

Máquinas e Instalaciones Eléctricas

UNIDAD N° 3

Motores asíncronos

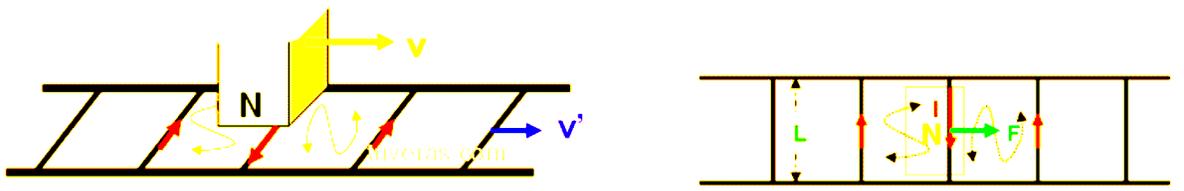
- *Principio de Funcionamiento. Constitución de la máquina asíncrona trifásica. Tipos de motores: Rotor bobinado, jaula de ardillas, doble jaula de ardillas, rotor de ranuras profundas. Par en los Motores de Jaula de Ardilla. Campo Magnético Giratorio. Conexión de los Devanados. Cambio del Sentido de Giro del Motor.*
- *Deslizamiento. Frecuencias de la corriente del rotor. Circuito equivalente con el rotor parado. Circuito equivalente con el rotor girando. Circuito equivalente del motor asíncrono trifásico. Funcionamiento: en vacío, con rotor parado, en carga.*
- *Circuito equivalente: Reducción del rotor al estator. Balance de potencias. Rendimiento.*
- *Par de rotación en el motor asíncrono.*
- *Par de rotación en la máquina asíncrona. Funcionamiento como motor. Funcionamiento como generador. Funcionamiento como freno.*
- *Ensayo de vacío o de rotor libre. Ensayo de cortocircuito o de rotor bloqueado.*
- *Arranque. Arranque directo. Arranque estrella-triángulo. Arranque por resistencias estatóricas. Arranque por resistencias rotóricas. Arranque por autotransformador. Variación de velocidad de los motores asíncronos.*
- *Motor asíncrono monofásico. Arranque: Método de fase partida, método de espira de sombra.*

Principio de Funcionamiento

Para explicar el funcionamiento de un motor asíncrono trifásico, nos vamos a servir del siguiente símil. Supongamos que tenemos un imán moviéndose a lo largo de una escalerilla conductora tal y como se indica en la figura adjunta. Este imán en su desplazamiento a velocidad v provoca una variación de flujo sobre los recintos cerrados que forman los peldaños de la escalera. Esta variación de flujo genera una f.e.m., definida por la Ley de Faraday:

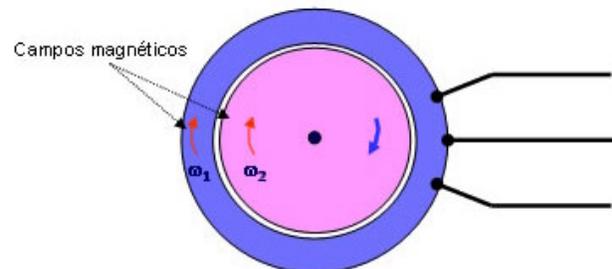
$$e = - \frac{d\Phi}{dt}$$

que a su vez hace que por dichos recintos circule una corriente. Esta corriente eléctrica provoca la aparición de una fuerza sobre la escalera definida por $F = I L B$ que hace que la escalera se desplace en el mismo sentido que lo hace el imán.



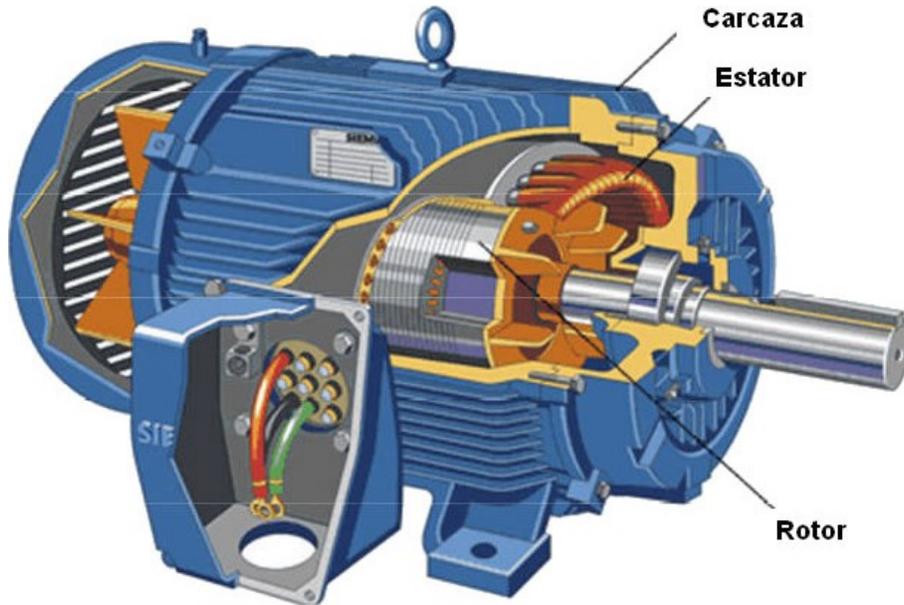
La escalera nunca podrá desplazarse a la velocidad del imán, pues en el supuesto caso de que se desplazase a la misma velocidad que el imán, la variación de flujo sobre los recintos cerrados sería nula, y por tanto la f.e.m. inducida también y por tanto la fuerza resultante también sería nula.

En un motor asíncrono la escalera es el desarrollo lineal del rotor y el campo magnético que se desplaza es originado por un sistema trifásico de corrientes que circulan por el estator (Teorema de Ferraris)



Constitución de la Máquina Asíncrona Trifásica

Tipos de Motores



Estator

Devanado trifásico distribuido en ranuras a 120°

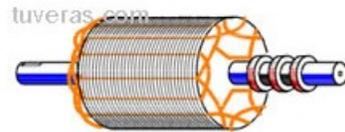
Tienen tres devanados en el estator. Estos devanados están desfasados $2\pi/(3P)$, siendo P el número de pares de polos de la máquina.



Rotor

Bobinado

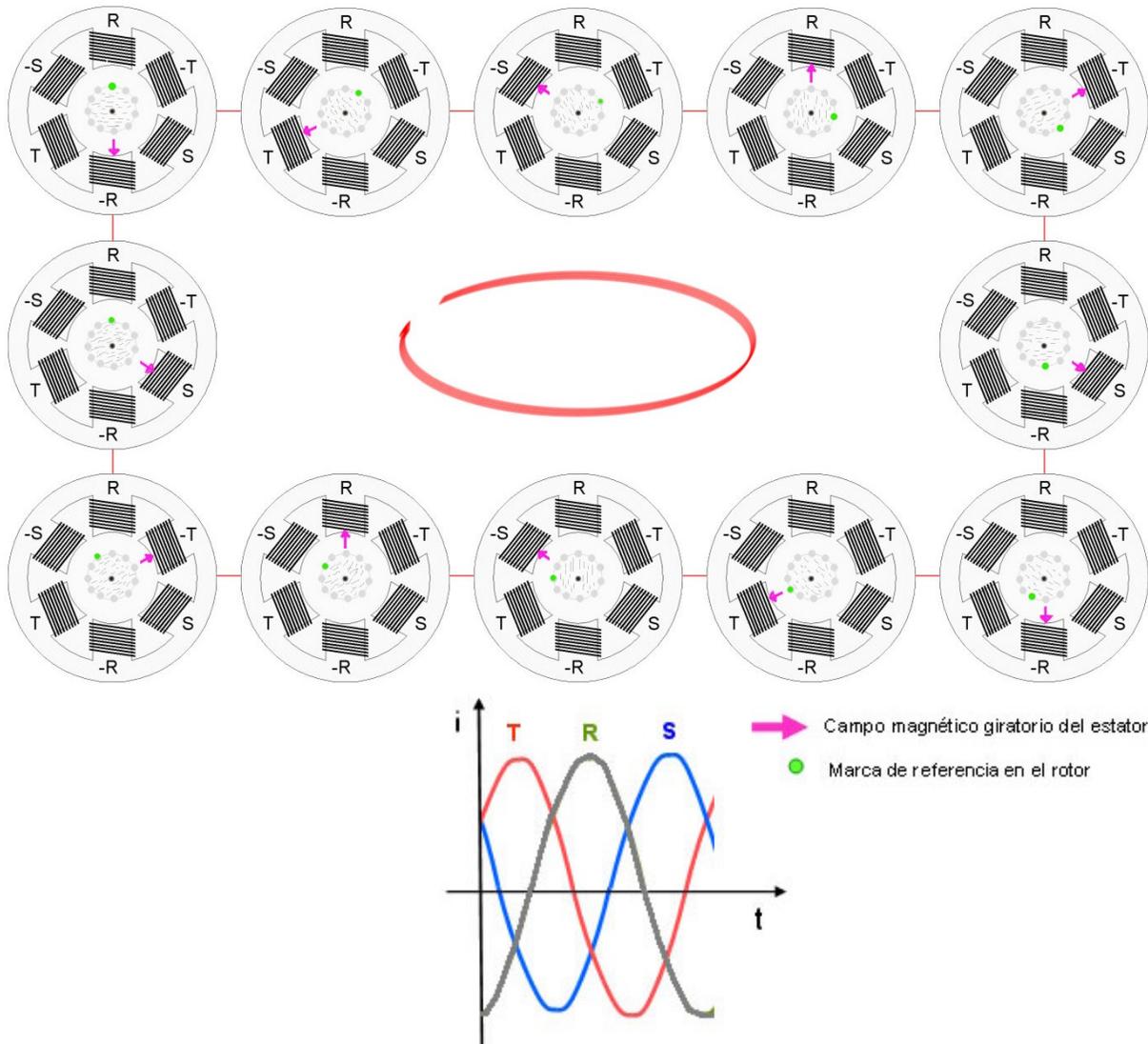
Rotor devanado: los devanados del rotor son similares a los del estator con el que está asociado. El número de fases del rotor no tiene por qué ser el mismo que el del estator, lo que sí tiene que ser igual es el número de polos. Los devanados del rotor están conectados a anillos colectores montados sobre el mismo eje.



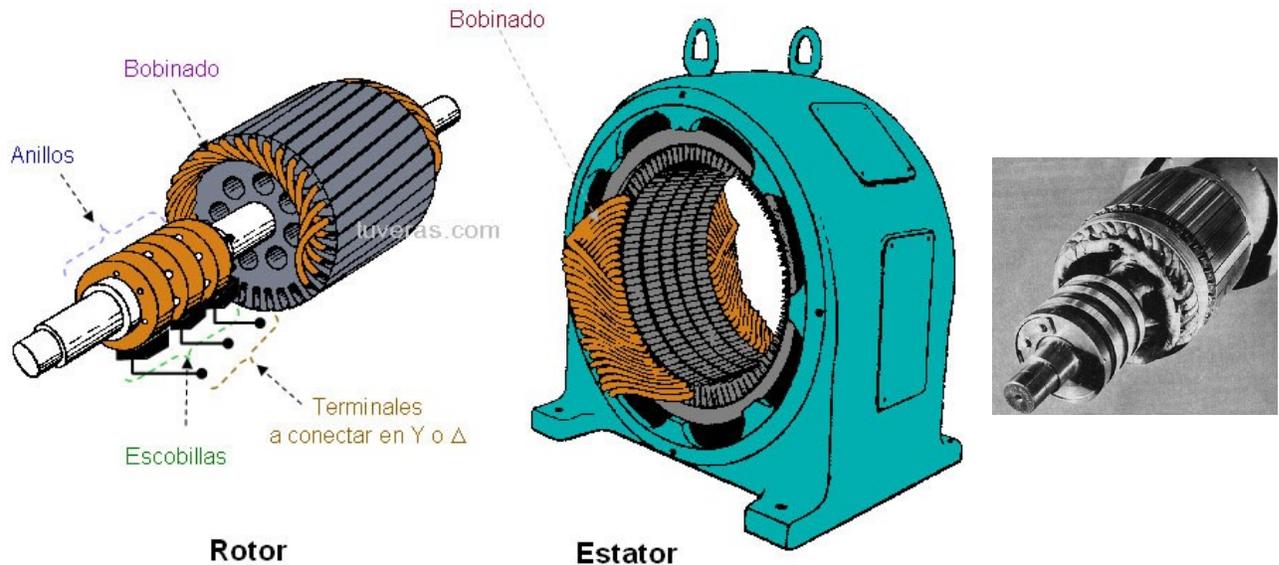
Jaula de ardilla

Los conductores del rotor están igualmente distribuidos por la periferia del rotor. Los extremos de estos conductores están cortocircuitados, por tanto no hay posibilidad de conexión del devanado del rotor con el exterior. La posición inclinada de las ranuras mejora las propiedades de arranque y disminuye los ruidos

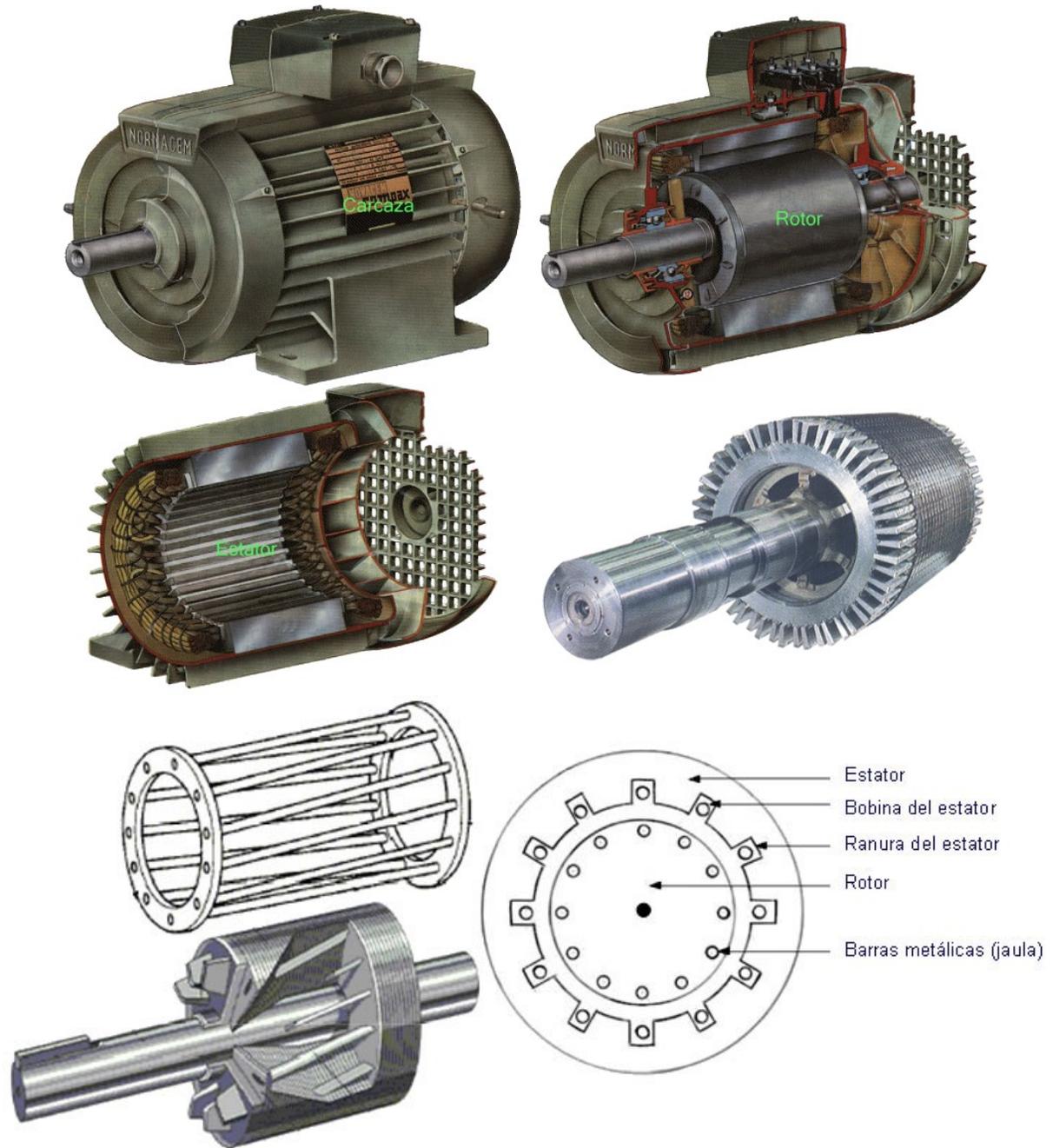




Motor con Rotor Bobinado



Motor con Rotor en Jaula de Ardilla



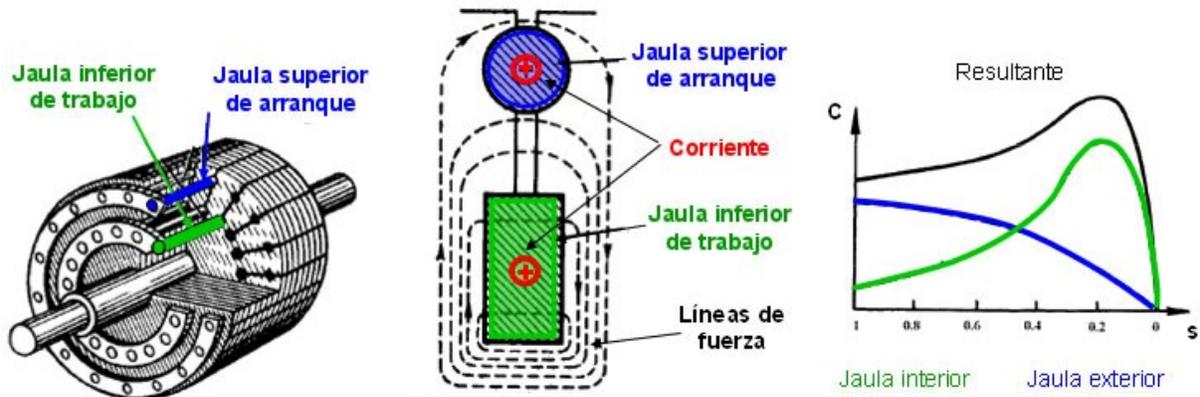
Motor con Rotor en Doble Jaula de Ardilla

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 reactancia y una jaula interior de baja resistencia y baja reactancia.

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).

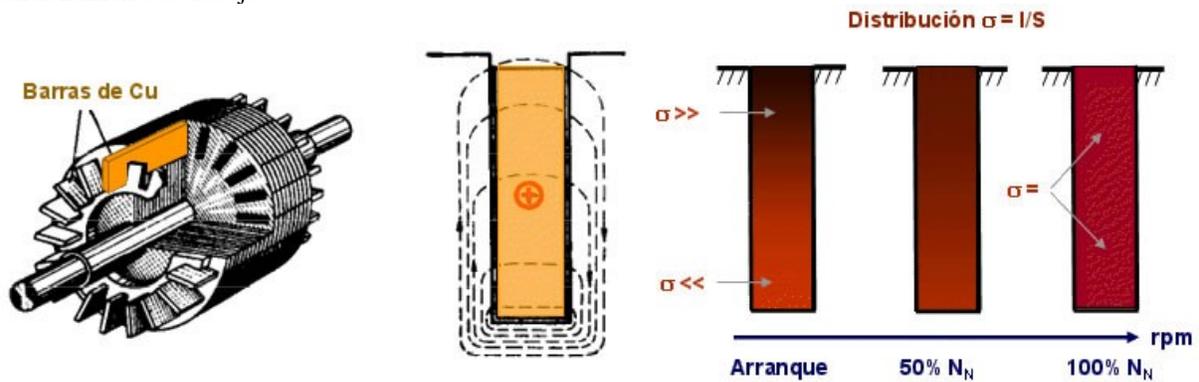
A la velocidad nominal (la resistencia predomina sobre la reactancia, f es muy pequeña) la corriente fluye en su mayor parte por la jaula interior (menor resistencia).

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.

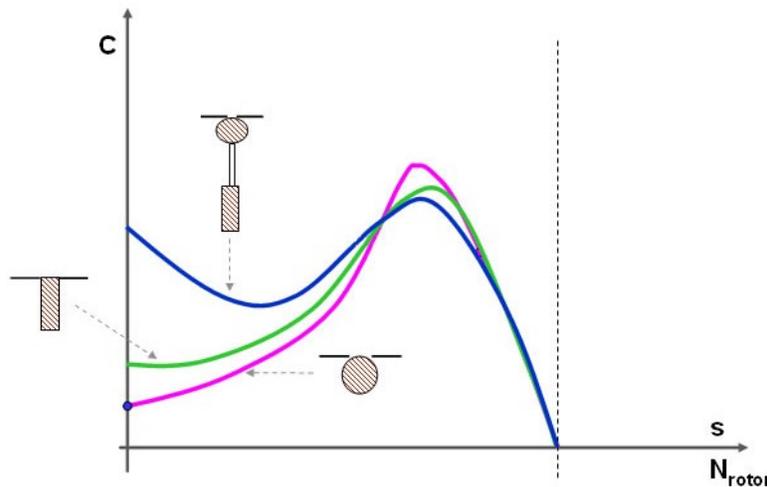


Motor con Rotor de Ranuras Profundas

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.



Par en los Motores de Jaula de Ardilla

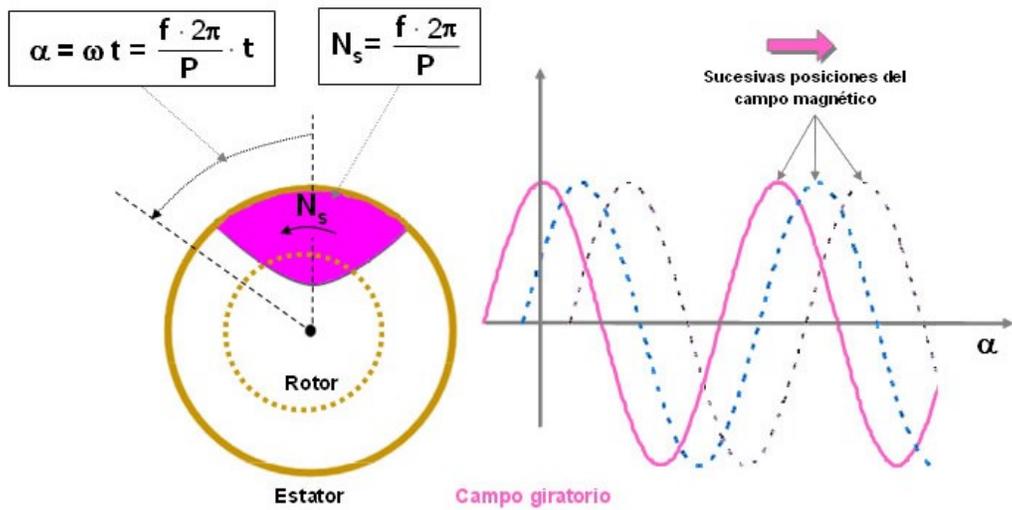
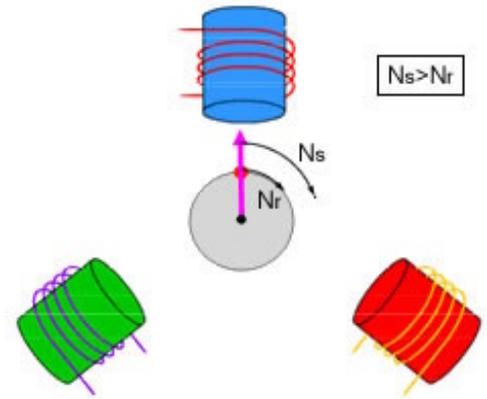


Motor jaula normal		Motor de doble jaula		Motor con ranura profunda	
I_{arrq} / I_n	M_{arrq} / M_n	I_{arrq} / I_n	M_{arrq} / M_n	I_{arrq} / I_n	M_{arrq} / M_n
4 - 7	0,8 - 1,2	3,3 - 5,5	1 - 2	4 - 4,8	1,2 - 1,5

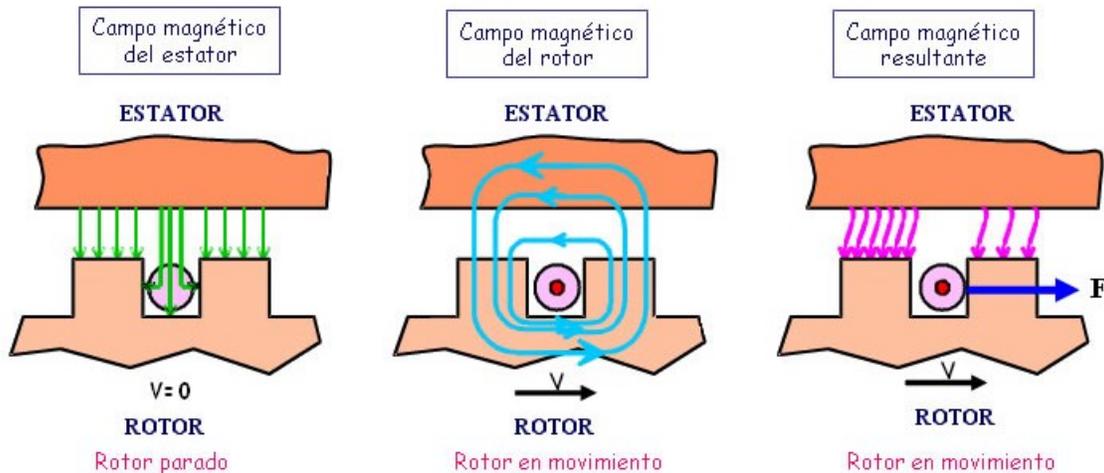
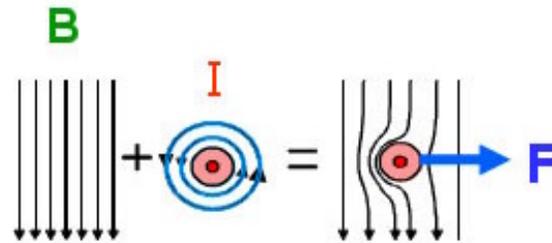
Campo Magnético Giratorio

El Campo magnético giratorio se obtiene con tres devanados desfasados 120° (acoplados en estrella o triángulo) y conectados a un sistema trifásico de c. a.

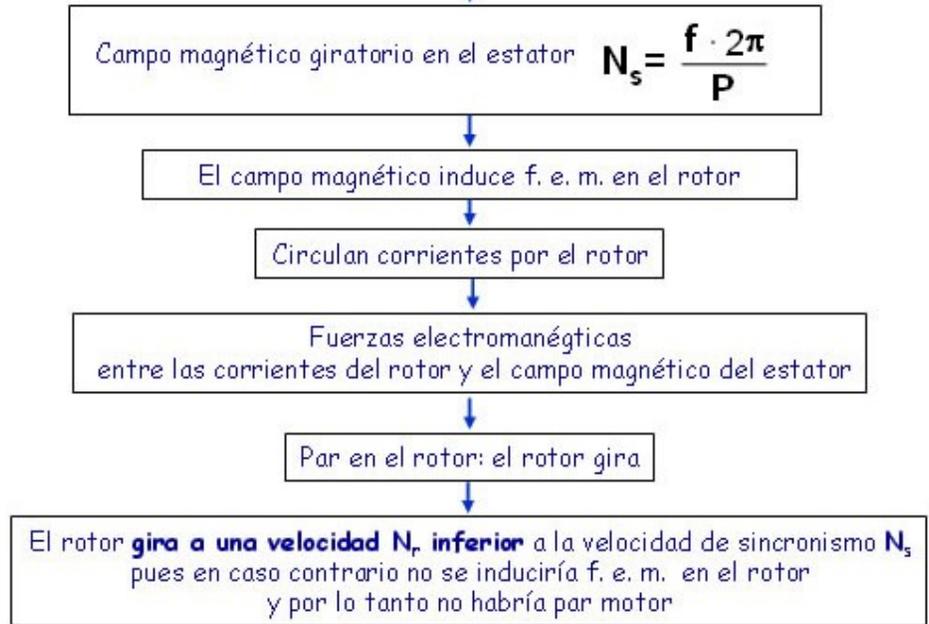
Si por el arrollamiento polifásico del estator del motor de una máquina síncrona circula una corriente de pulsación ω y si hay p pares de polos, se origina un campo magnético giratorio de p pares de polos y que giran a la velocidad ω/p (Teorema de Ferraris). Si el campo tiene distribución senoidal:



El campo magnético giratorio origina un flujo que induce corrientes en el rotor que interactúan con el campo magnético del estator. En cada conductor del rotor se produce una fuerza de valor $F = i \cdot L \cdot B$ que da lugar al par motor.

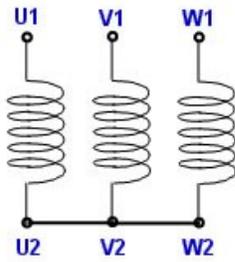


Principio de Funcionamiento del Motor Asíncrono

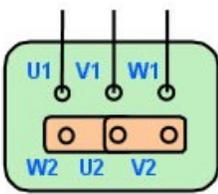


Conexión de los Devanados

Conexión en Estrella

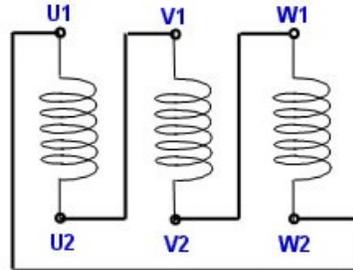


Devanados del motor

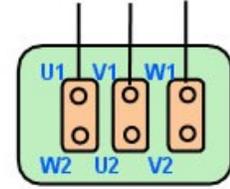


Caja de conexiones

Conexión en Triángulo



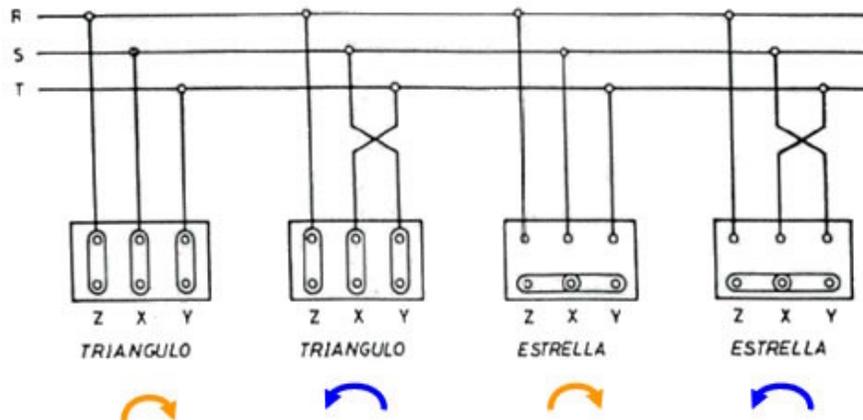
Devanados del motor



Caja de conexiones

Cambio del Sentido de Giro del Motor

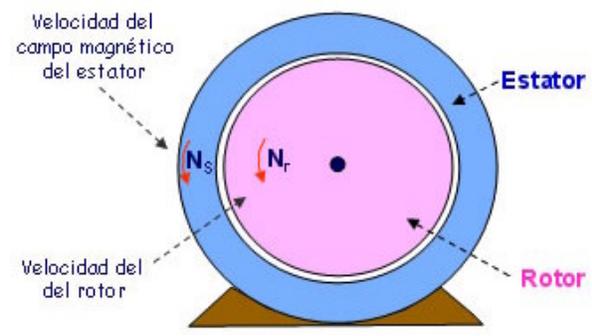
Intercambiando dos fases cambia el sentido de giro del campo magnético del estator y por lo tanto el sentido de giro del rotor



Deslizamiento

El rotor no puede girar a la velocidad $N_s = \omega/p$ de los polos ficticios del estator (velocidad de sincronismo), pues en este caso, no habría ningún desplazamiento relativo de las espiras del rotor con relación a los polos ficticios del estator, ninguna f.e.m., ninguna corriente, ninguna fuerza electromagnética y por lo tanto ningún par motor. Llamamos deslizamiento a la diferencia de velocidad entre la velocidad síncrona y la velocidad del rotor, expresada en tanto por uno o en % (a plena carga $s = 3\% - 8\%$):

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} \qquad S\% = \frac{N_s - N_r}{N_s} \cdot 100\%$$

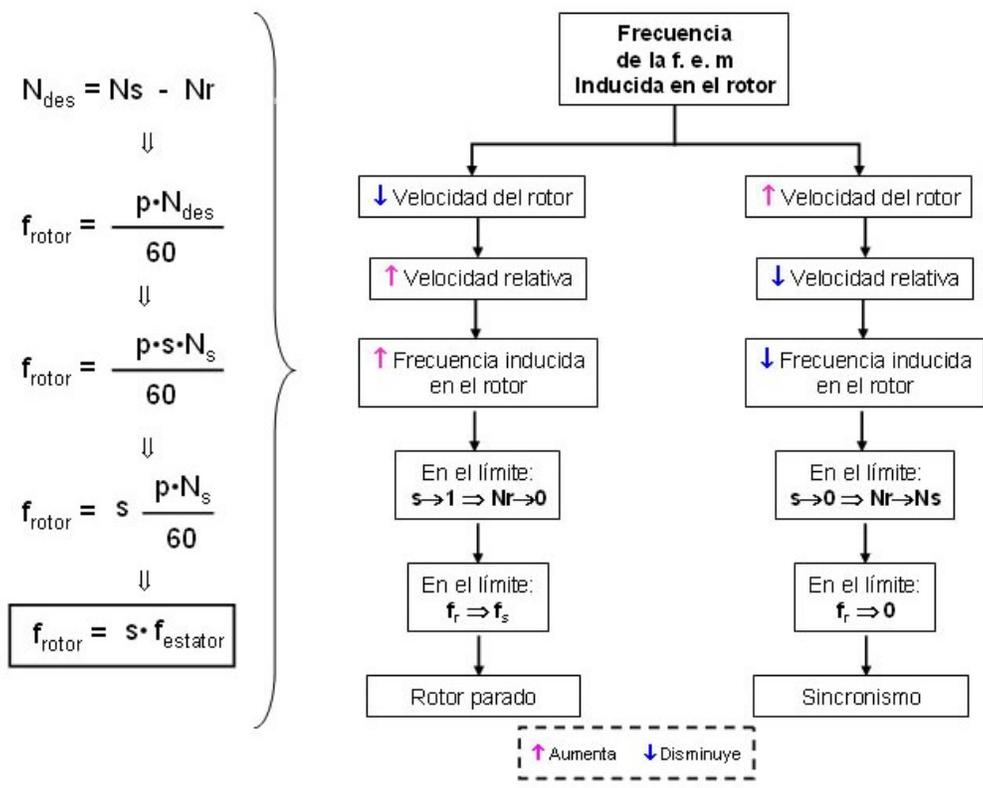


Ejemplo para $f = 50\text{Hz}$

Número de polos	N_s rpm	N_r rpm	S%
2	3000	2950	1,6
4	1500	1450	3,3
8	750	700	6,6
10	600	550	8

Frecuencias de la corriente del rotor

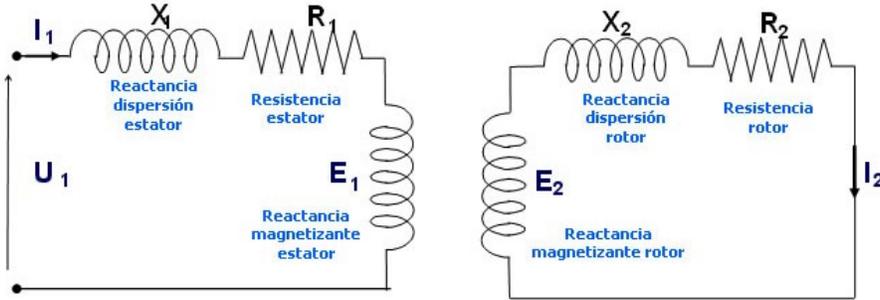
Sea N_{des} ($N_{des} = N_s - N_r$) la velocidad relativa del rotor con relación a los polos ficticios del estator



Circuito equivalente con el rotor parado

La transferencia de energía en un motor asíncrono se produce de estator a rotor por inducción electromagnética de forma análoga a la transferencia en el transformador, pero ha de tenerse en cuenta que cuando el motor gira las frecuencias en el estator y rotor son diferentes.

El circuito equivalente **POR FASE** de un motor asíncrono trifásico con el rotor parado, se obtiene de forma análoga al transformador. Designando con los subíndices 1 y 2 las magnitudes del estator y rotor respectivamente, el esquema equivalente es el siguiente:



$$\underline{U}_1 = (R_1 + jX_1) \underline{I}_1 + \underline{E}_1$$

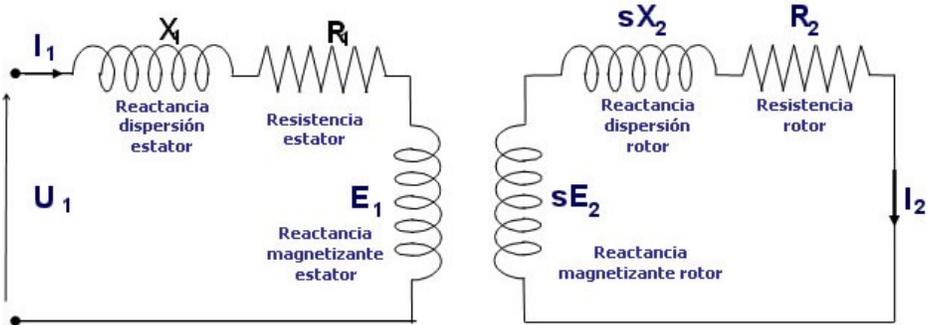
$$\underline{E}_2 = (R_2 + jX_2) \underline{I}_2$$

Circuito equivalente con el rotor girando

Con el rotor parado: $E_2 = K N f_2 \Phi_m$ como $f_2 = f_1 \Rightarrow E_2 = K N f_1 \Phi_m$

Con el rotor girando: $E_{2s} = K N f_2 \Phi_m$ como $f_2 = s f_1 \Rightarrow E_{2s} = K N s f_1 \Phi_m = s E_2$

Como la reactancia es función de la frecuencia $\Rightarrow X_{2s} = s X_2$



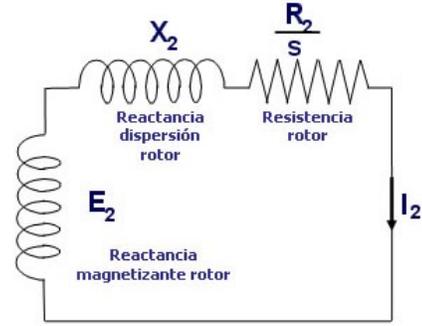
$$\underline{U}_1 = (R_1 + jX_1 \underline{I}_1) + \underline{E}_1$$

$$s \underline{E}_2 = (R_2 + s j X_2) \underline{I}_2$$

Que se puede poner en la siguiente forma:

Despejando I_2 en la fórmula anterior:

$$\underline{I}_2 = \frac{s \cdot \underline{E}_2}{R_2 + jsX_2} = \frac{\underline{E}_2}{\frac{R_2}{s} + jX_2}$$



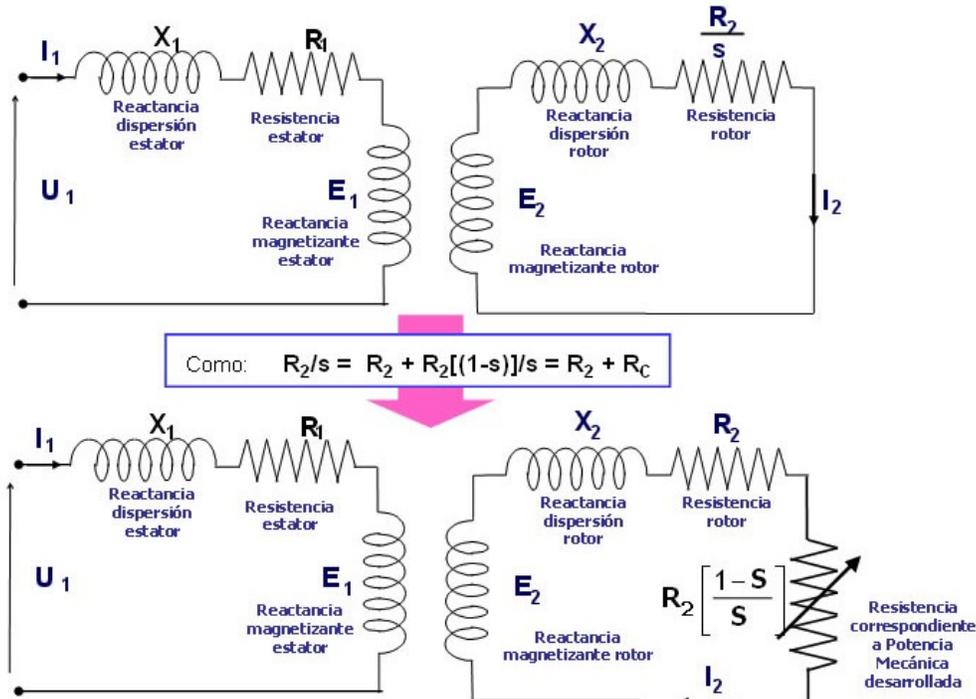
Circuito equivalente del motor asíncrono trifásico

La R_2/s ha de corresponder a la suma de: la potencia debida a la resistencia del rotor R_2 y la potencia mecánica producida por el motor, representada en el circuito eléctrico equivalente por una resistencia llamada de carga R_C (Potencia mecánica = $3 \cdot I_2 \cdot R_C$).

$$\begin{aligned} \text{Como: } R_2/s &= (-R_2 + R_2) + R_2/s = R_2 + R_2/s - R_2 \Rightarrow \\ \Rightarrow R_2/s &= R_2 + R_2(1/s - 1) = R_2 + R_2 \frac{(1-s)}{s} = R_2 + R_C \end{aligned}$$

$$\text{Con: } R_C = R_2 \frac{(1-s)}{s}$$

El circuito equivalente POR FASE de un motor asíncrono trifásico, es pues:



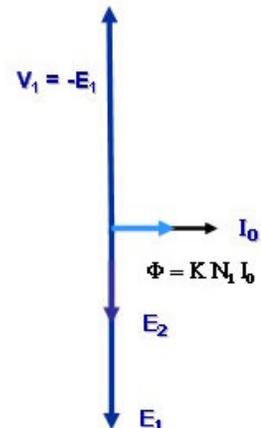
La resistencia R_C se denomina **resistencia de carga** y representa el efecto equivalente a la potencia mecánica desarrollada

Funcionamiento

Funcionamiento en vacío

Consideremos una maquina asíncrona ideal, en la que no existen pérdidas mecánicas, magnéticas ni resistencia estática, consideraciones que apartan muy poco el funcionamiento ideal del real.

Entonces en vacío $s = 0$ y cada fase del estator se comporta como una bobina pura y la corriente absorbida I_0 es puramente magnetizante. El diagrama vectorial es el de la figura adjunta.

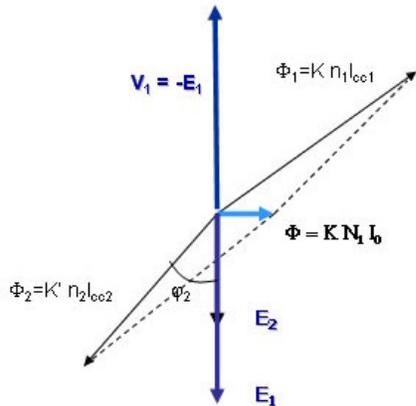


Funcionamiento con Rotor Parado

Con el rotor parado, en el arranque o por bloqueo del eje, $s = 1$ y la ecuación del rotor es:

$$\underline{I}_2 = \frac{s \cdot \underline{E}_2}{R_2 + jsX_2} = \frac{\underline{E}_2}{\frac{R_2}{s} + jX_2} \quad \text{Se transforma en:} \quad \underline{I}_2 = \frac{1 \cdot \underline{E}_2}{R_2 + j1X_2} = \frac{\underline{E}_2}{R_2 + jX_2}$$

El diagrama vectorial correspondiente:



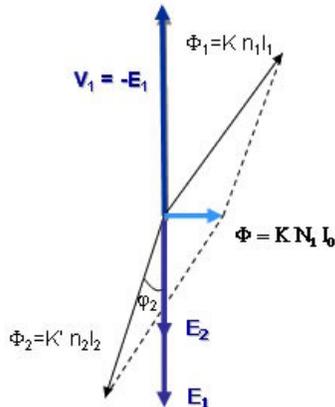
La corriente I_2 da lugar a una f.m.m. en el rotor de valor $n_2 \cdot I_2$ que a su vez origina una f.m.m. en el estator $n_1 \cdot I_1$. Como el flujo de la máquina debe de seguir siendo el mismo, pues $\Phi = K \cdot E_1 / f_1$ y ninguno de los valores cambia, las f.m.m. deben ser tal que originen flujos que su resultante sea Φ .

Funcionamiento en Carga

Hemos visto que la ecuación correspondiente al rotor es:

$$\underline{I}_2 = \frac{s \cdot \underline{E}_2}{R_2 + jsX_2} = \frac{\underline{E}_2}{\frac{R_2}{s} + jX_2}$$

El diagrama vectorial correspondiente:



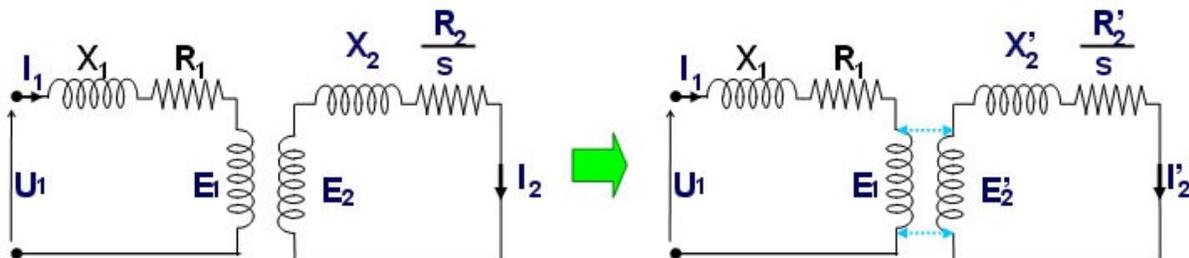
La corriente I_2 da lugar a una f.m.m. en el rotor de valor $n_2 \cdot I_2$ que a su vez origina una f.m.m. en el estator $n_1 \cdot I_1$. Como el flujo de la máquina debe de seguir siendo el mismo, pues $\Phi = K \cdot E_1 / f_1$ y ninguno de los valores cambia, las f.m.m. deben ser tal que originen flujos que su resultante sea Φ . Pero respecto al funcionamiento con el rotor parado, ahora al ser $s \ll 1$, el $\cos \varphi_2$ es muy superior,

$$\cos \varphi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + sX_2^2}}$$

Y comparando la fórmula de la intensidad con la del motor parado, deducimos que la corriente con el motor en carga es menor que la del arranque.

Circuito Equivalente: Reducción del Rotor al Estator

Se considera que la máquina asíncrona es "equivalente" a un transformador tal que: (Estator=Primario, Rotor=Secundario Relación Transf. = m)



Para simplificar los cálculos, consideremos igual número de fases en el estator y el rotor. Entonces por fase:

Multiplicando por m el secundario: $\underline{E}_2 m = (R_2/s + jX_2) I_2 m$

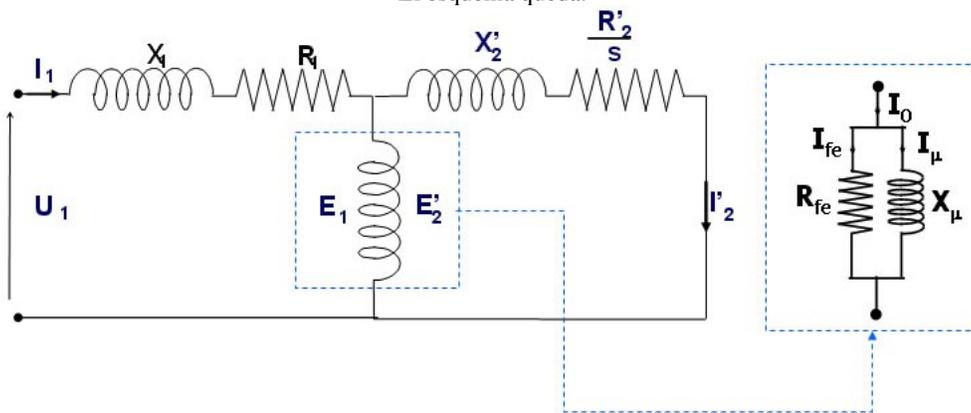
Haciendo: $E'_2 = E_2 m$
 Si los secundarios son equivalentes deberán suministrar la misma potencia: $E_2 I_2 = E'_2 I'_2$ } $\Rightarrow I'_2 = \frac{I_2}{m}$

Se ha de cumplir también las igualdades energéticas:
 $R_2 I_2^2 = R'_2 I'^2_2 \Rightarrow R'_2 = m^2 R_2$
 $X_2 I_2^2 = X'_2 I'^2_2 \Rightarrow X'_2 = m^2 X_2$

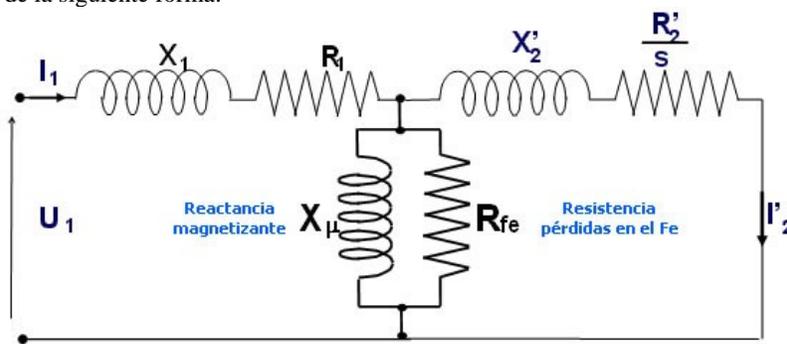
Como:

$$E'_2 = E_2 \cdot m = E_1$$

El esquema queda:

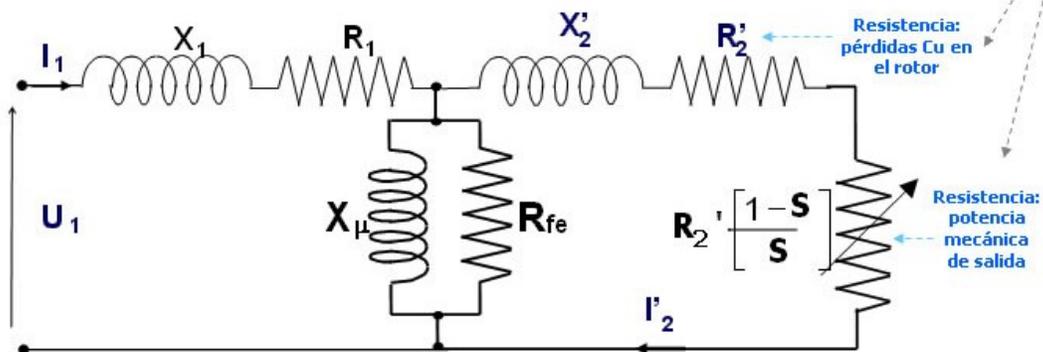


Que podemos poner de la siguiente forma:

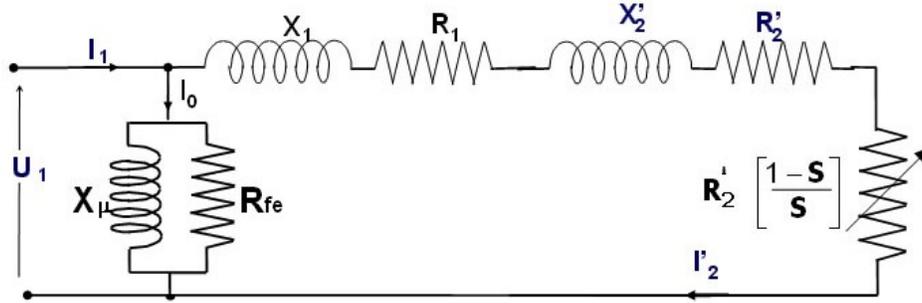


Podemos hacer:

$$\frac{R_2'}{s} = R_2' + R_2' \left[\frac{1-s}{s} \right]$$



Para simplificar los cálculos se sitúa X_{μ} y R_{fe} en el inicio del circuito, al igual que se hace en los transformadores, pero ahora los errores son superiores a los que se obtienen en los transformadores debido al entrehierro que da lugar a corrientes apreciables en vacío. De todos modos esta aproximación es **aceptable para motores > 10 KW**

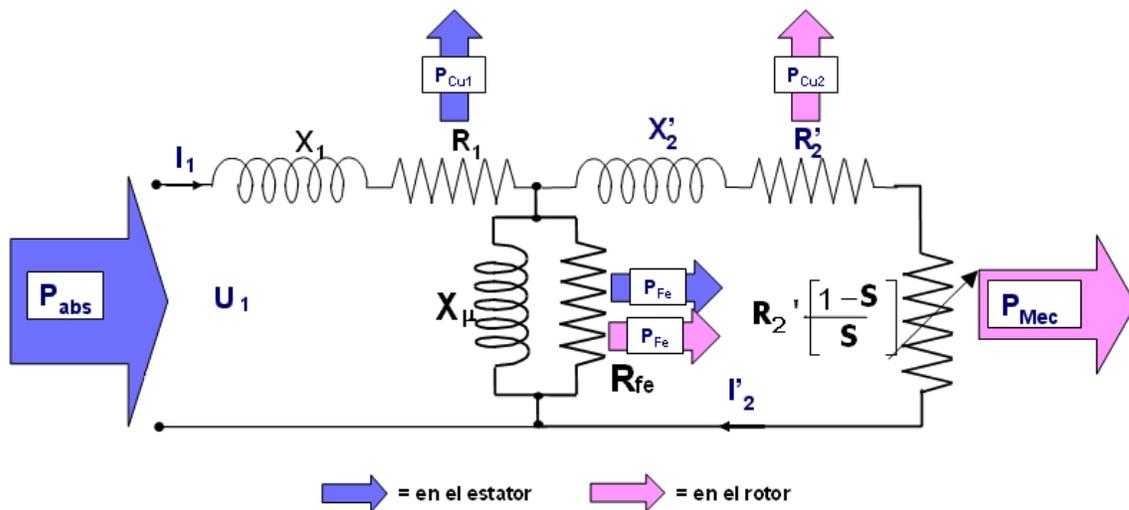


$$\underline{U}_1 = \underline{I}'_2 \left[R_1 + \frac{R'_2}{s} + jX_{cc} \right]$$

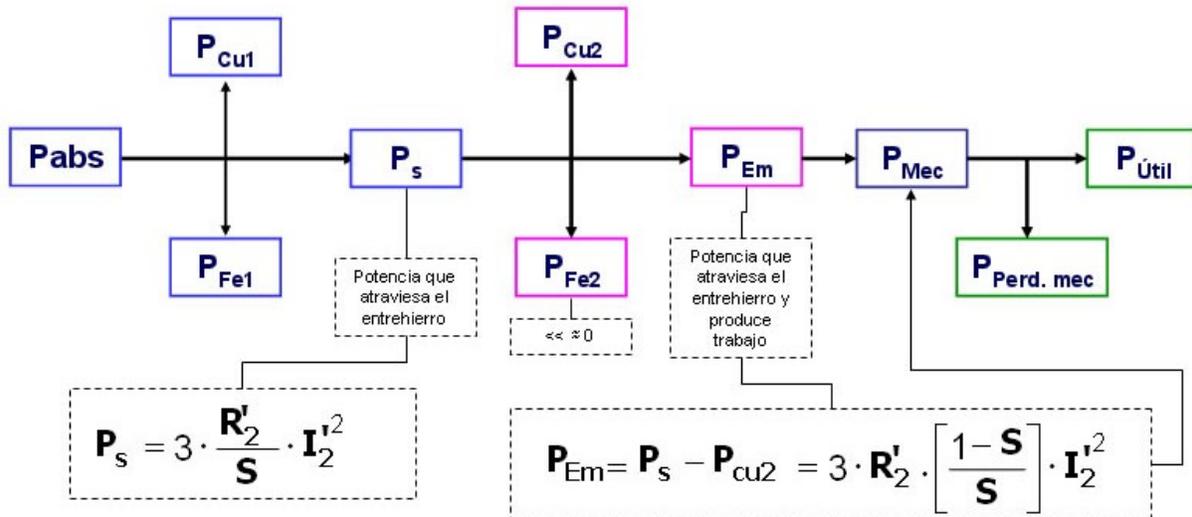
Llamando: $jX_{cc} = jX_2 + jX'_2$

Todos los elementos del circuito con ' están referidos al estator.

Balance de Potencias



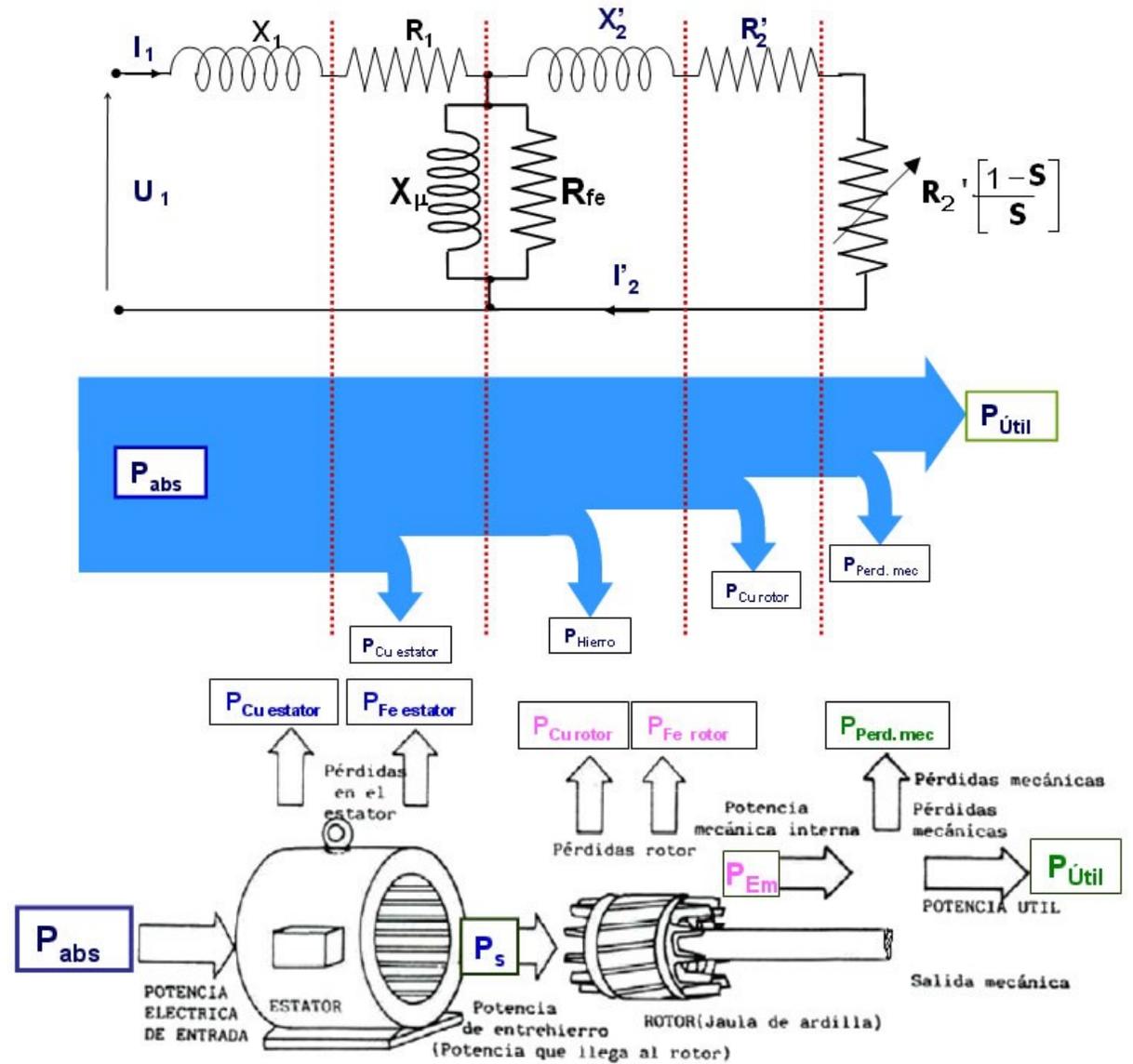
Para un motor trifásico:



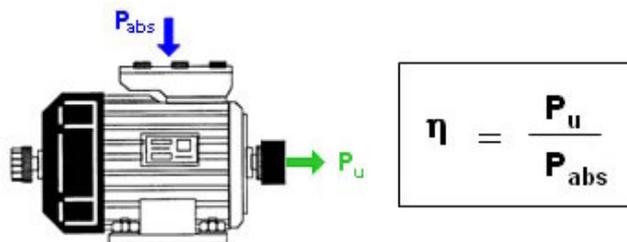
$$P_{Em} = P_S - P_{cu2} = 3.R'_2 \left[\frac{1-S}{S} \right] \cdot I_2'^2$$

$$P_{Em} = P_S - P_{cu2} = P_S - S \cdot P_S = [1-S]P_S$$

$$P_U = P_{Em} - \text{Pérdidas mecánicas}$$



Rendimiento



$$P_u = P_{abs} - P_{Cu\ est} - P_{Fe\ est} - P_{Cu\ rot} - P_{Perd\ meca}$$

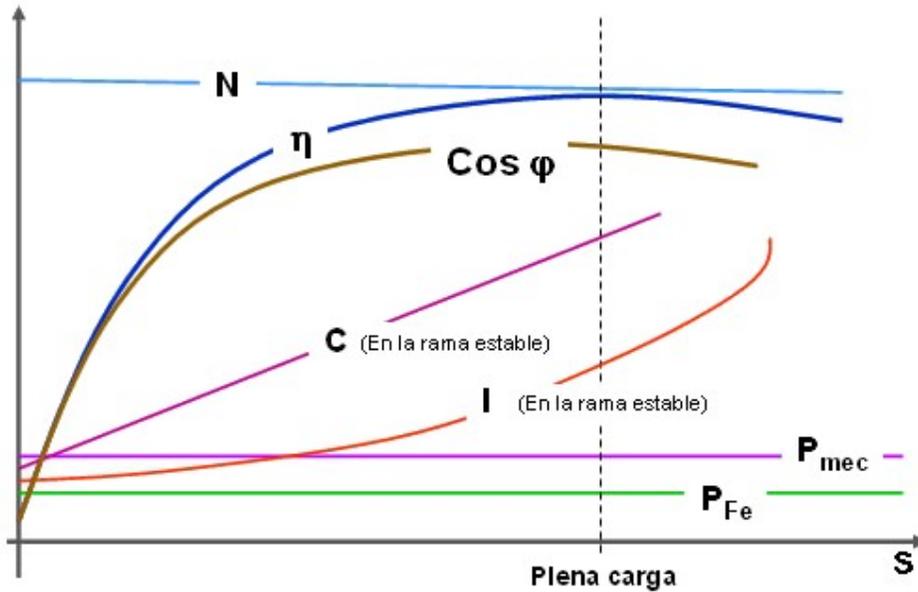
Es interesante considerar el rendimiento del rotor:

$$\eta_{\text{rotor}} = \frac{P_{Em}}{P_s}$$

$$\eta_{\text{rotor}} = \frac{P_{Em}}{P_s} = \frac{P_s(1-S)}{P_s}$$

$$\eta_{\text{rotor}} = 1 - S$$

El rendimiento de un motor asíncrono depende esencialmente del deslizamiento, el cual debe ser muy pequeño para que el rendimiento sea aceptable.



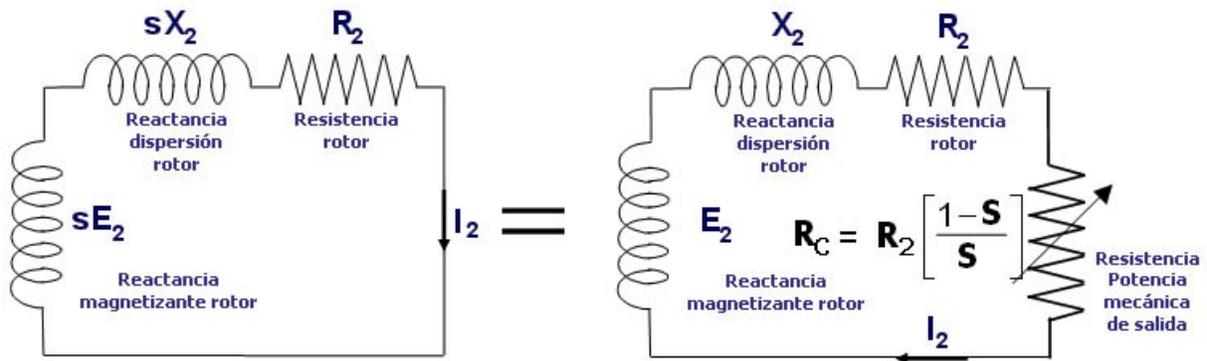
Tablas

Motores Asíncronos					Características Eléctricas			
Red 230/400V 50Hz								
IPSS	Potencia nominal	Velocidad Nominal	Intensidad Nominal	f.d.p.	Rendimiento	I arranque / I nominal	C arranque / C nominal	Momento de inercia
4 polos	P_n	V_n	I_n	$\cos \phi$	η	I_a/I_n	C_a/C_n	J
Tipo	KW	rpm	A					kg,m ²
LS56L	0,09	1370	0,43	0,7	55	2,9	2	0,00025
LS63E	0,12	1375	0,56	0,77	56	3	2,2	0,00035
LS63E	0,18	1410	0,75	0,75	63	3,7	2,3	0,00048
LS71L	0,25	1435	0,93	0,74	70	4,6	2,3	0,00067
LS71L	0,37	1425	1,4	0,7	70	4,4	2,3	0,00085
LS71L	0,55	1390	2,2	0,75	66	3,7	1,9	0,0011
LS80L	0,55	1400	2,1	0,74	68	4,4	2,1	0,0013
LS80L	0,75	1400	2,85	0,77	69	4,5	2,4	0,0018
LS80L	0,9	1425	3,2	0,73	73	5,7	2,6	0,0024
LS90S	1,1	1415	3,85	0,79	75	5,2	2,1	0,0032
LS90L	1,5	1420	5	0,79	78	5,9	2,8	0,0039
LS90L	1,8	1410	6	0,82	79	5,7	2,5	0,0049
LS100L	2,2	1430	7,7	0,81	75	5,3	1,9	0,0039
LS100L	3	1420	10,2	0,78	77	5,1	2,3	0,0051

d_{rotor}	[m]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
n_s	[rpm /min]	3000	3000	1500	1500	1000	1000
n_r	[rpm /min]	2860	2920	1470	1475	985	990
T_e	[Nm]	12,5	142	840	2300	5020	9500
P_{as}	[kW]	3,63	42,6	126,7	348	510	970
η	[-]	0,749	0,875	0,911	0,930	0,901	0,938

Par de Rotación en el Motor Asíncrono

Partamos del circuito equivalente del rotor. Prescindiendo de las pérdidas en el Fe, que son pequeñas, la potencia mecánica viene sustituida por las pérdidas de joule en la resistencia añadida R_C , tal que $R_C + R_2 = R_2/s$, entonces:



Si llamamos P_S a la potencia transferida al rotor:

$$R_C = R_2/s - R_2 = R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) \Rightarrow P_{\text{mec}} = P_{\text{EM}} = I_2^2 \cdot R_C = I_2^2 \cdot R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) \Rightarrow$$

$$P_S = E_2 \cdot I_2 \cdot \cos \phi_2 = P_{\text{EM}} + I_2^2 \cdot R_2 \Rightarrow P_{\text{EM}} = E_2 \cdot I_2 \cdot \cos \phi_2 - I_2^2 \cdot R_2$$

$$\Rightarrow P_{\text{EM}} = E_2 \cdot I_2 \cdot \cos \phi_2 - I_2^2 \cdot R_2 = I_2^2 \cdot R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) = I_2^2 \cdot R_2 \left(\frac{1}{s} - 1 \right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E_2 \cdot I_2 \cdot \cos \phi_2 = \frac{I_2^2 \cdot R_2}{s} \Rightarrow P_S = \frac{P_{\text{Cu2}}}{s} \Rightarrow \boxed{P_{\text{Cu2}} = s \cdot P_S}$$

Como: $P_{\text{EM}} = P_S - P_{\text{Cu2}} \Rightarrow P_{\text{EM}} = P_S - s \cdot P_S = P_S (1-s)$

A ésta potencia le corresponde un par: $C_E = C_E \cdot \omega_2 \Rightarrow C_E \cdot \omega_2 = E_2 \cdot I_2 \cdot \cos \phi_2 (1-s) \Rightarrow$

$$\boxed{C_E = \frac{E_2 \cdot I_2 \cdot \cos \phi_2}{\omega_1}}$$

Por otra parte, y como hemos visto: $P_{\text{Cu2}} = s \cdot P_S$

$$P_{\text{Cu2}} = s \cdot P_S = \left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1} \right) E_2 \cdot I_2 \cdot \cos \phi_2 = C_E (\omega_1 - \omega_2)$$

$$\boxed{P_{\text{Cu2}} = C_E (\omega_1 - \omega_2)}$$

$$P_{EM} = P_u + P_{pm} \approx P_u$$

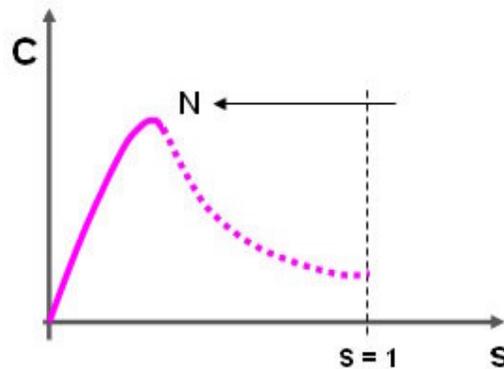
(Considerando despreciables las pérdidas mecánicas)

$$\left. \begin{array}{l} P_u = P_s(1-s) \\ P_{EM} = P_u \Rightarrow C_U = C_E \Rightarrow \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{La transmisión de potencia al} \\ \text{rotor se hace con pérdida de} \\ \text{velocidad pero a par constante} \end{array}$$

En la fórmula: $C_E = \frac{E_2 \cdot I_2 \cdot \cos \phi_2}{\omega_1}$ $\left\{ \begin{array}{l} E_2 : \text{ fem del rotor en reposo es cte.} \\ \omega_1 : \text{ velocidad de sincronismo es cte.} \end{array} \right.$

$$I_2 = \frac{s \cdot E_2}{\sqrt{R_2^2 + s \cdot X_2^2}} \left\{ \begin{array}{l} C_E = K \frac{s \cdot E_2 \cdot R_2}{R_2^2 + s \cdot X_2^2} \Rightarrow C_E = f(s) \end{array} \right.$$

Fórmula en la que E_2 , R_2 y X_2 son ctes. y cuya representación gráfica tiene la siguiente forma:



La línea punteada corresponde a un funcionamiento inestable del motor.

☞ El **par máximo** se obtiene para:

$$\frac{dC}{ds} = 0 \Rightarrow R_2 = s \cdot X_2$$

☞ El **par máximo es independiente de la resistencia del rotor**. Sustituyendo la expresión anterior en la fórmula del par:

$$C_{\max} = K \frac{E_2}{2 \cdot X_2}$$

☞ Para un determinado deslizamiento el par varía con el **cuadrado de la tensión** de alimentación:

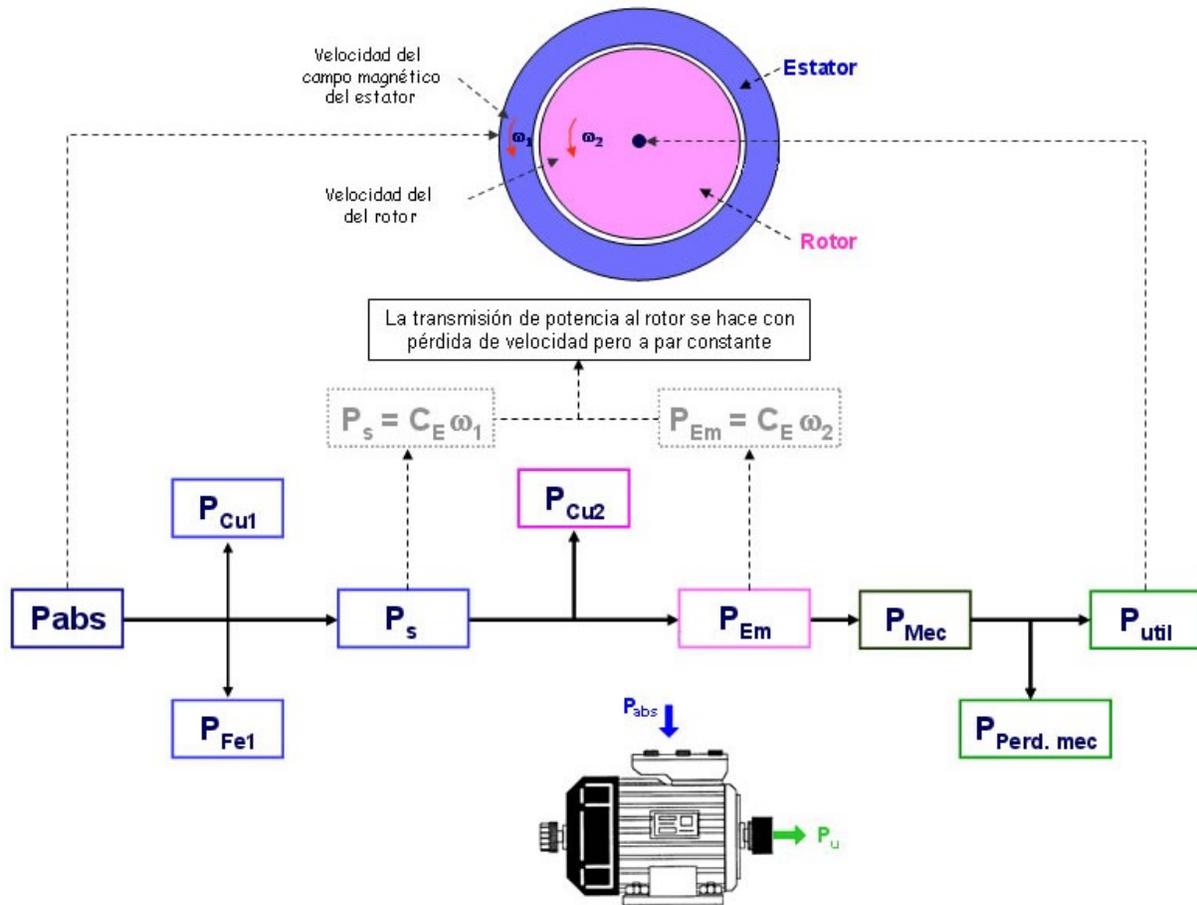
$$C_E = \frac{E_2 \cdot I_2 \cdot \cos \phi_2}{\omega_1} \text{ y para un mismo deslizamiento } s \text{ se tiene,}$$

Teniendo en cuenta que $I_2 = f(E_2)$, que $\cos \phi_2$ **permanece constante** y $E_2 = f(U)$

$$C_E = K \cdot E_2^2 = K \cdot U_2^2$$

☞ **En las proximidades del sincronismo el par es sensiblemente proporcional al deslizamiento**

En la fórmula del par, para s pequeños $\Rightarrow s \cdot X_2 \ll R_2 \Rightarrow C_E = K \cdot s$



Par de Rotación en la Máquina Asíncrona

Como punto de partida supongamos un motor trifásico.
El par útil de la máquina es:

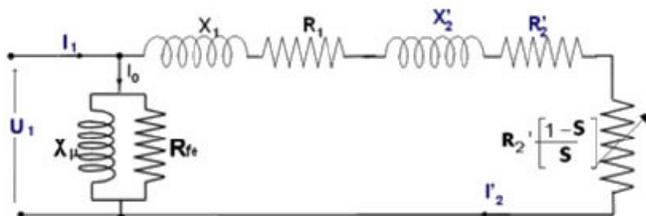
$$C_U = \frac{P_U}{N_2}$$

Si se desprecian las pérdidas mecánicas de la máquina:

$$P_U = P_{Em} \Rightarrow C_U = \frac{P_{Em}}{N_2} \Rightarrow$$

$$\left. \begin{aligned} s &= \frac{N_1 - N_2}{N_1} \\ P_{Em} &= (1-s)P_S \end{aligned} \right\} C_U = \frac{(1-s)P_S}{N_1(1-s)} \Rightarrow C_U = \frac{P_S}{N_1}$$

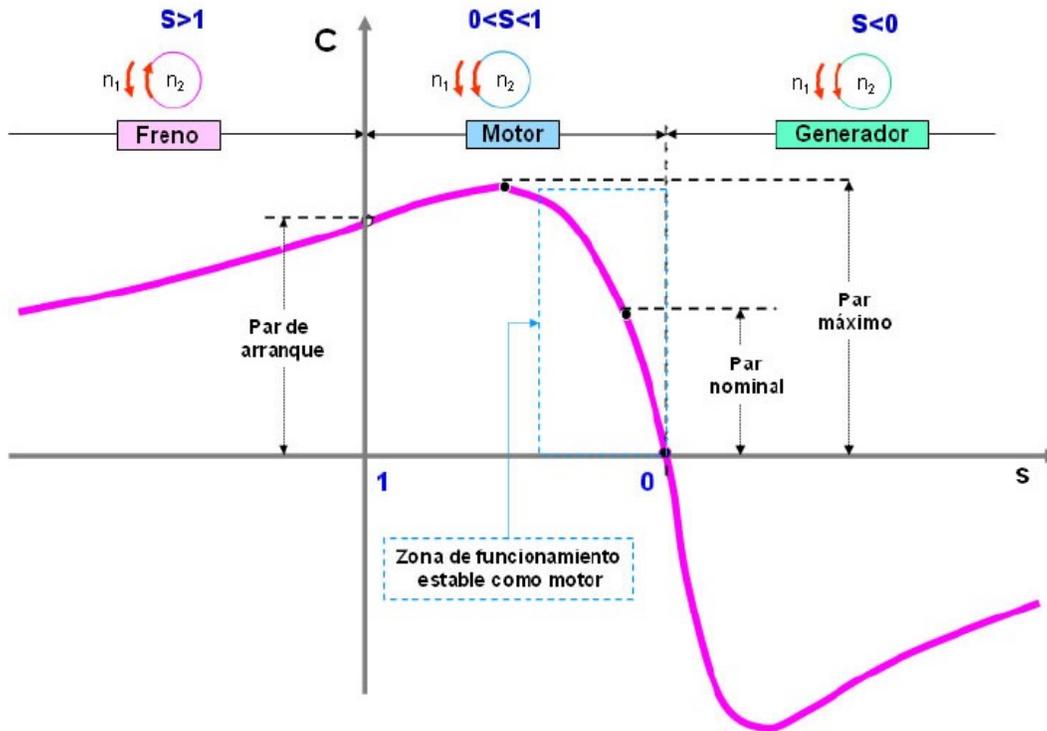
$$C_U = \frac{P_S}{N_1} = \frac{3R'_2 I_2'^2}{s N_1}$$



$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{cc}^2}}$$

$$C_u = \frac{3 \cdot U_1^2 \cdot \frac{R'_2}{s}}{N_1 \cdot \left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + N_1 \cdot X_{cc}^2} \Rightarrow \boxed{C_u = f(s)}$$

La representación gráfica de ésta función es:



Para los máximos de la función $C_u = f(s)$ se ha de cumplir: $\frac{dC_u}{ds} = 0$

Derivando la función e igualando a cero se obtiene: $s_{\max} = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_{cc}^2}}$

Y para el par máximo: $C_{\max} = \pm \frac{3 \cdot U_1^2}{2 \cdot N_1 \cdot \left(R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{cc}^2} \right)}$

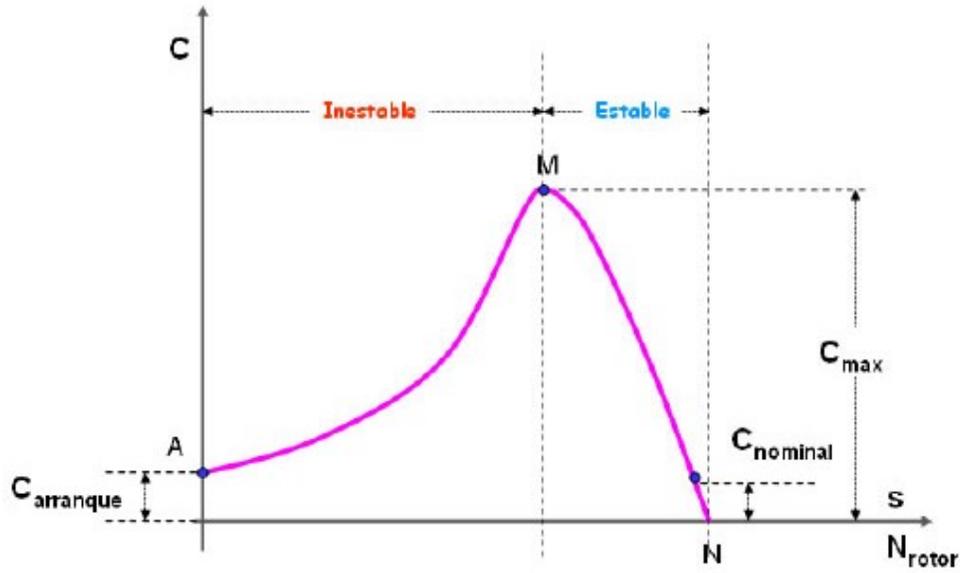
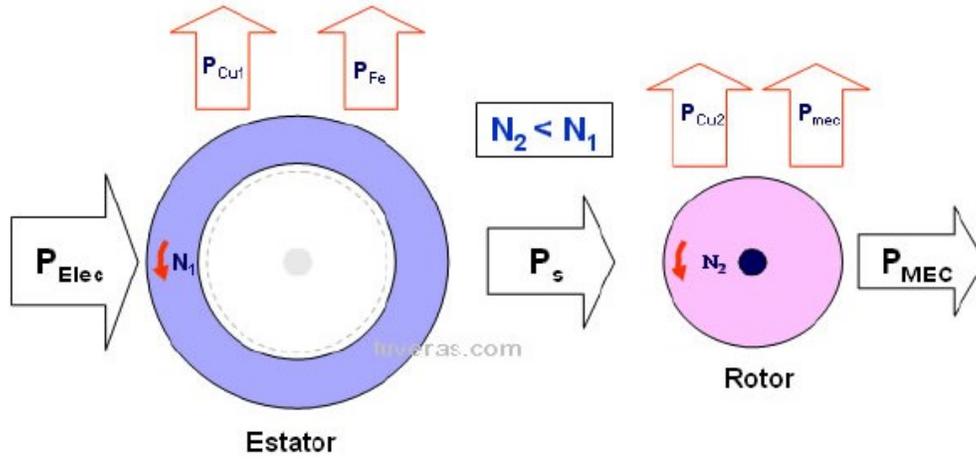
El signo positivo significa un **funcionamiento como motor** ($N_2 < N_1$)

El signo negativo significa un **funcionamiento como generador** ($N_2 > N_1$)

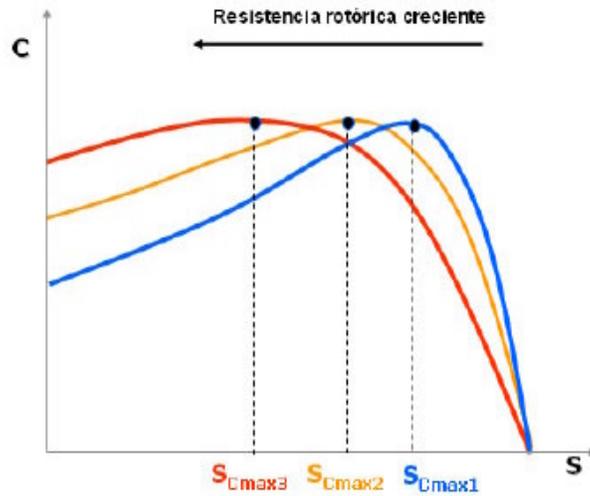
Con sentidos opuestos de giro el **funcionamiento es como freno**.

- La característica mecánica de los motores de inducción es prácticamente lineal entre vacío y plena carga.
- El par máximo suele ser de 2 a 3 veces el nominal.
- El par máximo **NO** depende de la resistencia retórica R'_2 .
- El deslizamiento al que se produce el par máximo **si depende de la resistencia** retórica R'_2 . Ésta propiedad se usa para el arranque mediante inserción de resistencias en máquinas de rotor bobinado.
- El par de arranque tiene que ser superior al nominal para permitir que el motor se ponga en marcha.
- Para un determinado deslizamiento, el par varía con el **cuadrado de la tensión**.

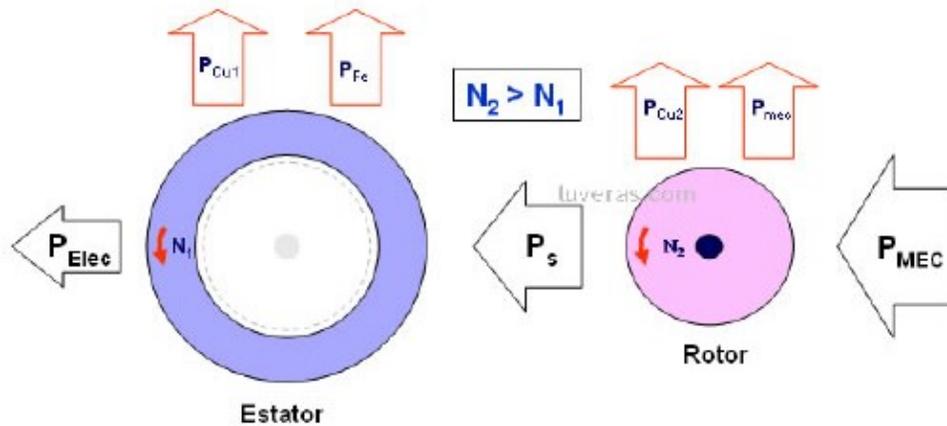
Funcionamiento como motor



Zona estable MN: aumento del par conforme el motor disminuye su velocidad.
 Zona inestable MA: disminución del par conforme el motor disminuye su velocidad.



Funcionamiento como generador

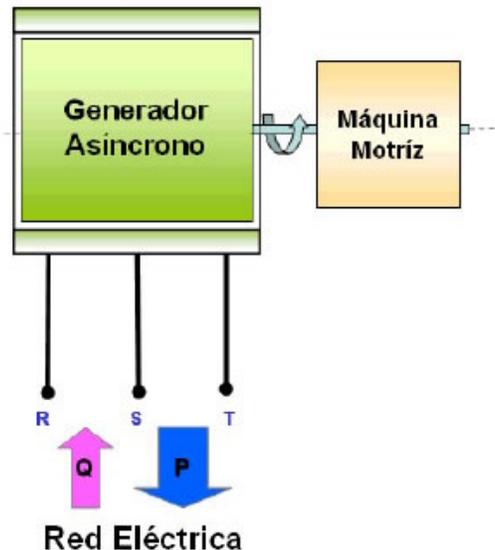


Corresponde a velocidades superiores a la de sincronismo, lo que comporta deslizamientos negativos. En este caso el par desarrollado por la máquina asíncrona se convierte en par de frenado respecto del rotor.

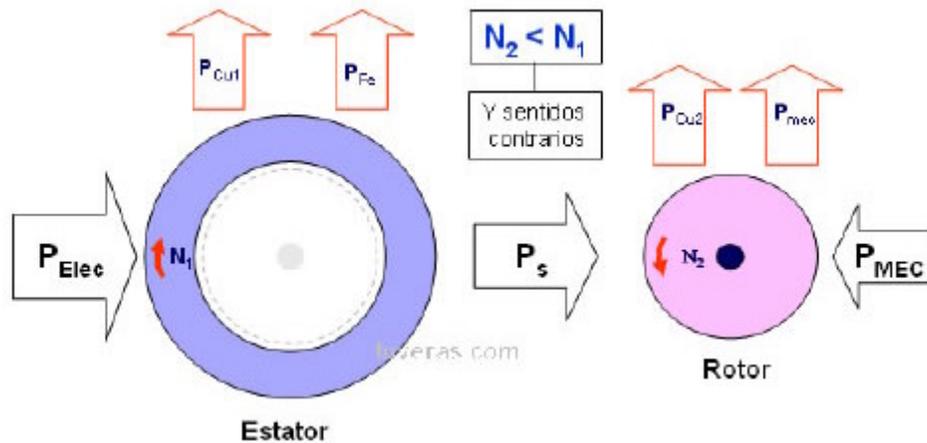
Se puede disponer de un generador asíncrono trifásico disponiendo de un motor asíncrono trifásico acoplado, por ejemplo, a un motor de explosión. Se conecta la máquina a una red trifásica y se arrancará como motor, arrastrando al motor de explosión, llegando a una velocidad de régimen próxima a la de sincronismo. A continuación se arranca el motor de explosión y una vez que, debido al motor de explosión, el sistema supere la velocidad de sincronismo, la máquina asíncrona se convertirá en generador, cediendo potencia activa al sistema eléctrico al que está conectada.

Este funcionamiento tiene las siguientes **particularidades**:

1. Proporciona tanta más potencia cuanto mayor es la velocidad a la que es llevada.
2. Su flujo, al contrario que en la máquina síncrona, se debe a una corriente alterna. No puede producir por sí misma la potencia reactiva (magnetizante) necesaria para la creación de flujo, debe tomarla de la red que alimenta. Por tanto en principio, no puede generar de forma independiente, sino acoplada a una red eléctrica existente, de la que toma la potencia magnetizante.
3. Cualquiera que sea su velocidad de hipersincronismo, la frecuencia a la que se suministra la potencia eléctrica es igual a la de la red a la que está acoplada.



Funcionamiento como freno



Este régimen de frenado se utiliza cuando se desea parar rápidamente un motor. La manobra se realiza **inviertiendo dos fases** de la alimentación, de tal manera que el campo giratorio pasa súbitamente a girar en sentido contrario al del rotor (frenado a contracorriente). El rotor va gradualmente disminuyendo su velocidad hasta pararse, momento en el que debe ser desconectado de la red, ya que de no hacerlo la máquina comenzaría a girar en sentido contrario al que estaba. En este tipo de frenado se pueden producir corrientes muy superiores a las de arranque.

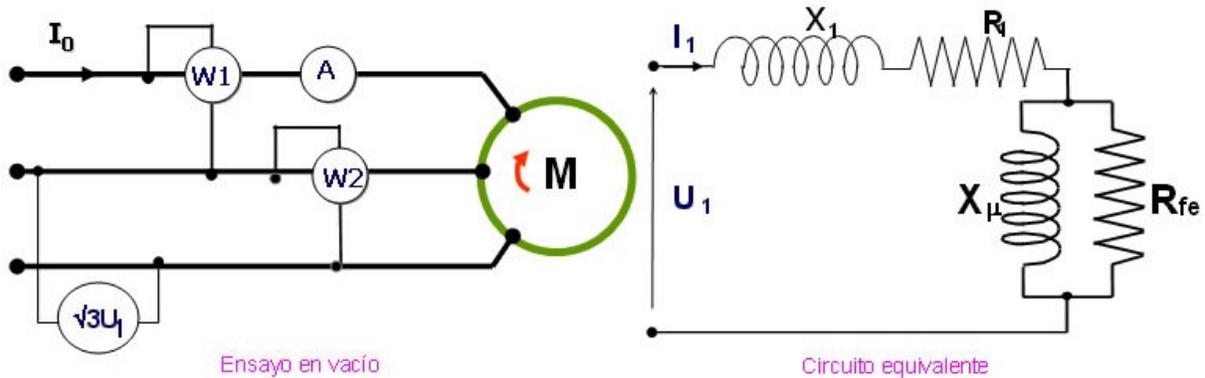
Ensayo de vacío o de rotor libre

Se hace funcionar el motor sin carga mecánica a la tensión nominal U_1 y frecuencia nominal f . En estas condiciones la velocidad de giro del motor estará muy cercana a la velocidad de sincronismo, de tal forma $\Rightarrow s \rightarrow 0 \Rightarrow R'_2 \cdot [(1-s)/s]$ es muy grande. En estas circunstancias la potencia P_0 consumida por el motor es:

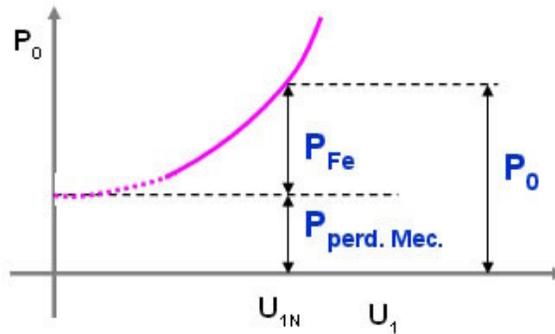
$$P_0 = W_1 + W_2 = P_{Cu1} + P_{Fe} + P_{Perd.Mec}$$

$$P_{Cu1} \ll \ll y \quad P_{Cu1} \ll P_{Fe} + P_{Perd.Mec} \quad (\text{pues } I_0 \ll I_N)$$

$$P_0 \approx W_1 + W_2 = P_{Fe} + P_{Perd.Mec}$$

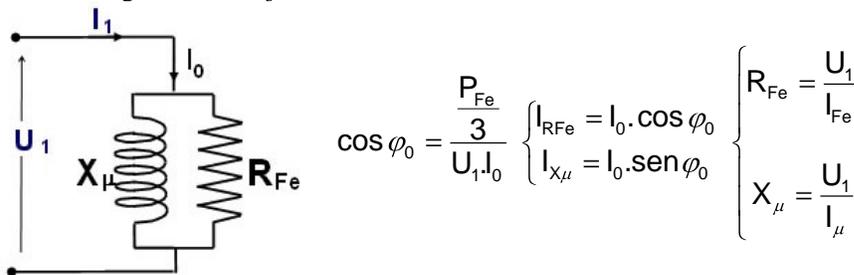


El problema que se plantea en este ensayo es que la potencia absorbida por el motor funcionando a rotor libre, es la suma de las pérdidas en el hierro más las pérdidas mecánicas. Es necesario separarlas, para ello, se procederá de la siguiente forma: comenzando por la tensión nominal de alimentación, se irán realizando sucesivas medidas de potencia a diferentes tensiones, hasta llegara una tensión de alimentación de aproximadamente el 25% de la tensión nominal, construyendo una gráfica (de tipo parabólico) como la que se muestra en la figura adjunta. Una vez construida la gráfica anterior, se prolongará dicha curva hasta que corte al eje de ordenadas. El punto de corte nos indica las pérdidas mecánicas, ya que entonces las pérdidas en el Fe serán nulas al no existir flujo. Por tanto a la tensión nominal de alimentación, las pérdidas en el hierro serán la potencia total absorbida menos las pérdidas mecánicas.



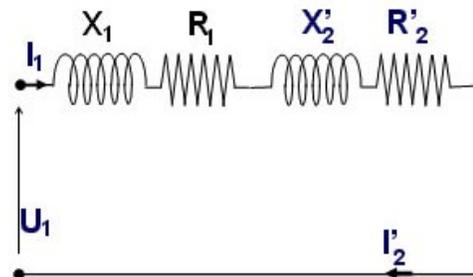
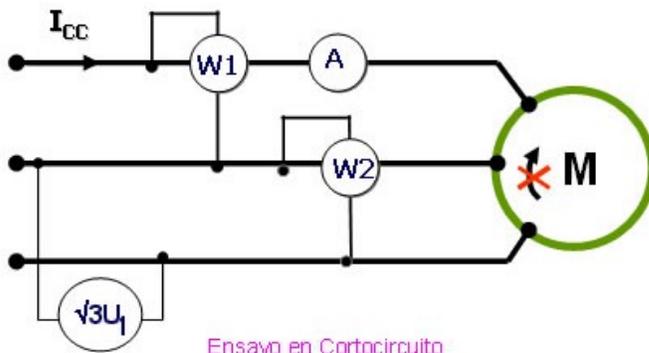
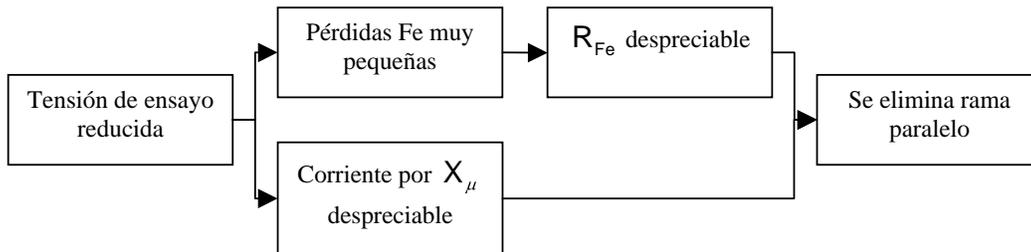
Nótese que las pérdidas mecánicas se consideran constantes para diferentes valores de tensión de alimentación porque una vez que el motor comienza a girar lo hace prácticamente a la misma velocidad, muy cercana a la de sincronismo, para diferentes tensiones de alimentación, con lo que las pérdidas mecánicas se pueden considerar constantes.

Una vez separadas las pérdidas en el hierro de las pérdidas mecánicas, el circuito equivalente queda en la forma que indica el diagrama de debajo. Entonces:



Ensayo de cortocircuito o de rotor bloqueado

El ensayo se realiza bloqueando el rotor e impidiendo que gire ($N_2 = 0$, $s = 1$, $R'_c = 0$) y se aplica al estator una tensión creciente desde 0 hasta que la corriente del motor sea la nominal ($I_{cc} = I_{1N}$).



$$P_{cc} = W_1 + W_2 = P_{Cu1} + P_{Cu2}$$

$$\left. \begin{aligned} \cos \varphi_{cc} &= \frac{\frac{P_{cc}}{3}}{U_{1cc} \cdot I_{1N}} \\ Z &= \frac{U_{1cc}}{I_{1N}} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} R_{cc} &= R_1 + R'_2 \\ X_{cc} &= X_1 + X'_2 \end{aligned} \left. \begin{aligned} R_{cc} &= R_1 + R'_2 = \frac{U_{1cc}}{I_{1N}} \cos \varphi_{cc} \\ X_{cc} &= X_1 + X'_2 = \frac{U_{1cc}}{I_{1N}} \sin \varphi_{cc} \end{aligned} \right\}$$

R_1 se obtiene por medición directa sobre los devanados del estator.

X_{cc} se reparte entre X_1 y X'_2 . A falta de otra información $X_1 = X'_2$

Arranque

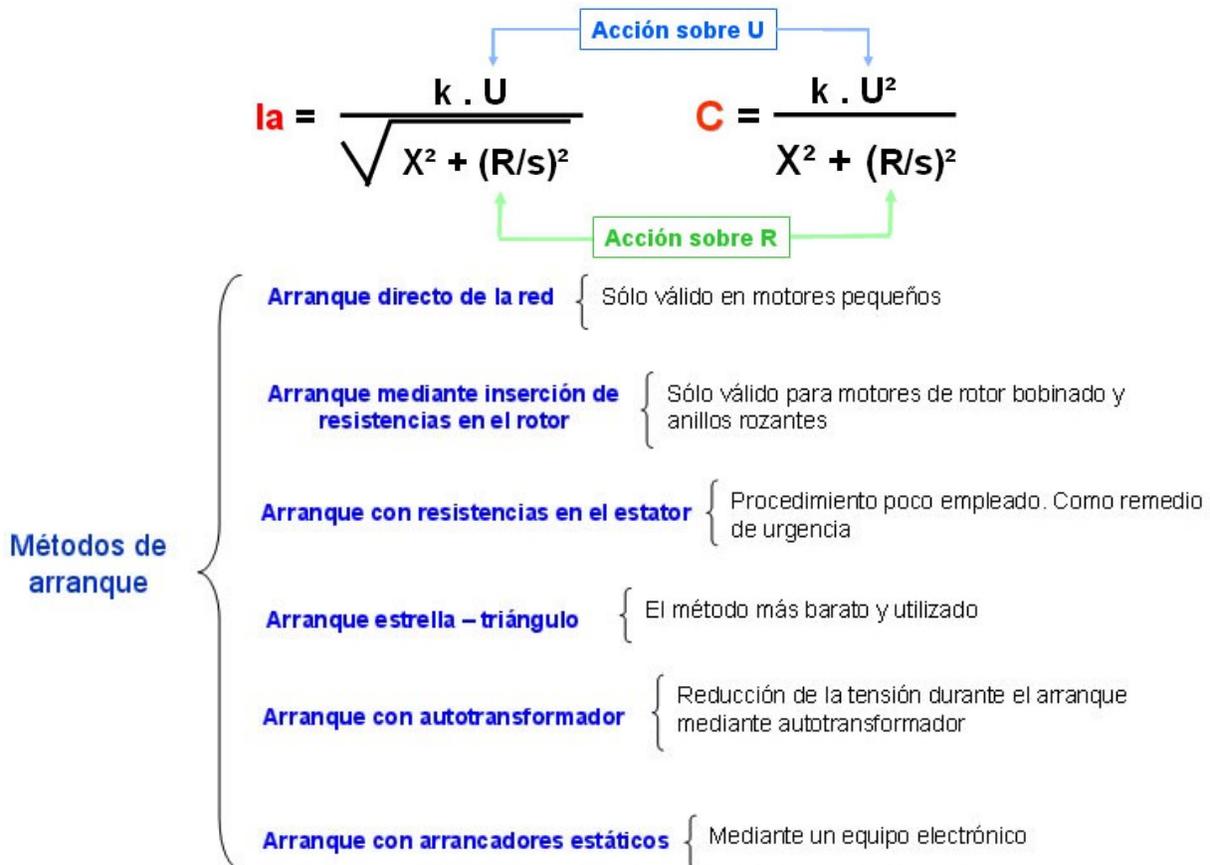
Bajo la acción de los pares motor o electromagnético C y del par resistente C_R se produce el comportamiento dinámico del motor, que responde a la ecuación:

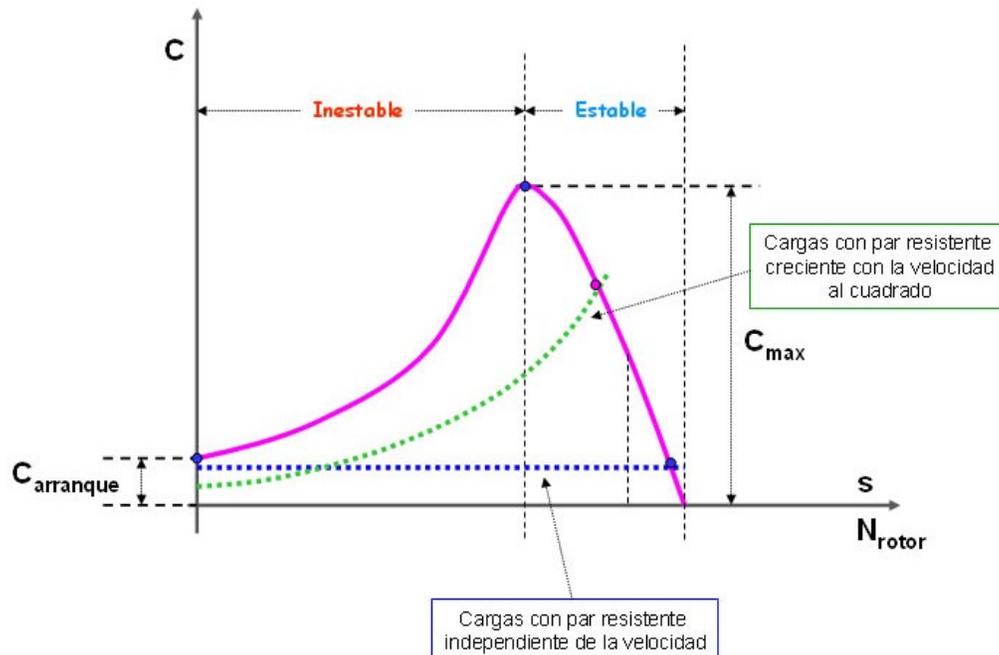
$$C - C_R = J \frac{d\omega}{dt}$$

Donde J es el momento de Inercia de las partes giratorias y ω la velocidad angular del rotor.

Para que se produzca el arranque es necesario que el par de arranque del motor sea superior al par resistente de la carga, de esta manera se produce una aceleración que hace girar el motor a una velocidad cada vez mayor, obteniéndose el régimen permanente cuando se igualan el par motor y resistente.

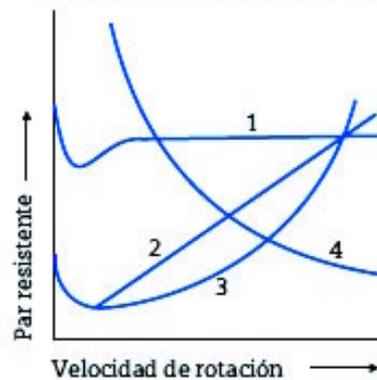
En el arranque se produce una elevada corriente I_a (en el circuito equivalente la resistencia de carga vale 0 pues el deslizamiento vale 1). Para reducir las corrientes en el momento del arranque se emplean diferentes métodos como veremos a continuación, actuando normalmente sobre U o R , pero se ha de tener en cuenta que el par C también sufre modificación.



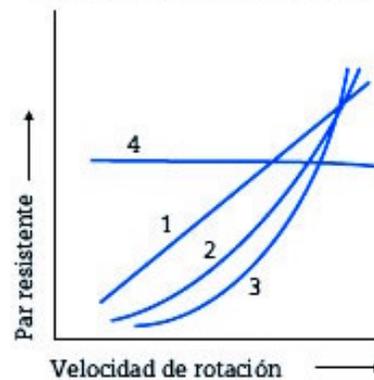


Para comprobar los procesos de arranque y de frenado, y para seleccionar la velocidad del motor a utilizar, se necesita conocer la curva del par resistente de la máquina accionada (par de carga), en dependencia de la velocidad de rotación. Las formas básicas representativas de los pares resistentes se reproducen en la figura inferior izquierda. En la figura inferior derecha se muestra el curso correspondiente de la potencia necesaria.

Par resistente en dependencia de la velocidad de rotación

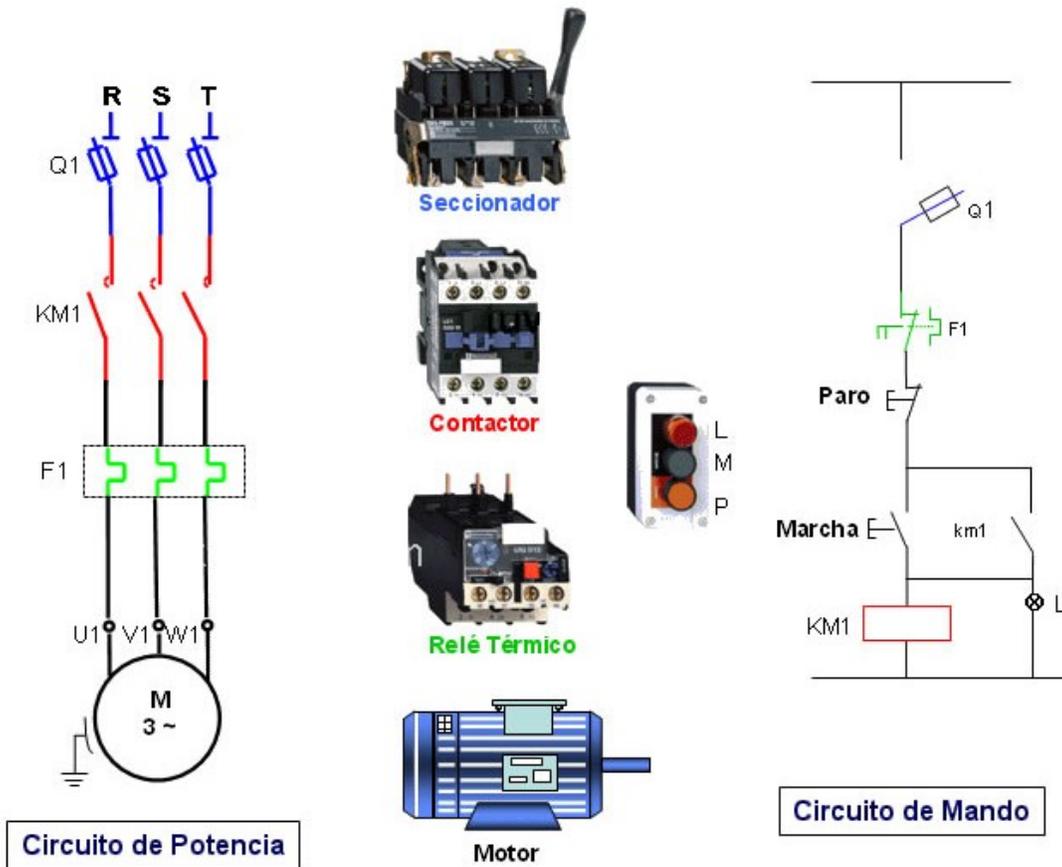


Potencia en dependencia de la velocidad de rotación

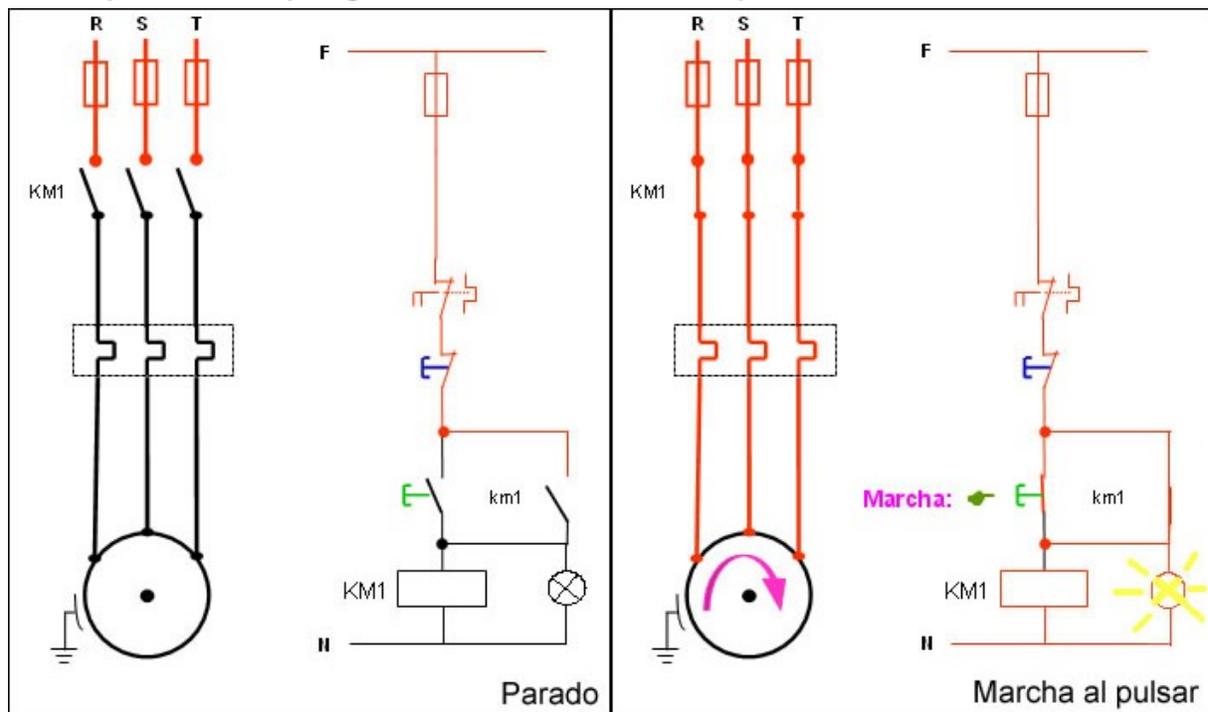


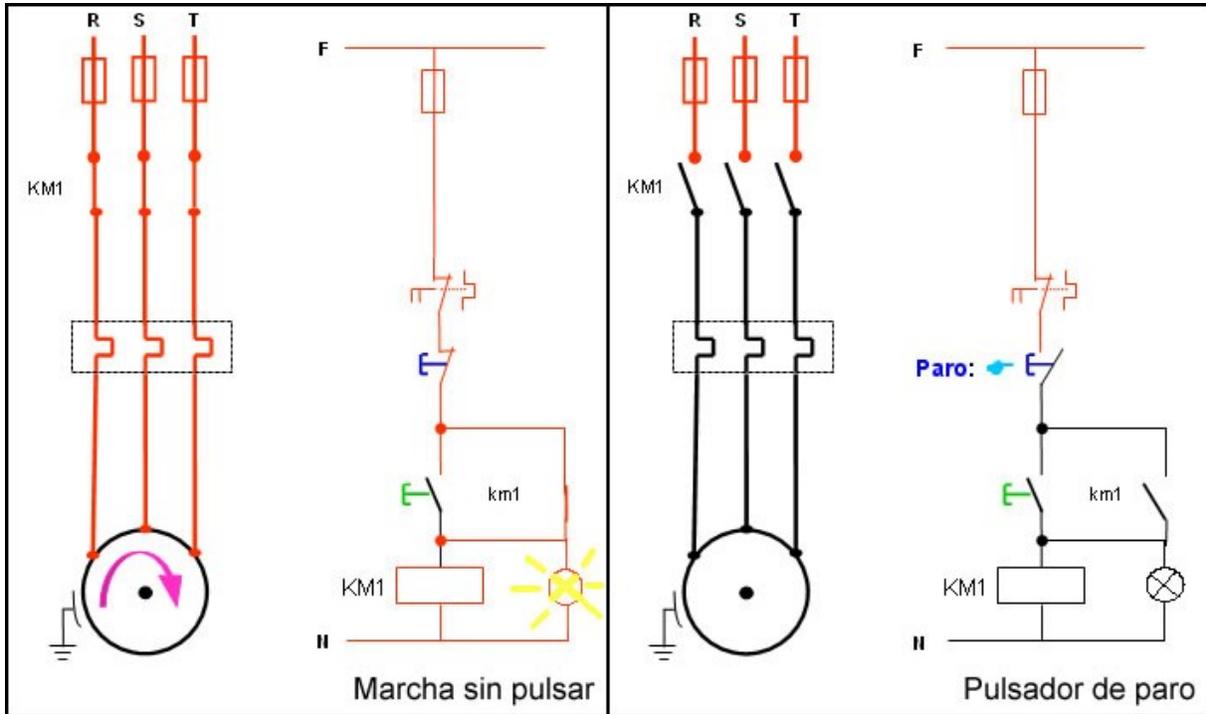
1. Par resistente prácticamente constante, potencia proporcional a la velocidad de rotación. Se establece normalmente, en mecanismos elevadores, bombas y compresores de émbolo que impulsen venciendo una presión constante, laminadores, cintas transportadoras, molinos sin efecto ventilador, máquinas herramientas con fuerza de corte constante,
2. El par resistente crece proporcionalmente con la velocidad de rotación y la potencia aumenta proporcionalmente con el cuadrado de la velocidad.
3. El par resistente crece proporcionalmente con el cuadrado de la velocidad de rotación, y la potencia con el cubo de la velocidad de rotación. Rige normalmente para bombas centrífugas, ventiladores y soplantes centrífugos, máquinas de émbolo que alimenten una red de tuberías abiertas,
4. El par resistente decrece en proporción inversa con la velocidad de rotación, permaneciendo constante la potencia, Solamente se considerará este caso para procesos de regulación, presentándose en los tornos y máquinas herramientas similares, máquinas bobinadoras y descortezadoras.

Arranque Directo

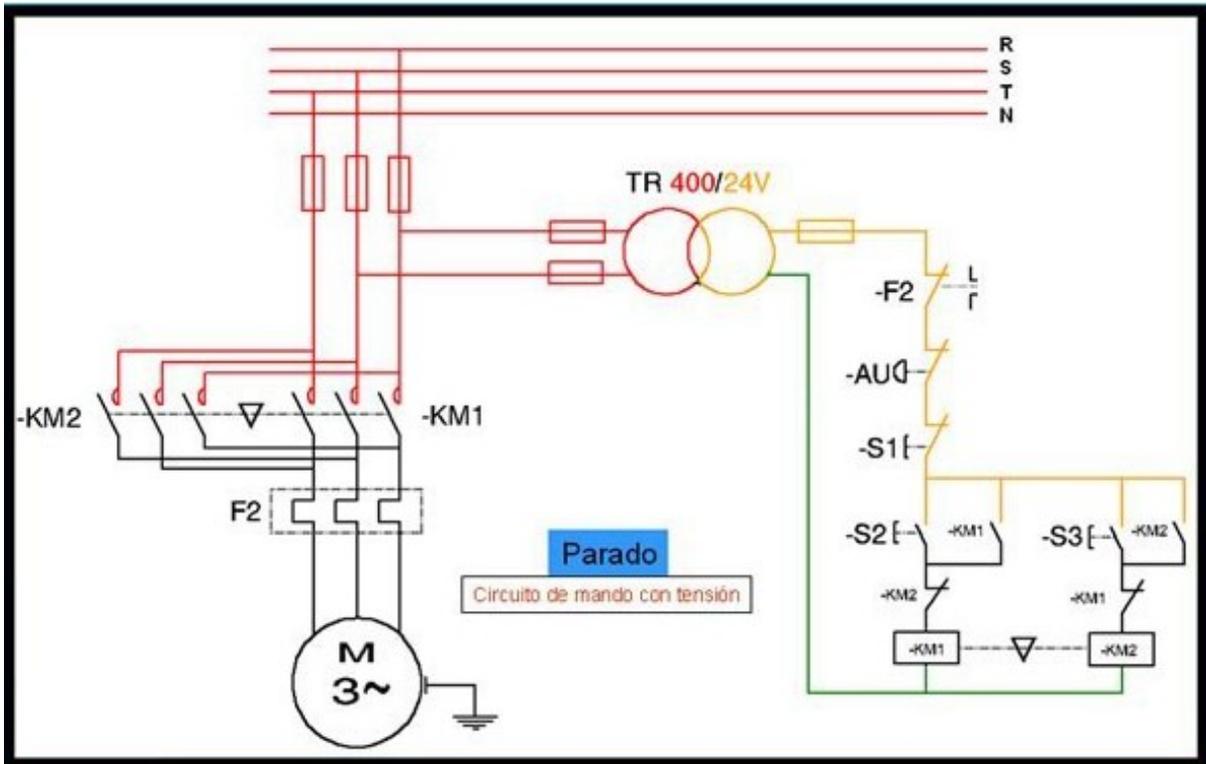


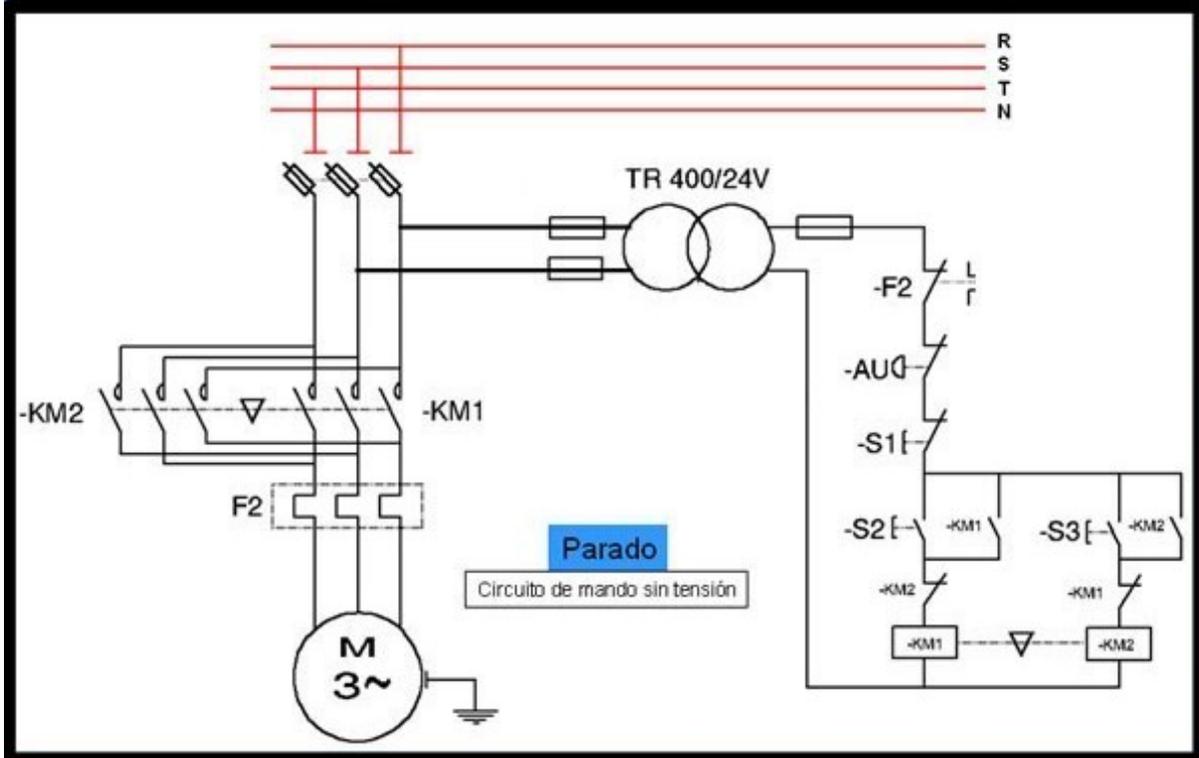
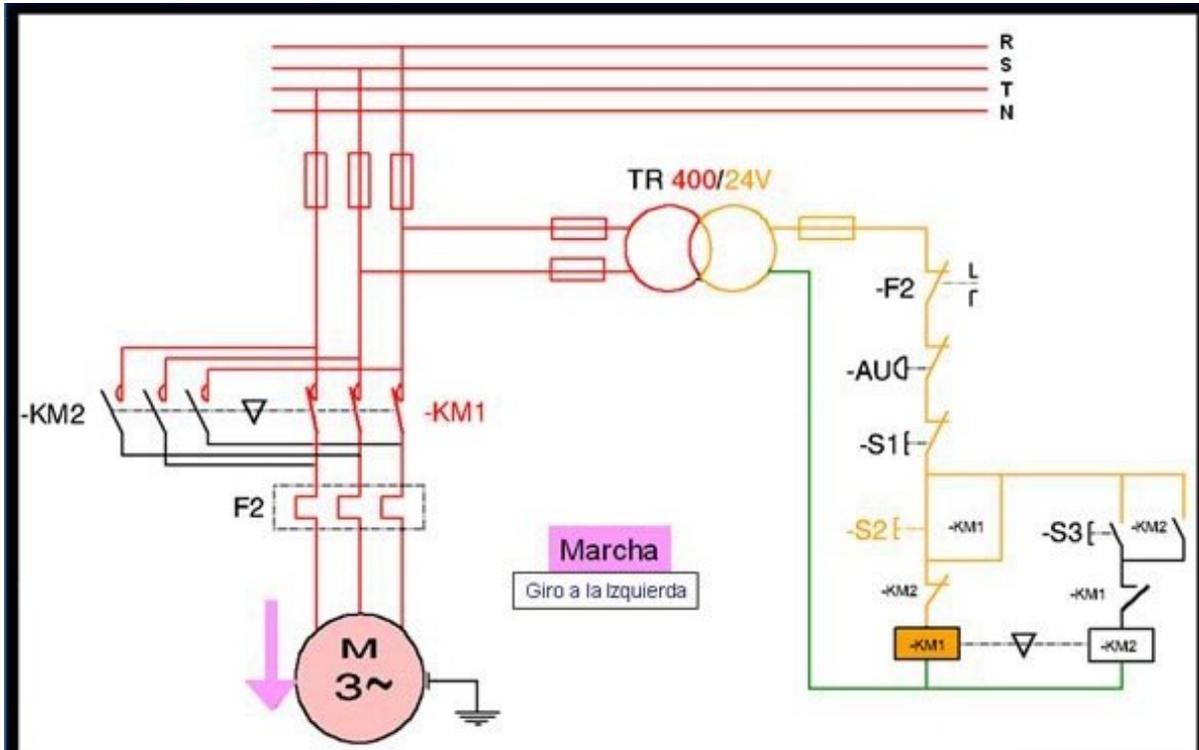
Arranque Directo (Diagrama de funcionamiento)

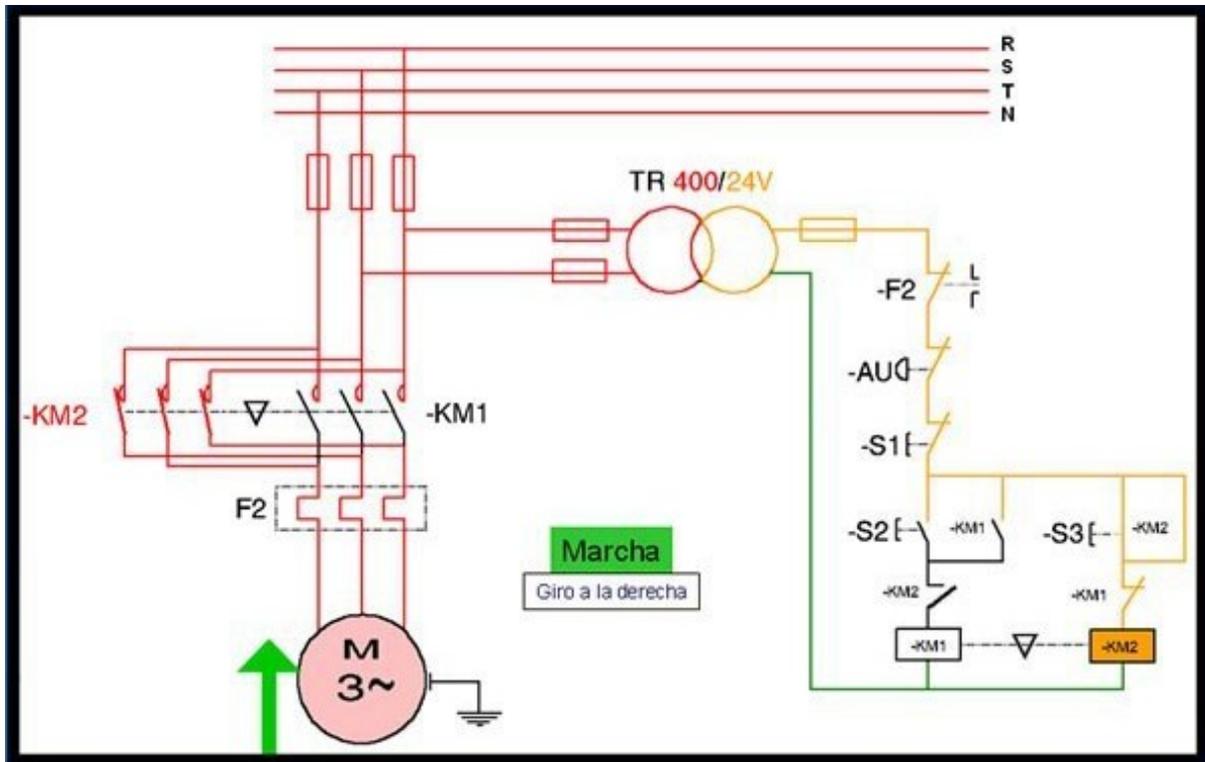




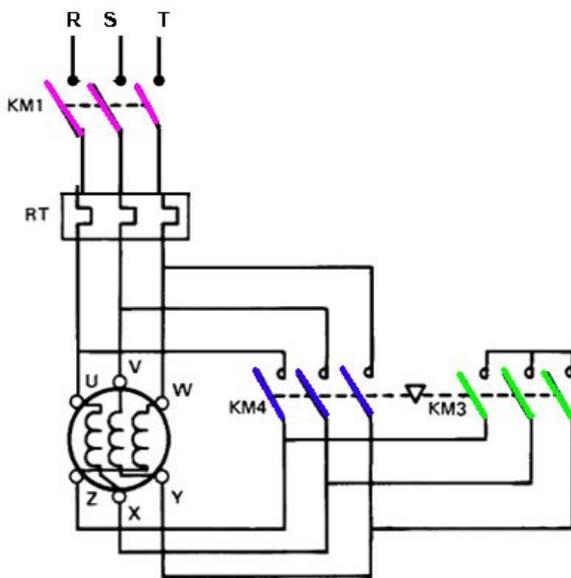
Arranque Directo con Inversión (Diagrama de funcionamiento)



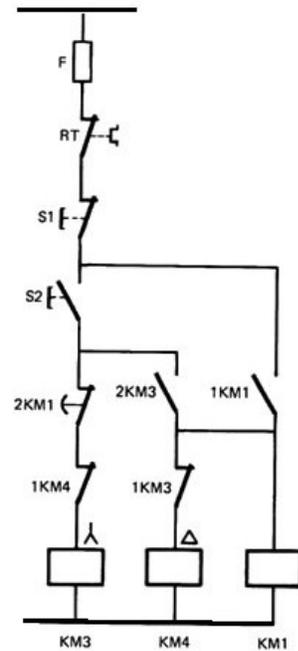




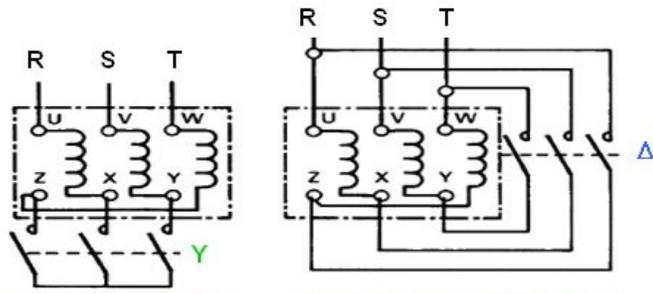
Arranque Estrella-Triángulo



Circuito de Potencia



Circuito de Mando



Primer tiempo: **Estrella Y**

Segundo tiempo: **Triángulo Δ**

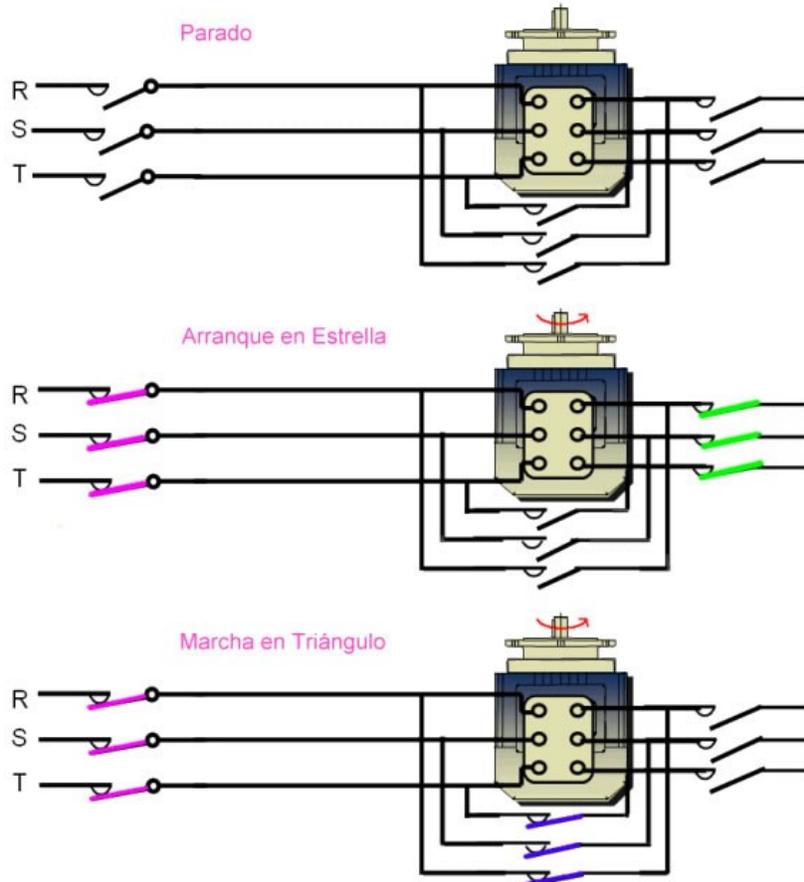
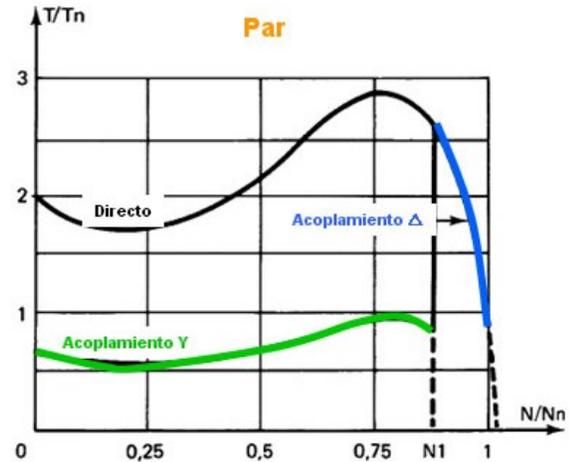
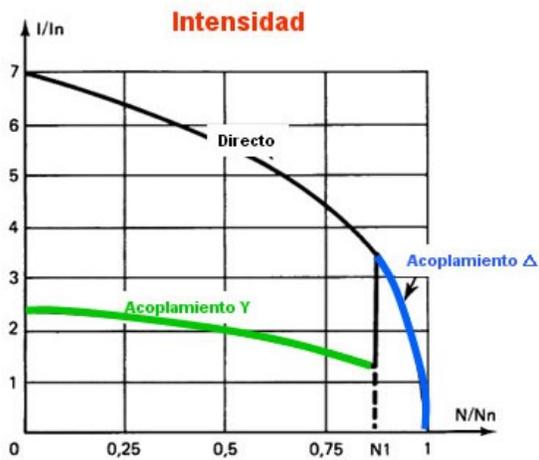
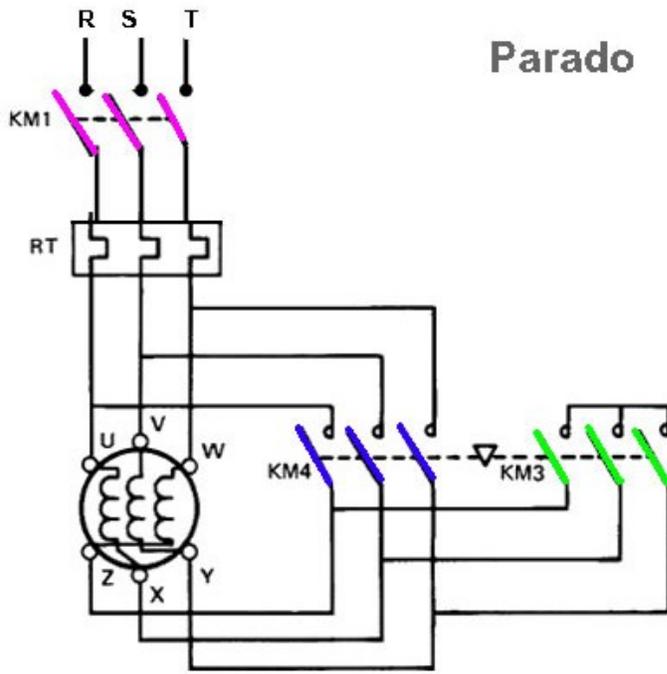
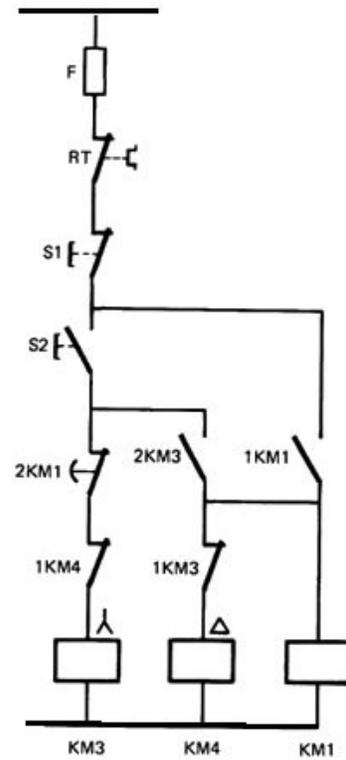


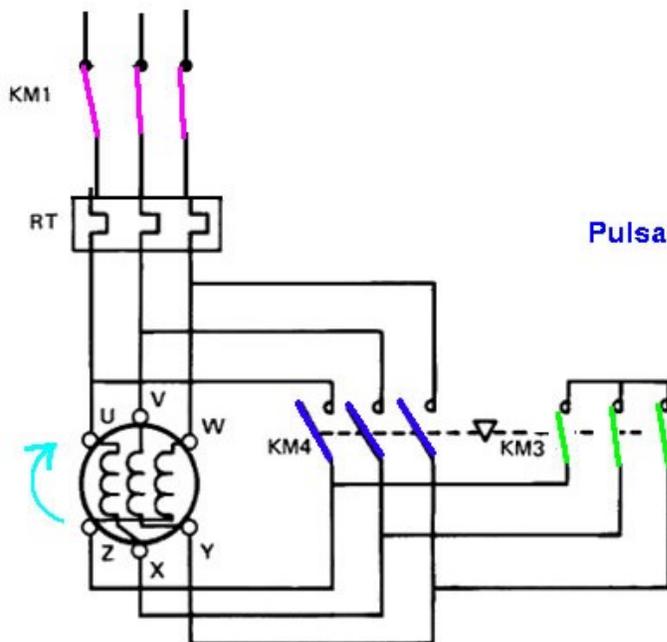
Diagrama de funcionamiento



Circuito de Potencia

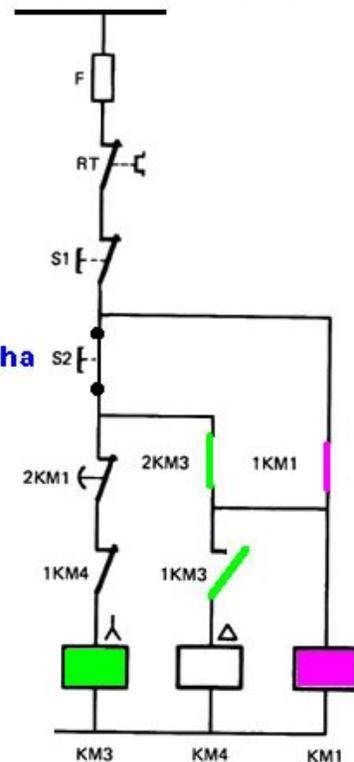


Circuito de Mando

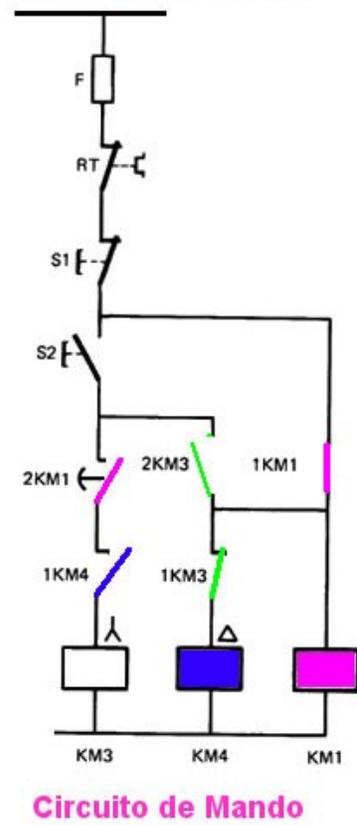
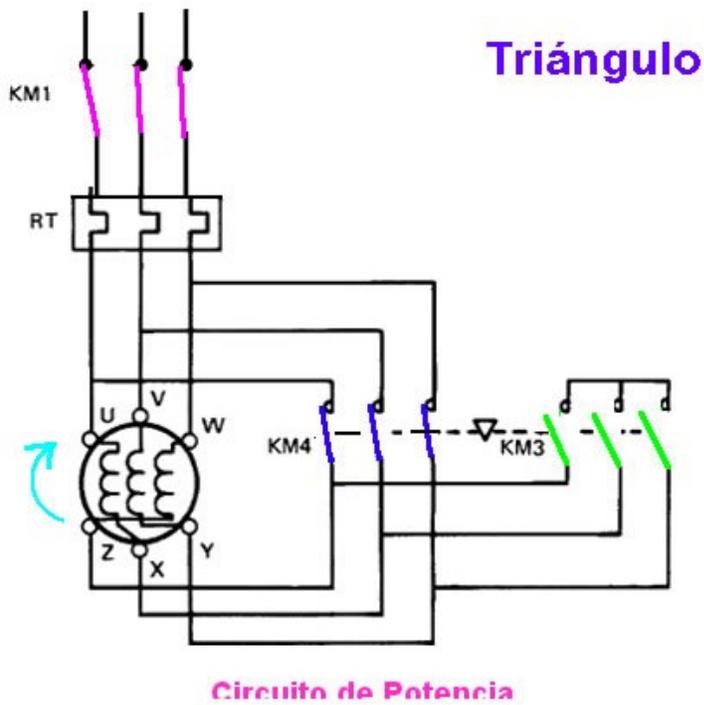
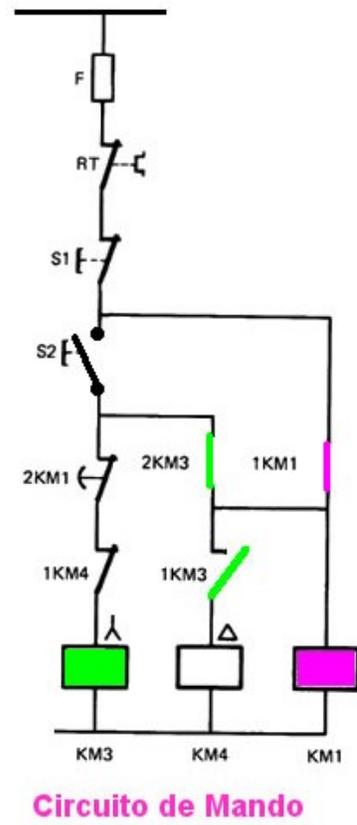
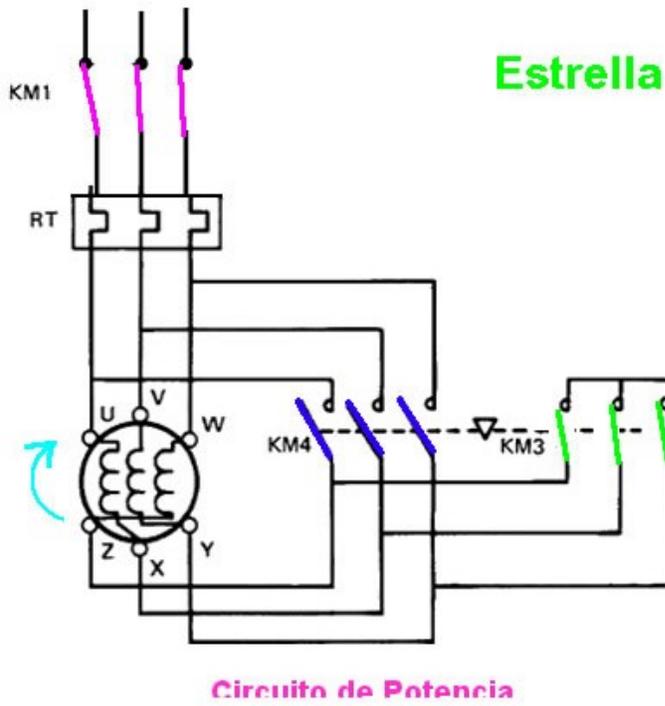


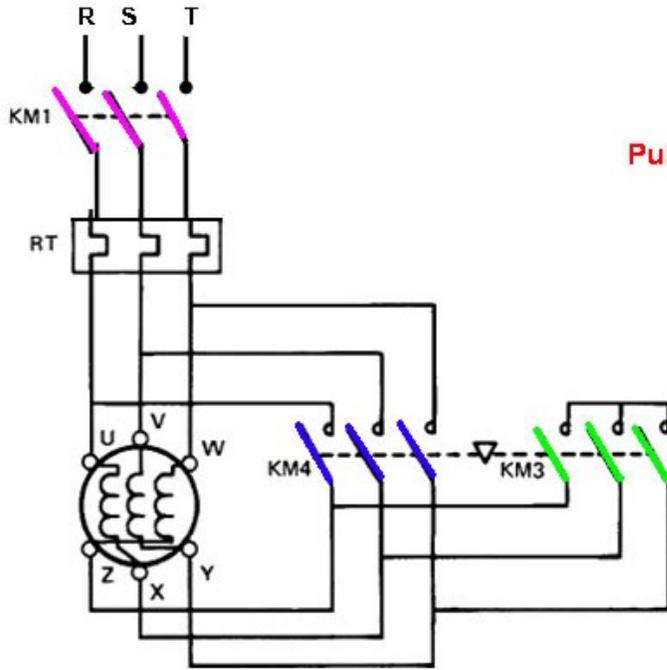
Circuito de Potencia

Pulsador de Marcha



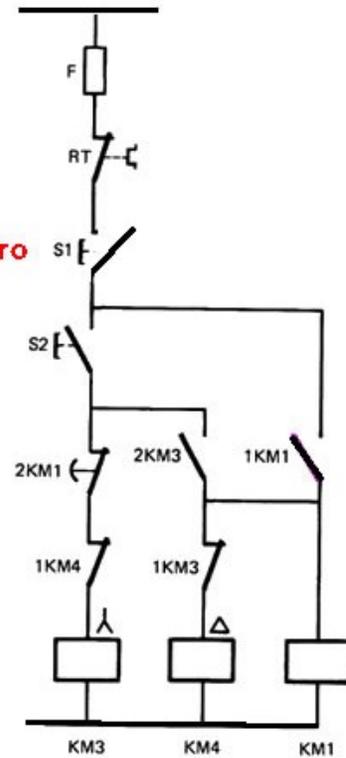
Circuito de Mando





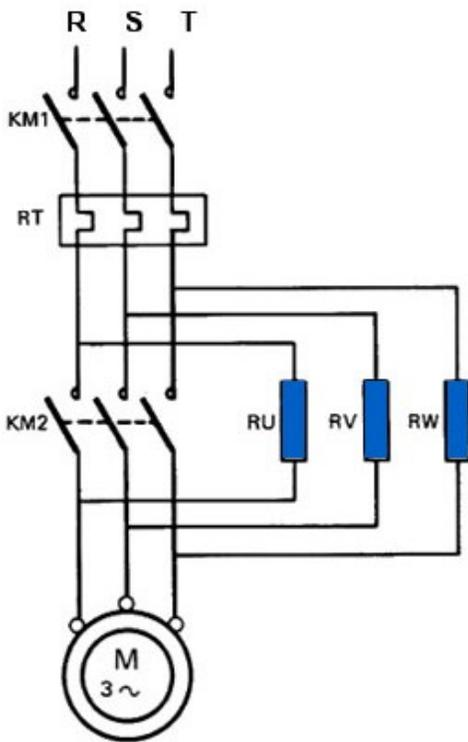
Circuito de Potencia

Pulsador de paro

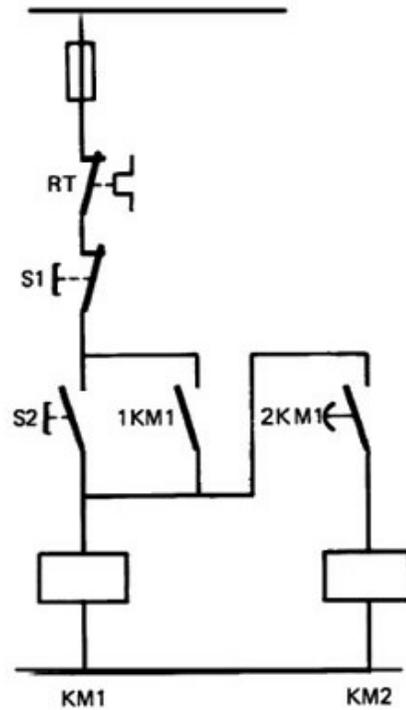


Circuito de Mando

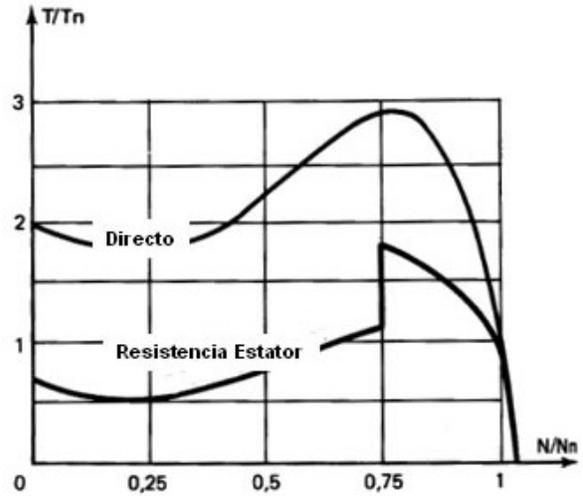
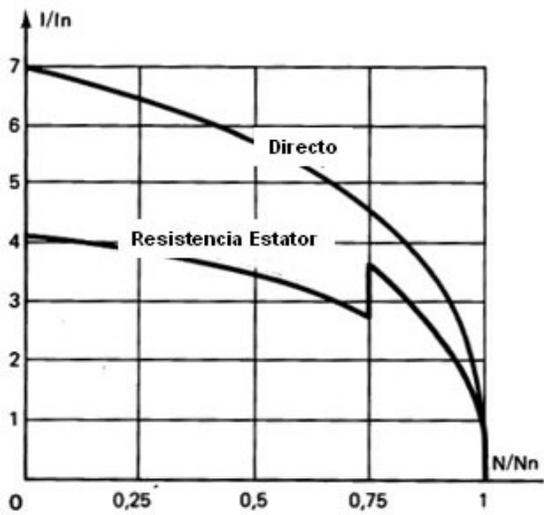
Arranque por resistencias estáticas



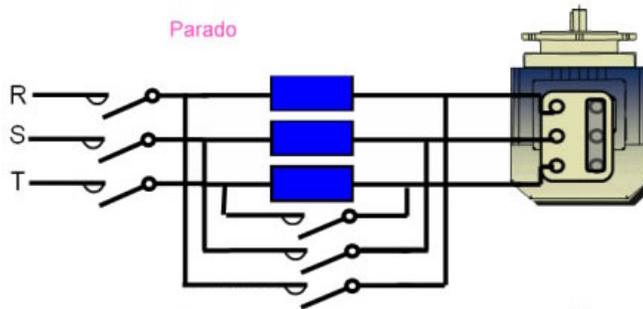
Circuito de Potencia



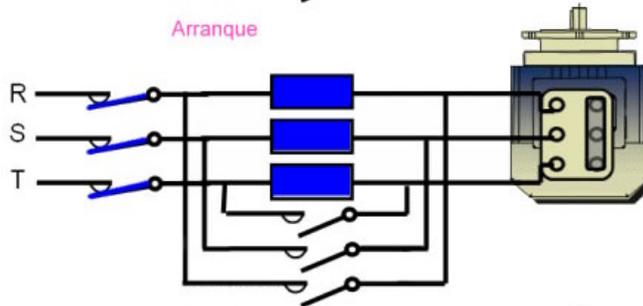
Circuito de Mando



Parado



Arranque



Marcha

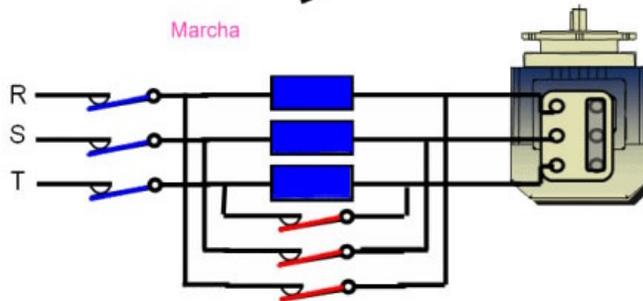
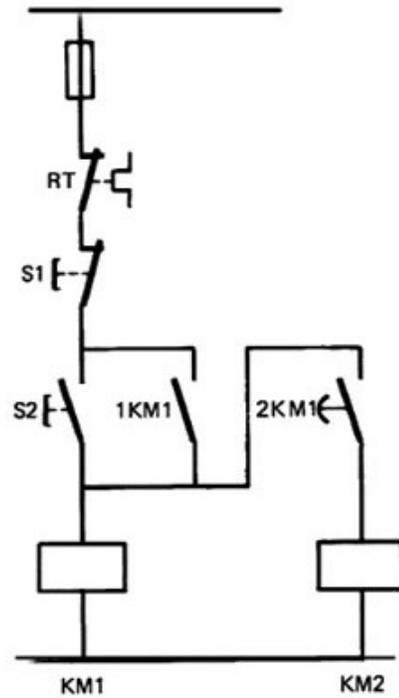
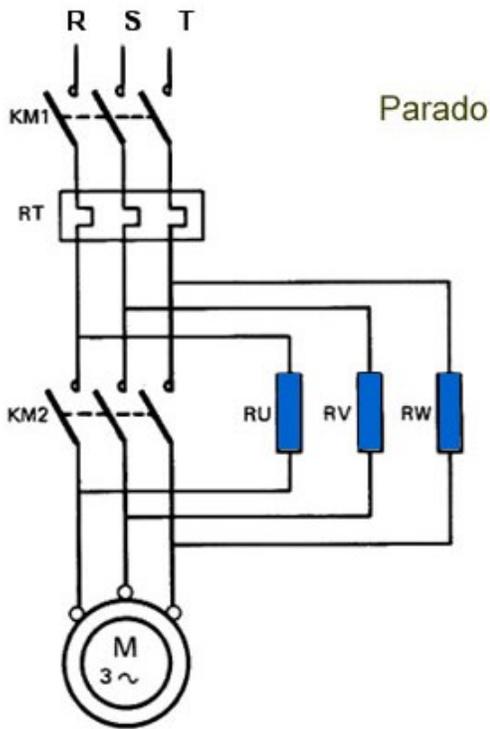
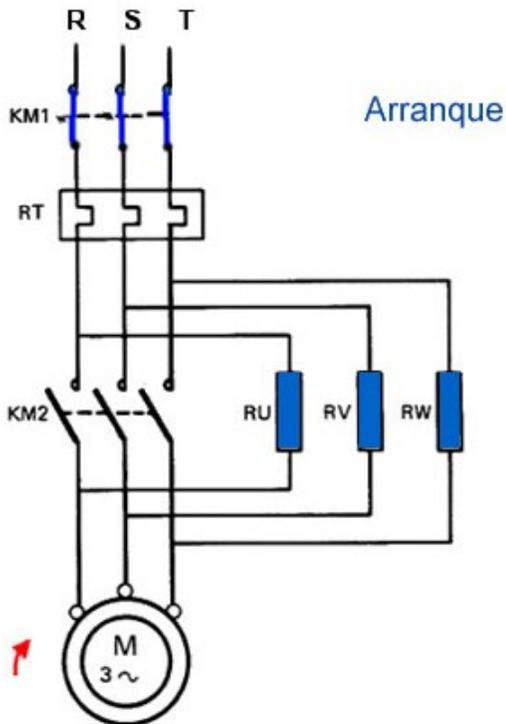


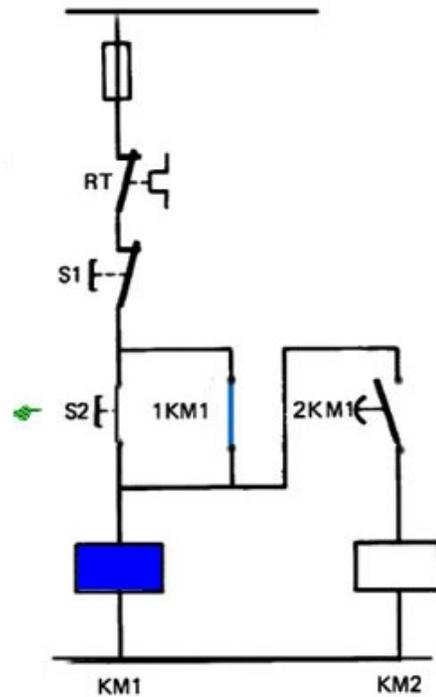
Diagrama de funcionamiento



Circuito de Potencia

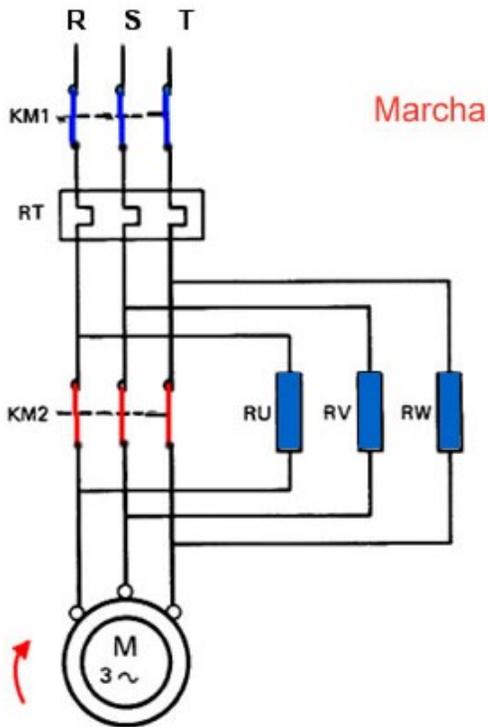


Circuito de Mando

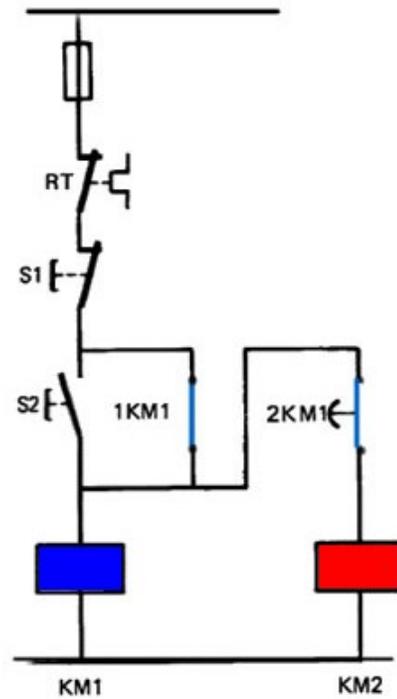


Circuito de Potencia

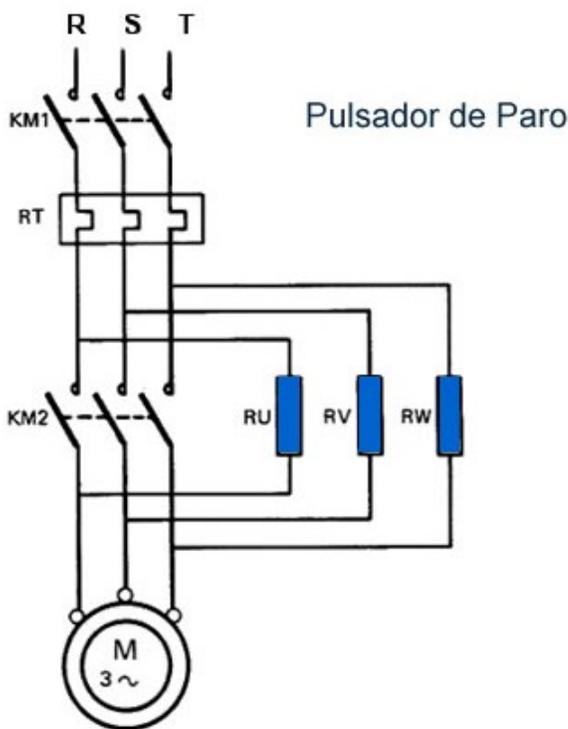
Circuito de Mando



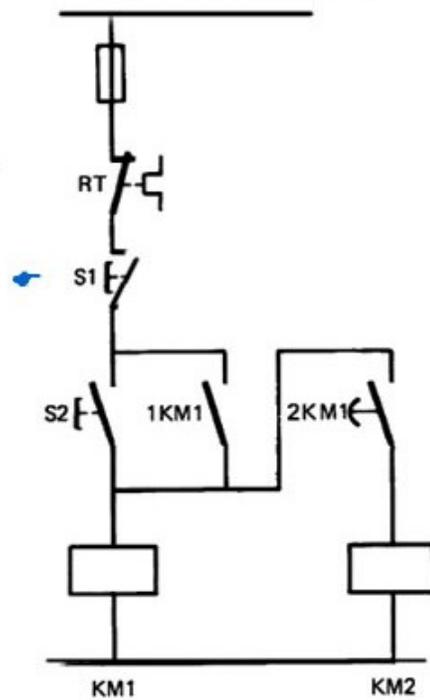
Circuito de Potencia



Circuito de Mando



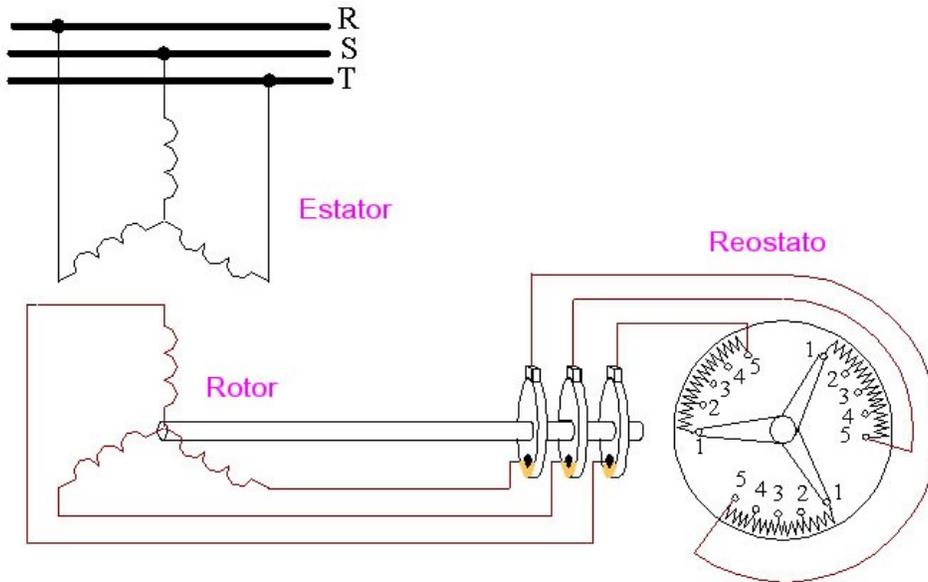
Circuito de Potencia



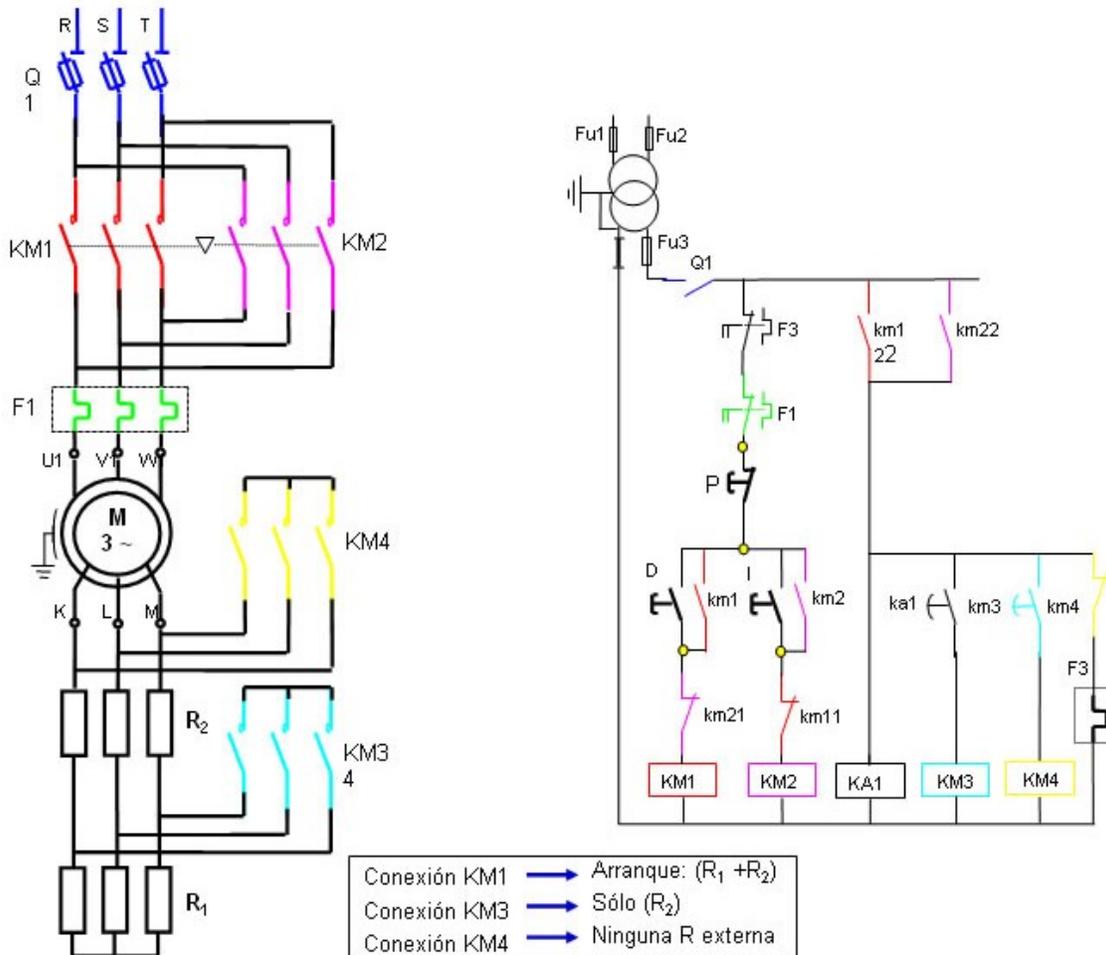
Circuito de Mando

Arranque por Resistencias Rotóricas

Arranque manual



Arranque con contactores (más inversión de giro)



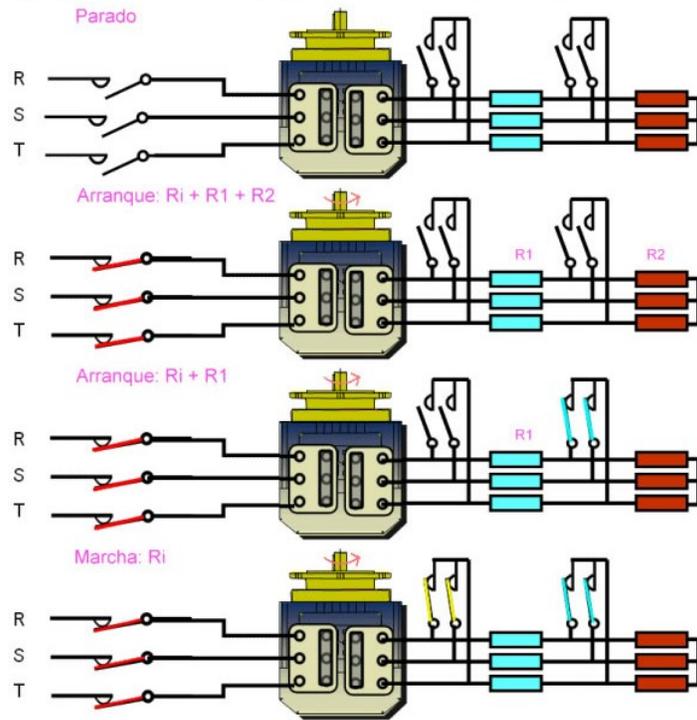
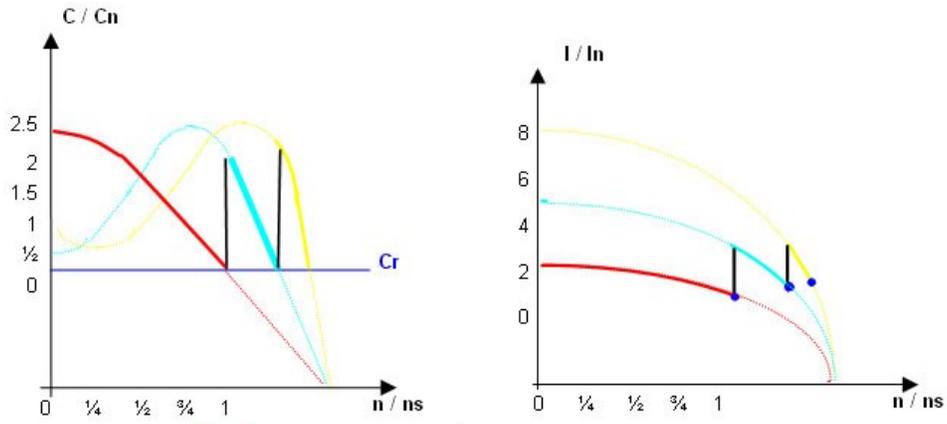
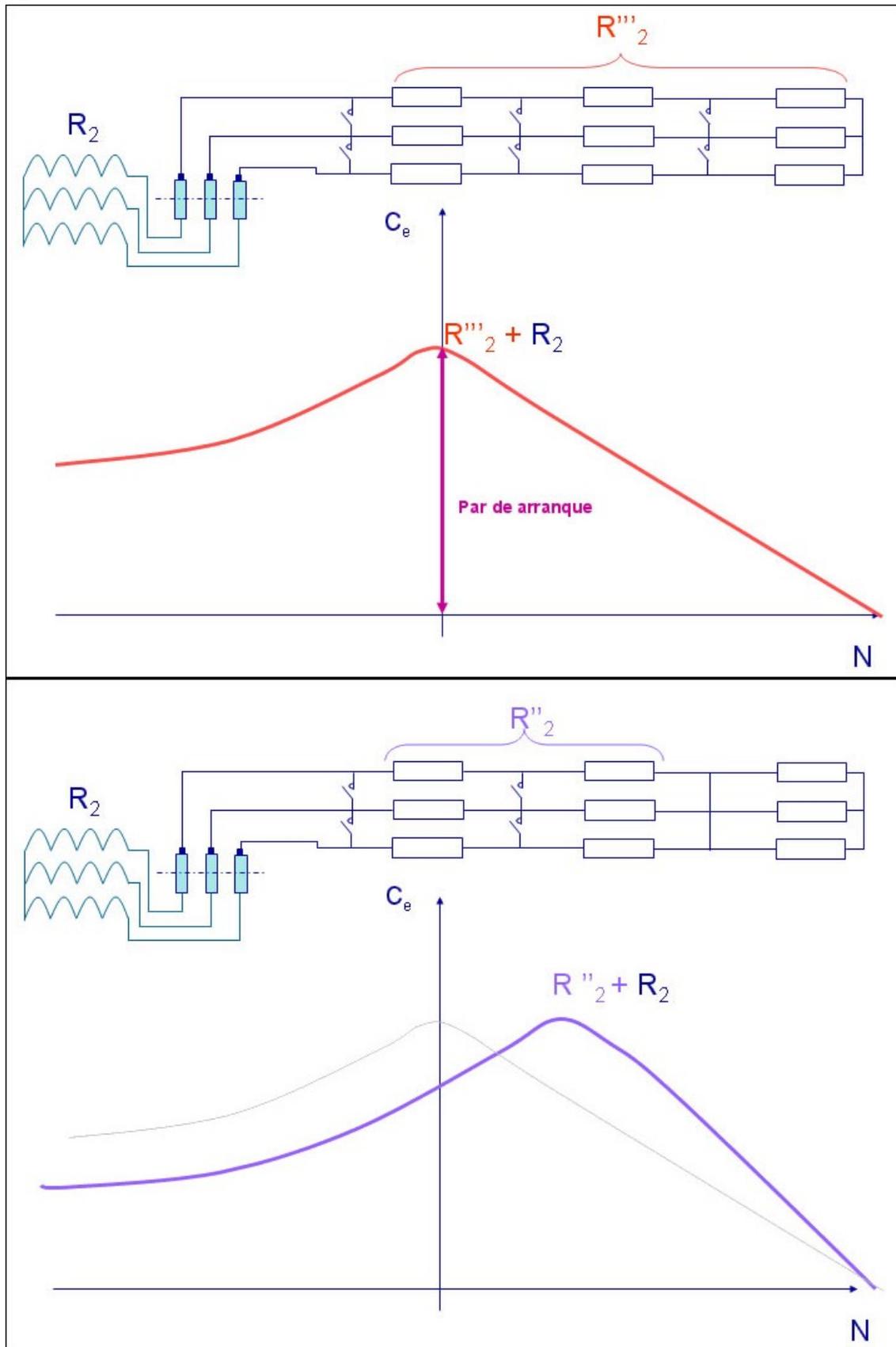
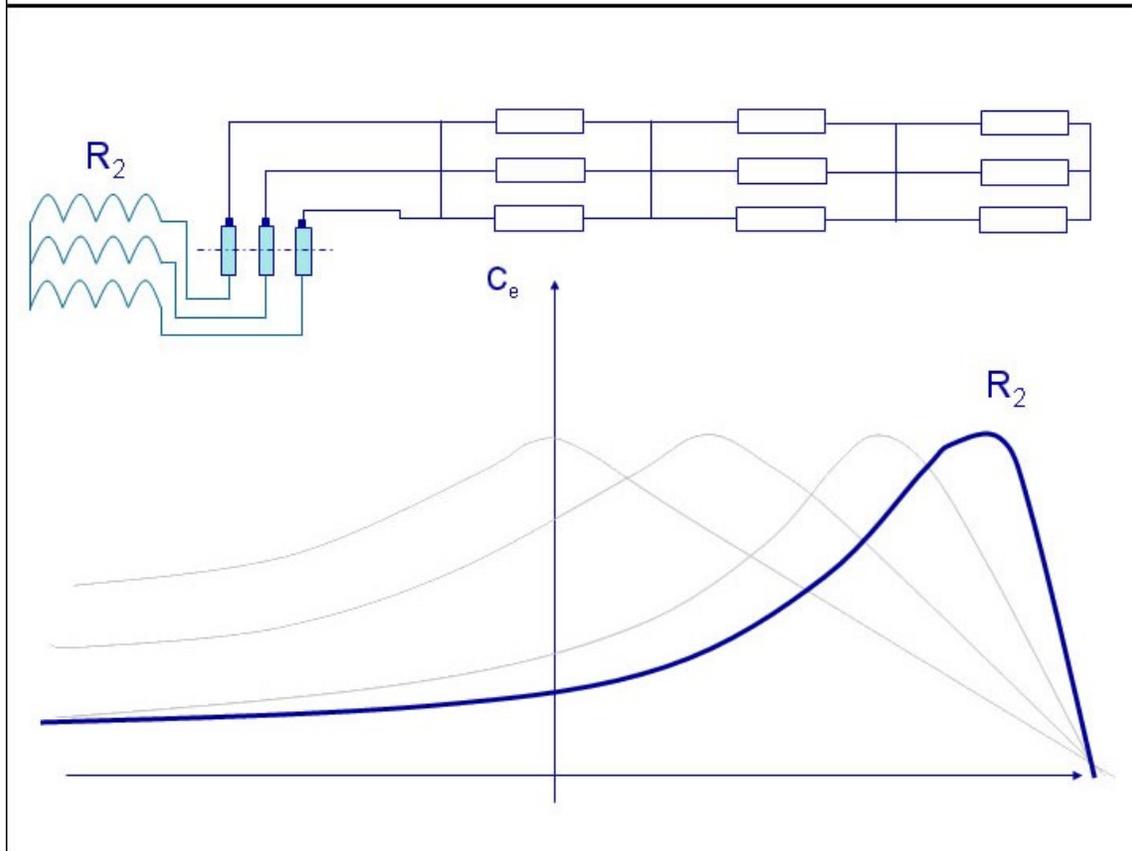
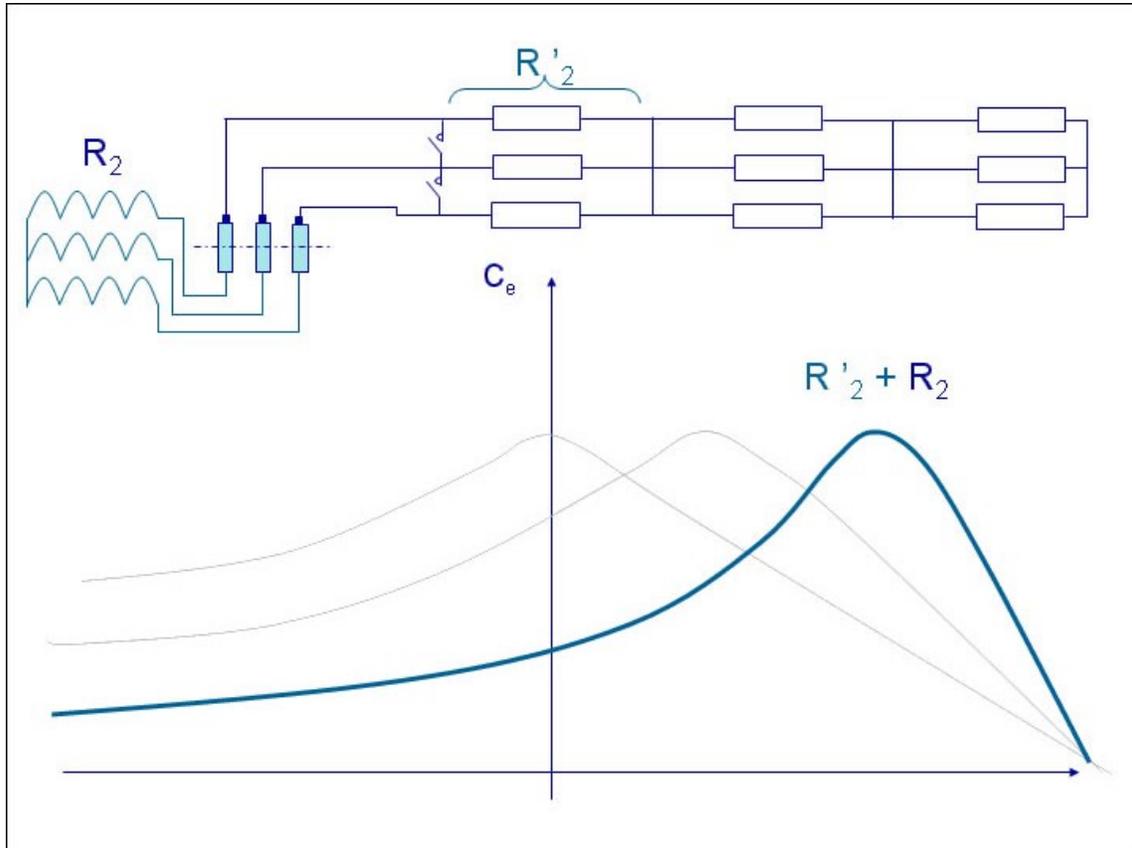


Diagrama de funcionamiento





Arranque por Autotransformador

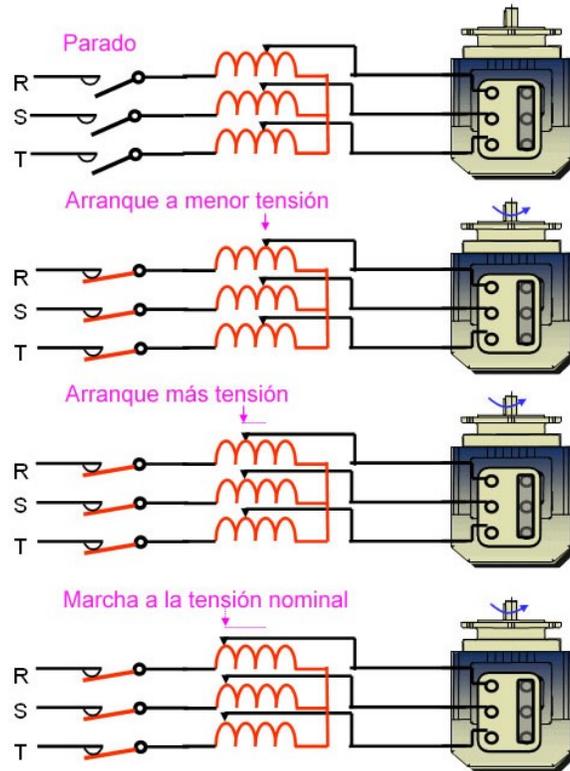
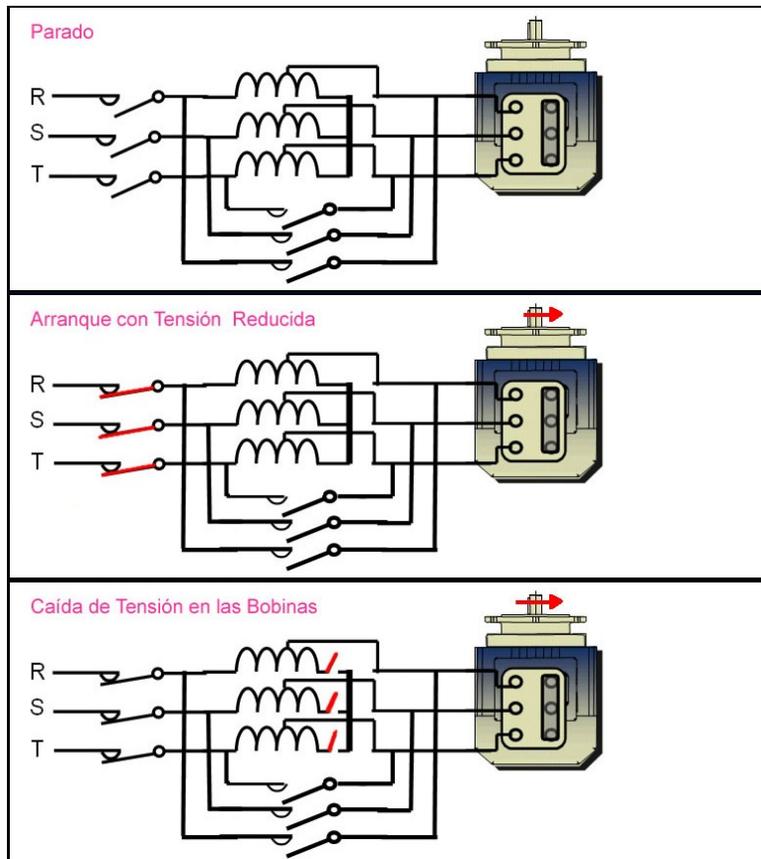
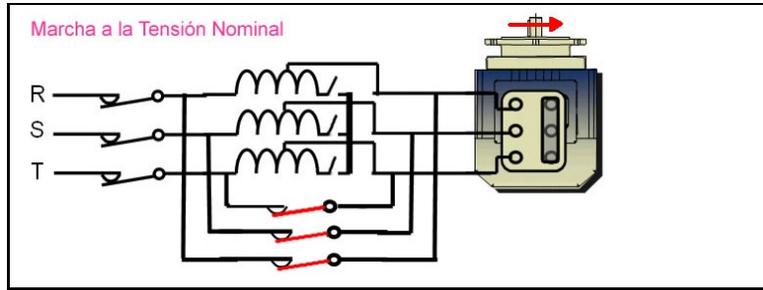


Diagrama de funcionamiento





Variación de Velocidad de los Motores Asíncronos

Se puede variar la velocidad del motor actuando sobre alguna de las variables de las que depende:

$$\left. \begin{aligned} s &= \frac{N_s - N_r}{N_s} \\ N_s &= \frac{f \cdot 60}{P} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{aligned} &\text{Velocidad de rotación} \\ N_r &= N_s (1 - s) = \frac{60 f}{P} (1 - s) \end{aligned}$$

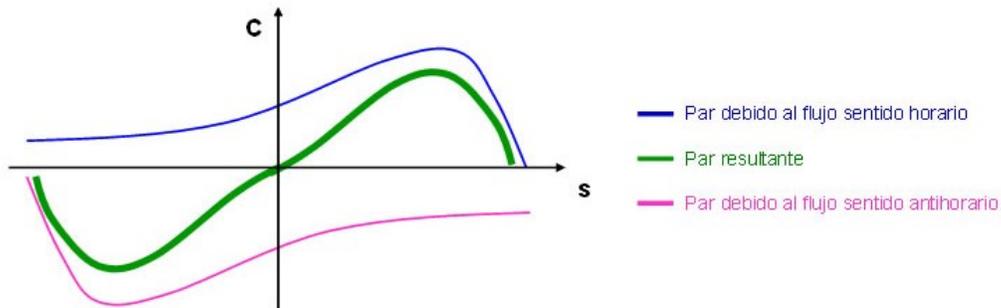
frecuencia → f deslizamiento → s
Pares de polos → P

Motor Asíncrono Monofásico

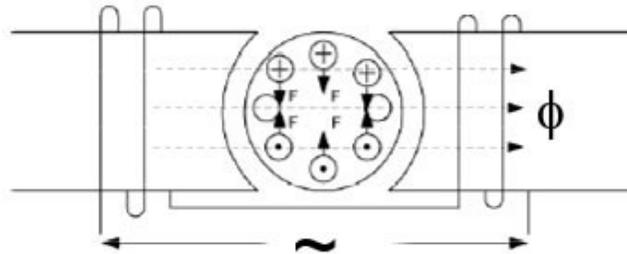
Para aplicaciones de muy baja potencia (de hasta 1 CV) se usan este tipo de motores de inducción. En ellos, el estator se alimenta con una única tensión, por lo que no es posible generar un campo magnético giratorio; consiguiéndose tan sólo, un campo pulsante, como ya hemos visto en los conceptos previos.

El arrollamiento del estator engendra dos conjuntos de polos ficticios que giran en sentido inverso a la velocidad angular ω / p (Teorema de Maurice-Leblanc). Llamemos polos concordantes a los que giran en el mismo sentido que el rotor, y polos inversos a los que giran en sentido inverso.

Por una parte los polos concordantes, y por otra los polos inversos, ejercen sobre el rotor pares opuestos. Sumando algebraicamente las ordenadas de las curvas de los pares $C(s)$ debidos a ambos polos, obtenemos la característica $C(s)$ del motor:

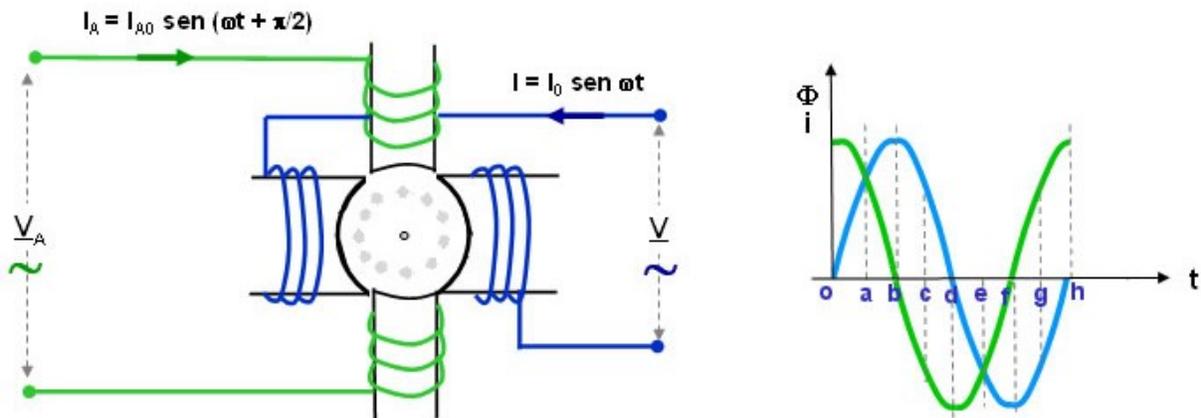


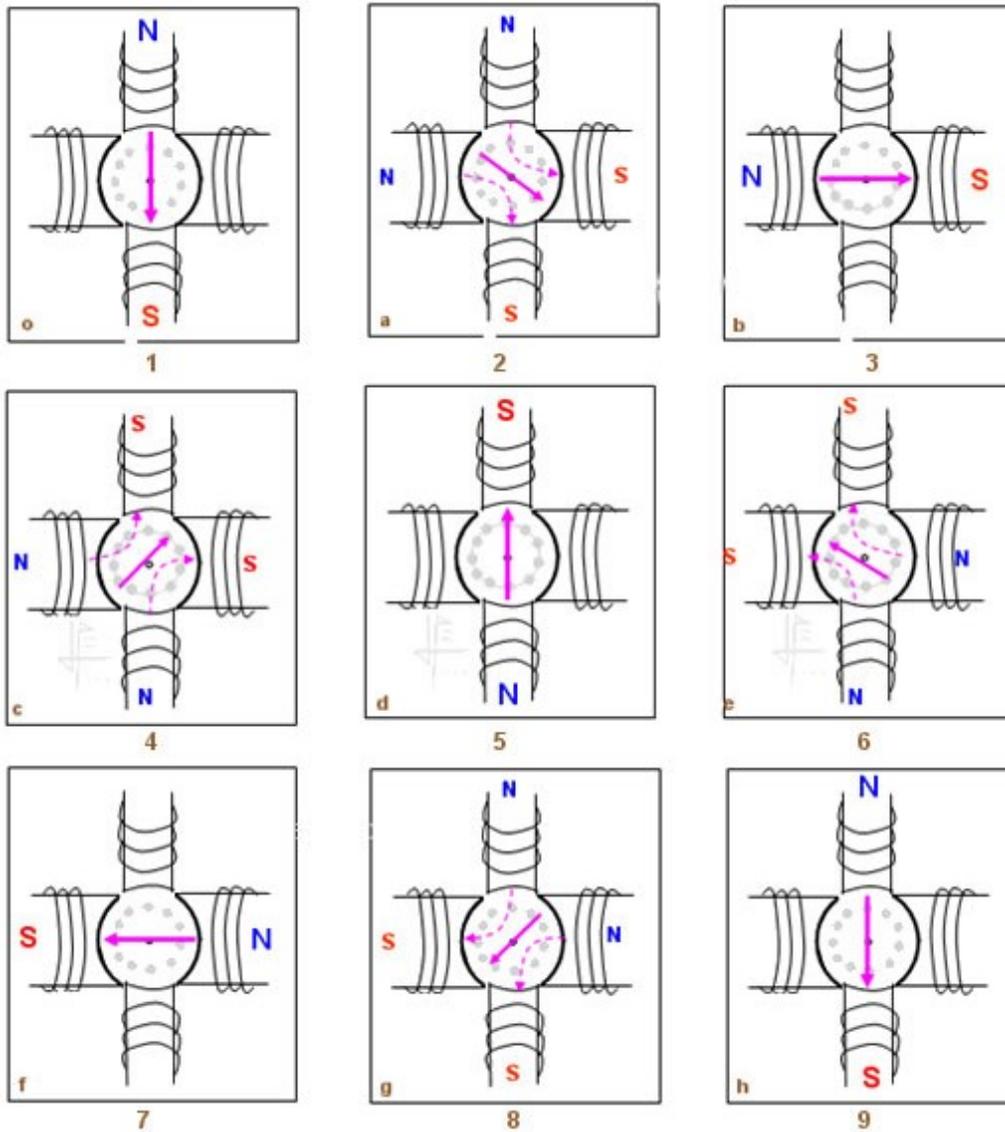
En el arranque, rotor parado, los dos pares son iguales pero de sentido contrario. Luego el motor monofásico no arranca por sí solo. Si por cualquier procedimiento se ayudara a girar el rotor en un sentido, aparecerá inmediatamente un par que si es superior al par resistente pondrá en funcionamiento la máquina.



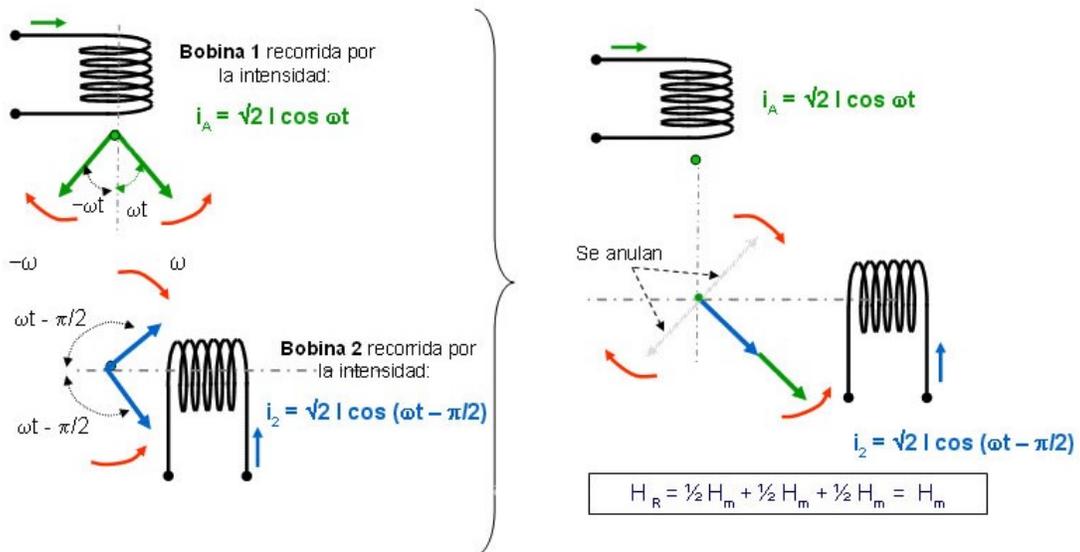
Motor Asíncrono Monofásico: Arranque

Para el arranque se crea un campo giratorio bifásico, aproximadamente, disponiendo dos devanados dispuestos formando un ángulo de 90° , y haciendo que las corrientes I_A e I que pasan por ellos estén desfasadas 90° .





La aplicación del Teorema de Maurice-Leblanc (ver conceptos preliminares), nos da como resultado un campo giratorio de intensidad constante H_R y pulsación ω :

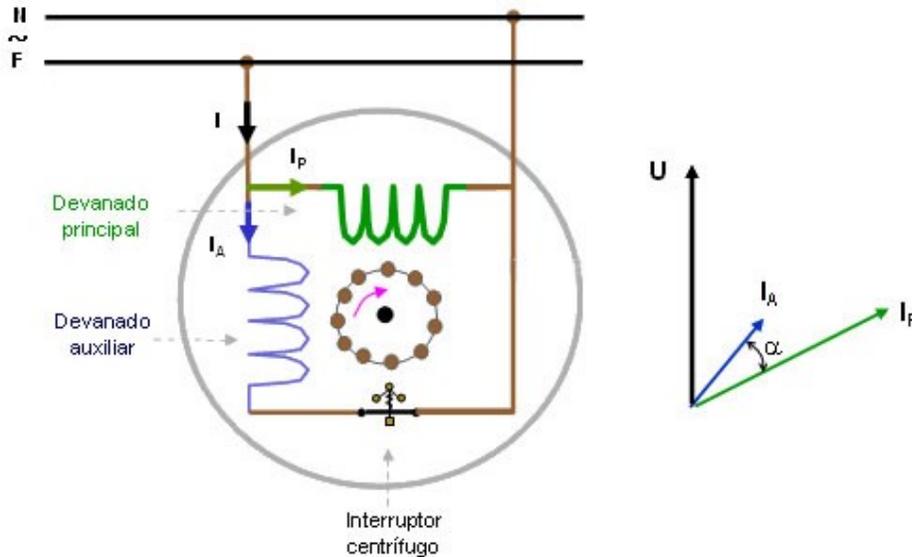


Para conseguir este campo, se utilizan dos recursos:

Método de Fase Partida.

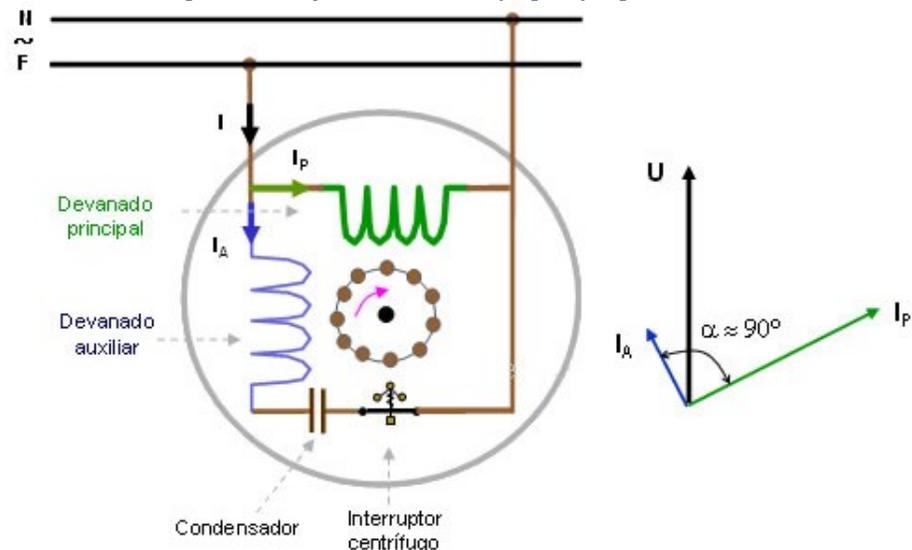
Se emplea un arrollamiento auxiliar, colocado en el estator, con un desplazamiento adecuado respecto al arrollamiento principal, con objeto de hacer en el arranque una especie de campo giratorio bifásico. Para conseguir que las corrientes que pasen por esos devanados estén desfasadas del orden de 90 grados eléctricos, se utilizan dos recursos:

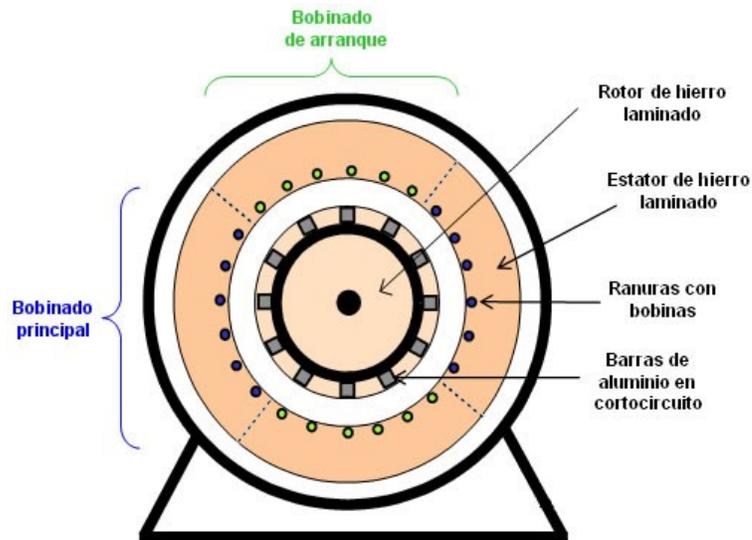
- a) En este motor se sitúan en el estator dos devanados desfasados 90° eléctricos en el espacio según la siguiente figura. El primer devanado, denominado principal cubre el $2/3$ de las ranuras y tiene gran reactancia y baja resistencia, mientras que el otro denominado auxiliar, cubre el resto del estator y tiene gran resistencia y baja reactancia, de tal forma que esta en serie con un interruptor centrífugo situado en el eje del motor.



El ángulo formado por U e I_P es superior al que existe entre U e I_A , en virtud de la mayor reactancia del devanado principal. En la práctica el ángulo α que forman las corrientes es próximo a los 30° , y como los arrollamientos están desfasados 90° en el espacio, resulta un campo giratorio de naturaleza elíptica debido a que los módulos de I_A e I_P no son iguales y forman entre sí 90° , este campo giratorio produce el despegue del motor, y cuando la velocidad del rotor alcanza un valor del orden del 70% de nominal, el interruptor centrífugo desconecta el devanado auxiliar que al estar realizado con un hilo delgado no es capaz de soportar un funcionamiento continuo

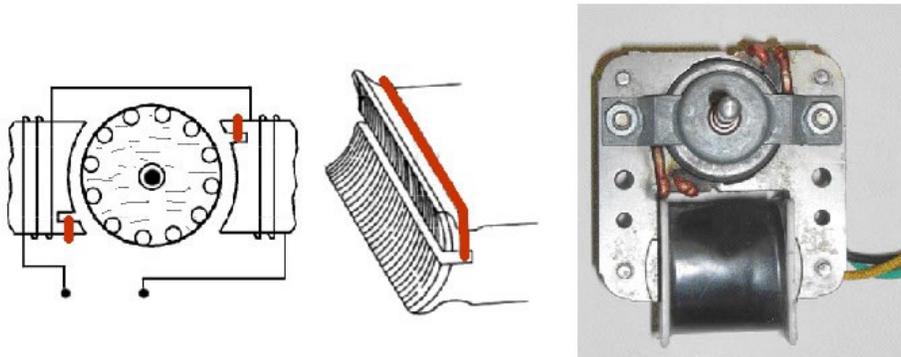
- b) Añadir al devanado secundario un condensador en serie, con ello se logra que la corriente que pase por la rama principal y por esta última queden desfasados casi 90° . Una vez arrancado el motor se puede desconectar el condensador (con un interruptor centrífugo montado en el eje, por ejemplo).



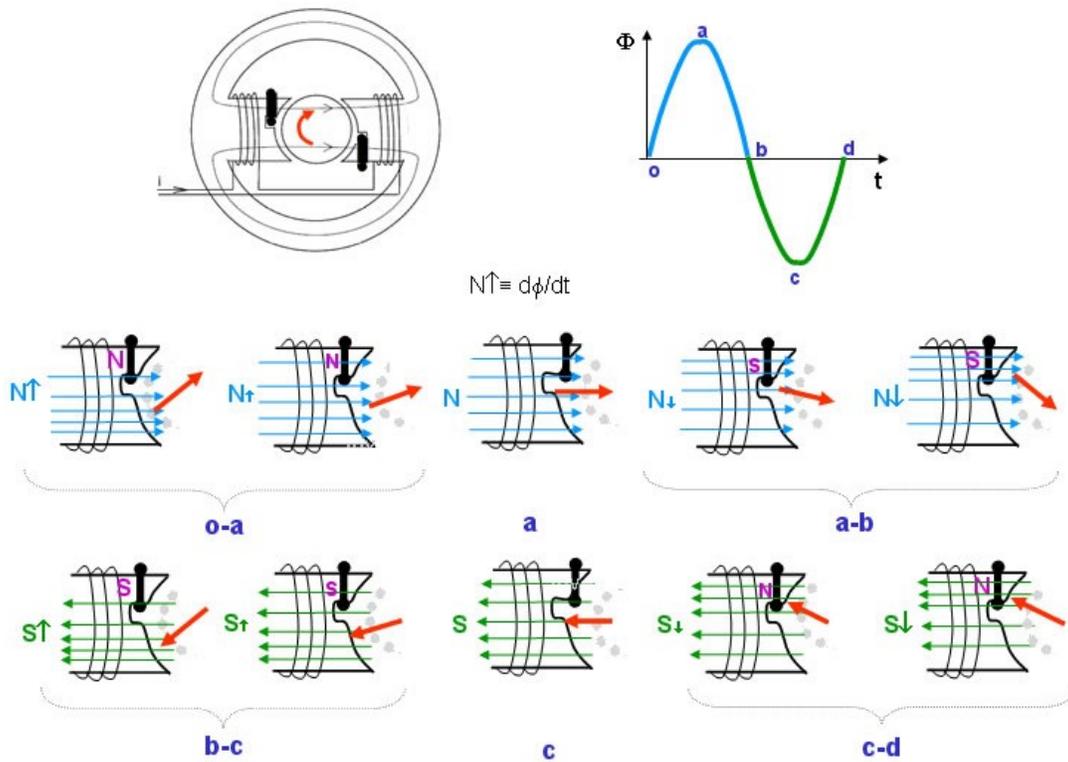


Método de Espira de Sombra

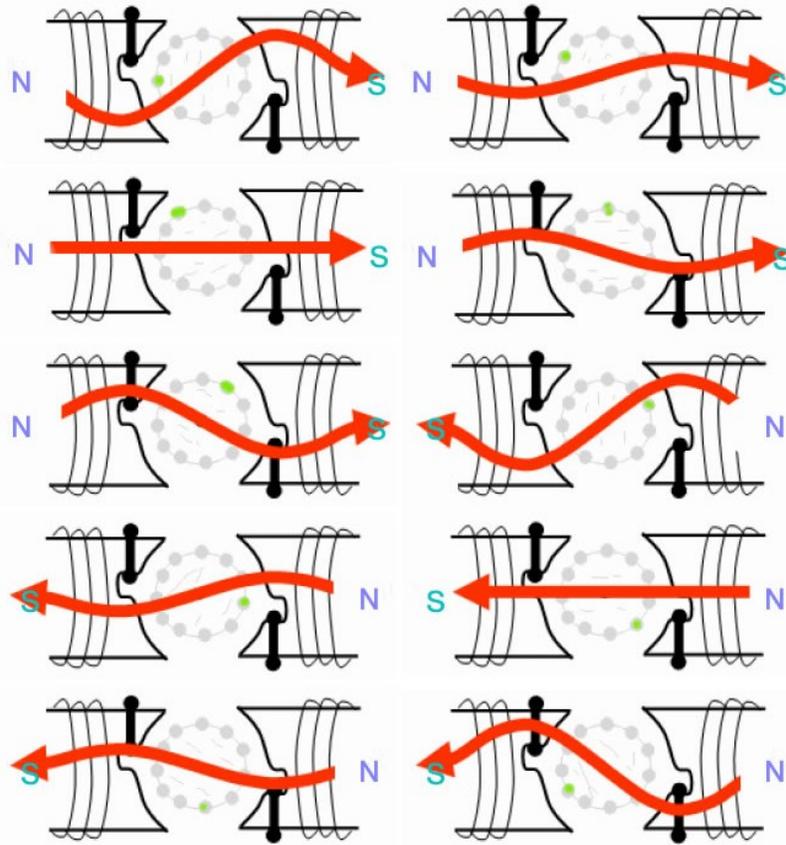
El método de la espira de sombra, se usa para los motores muy pequeños. Consiste en utilizar un estator con polos salientes. Cada polo saliente se divide en dos partes, y en una de ellas se coloca una bobina conductora que lo abraza. Por esas bobinas, cuando el flujo que pasa por ella varíe, aparecerán sendas corrientes que crearán otros tantos campos magnéticos, debilitando al flujo que los crearon oponiéndose a ellos. De esta forma se consigue debilitar el campo magnético en los polos sombreados cuando el campo está creciendo, y aguantar la magnitud del campo cuando éste está disminuyendo. El efecto total es que se tiene dos campos magnéticos pulsantes; no están desplazados en el espacio 90 grados (como mucho 45 grados), pero su efecto conjunto es la creación de un débil campo giratorio que posibilite el arranque del motor.



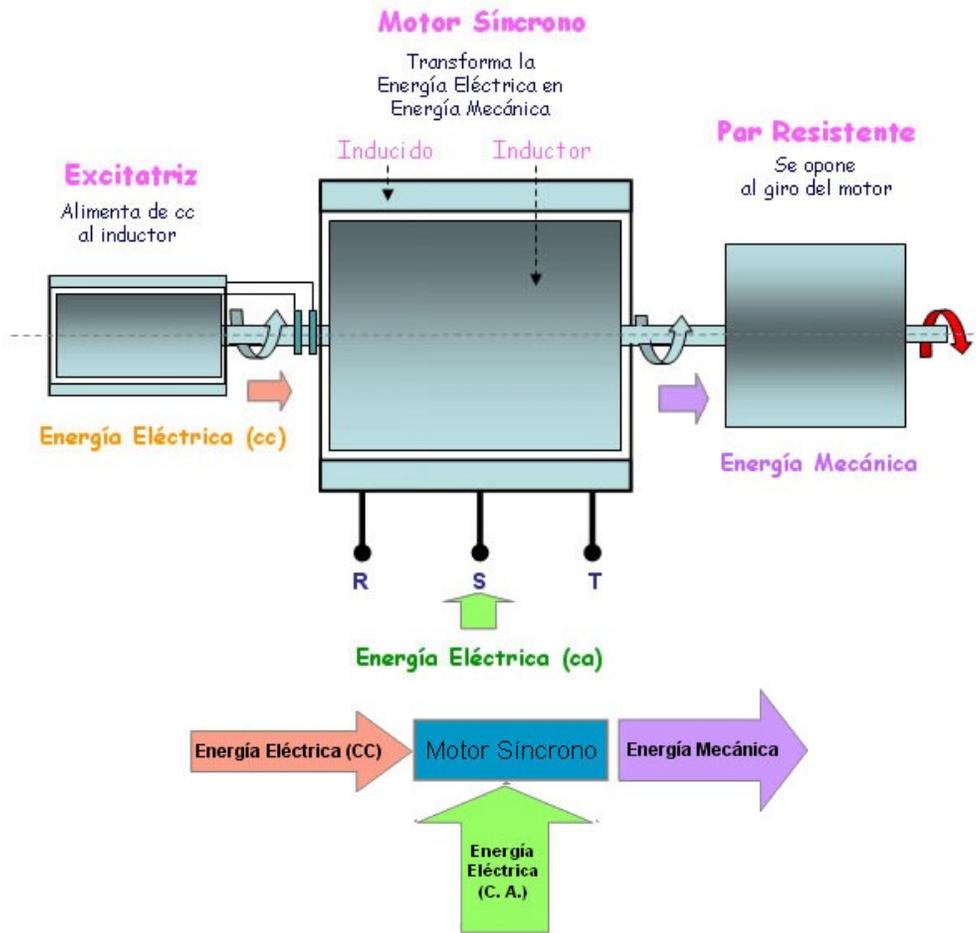
Veamos las diferentes fases del flujo resultante (para conocer la polaridad de las corrientes inducidas en la espira de sombra, recuerda la Ley de Lenz):



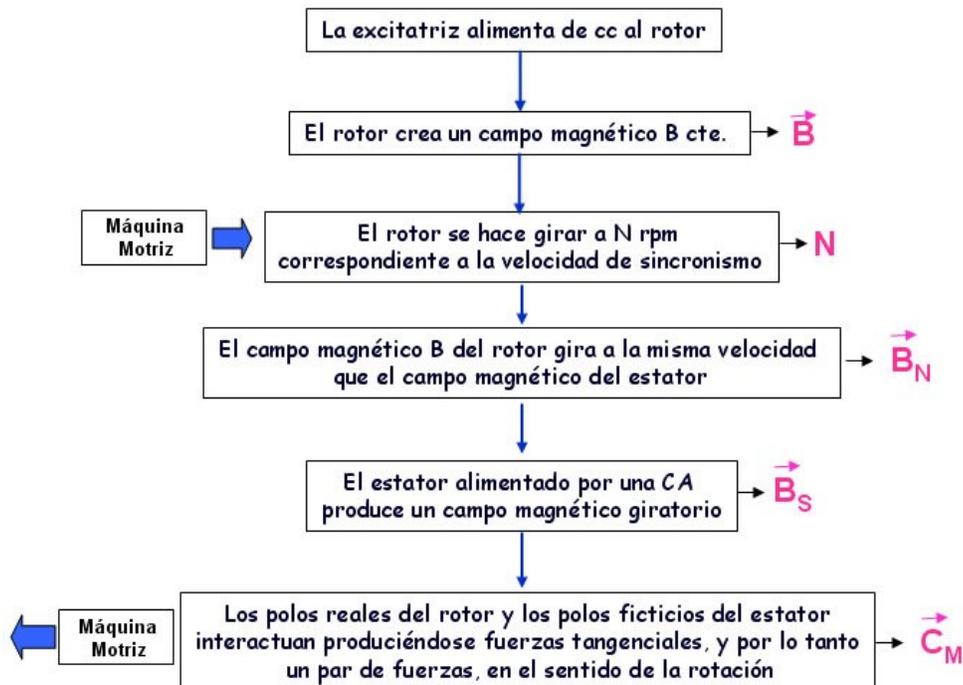
Se crea pues, un campo magnético giratorio tal como se muestra en la siguiente figura:



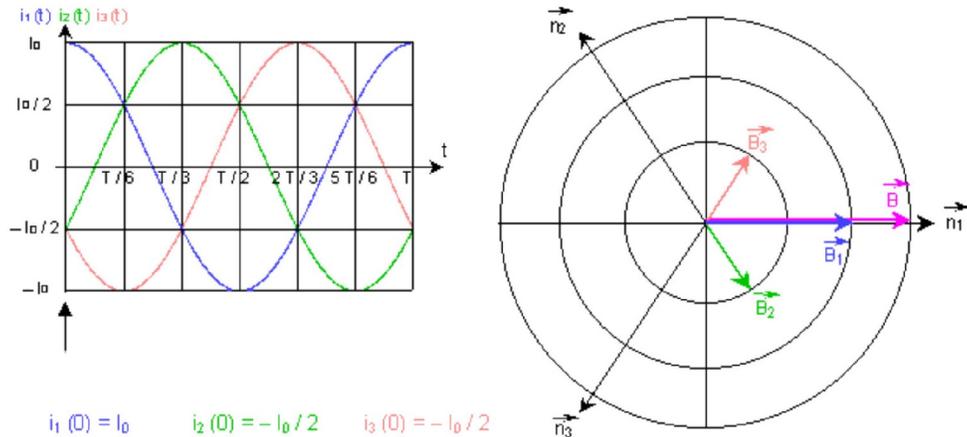
El Motor Síncrono



Principio de funcionamiento



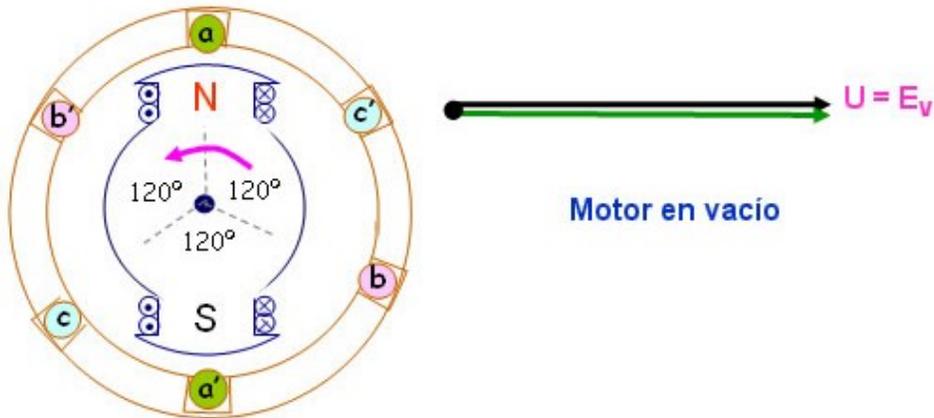
Campo Magnético del Estator



Gráficos del Motor en Vacío y en Carga

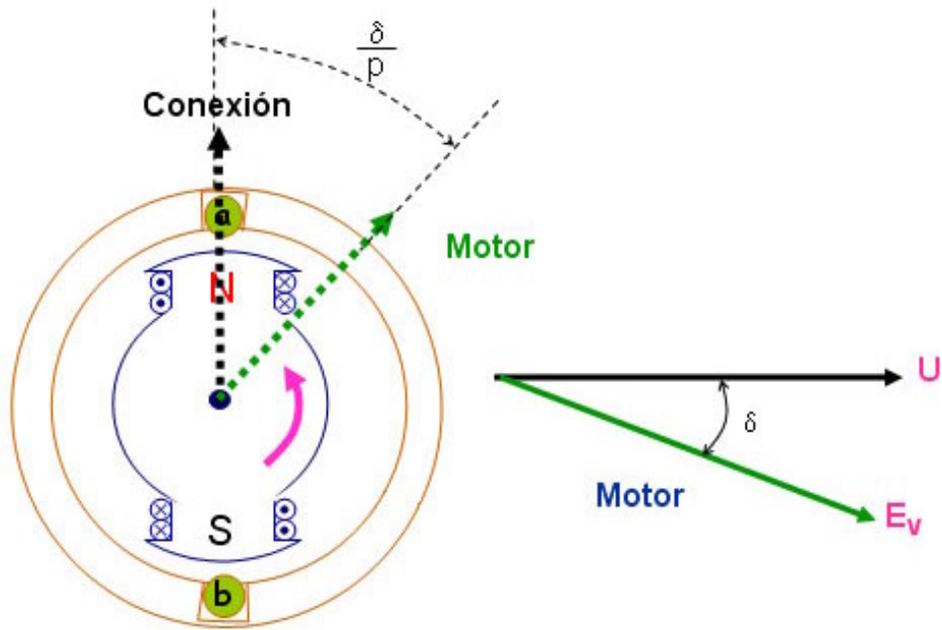
Motor en vacío

Si a un alternador trifásico se le retira la máquina motriz y se alimenta su estator mediante un sistema trifásico de C.A. se genera en el estator un campo magnético giratorio, cuya velocidad sabemos que es $N = 60.f / p$. Si en estas circunstancias, con el rotor parado se alimenta el devanado del mismo con C.C. se produce un campo magnético rotórico fijo, delante del cual pasa el campo magnético del estator. Los polos del rotor están sometidos ahora a atracciones y repulsiones, en breves periodos de tiempo, por parte de los polos del estator, pero el rotor no consigue girar, a lo sumo vibrará. Pero si llevamos el rotor a la velocidad de sincronismo, haciéndole girar mediante un motor auxiliar, al enfrentarse polos de signo opuestos se establece un enganche magnético que les obliga a seguir girando juntos, pudiéndose retirar el motor auxiliar.

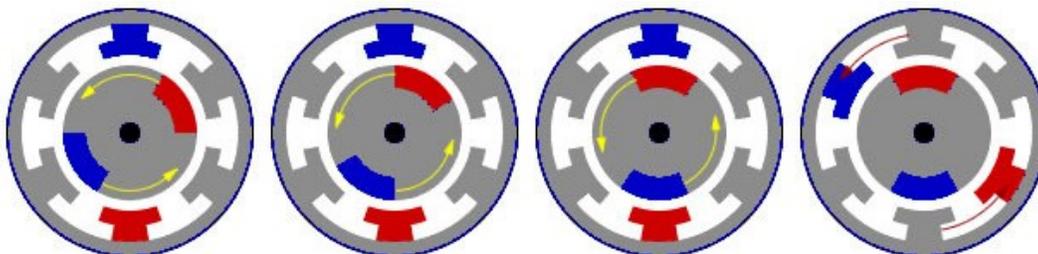
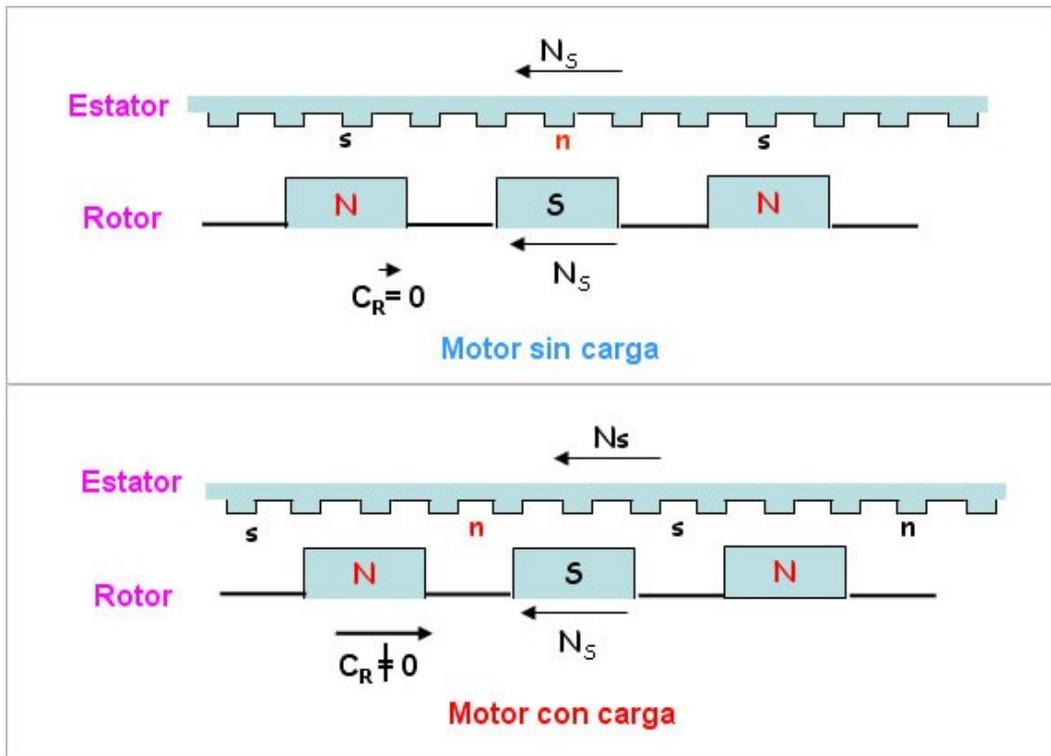


Motor en carga

Una vez que se produzca la conexión del motor a la red, se produce un desplazamiento (d/p) del eje de los polos del rotor respecto de los polos ficticios del estator, que aumenta con la carga del motor, y tal que si este desplazamiento supera un límite el motor se para (ver más debajo "estabilidad del motor").

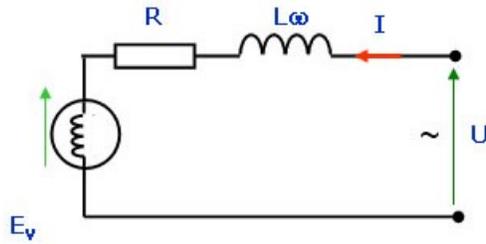


Resumen



Círculo equivalente. Diagrama de Blondel

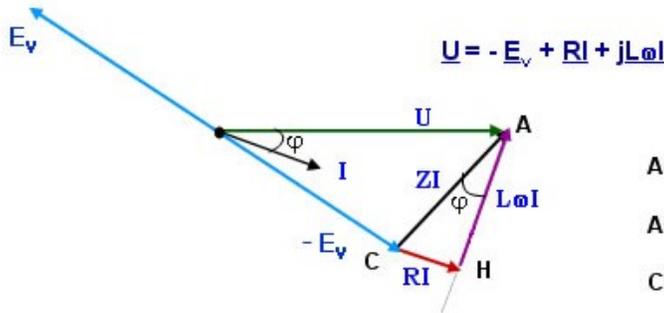
Al conectar el motor síncrono a la red, el estator se comporta como el primario de un transformador



- R = resistencia inducido por fase
- $L\omega$ = caída inductiva
- E_v = tensión autoinducida por fase
- U = tensión de fase de la línea

Diagrama de Blondel

El diagrama de Blondel supone que L es cte. para todos los regímenes de funcionamiento y el alternador es de polos lisos.



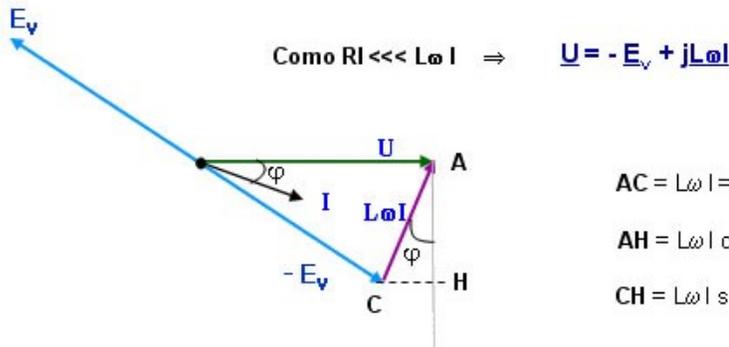
$$\underline{U} = -\underline{E}_v + \underline{RI} + j\underline{L\omega I}$$

$$AC = ZI = KI$$

$$AH = ZI \cos \varphi = \frac{U}{Z} ZI \cos \varphi = KP = K' C$$

$$CH = L\omega I \sin \varphi = \frac{U}{L\omega} L\omega I \sin \varphi = KQ$$

Diagrama simplificado de Blondel



Como $RI \ll L\omega I \Rightarrow \underline{U} = -\underline{E}_v + j\underline{L\omega I}$

$$AC = L\omega I = KI$$

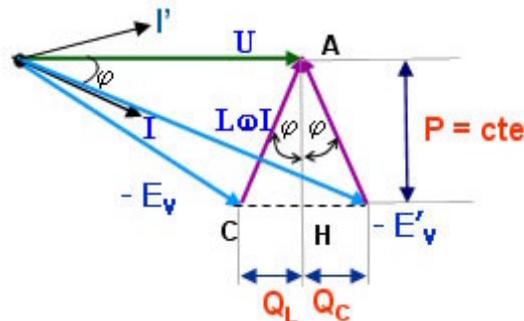
$$AH = L\omega I \cos \varphi = \frac{U}{L\omega} L\omega I \cos \varphi = KP = k' C$$

$$CH = L\omega I \sin \varphi = \frac{U}{L\omega} L\omega I \sin \varphi = KQ$$

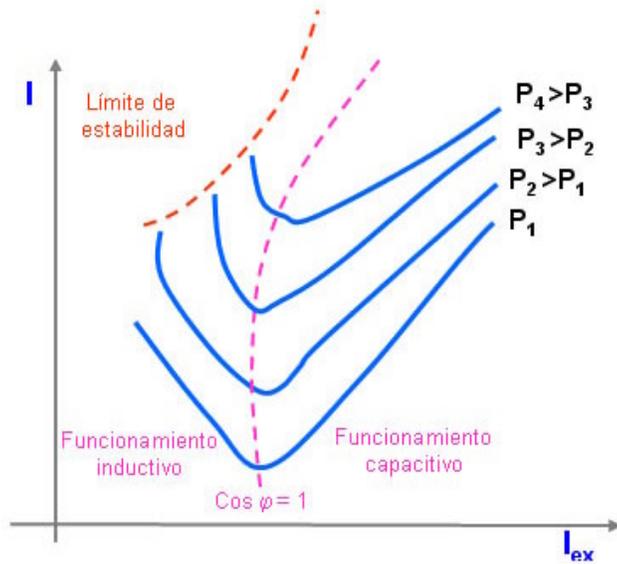
Curvas en V (de Mordey)

El motor síncrono para una misma potencia P, tal como vemos en la gráfica, puede absorber una corriente variable I según su excitación.

- El motor subexcitado absorbe potencia reactiva (Q_L)
- El motor sobreexcitado suministra potencia reactiva (Q_C)



Esta propiedad se traduce gráficamente en una serie de **curvas en V de Mordey**. Cada una de ellas da para una *potencia útil constante*, la variación de la corriente absorbida I en función de la corriente de excitación I_{ex} .



Potencia y par del motor

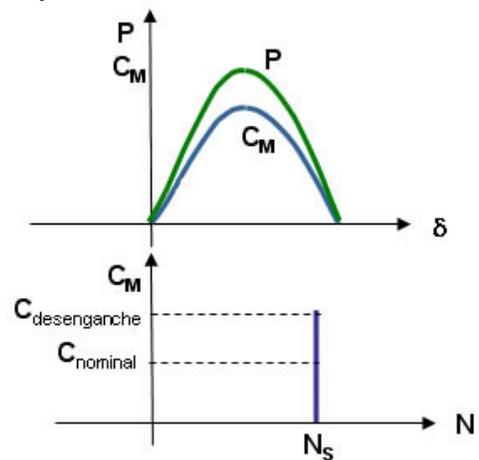
Hemos visto que la potencia de una máquina síncrona, **por fase**, viene dada por la fórmula:

$$P = \frac{E_v \cdot U \cdot \text{sen } \delta}{X_s} = P_{\text{max}} \text{sen } \delta$$

Y como:

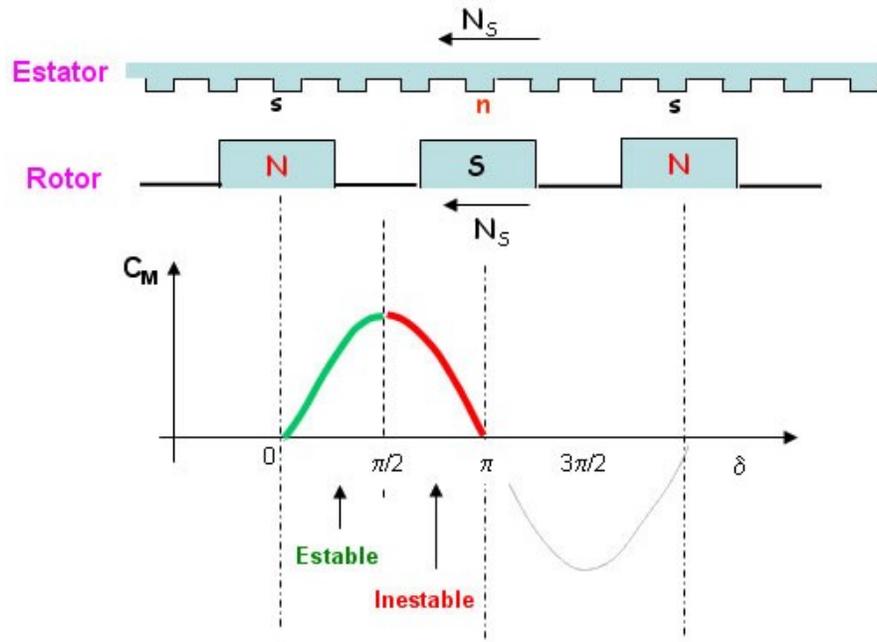
$$P = C_M \cdot \omega \Rightarrow C_M = P / \omega \Rightarrow C_M = \frac{60 \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot N_s}$$

Por otra parte, el par no es función de la velocidad, pues esta permanece cte., velocidad de sincronismo, independientemente de la carga, a no ser que se supere el máximo par posible en el motor y entonces se sale del sincronismo y se para.



d_{rotor}	[m]	0,2	0,4	0,8	1,2
p	[-]	2	2	3	4
n_s	[rpm /min]	1500	1500	1000	750
T_e	[Nm]	203	1623	9200	25000
P_{as}	[kW]	31,3	250	945	1950
η	[-]	0,858	0,915	0,941	0,949

Estabilidad del motor



Hemos visto que en una máquina síncrona la curva del par tiene forma sinusoidal. Para la estabilidad del motor se requiere que el desplazamiento polar sea inferior a $\pi/2$ (ángulo eléctrico). En este caso una desaceleración del motor, desplazamiento de los polos reales hacia atrás, lleva consigo un aumento del par motor, cosa que no se produce más allá del ángulo $\pi/2$.