



UNIVERSIDADE
DE VIGO

MÁQUINAS ASÍNCRONAS

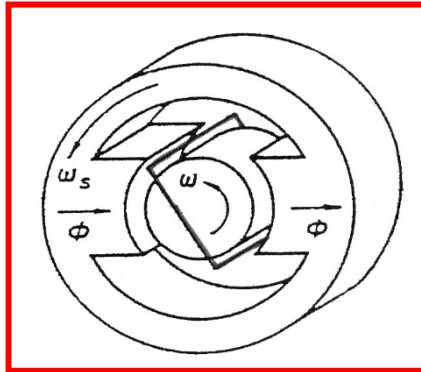
Funcionamiento y aplicaciones de las máquinas
asíncronas

Manuel Pérez Donsión

Departamento de Ingeniería Eléctrica

Universidad de Vigo

Principio de funcionamiento de las máquinas asíncronas



Si se hace girar el estator con una velocidad n_s , supuesto inicialmente el rotor en reposo, en la espira en cortocircuito se induce una f.e.m. debida a la variación del flujo abarcado por la misma:

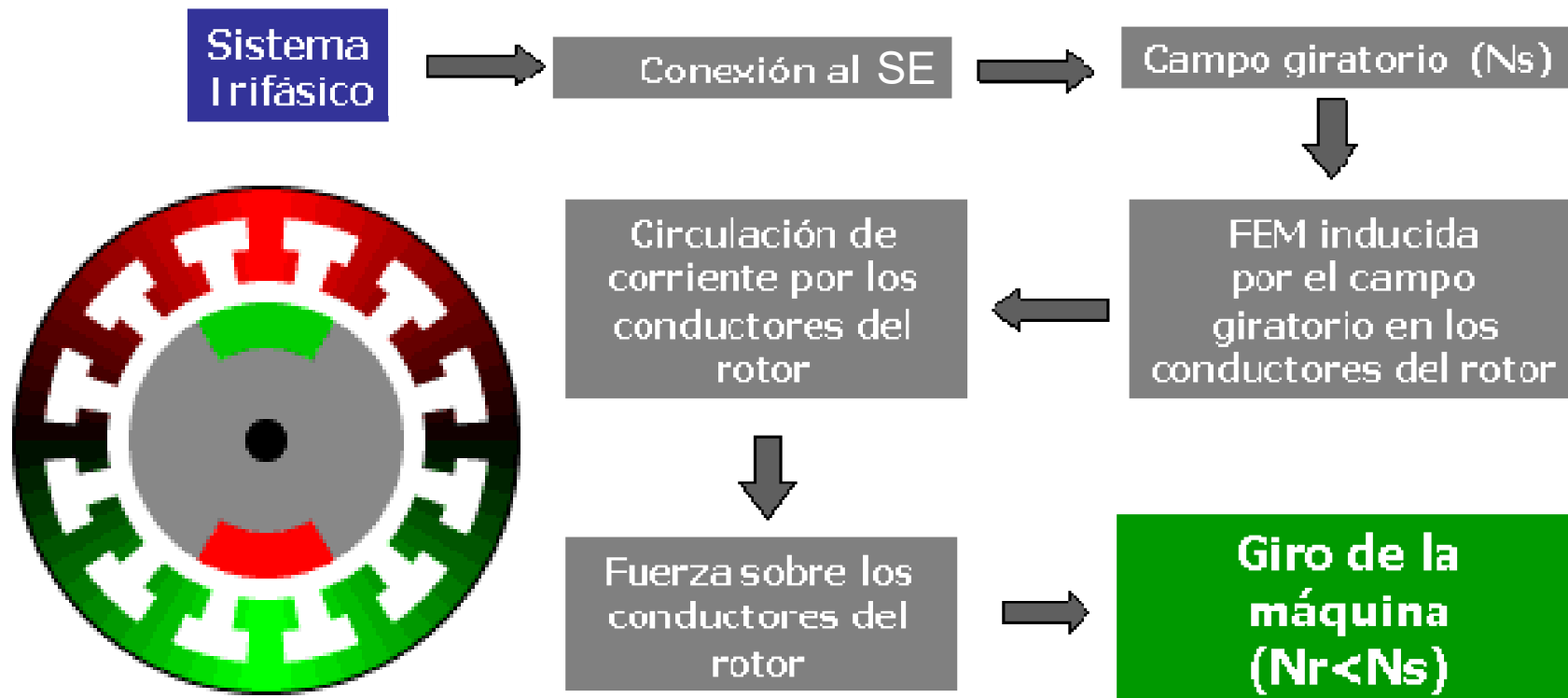
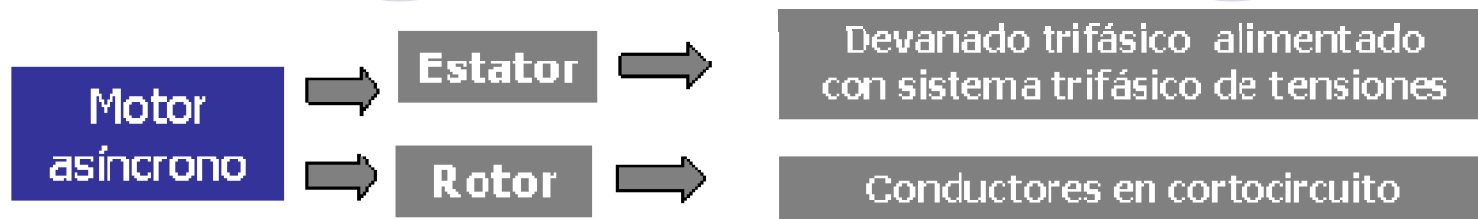
$$e = \frac{-d\phi}{dt}$$

- ➡ Esta f.e.m. hará circular una corriente i , por la espira. Dicha corriente, según la **Ecuación de Laplace**, genera una fuerza tangencial al rotor de valor:

$$F = B \cdot L \cdot i$$

- ➡ El par generado por esta fuerza es el causante de que se mueva la espira. ²

Principio de funcionamiento del motor asíncrono



Principio de Funcionamiento del Motor Asíncrono

Campo magnético giratorio en el estator $N_s = \frac{f \cdot 2\pi}{P}$

El campo magnético induce f. e. m. en el rotor

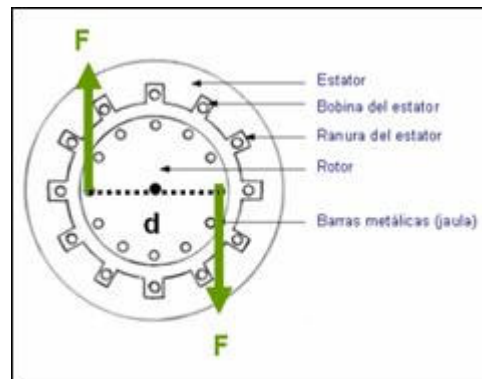
Circulan corrientes por el rotor

Fuerzas electromagnéticas entre las corrientes del rotor y el campo magnético del estator

$$M = F * d$$

Par en el rotor: el rotor gira

El rotor **gira a una velocidad N_r inferior** a la velocidad de sincronismo N_s pues en caso contrario no se induciría f. e. m. en el rotor y por lo tanto no habría par motor



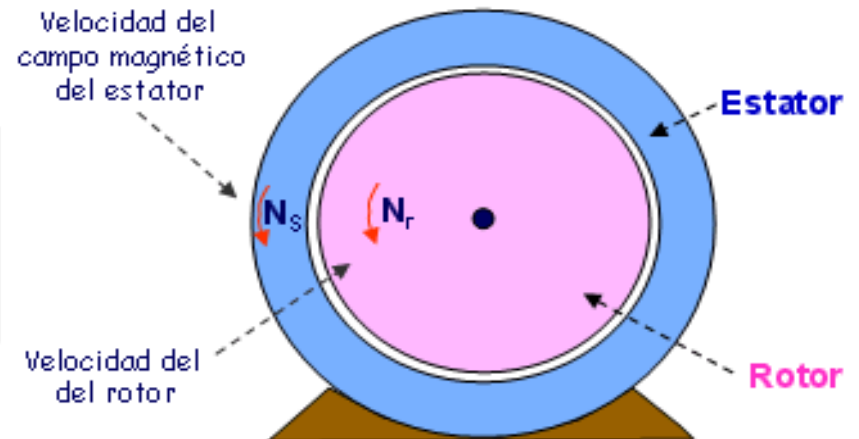
Deslizamiento

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 $s = 3\% - 8\%$):

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s}$$

$$s\% = \frac{N_s - N_r}{N_s} 100$$



En la tabla se pueden ver los **deslizamientos nominales** típicos en función del número de polos del motor Ejemplo para $f = 50$ 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

$$N_{des} = N_s - N_r$$

⇓

$$f_{rotor} = \frac{p \cdot N_{des}}{60}$$

⇓

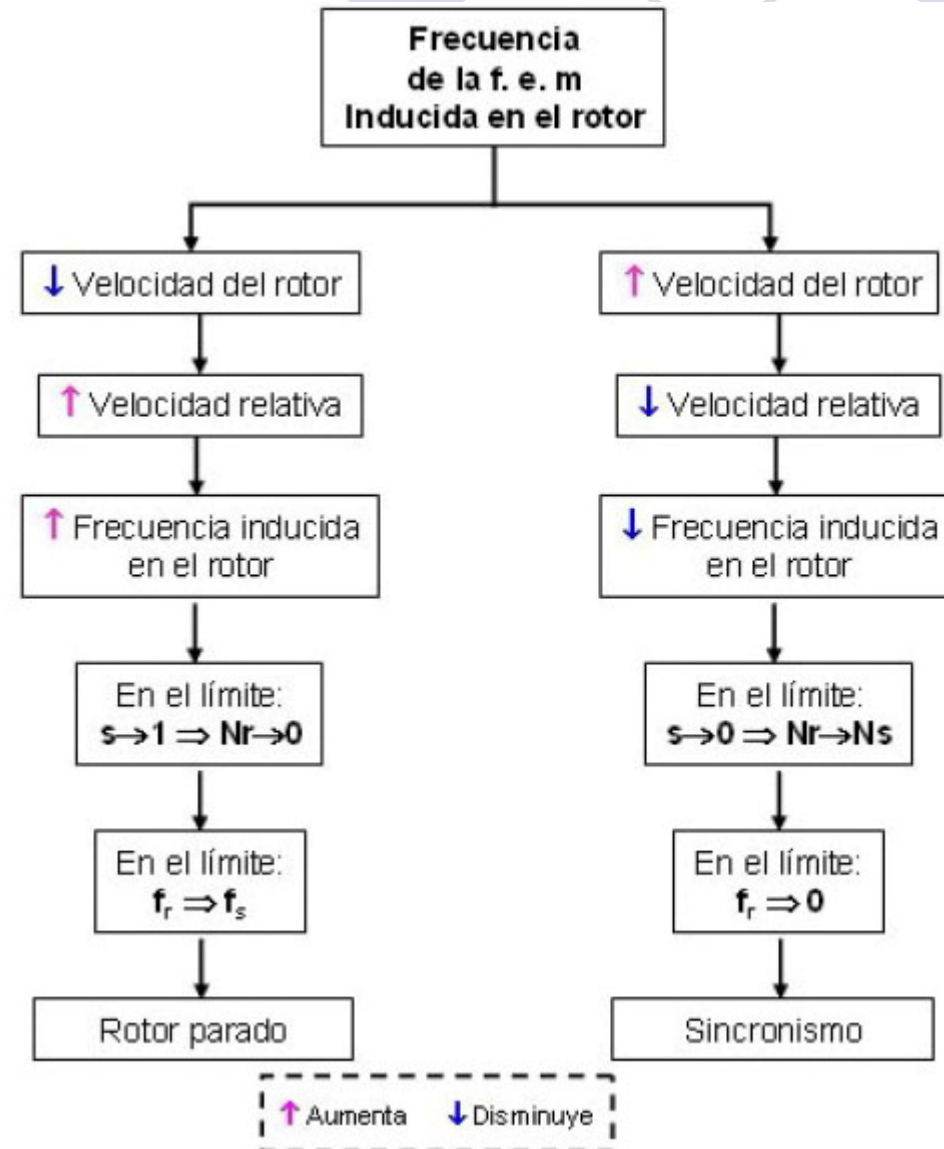
$$f_{rotor} = \frac{p \cdot s \cdot N_s}{60}$$

⇓

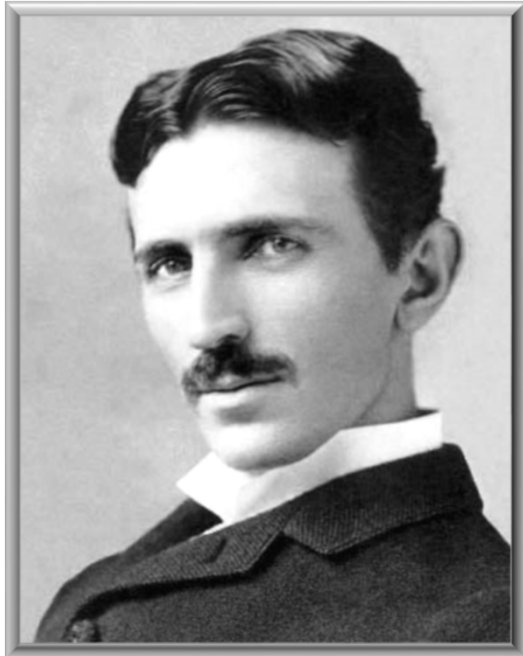
$$f_{rotor} = s \frac{p \cdot N_s}{60}$$

⇓

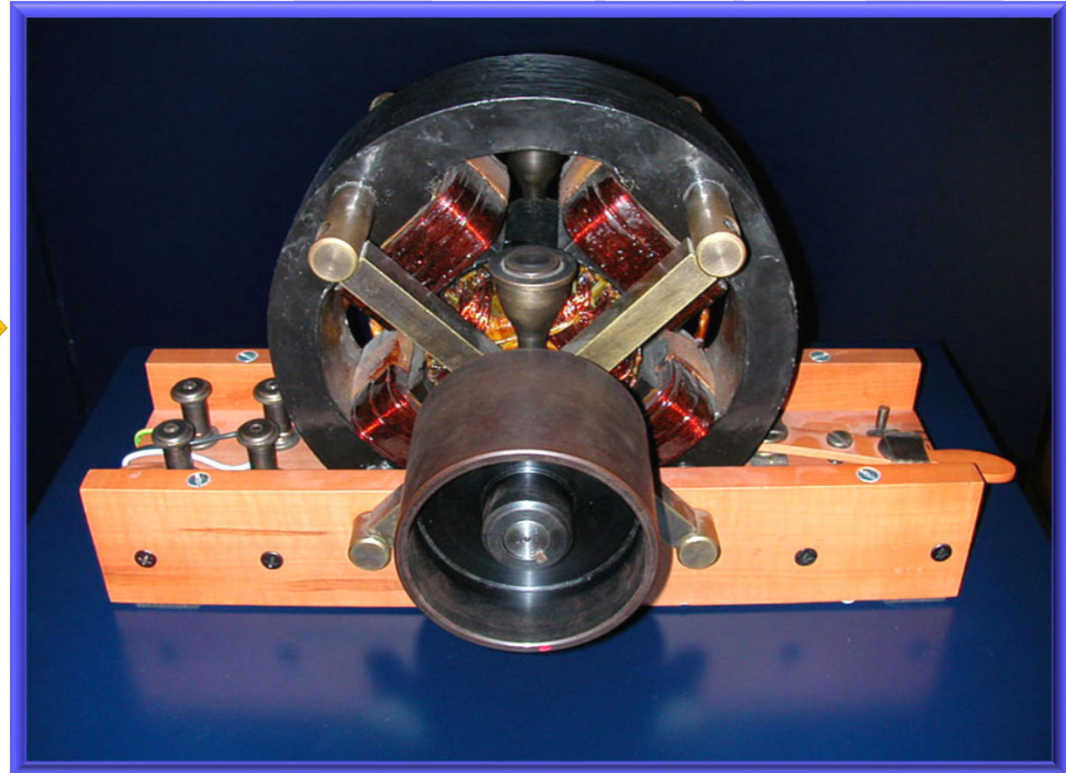
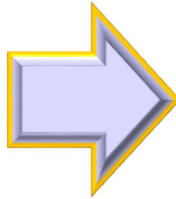
$$f_{rotor} = s \cdot f_{estator}$$



Máquinas asíncronas. Constitución



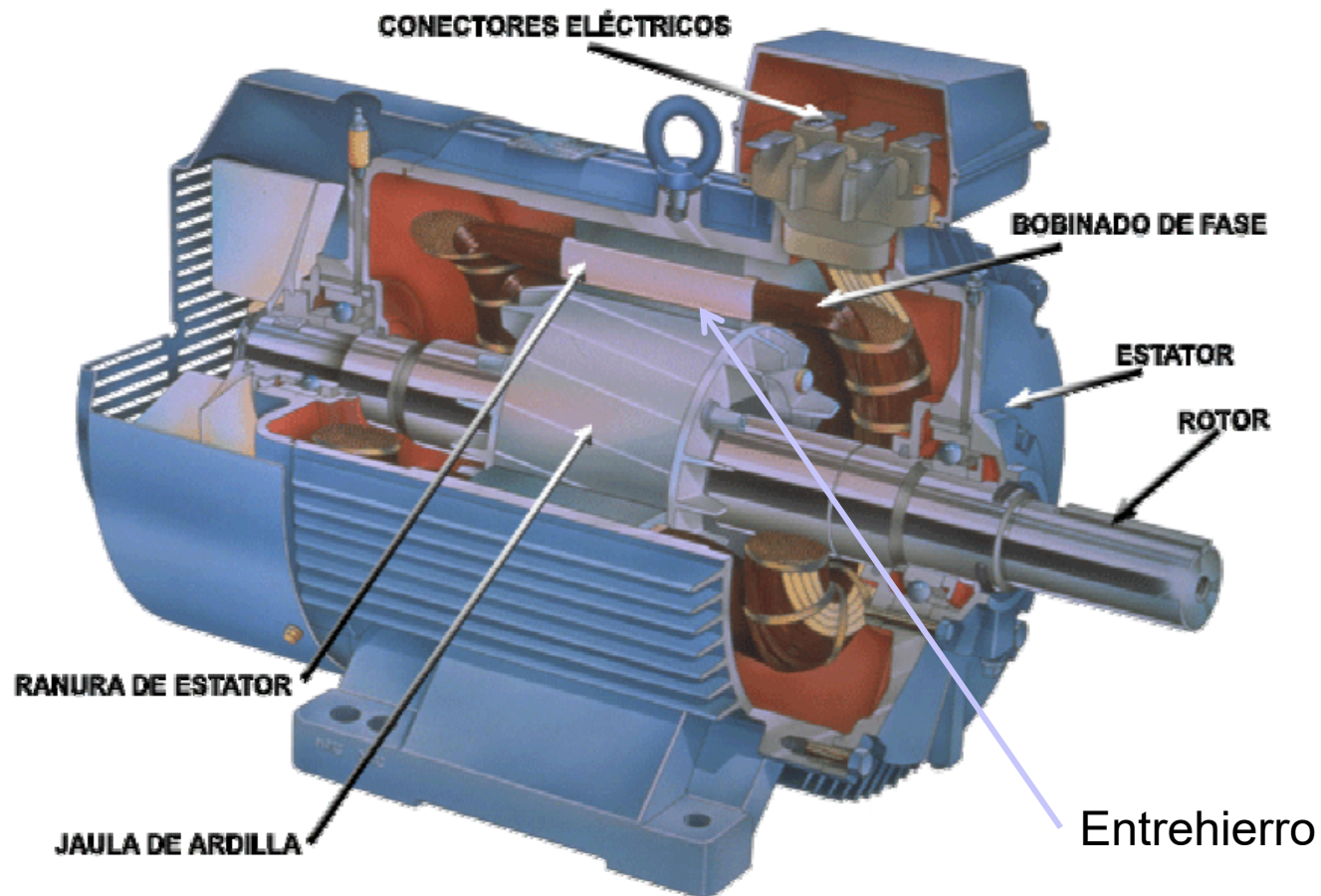
Nikola Tesla (1856-1943)



Generador asíncrono de Nikola Tesla (1888)

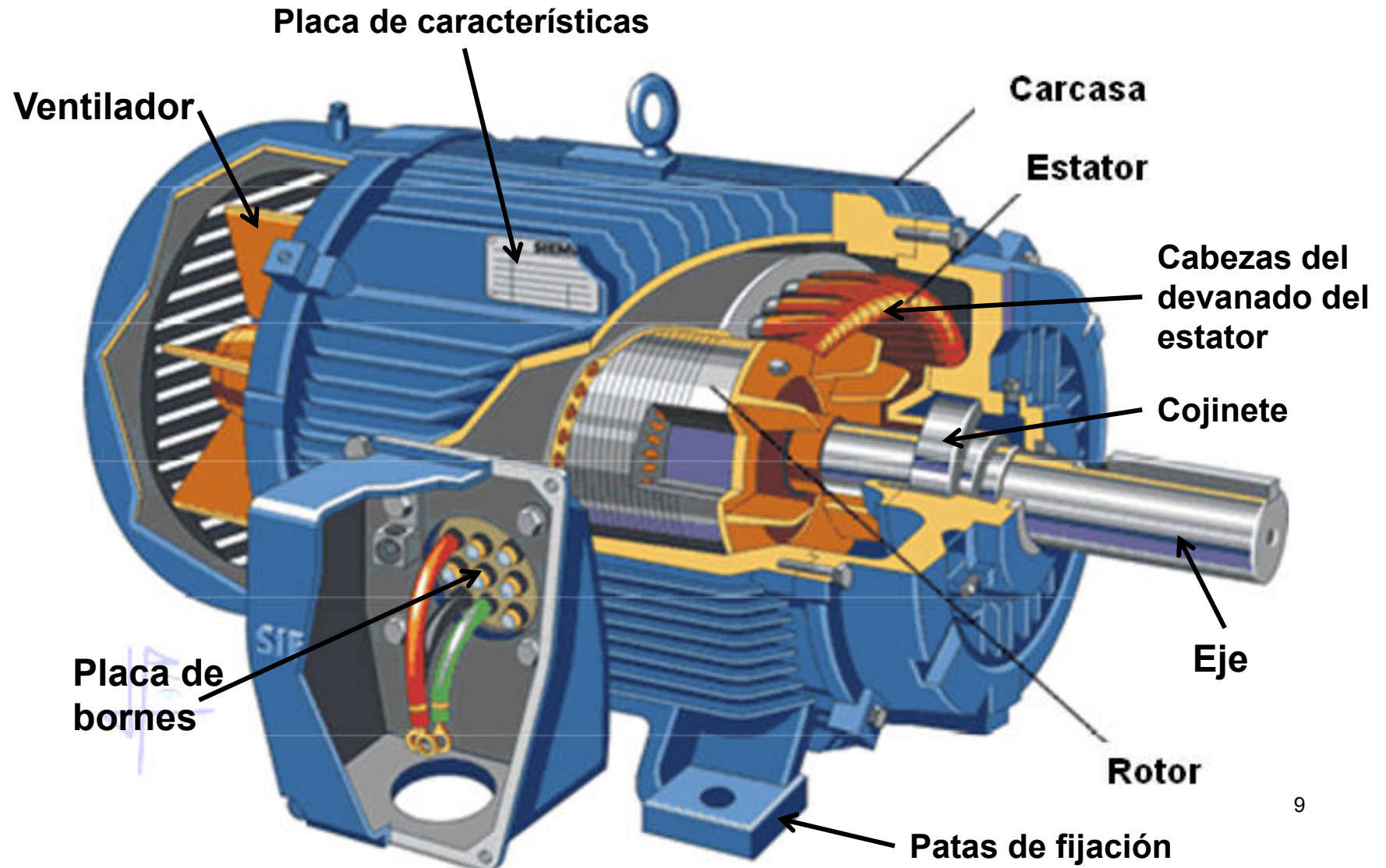
Los **motores asíncronos** o **de inducción** son un tipo de motor de corriente alterna. El primer prototipo de motor eléctrico capaz de funcionar con corriente alterna fue desarrollado y construido por el ingeniero **Nikola Tesla** y presentado en el *American Institute of Electrical Engineers* en 1888.

Máquinas asíncronas. Constitución

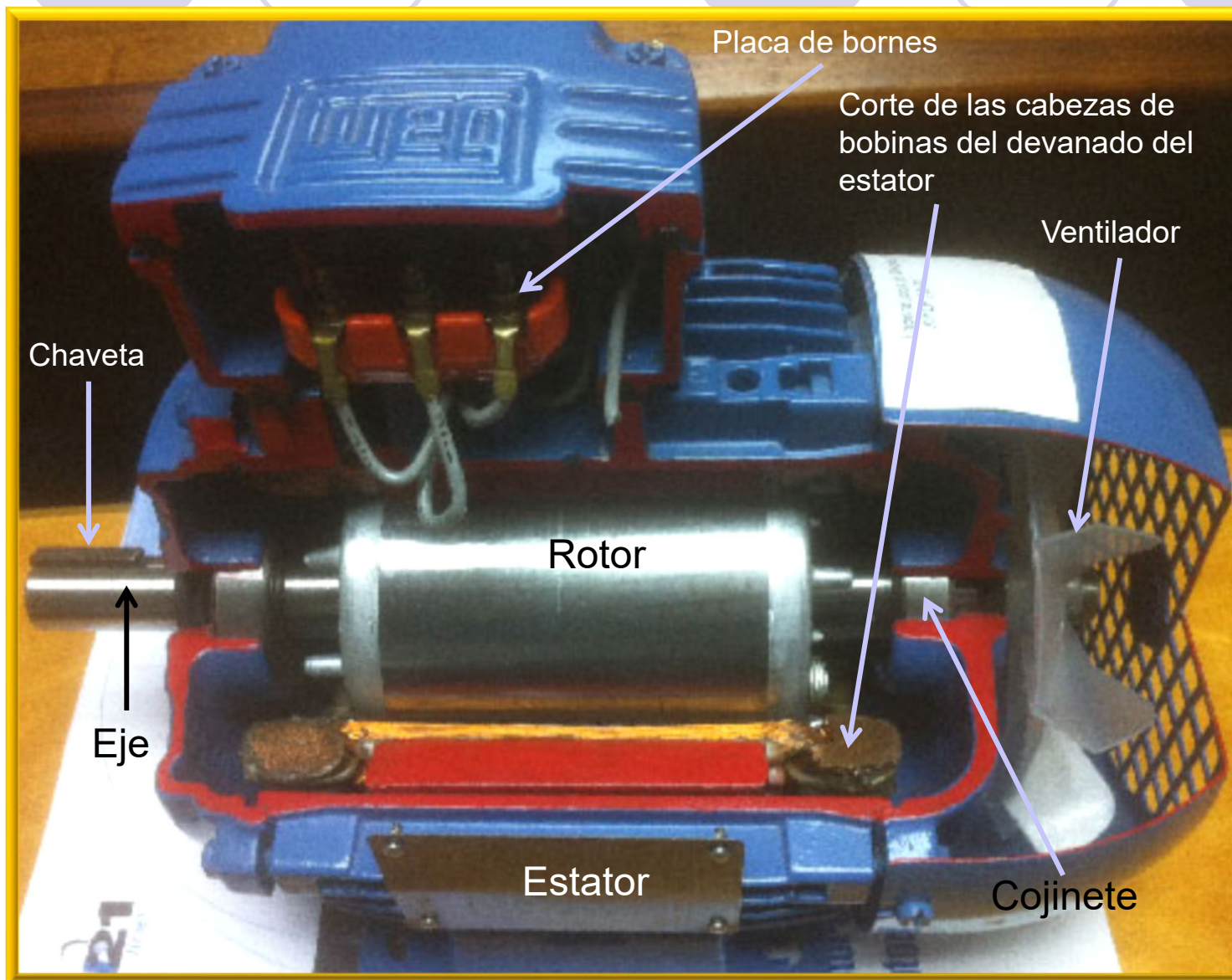


- Alimentación trifásica estator con bobinas distribuidas en tres fases a 120°
- Rotor de jaula de ardilla con ranuras inclinadas

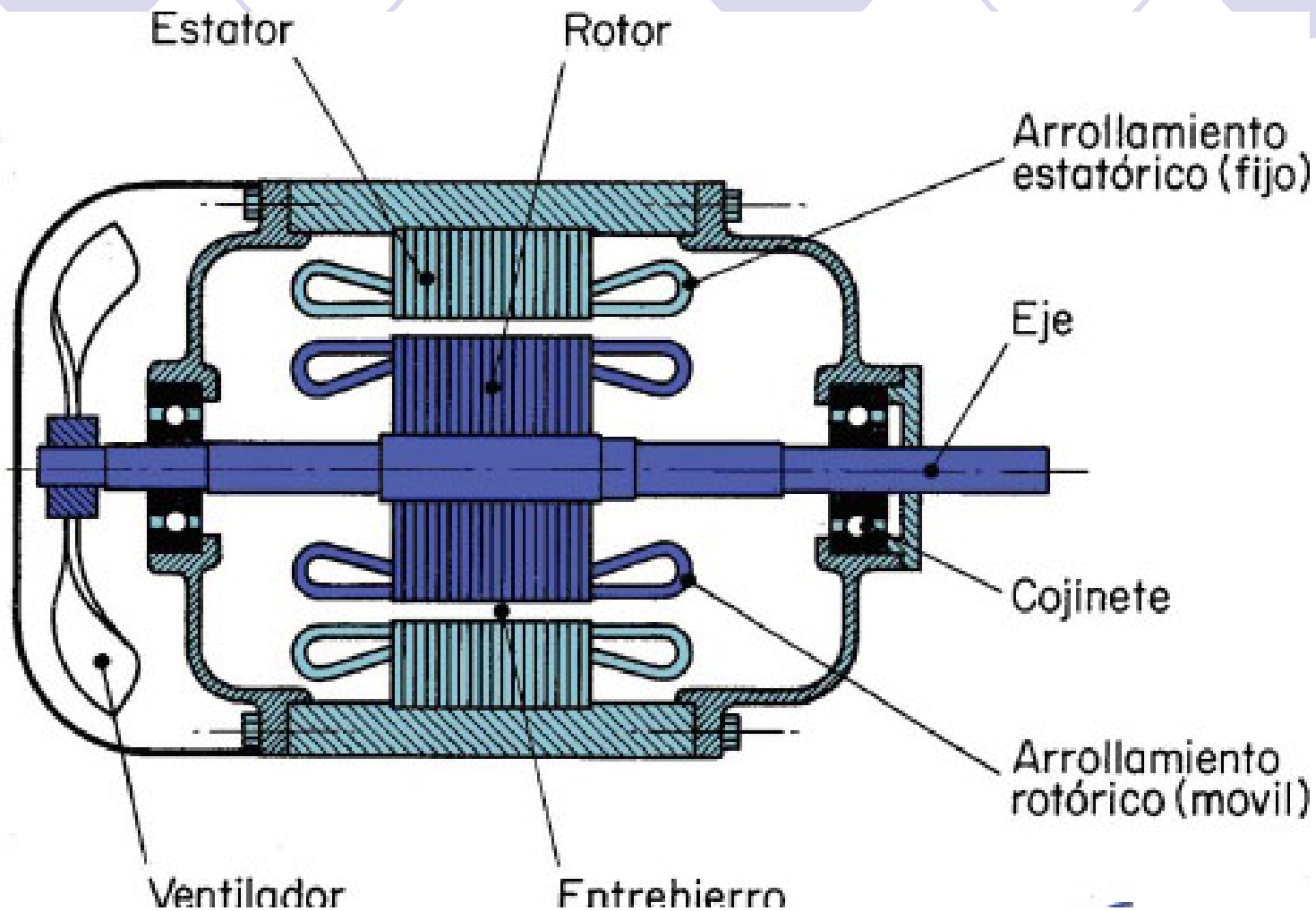
Máquinas asíncronas. Constitución



Máquinas asíncronas. Constitución



Máquinas asíncronas. Constitución



Corte longitudinal de una máquina asíncrona

Máquinas asíncronas. Constitución

Estator

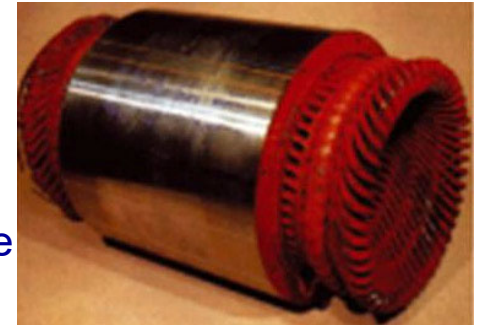
Devanado trifásico distribuido en ranuras a 120°

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



Bobinado

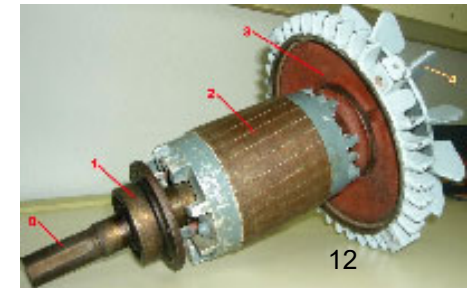
Rotor devanado: los devanados del rotor son similares a los del estator con los que están acoplados. El número de fases del rotor no tiene por que ser el mismo que el del estator, lo que ha de ser igual es el número de polos. Los devanados de cada fase del rotor están conectados a anillos colectores montados en el eje.



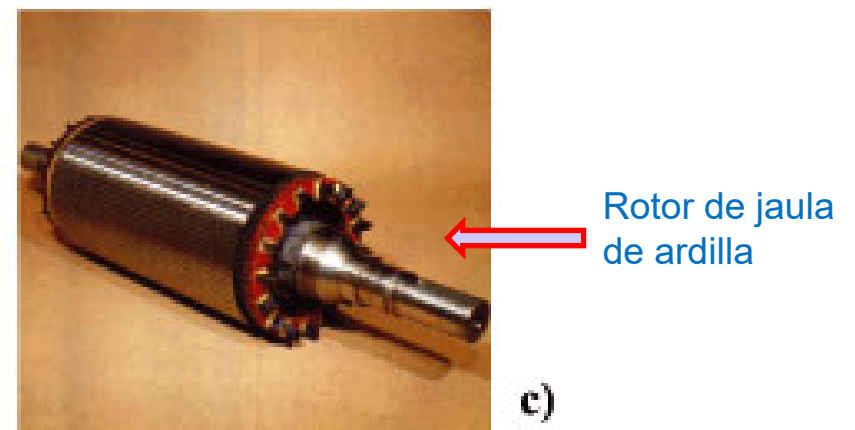
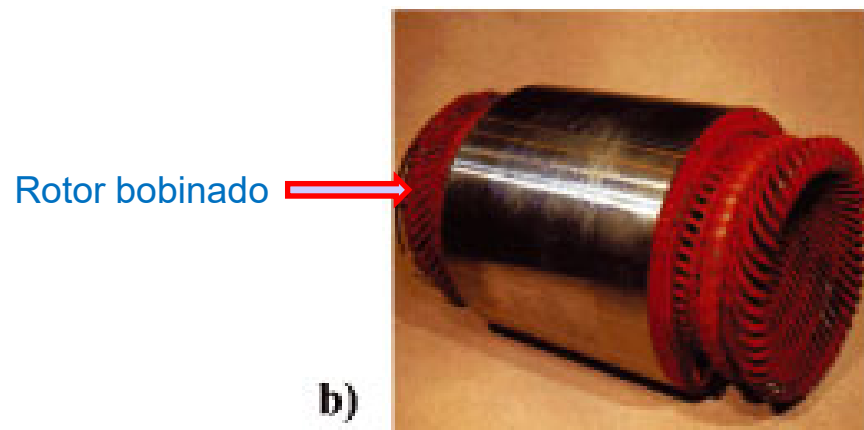
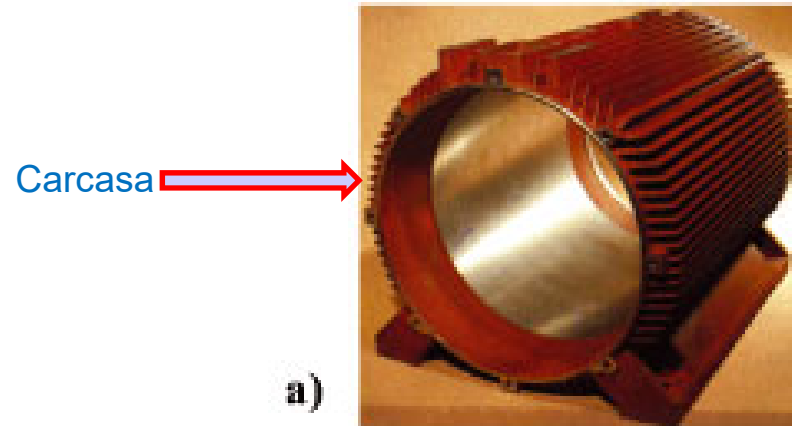
Rotor

Jaula de ardilla

Los conductores del rotor están igualmente distribuidos por la periferia del rotor. Los extremos de estos conductores están cortocircuitados, por lo que no existe posibilidad de conexión del rotor con el exterior. Las ranuras suelen ser inclinadas lo que mejora las propiedades en el arranque y disminuye los ruidos.



Máquinas asíncronas. Constitución

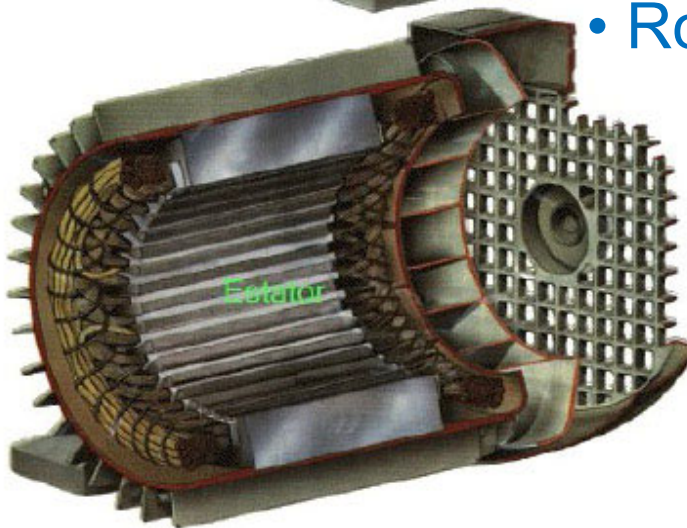


*Carcasa, estator y rotor de un motor asíncrono.
(Fuente: Revista ABB, nº 5, 1990).*

Máquinas asíncronas. Constitución

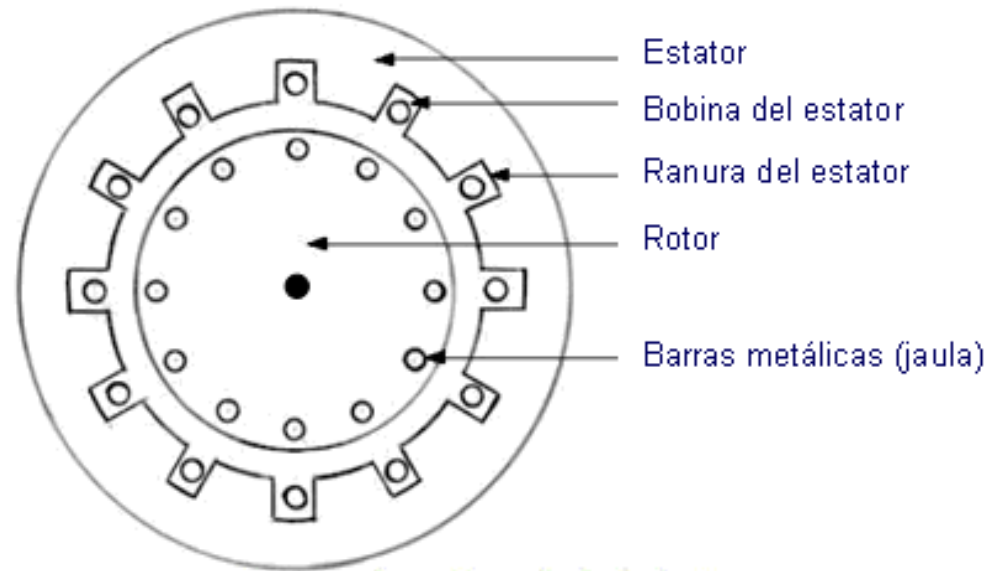
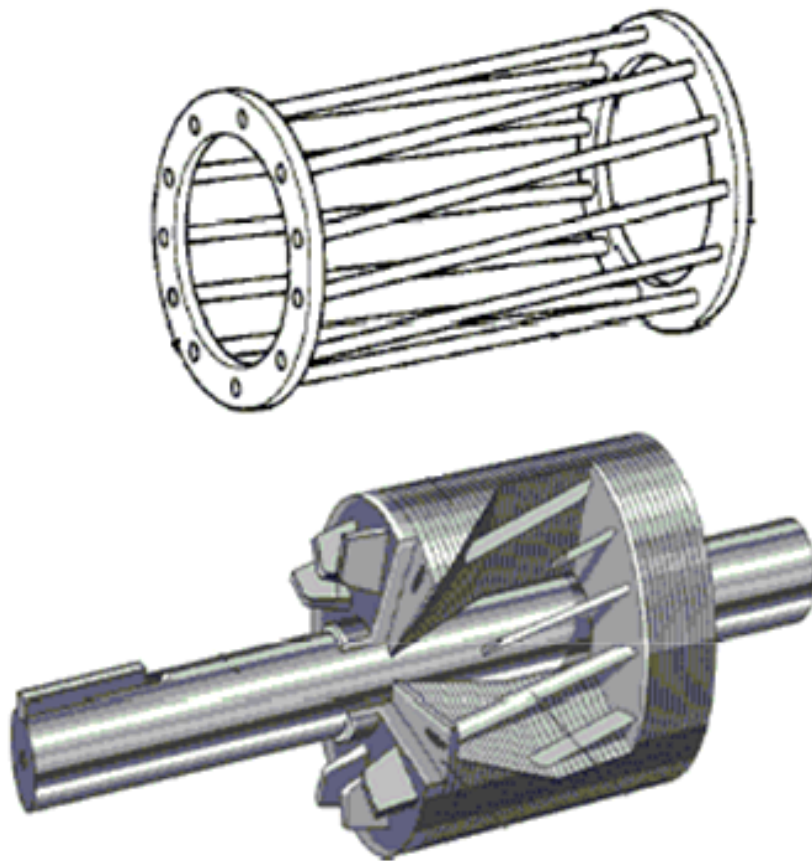


- Rotor de jaula de ardilla



Máquinas asíncronas. Constitución

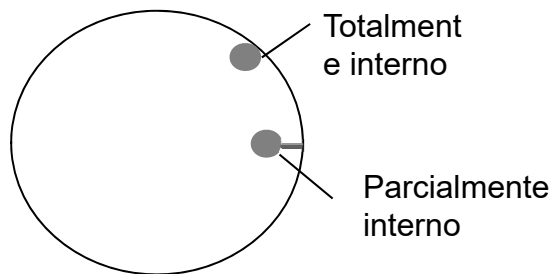
- Rotor de jaula de ardilla



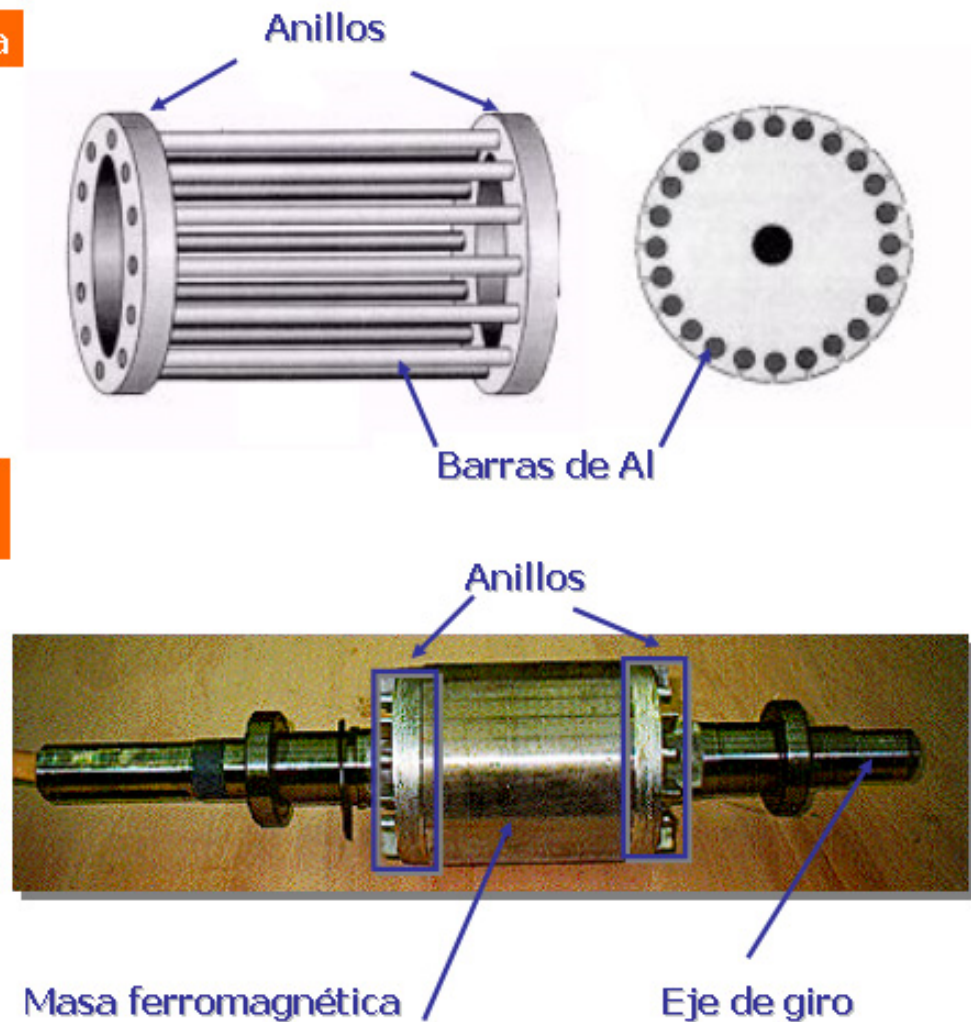
Máquinas asíncronas. Constitución

- Rotor de jaula de ardilla

Jaula de ardilla aislada

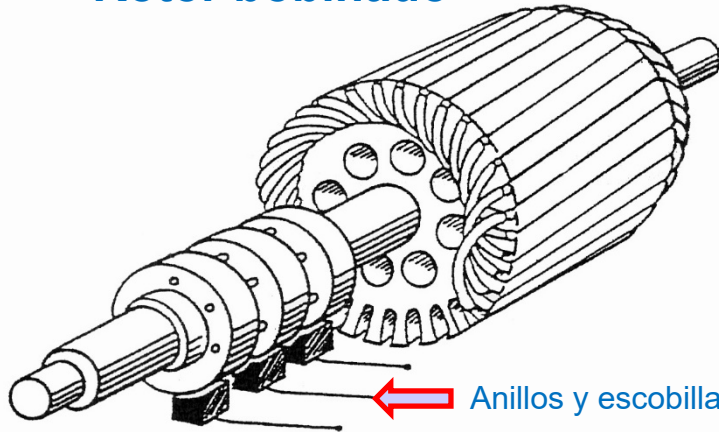


Aspecto de un rotor de jaula de ardilla

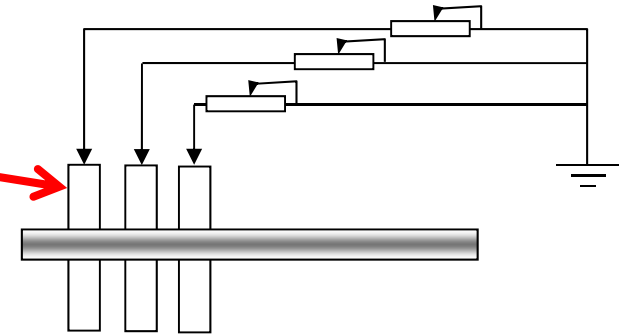
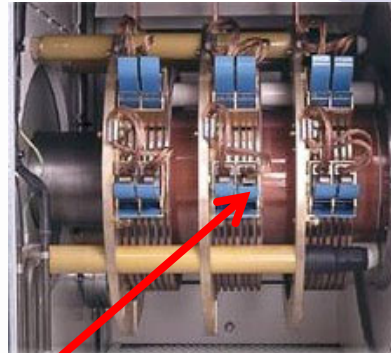


Devanados de las máquinas asíncronas

Rotor bobinado



Anillos y escobillas

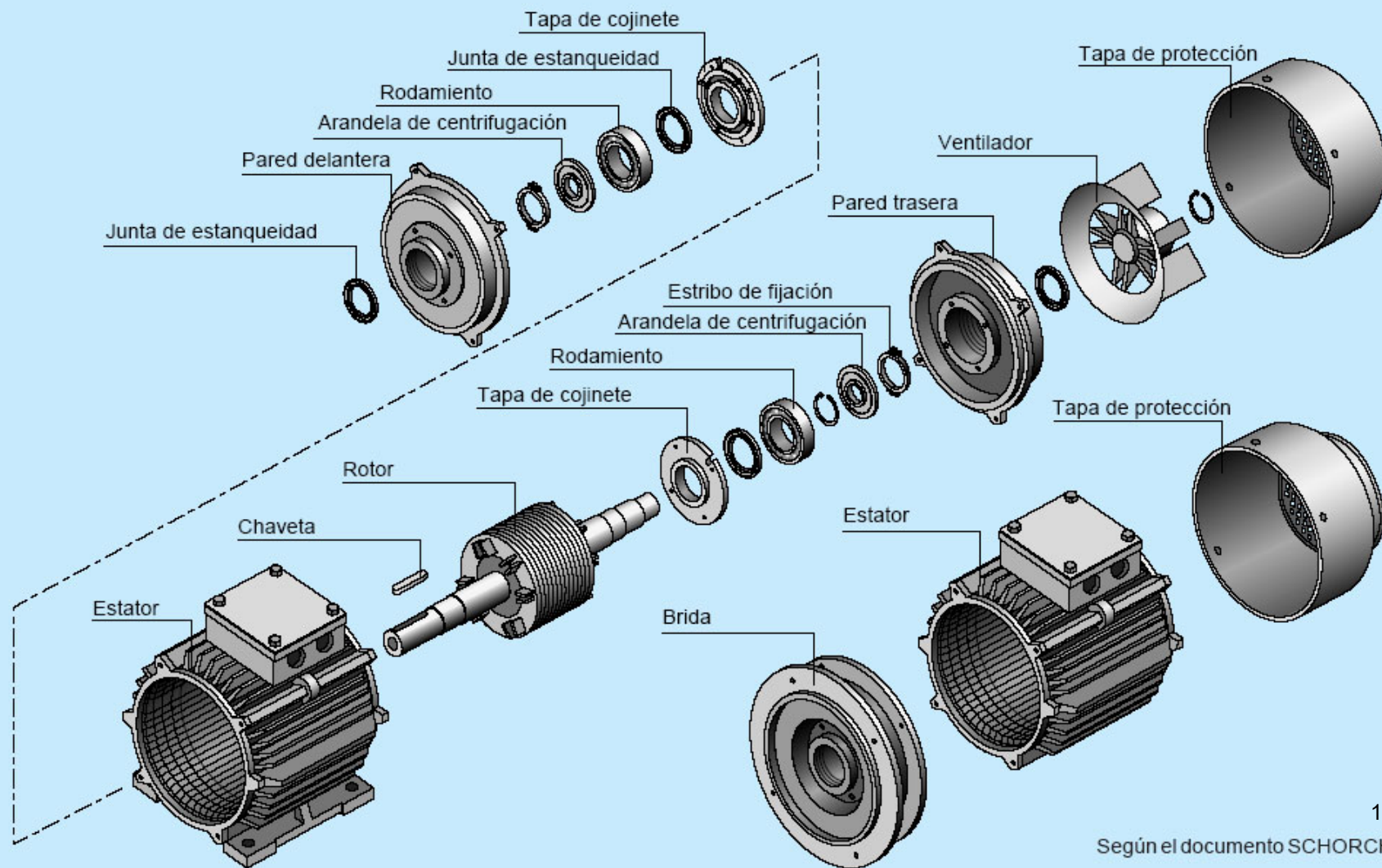


Esquema de conexión de un reostato de arranque

Ante todo indicar que actualmente **los rotores bobinados se están dejando de fabricar** y que el 95 % de los motores de inducción que se fabrican actualmente son de jaula de ardilla.

La principal diferencia es que los conductores constituyen un devanado trifásico de hilo esmaltado, similar a los devanados estáticos. Un extremo del devanado se conecta en estrella y el otro se conecta con el exterior mediante tres anillos sobre los que rozan tres escobillas. En el exterior se puede conectar en estrella mediante cables, para cerrar el circuito rotórico, o bien se puede colocar un reostato para facilitar el arranque o la regulación de velocidad. En vista de estas conexiones y del rozamiento anillos-escobillas, estos motores necesitan un mantenimiento que no precisan los de jaula de ardilla.

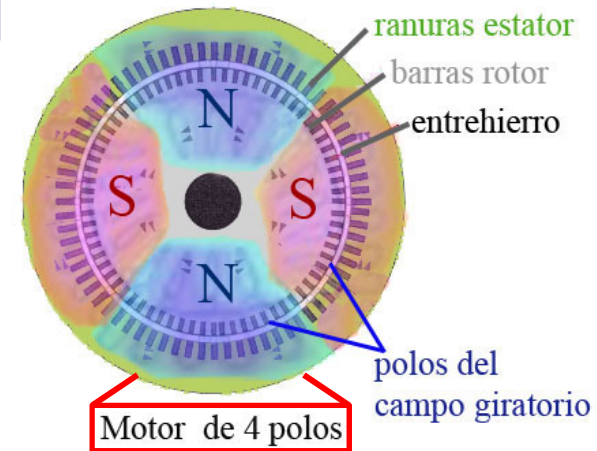
Máquinas asíncronas. Constitución



Máquinas asíncronas

Devanado inductor:

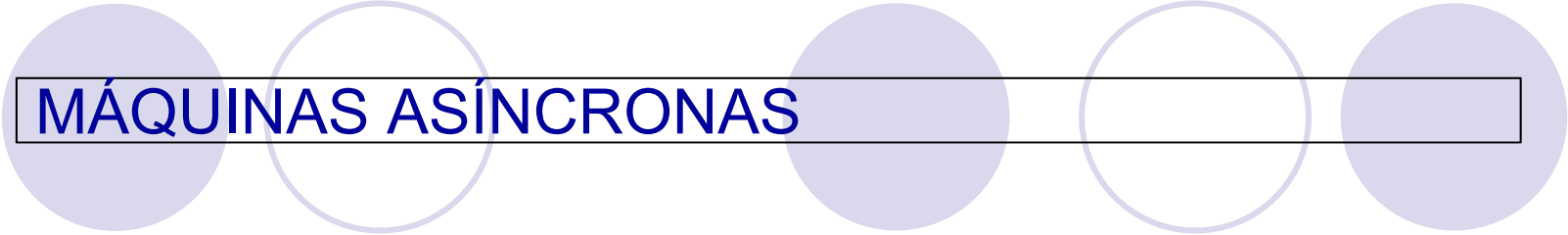
$$\text{Estator} \Rightarrow \begin{cases} m_1 = 3 \\ p_1 = p \end{cases}$$



Esquema de un máquina asíncrona de 4 polos

Devanado inducido:

$$\text{Rotor} \begin{cases} \text{Jaula de ardilla} \rightarrow \begin{cases} m_2 \geq m_1 = 3 \\ p_2 = p_1 = p \end{cases} \\ \text{Bobinado de anillos rozantes} \rightarrow \begin{cases} m_2 \leq \text{ó} \geq m_1 = 3 \\ p_2 = p_1 = p \end{cases} \end{cases}$$

The header features a horizontal arrangement of five circles. The first, third, and fifth circles are solid light purple. The second and fourth circles are white with a light purple outline. A thin black rectangular box is superimposed over the middle of the circles, containing the text 'MÁQUINAS ASÍNCRONAS' in blue capital letters.

MÁQUINAS ASÍNCRONAS

- Corrientes desfasadas 120° y variación temporal
- Flujo giratorio a través del entrehierro
- Campos generados por las tres fases
- La suma de los campos magnéticos creados por las tres fases forma un campo giratorio de amplitud constante ($3H_{\max}/2$) de dos polos

Devanados de las máquinas asíncronas

Rotor bloqueado

$$f_2 = f_1$$



$$E_2 = 4.44 \cdot \xi_2 \cdot f_1 \cdot N_2 \cdot \hat{\phi}$$

Rotor en movimiento

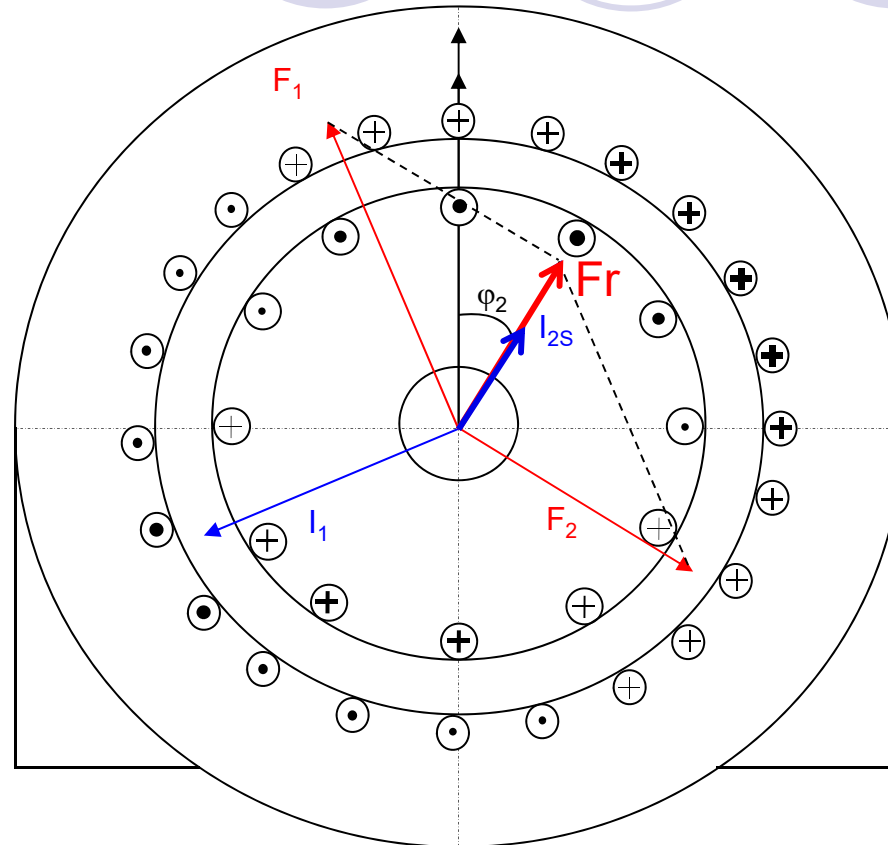
$$f_2 = S \cdot f_1$$



$$E_{2s} = 4.44 \cdot \xi_2 \cdot f_2 \cdot N_2 \cdot \hat{\phi}$$

$$\left. \begin{array}{l} X_2 = L_2 \cdot \omega_2 = L_2 \cdot \omega_1 \\ X_{2s} = L_2 \cdot \omega_2 = L_2 \cdot S \cdot \omega_1 \end{array} \right\} \Rightarrow X_{2s} = S \cdot X_2$$

$$n_2 = \frac{60 \cdot f_2}{p} = \frac{60 \cdot S \cdot f_1}{p} = S \cdot n_1$$



$$E_{2s} = S \cdot E_2$$

$$\bar{F}_r = \bar{F}_1 + \bar{F}_2$$

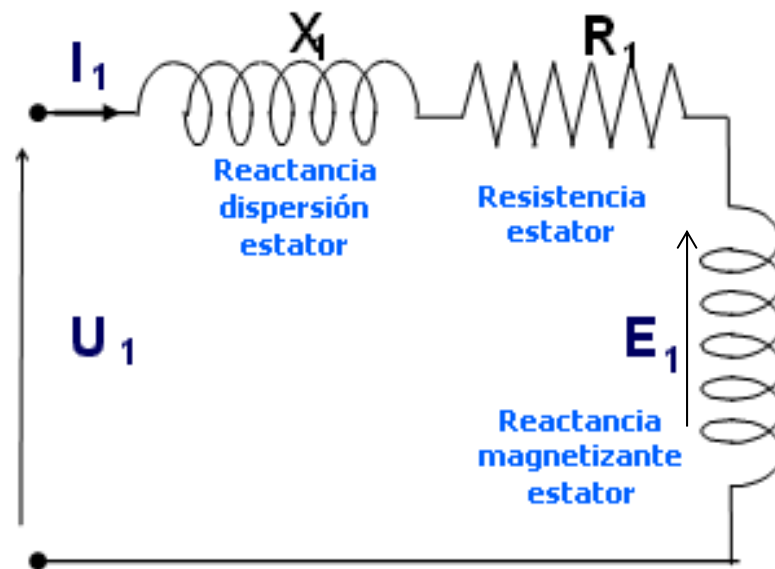
$$\Rightarrow \bar{F}_1 = \bar{F}_r - \bar{F}_2$$

Una vez conocida $\bar{F}_1$, se puede determinar la distribución senoidal de la corriente en el estator, que estará adelantada respecto a $\bar{F}_1$

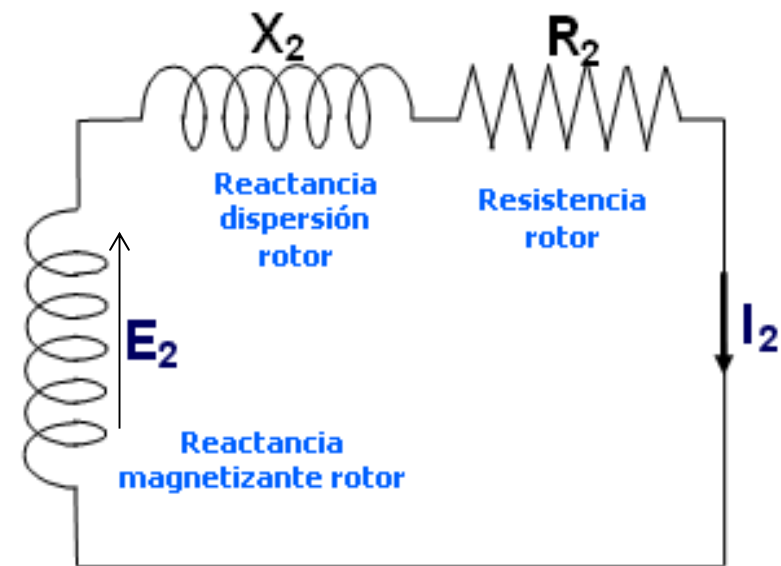
Circuito Equivalente con el Rotor Parado

La transferencia de energía en un motor asíncrono se produce de estátor 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 estátor 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 estátor y rotor respectivamente, el esquema equivalente es el siguiente:



$$\underline{U}_1 = (\underline{R}_1 + j\underline{X}_1) \underline{I}_1 + \underline{E}_1$$



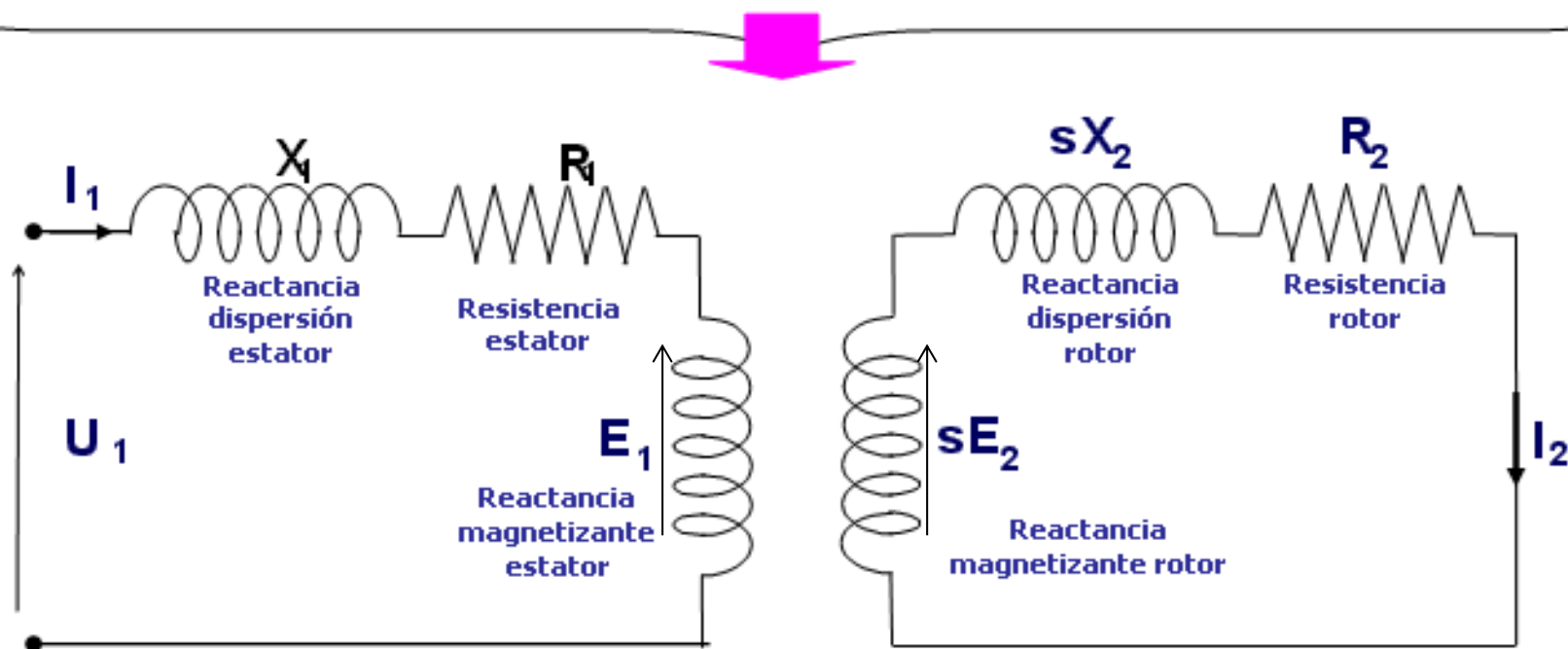
$$\underline{E}_2 = (\underline{R}_2 + j\underline{X}_2) \underline{I}_2$$

Circuito Equivalente con el Rotor Girando

Con el rotor parado: $E_2 = K_2 N_2 f_2 \Phi_m$ como $f_2 = f_1 \Rightarrow E_2 = K_2 N_2 f_1 \Phi_m$

Con el rotor girando: $E_{2s} = K_2 N_2 f_2 \Phi_m$ como $f_2 = s f_1 \Rightarrow E_{2s} = K_2 N_2 s f_1 \Phi_m = s E_2$
 $K_2 = 4,44 \cdot \mathcal{E}_2$

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



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

$$s \cdot \vec{E}_2 = (R_2 + jsX_2)\vec{I}_2$$

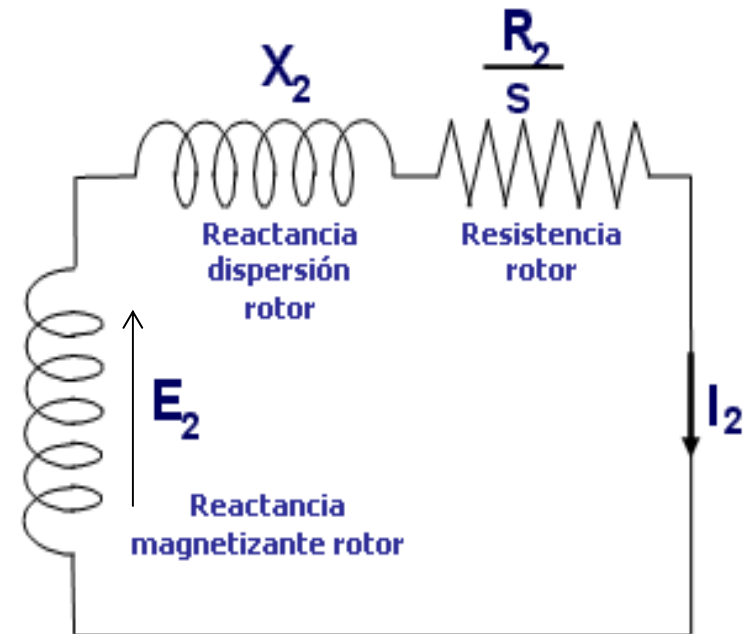
Circuito equivalente con el rotor girando

Que se puede poner en la siguiente forma:

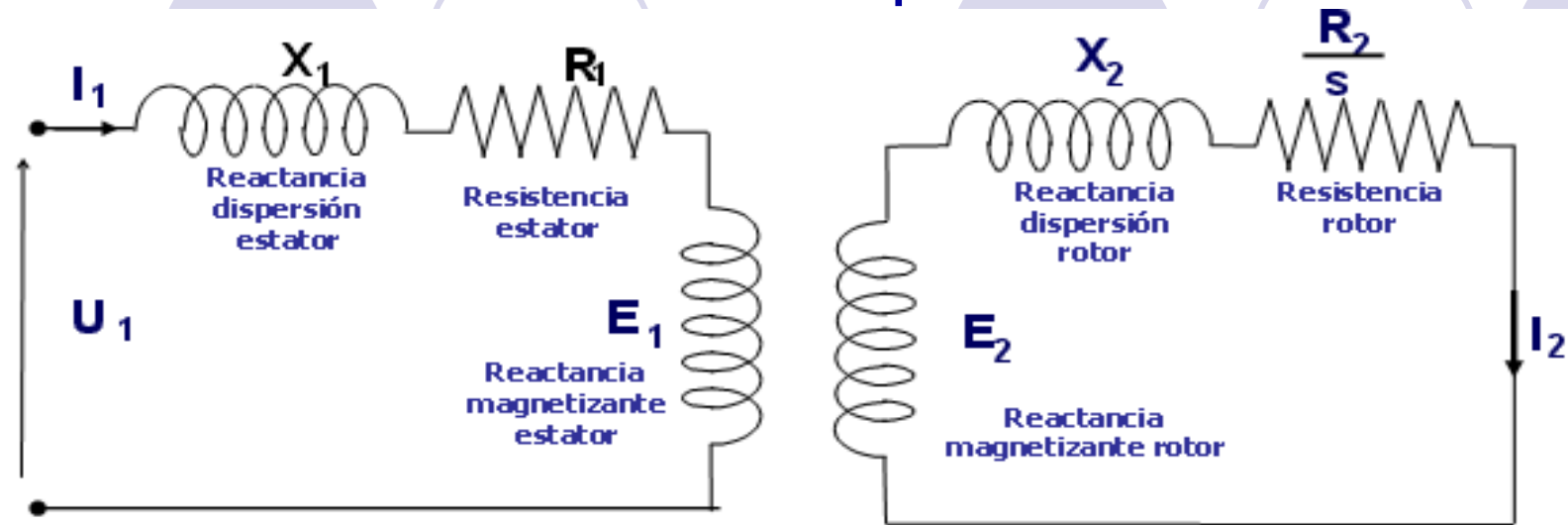
Despejando I_2 en la fórmula anterior:

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

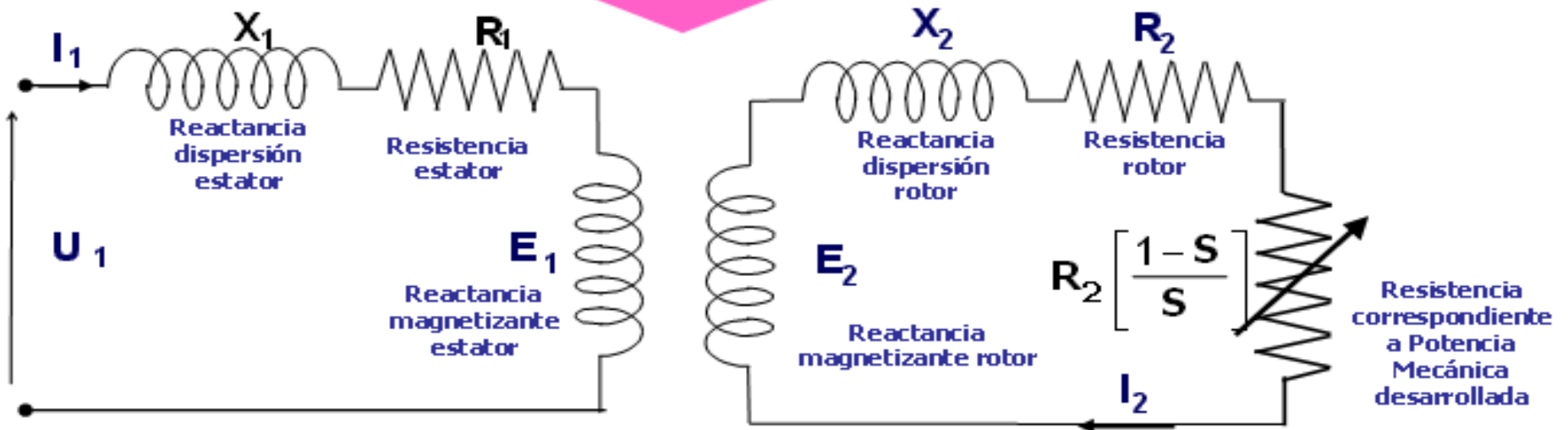
Circuito
Equivalente
del Rotor



Circuito equivalente



Como: $R_2/s = R_2 + R_2[(1-s)]/s = R_2 + R_c$

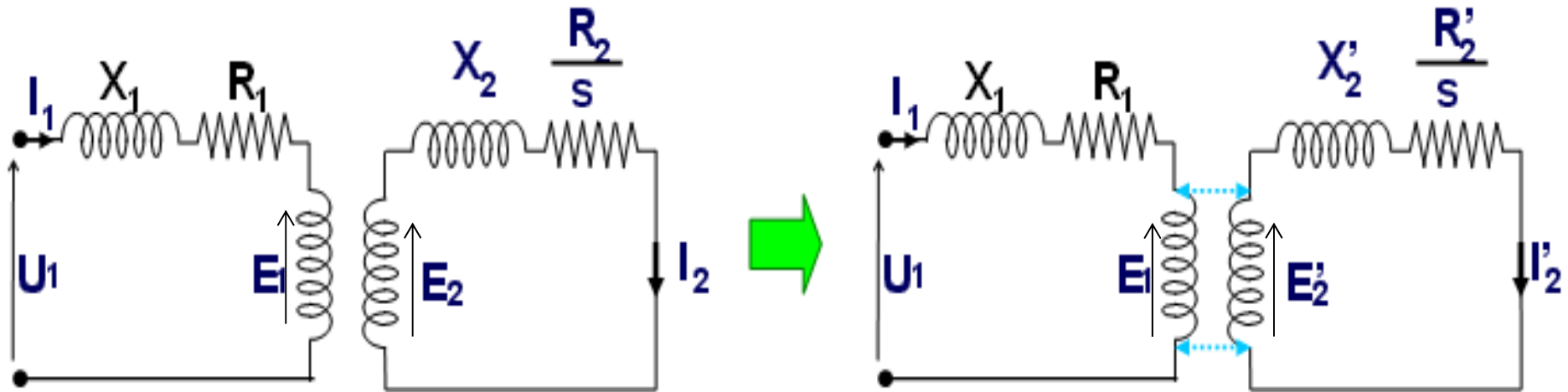


La resistencia R_c se denomina **resistencia de carga** y representa el efecto equivalente a la potencia mecánica desarrollada

Circuito Equivalente: Reducción del Rotor al Estator

Se considera que la máquina asíncrona es “equivalente” a un transformador tal que:

(Estator = Primario, Rotor = Secundario):



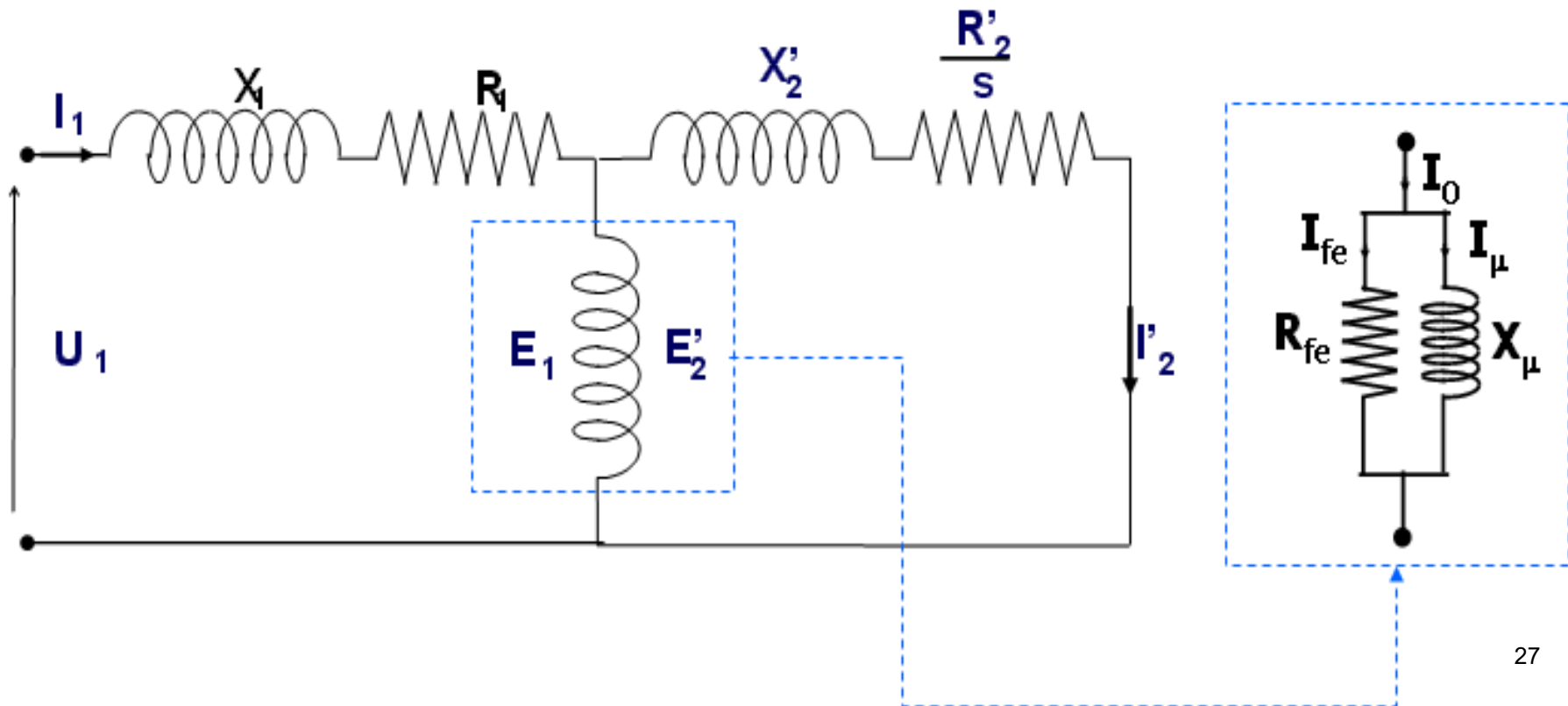
$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{r_{ti}} &= \frac{m_2 \cdot N_2 \cdot \xi_2}{m_1 \cdot N_1 \cdot \xi_1} \\ r_{tU} &= \frac{N_1 \cdot \xi_1}{N_2 \cdot \xi_2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{cases} E'_2 = r_{tU} \cdot E_2 \\ I'_2 = + \frac{I_2}{r_{ti}} \\ R'_2 = r_{tU} \cdot r_{ti} \cdot R_2 \\ X'_2 = r_{tU} \cdot r_{ti} \cdot X_2 \end{cases}$$

Circuito equivalente

Como:

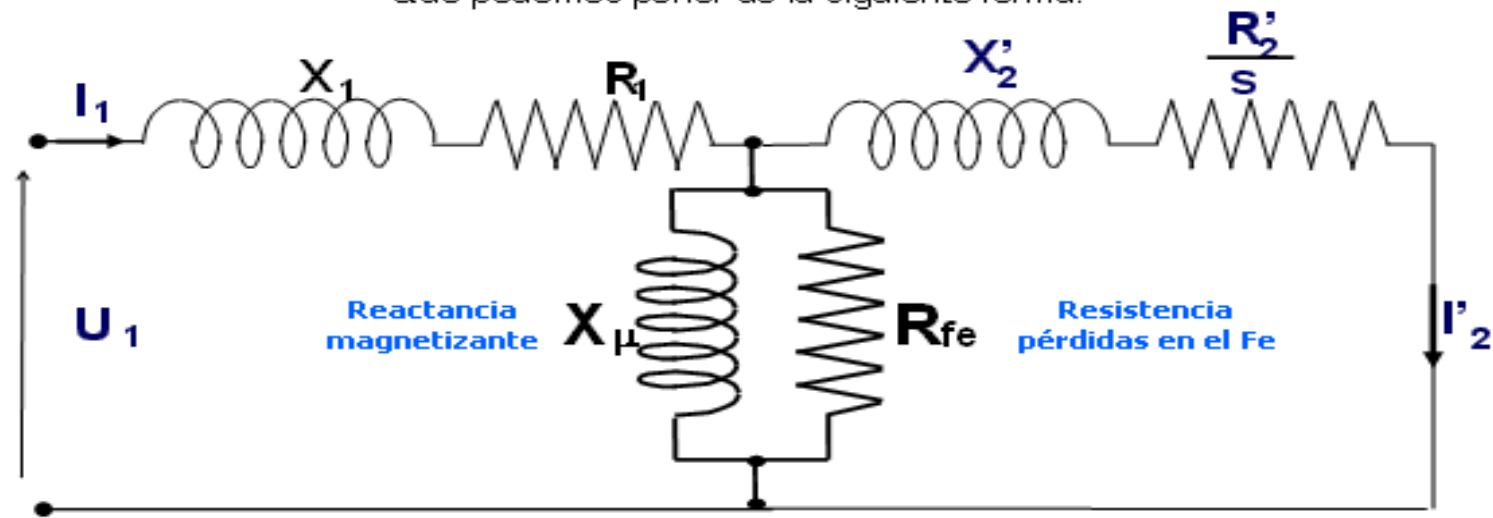
$$E'_2 = r_{tU} \cdot E_2 = E_1$$

El esquema queda:



Circuito equivalente

Que podemos poner de la siguiente forma:



Podemos hacer:

$$\frac{R'_2}{s} = R'_2 + R'_2 \left[\frac{1-s}{s} \right]$$

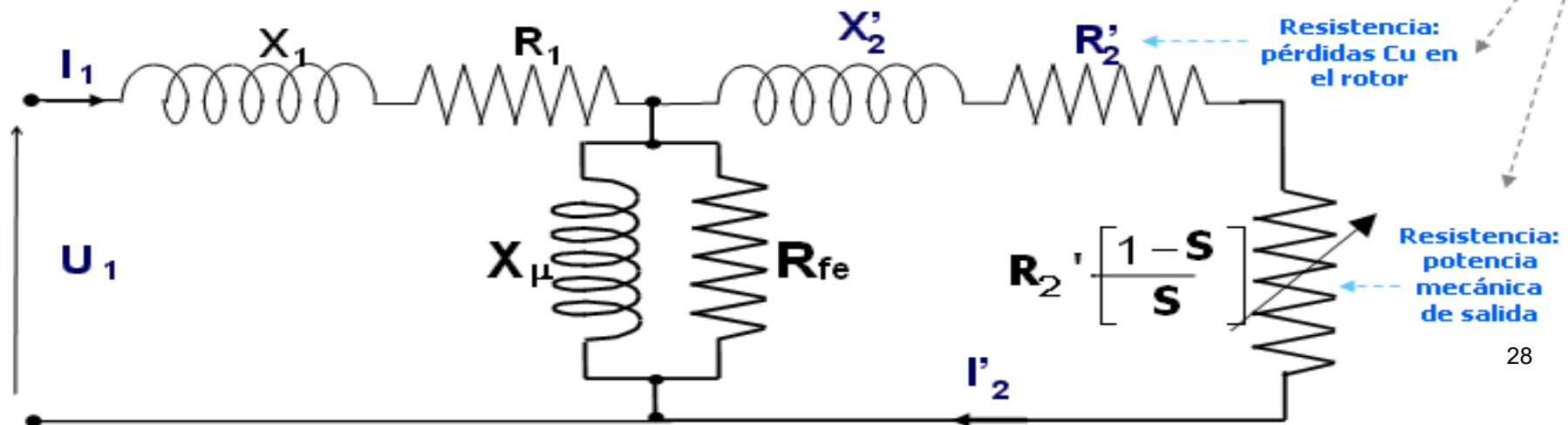
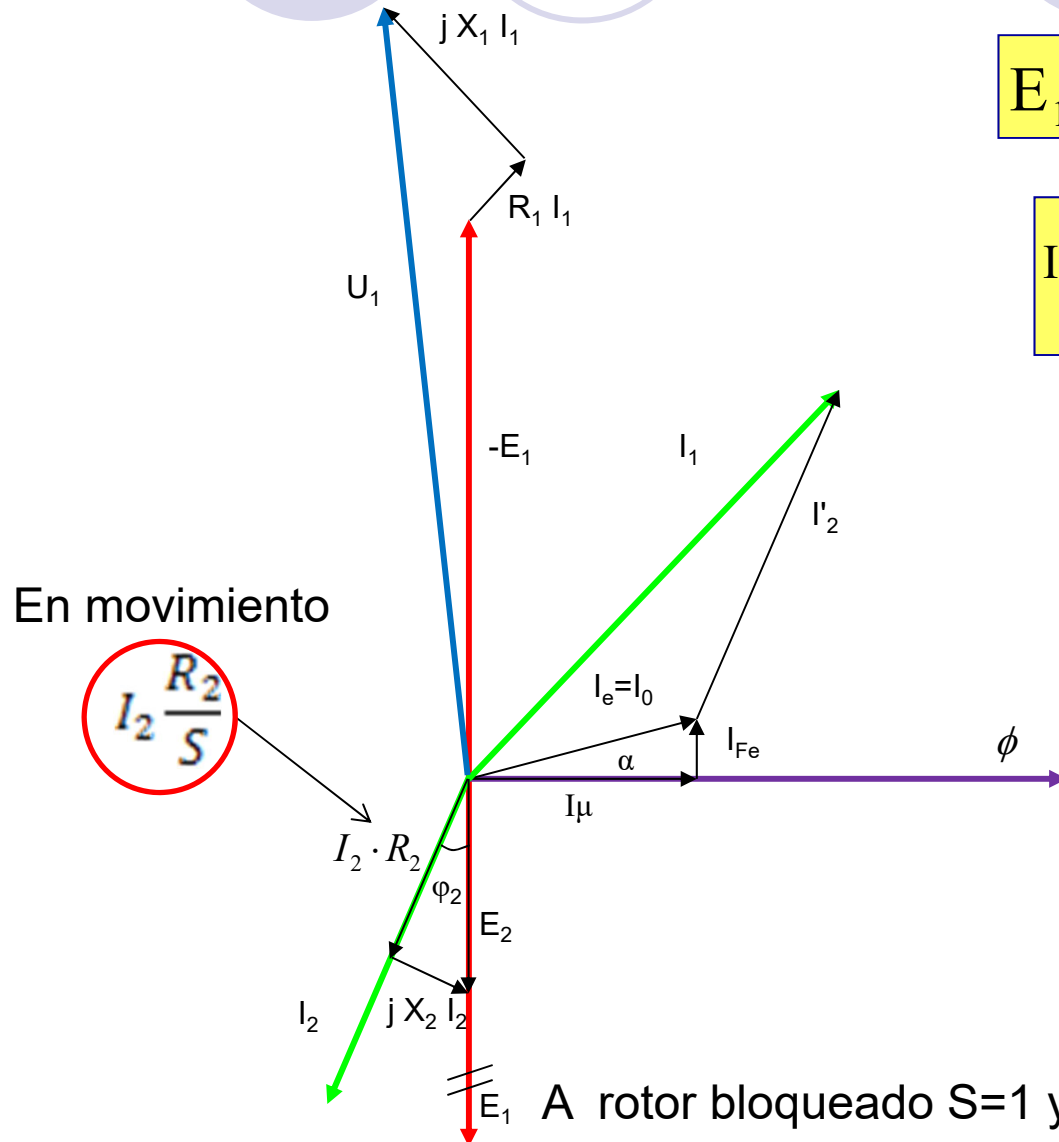


Diagrama vectorial



$$E_1 = 4.44 \cdot \xi_1 \cdot f_1 \cdot N_1 \cdot \hat{\phi}$$

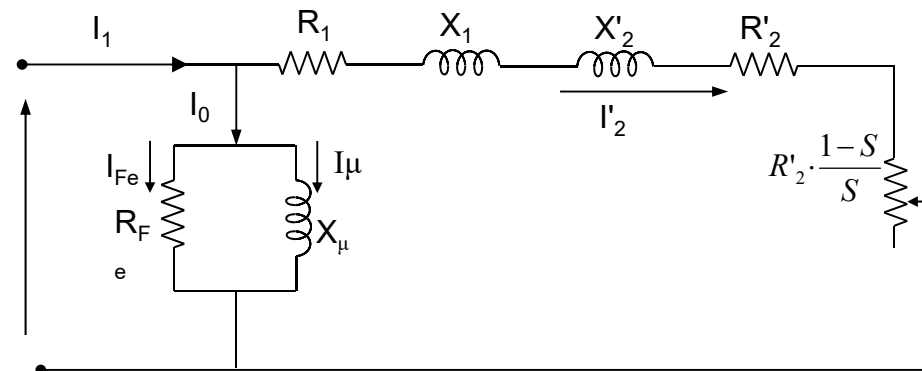
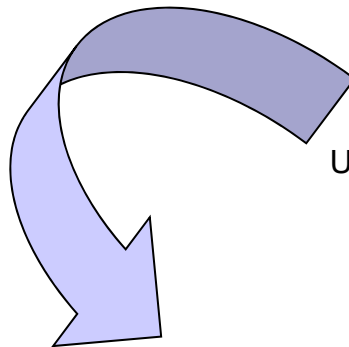
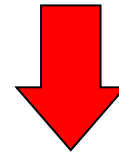
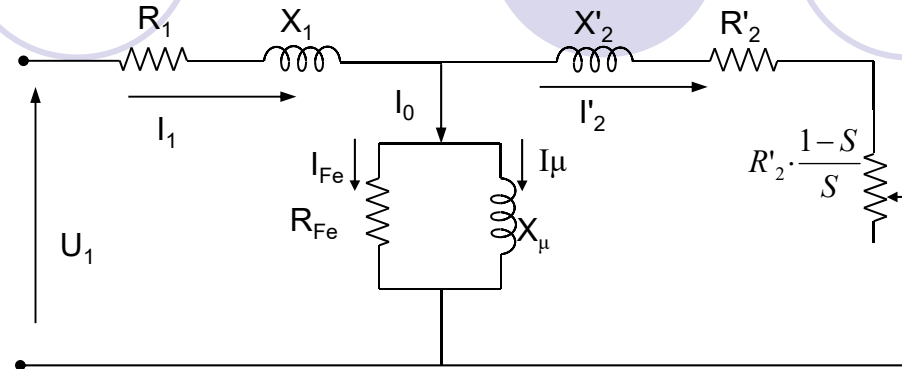
$$I_2 = \frac{E_{2s}}{\sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2}} = \frac{S \cdot E_2}{\sqrt{R_2^2 + S^2 \cdot X_2^2}}$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}'_2 + \bar{I}_e$$

$$\bar{E}_2 = R_2 \cdot \bar{I}_2 + j \cdot X_2 \cdot \bar{I}_2$$

$$\bar{U}_1 = -\bar{E}_1 + R_1 \cdot \bar{I}_1 + j \cdot X_1 \cdot \bar{I}_1$$

Máquinas asíncronas. Circuito equivalente simplificado



Esta aproximación
es aceptable para
motores >10kW

$$jX_{cc} = jX_1 + jX'_2$$

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{S}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}} = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{S}\right)^2 + X_{cc}^2}}$$



$$P_{mi} = m_1 \cdot R'_2 \cdot \frac{(1-s)}{s} \cdot \frac{U_1^2}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{S}\right)^2 + X_{cc}^2}$$

Máquinas asíncronas

$$P_{mi} = m_1 \cdot R'_2 \cdot \frac{(1-s)}{s} \cdot \frac{U_1^2}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{S}\right)^2 + X_{cc}^2}$$

$$\frac{dP_{mi}}{ds} = 0 \Rightarrow S_p = \frac{R'_2}{R'_2 \pm \sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2}}$$

Potencia mecánica interna máxima

$$(P_{mi})_{\max} = \pm \frac{m_1 \cdot U_1^2}{2(\pm R_{cc} + \sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2})} = \pm \frac{m_1 \cdot U_1^2}{2 \cdot (\pm R_{cc} + Z_{cc})}$$

Par de rotación de un motor asíncrono

$$M_i = \frac{P_{mi}}{2\pi \cdot \frac{n}{60}}$$

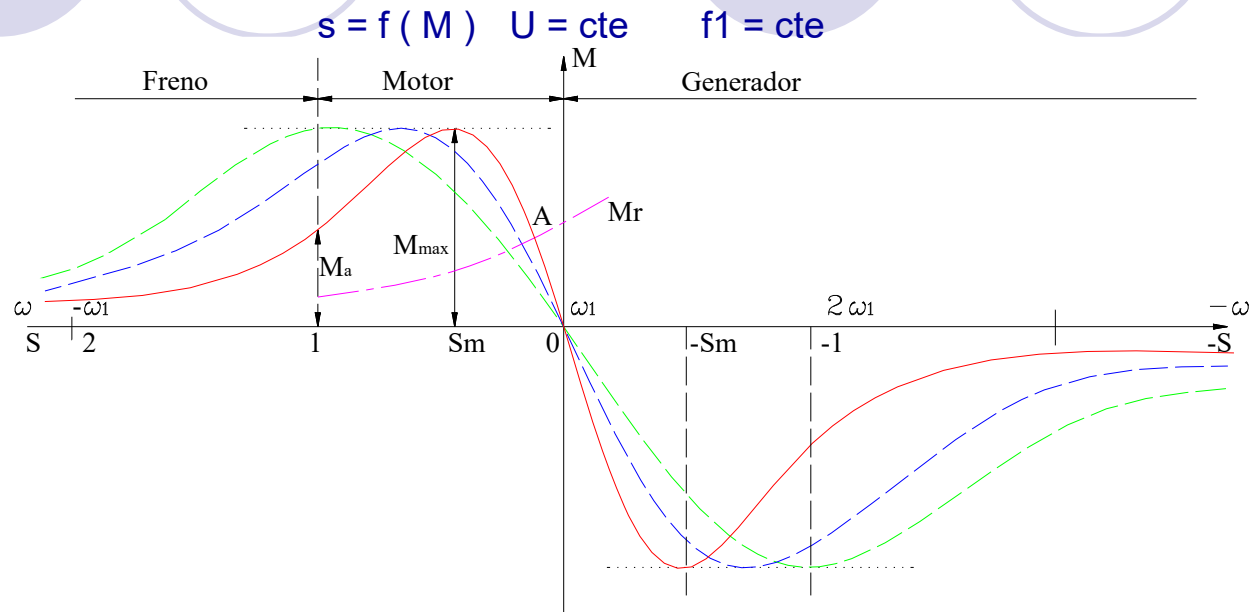
$$M_i = \frac{P_{mi}}{2\pi \cdot \frac{n_1}{60} (1-S)}$$

$$M_i = \frac{P_{cu2} \cdot \frac{1-S}{S}}{2\pi \cdot \frac{n_1}{60} (1-S)} = \frac{P_{cu2}}{2\pi \cdot \frac{n_1}{60} S}$$

$$\left. \begin{array}{l} M_i = \frac{P_a}{2\pi \cdot \frac{n_1}{60}} \\ P_a = m_1 \cdot \frac{R'_2}{S} \cdot I_2'^2 \end{array} \right\} \Rightarrow M_i = \frac{m_1 \cdot \frac{R'_2}{S} \cdot I_2'^2}{2\pi \cdot \frac{n_1}{60}}$$

$$\left. \begin{array}{l} M_i = \frac{m_1 \cdot \frac{R'_2}{S} \cdot I_2'^2}{2\pi \cdot \frac{n_1}{60}} \\ I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{S}\right)^2 + X_{cc}^2}} \end{array} \right\} \Rightarrow M_i = \frac{m_1 \cdot \frac{R'_2}{S} \cdot U_1^2}{2\pi \cdot \frac{n_1}{60} \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{S}\right)^2 + X_{cc}^2 \right]}$$

Máquinas asíncronas. Característica de par-deslizamiento



Curva — Característica con la resistencia propia del rotor.
 Curva - - Característica con resistencia adicional en el rotor.
 Curva - - Característica con resistencia adicional en el rotor para par arranque máximo.

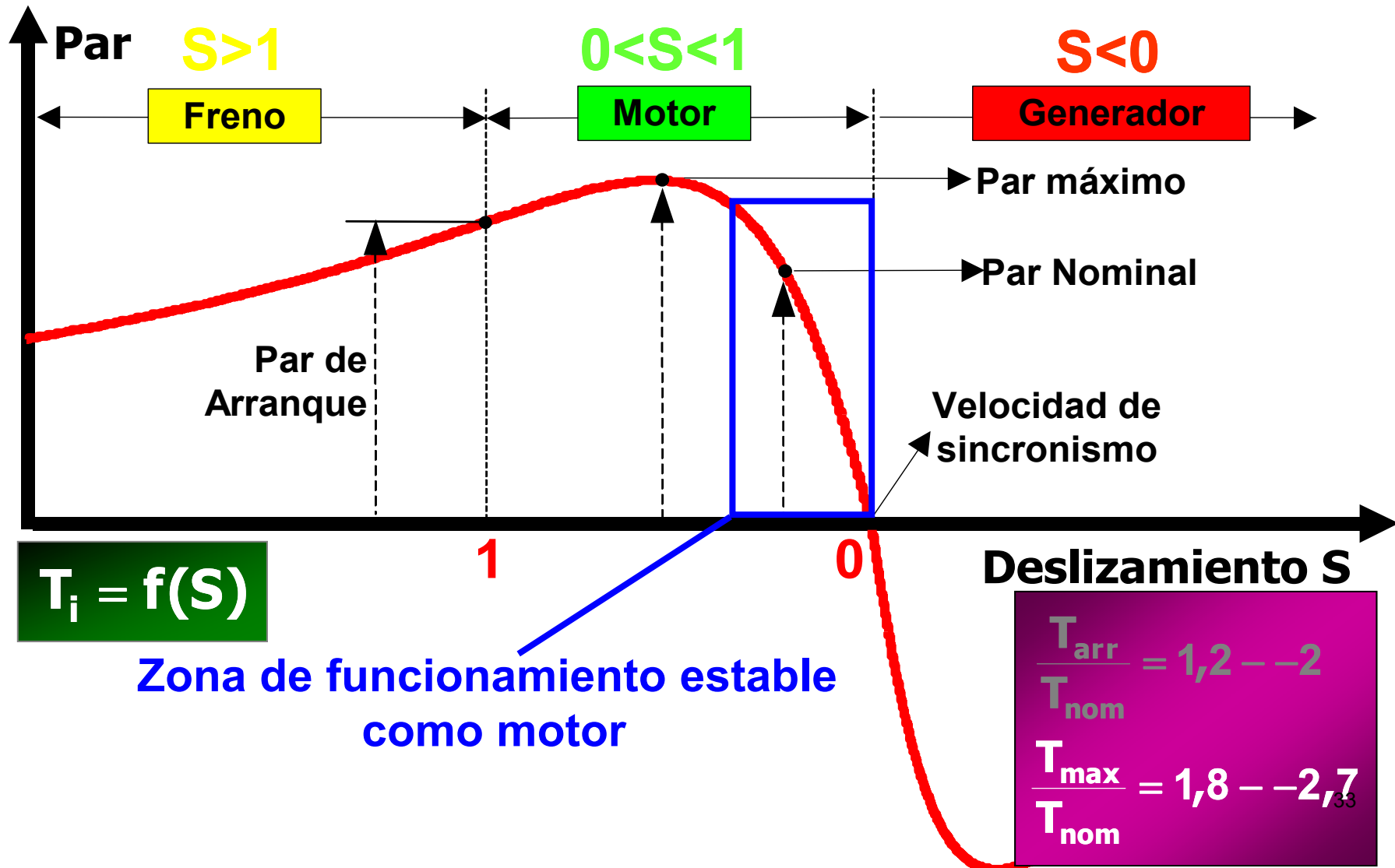
$$M = \frac{m_1}{\Omega_1} \cdot \frac{R_2'}{s} \cdot \frac{U_1^2}{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{cc}^2}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{--- } s = s_n \\ M_n = \frac{m_1 \cdot R_2' \cdot U_1^2}{\Omega_1 \cdot s_n \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{cc}^2 \right]} \\ \text{--- } s = 1 \\ M_a = \frac{m_1 \cdot R_2' \cdot U_1^2}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n_1}{60} \cdot \left[\left(R_1 + R_2'\right)^2 + X_{cc}^2 \right]} \end{array} \right\}$$

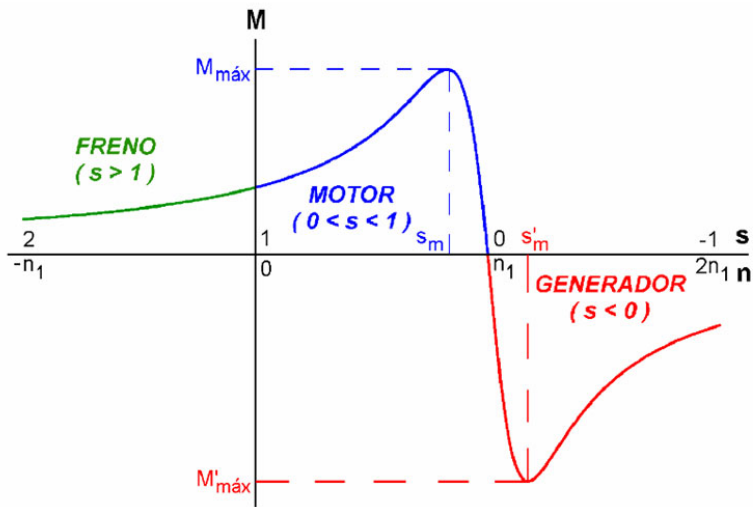
$$s_m = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}$$

$$M_{\max} = \pm \frac{m_1 \cdot U_1^2}{2 \cdot \Omega_1 \cdot \left(R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_{cc}^2}\right)} = \frac{m_1 \cdot U_1^2}{4 \cdot \pi \cdot \frac{n_1}{60} \cdot \left(R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}\right)}$$

CARACTERÍSTICA DE PAR



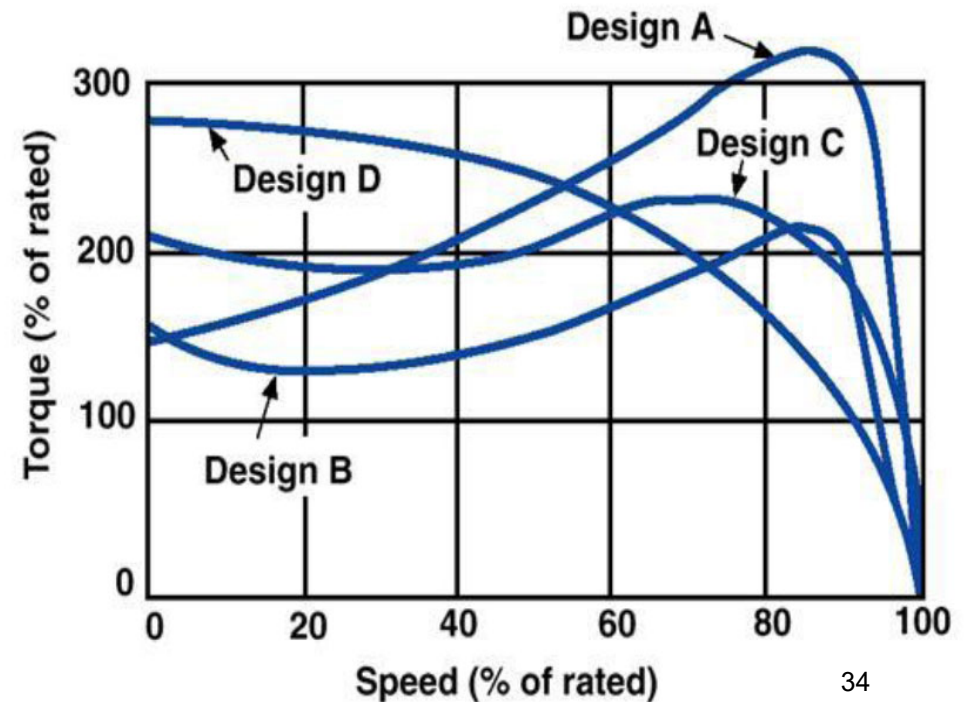
CARACTERÍSTICA DE PAR



Curva par-deslizamiento de una máquina asíncrona

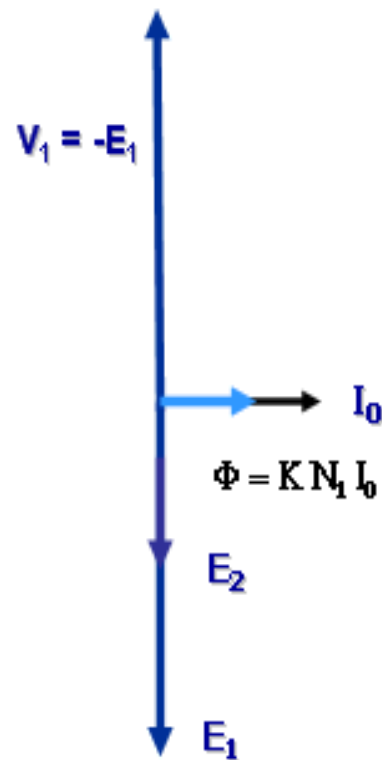
El par, dependiendo de los autores, se puede ver representado por cualquiera de las letras: **M**, **T** y **C**

La influencia del deslizamiento en el par proporcionado por la máquina puede observarse en la curva anterior, que corresponde a una máquina asíncrona tipo A. Existen otras curvas de par-deslizamiento, clasificados por NEMA como puede verse a continuación:



Funcionamiento

Funcionamiento en Vacío



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

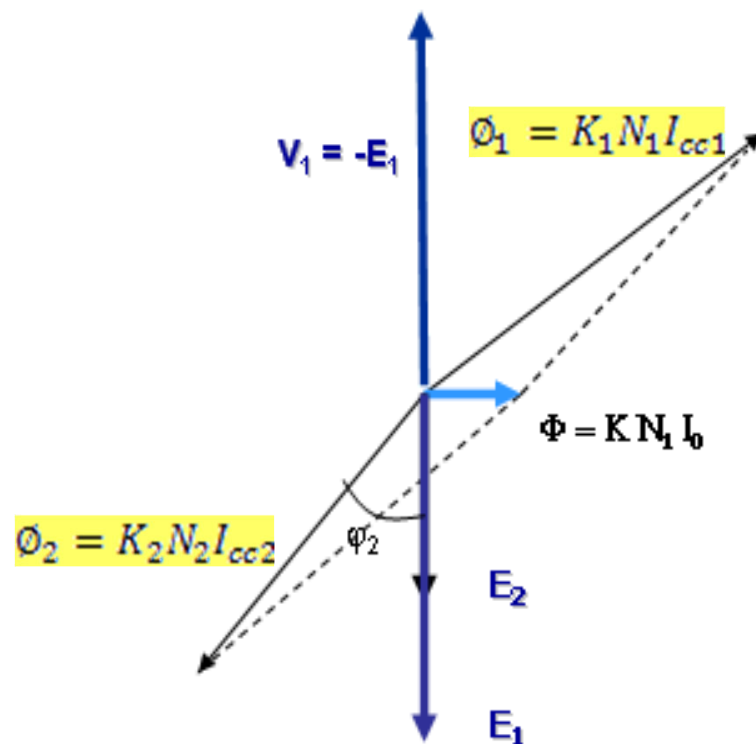
Entonces en vacío $s = 0$ y cada fase del estator se comporta como una bobina pura y la corriente absorbida I_0 es puramente magnetizante. El diagrama vectorial es el de la figura adjunta.

Funcionamiento con Rotor Parado

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

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{S} \cdot \underline{E}_2}{\underline{R}_2 + \underline{j s X}_2} = \frac{\underline{E}_2}{\frac{\underline{R}_2}{\underline{S}} + \underline{j X}_2} \quad \text{Se transforma en:} \quad \underline{I}_2 = \frac{\underline{1} \cdot \underline{E}_2}{\underline{R}_2 + \underline{j 1 X}_2} = \frac{\underline{E}_2}{\underline{R}_2 + \underline{j X}_2}$$

El diagrama vectorial correspondiente:



$$\underline{I}_2 (s=1) \Rightarrow I_{cc2}$$

$$\underline{I}_1 (s=1) \Rightarrow I_{cc1}$$

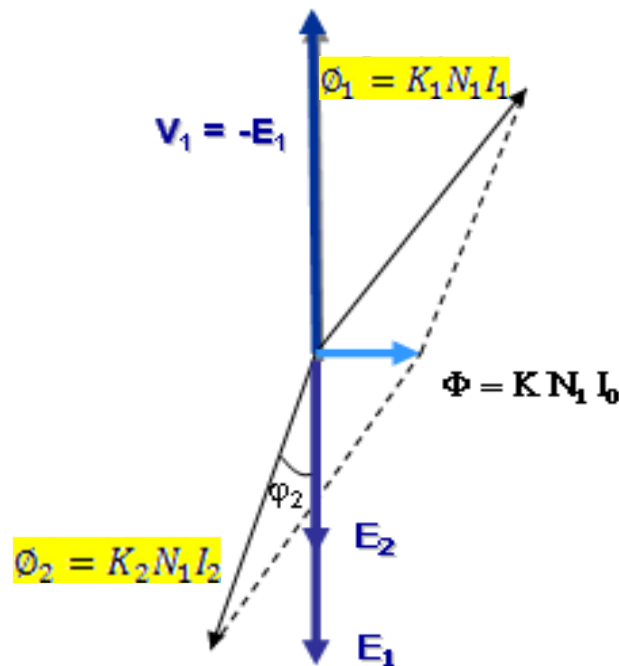
La corriente I_2 da lugar a una fmm en el rotor de valor $N_2 I_2$ que a su vez origina una fmm en el estator $N_1 I_1$. Como el flujo de la máquina debe de seguir siendo el mismo, pues $\Phi = K E_1 / f_1$ y ninguno de los valores cambia, las fmm deben ser tal que originen flujos que su resultante sea Φ .

Funcionamiento en Carga

Hemos visto que la ecuación correspondiente al rotor es:

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{S} \cdot \underline{E}_2}{\underline{R}_2 + \underline{j} \underline{s} \underline{X}_2} = \frac{\underline{E}_2}{\frac{\underline{R}_2}{\underline{S}} + \underline{j} \underline{X}_2}$$

El diagrama vectorial correspondiente:



La corriente I_2 da lugar a una fmm en el rotor de valor $N_2 I_2$ que a su vez origina una fmm en el estator $N_1 I_1$. Como el flujo de la máquina debe de seguir siendo el mismo, pues $\Phi = KE_1/f_1$ y ninguno de los valores cambia, las fmm 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

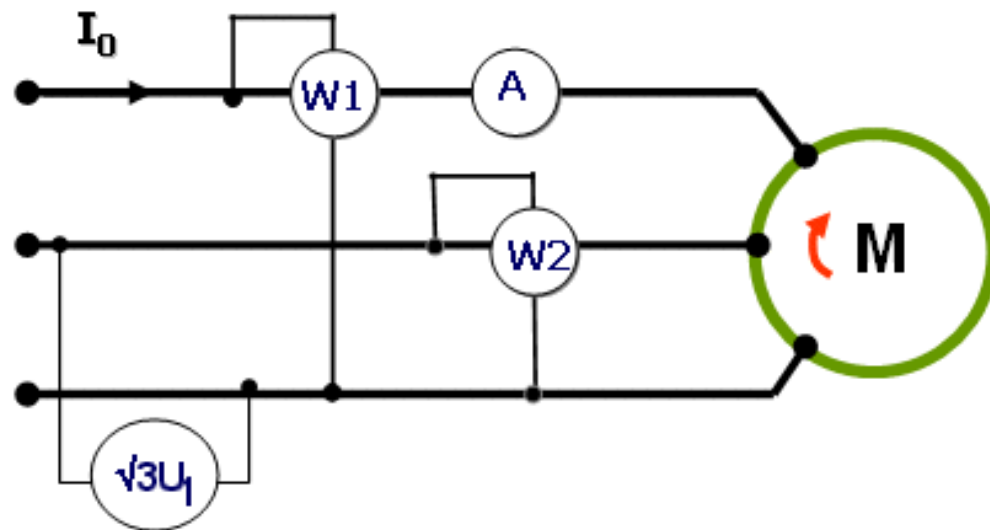
Ensayo de Vacío o de Rotor Libre

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 $\Rightarrow s \rightarrow 0 \Rightarrow R'_2 \cdot [(1-s) / s] \rightarrow$ es muy grande. En estas circunstancias la potencia P_0 consumida por el motor es:

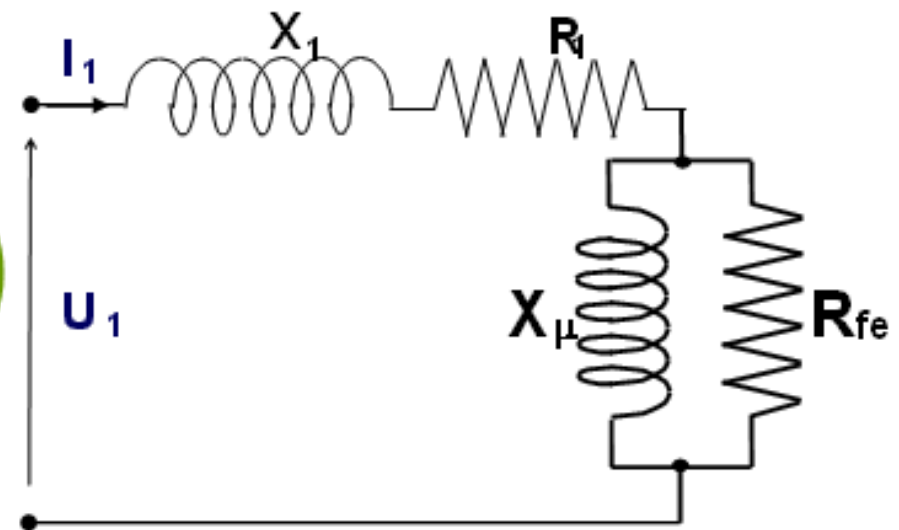
$$P_0 = W_1 + W_2 = P_{Cu1} + P_{Fe} + P_{Perd. Mec}$$

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

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



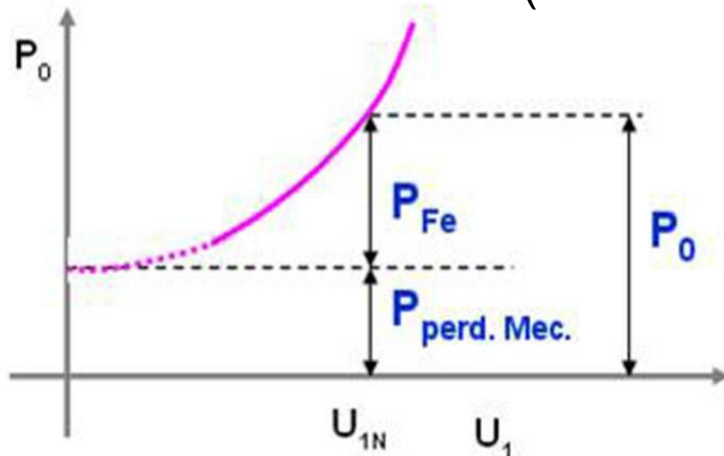
Ensayo en vacío



Circuito equivalente

SEPARACIÓN DE PÉRDIDAS

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. Sería conveniente separarlas, para ello, se procederá de la siguiente forma: comenzando con la tensión nominal de alimentación, se irán realizando sucesivas medidas de potencia a diferentes tensiones, hasta llegar a una tensión de alimentación de aproximadamente el 25% de la tensión nominal, construyendo una gráfica de tipo parabólico como la de 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 hierro serán nulas al no existir (o ser despreciable, flujo remanente).



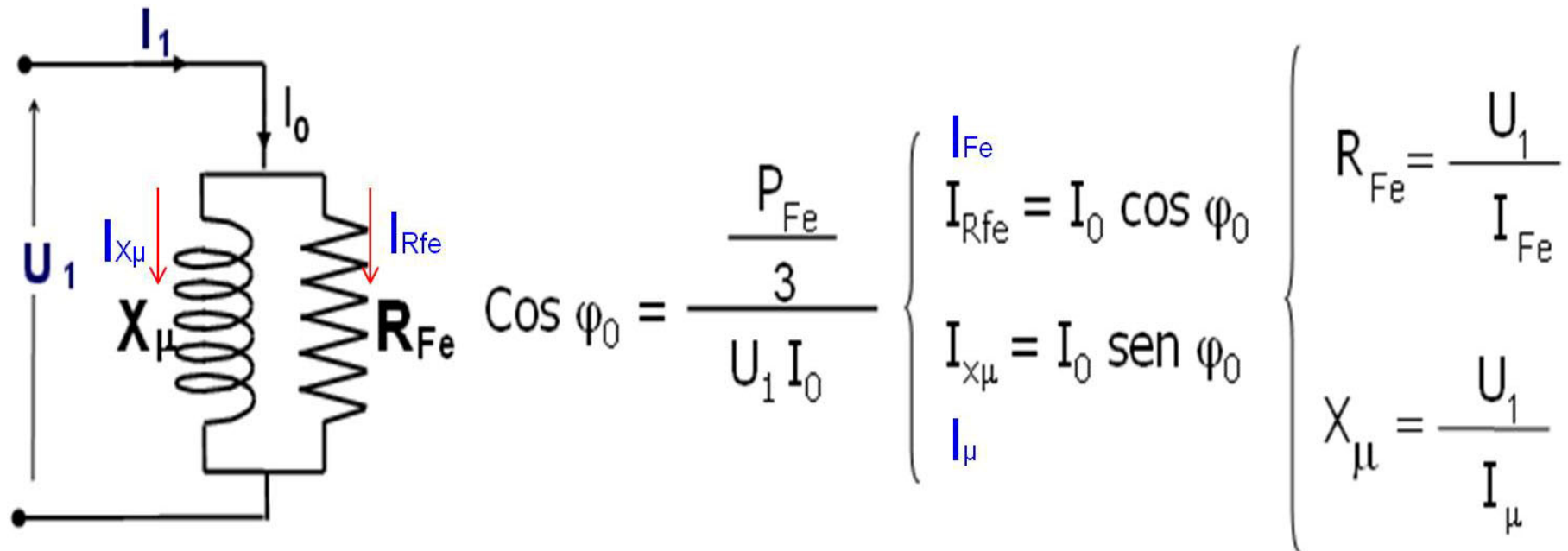
Por tanto, a la tensión nominal de alimentación, las pérdidas en el hierro serán la potencia total absorbida menos las pérdidas mecánicas.

Nótese que las pérdidas mecánicas se consideran constantes para diferentes

valores de la 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.

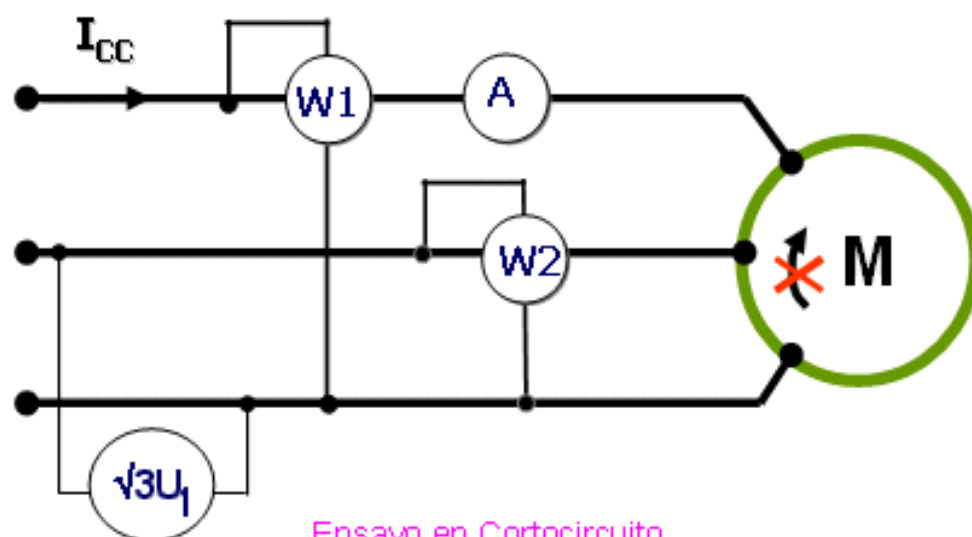
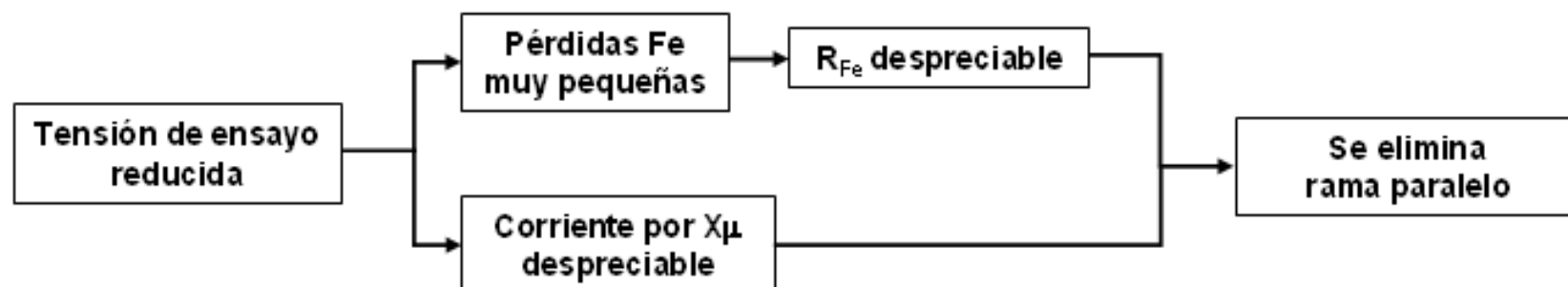
Ensayo de vacío o de rotor libre

Una vez separadas las pérdidas, se tiene:

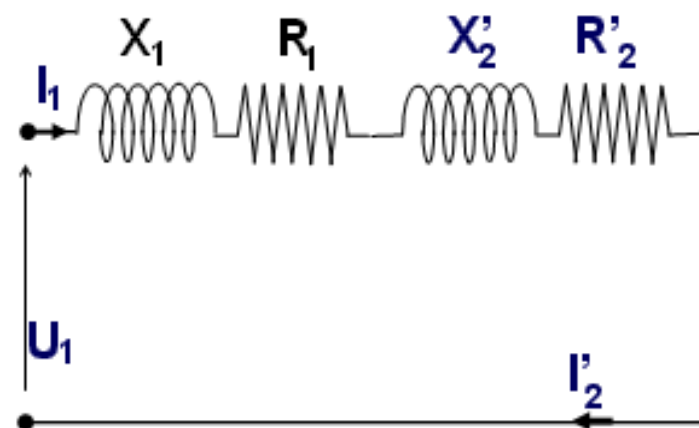


Ensayo de Cortocircuito o de Rotor Bloqueado

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 ($I_{CC} = I_{1N}$).



Ensayo en Cortocircuito



Circuito equivalente

Ensayo de cortocircuito o de rotor bloqueado

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

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

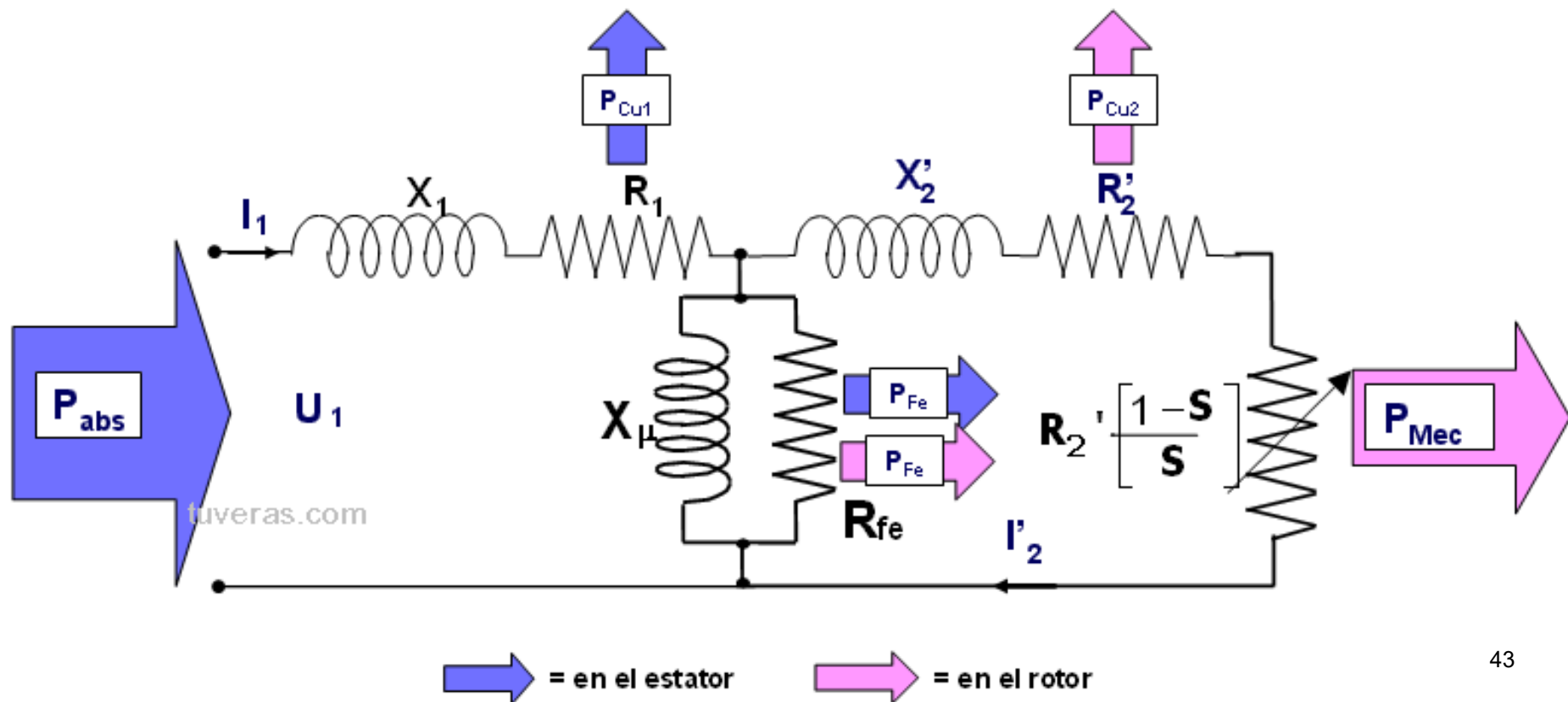
$$Z = \frac{U_{1cc}}{I_{1N}} \quad \left\{ \begin{array}{l} R_{cc} = Z \cos \varphi_{cc} \\ X_{cc} = Z \sin \varphi_{cc} \end{array} \right.$$

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 $X_1 = X'_2$

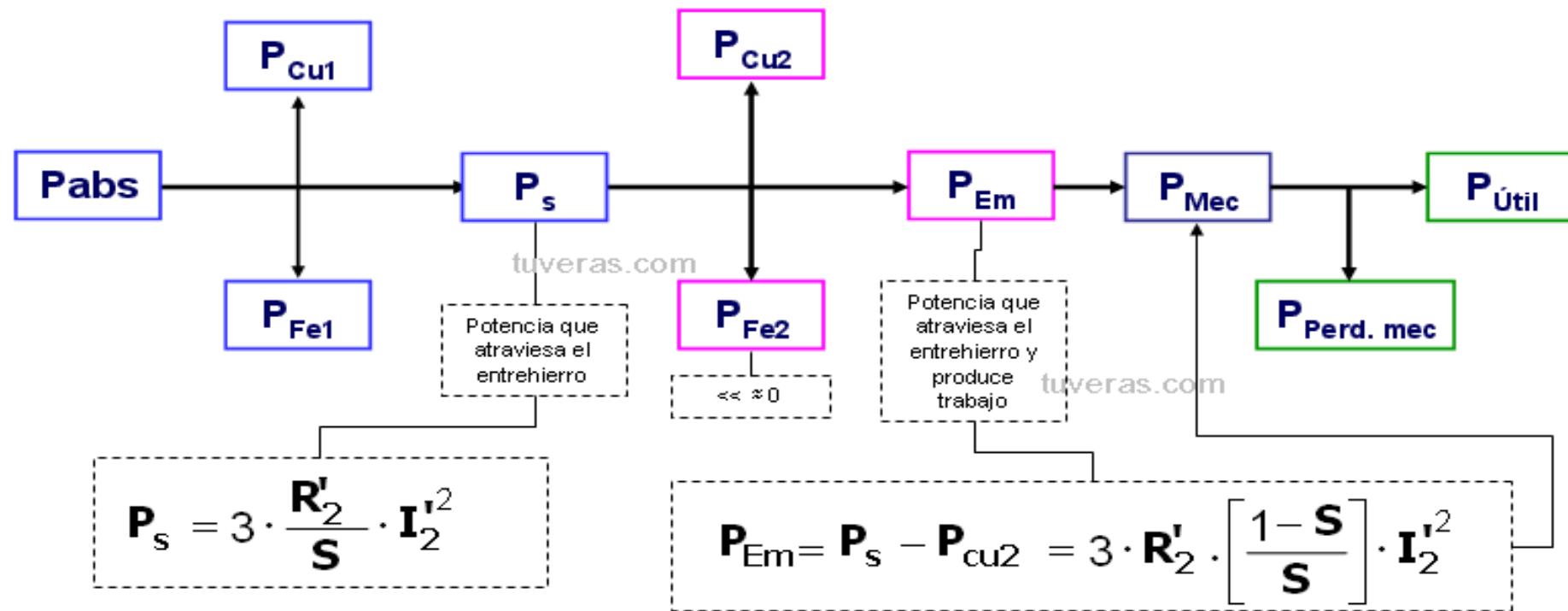
Máquinas asíncronas. Balance de potencias

Balance de Potencias



Máquinas asíncronas. Balance de potencias

Para un motor trifásico:

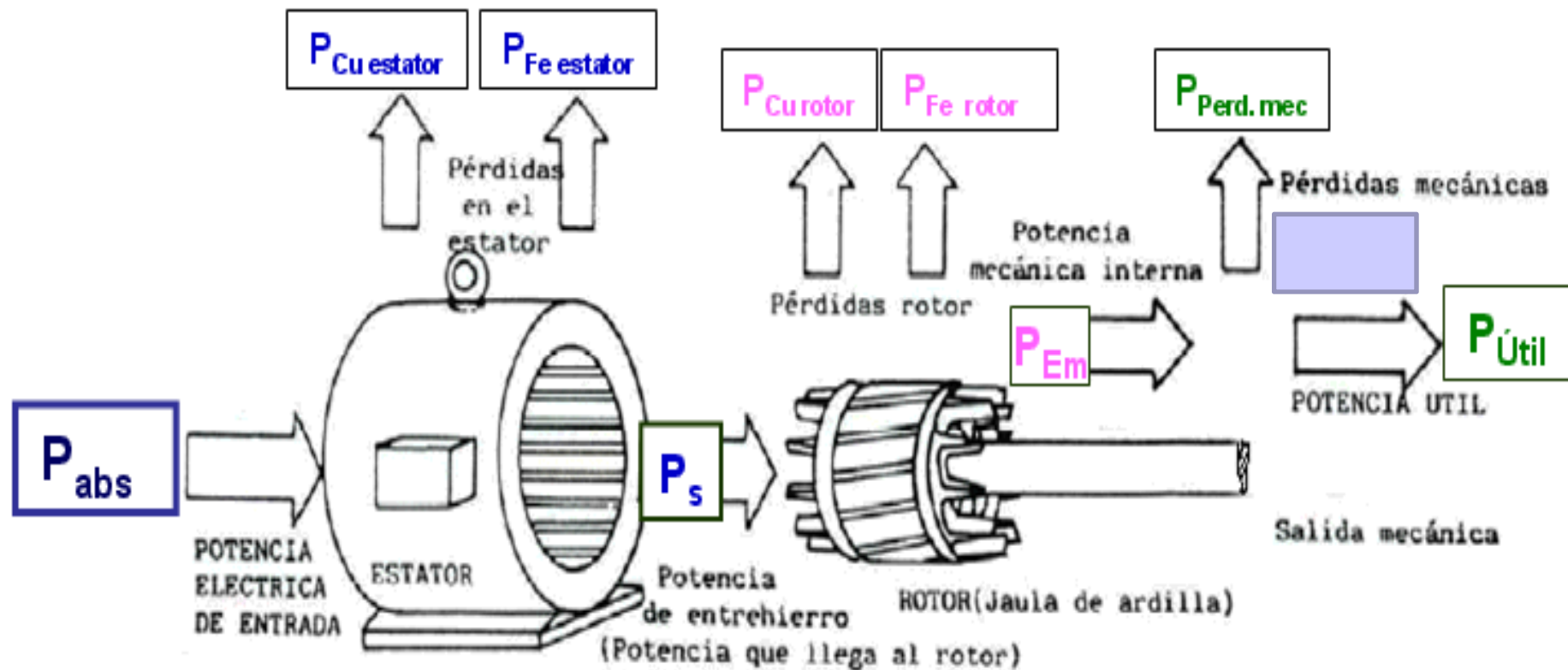


$$P_{Em} = P_s - P_{Cu2} = 3 \cdot R'_2 \cdot \left[\frac{1-S}{S} \right] \cdot I_2'^2$$

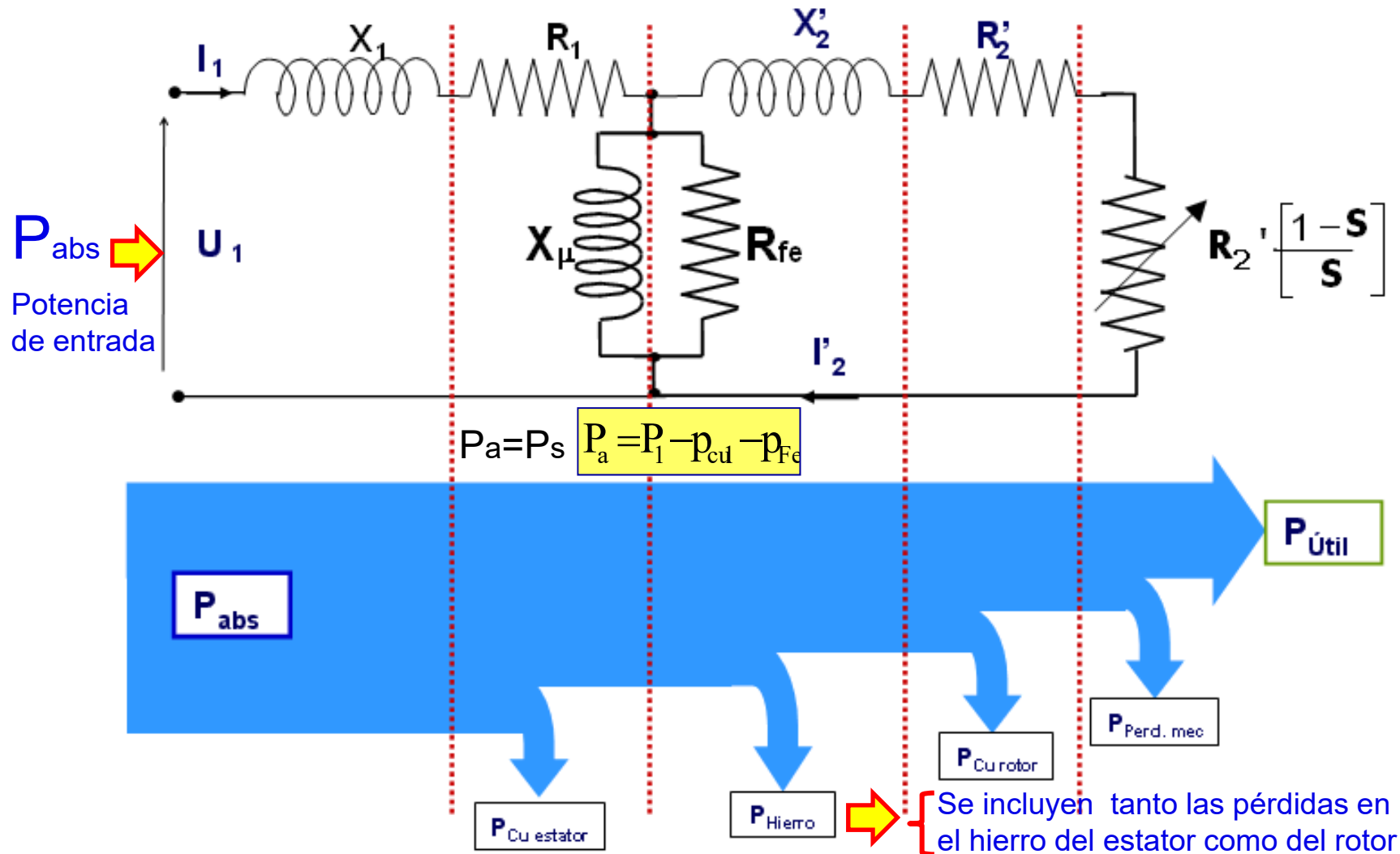
$$P_{Em} = P_s - P_{Cu2} = P_s - S \cdot P_s = [1-S] \cdot P_s$$

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

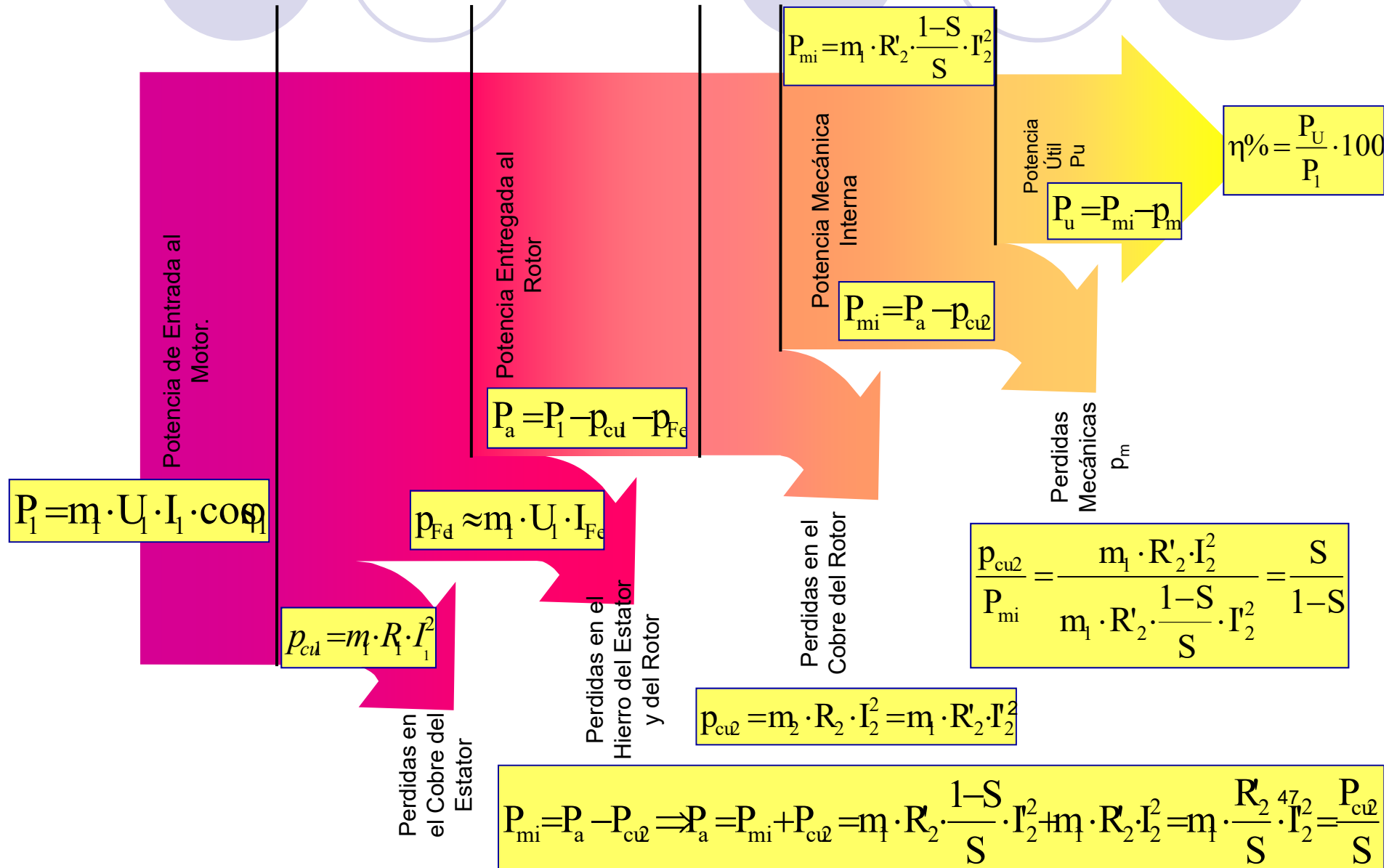
Máquinas asíncronas. Balance de potencias



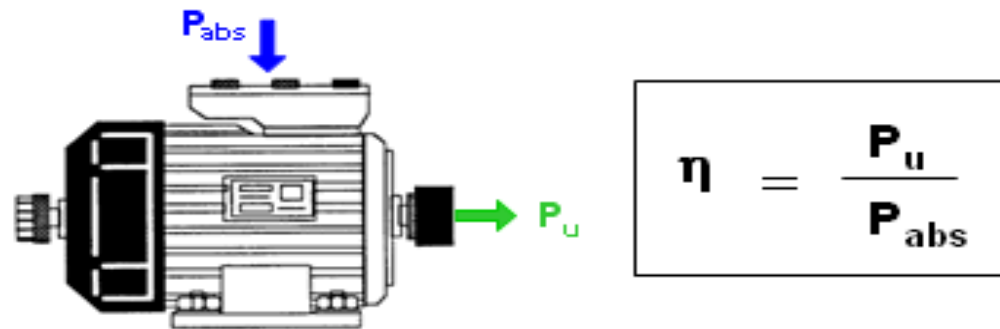
Máquinas asíncronas. Balance de potencias



Máquinas asíncronas. Balance de potencias



Rendimiento



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

Es interesante considerar el rendimiento del rotor:

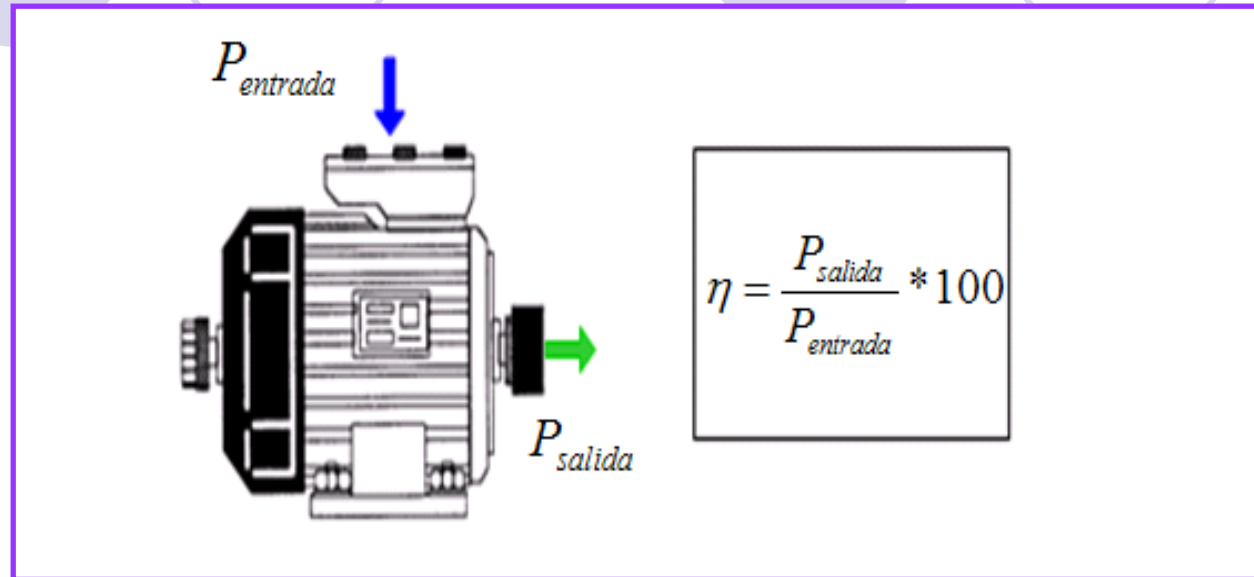
$$\eta_{rotor} = \frac{P_{Em}}{P_S}$$

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

$$\eta_r = 1 - S$$

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

Motores asíncronos. Rendimiento



$$P_{entrada} = P_{salida} + \sum Pérdidas$$

Los motores están diseñados para trabajar a su tensión nominal indicada en la placa de características.

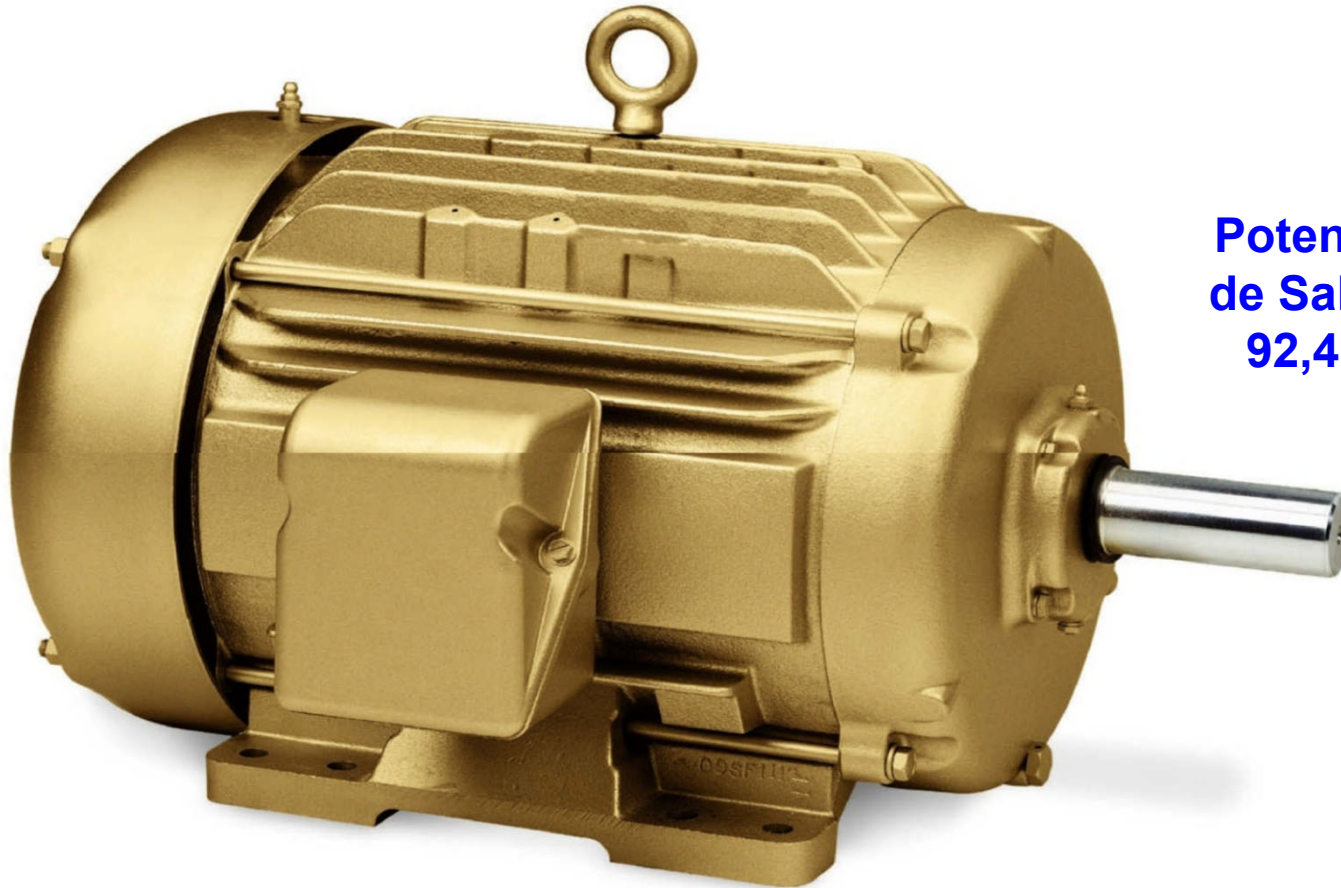
Se debe evitar en lo posible hacer trabajar los motores con tensiones que difieran en un $\pm 10\%$ del valor de diseño.

Motores asíncronos. Rendimiento

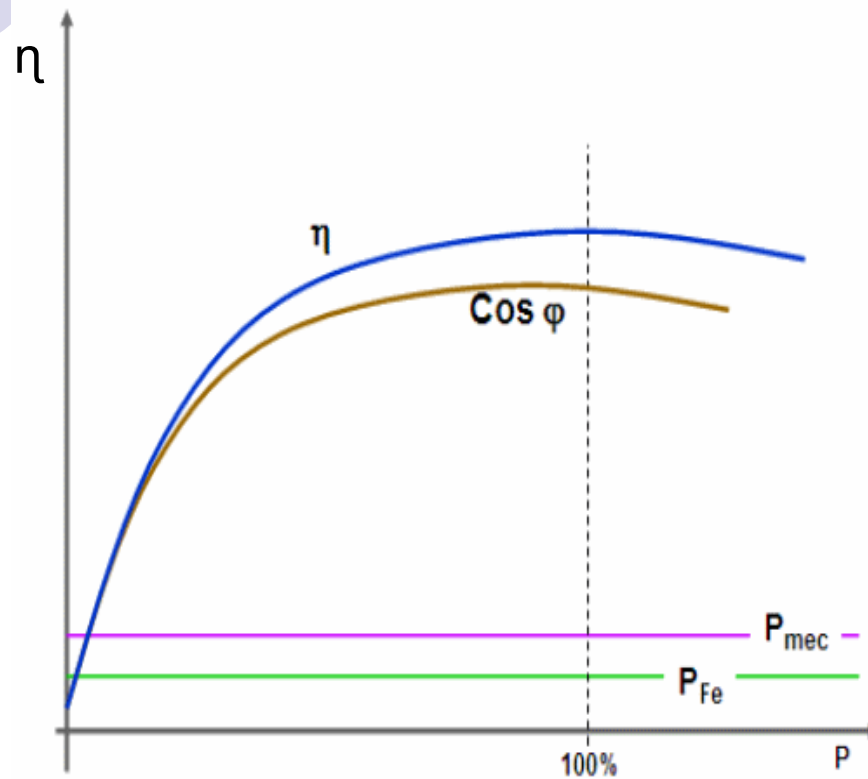
Pérdidas
7,6%

**Potencia
Entrada
100%**

**Potencia
de Salida
92,4%**

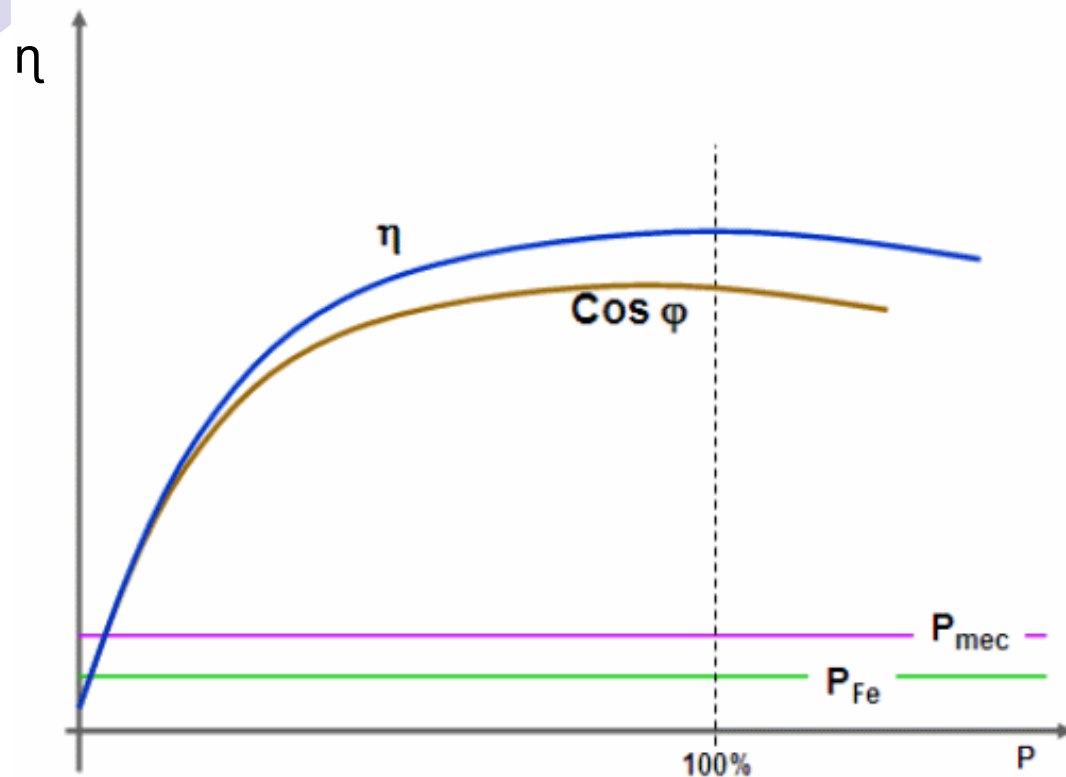


Motores asíncronos. Rendimiento



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

Motores asíncronos. Rendimiento



La eficiencia (rendimiento) de los motores varía con la carga y será menor si el motor trabaja con bajos porcentajes de la carga nominal; por lo tanto, **las pérdidas porcentuales serán menores si trabaja cerca de su potencia nominal.**

Motores Asíncronos de Alta Eficiencia

La tecnología también ha aplicado sus últimos avances para una mejor operación de los motores eléctricos, tales como los Motores de Alta Eficiencia.

Ventajas

- ➡ Menores Pérdidas.
- ➡ Menor Temperatura de Operación.
- ➡ Mayor Vida Útil.
- ➡ Mayor Capacidad de Sobrecarga.
- ➡ Mejor operación que un motor Standard en condiciones ambientales críticas (altas temperaturas, zonas de altitud)
- ➡ Mejor respuesta ante las variaciones de tensión (menor sobrecalentamiento).

Ventajas de los Motores de Alta Eficiencia

- El hecho de que se tenga una eficiencia mayor significa que se disminuye los costos de operación del motor y se puede recuperar la inversión adicional en un tiempo razonable, sobre todo si se opera a una carga cercana a la potencia nominal. Recuerde que en un año el costo de la energía es aproximadamente seis veces el costo de compra del motor.
- Los motores de alta eficiencia poseen generalmente un menor deslizamiento (mayor velocidad de operación) que los motores de eficiencia estándar, debido a los cambios que se producen en los parámetros del motor. La mayor velocidad puede ser ventajosa en muchos casos, pues mejora la ventilación.
- Los motores de alta eficiencia son normalmente más robustos y mejor contruidos que los motores estándar, lo que traduce en menores gastos en mantenimiento y mayor tiempo de vida.

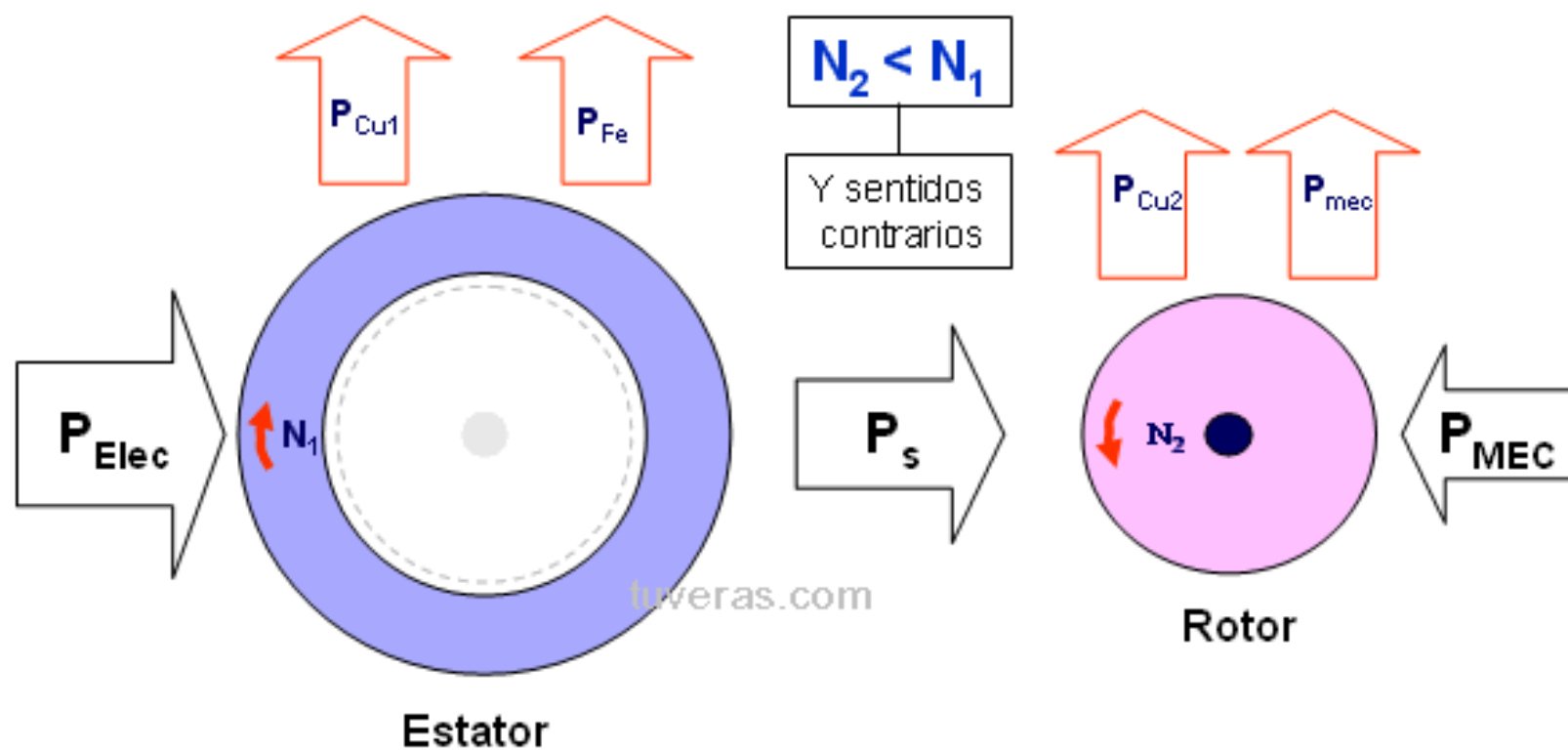
Limitaciones de los Motores de Alta Eficiencia

- ➡ El hecho de que los motores de alta eficiencia operan a una velocidad mayor, puede ocasionar un incremento en la carga, sobre todo cuando se accionan ventiladores o bombas centrífugas, de hecho debe valorarse en cada situación
- ➡ El par de arranque y el par máximo son en algunos diseños ligeramente mayores y en otros ligeramente menores, por lo tanto es necesario analizar de forma detallada cada aplicación en particular.

Limitaciones de los Motores de Alta Eficiencia

- La corriente de arranque suele ser mayor. Esto puede provocar que se sobrepasen los límites máximos de caída de voltaje en la red. También puede influir en la capacidad de los equipos de maniobra, aunque muchas veces se puede operar con los mismos que se usan con los motores estándar y en ocasiones sólo resulta necesario cambiar los elementos térmicos.
- El factor de potencia del motor puede ser menor que un motor estándar. Un estudio reciente realizado por Bonnett (1997) encontró que los motores de alta eficiencia construidos en USA, en el intervalo de 3 a 10 HP tienen un factor de potencia mayor que los estándares, inferior en el intervalo de 15 a 40 HP, aproximadamente igual de 50 a 100 HP y de nuevo menor de 125 HP en adelante.

Funcionamiento como Freno

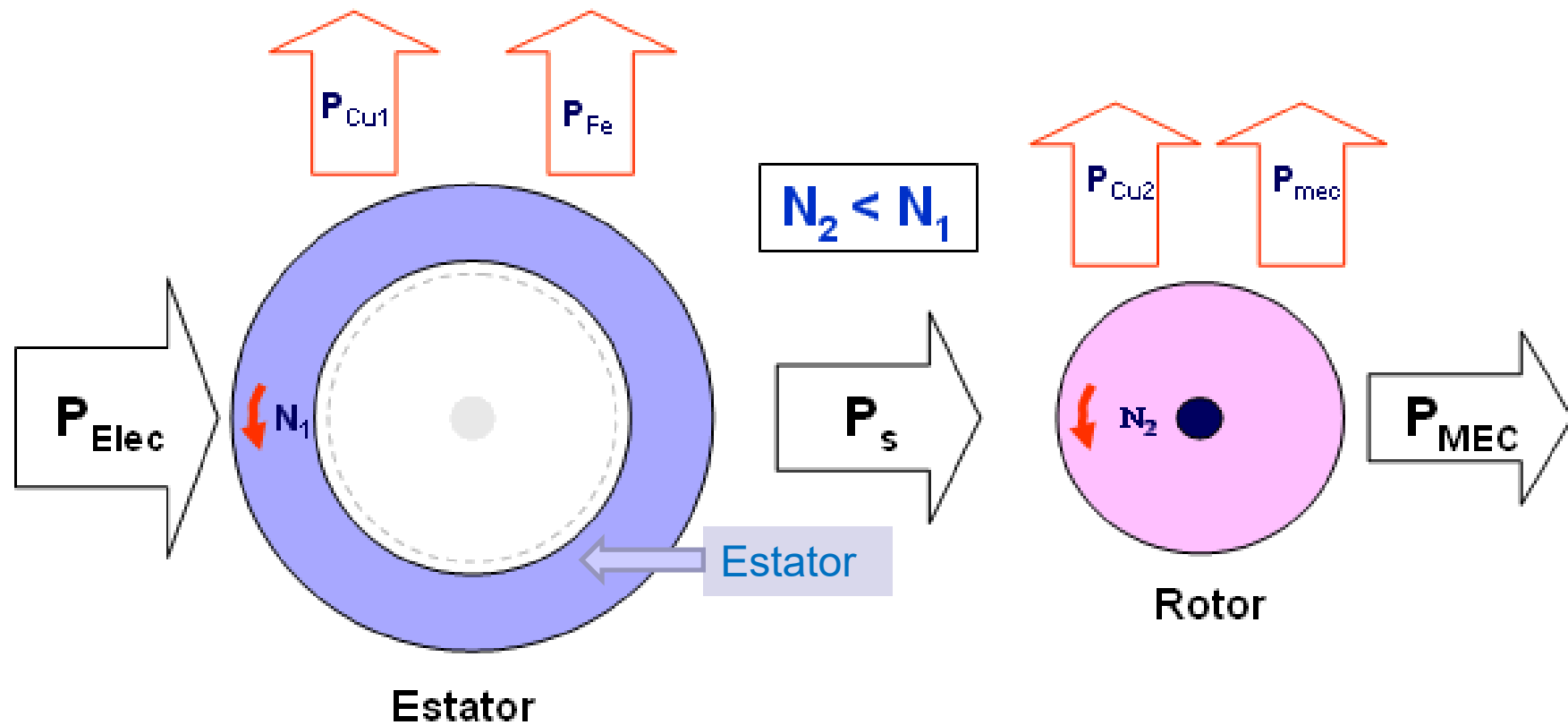




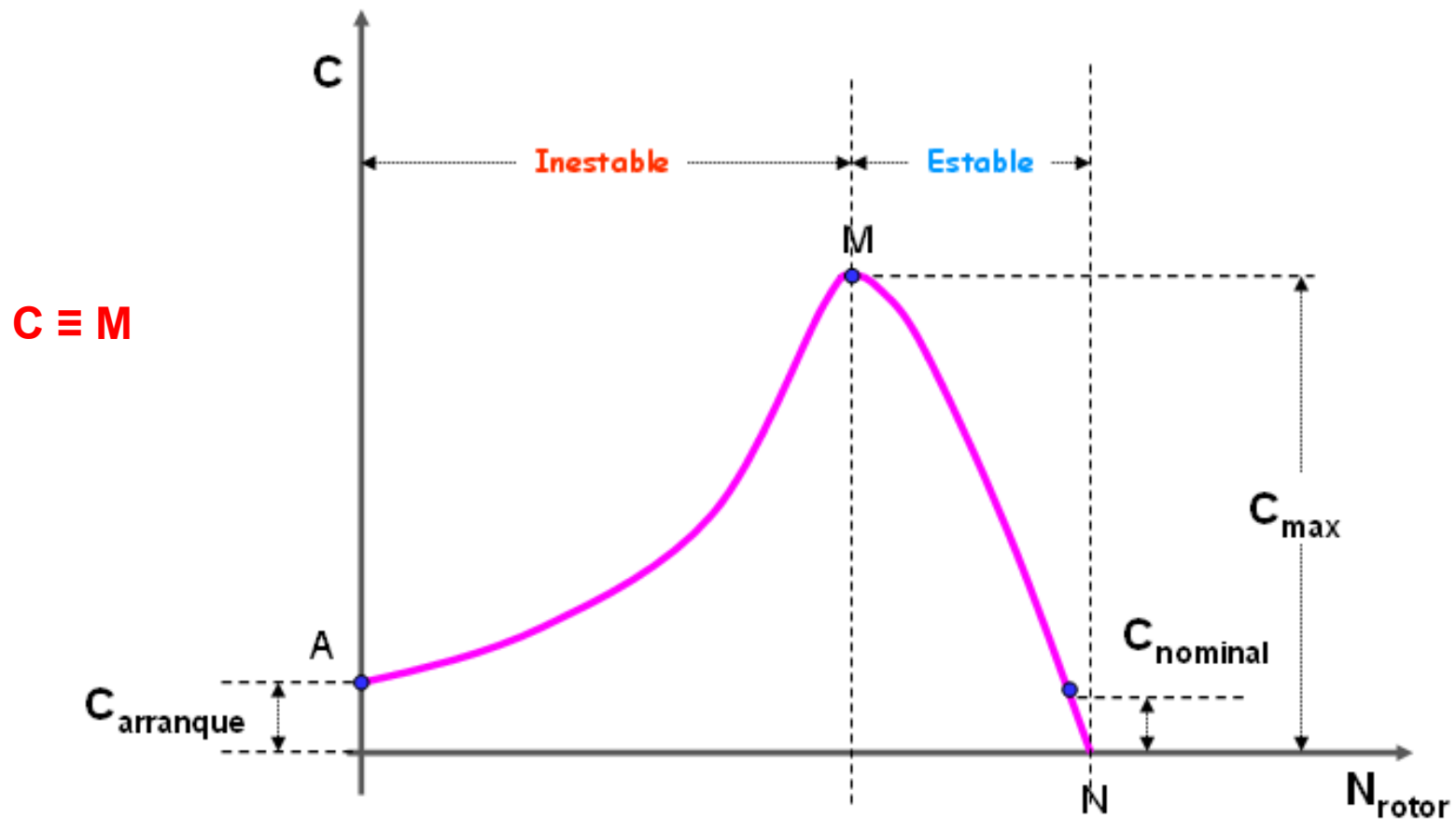
FUNCIONAMIENTO COMO FRENO

Este régimen de frenado se utiliza cuando se desea parar rápidamente un motor. La maniobra se realiza **invirtiendo 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 del arranque.

Funcionamiento como Motor



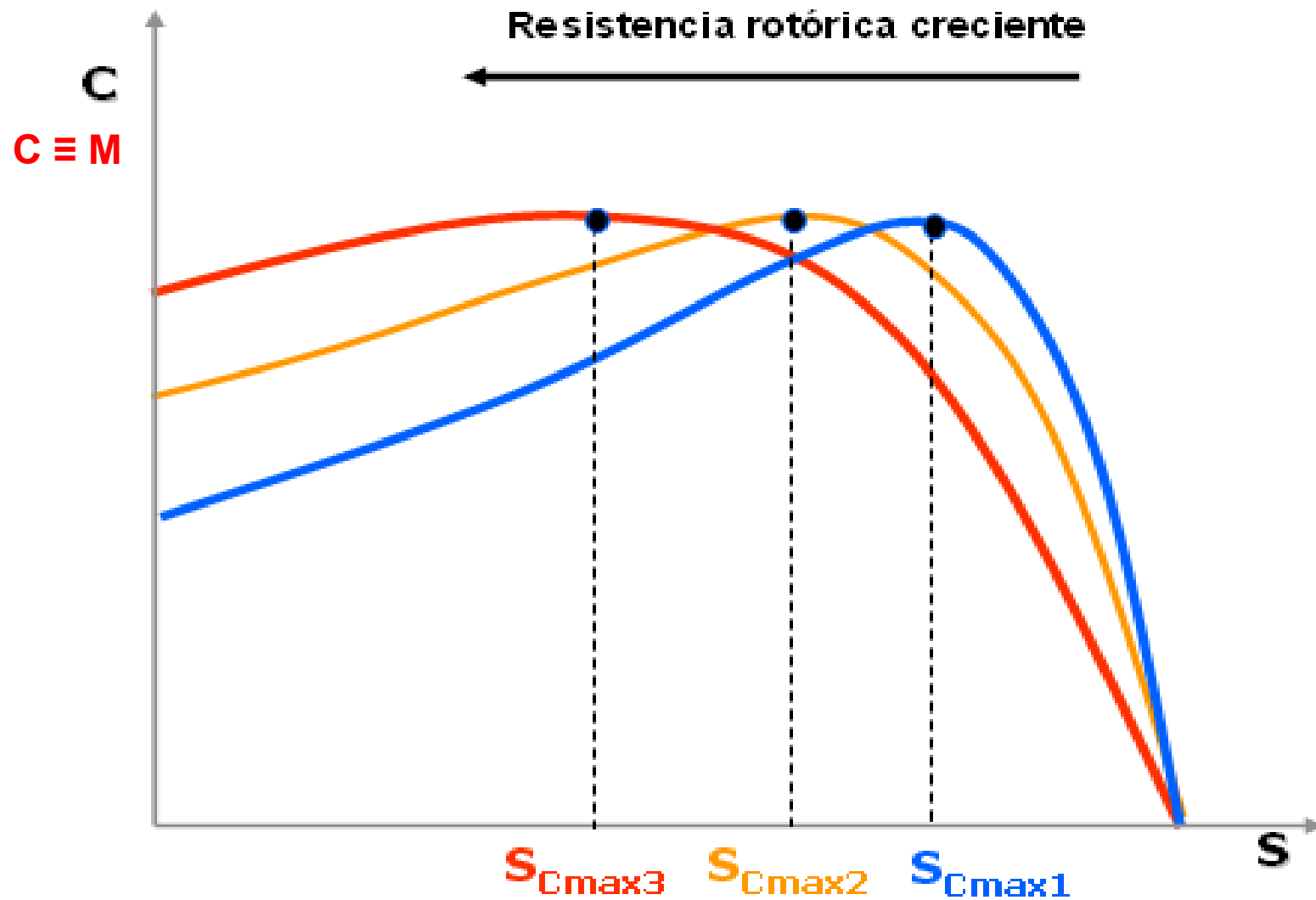
FUNCIONAMIENTO COMO MOTOR

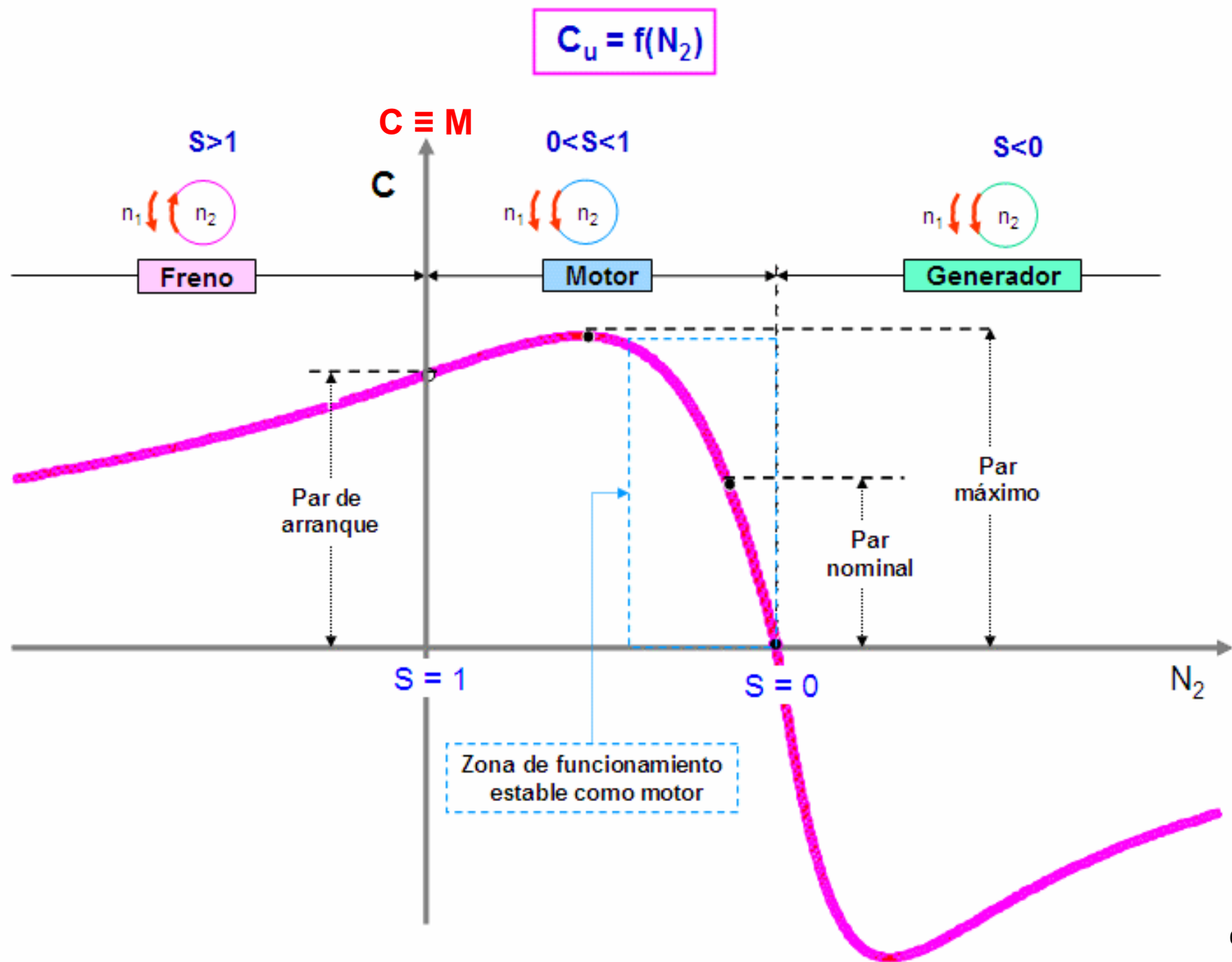


Zona estable MN: aumento del par conforme el motor disminuye su velocidad

Zona inestable MA: disminución del par conforme el motor disminuye su velocidad

FUNCIONAMIENTO COMO MOTOR

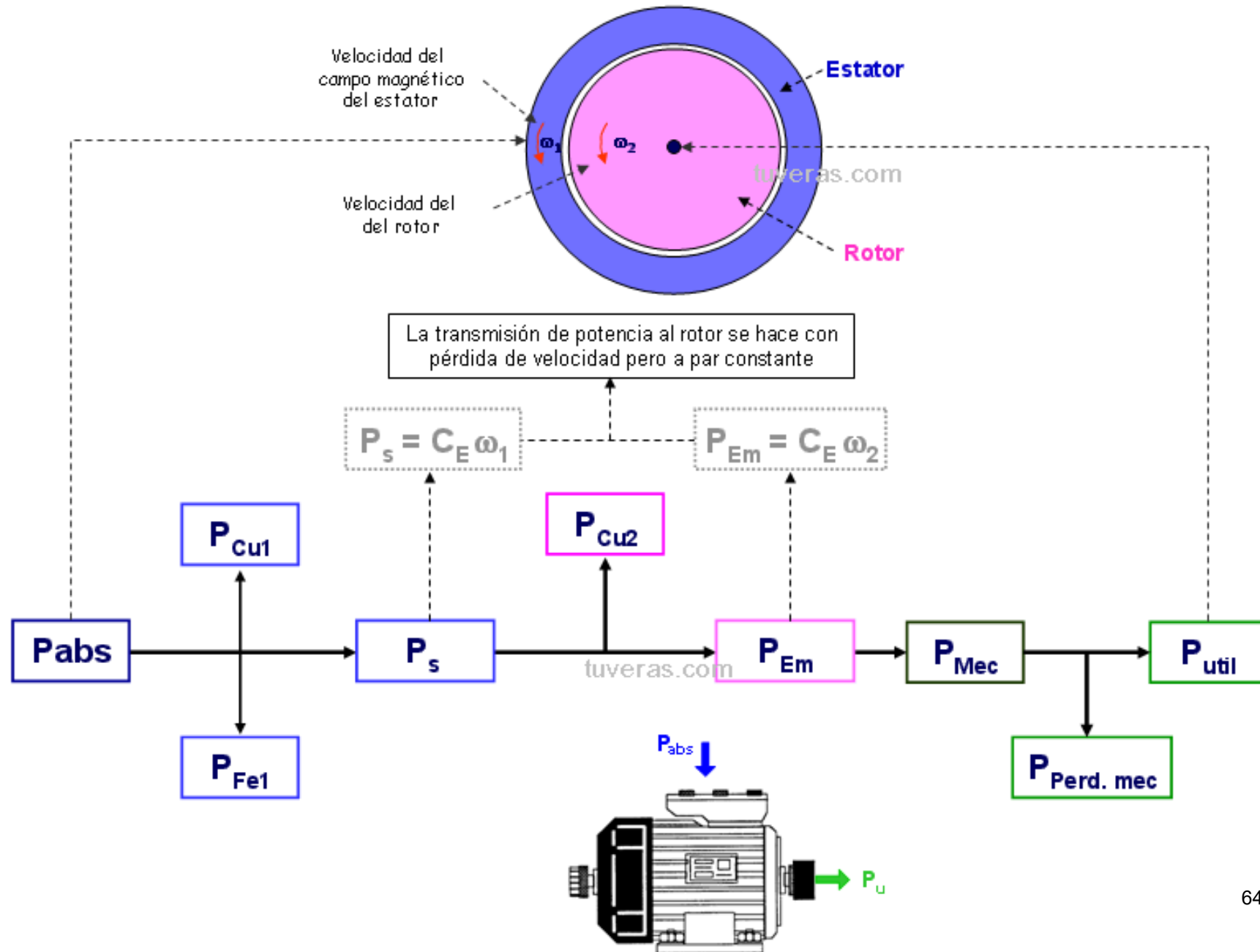




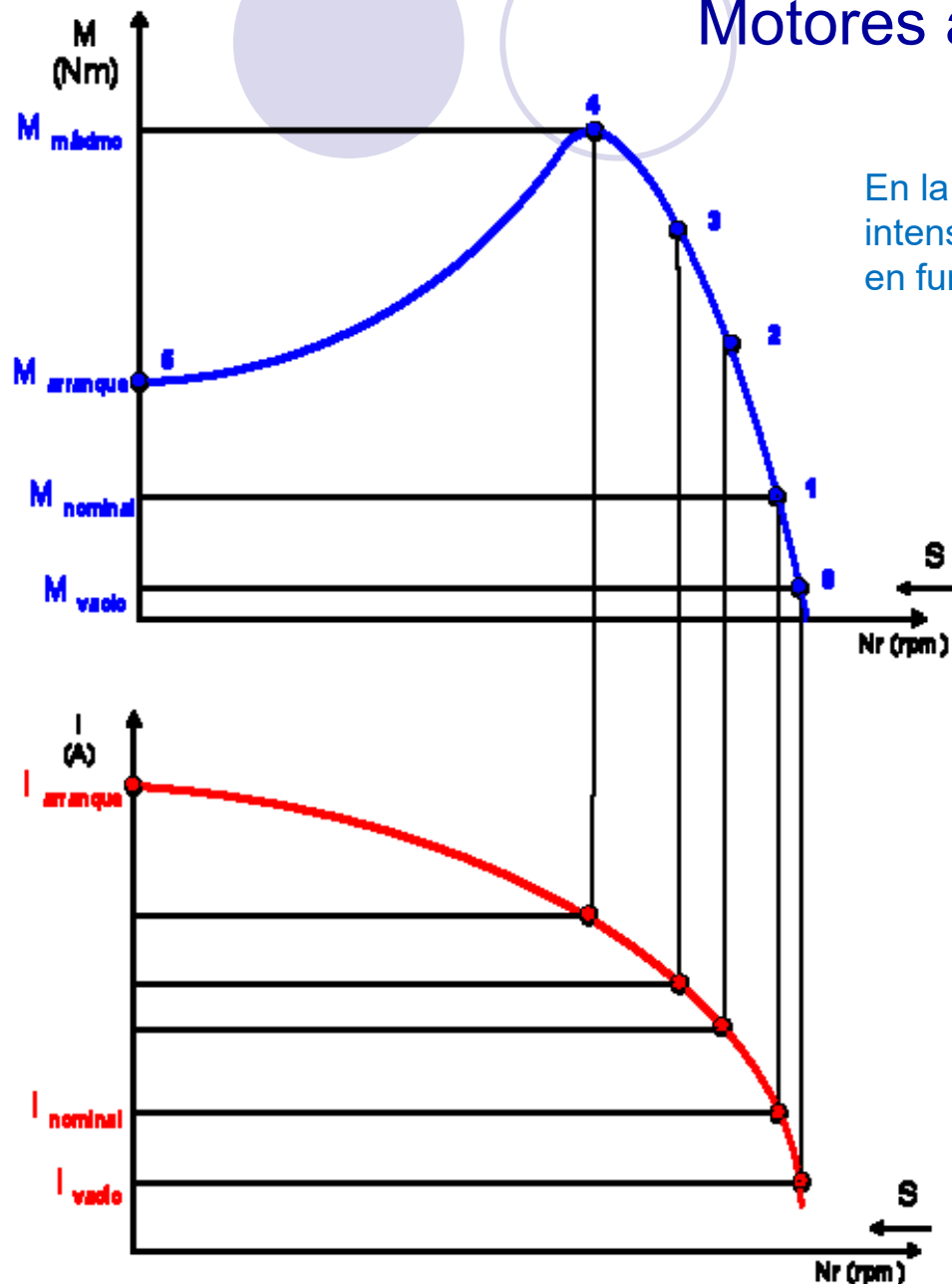
FUNCIONAMIENTO COMO MOTOR

- ☞ 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 rotórica R_2'
- ☞ EL deslizamiento al que se produce el par máximo **si depende de la resistencia** rotórica R_2' . Esta propiedad se usa para el arranque mediante inserción de resistencias en máquinas de rotor bobinado
- ☞ El par de arranque tiene que ser superior al M_r para permitir que el motor se ponga en marcha **$M_a > M_r (s=1)$**
- ☞ Para un determinado deslizamiento el par varía con el **cuadrado de la tensión**

FUNCIONAMIENTO COMO MOTOR



Motores asíncronos. Funcionamiento

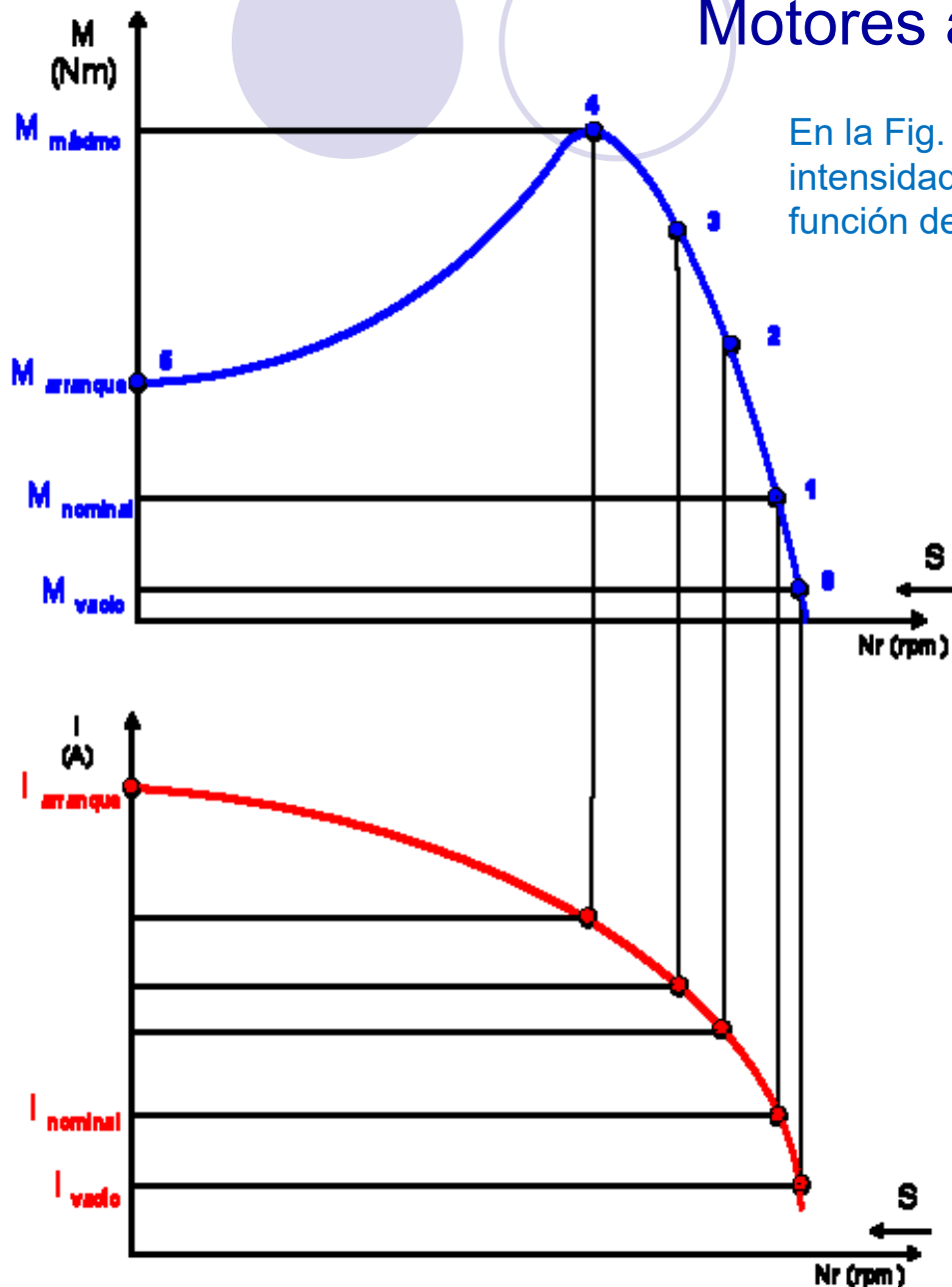


En la Fig. se puede ver la curva del par motor (M) y la de intensidad (I) (intensidad estatórica absorbida de la red), en función de la velocidad del motor (N_r).

Punto 1: es el **punto de funcionamiento nominal**. La velocidad es alta y el deslizamiento bajo. Como es lógico en este punto la intensidad es la nominal, luego el motor está preparado para soportarla indefinidamente sin calentamientos excesivos.

Punto 2: en este punto el motor debe de producir un par mayor porque está más cargado (la carga “pesa más”), lo que supone más consumo de intensidad. La velocidad es más baja y el deslizamiento mayor. El motor está **sobrecargado** y los calentamientos pueden ser peligrosos si la situación se mantiene durante mucho tiempo. Además estos calentamientos suponen una pérdida de energía, luego el rendimiento en este punto es malo.

Motores asíncronos. Funcionamiento



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).

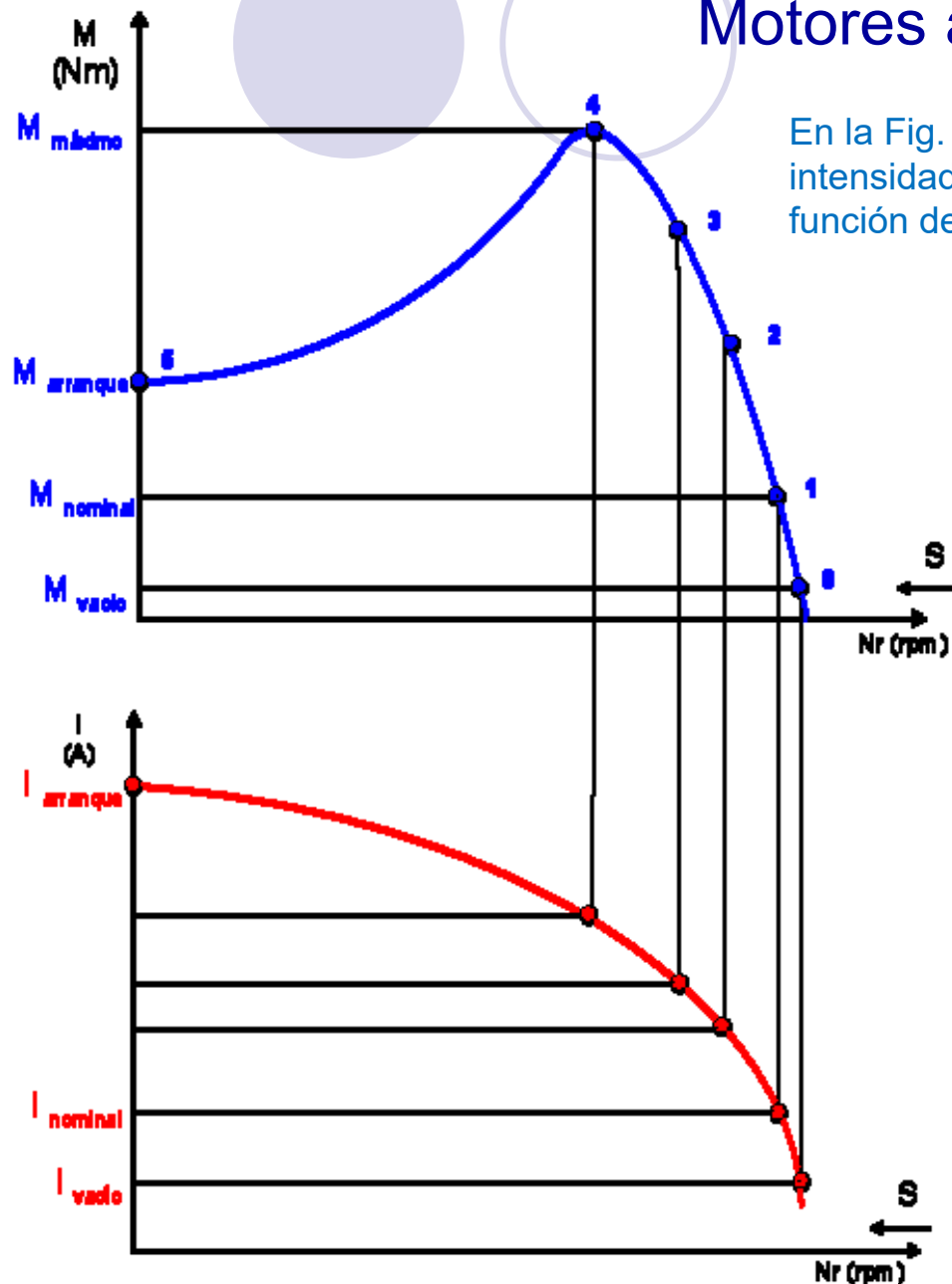
Punto 3: el par y la intensidad son aún mayores que en el pto 2, luego el motor está **muy sobrecargado** corriendo peligro de quemarse. La velocidad es más baja y el deslizamiento mayor.

Punto 4: es el punto de par máximo, donde la intensidad es elevadísima, al igual que los calentamientos. La velocidad es más baja que en el pto 3 y el deslizamiento mayor. El motor no puede permanecer en este punto porque se quemaría rápidamente.

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

Motores asíncronos. Funcionamiento

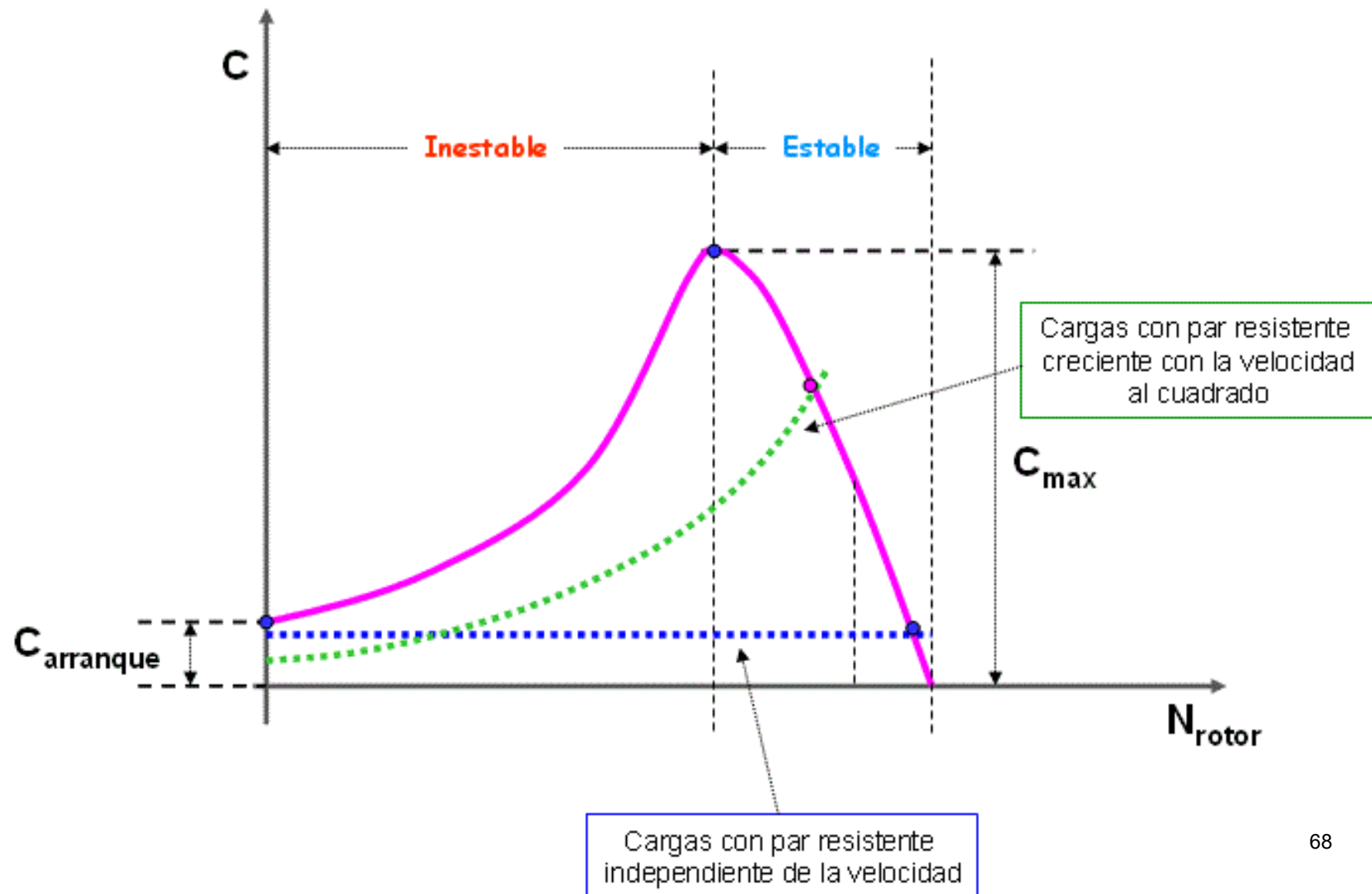
En la Fig. se puede ver la curva del par motor (M) y la de la intensidad (I) (intensidad estática absorbida de la red), en función de la velocidad del motor (N_r).



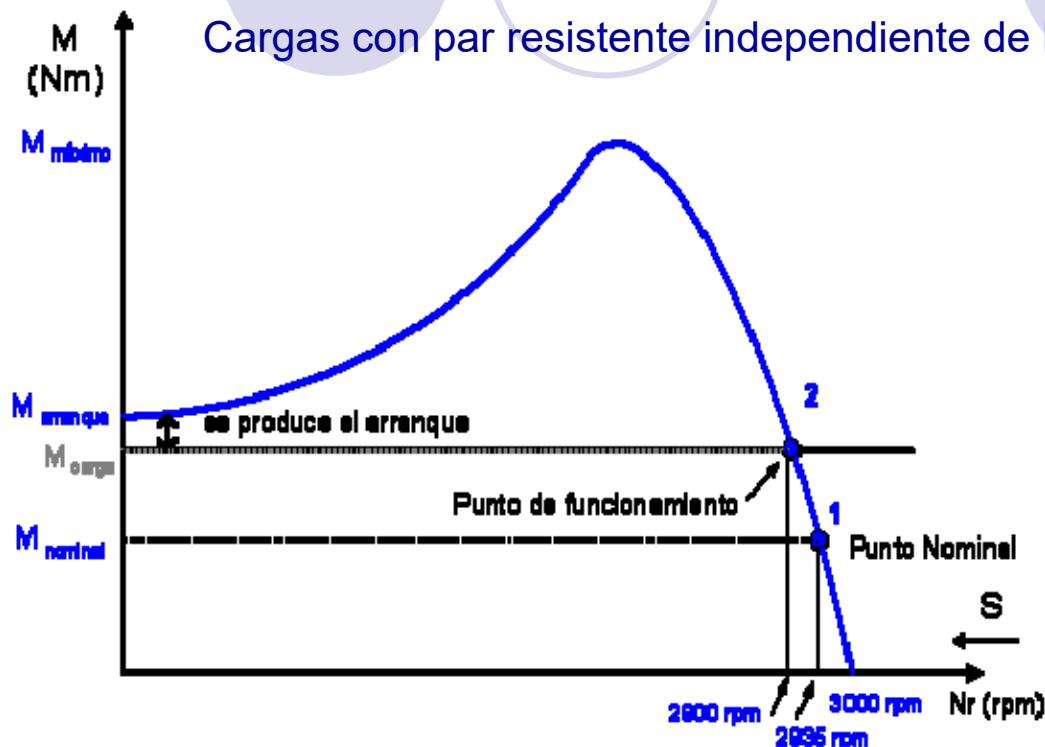
Punto 6: funcionamiento en vacío, sin carga mecánica acoplada al eje. El motor solo tiene que vencer los rozamientos, luego la **velocidad** es muy **elevada** (próxima a la de sincronismo). La intensidad por este motivo es la mínima del motor. El **deslizamiento** es **muy bajo**.

En general se puede decir que un motor trifásico de inducción presenta buenas características a velocidades altas y deslizamientos bajos. Por encima del punto nominal se puede sobrecargar en un 125 % durante un tiempo, sin que los calentamientos sean peligrosos.

Motores asíncronos. Funcionamiento



Motores asíncronos. Funcionamiento

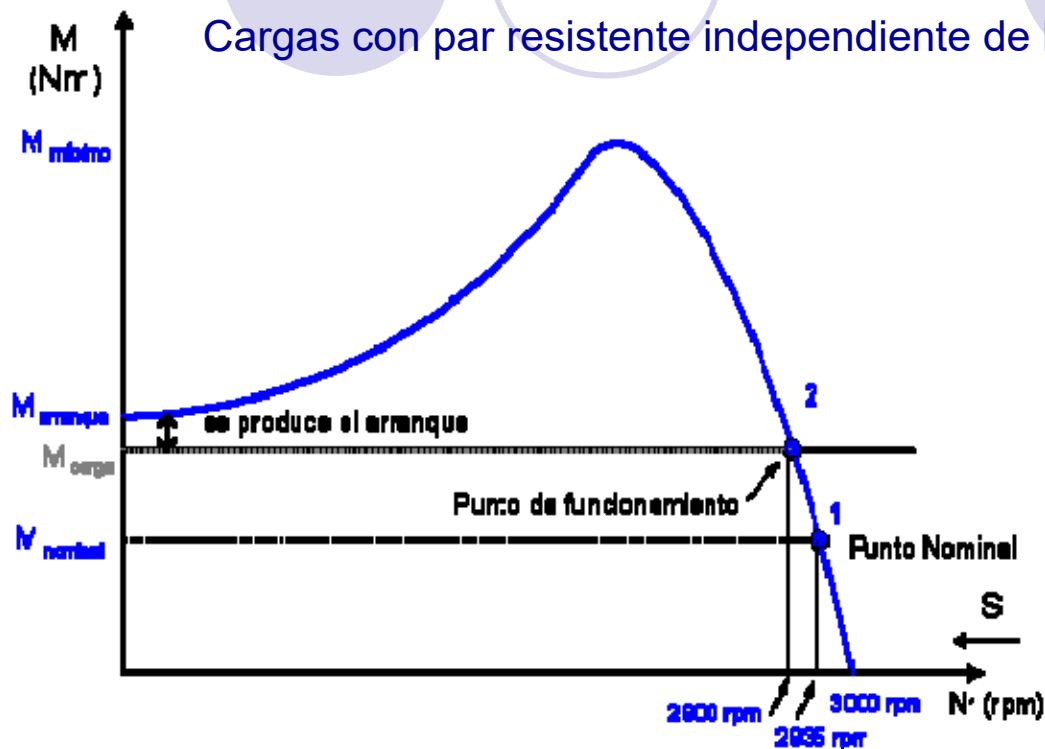


En la Fig. se puede ver un motor de 2 polos y 3000 (rpm) de velocidad de sincronismo. En el arranque el par del motor supera al resistente, luego el motor arrancará. El punto de **funcionamiento** del motor será la intersección entre la curva de par del motor y del par resistente de la carga; este punto es el **punto 2** donde la velocidad es 2900 (rpm). Luego el motor acelera desde 0 hasta llegar a 2900 (rpm), permaneciendo a esta velocidad hasta que ocurra algún cambio en sus condiciones de trabajo.

Observando el **punto 1**, o punto **nominal**, cuya velocidad es 2935 (rpm). ¿Qué diferencias hay entre el punto de trabajo (punto 2) y el punto nominal?

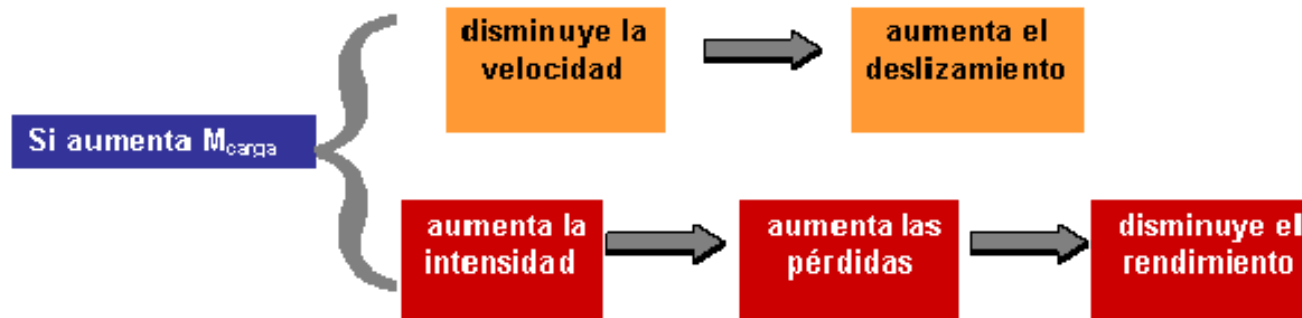
- ➡ El motor genera más par y gira más despacio en el punto 2.
- ➡ Por este motivo, absorbe algo más de intensidad que en el punto nominal, lo cual quiere decir que está **ligeramente sobrecargado**.
- ➡ El deslizamiento en el punto 2 es mayor:

Motores asíncronos. Funcionamiento

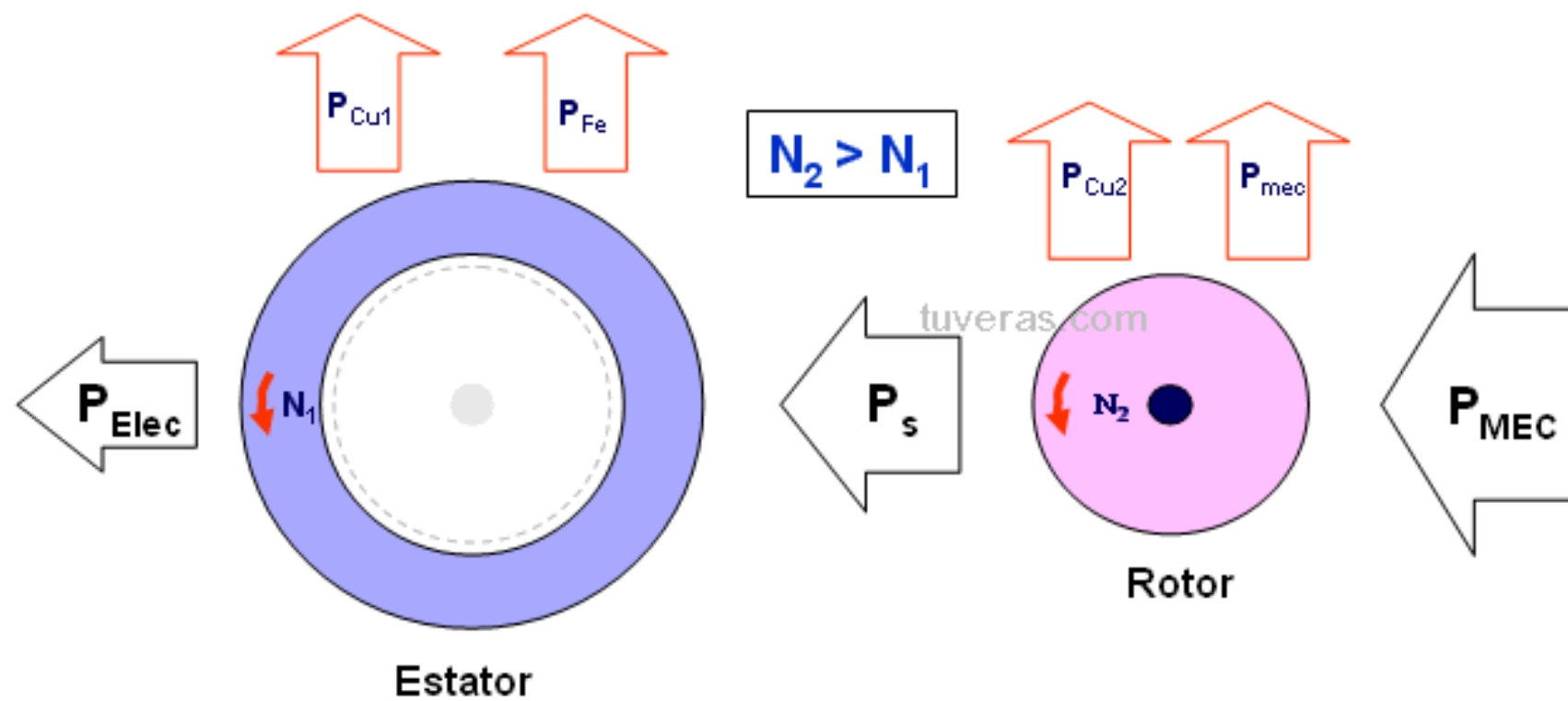


El motor funcionando en el **Punto 2** está ligeramente sobrecargado, consumiendo algo más de intensidad que la nominal.

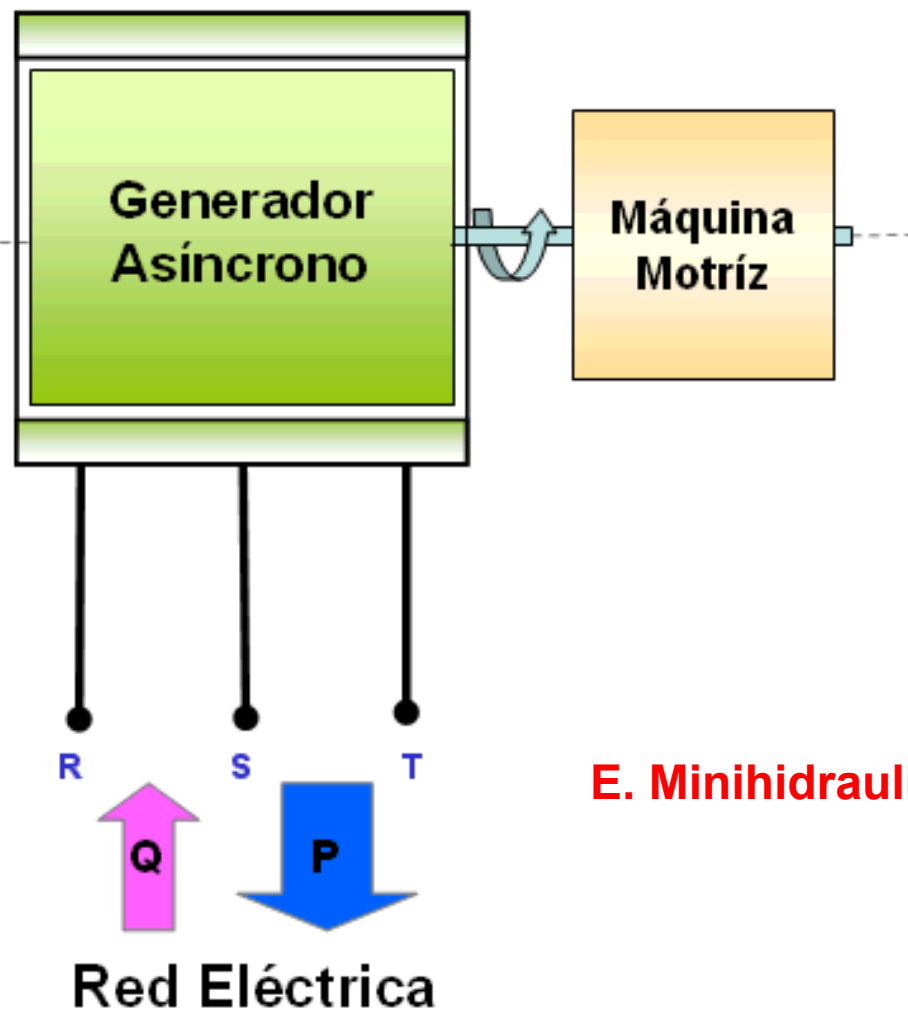
¿Es esto peligroso? ¿Corre riesgo de quemarse?. No si la sobrecarga es ligera, porque los fabricantes diseñan los motores con la capacidad de sobrecargarse en un 125 % aproximadamente, durante un determinado tiempo, sin que los calentamientos sean excesivos. Ante sobrecargas mayores entonces la vida del motor corre serio peligro y serán las protecciones las que deban de actuar y desconectarlo de la red.



Funcionamiento como Generador



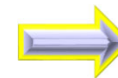
FUNCIONAMIENTO COMO GENERADOR



E. Eólica



E. Minihidraulica



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**:

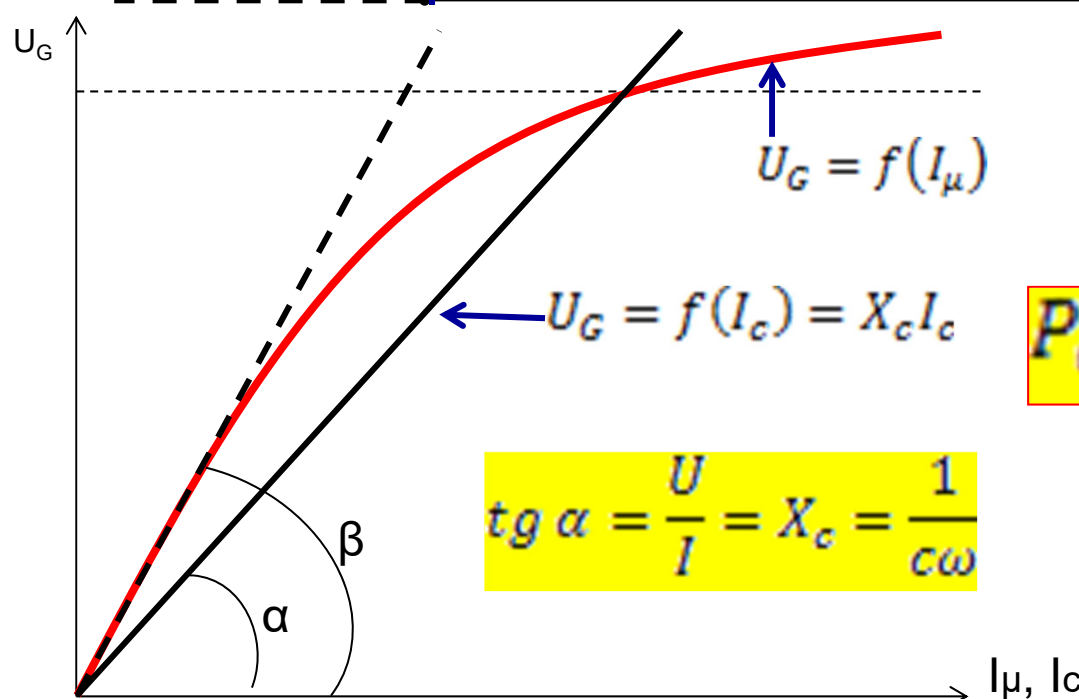
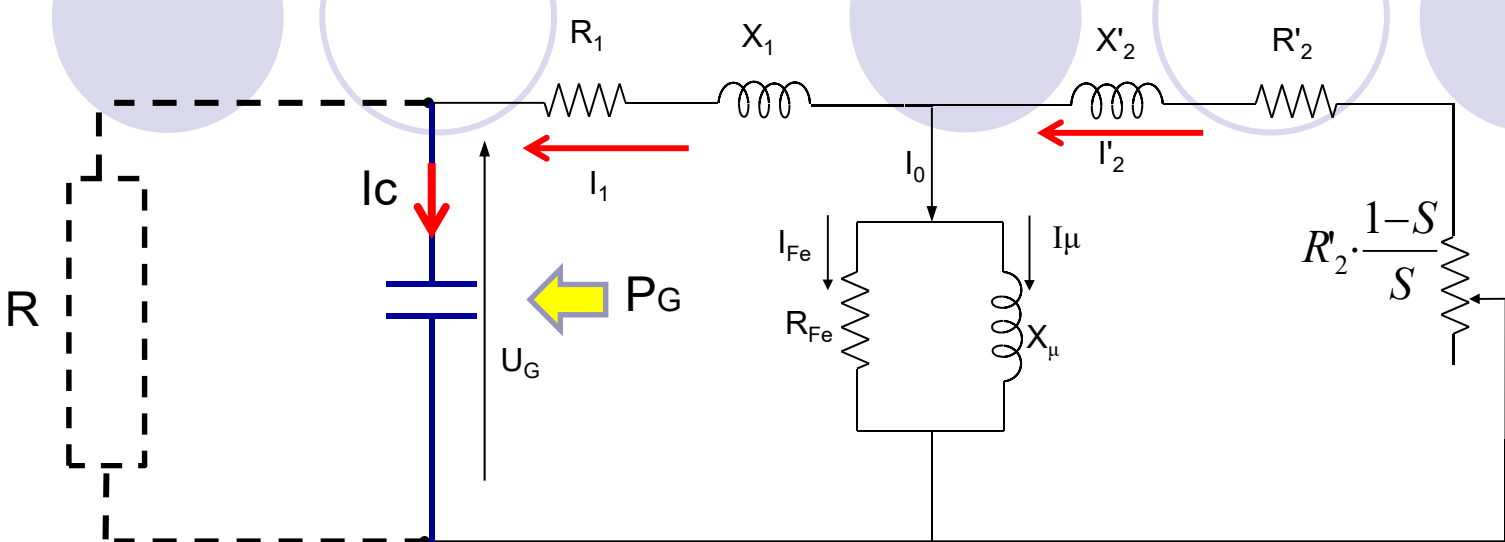
1º. Proporciona tanta más potencia cuanto mayor es la velocidad a la que es llevada.

2º. Su flujo, al contrario que en la máquina síncrona, se debe a una corriente alterna. No puede producir por sí misma 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.

3º. Cualquiera que sea su velocidad de hipersincronismo, la frecuencia a la que suministra la potencia eléctrica es igual a la de la red a la que está acoplada.

FUNCIONAMIENTO COMO GENERADOR

The diagram shows a synchronous generator connected to a load. The generator's internal impedance is represented by a series combination of resistance R_1 and reactance X_1 . The load is represented by a series combination of reactance X_2 and resistance R'_2 . The generator's terminal voltage is V_t , and the load voltage is V_L . The generator's internal induced EMF is E_g . The current flowing out of the generator is I_a . The diagram also shows the generator's internal resistance R_1 and reactance X_1 , and the load's reactance X_2 and resistance R'_2 .

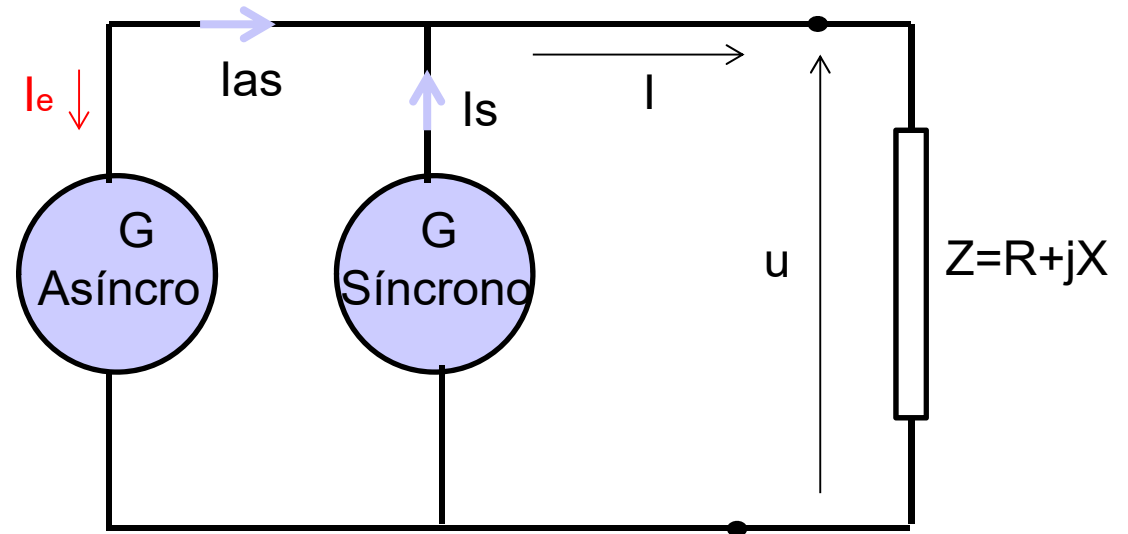
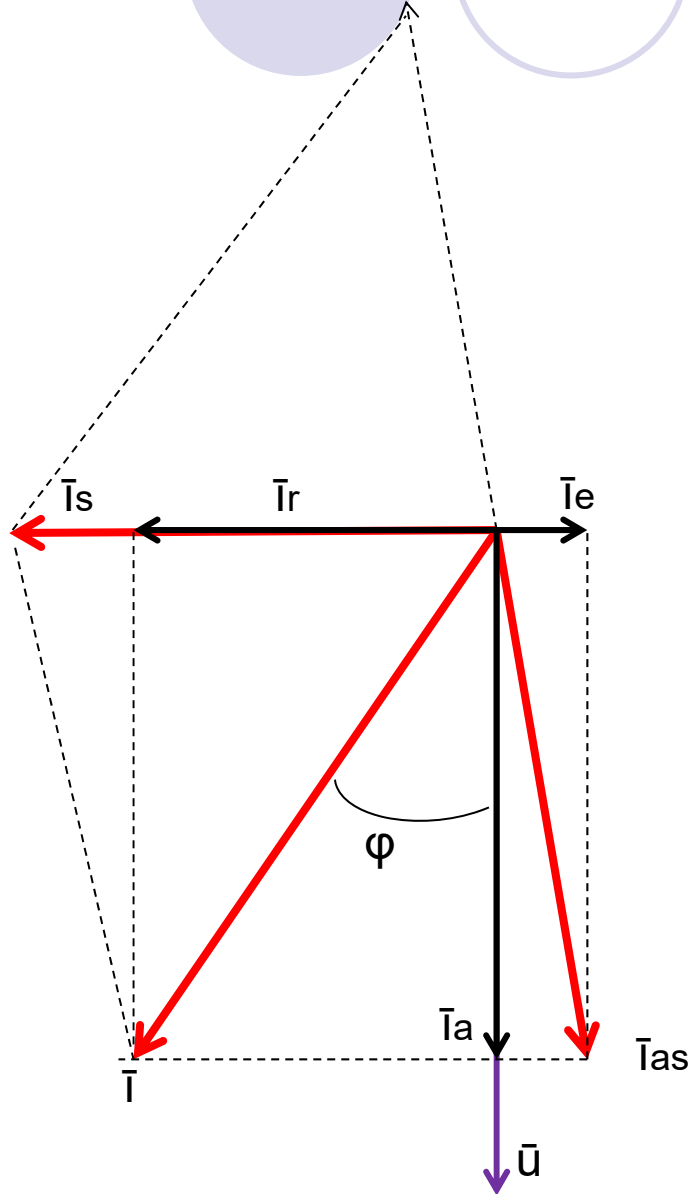


$$\left. \begin{array}{l} N_r > N_1 \\ S < 0 \end{array} \right\} \Rightarrow R'_c = R'_2 \left(\frac{1}{S} - 1 \right) < 0$$

$$P_G = m_1 U_G l_1 \cos \varphi_G$$

$$\tan \alpha = \frac{U}{I} = X_c = \frac{1}{\omega C}$$

FUNCIONAMIENTO COMO GENERADOR



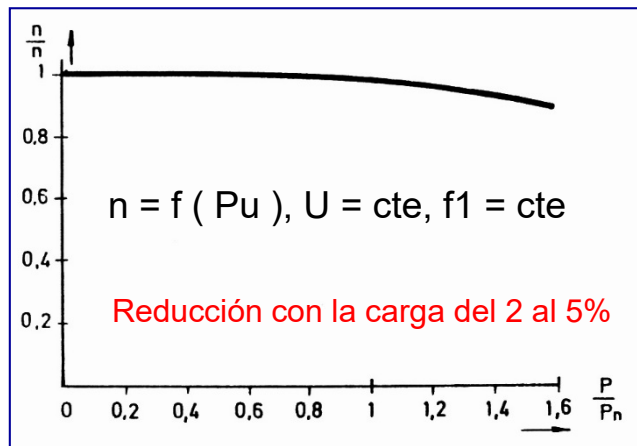
$$I = I_a + jI_r$$

$$I_s = j(I_r + I_e)$$

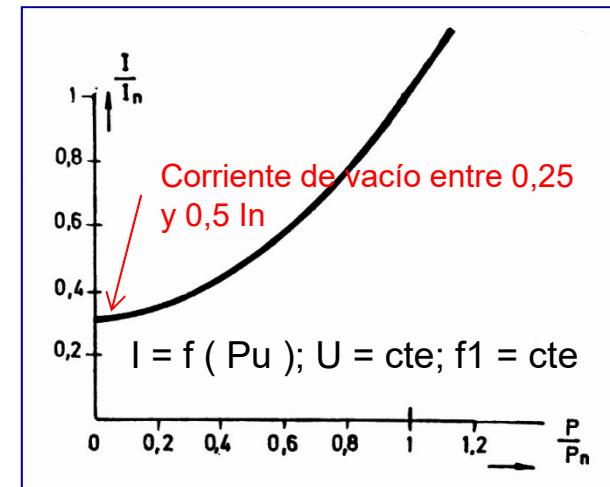
$$I_{as} = I_a - jI_e$$

Máquinas asíncronas. Curvas características

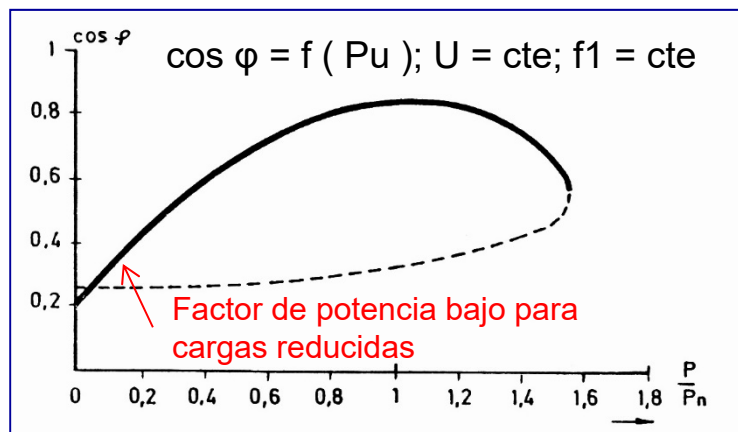
Característica de velocidad



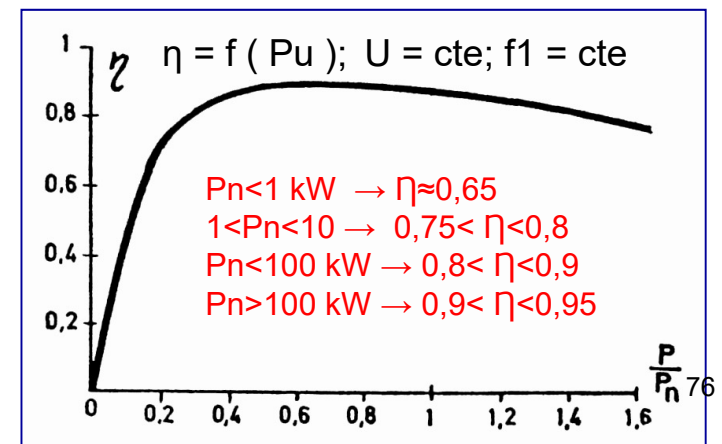
Característica de consumo



Característica de factor de potencia

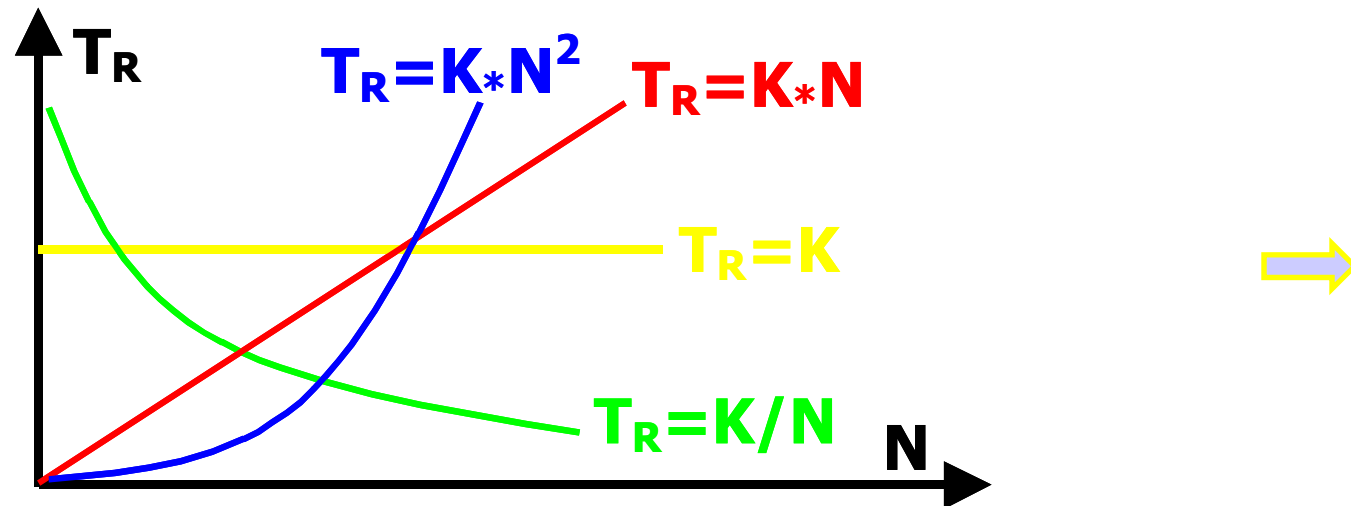


Característica de rendimiento



Motores asíncronos – Máquinas accionadas

Para comprobar los procesos de arranque y de frenado, el funcionamiento y para seleccionar la velocidad más apropiada para el motor a utilizar en una aplicación concreta, se necesita conocer la curva del par resistente de la máquina accionada (par de carga), en función de la velocidad de rotación. Las formas básicas representativas de los pares resistentes en función de la velocidad se reproducen en la figura inferior.



Características Par resistente-Velocidad de las cargas tipo

Tipos más habituales de cargas mecánicas

$$T_R = K * N^2$$

- ❑ Bombas centrífugas
- ❑ Compresores centrífugos
- ❑ Ventiladores y soplantes
- ❑ Centrifugadoras

$$T_R = K * N$$

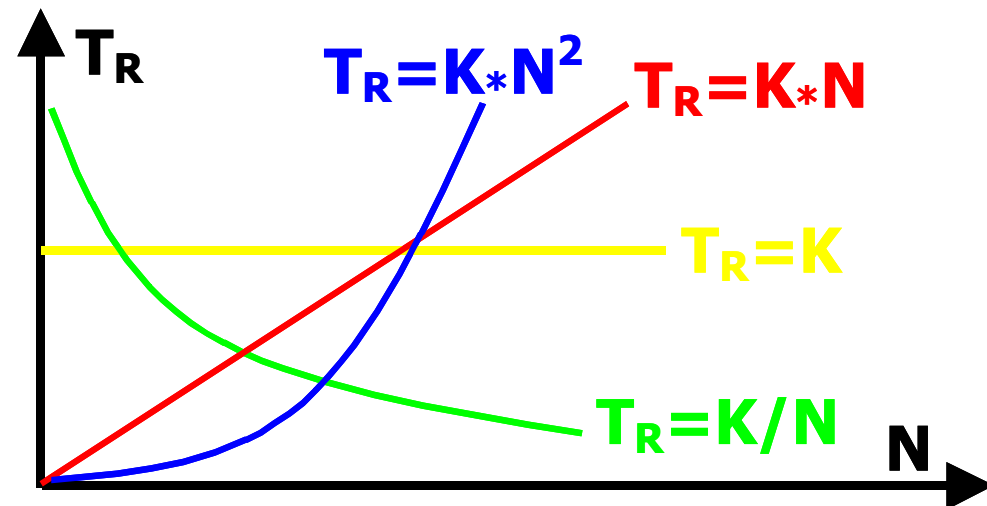
- ❑ Prensas
- ❑ Máquinas herramientas

$$T_R = K / N$$

- ❑ Bobinadoras
- ❑ Máquinas fabricación chapa

$$T_R = K$$

- ❑ Máquinas elevación
- ❑ Cintas transportadoras
- ❑ Machacadoras y trituradoras
- ❑ Compresores y bombas de pistones



Motores asíncronos. Aplicaciones

A Aplicaciones diversas

- a elevadores, ascensores, motores de alimentación
- b máquinas herramienta para manipulación de metal
- c vehículos de velocidad lenta, c' vehículos de velocidad rápida
- d extrusores
- e calandrias

B Compresores

- f compresores de pistón de contrapresión, f' sin carga
- g compresores giratorios de contrapresión, g' sin carga
- h turbocompresores

C Ventiladores

- i ventiladores de contrapresión o bombas centrífugas, i' ventiladores sin carga
- k soplantes giratorios de pistón, k' sin carga

D Trituradoras

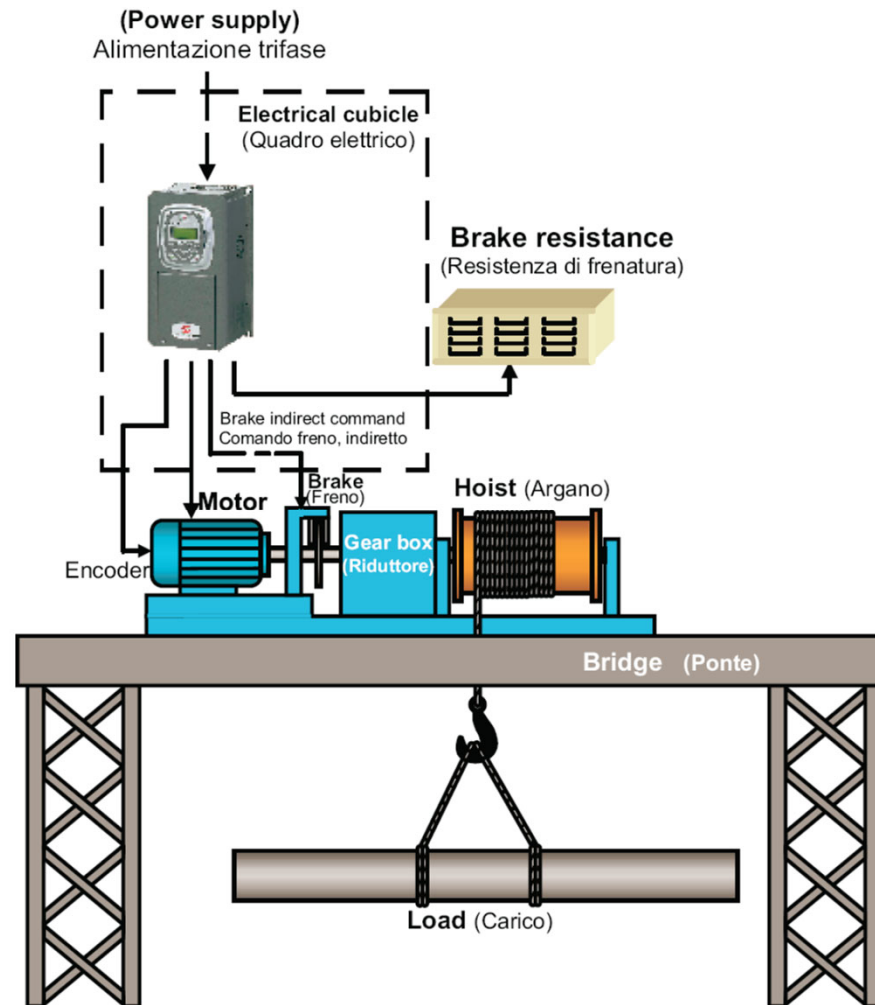
- l molinos de bolas
- m trituradoras centrífugas
- n trituradoras de martillo
- o trituradoras de impacto

Motores asíncronos. Aplicaciones



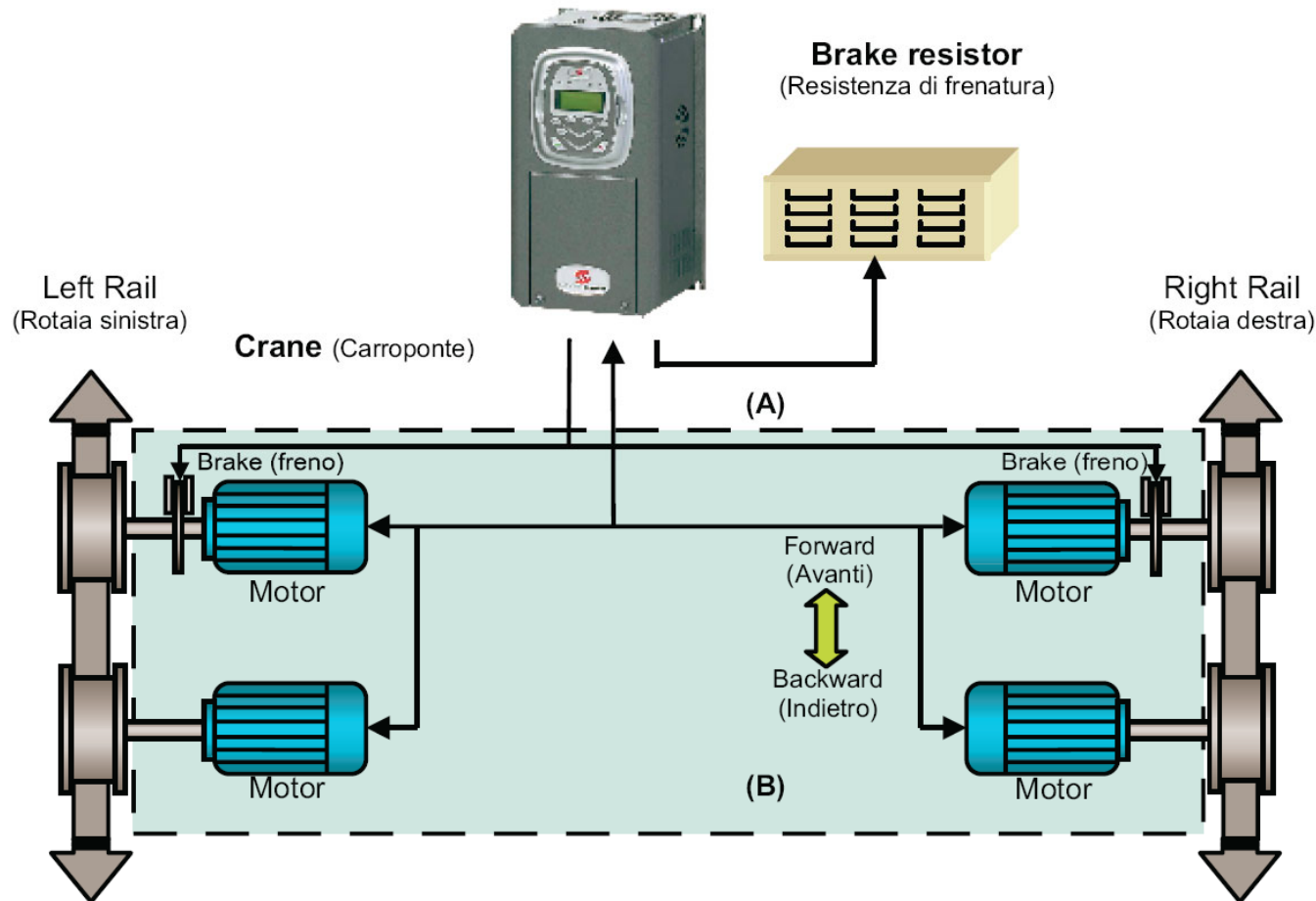
Motores asíncronos en un taller de carpintería

Motores asíncronos. Aplicaciones



Motores asíncronos en una industria minera

Motores asíncronos. Aplicaciones



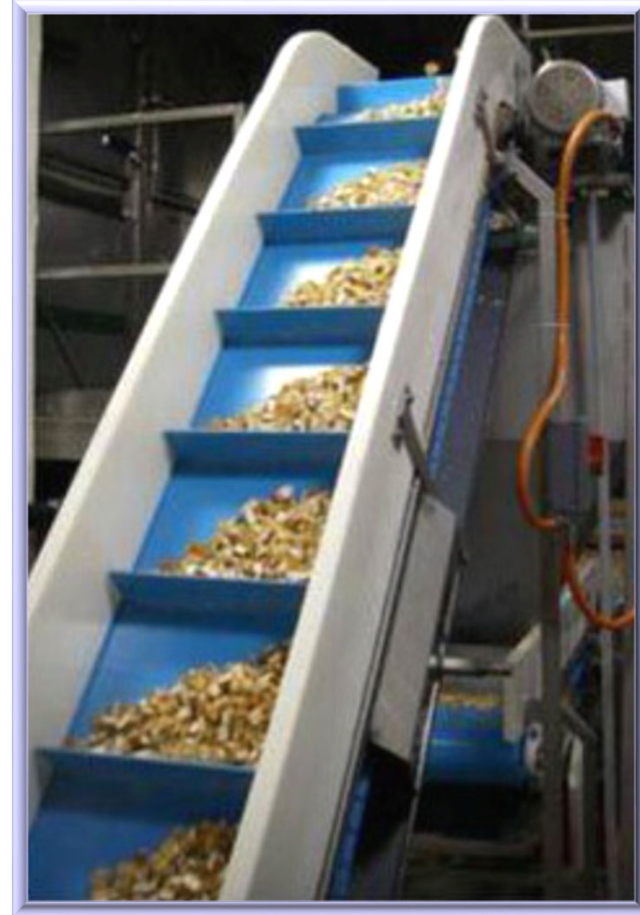
Motores asíncronos en trenes de laminado

Motores asíncronos. Aplicaciones



Motores asíncronos en trenes de laminado

Motores asíncronos. Aplicaciones



Motores asíncronos en cintas transportadoras

Motores asíncronos. Aplicaciones



Motores asíncronos sistemas de bombeo de agua

Motores asíncronos. Aplicaciones



Motores asíncronos en sistemas contraincendios

Motores asíncronos. Aplicaciones



Motores asíncronos en máquinas trefiladoras

Motores asíncronos. Aplicaciones



Motores asíncronos accionando un ventilador industrial