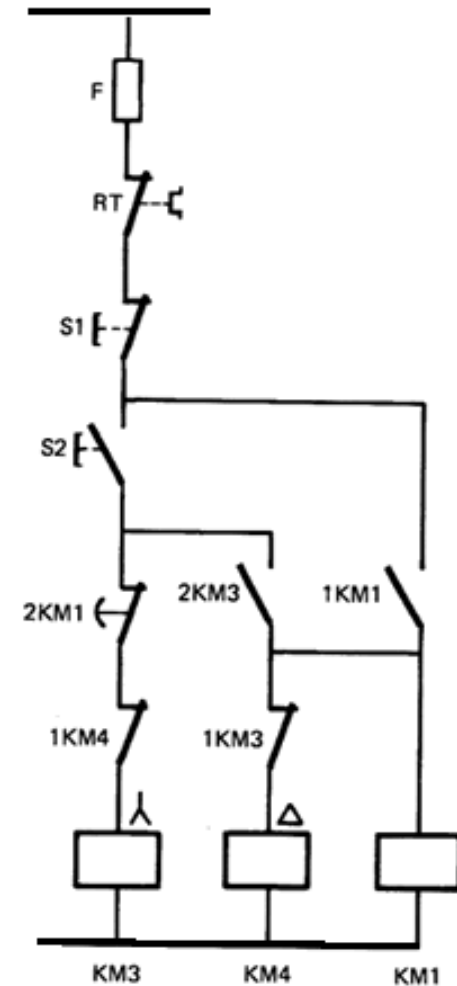
Caja de conexiones

Motores asíncronos. Arranque

Arranque estrella-triángulo



Circuito de Potencia



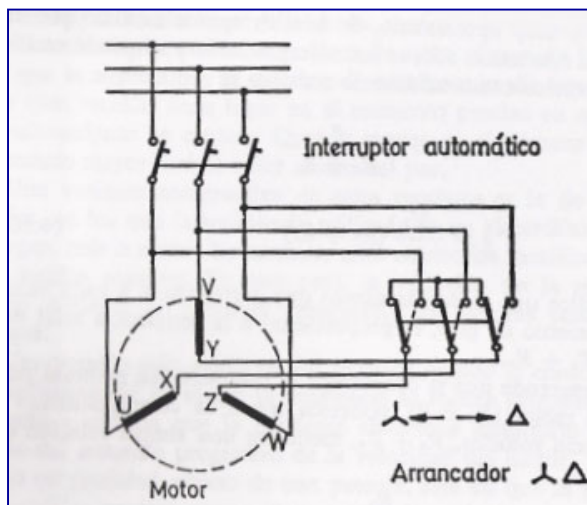
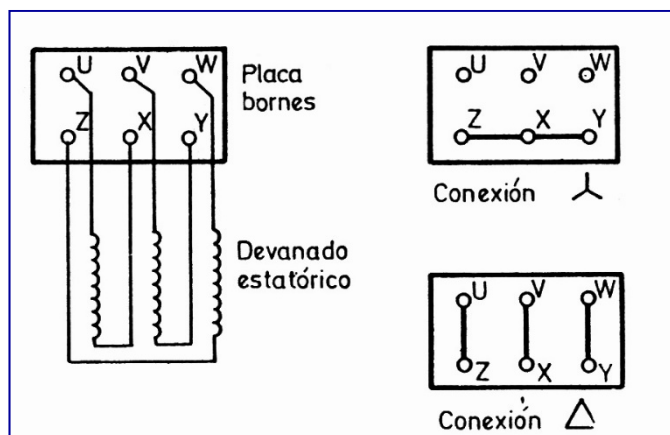
Circuito de Mando

Motores asíncronos. Arranque

Arranque estrella-triángulo

$$a = \frac{I_a}{I_n}$$

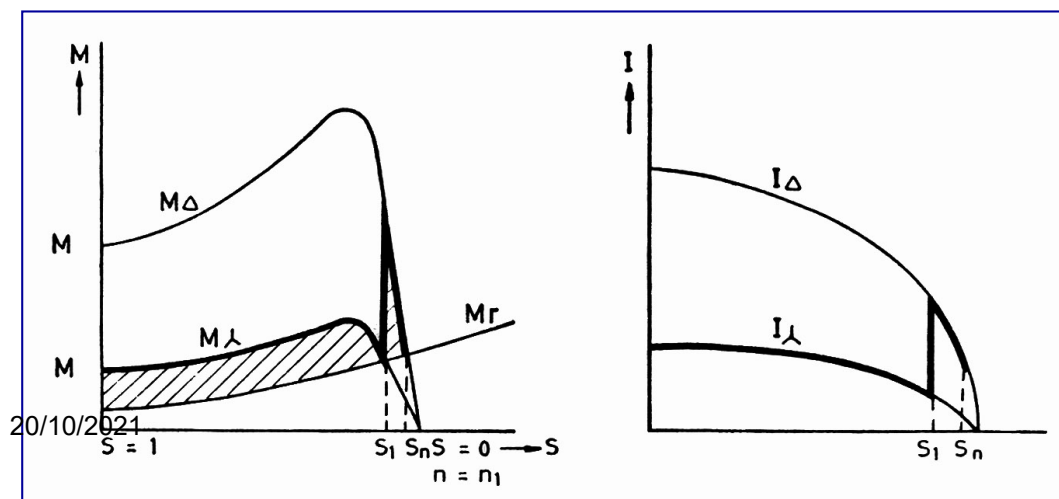
Es un método equivalente al del autotransformador con: $r = \sqrt{3}$



$$a = \frac{I_a}{I_n} = \frac{\frac{I_{cc}}{r^2}}{I_n} = \frac{I_{cc}}{3 \cdot I_n}$$

$$\frac{P_{aa}}{P_{an}} = \left(\sqrt{3} \cdot \frac{I_{cc}}{3 \cdot I_n} \right)^2 \cdot s = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{I_{cc}}{I_n} \right)^2 \cdot s$$

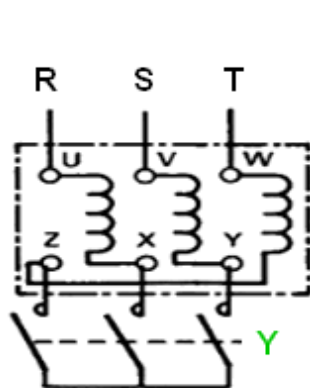
$$\frac{M_{a\lambda}}{M_{a\Delta}} = \frac{k \cdot \left(\frac{U_c}{\sqrt{3}} \right)^2}{k \cdot U_c^2} = \frac{1}{3}$$



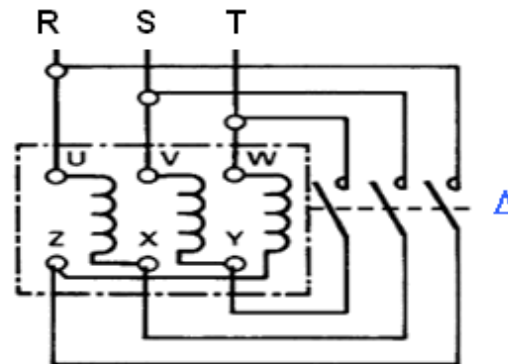
Características par-deslizamiento y corriente-deslizamiento de un motor asíncrono en el arranque estrella / triángulo.

Motores asíncronos. Arranque

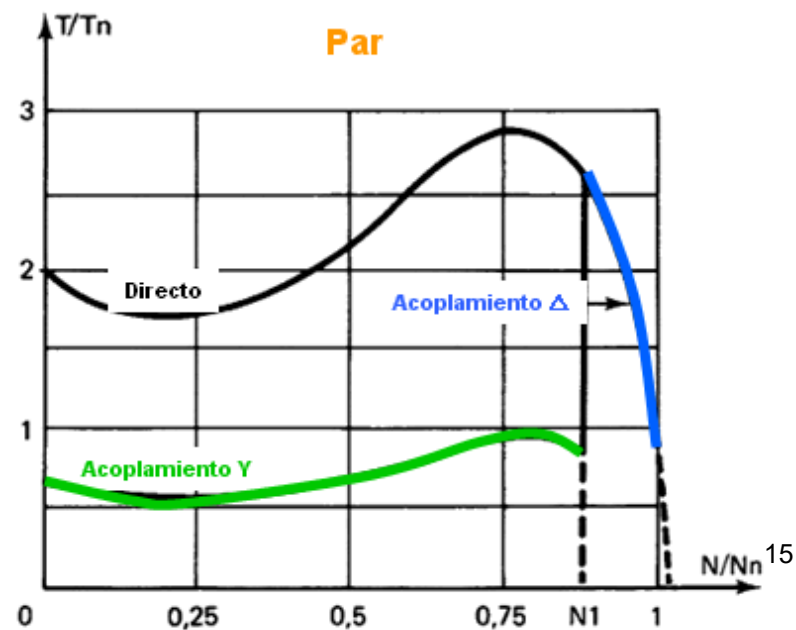
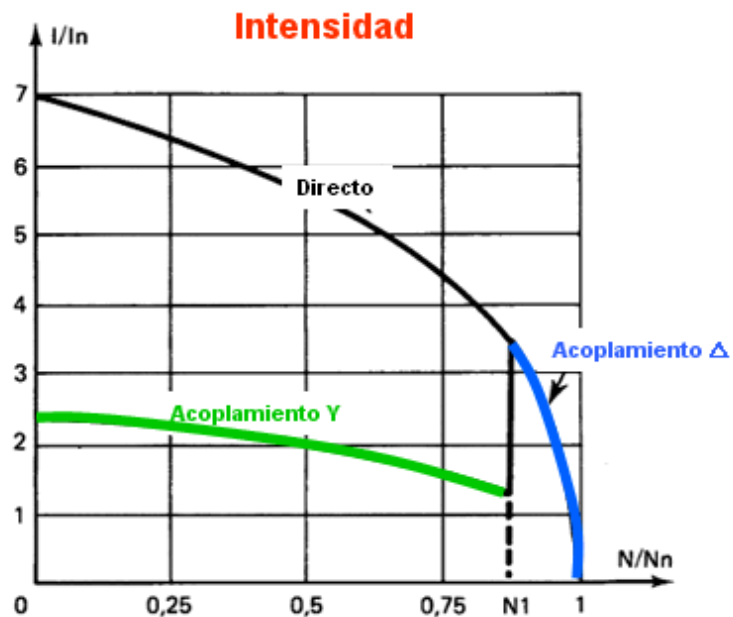
Arranque estrella-triángulo



Primer tiempo: **Estrella Y**

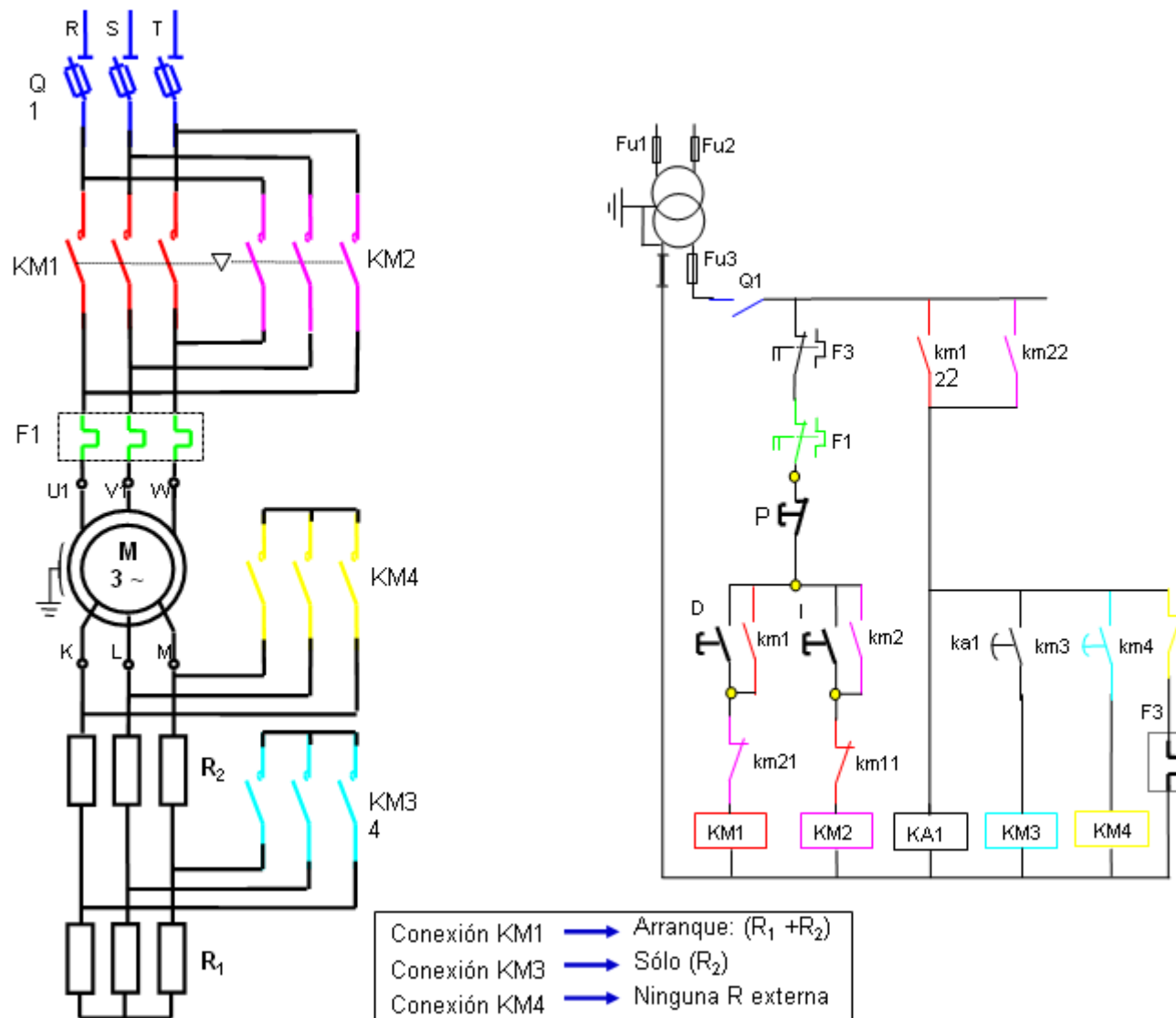


Segundo tiempo: Triángulo Δ



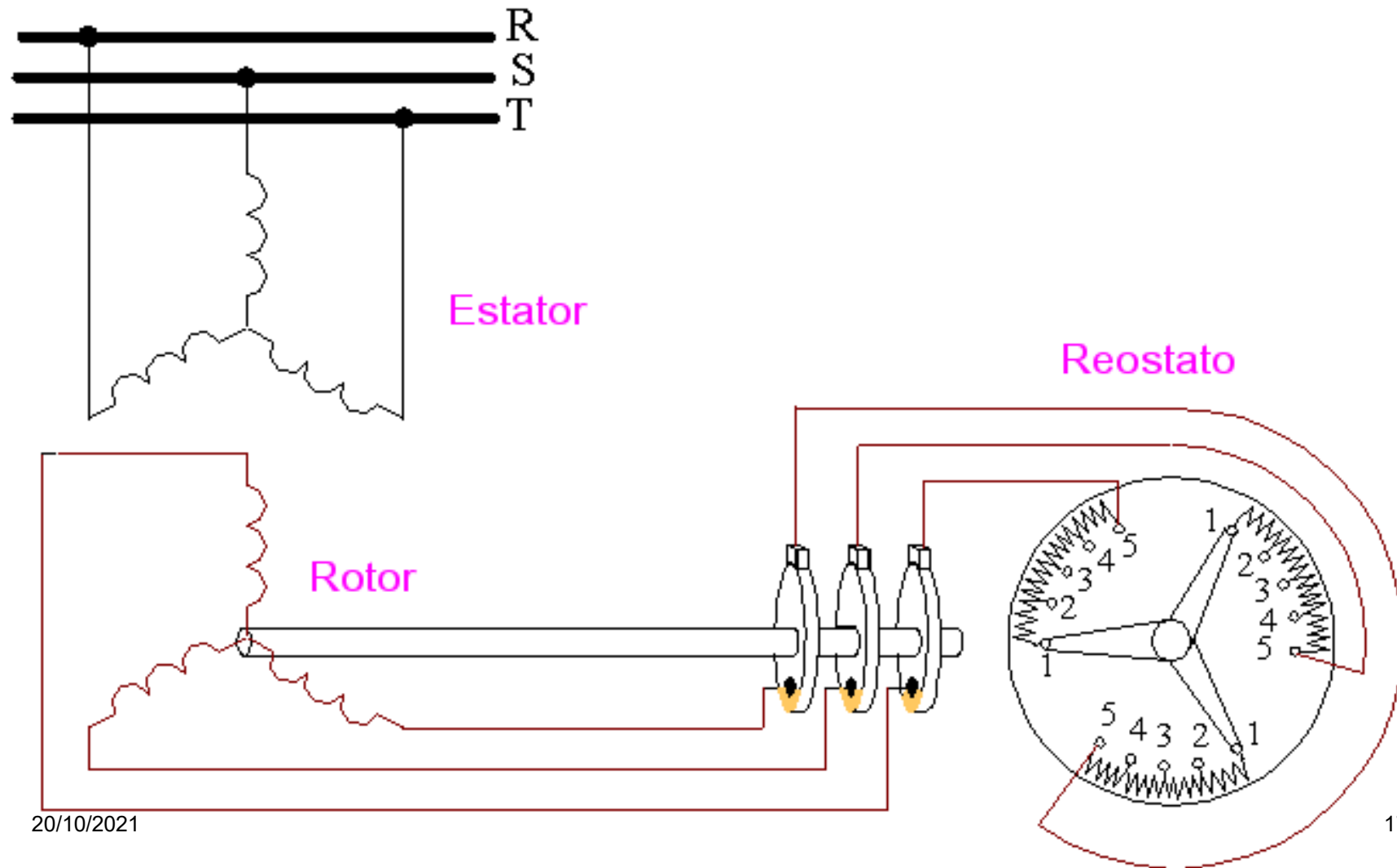
Motores asíncronos. Arranque

Arranque por inserción de resistencias en el circuito del rotor



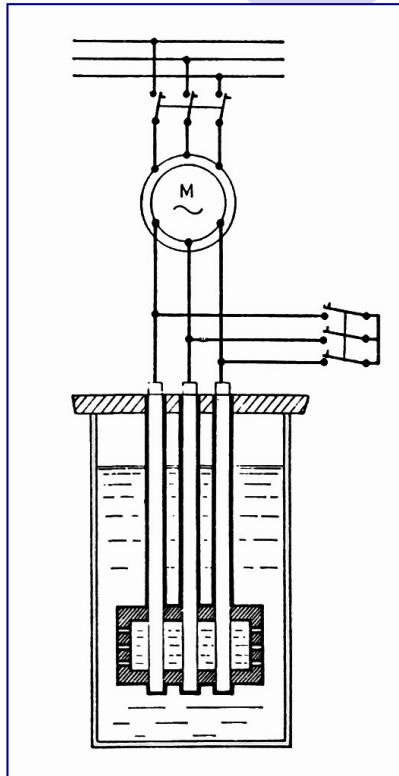
Motores asíncronos. Arranque

Arranque por inserción de resistencias en el circuito del rotor



Motores asíncronos. Arranque

Arranque por inserción de resistencias en el circuito del rotor



Reostato
líquido-vapor

20/10/2021

$$I_{2a} = \frac{E_2}{R_2 + R_r + jX_2}$$

$$P_{aa} = m_2 (R_2 + R_r) I_{2a}^2 = m_2 \frac{E_2^2}{R_2 + R_r}$$

$$M_1 = k \frac{(R_2 + R_r) \cdot s}{(R_2 + R_r)^2 + s^2 X_2^2}$$

Haciendo la aproximación de que el rotor es totalmente resistivo una vez acelerado se obtiene:

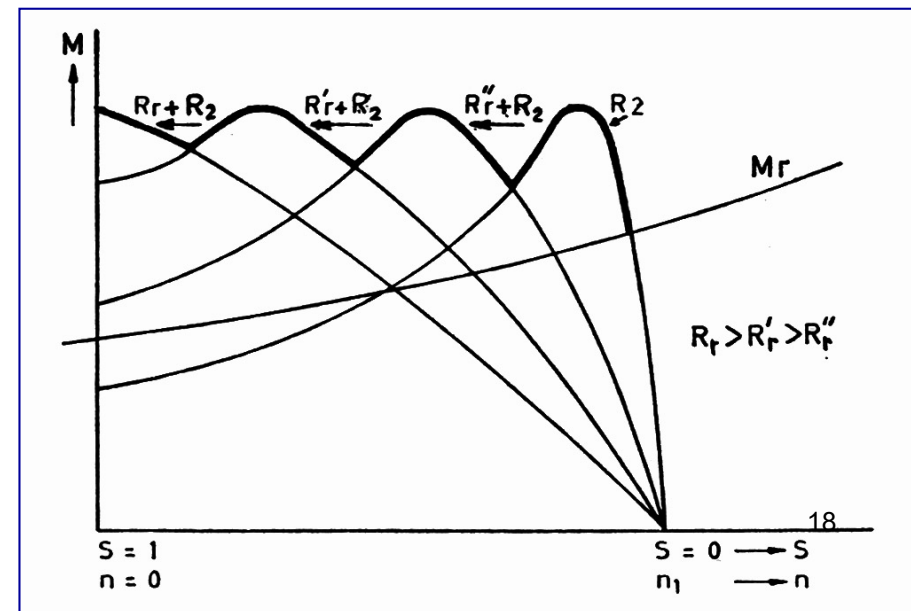
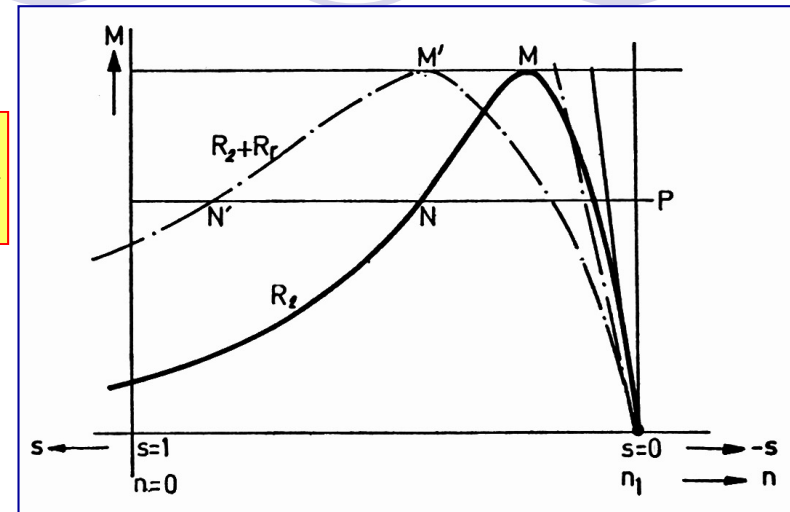
$$M_1 = k \frac{s}{R_2 + R_r}$$

Si se conoce la característica nominal par-deslizamiento del motor ($R_r = 0$) se puede trazar para cualquier resistencia rotórica $R_2 + R_r$ mediante la relación de abscisas:

$$\frac{R_2}{R_2 + R_r}$$

$S=1 \rightarrow M_{max} \rightarrow$

$$R_2 + R_r = X_2$$



Motores asíncronos. Arranque

Motor de inducción de doble jaula de ardilla

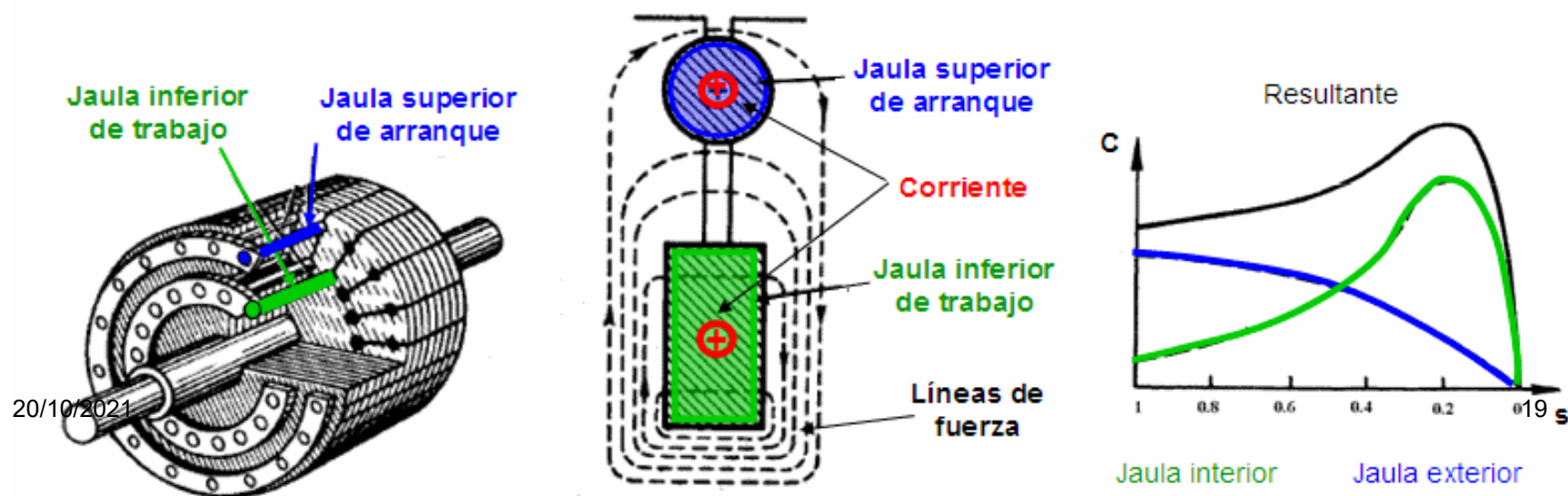
El rotor en estos motores está constituido por dos jaulas, una externa, de menor sección y material de alta resistividad, y otra interna de sección mayor y material de baja resistividad. Ambas jaulas están separadas entre sí en cada ranura por medio de una delgada rendija que aumenta el flujo de dispersión en la jaula inferior. De este modo se consigue una jaula exterior de alta resistencia y baja inductancia de dispersión y una jaula interior de baja resistencia y alta inductancia de dispersión

$$X_2 = j\omega_2 \cdot L_2 = j2\pi f_2 \cdot L_2 = j2\pi s f_1 \cdot L_2$$

En el arranque (la reactancia predomina sobre la resistencia, pues f es grande) la corriente fluye en su mayor parte por la jaula exterior (menor reactancia).

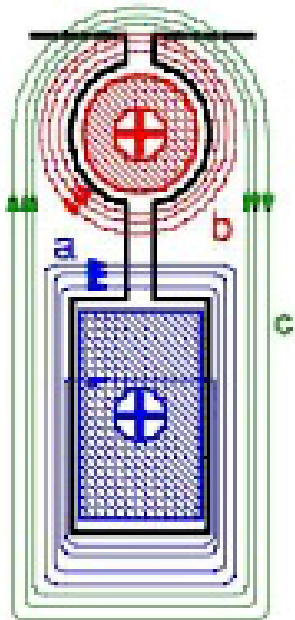
A la velocidad nominal (la resistencia predomina sobre la reactancia, f es muy pequeña) la corriente fluye en su mayor parte por la jaula interior (menor resistencia).

Con todo esto se consigue que en el arranque la resistencia se alta, lo que implica alto par de arranque y baja intensidad, y a la velocidad nominal, como la resistencia es baja, se tiene buen rendimiento

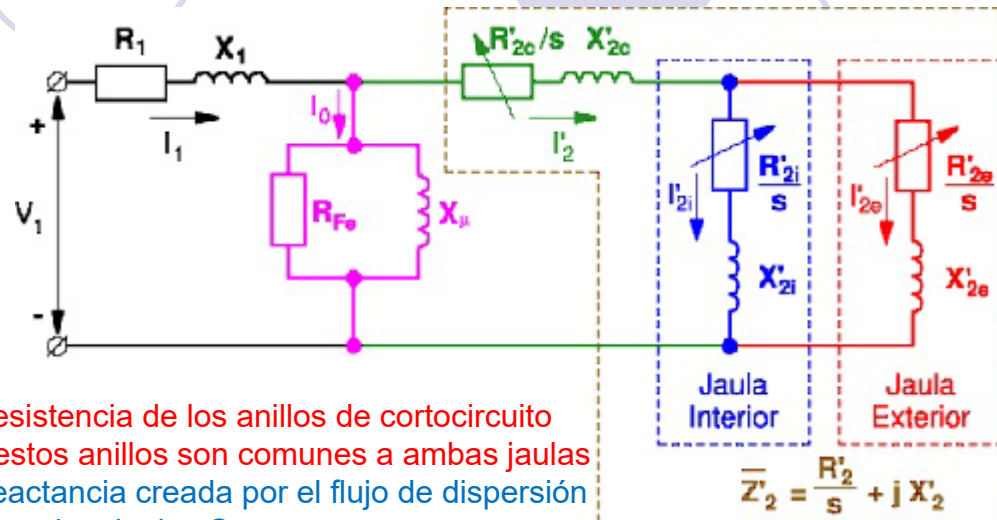


Motores asíncronos. Arranque

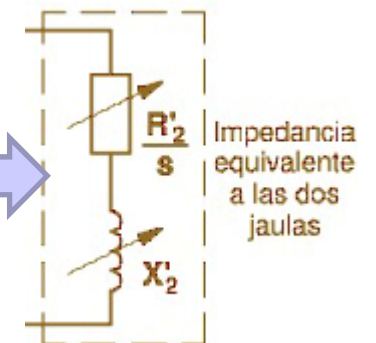
Motor de inducción de doble jaula de ardilla



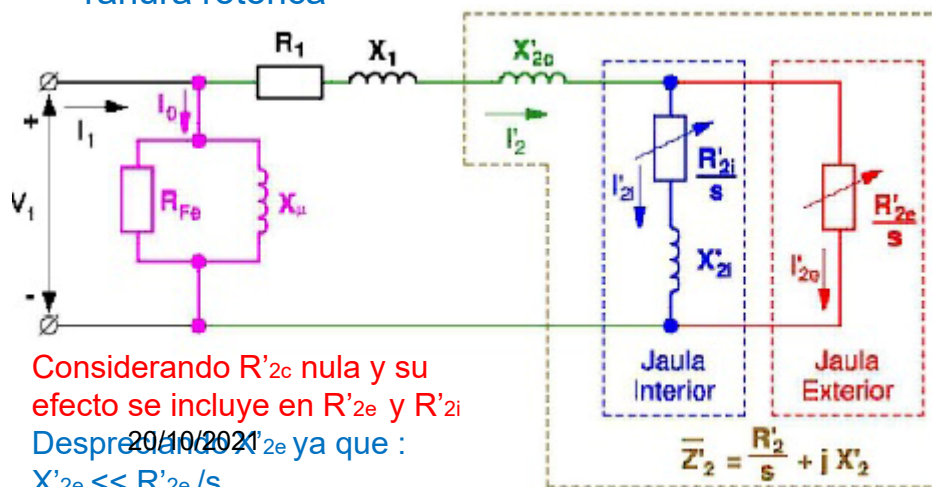
Dispersión en la ranura rotórica



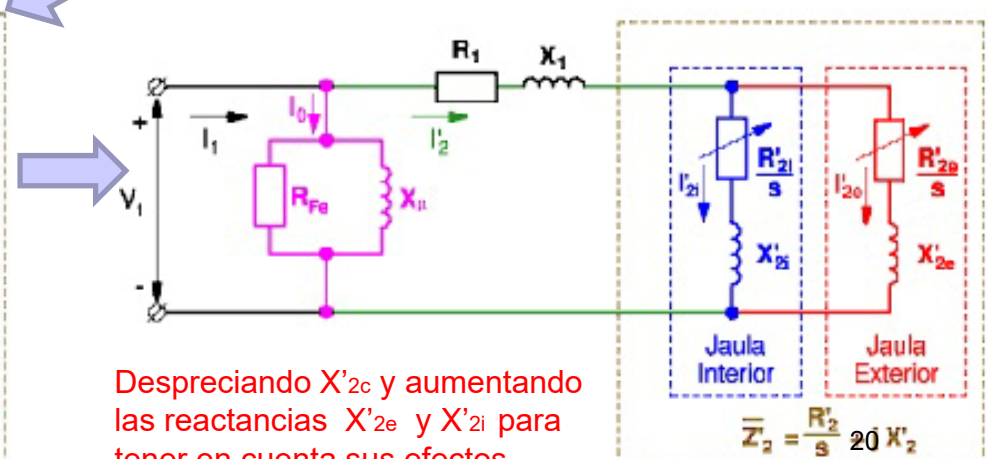
CIRCUITO EQUIVALENTE



R'_{2c} = Resistencia de los anillos de cortocircuito cuando estos anillos son comunes a ambas jaulas
 X'_{2c} = Reactancia creada por el flujo de dispersión común a ambas jaulas ©



Considerando R'_{2c} nula y su efecto se incluye en R'_{2e} y R'_{2i}
 Despreciando X'_{2c} ya que :
 $X'_{2e} \ll R'_{2e}/s$



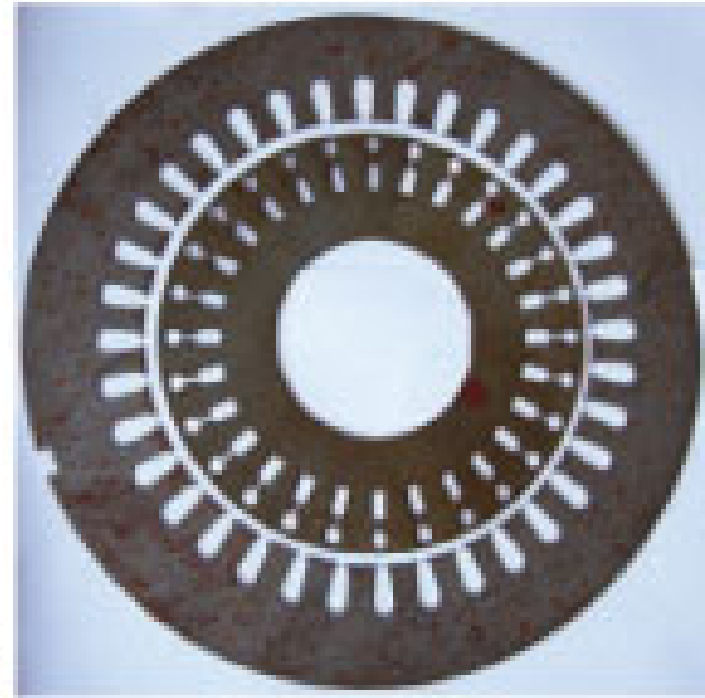
Despreciando X'_{2c} y aumentando las reactancias X'_{2e} y X'_{2i} para tener en cuenta sus efectos

Motores asíncronos. Arranque

Motor de inducción de doble jaula de ardilla



a)



b)

Chapa magnética de un motor de doble jaula

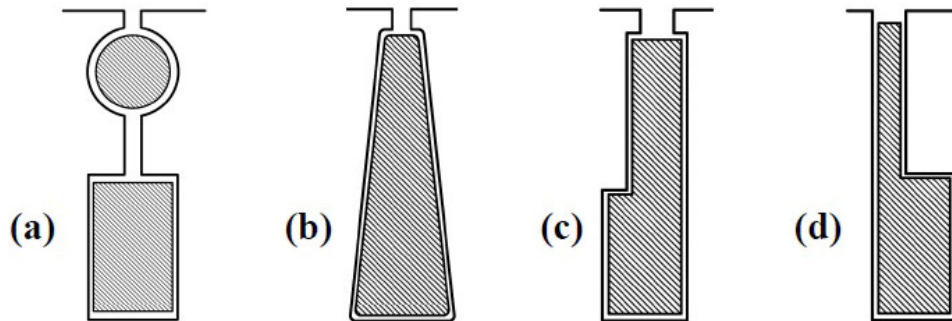
a) Rotor b) Estator y rotor

Fuente: Miguel A. Rodríguez Pozueta

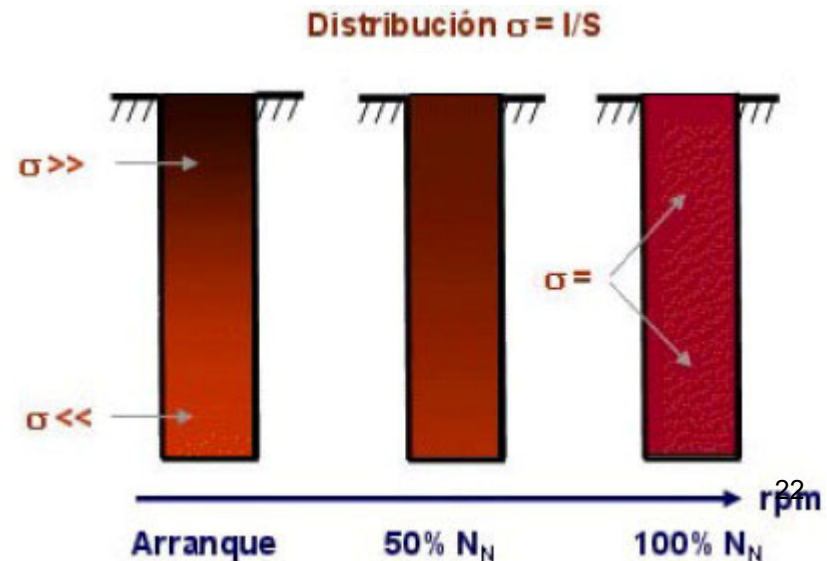
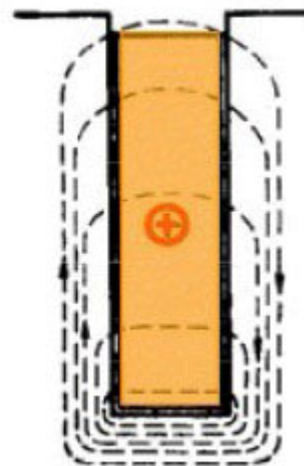
Motores asíncronos. Arranque

Motor de inducción de ranura profunda

Un efecto análogo al anterior se obtiene mediante un rotor de ranuras profundas, ocupadas por barras altas y profundas, donde debido al efecto autoinductivo y de Foucault, la corriente se distribuye de forma diferente en el arranque y en el funcionamiento de trabajo.

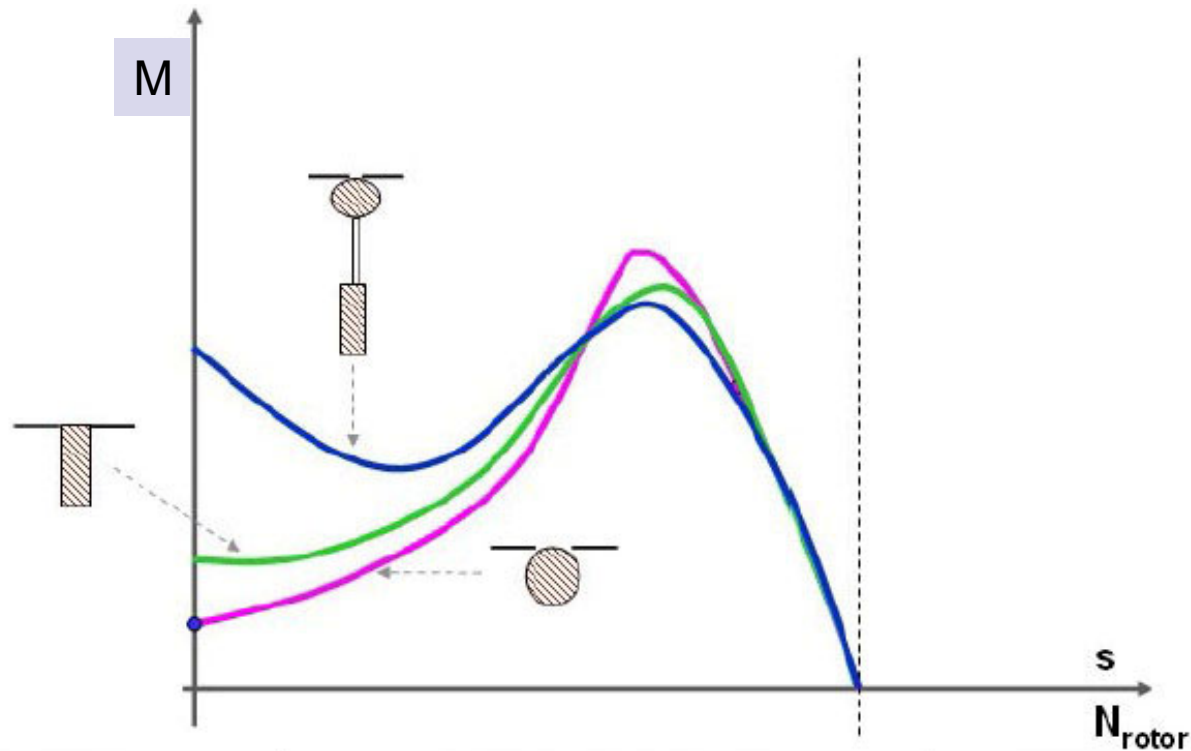


20/10/2021



Motores asíncronos. Arranque

Motor de inducción de ranura profunda



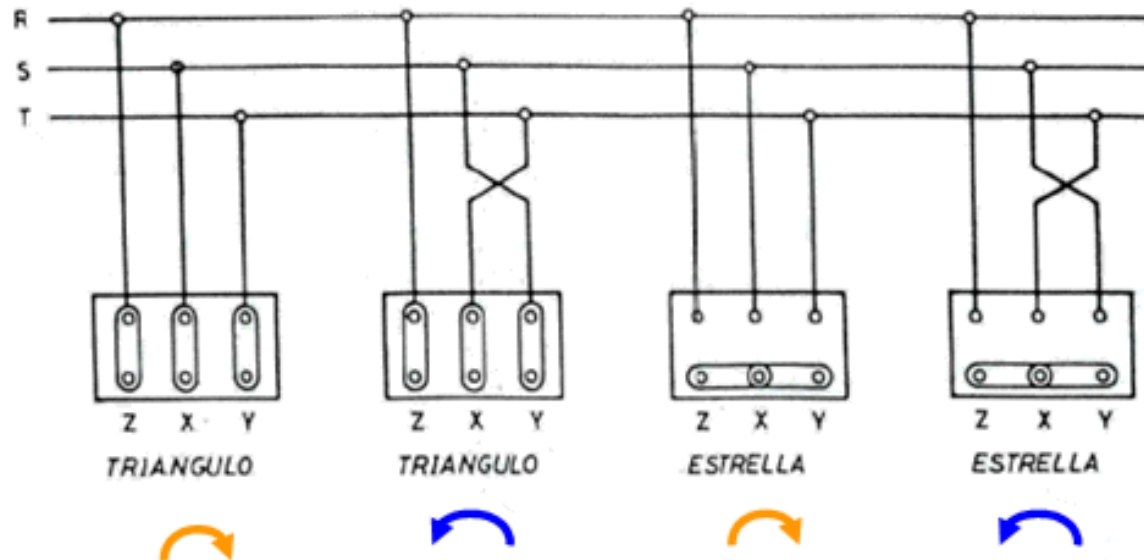
Motor jaula normal		Motor de doble jaula		Motor con ranura profunda	
I_{arrq} / I_n	M_{arrq} / M_n	I_{arrq} / I_n	M_{arrq} / M_n	I_{arrq} / I_n	M_{arrq} / M_n
4 - 7	0,8 - 1,2	3,3 - 5,5	1 - 2	4 - 4,8	1,2 - 1,5

Comparación de las características de par (C)-velocidad (N_{rotor}) de los motores de inducción con rotor de simple jaula de ardilla, ranura profunda y doble jaula de ardilla.

Motores asíncronos. Cambio del sentido de giro

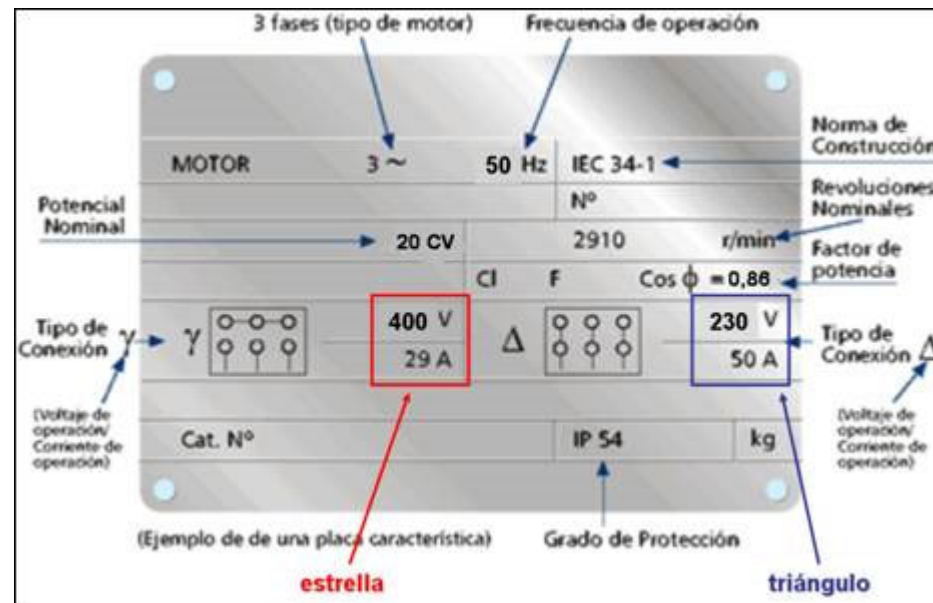
Cambio del Sentido de Giro del Motor

Intercambiando dos fases cambia el sentido de giro del campo magnético del estator y por lo tanto el sentido de giro del rotor



Motores asíncronos. Características nominales

Son las características de funcionamiento cuando trabaja en el punto nominal y son las **óptimas** del motor. Las podemos ver en la placa de características que llevan todos los motores.



Las características nominales de los motores que se deben tener en cuenta son:

Tensiones nominales: son dos valores, el mayor para conectar en estrella y el menor para conectar en triángulo. En Fig. placa son 400/230 (V).

Corrientes nominales: las absorbidas de la red cuando el motor trabaja en el punto nominal, de tal forma que el fabricante garantiza la correcta refrigeración. En Fig. placa son 29/50 (A).

Motores asíncronos. Características nominales

Velocidad nominal: la velocidad de giro del rotor en el punto nominal. Es un valor alto próximo al de sincronismo. En Fig. placa es 2910 (rpm), luego la velocidad del campo giratorio es de 3000 (rpm), que corresponde a dos polos.

Potencia mecánica nominal: es la potencia que el motor entrega a la carga mecánica en forma de movimiento, cuando trabaja en el punto nominal. En Fig. placa es 20 (CV). También se la llama **potencia útil**, y se determina en cualquier punto de funcionamiento con la siguiente expresión:

$$P_{mec} = \frac{2\pi}{60} M \cdot N_r$$

donde:

P_{mec} : potencia mecánica entregada a la carga en watios (W).

M: par motor en newtons por metro (Nm).

N_r : velocidad del motor (rotor) en rev/min (rpm).

Normalmente se expresa en caballos de vapor (CV). Recuerda que: **1 CV = 736 W**

Par nominal: normalmente no viene en la placa de características, pero lo podemos determinar, aplicando la fórmula anterior de la potencia mecánica, en el punto nominal.

Rendimiento nominal: no suele verse en las placas de características y su valor típico es de alrededor del 80 %, aunque depende de las características del motor y de su potencia nominal. Los motores de mayor potencia suelen tener un rendimiento más elevado.

En la placa del motor se pueden ver otros detalles prácticos interesantes como el grado de protección (en Fig. placa es IP54), el código de refrigeración y la clase de aislamiento.