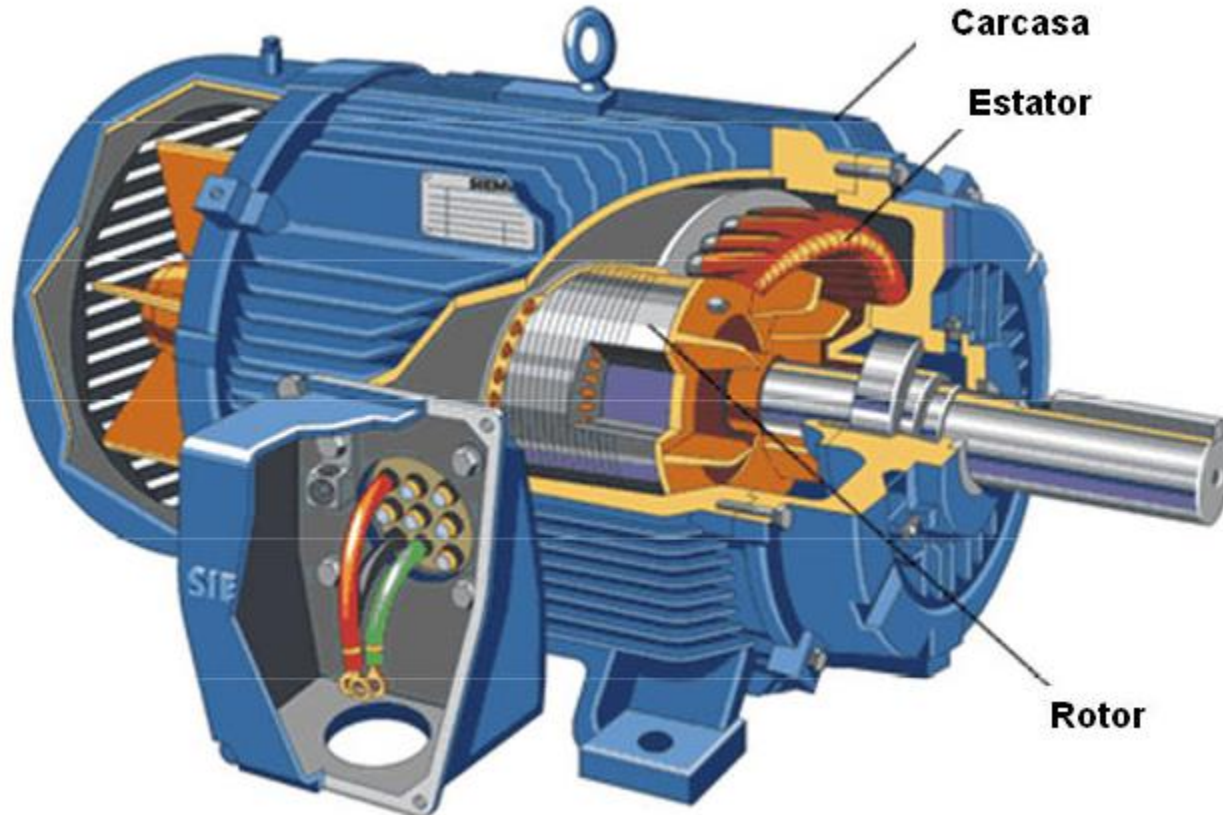


Motores Trifásicos de Inducción



M. C. Rito Javier Rodríguez Lozoya

Los motores trifásicos de inducción son las máquinas más frecuentemente usadas en la industria

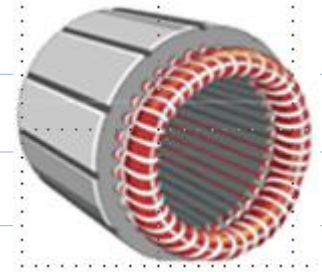
- diseño simple, bajo precio, fácil mantenimiento
- amplio rango en potencias: desde fraccionarios hasta 10 MW
- gira esencialmente a velocidad constante desde vacío hasta plena carga
- su velocidad depende de la frecuencia de la fuente
 - no es sencillo controlar la velocidad
 - requiere un controlador electrónico de frecuencia variable para controlar la velocidad óptima

Partes principales del motor de inducción

Estator

Devanado trifásico
distribuido en ranuras a 120°

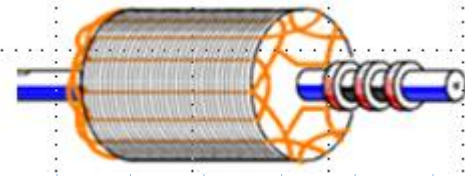
3 devanados en el
estator desfasados 120°
($2\pi/3P$) siendo P el
número de pares de polos



Rotor

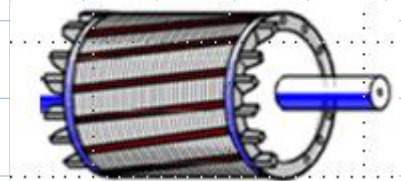
Bobinado

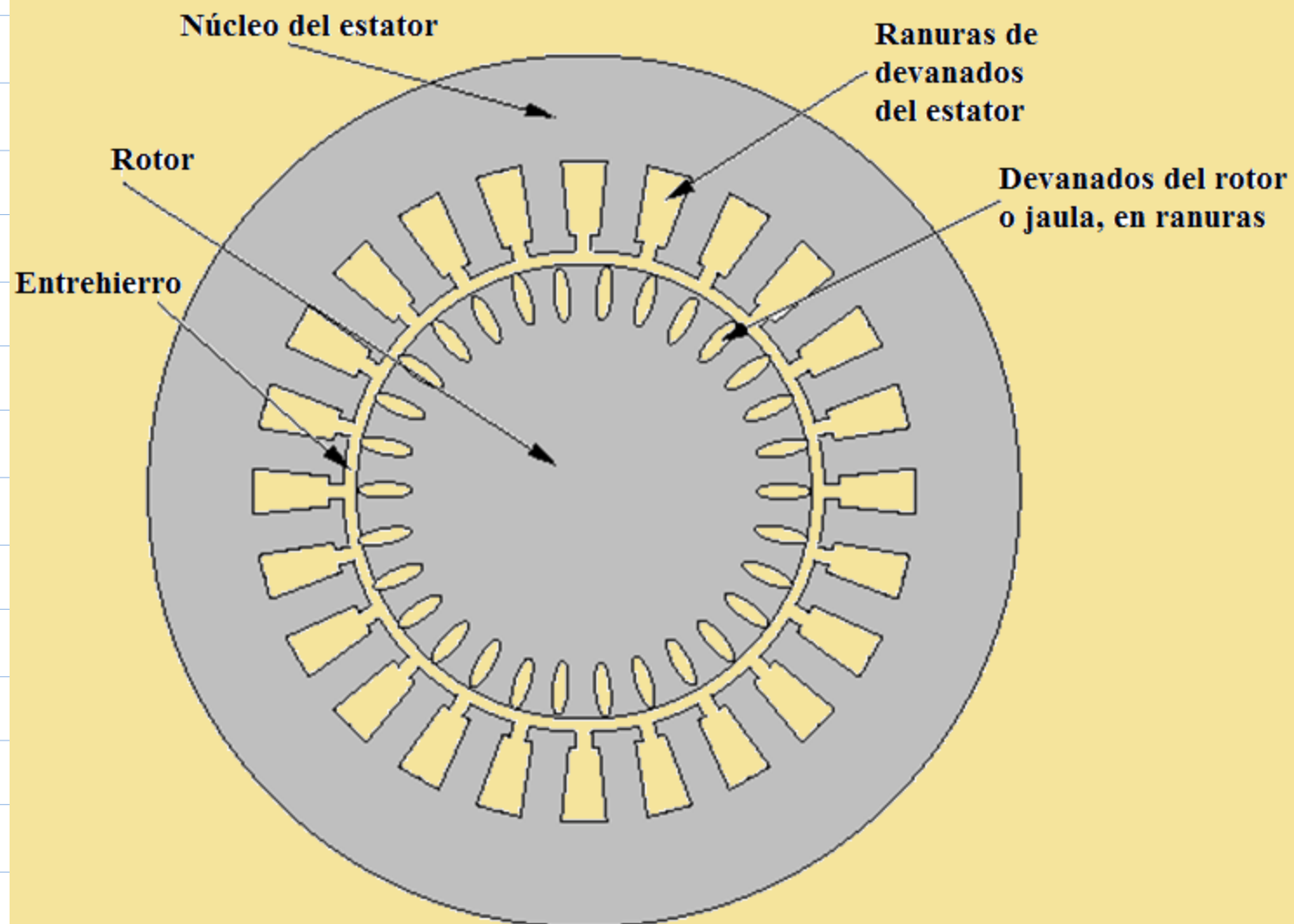
El número de fases del rotor no tiene porqué ser el mismo que el del estator, sí será igual al No de polos. Los devanados están conectados a anillos colectores montados sobre el mismo eje



Jaula de ardilla

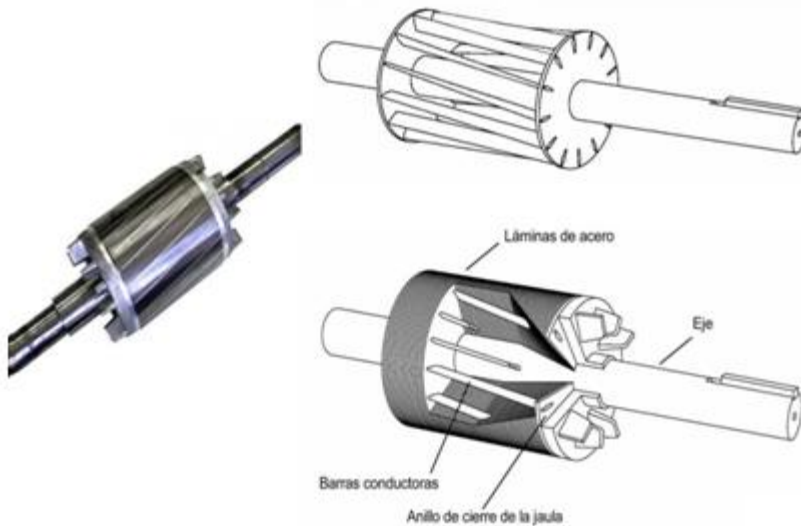
Los conductores del rotor están igualmente distribuidos por la periferia del rotor. Los extremos de estos conductores están cortocircuitados, no habiendo conexión con el exterior. La posición inclinada de las ranuras mejora el arranque y disminuye el ruido





Vista axial de una máquina de inducción

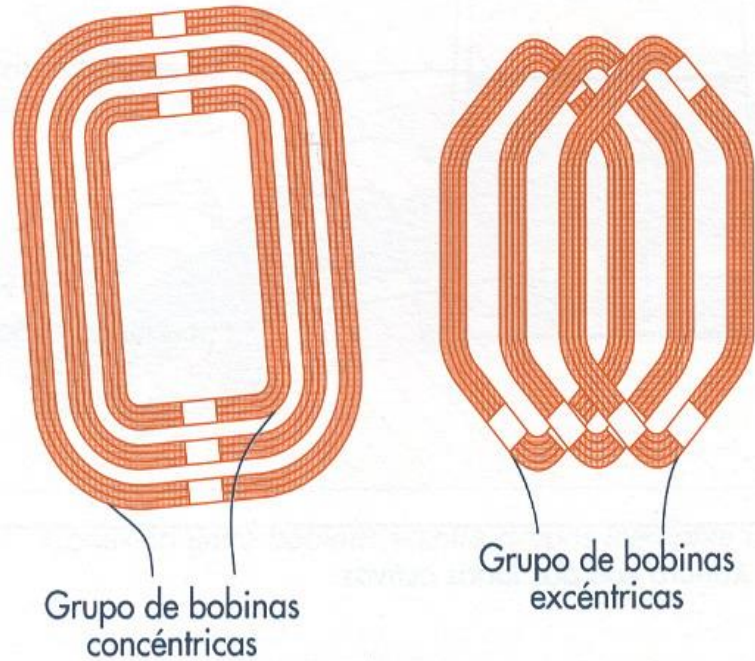
Rotor jaula de ardilla



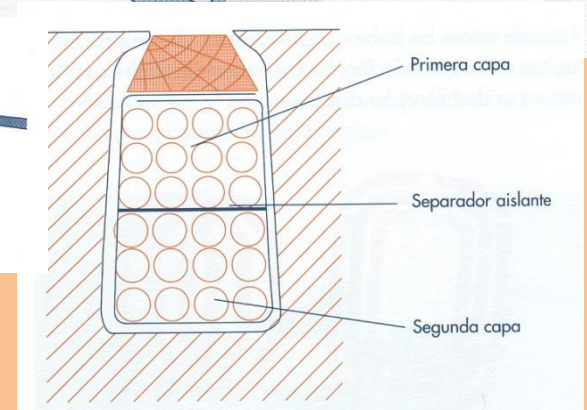
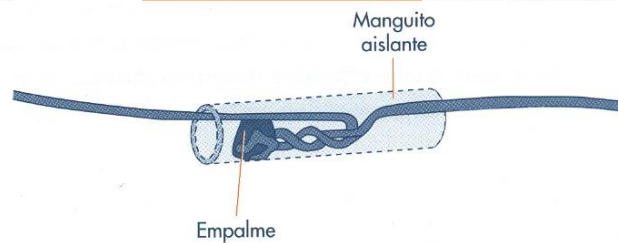
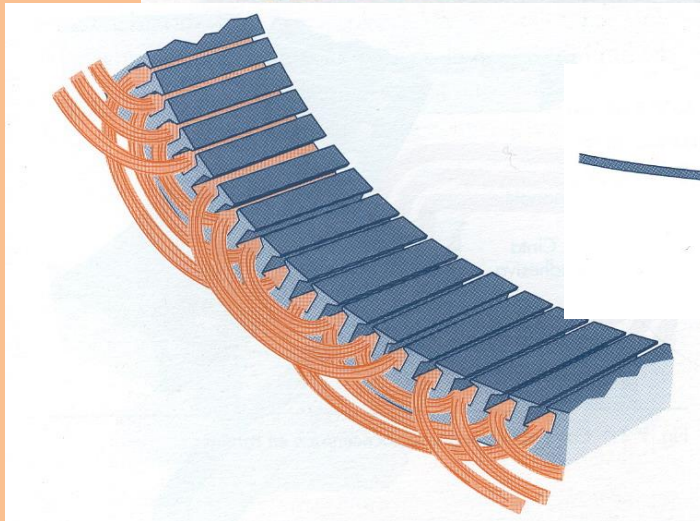
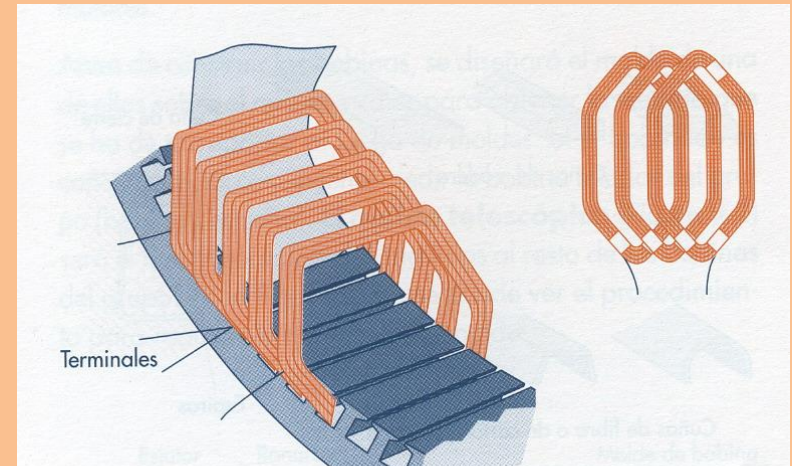
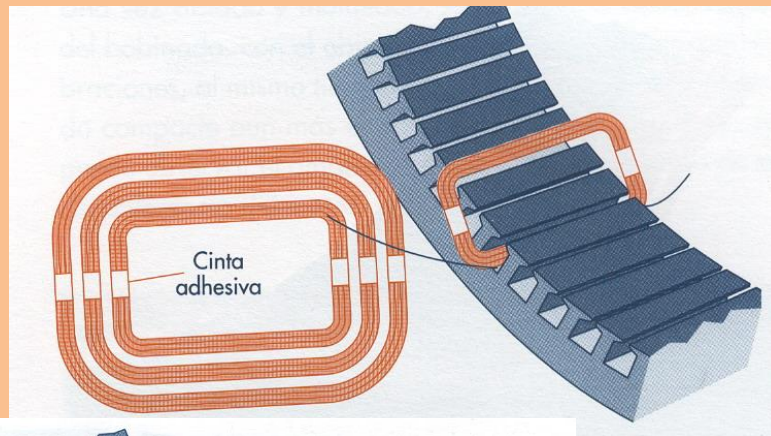
Rotor devanado



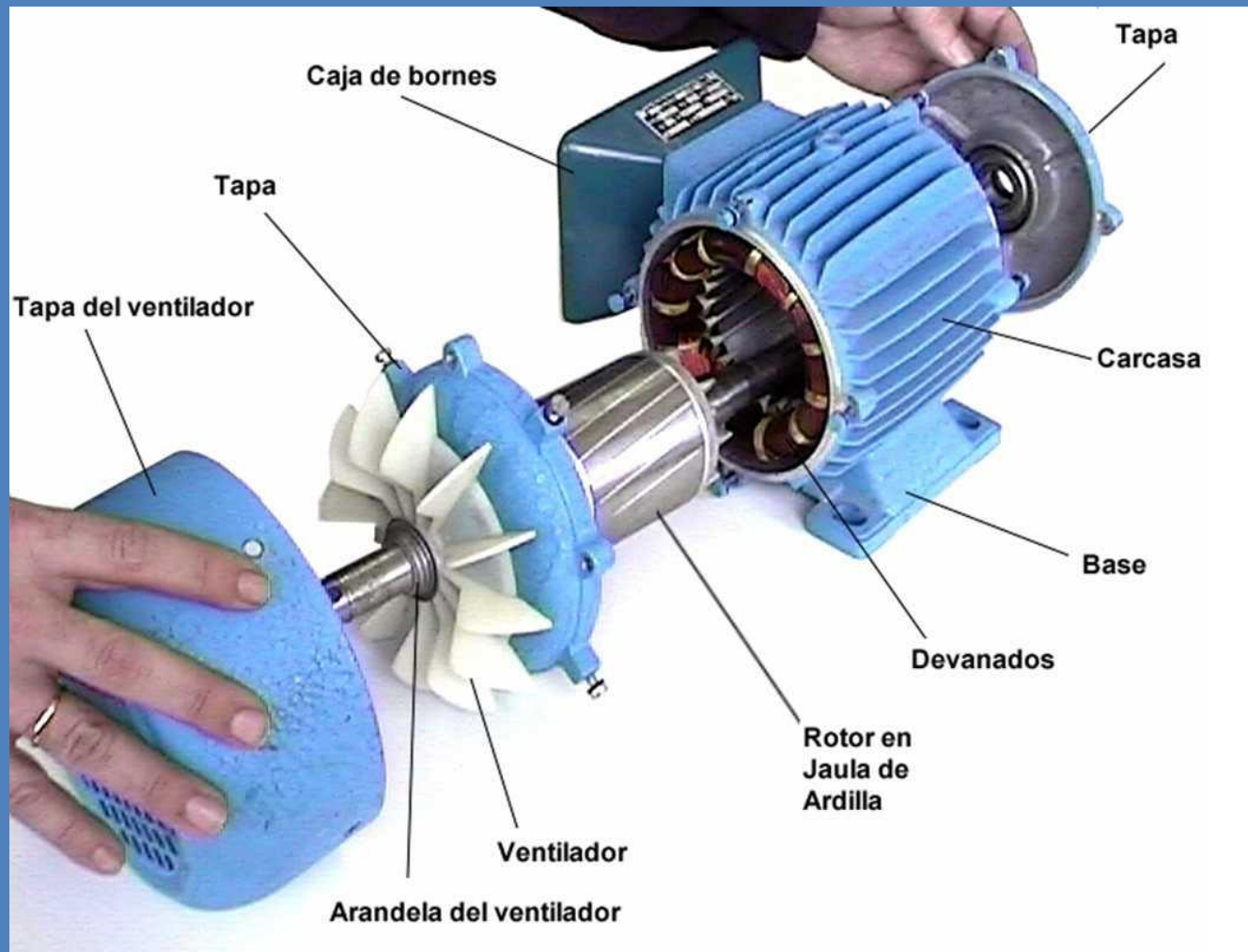
Tipos de bobinas en el estator



Distribución de las bobinas en el estator



Despiece de un motor de inducción



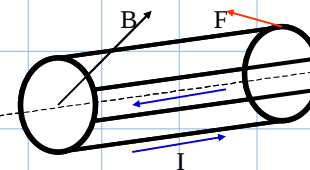
Principio de funcionamiento del Motor de Inducción

Campo magnético en el estator

$$n = \frac{2\pi f}{p}$$

El campo magnético del estator induce una FEM en el rotor

Circulan corrientes por el rotor



Eje de giro

Corrientes y fuerzas inducidas en la jaula

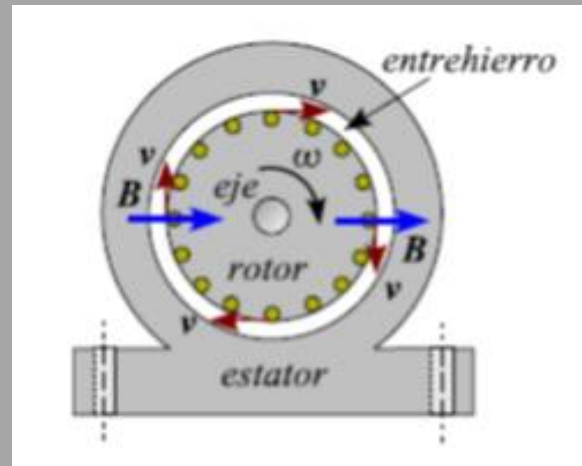
Se generan fuerzas electromagnéticas entre las corrientes del rotor y el campo magnético del estator

Se produce un par en el rotor, el rotor gira

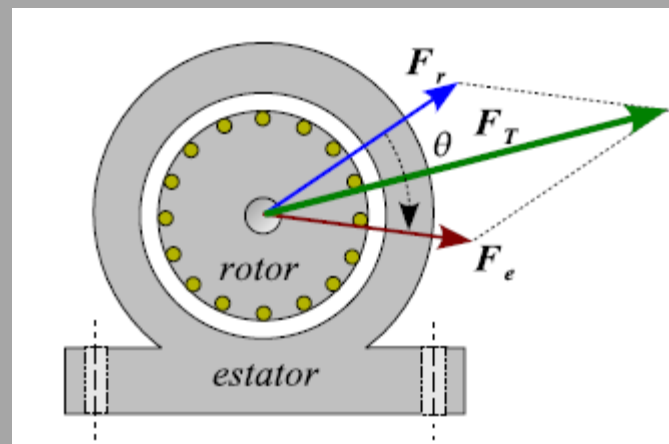
La velocidad del rotor es inferior a la velocidad del campo magnético giratorio producido por el estator (velocidad de sincronismo)



Configuración cilíndrica de los conductores en una máquina

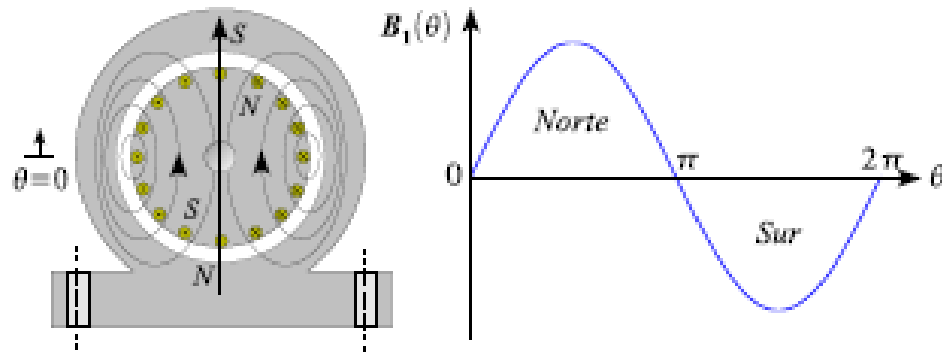


Par eléctrico a partir de las fuerzas FEM's

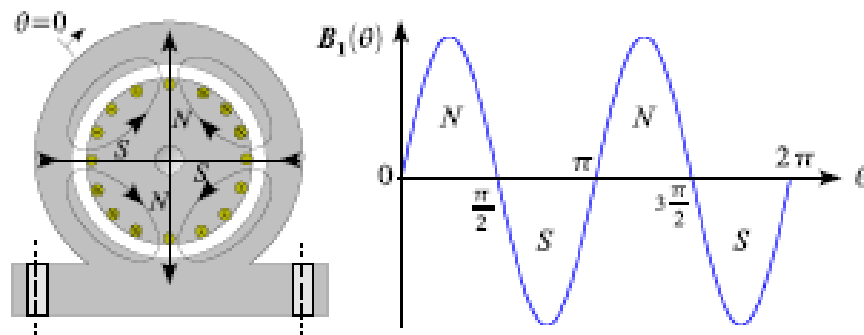


Máquina de dos polos

Polos norte y sur en un rotor cilindro



Máquina de cuatro polos



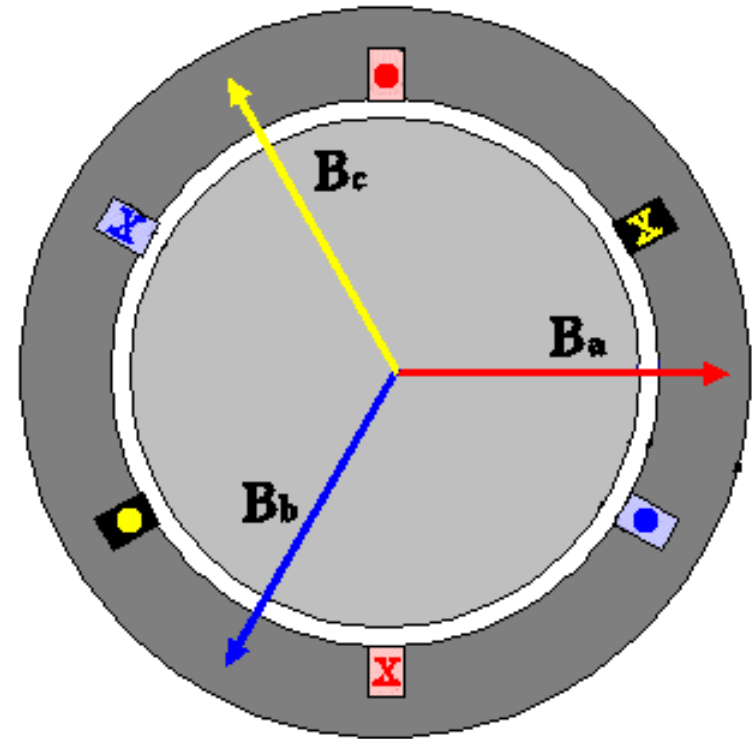
Campo magnético giratorio

El devanado trifásico está balanceado, es decir. Desplazado mecánicamente 120° uno de otro, alimentados por una fuente trifásica

Se produce un campo magnético giratorio de magnitud constante que gira a una velocidad de

$$n_{sinc} = \frac{120 f_e}{P} \text{ rpm}$$

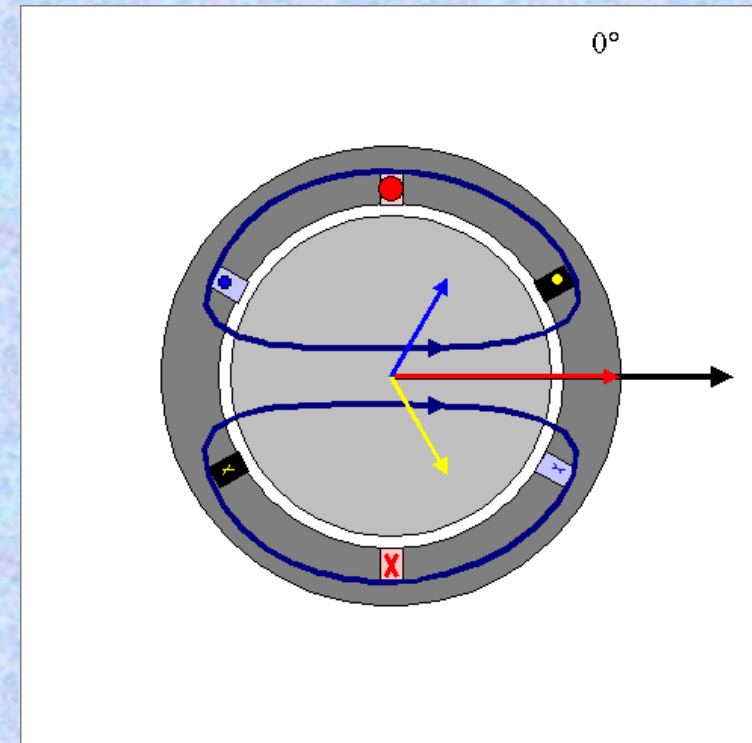
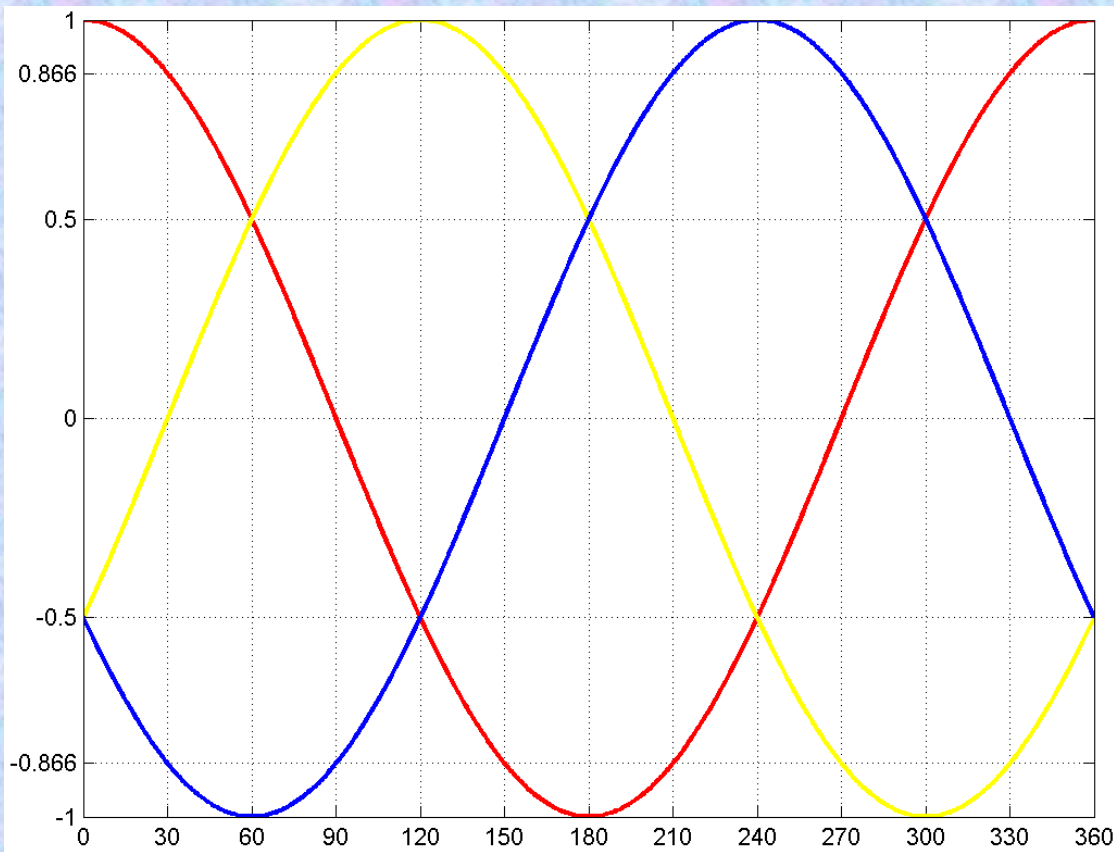
$$\omega_{sinc} = \frac{4\pi f_e}{P} \text{ rad/seg}$$



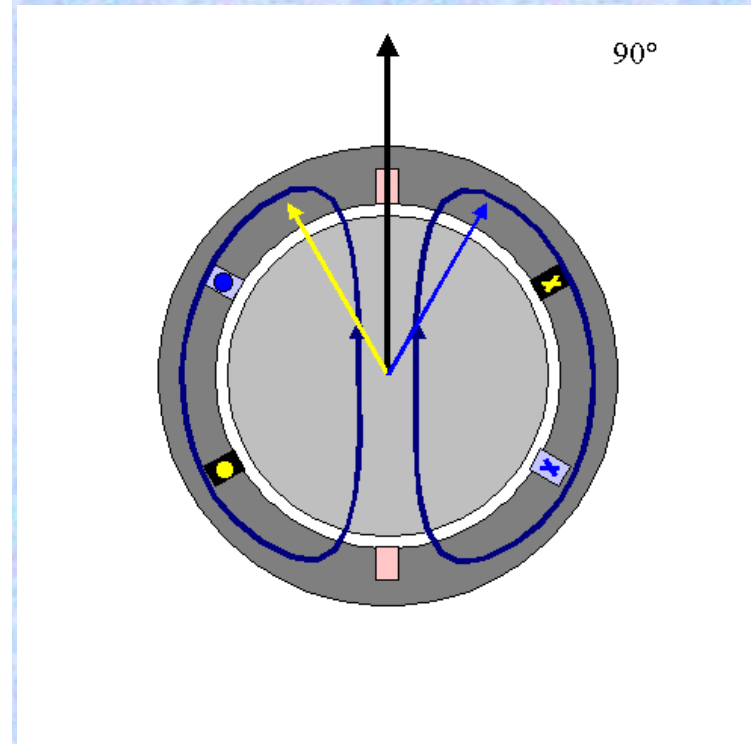
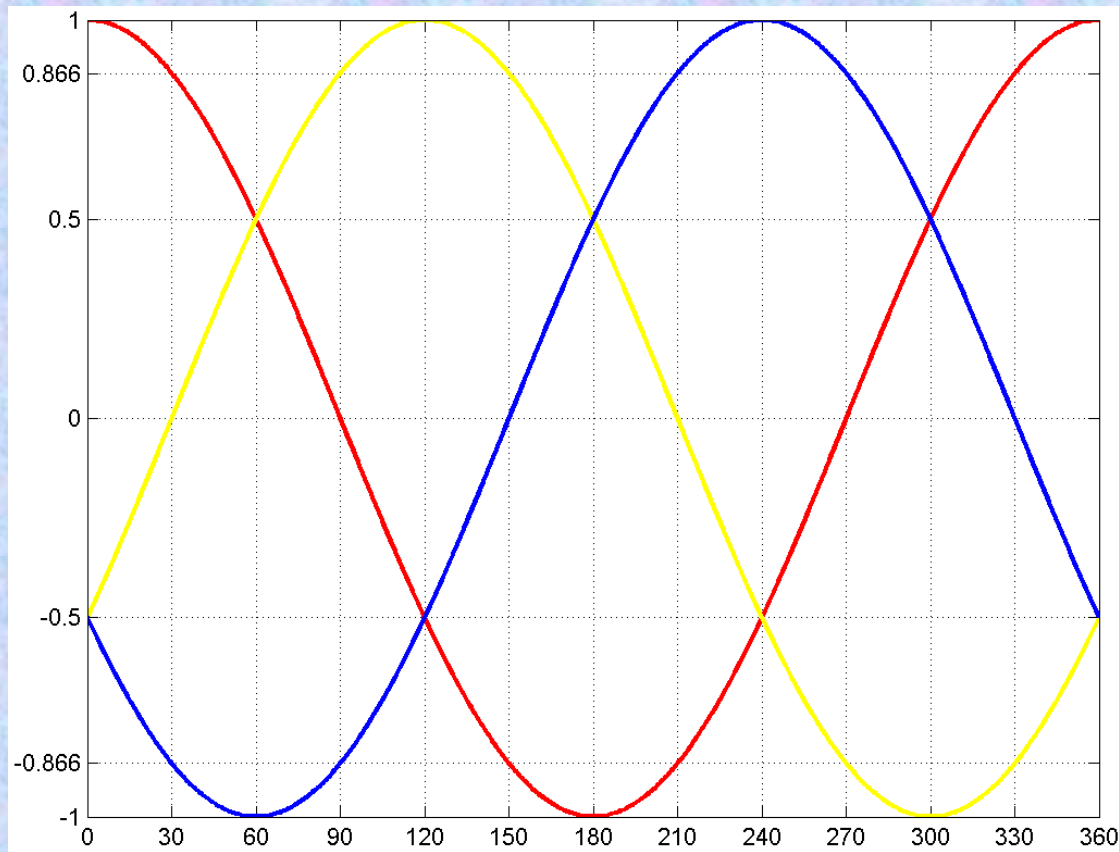
Velocidad síncrona en rpm

P	50 Hz	60 Hz
2	3000	3600
4	1500	1800
6	1000	1200
8	750	900
10	600	720
12	500	600

Campo magnético giratorio



Campo magnético giratorio



Campo magnético giratorio

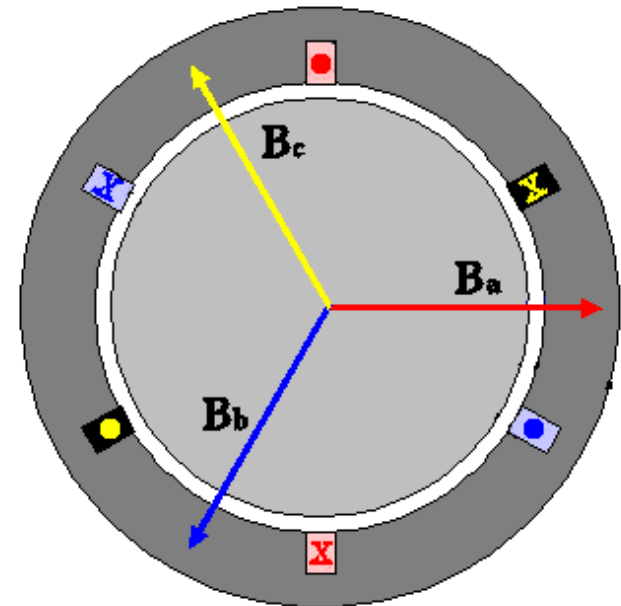
$$B_{net}(t) = B_a(t) + B_b(t) + B_c(t)$$

$$= B_M \sin(\omega t) \angle 0^\circ + B_M \sin(\omega t - 120^\circ) \angle 120^\circ + B_M \sin(\omega t - 240^\circ) \angle 240^\circ$$

$$= B_M \sin(\omega t) \hat{x}$$

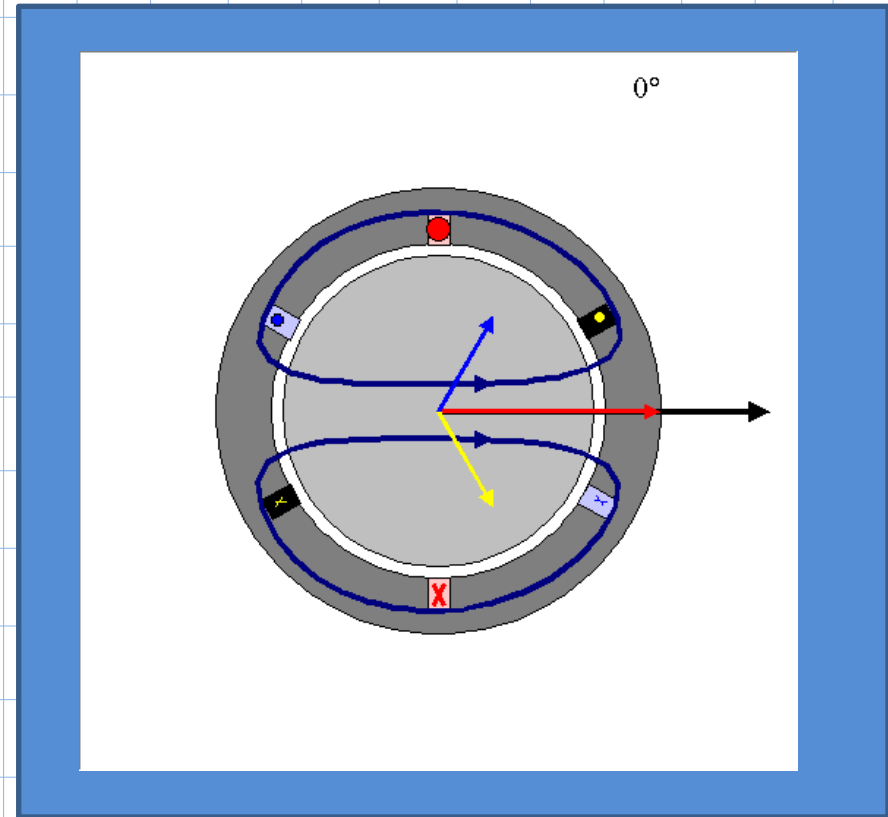
$$- [0.5 B_M \sin(\omega t - 120^\circ)] \hat{x} - \left[\frac{\sqrt{3}}{2} B_M \sin(\omega t - 120^\circ) \right] \hat{y}$$

$$- [0.5 B_M \sin(\omega t - 240^\circ)] \hat{x} + \left[\frac{\sqrt{3}}{2} B_M \sin(\omega t - 240^\circ) \right] \hat{y}$$



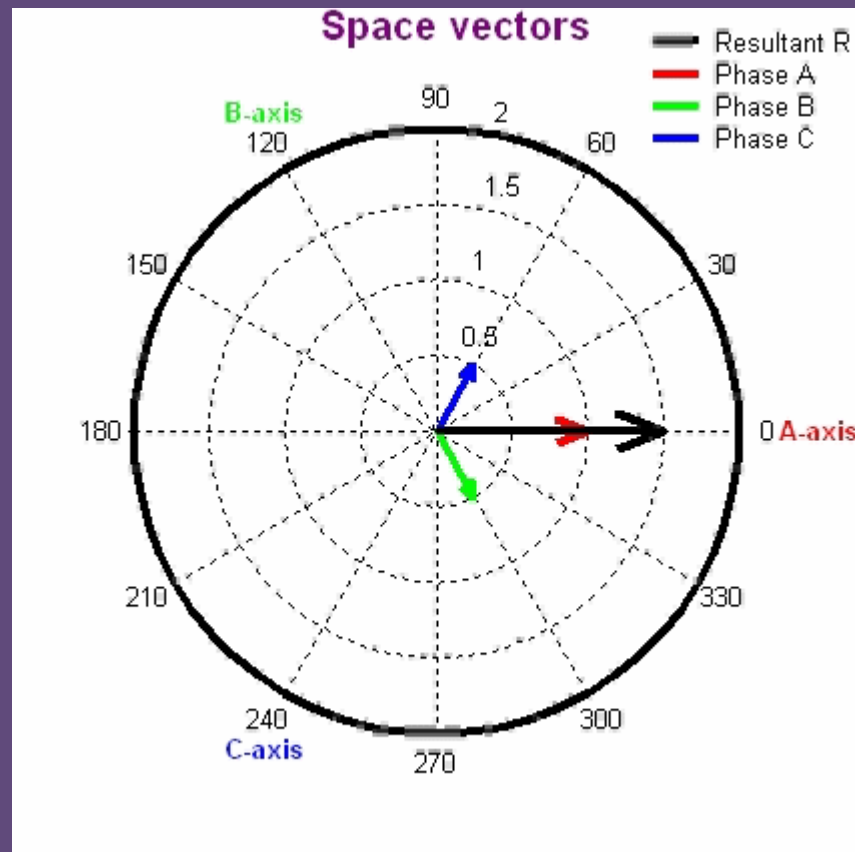
Campo magnético giratorio

$$\begin{aligned} B_{net}(t) &= [B_M \sin(\omega t) + \frac{1}{4} B_M \sin(\omega t) + \frac{\sqrt{3}}{4} B_M \cos(\omega t) + \frac{1}{4} B_M \sin(\omega t) - \frac{\sqrt{3}}{4} B_M \cos(\omega t)] \hat{x} \\ &\quad + [-\frac{\sqrt{3}}{4} B_M \sin(\omega t) - \frac{3}{4} B_M \cos(\omega t) + \frac{\sqrt{3}}{4} B_M \sin(\omega t) - \frac{3}{4} B_M \cos(\omega t)] \hat{y} \\ &= [1.5 B_M \sin(\omega t)] \hat{x} - [1.5 B_M \cos(\omega t)] \hat{y} \end{aligned}$$



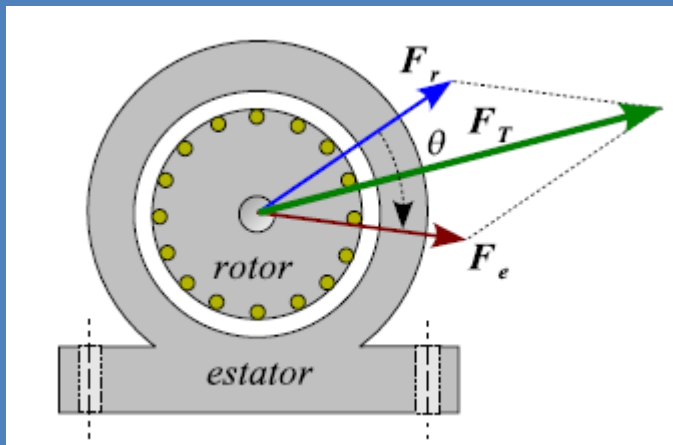
Vectores espaciales

La representación de vectores espaciales de la distribución de la fuerza magnetomotriz en una máquina de corriente alterna creada por una secuencia positiva balanceada de tres corrientes senoidales



Principio de operación

- Este campo magnético giratorio corta las bobinas del rotor y produce un voltaje inducido en las bobinas
- Como las bobinas del rotor en ambos casos, rotor devanado y jaula, están en corto, circula una corriente inducida en las bobinas del rotor
- Las corrientes de rotor producen otro campo magnético
- Como resultado de la interacción de éstos dos campos, se produce un par inducido



$$\tau_{ind} = k B_R \times B_s$$

Velocidad del MI

¿A qué velocidad gira el MI?

Si el rotor girará a velocidad síncrona, tal como el campo magnético giratorio del estator, entonces el rotor aparecería estacionario al campo magnético giratorio y no cortaría las bobinas del rotor. Entonces, no se inducirían corrientes en el rotor ni se produciría flujo magnético, por lo que tampoco habría un par resultante y la velocidad del rotor caería por debajo de la velocidad síncrona

Cuando la velocidad se reduce, el campo magnético giratorio corta las bobinas del rotor y se produce el par inducido

Velocidad del MI

- Por tanto, el MI girará a una velocidad más lenta que la velocidad de sincronismo
- La diferencia entre la velocidad del rotor y la velocidad de sincronismo se llama *Deslizamiento*

$$n_{des} = n_{sinc} - n_{mec}$$

Donde: n_{des} = Velocidad de deslizamiento

n_{sinc} = Velocidad del campo magnético giratorio

n_{mec} = Velocidad mecánica del rotor

El deslizamiento

$$s = \frac{n_{sinc} - n_{mec}}{n_{sinc}} = \frac{\omega_{sinc} - \omega_{mec}}{\omega_{sinc}}$$

Donde s es el *deslizamiento*

Note que: si el rotor gira a velocidad síncrona

$$s = 0$$

si el rotor está estacionario

$$s = 1$$

El deslizamiento se puede expresar en porcentaje y no tiene unidades

Motores de Inducción y Transformadores

Tanto el MI como el transformador trabajan bajo el principio de inducción:

Transformador:

El voltaje aplicado al devanado primario produce un voltaje inducido en el devanado secundario

Motor de Inducción: el voltaje aplicado al devanado del estator produce un voltaje inducido en el devanado del rotor

Motores de Inducción y Transformadores

La diferencia es que en el caso del MI, el devanado secundario se puede mover

Debido a la rotación del rotor (el devanado secundario del MI), el voltaje inducido no tiene la misma frecuencia del estator (devanado primario)

Frecuencia

La frecuencia del voltaje inducido en el rotor está dado por

$$f_r = \frac{P \times n}{120}$$

Donde f_r = frecuencia del rotor (Hz)

P = número de pares de polos del estator

n = Velocidad de sincronismo (rpm)

$$f_r = \frac{P * (n_s - n_{mec})}{120} = \frac{P * s n_s}{120} = s f_{est}$$

Frecuencia

La frecuencia del voltaje inducido en el rotor a cualquier velocidad es

$$f_r = s f_{est}$$

Cuándo el rotor está bloqueado ($s = 1$), la frecuencia del voltaje inducido es igual a la frecuencia de suministro

Por otro lado, si el rotor gira a velocidad de sincronismo ($s = 0$), la frecuencia del rotor será cero

Par

La entrada del MI es potencia eléctrica y su salida es potencia mecánica, por lo que es necesario relacionarse con algunos términos y cantidades relacionados con la potencia mecánica

Cualquier carga mecánica aplicada al eje del motor produce un par en el eje. Este par se relaciona con la potencia y velocidad del motor como sigue:

$$\tau_{carga} = \frac{P_{sal}}{\omega_m} \text{ N-m}$$

y

$$\omega_m = \frac{2\pi n_m}{60} \text{ rad/seg}$$

Par

**Disminuye
la velocidad**

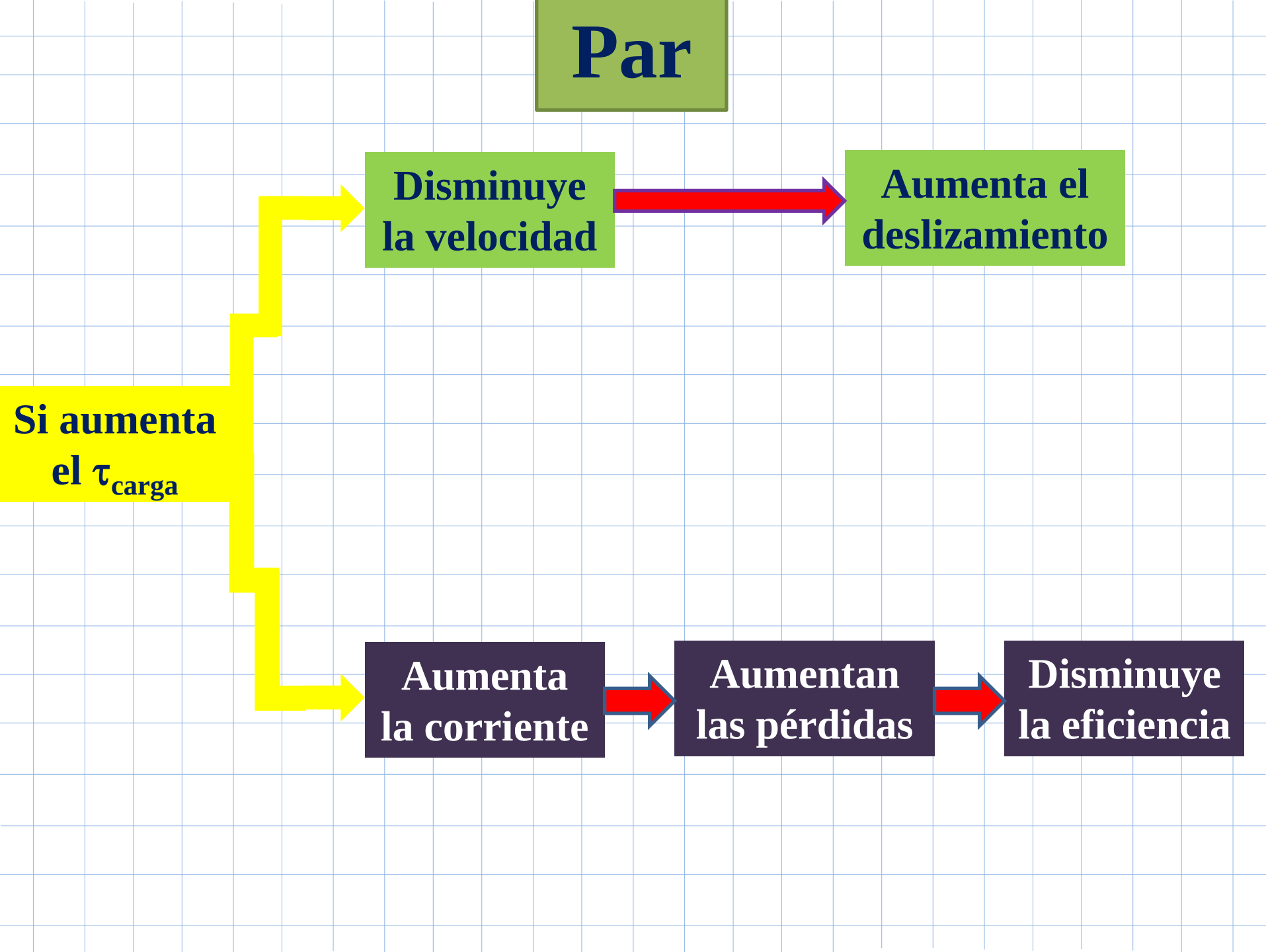
**Aumenta el
deslizamiento**

**Si aumenta
el τ_{carga}**

**Aumenta
la corriente**

**Aumentan
las pérdidas**

**Disminuye
la eficiencia**



Caballos de fuerza (HP)

Otra unidad usada para medir la potencia mecánica es el HP

Es utilizado para referir la potencia mecánica de salida del motor

La relación entre los caballos de fuerza y la potencia es

$$1 \text{ hp} = 746 \text{ watts}$$

Ejemplo

Un motor de inducción de 208-V, 10hp, cuatro polos, 60 Hz, conexión Y, trabaja a plena carga con un deslizamiento de un 5%

1. ¿Cuál es la velocidad síncrona del motor?
2. ¿Cuál es la velocidad del motor a plena carga?
3. ¿Cuál es la frecuencia del rotor a plena carga?
4. ¿Cuál es el par del motor a plena carga?

Solución

$$1. \quad n_{sync} = \frac{120 f_e}{P} = \frac{120(60)}{4} = 1800 \text{ rpm}$$

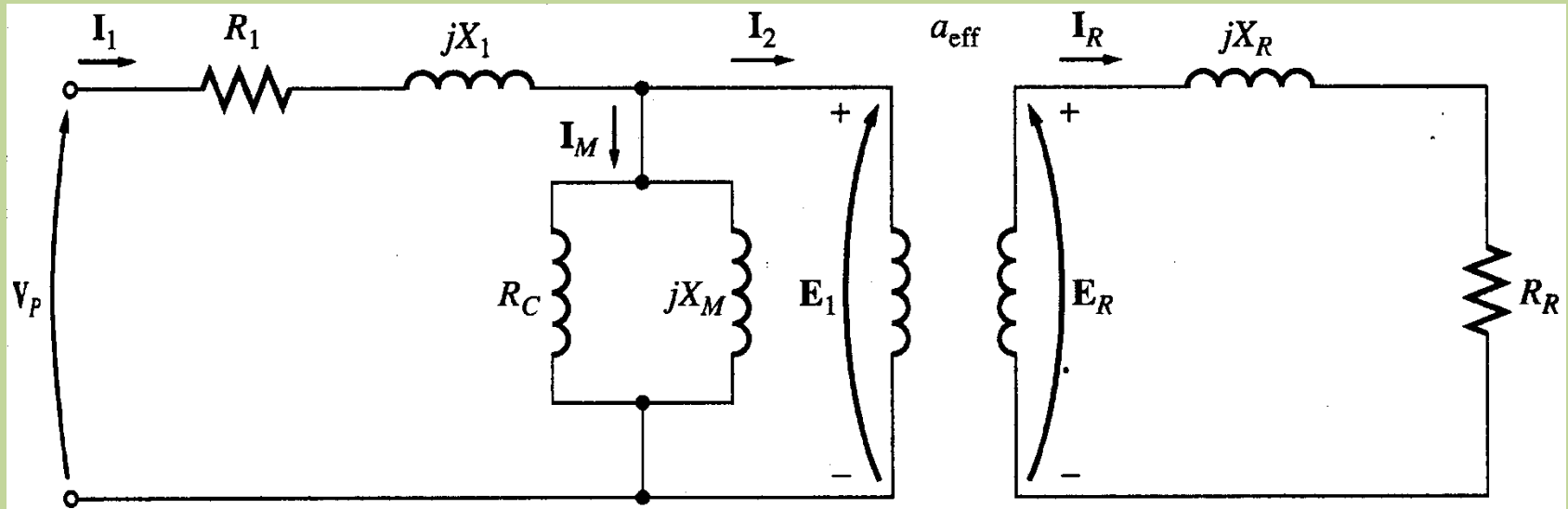
$$2. \quad n_m = (1-s)n_s \\ = (1-0.05) \times 1800 = 1710 \text{ rpm}$$

$$3. \quad f_r = s f_e = 0.05 \times 60 = 3 \text{ Hz}$$

$$4. \quad \tau_{load} = \frac{P_{out}}{\omega_m} = \frac{P_{out}}{2\pi \frac{n_m}{60}} \\ = \frac{10 \text{ hp} \times 746 \text{ watt / hp}}{1710 \times 2\pi \times (1/60)} = 41.7 \text{ N.m}$$

Circuito Equivalente

El MI es similar al transformador, a excepción de que sus devanados secundarios están cortocircuitados y giran libremente



Circuito Equivalente

Cuando el rotor está bloqueado, es decir, $s = 1$, se inducen el mayor voltaje y la mayor frecuencia al rotor

Además, si el rotor gira a velocidad síncrona, $s = 0$, y el voltaje y frecuencia en el rotor serán cero, a cualquier otra velocidad

$$E_R = sE_{R0}$$

Donde E_{R0} es el voltaje a rotor bloqueado

Circuito Equivalente

También es la misma relación para la frecuencia

$$f_r = s f_e$$

Sabemos que

$$X_L = \omega L = 2\pi f L$$

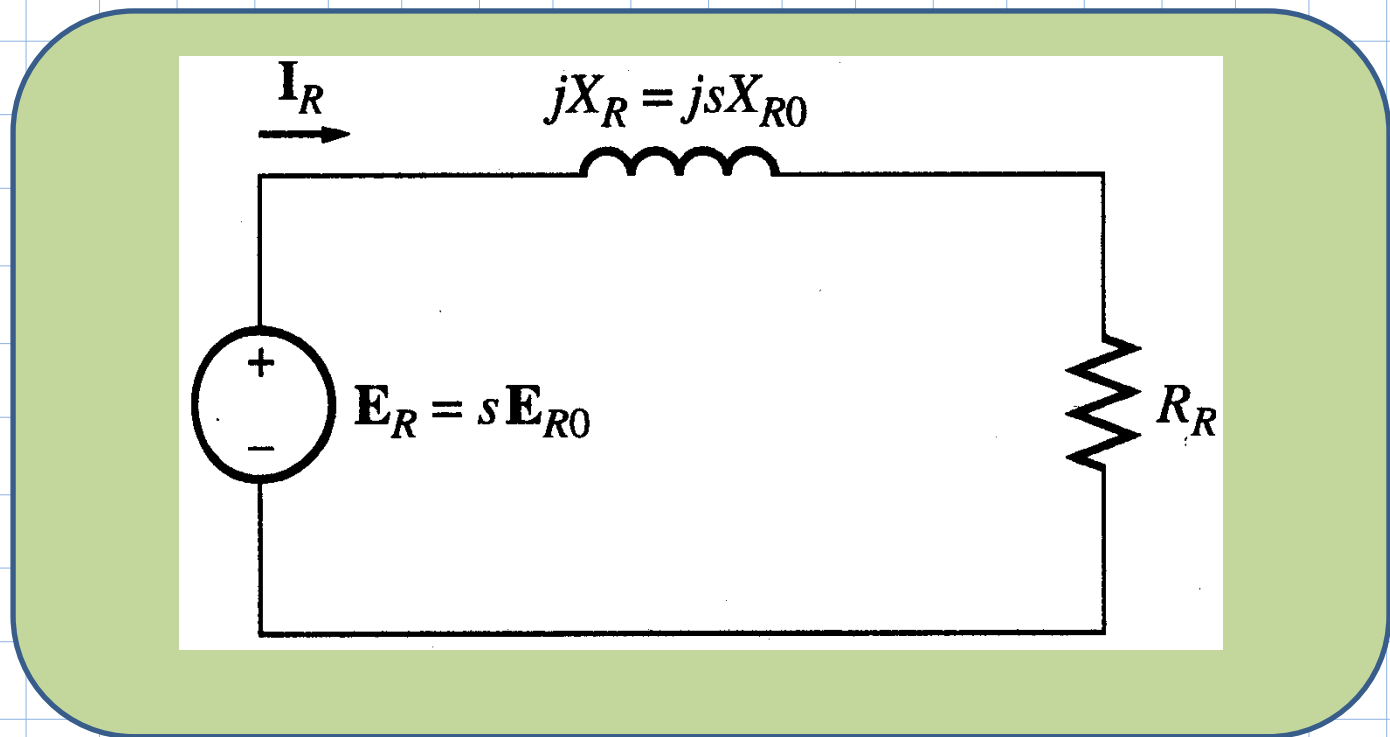
Entonces, como la frecuencia y el voltaje inducido en el rotor cambian, la reactancia del rotor también cambiará

Donde X_{r0} es la reactancia del rotor a la frecuencia de suministro (a rotor bloqueado)

$$\begin{aligned} X_r &= \omega_r L_r = 2\pi f_r L_r \\ &= 2\pi s f_e L_r \\ &= s X_{r0} \end{aligned}$$

Circuito Equivalente

Ahora, podemos dibujar el circuito equivalente del rotor como sigue



Donde E_R es el voltaje inducido en el rotor y R_R es la resistencia del rotor

Circuito Equivalente

Ahora podemos calcular la corriente en el rotor como

$$\begin{aligned} I_R &= \frac{E_R}{(R_R + jX_R)} \\ &= \frac{sE_{R0}}{(R_R + jsX_{R0})} \end{aligned}$$

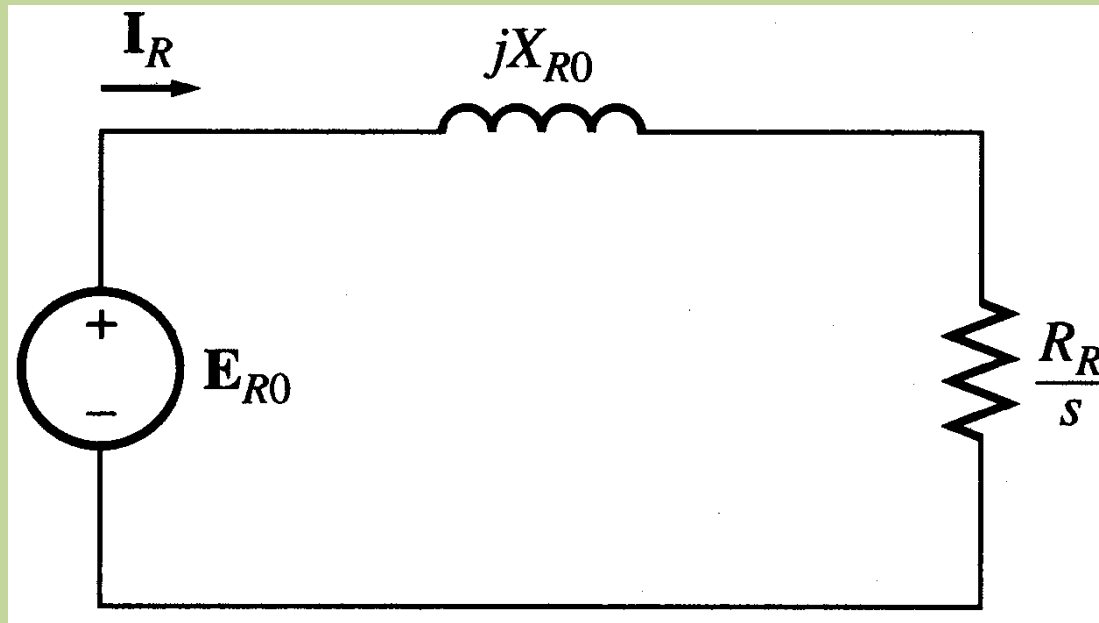
Dividiendo ambos términos por s se obtiene

$$I_R = \frac{E_{R0}}{\left(\frac{R_R}{s} + jX_{R0}\right)}$$

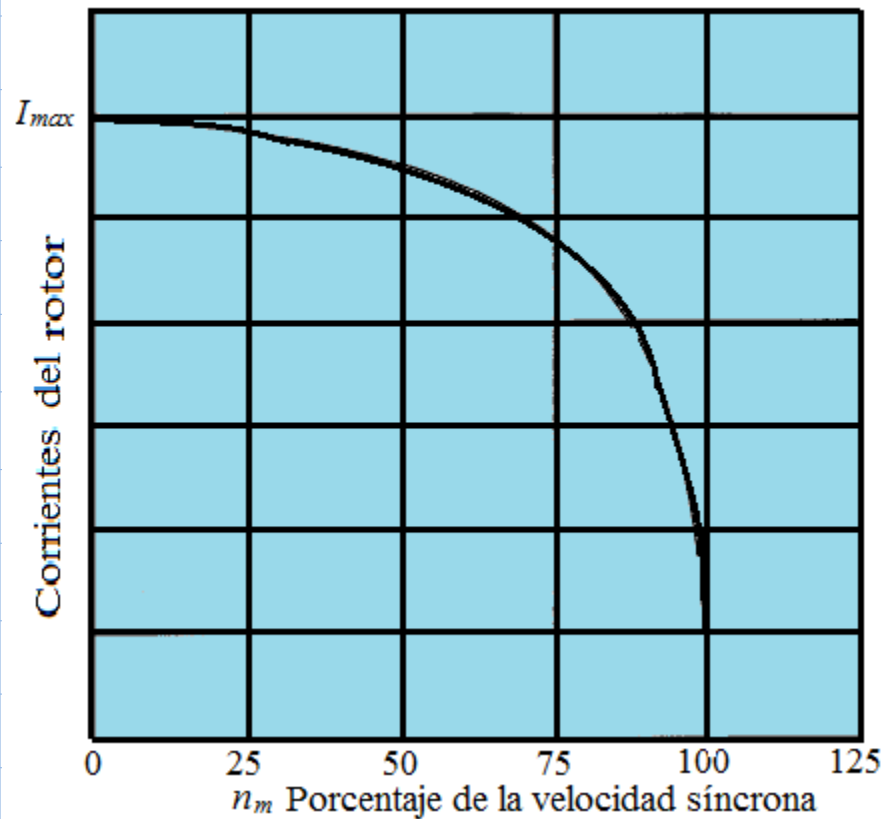
Donde E_{R0} es el voltaje inducido y X_{R0} es la reactancia del rotor a rotor bloqueado ($s = 1$)

Circuito Equivalente

Hemos obtenido el circuito equivalente del rotor



Corriente del rotor en función de la velocidad del rotor



Circuito Equivalente

Ahora podemos combinar los circuitos equivalentes del estator y del rotor para obtener el circuito equivalente del motor de inducción, por fase

Donde

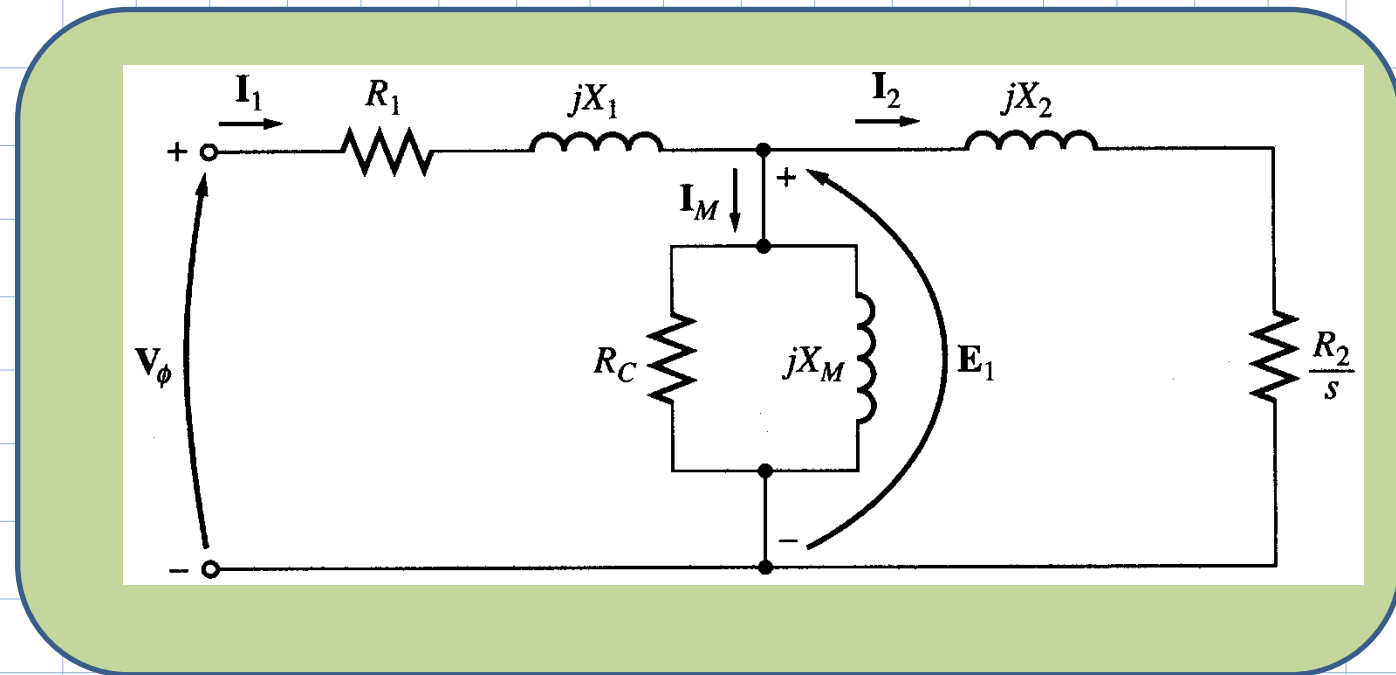
$$X_2 = a_{eff}^2 X_{R0}$$

$$R_2 = a_{eff}^2 R_R$$

$$I_2 = \frac{I_R}{a_{eff}}$$

$$E_1 = a_{eff} E_{R0}$$

$$a_{eff} = \frac{N_S}{N_R}$$



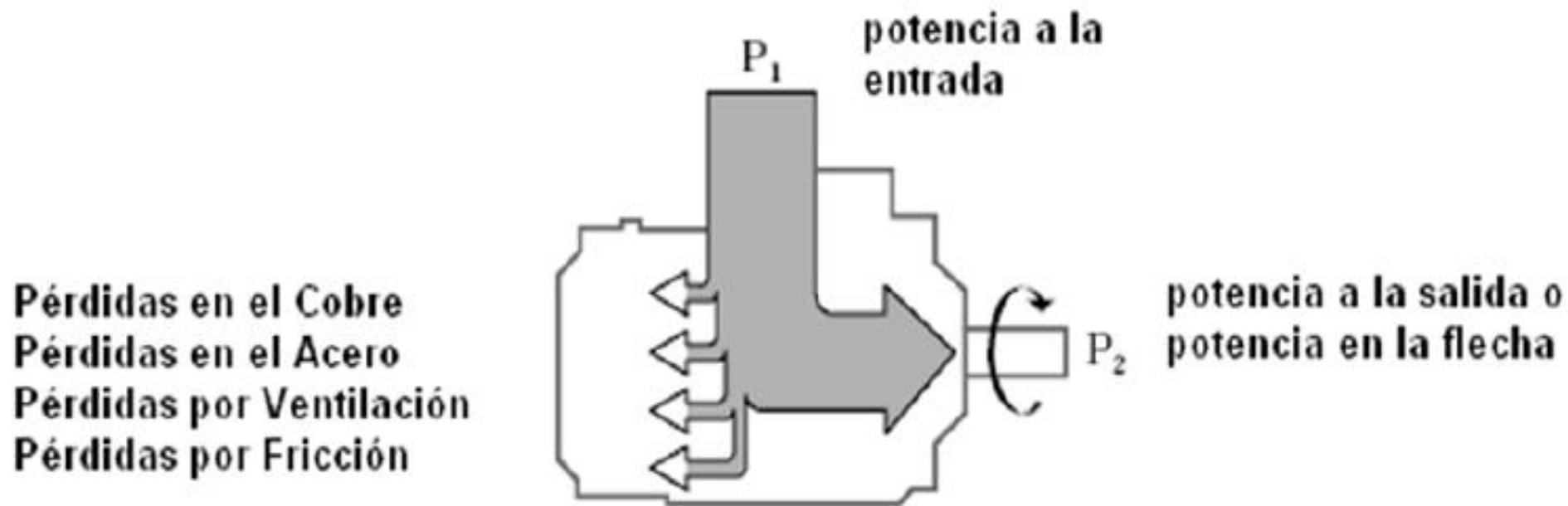
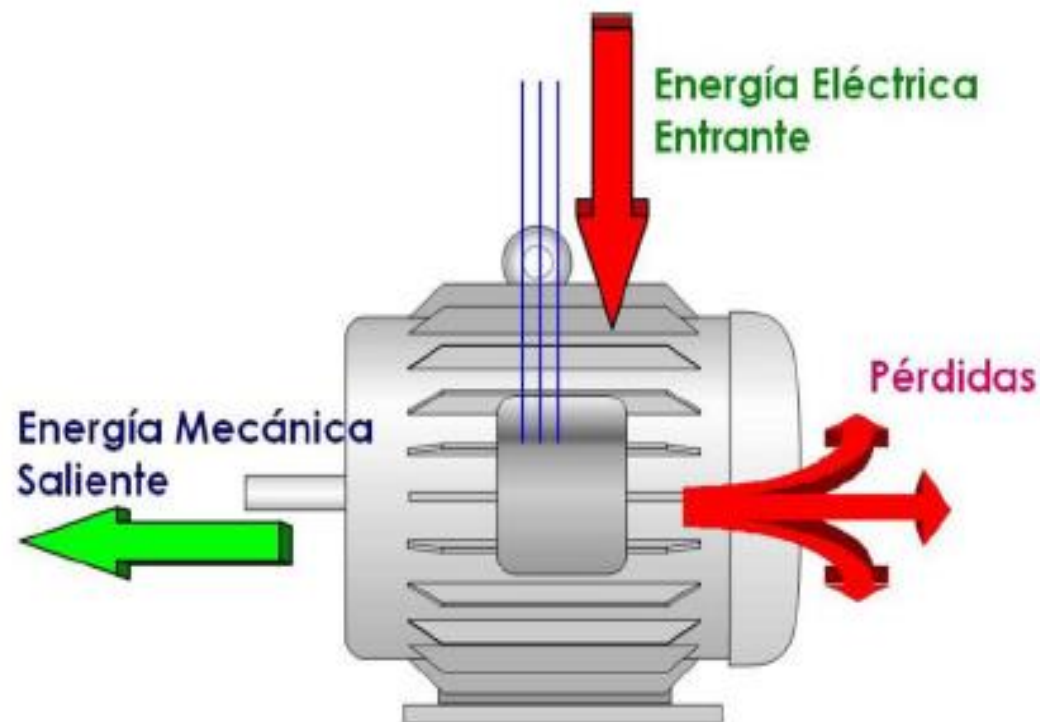
Pérdidas en las máquinas de inducción

Pérdidas en el cobre

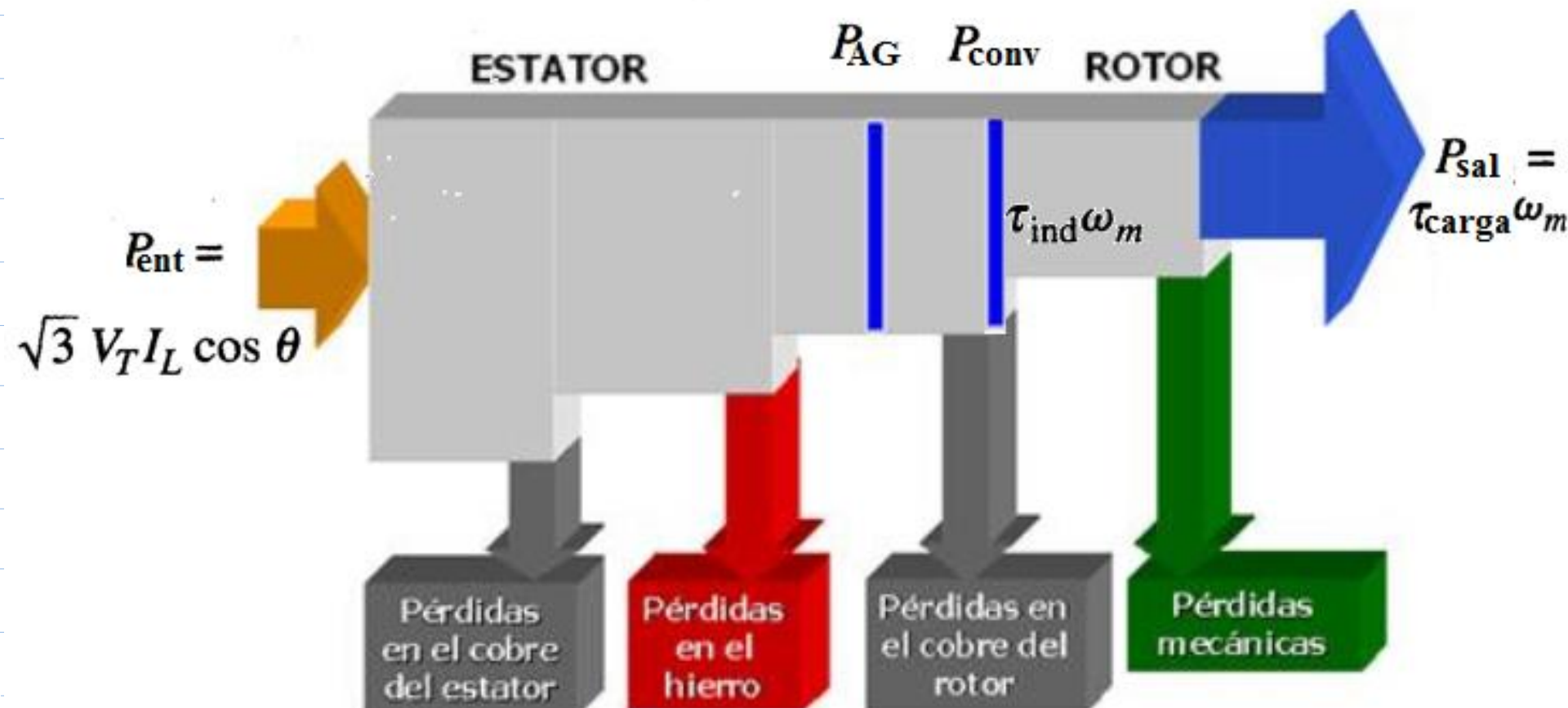
- En el estator ($P_{SCL} = I_1^2 R_1$)
- En el rotor ($P_{RCL} = I_2^2 R_2$)

Pérdidas en el núcleo (P_{core})

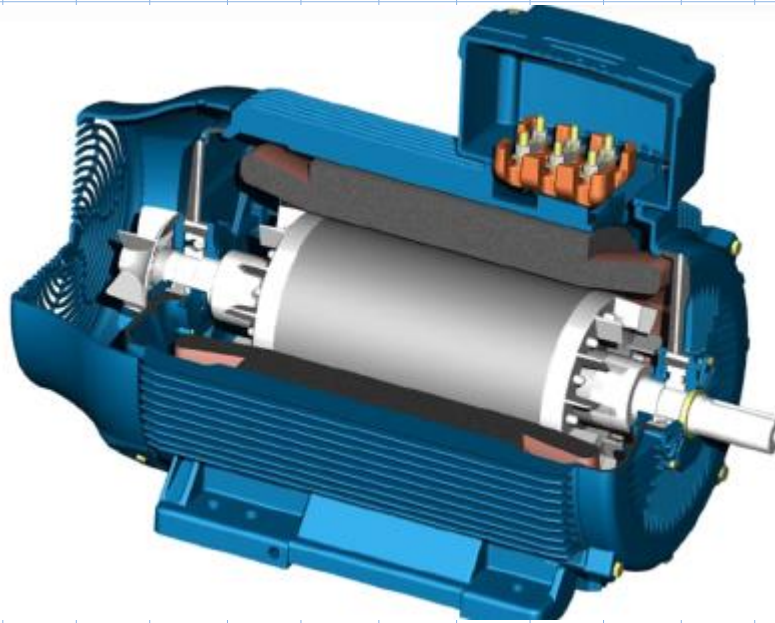
Pérdidas mecánicas por fricción y ventilación



Flujo de Potencias en el MI



Motores de Alta Eficiencia



Pérdidas Típicas en Motores de Inducción de 4 polos

Pérdidas	Valores Típicos %	Factores que las Afectan
Eléctricas en devanados	35 al 40	Calibre y material de los devanados
Magnéticas en el estator y rotor	15 al 20	Tipo y calidad de los materiales magnéticos
Indeterminadas	10 al 15	Diseño y Fabricación
Fricción y ventilación	5 al 10	Selección y diseño de rodamientos y ventiladores

Relaciones de Potencias

$$P_{in} = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta = 3 V_{ph} I_{ph} \cos \theta$$

$$P_{SCL} = 3 I_1^2 R_1$$

$$P_{AG} = P_{in} - (P_{SCL} + P_{core})$$

$$P_{RCL} = 3 I_2^2 R_2$$

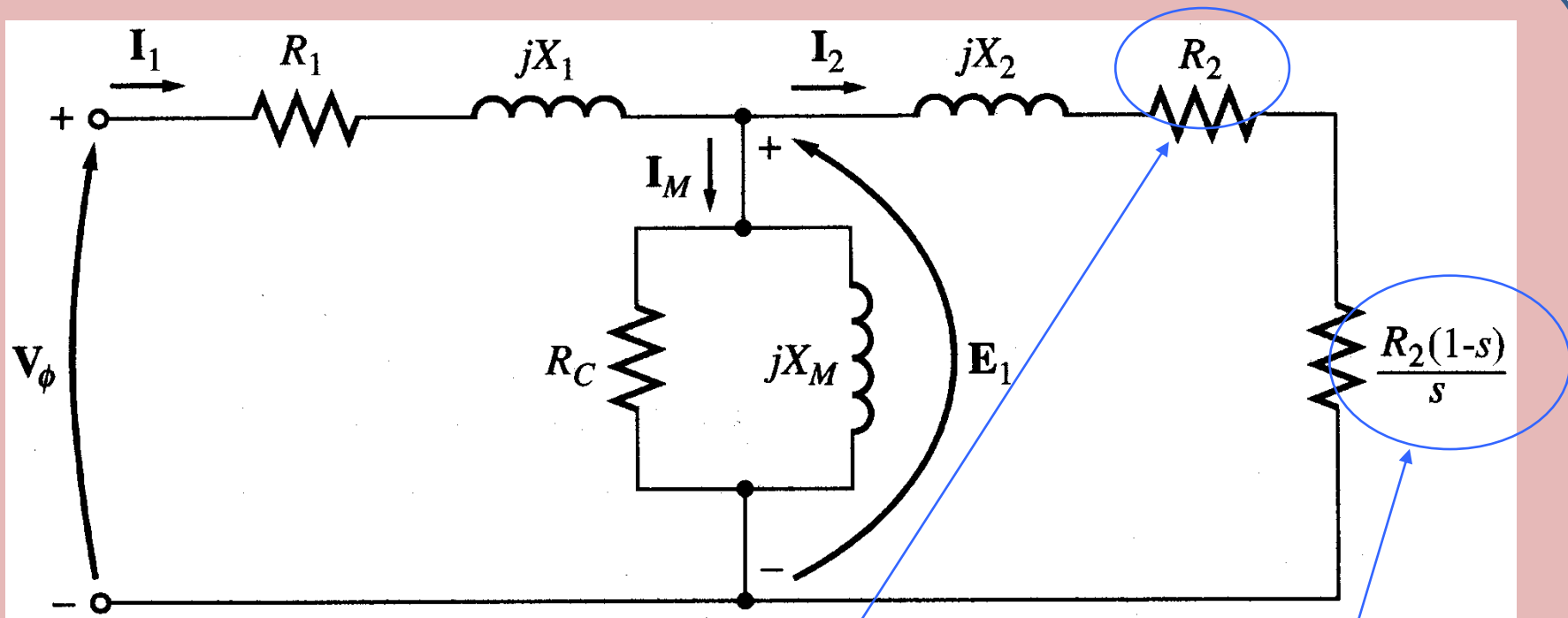
$$P_{conv} = P_{AG} - P_{RCL}$$

$$P_{out} = P_{conv} - (P_{f+w} + P_{stray})$$

$$\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m}$$

Circuito Equivalente

Se puede arreglar el circuito equivalente como sigue:



Resistencia del
rotor actual

Resistencia equivalente debida
a la carga mecánica

Relaciones de Potencia

$$P_{in} = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta = 3 V_{ph} I_{ph} \cos \theta$$

$$P_{SCL} = 3 I_1^2 R_1$$

$$P_{AG} = P_{in} - (P_{SCL} + P_{core}) = P_{conv} + P_{RCL} = 3 I_2^2 \frac{R_2}{s} = \frac{P_{RCL}}{s}$$

$$P_{RCL} = 3 I_2^2 R_2$$

$$P_{conv} = P_{AG} - P_{RCL} = 3 I_2^2 \frac{R_2 (1-s)}{s} = \frac{P_{RCL} (1-s)}{s}$$

$$P_{conv} = (1-s) P_{AG}$$

$$P_{out} = P_{conv} - (P_{f+w} + P_{stray}) \quad \tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} = \frac{(1-s) P_{AG}}{(1-s) \omega_s}$$

$$\tau_{out} = \frac{P_{out}}{\omega_m}$$

Ejemplo

Un motor de inducción trifásico de 480-V, 60 Hz, 50-hp, maneja 60A a $FP = 0.85$ (-). El motor tiene las siguientes pérdidas:

pérdidas del cobre en el estator = 2 kW, pérdidas de cobre en el rotor = 700 W, pérdidas por fricción y ventilación = 600 W, pérdidas en el núcleo = 1800 W, pérdidas misceláneas se consideran nulas. Encuentre:

1. La potencia en el entrehierro P_{AG} .
2. La potencia convertida P_{conv} .
3. La potencia de salida P_{sal} .
4. La eficiencia del motor.

Solución

$$\begin{aligned} 1. \quad P_{in} &= \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta \\ &= \sqrt{3} \times 480 \times 60 \times 0.85 = 42.4 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{AG} &= P_{in} - P_{SCL} - P_{core} \\ &= 42.4 - 2 - 1.8 = 38.6 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 2. \quad P_{conv} &= P_{AG} - P_{RCL} \\ &= 38.6 - \frac{700}{1000} = 37.9 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 3. \quad P_{out} &= P_{conv} - P_{F\&W} \\ &= 37.9 - \frac{600}{1000} = 37.3 \text{ kW} \end{aligned}$$

Solución

$$P_{out} = \frac{37.3}{0.746} = 50 \text{ hp}$$

4.
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$
$$= \frac{37.3}{42.4} \times 100 = 88\%$$

Ejemplo

Un motor de 460-V, 25-hp, 60 Hz, cuatro polos, conectado en Y tiene los siguientes valores de su circuito equivalente:

$$R_1 = 0.641 \Omega \quad R_2 = 0.332 \Omega$$

$$X_1 = 1.106 \Omega \quad X_2 = 0.464 \Omega \quad X_M = 26.3 \Omega$$

Las pérdidas rotacionales son 1100 W y se asumen constantes.

Las pérdidas en el núcleo se incluyen en las pérdidas rotacionales. Para un deslizamiento de 2.2 por ciento a voltaje y frecuencia nominales, encuentre:

1. La velocidad del motor
2. La corriente en el estator
3. El factor de potencia
4. P_{conv} y P_{out}
5. τ_{ind} y τ_{carga}
6. El porcentaje de Eficiencia

Solución

$$1. \quad n_{sync} = \frac{120 f_e}{P} = \frac{120 \times 60}{4} = 1800 \text{ rpm}$$

$$n_m = (1-s)n_{sync} = (1-0.022) \times 1800 = 1760 \text{ rpm}$$

$$2. \quad Z_2 = \frac{R_2}{s} + jX_2 = \frac{0.332}{0.022} + j0.464$$
$$= 15.09 + j0.464 = 15.1 \angle 1.76^\circ \Omega$$

$$Z_f = \frac{1}{1/jX_M + 1/Z_2} = \frac{1}{-j0.038 + 0.0662 \angle -1.76^\circ}$$
$$= \frac{1}{0.0773 \angle -31.1^\circ} = 12.94 \angle 31.1^\circ \Omega$$

Solución

$$\begin{aligned}Z_{tot} &= Z_{stat} + Z_f \\&= 0.641 + j1.106 + 12.94 \angle 31.1^\circ \Omega \\&= 11.72 + j7.79 = 14.07 \angle 33.6^\circ \Omega\end{aligned}$$

$$I_1 = \frac{V_\phi}{Z_{tot}} = \frac{\frac{460 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}}}{14.07 \angle 33.6^\circ} = 18.88 \angle -33.6^\circ \text{ A}$$

$$FP = \cos 33.6^\circ = 0.833 \text{ atrasado}$$

$$3. \ P_{in} = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta = \sqrt{3} \times 460 \times 18.88 \times 0.833 = 12530 \text{ W}$$

$$4. \ P_{SCL} = 3 I_1^2 R_1 = 3 (18.88)^2 \times 0.641 = 685 \text{ W}$$

$$P_{AG} = P_{in} - P_{SCL} = 12530 - 685 = 11845 \text{ W}$$

Solución

$$P_{conv} = (1-s)P_{AG} = (1-0.022)(11845) = 11585 \text{ W}$$

$$P_{out} = P_{conv} - P_{F\&W} = 11585 - 1100 = 10485 \text{ W}$$
$$= \frac{10485}{746} = 14.1 \text{ hp}$$

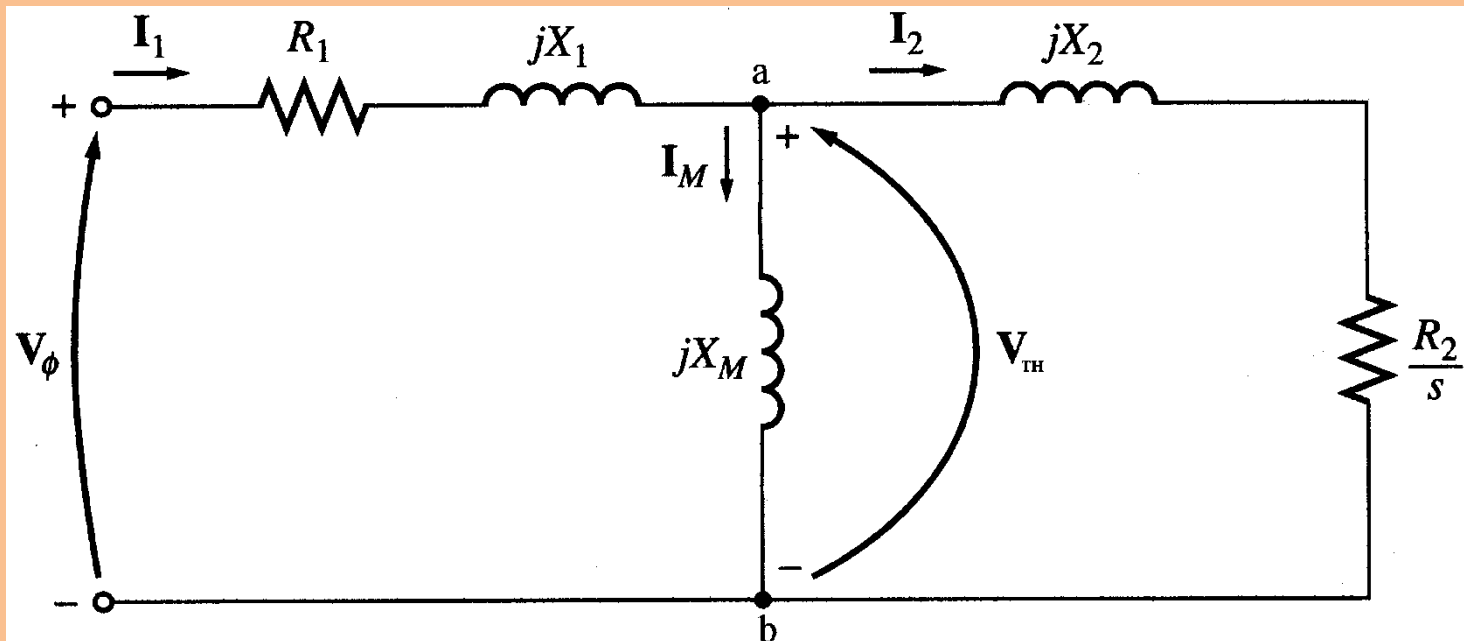
5. $\tau_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_{sync}} = \frac{11845}{2\pi \times 1800 / 60} = 62.8 \text{ N.m}$

$$\tau_{load} = \frac{P_{out}}{\omega_m} = \frac{10485}{2\pi \times 1760 / 60} = 56.9 \text{ N.m}$$

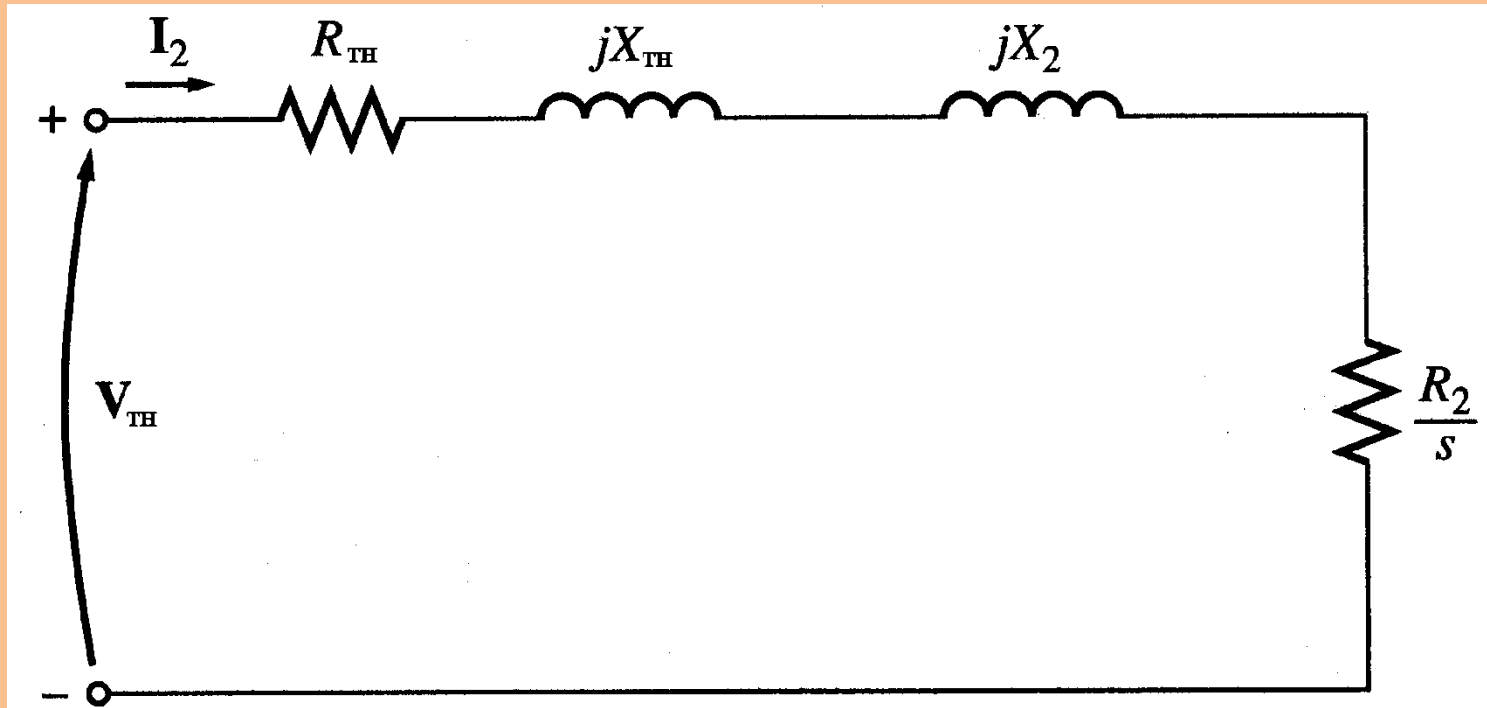
6. $\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% = \frac{10485}{12530} \times 100 = 83.7\%$

Par, Potencia y Teorema de Thevenin

El teorema de Thevenin se puede usar para transformar la red a la izquierda de los puntos a y b dentro de una fuente de voltaje equivalente V_{TH} en serie con una impedancia equivalente $R_{TH} + jX_{TH}$



Par, Potencia y Teorema de Thevenin



$$V_{TH} = V_{\phi} \frac{jX_M}{R_1 + j(X_1 + X_M)}$$

$$|V_{TH}| = |V_{\phi}| \frac{X_M}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_M)^2}}$$

$$R_{TH} + jX_{TH} = (R_1 + jX_1) // jX_M$$

Par, Potencia y Teorema de Thevenin

Como $X_M \gg X_1$ y $X_M \gg R_1$

$$V_{TH} \approx V_\phi \frac{X_M}{X_1 + X_M}$$

También $X_M \gg X_1$ y $X_M + X_1 \gg R_1$

$$R_{TH} \approx R_1 \left(\frac{X_M}{X_1 + X_M} \right)^2$$
$$X_{TH} \approx X_1$$

Par, Potencia y Teorema de Thevenin

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{Z_T} = \frac{V_{TH}}{\sqrt{\left(R_{TH} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2}}$$

La potencia convertida a mecánica es (P_{conv})

$$P_{conv} = 3I_2^2 \frac{R_2(1-s)}{s}$$

Y el par desarrollado internamente (τ_{ind})

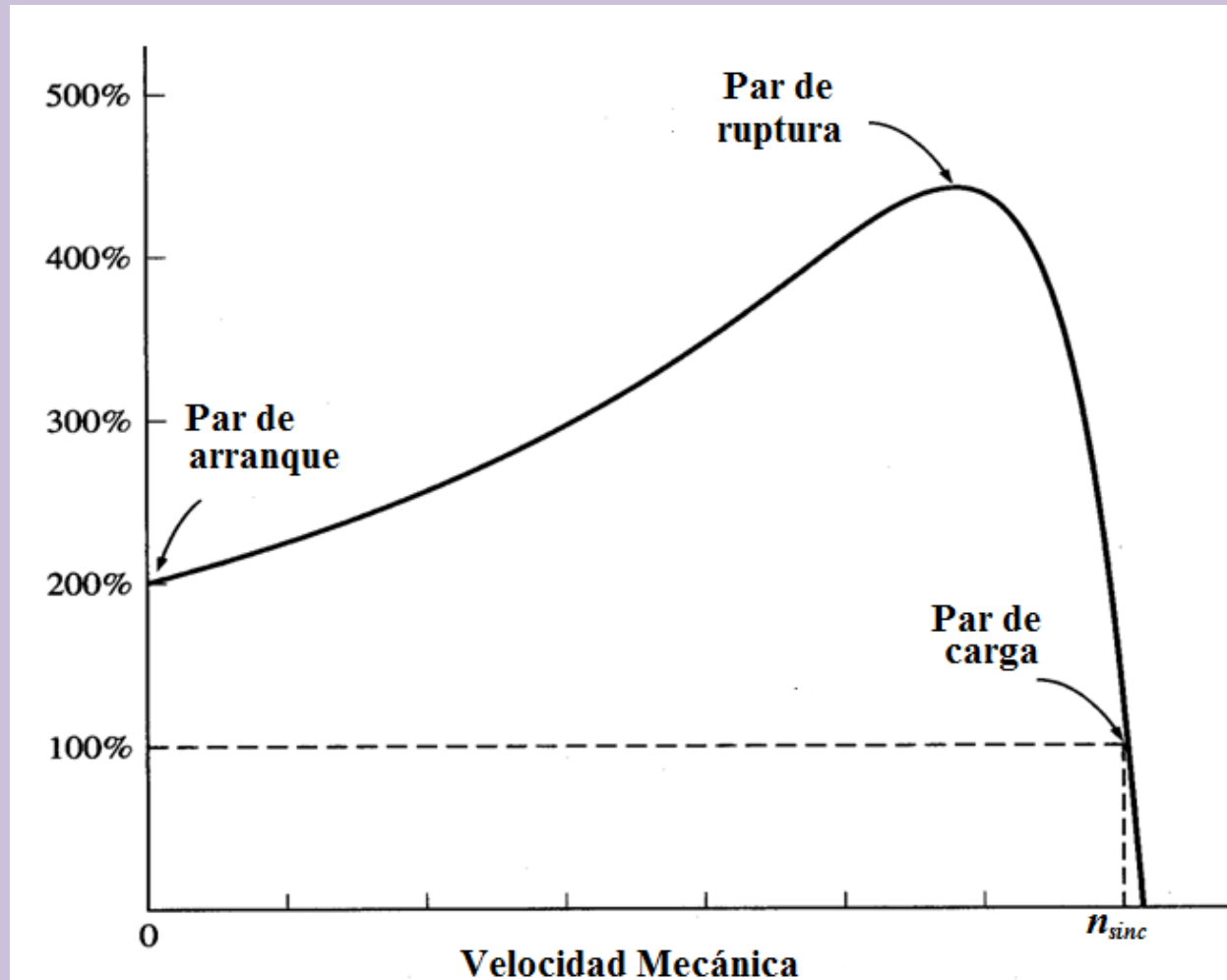
$$\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} = \frac{P_{conv}}{(1-s)\omega_s} = \frac{3I_2^2 \frac{R_2}{s}}{\omega_s} = \frac{P_{AG}}{\omega_s}$$

Par, Potencia y Teorema de Thevenin

$$\tau_{ind} = \frac{3}{\omega_s} \left(\frac{V_{TH}}{\sqrt{\left(R_{TH} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \right)^2 \left(\frac{R_2}{s} \right)$$

$$\tau_{ind} = \frac{1}{\omega_s} \frac{3V_{TH}^2 \left(\frac{R_2}{s} \right)}{\left(R_{TH} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2}$$

Característica Par - Velocidad



Curva característica típica par – velocidad del motor de inducción

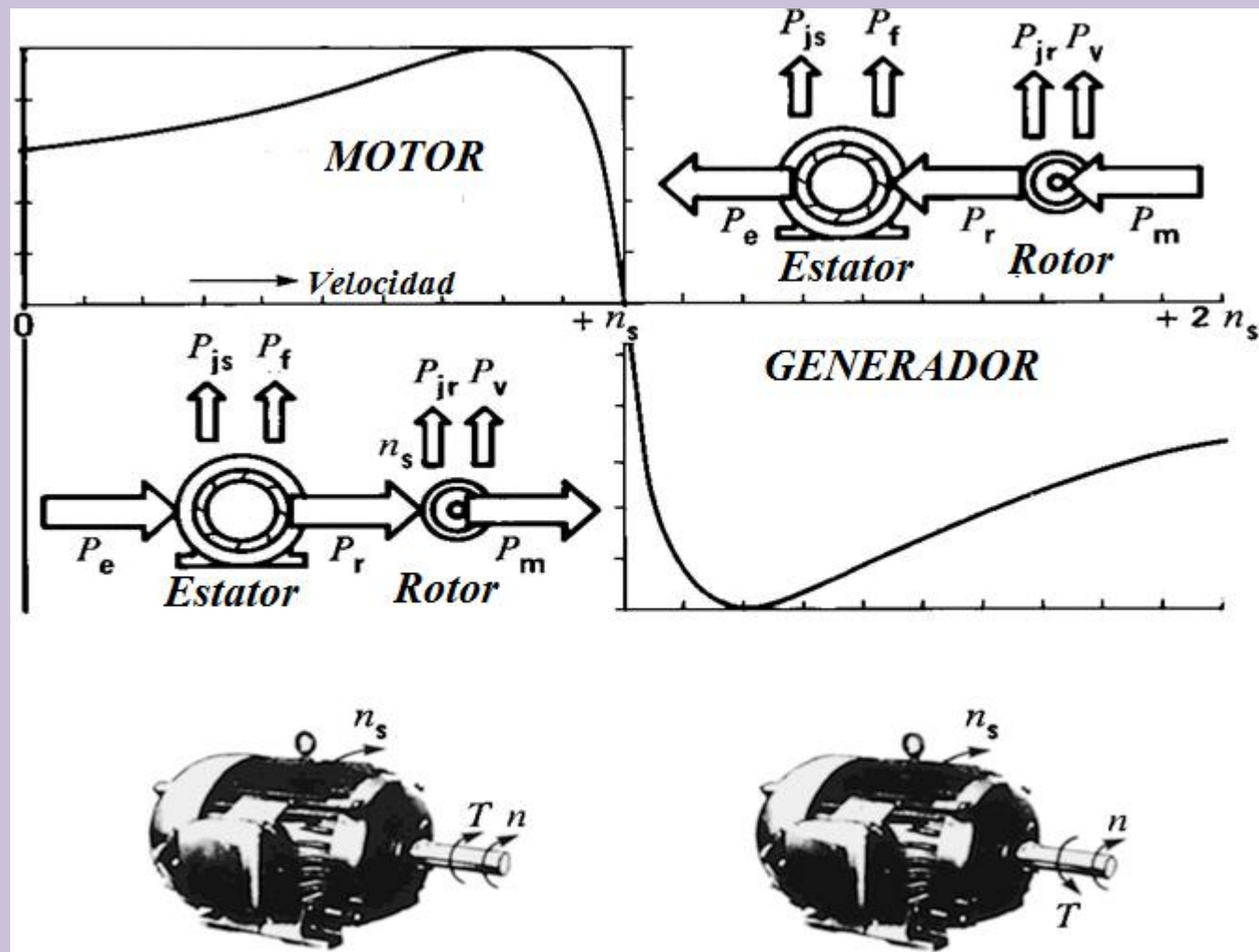
Comentarios

1. El par inducido es cero a velocidad síncrona
2. La curva es casi lineal entre vacío y plena carga. En este rango, la resistencia del rotor es mucho más grande que la reactancia, debido a la corriente del rotor, el par se incrementa linealmente con el deslizamiento.
3. Hay un par máximo que no puede ser excedido y se llama *par de ruptura*, este par excede de 2 a 3 veces el par de plena carga

Comentarios

4. El par de arranque del motor es ligeramente mayor que el par de plena carga, para que el motor al arrancar pueda mover cualquier carga que le sea suministrada
5. El par del motor para un deslizamiento dado varía al cuadrado del voltaje aplicado
6. Si el rotor gira a velocidad mayor a la síncrona, la máquina funciona como generador, convirtiendo la potencia mecánica en potencia eléctrica

Curva característica completa par – velocidad de la máquina de inducción



Par máximo

El par máximo ocurre cuando la potencia transferida a R_2/s es máxima

Esta condición ocurre cuando R_2/s se iguala a la magnitud de la impedancia $R_{TH} + j(X_{TH} + X_2)$

$$\frac{R_2}{s_{T_{\max}}} = \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}$$

$$s_{T_{\max}} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}}$$

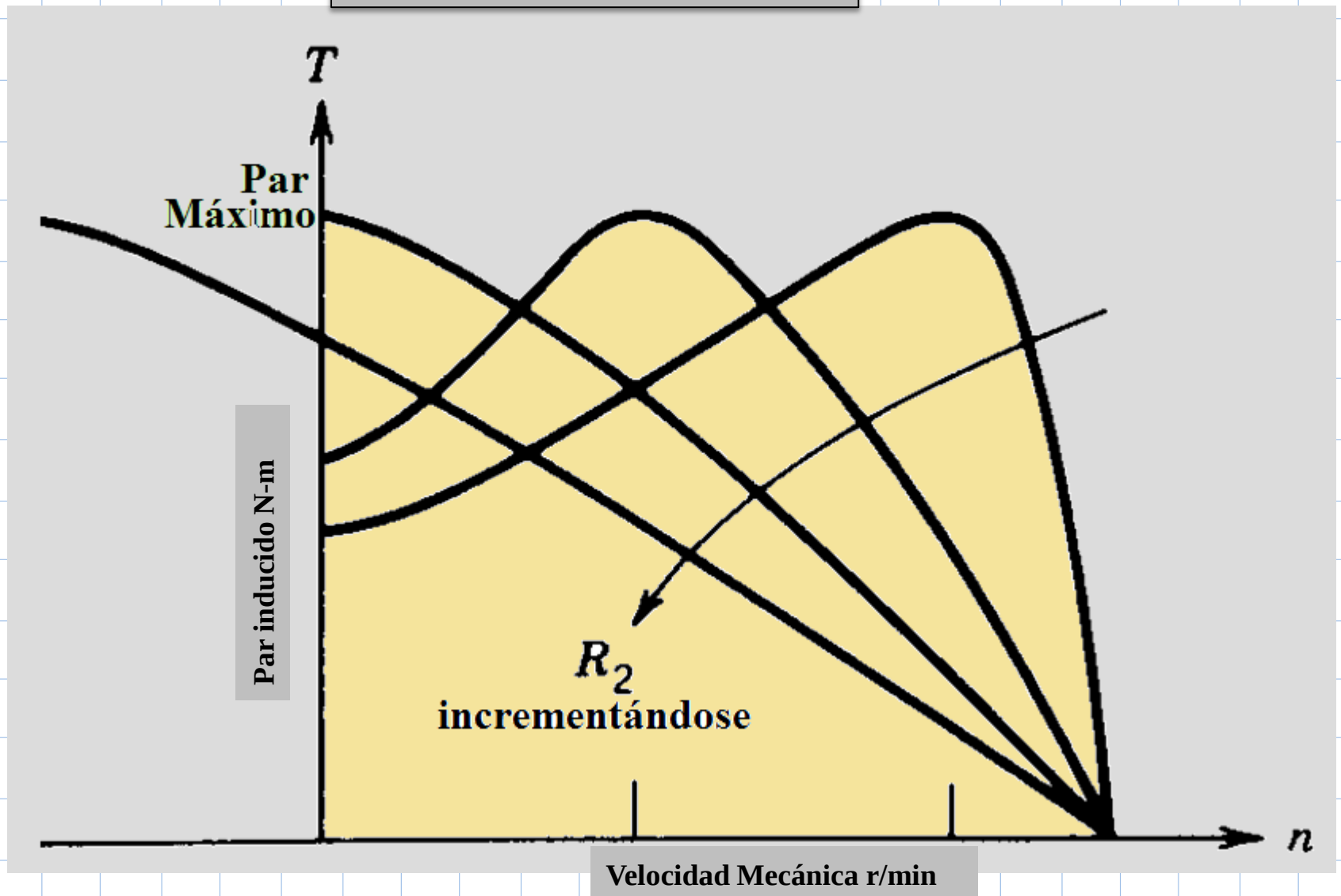
El par máximo correspondiente al motor de inducción es igual a

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2\omega_s} \left(\frac{3V_{TH}^2}{R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \right)$$

El deslizamiento a par máximo es directamente proporcional a la resistencia del rotor R_2

El par máximo es independiente de R_2

Par máximo



Efecto de la resistencia del rotor en la curva par velocidad

Máquina de inducción de rotor devanado

Es deseable que una máquina eléctrica produzca un par de arranque elevado y un rendimiento cercano a la unidad. Estas dos características de la máquina se contraponen con respecto a la variación de la resistencia del rotor. Por esta razón en algunas máquinas de inducción se añade en el eje del rotor anillos deslizantes, cada uno de ellos se conecta a un extremo de las fases del rotor

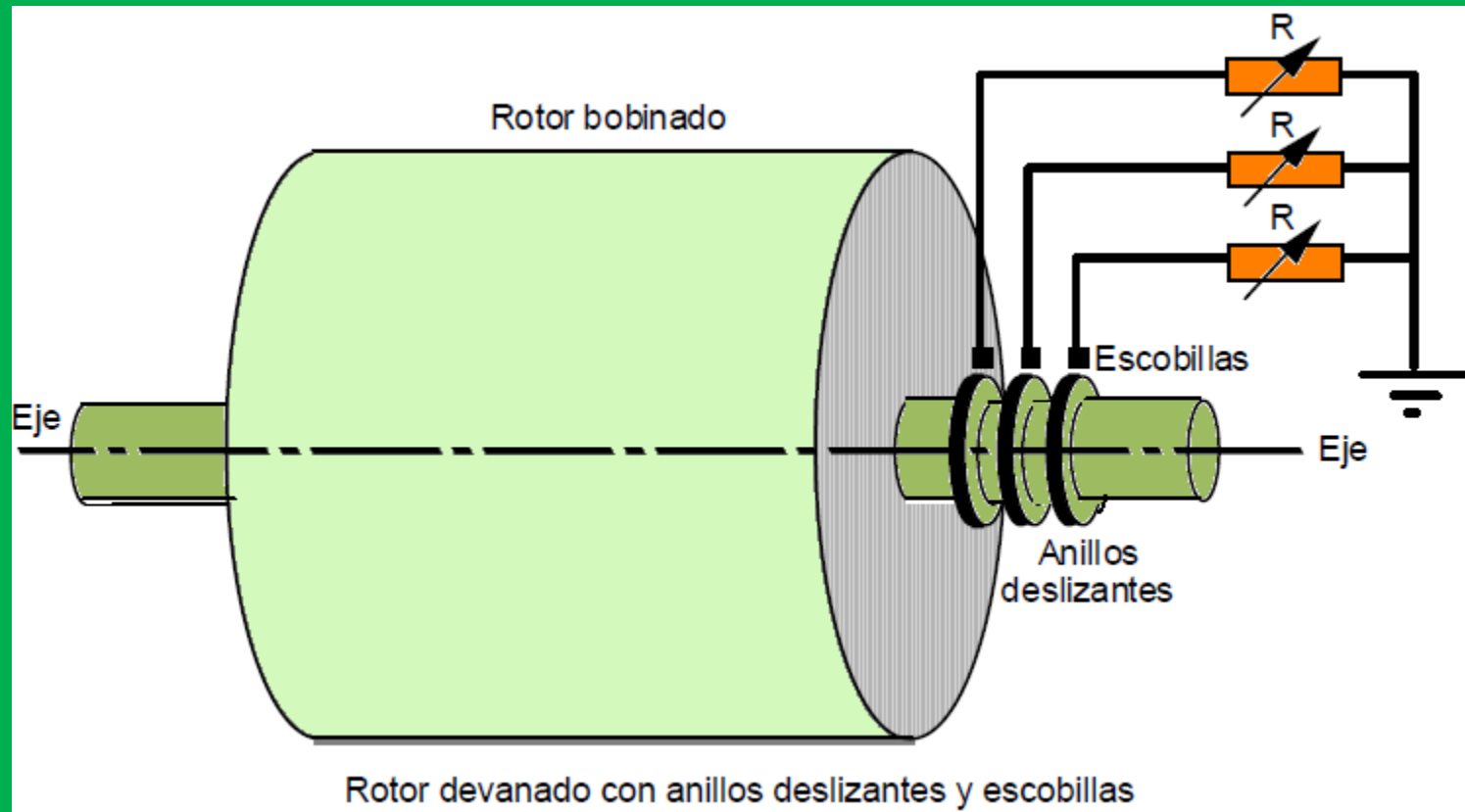
Estos anillos, permiten conectar elementos en el exterior de la máquina con las bobinas del rotor, mediante contactos deslizantes - carbones o escobillas -

Máquina de inducción de rotor devanado

Al disponer de acceso al circuito del rotor, es posible incluir resistencia adicional con la finalidad de incrementar el par eléctrico de la máquina durante el arranque

Cuando la máquina está operando en régimen permanente es posible eliminar o cortocircuitar la resistencia adicional para mejorar el rendimiento.

Máquina de inducción de rotor devanado



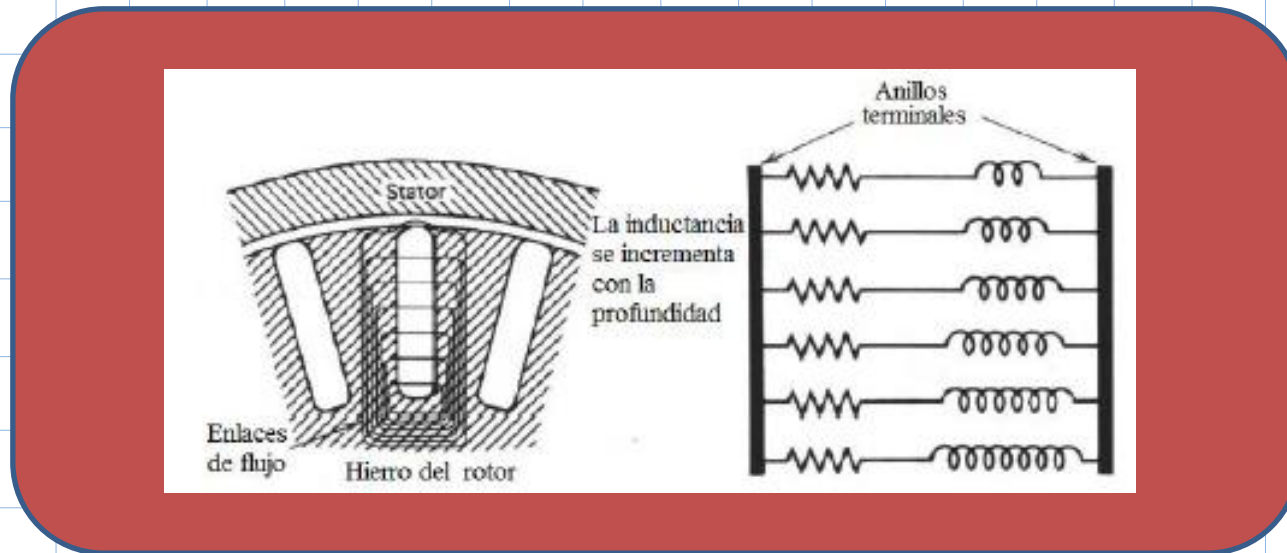
Máquina de inducción de rotor devanado

El rotor bobinado con acceso mediante anillos rozantes, es capaz de regular el par de arranque, disminuir las corrientes durante el proceso de aceleración y aumentar el rendimiento en el punto de operación, eliminando la resistencia externa

Sin embargo, esta solución encarece la máquina, incrementa las pérdidas mecánicas por fricción con las escobillas.

Rotores de barras profundas

El flujo de dispersión de una ranura es producido por la corriente que circula en la barra presente dentro de la ranura. Este campo se presenta en la figura siguiente



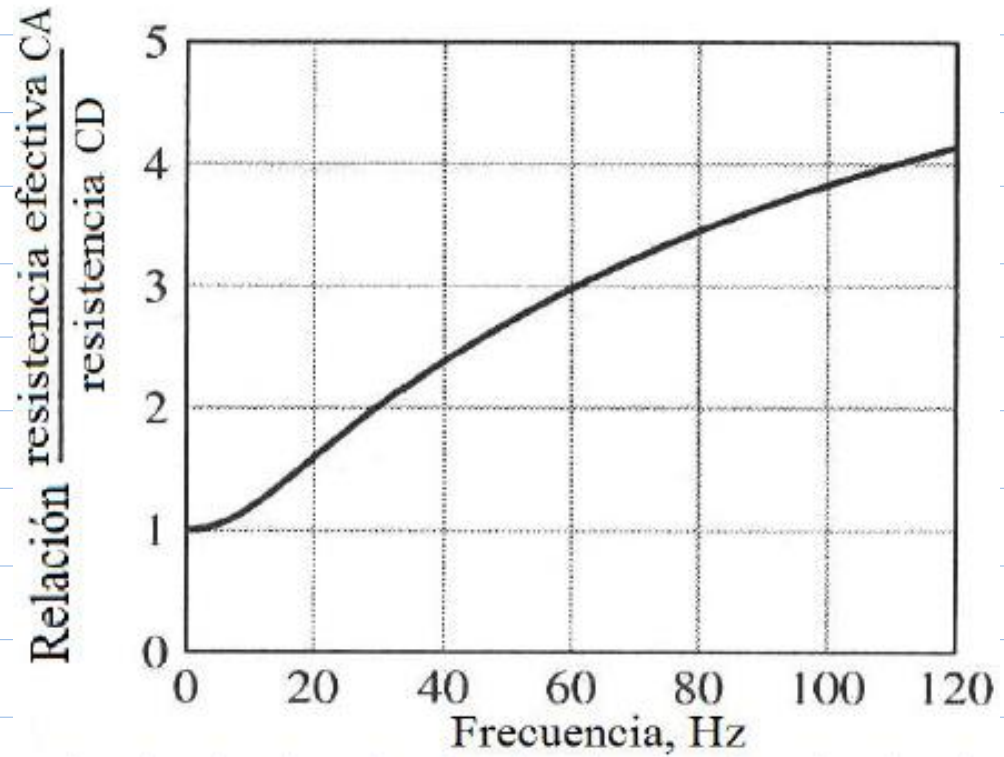
Cuanto mayor es el número de líneas de campo en la barra conductora mayor es la inductancia en esa región
De esta forma la inductancia aumenta en las partes más profundas de la barra

Rotores de barras profundas

A mayor frecuencia del voltaje inducido en la barra mayor inductancia, haciendo que la corriente se concentre en la parte superficial de la barra

Reduciendo el área de circulación de la corriente y por consecuencia aumentando la resistencia de la barra

Aumento de la resistencia debido al efecto pelicular



Rotor de jaula profunda y doble jaula

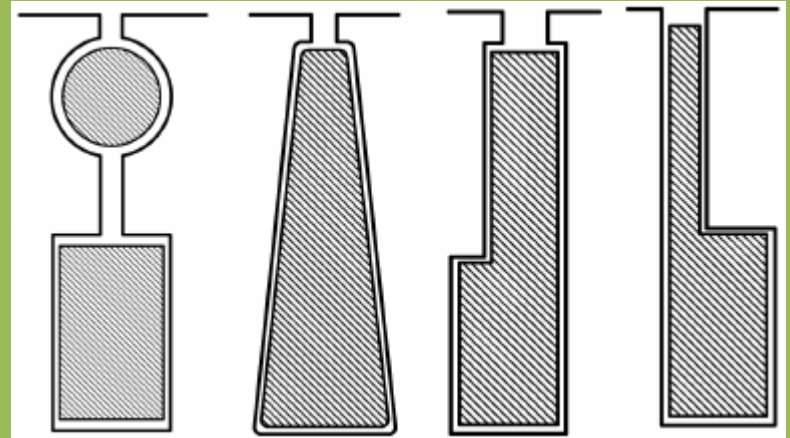
El rotor de jaula de ardilla es muy simple desde el punto de vista constructivo, además es capaz de soportar esfuerzos eléctricos y mecánicos mucho mayores que el rotor devanado. En este rotor no es posible incluir resistencia adicional en serie con los conductores. Sin embargo, durante la construcción del rotor se puede variar el valor de la resistencia controlando el espesor de los anillos que cortocircuitan las barras.

El rotor de jaula de ardilla se puede diseñar utilizando barras profundas o doble jaula, una externa muy resistiva y otra profunda con menor resistencia.

Rotor de jaula profunda y doble jaula

Cuando la máquina está operando cerca del punto nominal, los deslizamientos son cercanos a cero y la frecuencia de las corrientes que circulan por el rotor también es reducida.

En este caso las corrientes se distribuyen uniformemente por la barra profunda o consecuentemente por las dos barras, disminuyendo la resistencia equivalente

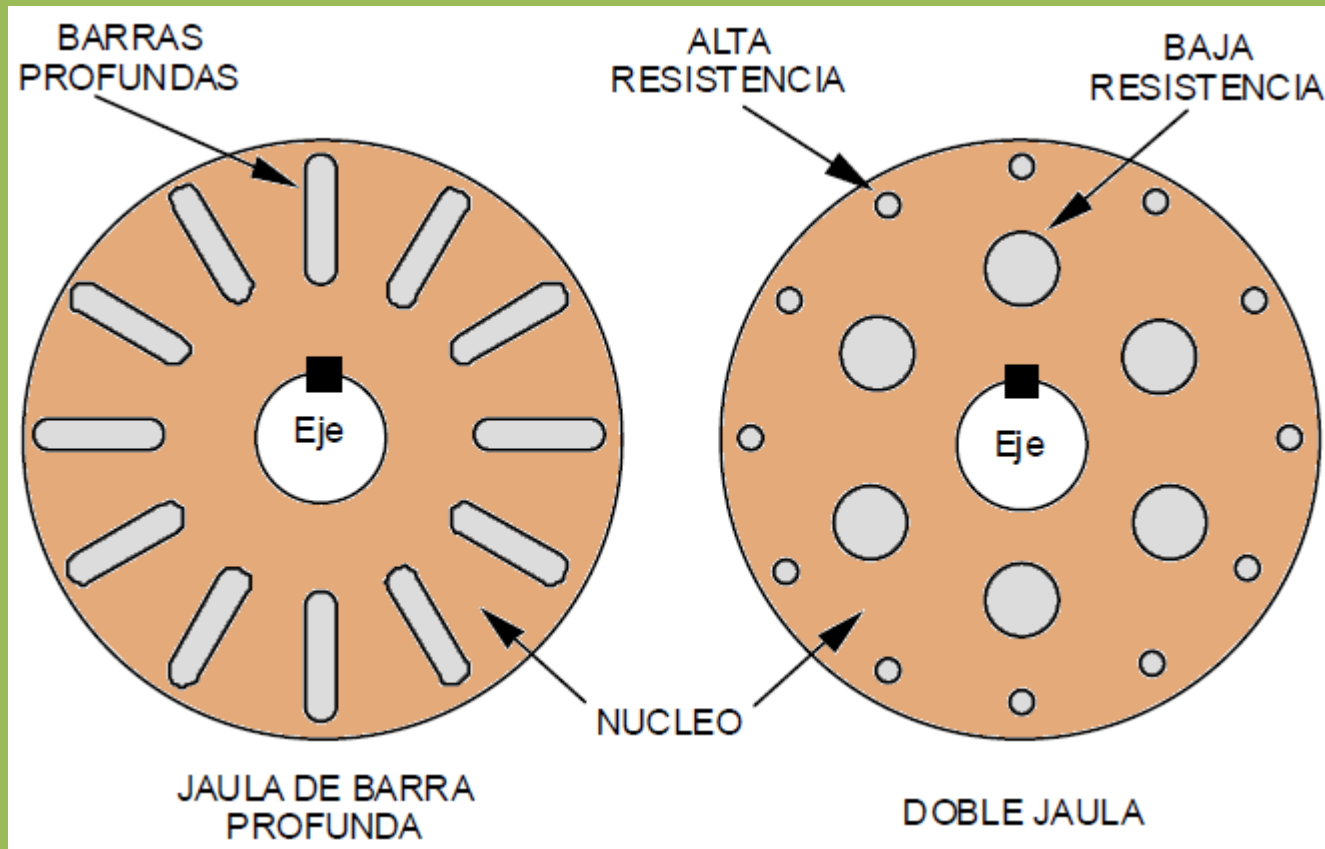


Rotor de jaula profunda y doble jaula

Estas modificaciones permiten utilizar el efecto pelicular para producir una variación de la resistencia equivalente del rotor durante el arranque. Con el rotor en reposo, el deslizamiento es grande y la frecuencia de las corrientes que circulan por el rotor es proporcional al deslizamiento.

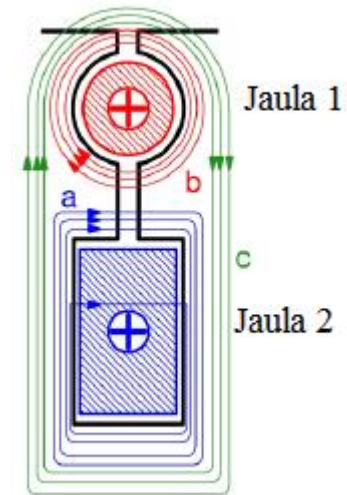
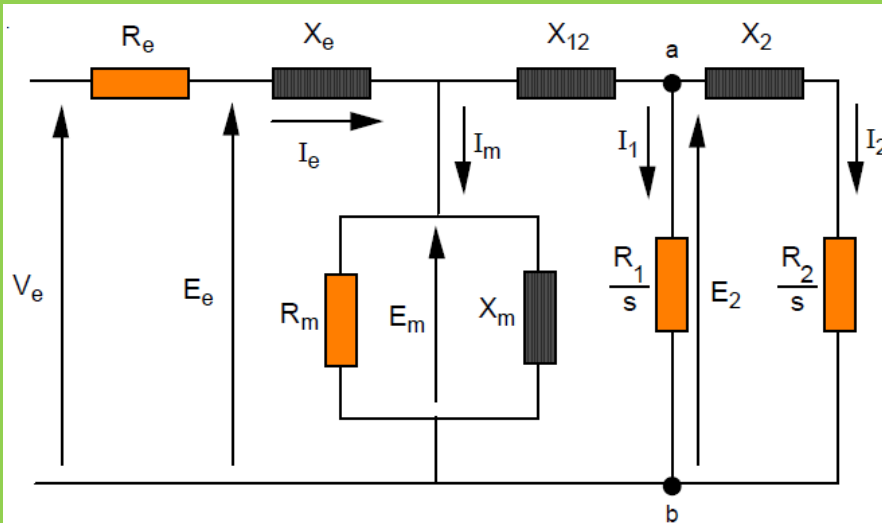
Si las barras son profundas o el rotor es de doble jaula, la corriente de alta frecuencia fluye por la periferia de la barra o por la jaula más externa y resistiva, incrementando sustancialmente la resistencia equivalente del rotor en esta condición

Rotor de jaula profunda y doble jaula

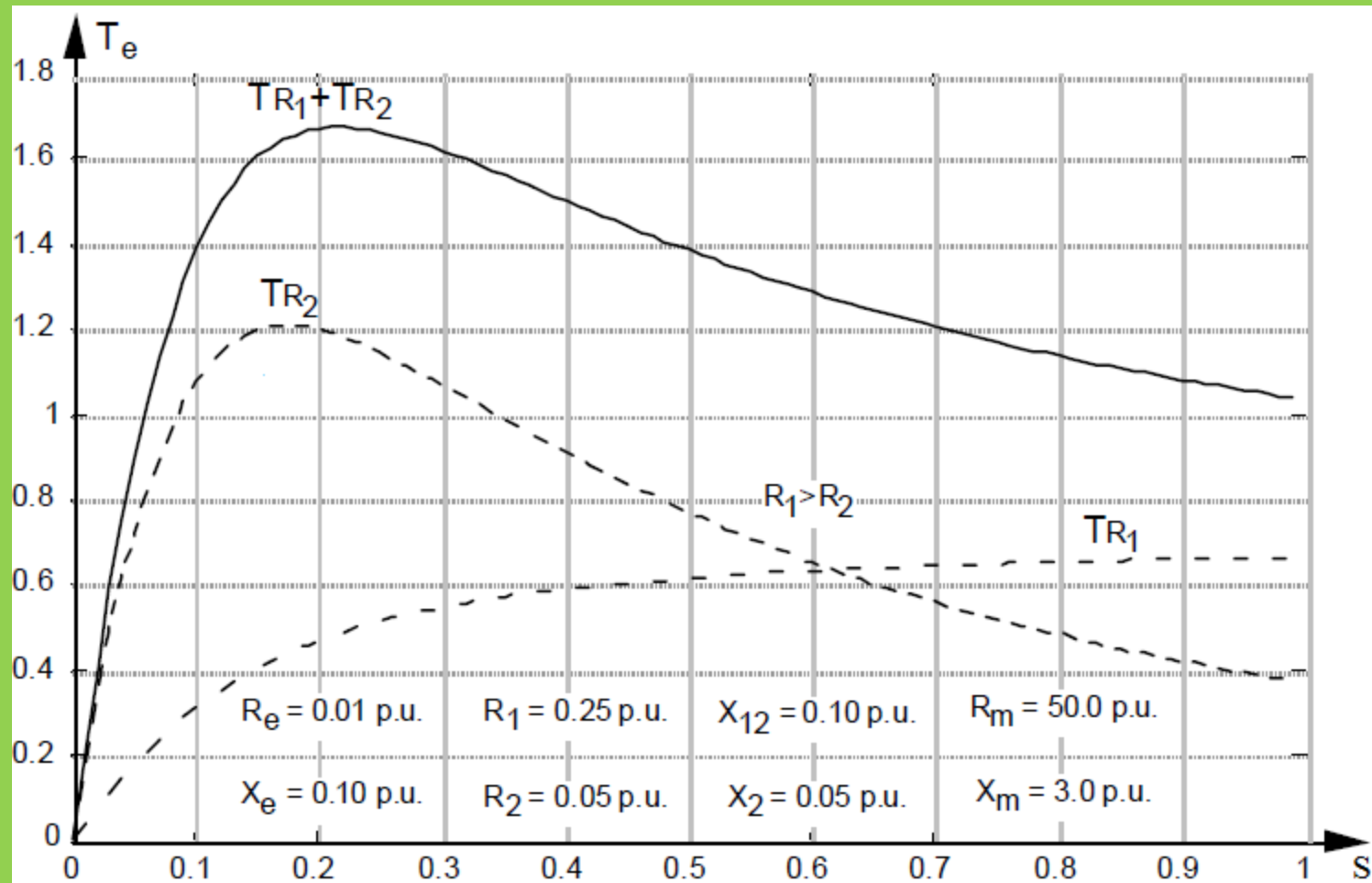


Rotor de jaula profunda y doble jaula

La máquina de inducción de doble jaula se puede modelar mediante un circuito equivalente que considere los enlaces de flujo mutuos entre el estator y las barras del rotor, así como los enlaces de dispersión de cada una de las jaulas



Rotor de jaula profunda y doble jaula



Característica de par eléctrico-deslizamiento para un rotor de doble jaula

Rotor de jaula profunda y doble jaula

Durante el arranque, el efecto pelicular reparte las corrientes no uniformemente en el interior de las barras del rotor. Las corrientes circulan principalmente por la periferia de la barra con la finalidad de reducir la trayectoria de los enlaces de flujo –condición de menor energía-

Cuando la máquina alcanza el punto de operación permanente, el deslizamiento es muy pequeño, y las corrientes se distribuyen uniformemente en las barras, con lo cual disminuye su resistencia. El modelo del rotor de doble jaula puede ser empleado en el análisis de este tipo de máquinas con suficiente precisión

Ejemplo

Un motor de inducción de dos polos, 50-Hz suministra 15kW a una carga a una velocidad de 2950 rpm. Calcule:

1. El deslizamiento del motor
2. El par inducido en esas condiciones
3. La velocidad de operación del motor si se duplica el par
4. La potencia suministrada por el motor en condiciones del inciso 3)

Solución

$$1. \ n_{sync} = \frac{120 f_e}{P} = \frac{120 \times 50}{2} = 3000 \text{ rpm}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{3000 - 2950}{3000} = 0.0167 \text{ or } 1.67\%$$

2. Como las P_{F+V} no se indican, asuma que $P_{conv} = P_{carga}$ y que $\tau_{ind} = \tau_{carga}$

$$\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} = \frac{15 \times 10^3}{2950 \left(\frac{2\pi}{60} \right)} = 48.6 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Solución

3. En la región de bajo deslizamiento, la curva del par es lineal y el par inducido es directamente proporcional al deslizamiento, si el par se duplica, el nuevo deslizamiento será 3.33% y la velocidad del motor será

$$n_m = (1-s)n_{sync} = (1-0.0333) \times 3000 = 2900 \text{ rpm}$$

4. $P_{conv} = \tau_{ind} \omega_m$

$$= (2 \times 48.6) \times \left(2900 \times \frac{2\pi}{60}\right) = 29.5 \text{ kW}$$

Ejemplo

Un motor de 460-V, 25-hp, 60-Hz, cuatro polos, conexión Y, rotor devanado tiene los siguientes valores en ohms por fase, referidos al circuito del estator.

$$R_1 = 0.641\Omega, R_2 = 0.332\Omega, X_1 = 1.106\Omega, X_2 = 0.464\Omega, X_M = 26.3\Omega$$

Calcule:

1. El par máximo de este motor y la velocidad a la cual ocurre
2. El par de arranque
3. La velocidad a la cual ocurre el par máximo si se duplica la resistencia del rotor. Calcule también el nuevo par de arranque.
4. Calcule y dibuje la curva del par para ambos casos

Solución

$$V_{TH} = V_{\phi} \frac{X_M}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_M)^2}}$$
$$= \frac{\frac{460}{\sqrt{3}} \times 26.3}{\sqrt{(0.641)^2 + (1.106 + 26.3)^2}} = 255.2 \text{ V}$$

$$R_{TH} \approx R_1 \left(\frac{X_M}{X_1 + X_M} \right)^2$$
$$\approx (0.641) \left(\frac{26.3}{1.106 + 26.3} \right)^2 = 0.590 \Omega$$

$$X_{TH} \approx X_1 = 1.106 \Omega$$

Solución

$$\begin{aligned} s_{T_{\max}} &= \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \\ &= \frac{0.332}{\sqrt{(0.590)^2 + (1.106 + 0.464)^2}} = 0.198 \end{aligned}$$

La velocidad correspondiente es:

$$n_m = (1 - s)n_{sync} = (1 - 0.198) \times 1800 = 1444 \text{ rpm}$$

Solución

El par máximo a esta velocidad es:

$$\begin{aligned}\tau_{\max} &= \frac{1}{2\omega_s} \left(\frac{3V_{TH}^2}{R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \right) \\ &= \frac{3 \times (255.2)^2}{2 \times (1800 \times \frac{2\pi}{60}) [0.590 + \sqrt{(0.590)^2 + (1.106 + 0.464)^2}] } \\ &= 229 \text{ N.m}\end{aligned}$$

Solución

2. El par de arranque se encuentra de la ecuación del par haciendo $s = 1$

$$\begin{aligned}\tau_{\text{arranque}} = \tau_{\text{ind}}|_{s=1} &= \frac{1}{\omega_s} \frac{3V_{TH}^2 \left(\frac{R_2}{s} \right)}{\left(R_{TH} + \frac{R_2}{s} \right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \Big|_{s=1} \\ &= \frac{3V_{TH}^2 R_2}{\omega_s [(R_{TH} + R_2)^2 + (X_{TH} + X_2)^2]} \\ &= \frac{3 \times (255.2)^2 \times (0.332)}{1800 \times \frac{2\pi}{60} \times [(0.590 + 0.332)^2 + (1.106 + 0.464)^2]} \\ &= \mathbf{104 \text{ N} \cdot \text{m}}\end{aligned}$$

Solución

3. Si la resistencia del rotor se duplica, entonces también lo hace el deslizamiento a par máximo

$$s_{T_{\max}} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} = 0.396$$

La velocidad correspondiente es

$$n_m = (1 - s)n_{sync} = (1 - 0.396) \times 1800 = 1087 \text{ rpm}$$

Y el par máximo sigue siendo

$$\tau_{max} = 229 \text{ N.m}$$

Solución

El par de arranque es ahora

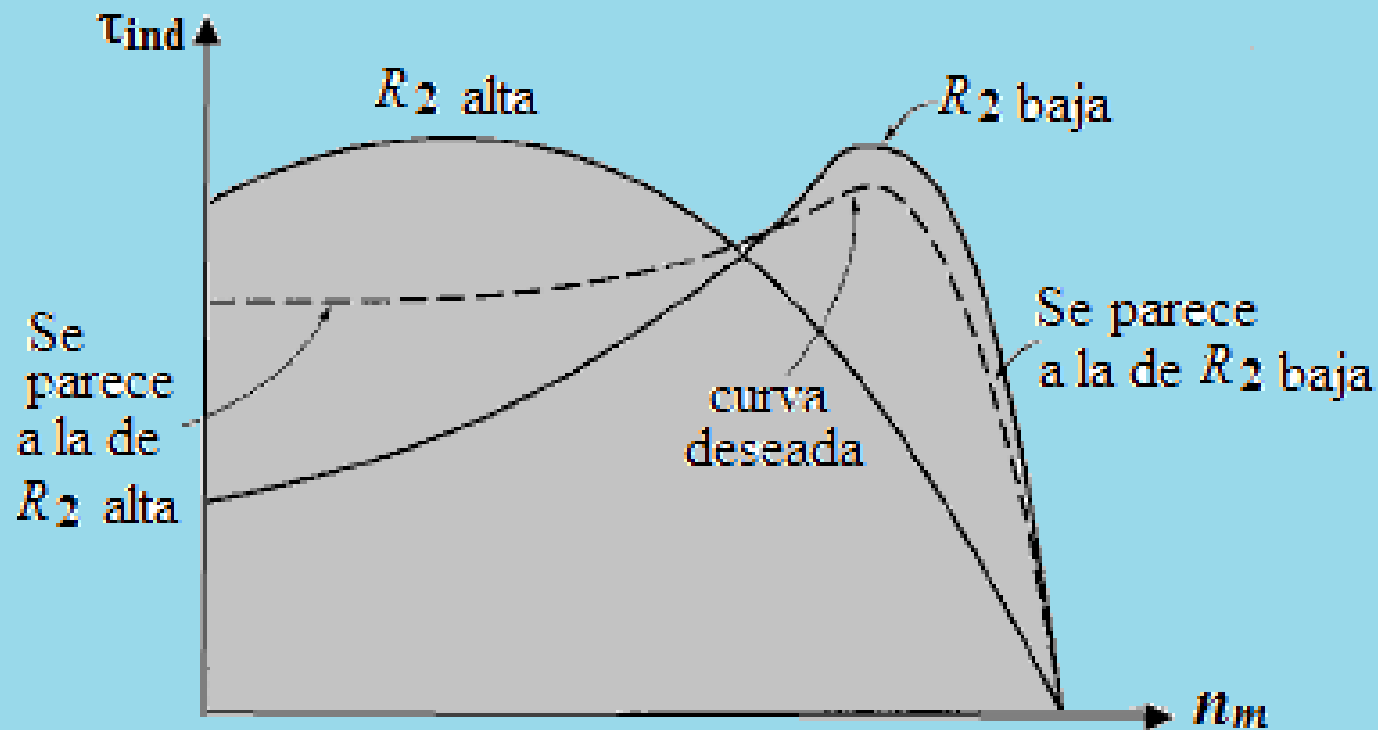
$$\tau_{arr} = \frac{3 * 255.2^2 * 0.664}{1800 * \frac{2\pi}{60} * [(0.590 + 0.664)^2 + (1.106 + 0.464)^2]}$$
$$= 170 \text{ N-m}$$

Diseños NEMA de los motores asíncronos

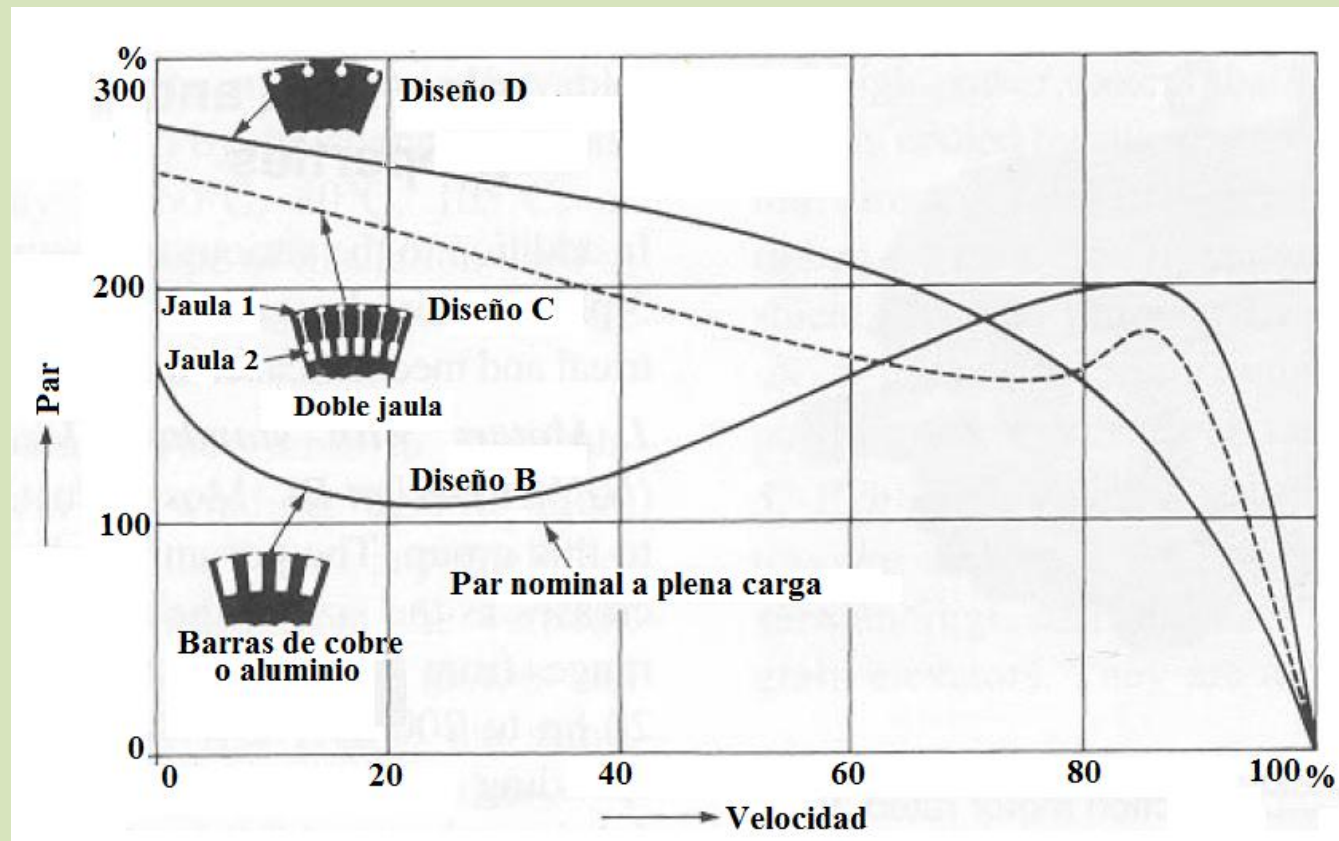
En las máquinas de inducción es posible producir una gran variedad de curvas de torsión – velocidad, variando las características del rotor, lo que resulta de gran ayuda a la industria a la hora de escoger los motores más apropiados para la gran variedad de aplicaciones

NEMA en Estados Unidos y la International Electrotechnical Commission (IEC) tienen definidos, en toda la gama de caballos de fuerza, una serie de diseños normalizados con diferentes curvas de par – velocidad

Curva característica par velocidad que combina los efectos de alta resistencia a bajas velocidades (deslizamiento alto) con efectos de baja resistencia a altas velocidades (deslizamiento bajo)



Estos diseños normalizados se conocen como *clases de diseño*. En la siguiente figura pueden verse una serie de curvas de momento de torsión – velocidad típicas para las cuatro clases de diseños normalizados de NEMA. Los rasgos característicos de cada clase de diseño normalizado se esbozan a continuación:



Diseño clase “A”

Características: par de arranque normal y bajo deslizamiento

- Deslizamiento a plena carga menor al 5%
- Par máximo entre 200 y 300% del par de plena carga y sucede a bajo deslizamiento (menos del 20%)
- Par de arranque entre el 100 y 200% del par nominal
- Problemas con alta corriente de arranque, entre 500 y 800% de la corriente nominal, en motores de 7.5 HP en adelante se requiere un método de arranque a voltaje reducido
- Aplicaciones: ventiladores, abanicos, bombas, tornos y otras máquinas – herramientas.

Diseño clase “B”

Características: Baja corriente de arranque y bajo deslizamiento

- Produce el mismo par de arranque que un clase A pero con 25% menos de la corriente
- Par máximo igual o mayor al 200% del par nominal
- Deslizamiento menor al 5%
- Prácticamente ha desplazado al motor diseño clase A

Diseño clase “C”

Par de arranque alto, con corriente de arranque baja y bajo deslizamiento (menos del 5%) a plena carga. El par máximo es ligeramente más bajo que el de los motores de clase A, mientras que el par de arranque llega hasta un 250% del momento de plena carga. Estos motores se fabrican con rotores de doble jaula por lo que son más costosos que los motores de las clases anteriores. Se usan para cargas que requieren un alto par de arranque, tales como bombas cargadas, compresores y bandas transportadoras.

Diseño clase “D”

- Par de arranque muy alto (275% o mas del par nominal)
- Corriente de arranque baja
- Muy alto deslizamiento alto a plena carga.
- Son motores de inducción comunes, de clase A, pero con las barras del rotor más pequeñas y hechos de un material de más alta resistencia
- La alta resistencia del rotor hace que el par máximo se presente a muy baja velocidad.
- Se usa en aplicaciones que requieren la aceleración de cargas de tipo inercias extremadamente altas, especialmente grandes volantes usados en prensas punzonadoras o grúas de tijera

Arranque de motores de inducción

Elementos de control Normas ANSI



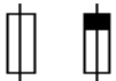
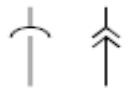
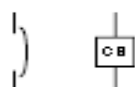
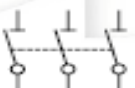
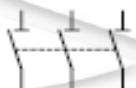
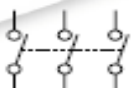
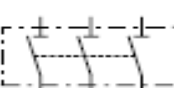
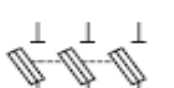
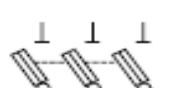
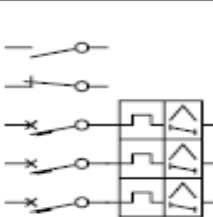
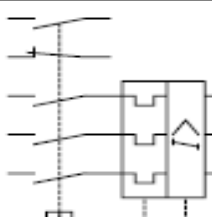
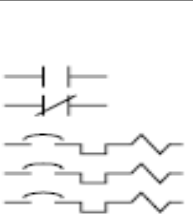
Interruptores de límite	
Interruptores de presión	
Interruptores de nivel	
Interruptores de temperatura	
Interruptores de flujo	
Botones de arranque y paro	
Contactos NA - NC	
Contactos temporizados on delay	
Contactos temporizados off delay	
Luz indicadora	
Bobina de contactor	
Elementos térmicos	



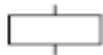
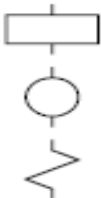
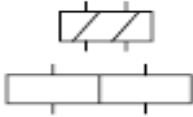
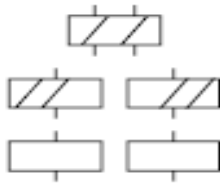
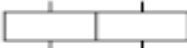
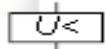
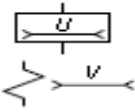
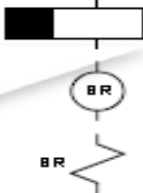
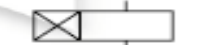
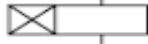
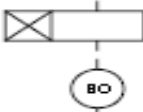
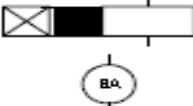
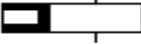
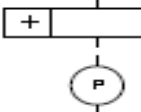
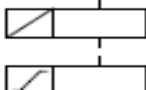
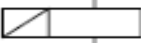
Simbología

Significación	Símbolo según las normas		
	IEC	DIN	ANSI
Contacto de cierre.			
Contacto de apertura.			
Contacto de conmutación.			
Contacto de conmutación sin interrupción.			
Contacto temporizado abierto. Cierre retardado.			
Contacto temporizado cerrado. Apertura retardada.			
Contacto temporizado abierto. Apertura retardada.			
Contacto temporizado cerrado. Cierre retardado.			
Contactor con relé térmico (guardamotor).			

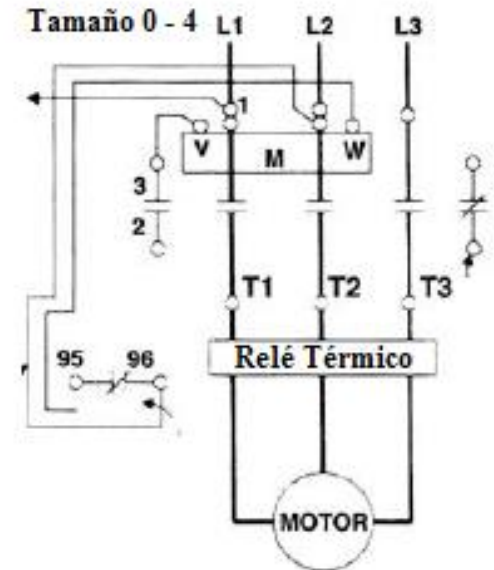
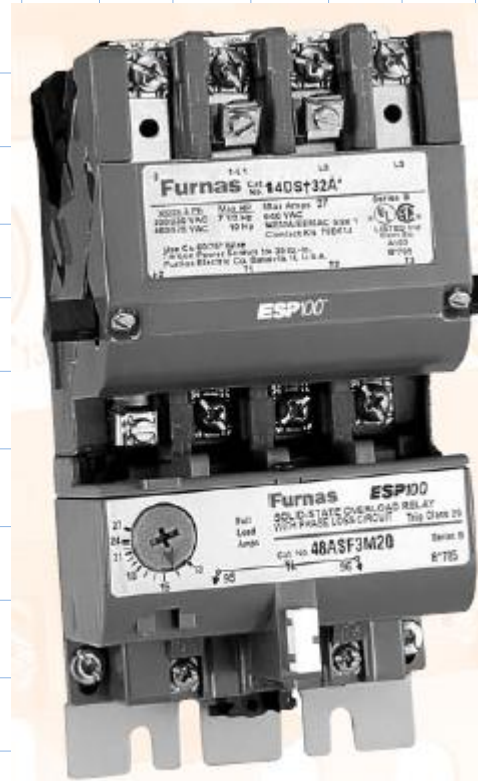
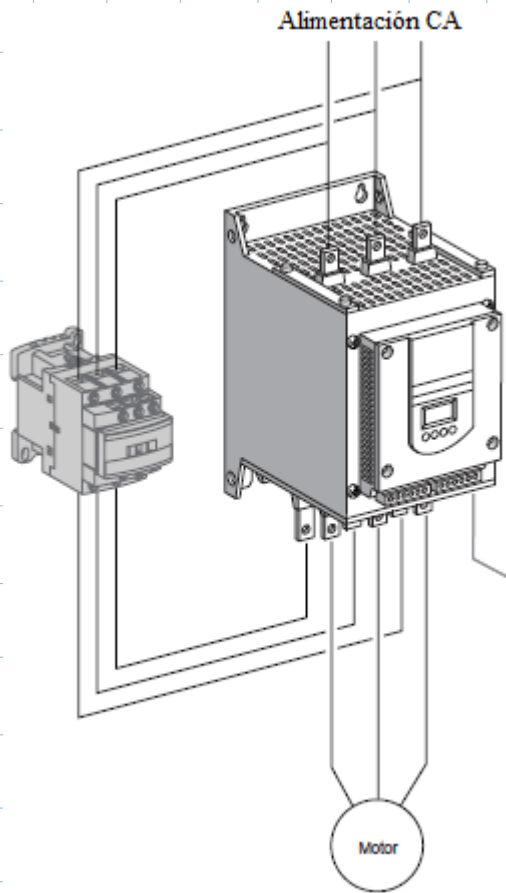
Simbología

Significación	Símbolo según las normas		
	IEC	DIN	ANSI
Cortocircuito fusible (base + cartucho).		= IEC	= IEC 
Barra de seccionamiento (barra de conexión).			
Dispositivo de enchufe.			
Interruptor de potencia. Símbolo general.			
Interruptor seccionador de potencia. (Posición seccionadora visible).			
Seccionador tripolar.			
Seccionador en carga, tripolar.			
Seccionador con fusibles.		= IEC	
Interruptor automático con protección magnetotérmica.			

Simbología

Significación	Símbolo según las normas		
	IEC	DIN	ANSI
Sistema de accionamiento, con retroceso automático, al cesar la fuerza de accionamiento, para contactores y similares.		= IEC	
Relé con dos devanados activos en el mismo sentido.			
Relé o disparador de medida con indicación de la magnitud medida. Por ej.: mínima tensión.			
Sistema de accionamiento electromecánico retardado. Retraso a la desconexión.	  MUY RETARDADO		
Sistema de accionamiento electromecánico retardado. Retraso a la conexión.	  MUY RETARDADO		
Sistema de accionamiento electromecánico retardado. Retraso a la conexión y desconexión.			
Relé polarizado.			
Relé de remanencia.			

Contactor con protección térmica



Centro de control de motores



Tableros de motores de media tensión con interruptores automáticos



Arranque motores de inducción

Datos de placa de un motor 50/60 Hz

○ CATALOG # U15E2D FRAME 254T ENCL TEFC ○			
SHAFT END BRG 6309	OPP END BRG 6207	MAX AMB 40 C	INSUL CLASS F
PH 3	DUTY CONT	MODEL # AE51	
USABLE ON 208V 60HZ AT 47.6 MAX AMPS			
60 HERTZ DATA	HP 15.0	RPM 1770	50 HERTZ DATA
	VOLTS 208	230 460	
	FLA 42.6	38.4 19.2	
	SFA	44.2 22.1	
	SF 1.15	DESIGN B CODE G	
	NEMA NOM EFFICIENCY 91.0	NOM PF 83.5 K	
	GUARANTEED EFFICIENCY 89.5	MAX KVAR 4.4 V	
HP 15.0	RPM 1450		
VOLTS 190	380		
FLA 42.5	21.5		
SFA			
SF 1.0	DESIGN B CODE G		
NEMA NOM EFFICIENCY 91.0	NOM PF 83.5 K		
GUARANTEED EFFICIENCY 89.5	MAX KVAR 4.4 V		



U.S. Electrical Motors
Division of Emerson Electric
St. Louis, MO



Wiring diagram on supplemental plate ○

UL

CSA

EE

CE

○

Arranque motores de inducción

El proceso de arranque va acompañado de un consumo elevado de corriente (5 a 7 veces la corriente nominal)

Si vemos el circuito equivalente del motor, la resistencia de carga es nula en ese instante debido a que el deslizamiento es la unidad, por lo que el rotor ofrece una baja impedancia, estando prácticamente en un corto circuito.

Es por esto que en algunas aplicaciones, se tienen que usar métodos que limiten esta corriente de arranque

Arranque motores de inducción

Los motores de corriente alterna con rotor jaula de ardilla se pueden poner en marcha mediante los métodos de arranque directo o a tensión reducida

En ambos casos, la corriente de arranque generalmente resulta muy superior que la nominal, produciendo perturbaciones en la red de distribución

Estos inconvenientes no son importantes en motores pequeños, que habitualmente se arrancan a tensión nominal

Arranque motores de inducción

La máxima caída de tensión durante el arranque de un motor no debe exceder el 15%

Los circuitos con motores deben contar con interruptores que corten las tres fases o polos simultáneamente y con protecciones que corten automáticamente cuando la corriente adquiera valores peligrosos

En los motores trifásicos debe colocarse una protección automática adicional que corte el circuito cuando falte una fase o la tensión se reduzca a un valor determinado

Arranque motores de inducción

Arranque directo de motores asíncronos con rotor jaula de ardilla

Se dice que un motor arranca en forma directa cuando a sus terminales se le aplica directamente la tensión nominal a la que debe trabajar

Si el motor arranca a plena carga, el bobinado tiende a absorber una cantidad de corriente muy superior a la nominal, lo que hace que las líneas de alimentación incrementen considerablemente su carga y como consecuencia directa se produzca una caída de tensión

Arranque motores de inducción

Arrancadores NEMA a tensión plena



NEMA 1



NEMA 4 & 4X



NEMA 7 & 9



NEMA 12

GABINETES

TIPO 1

USOS GENERALES

TIPO 4, A PRUEBA DE AGUA

TIPO 4X, A PRUEBA DE CORROSION

TIPO 7, 9, A PRUEBA DE EXPLOSION

TIPO 12, A PRUEBA DE POLVO

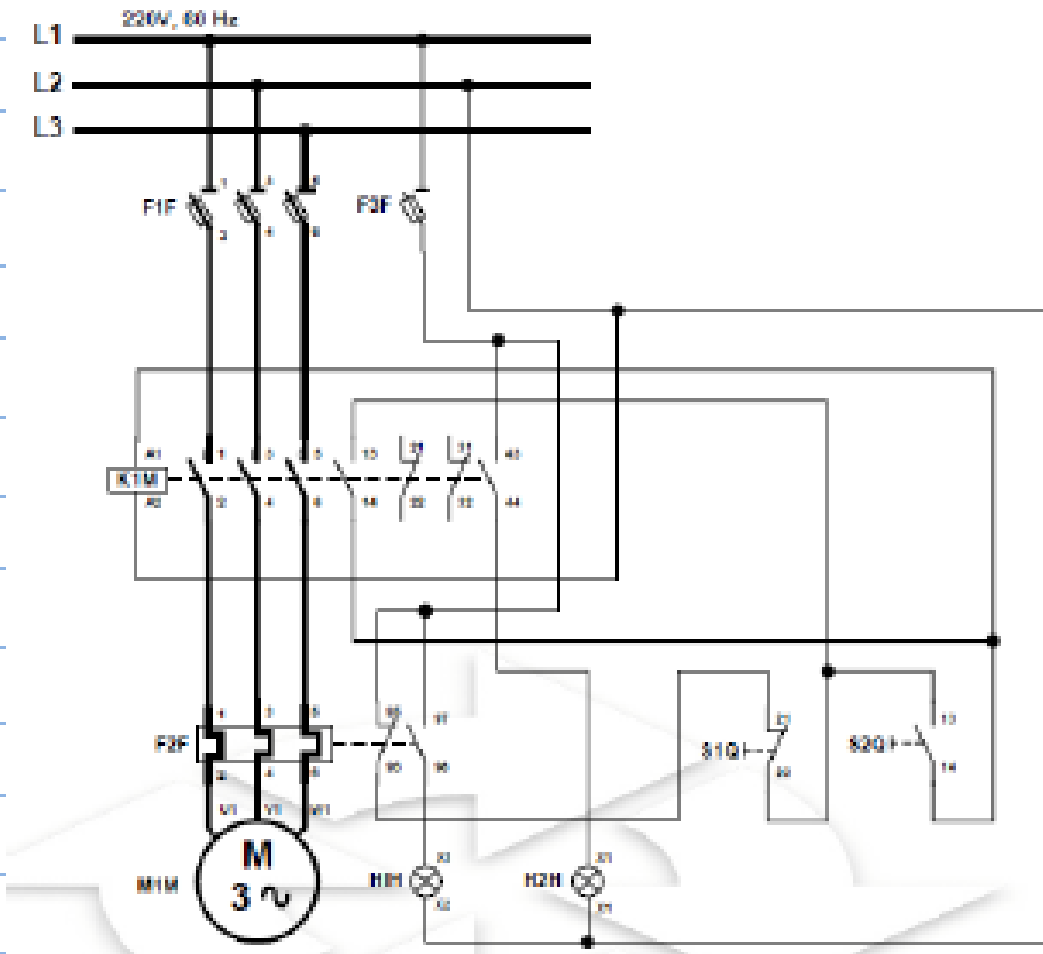
Arranque motores de inducción

Como se ha comentado, la corriente de arranque puede tomar entre 5 y 7 veces la corriente nominal, esto tiene una ventaja, un también alto par de arranque

Siempre que sea posible conviene arrancar los motores a tensión plena por el gran par de arranque que se obtiene, pero cuando se tienen varios motores de media y gran potencia que paran y arrancan en forma intermitente, se tendrá un gran problema de perturbaciones en 'red de suministro eléctrico

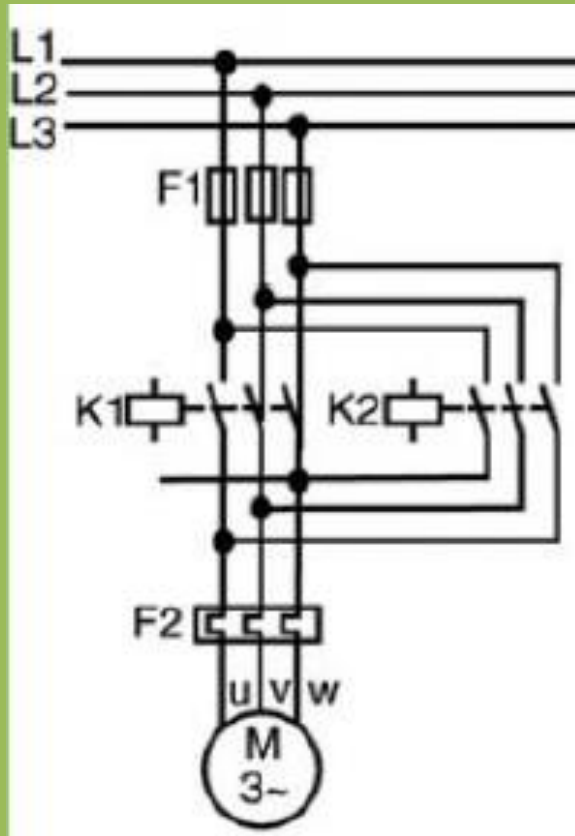
Arranque motores de inducción

Equipo y diagrama para un arranque directo de un motor asíncrono trifásico



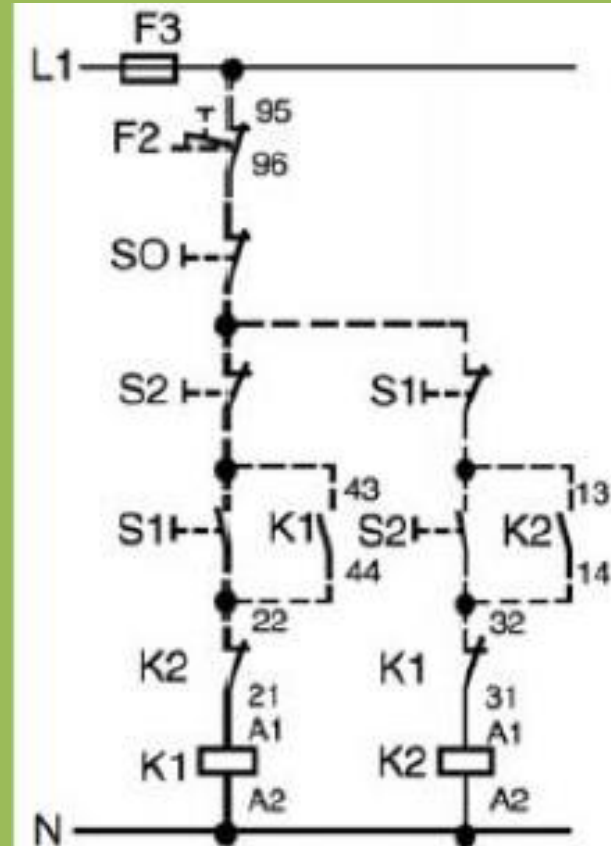
Arranque motores de inducción

Arranque reversible



Designaciones:

SO: Pulsador "parar".
S1: Pulsador "reversa".
S2: Pulsador "arrancar a la derecha".
S: Interruptor reversa-paro-arrancar".
K1: Contactor "reversa".



K2: Contactor "arrancar a la derecha".
F1: Fusibles circuito principal.
F3: Fusibles del circuito de control.
F2: Relevador bimetálico.
IOr: Adentro-fuera-reversa.

Arranque motores de inducción

Arranque a tensión reducida de motores asíncronos con rotor tipo jaula de ardilla

Este método se utiliza para motores que no necesitan un alto par de arranque

Consiste en producir en el momento del arranque una tensión menor a la nominal en los arrollamientos del motor. Al reducirse la tensión de alimentación, se reduce proporcionalmente la corriente, la intensidad del campo magnético y el par motriz

Entre las formas de arranque a tensión reducida más utilizados se pueden mencionar:

Arranque motores de inducción

Arranque estrella delta

Arranque por autotransformador

Arrancador electrónico

Arranque estrella delta

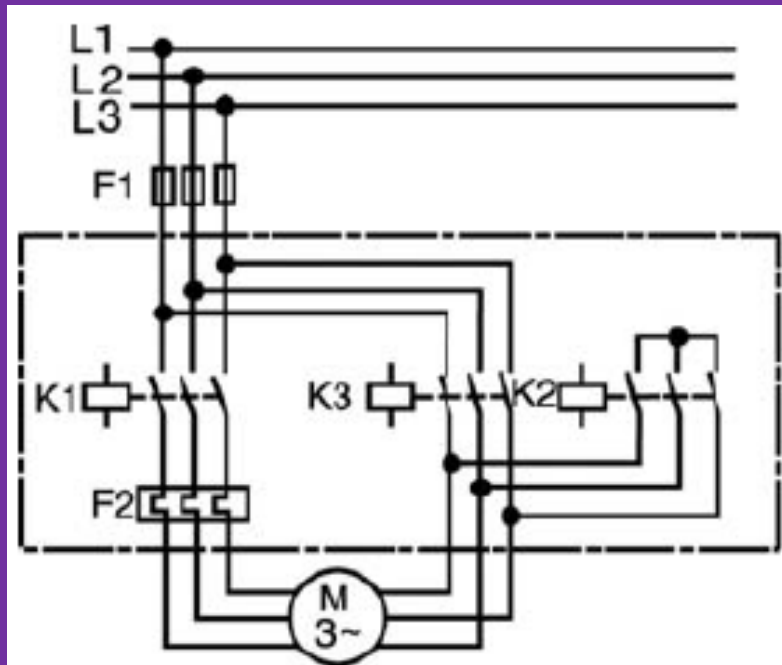
Es el procedimiento más empleado por su construcción simple, precio reducido y buena confiabilidad

El proceso para reducir la tensión en el arranque consiste en conmutar las conexiones de las bobinas en los motores trifásicos previstos para trabajar conectados en delta en la red de 3 X 480 V

Arranque estrella delta

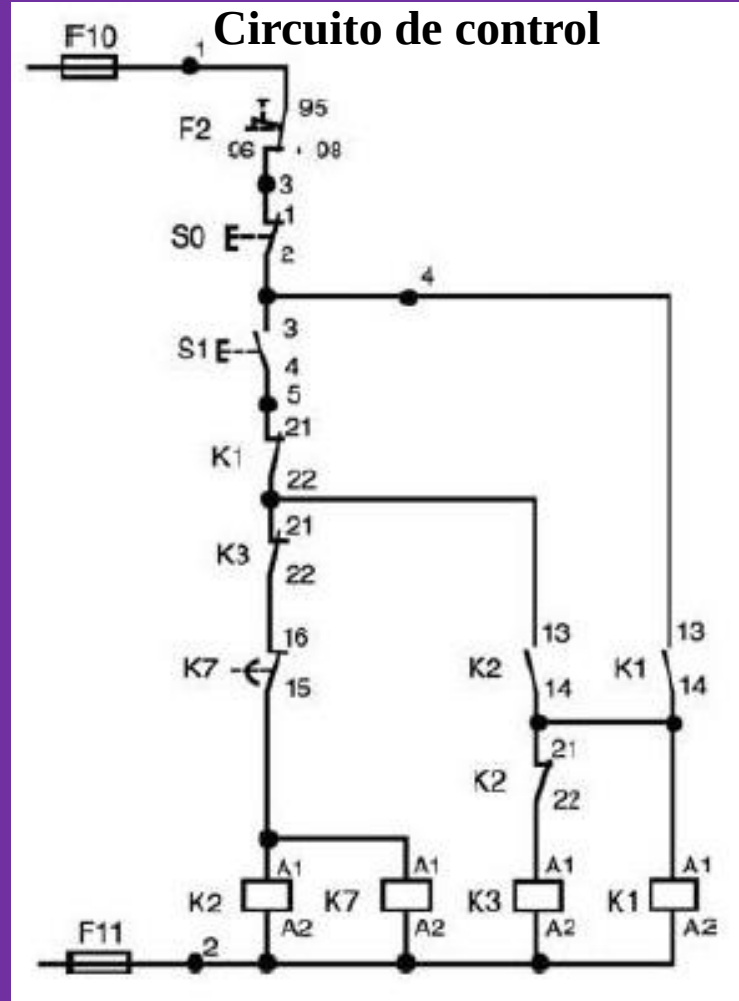
Diagrama del arrancador estrella delta

Circuito de fuerza



K1 Contactor de acometida
K2 Contactor punto estrella
K3 Contactor etapa delta
K7 Relevador de tiempo

Circuito de control



S1 Botón de arranque S0 Botón de paro F2 Relevador térmico F1 Interruptor principal
F10 F11 Fusibles

Arranque estrella delta

Los bobinados inicialmente se conectan en estrella, o sea que reciben una tensión de fase de 220 V, y luego se conectan en delta a la tensión de línea de 480 V: es decir, la tensión durante el arranque es $\sqrt{3}$ veces menor

Por ser esta una relación fija y dado que la influencia de la tensión sobre la corriente y el par es cuadrática, tanto la corriente como el par de arranque del motor se reducen tres veces

Arranque estrella delta

Además, es necesario que el motor esté construido para funcionar en delta con la tensión de línea. Si no es así, no se puede conectar

Por otra parte, el estator debe tener sus seis bornes accesibles (situación que no se da en todos los motores, por ejemplo en las bombas sumergibles). Para ello, se abren los circuitos de las bobinas del estator y se les conecta al conmutador. En este caso, al motor ingresan seis cables mas un cable de puesta a tierra

La conmutación en estrella delta generalmente se hace en forma automática luego de transcurrido un lapso (que puede regularse) en el que el motor alcanza determinada velocidad

Arranque estrella delta

Para concluir se puede agregar que el arrancador estrella delta tiene el inconveniente de que el par de arranque que se obtiene a veces no es suficiente para arrancar máquinas con alto momento de inercia, en cuyo caso, se utilizan los dos métodos que se mencionan a continuación

Ambos permiten conectar motores trifásicos con motor jaula de ardilla, los cuales traccionan, por ejemplo, bombas sumergibles

Arranque por autotransformador

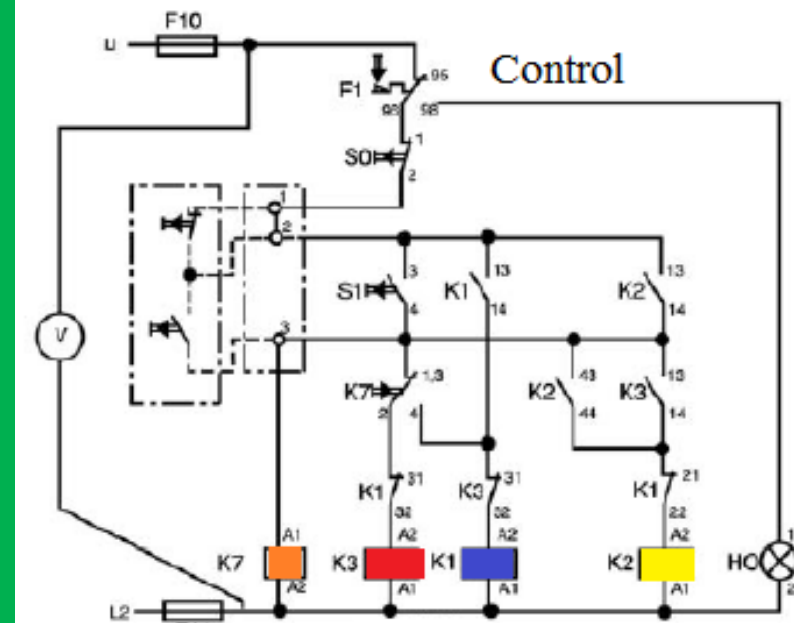
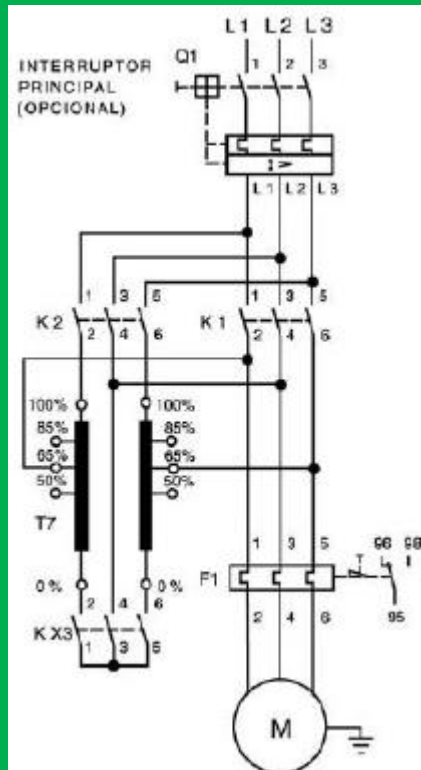
Al arrancador por autotransformador es un equipo similar al estrella delta, salvo por el hecho de que la reducción de tensión en el arranque se logra mediante bobinas auxiliares que permiten aumentar de forma escalonada la tensión de alimentación al motor, permitiendo un arranque suave

El único inconveniente es que las etapas de conmutación se realizan bruscamente, produciendo en algunas ocasiones daños perjudiciales a sistema mecánico o a la máquina accionada

Arranque por autotransformador

Por ejemplo, desgaste prematuro en los acoplamientos (correas, cadenas, engranajes o embragues de acoplamiento) o en casos extremos, roturas por fatiga del eje de o rodamientos del motor, producidos por los grandes esfuerzos realizados en el momento del arranque

Arranque por autotransformador



Para operar con control remoto, conectar la botonera como se indica con una línea punteada, suprimiendo el puente entre clemas 1 y 2

T7 autotransformador
K2 Contactor a tensión reducida (arranque)
K3 Contactor en estrella
K1 Contactor a tensión plena (marcha)

P Interruptor
S1 Botón arranque
S0 Botón paro
K7 Relé de tiempo
F1 Relé térmico (OL)

Q Interruptor de presión
Q1 Interruptor principal
F10 F11 Fusibles de control
HO Lámpara indicadora
V Voltímetro

Arranque por dispositivos electrónicos

Los arrancadores electrónicos son la mejor solución que los dos métodos anteriores, gracias a la posibilidad de un arranque suave, permitiendo un aumento en la vida útil de todas las partes involucradas

Estos consisten básicamente, en un convertidor estático alterna – continua – alterna o alterna – alterna generalmente de tiristores que permiten el arranque de motores de corriente alterna con aplicación progresiva de la tensión, con la consiguiente limitación de corriente y par de arranque. En algunos modelos también se varía la frecuencia aplicada

Arranque por dispositivos electrónicos

Al iniciar el arranque, los thiristores dejan pasar la corriente que alimenta al motor según la programación realizada en el circuito de control, que irá aumentando hasta alcanzar valores nominales de la tensión de servicio

La posibilidad de arranque progresivo también se puede utilizar para detener el motor, de manera que vaya reduciendo la tensión hasta el momento del paro

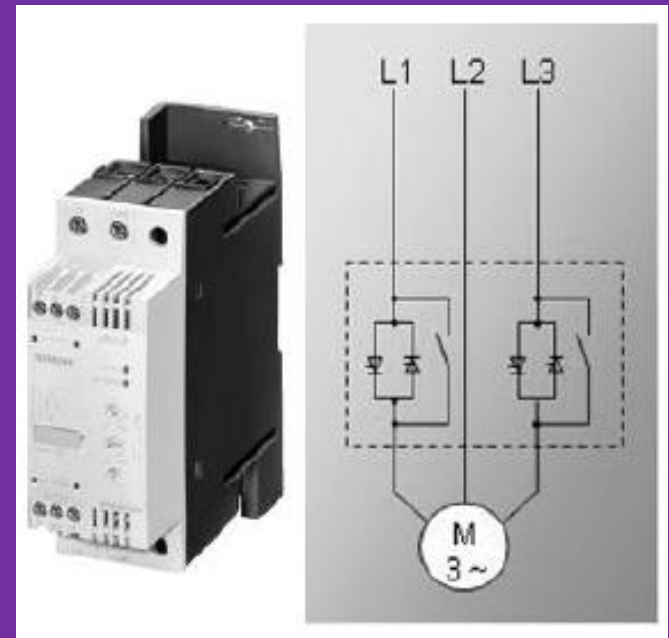
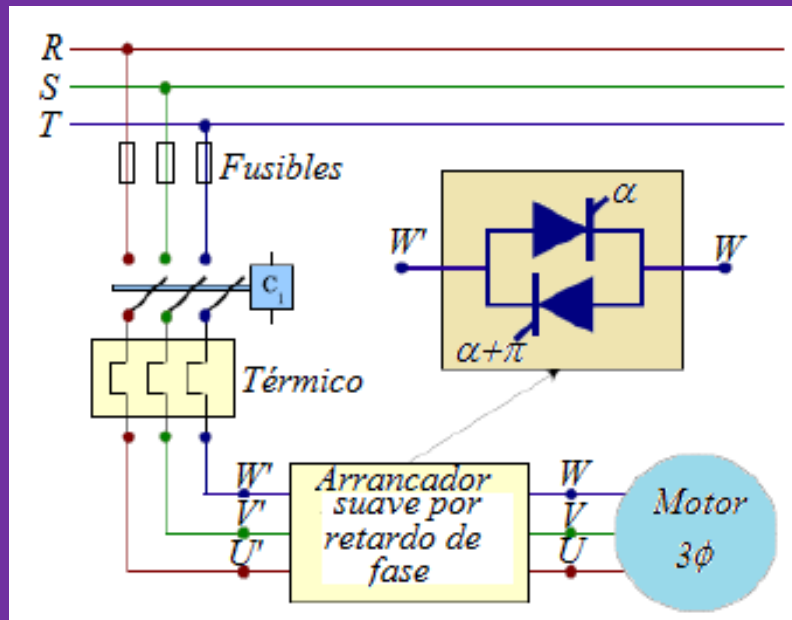
Estos arrancadores ofrecen selección de parada suave, evitando por ejemplo, los dañinos golpes de ariete en las tuberías durante el arranque de las bombas y detención por inyección de corriente directa para la parada más rápida de las masas en movimiento

Arranque por dispositivos electrónicos

Además poseen protecciones por asimetría, contra sobretemperatura y sobre carga, contra fallas de thiristores, vigilancia del tiempo de arranque, control de servicio de inversión de giro, optimización del factor de potencia a carga parcial, maximizando el ahorro de energía durante este proceso y permitiendo un ahorro en el mantenimiento por ausencia de partes en movimiento que sufran desgastes

Arranque por dispositivos electrónicos

Arranque suave implementado por thiristores



Control de velocidad de los motores de inducción

De acuerdo a la ecuación de velocidad de un motor de inducción, existen dos formas primarias de controlar la velocidad:

1. Variando el número de polos
2. Variando la frecuencia

Una tercera técnica sería variar el deslizamiento y este se puede llevar acabo variando o bien la resistencia del rotor o variando el voltaje aplicado

1. Variación de velocidad cambiando el número de polos.

Existen dos métodos para cambiar el número de polos:

- a. Método de polos consecuentes
- b. Devanados de estator múltiples

Control de velocidad de los motores de inducción

El primer método es antiguo (1987) y se basa en el hecho de que el número de polos en devanados del estator se pueden cambiar con facilidad en relación 2:1 con solo efectuar cambios en la conexión de las bobinas, por lo que no se pueden conseguir velocidades intermedias

Ventajas

1. Elevado rendimiento al cambio de ajuste de velocidad
2. Buena regulación de velocidad
3. Simplicidad en el control
4. Reguladores de velocidad auxiliares económicos

Desventajas

1. Se requiere un motor especial con acceso a devanados para efectuar cambios en polos
2. No hay un control continuo gradual de velocidad

Control de velocidad de los motores de inducción

Control de velocidad variando la frecuencia

El variador de frecuencia es un aparato electrónico que permite controlar la velocidad de motores de inducción eléctricos, siendo que el control de velocidad es hecho cambiando la frecuencia de la salida de corriente enviada al motor, en el rango de 0 a 400 Hz. Estos variadores pueden funcionar comúnmente a 240 o 480 V, 60 Hz

Este método implica disponer de una fuente separada, en donde la frecuencia y la tensión puedan ser variadas simultáneamente y en proporción directa una de la otra; ya que para obtener un flujo permanente en los motores, se deben mantener una relación constante entre la tensión V , y la frecuencia f de la fuente de alimentación, la razón de mantener una relación constante entre la tensión aplicada y la frecuencia de la fuente, es porque el par desarrollado depende de la magnitud del flujo, y existen muchas aplicaciones en donde conservar el par constante, es de especial interés

Control de velocidad de los motores de inducción

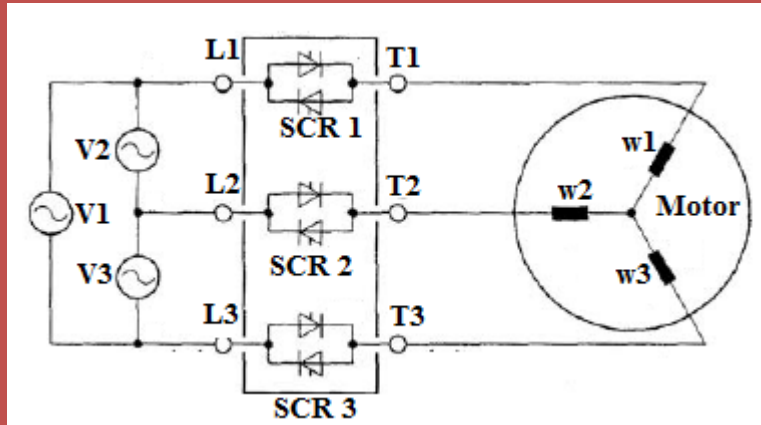


Figura mostrando el diagrama de fuerza para arranque de un motor de inducción por tiristores

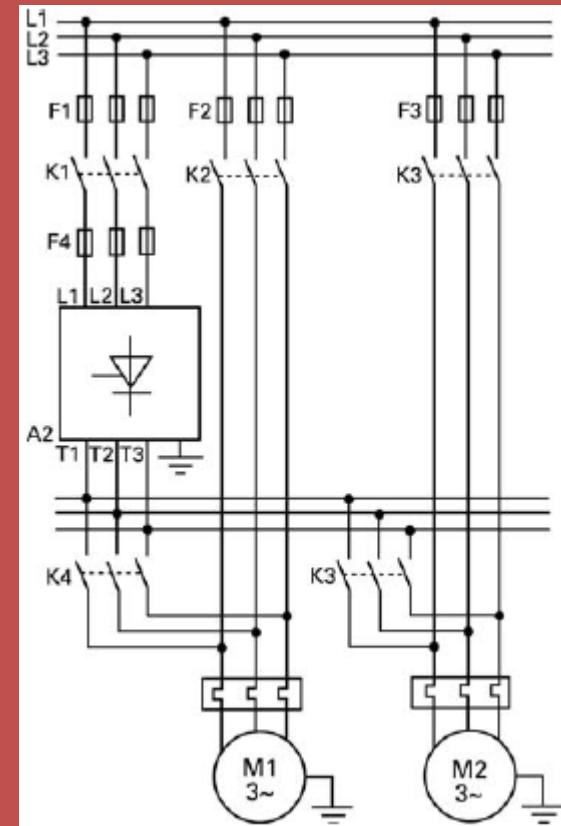


Diagrama mostrando las ventajas de los arrancadores electrónicos con arranque suave, con un solo arrancador se pueden arrancar varios motores (no de manera simultánea)

Determinación de los parámetros del motor

Debido a la similaridad entre el circuito equivalente del motor de inducción y el circuito equivalente del transformador, se usan las mismas pruebas para determinar los valores de los parámetros del motor

Determinación de los parámetros del motor

Prueba de corriente directa: determina el valor de la resistencia del estator R_1

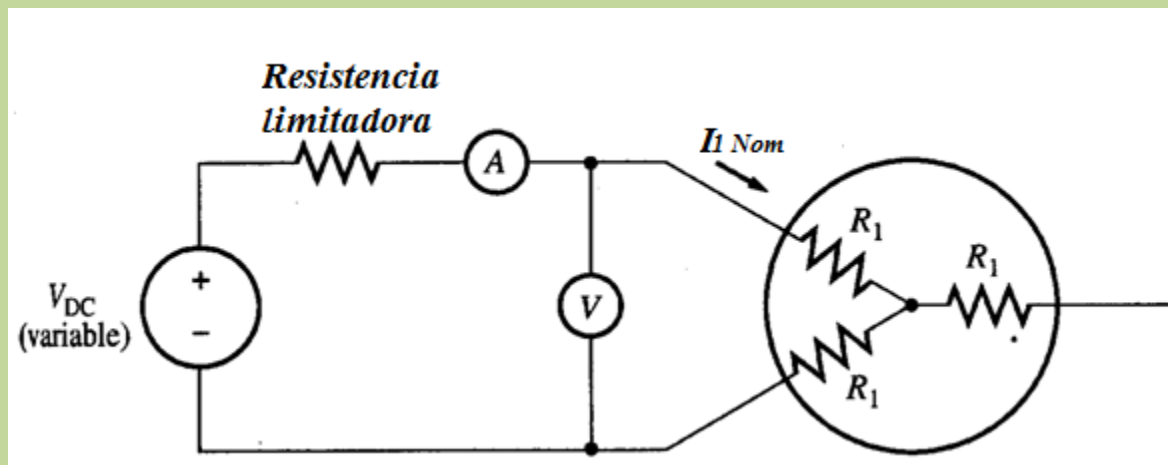
La prueba en vacío: determina las pérdidas rotacionales y la corriente de magnetización (similar a la prueba en vacío del transformador)

La prueba a rotor bloqueado: determina las impedancias del estator y del rotor (similar a la prueba de corto circuito del transformador)

Determinación de los parámetros del motor: Prueba de CD

El propósito de esta prueba es determinar R_1 . Se conecta una fuente de CD variable a dos terminales del estator

La fuente de CD se ajusta para suministrar la corriente nominal del estator, la resistencia se calcula de las lecturas tomadas en un voltímetro y un amperímetro



Determinación de los parámetros del motor: Prueba de CD

La resistencia se calcula

$$R_{DC} = \frac{V_{DC}}{I_{DC}}$$

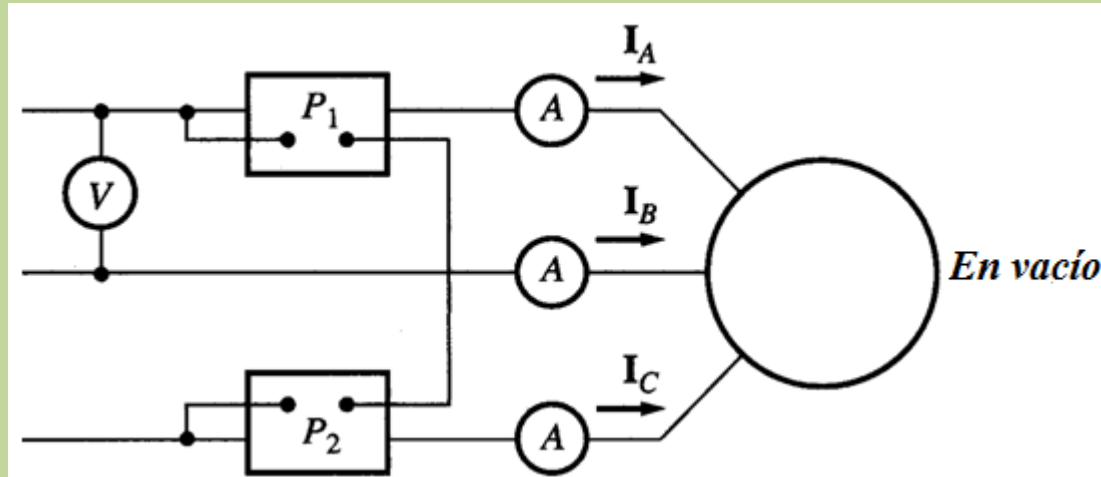
Si el estator está conectado en Y, la resistencia por fase es

$$R_{CD} = \frac{V_{CD}}{2I_{CD}}$$

Si el estator está conectado en Delta, la resistencia por fase es

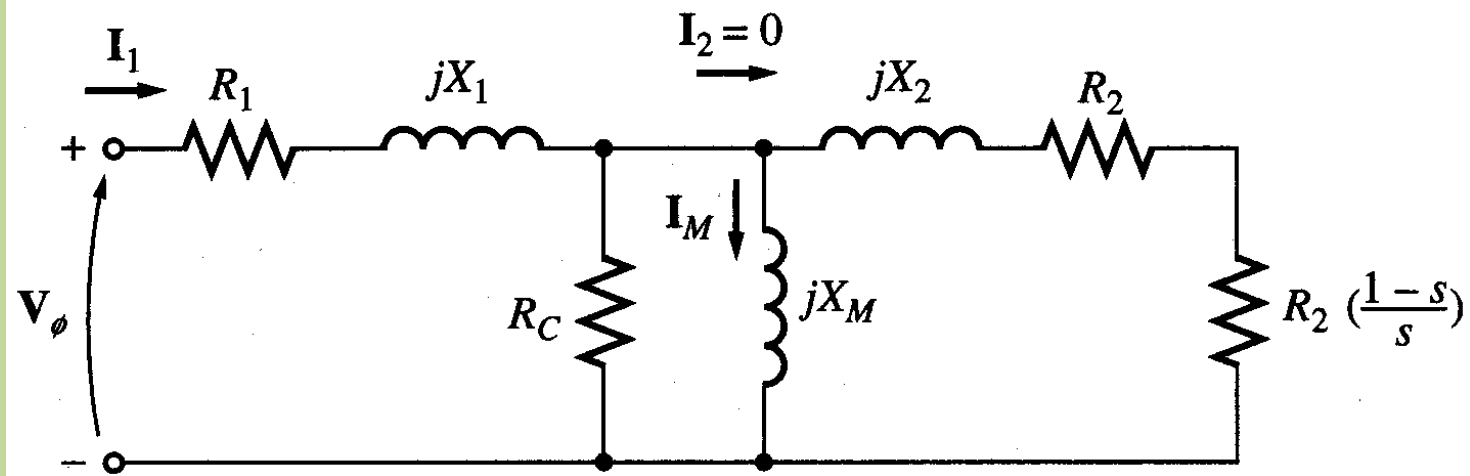
$$R_1 = \frac{3}{2} R_{DC}$$

Determinación de los parámetros del motor: Prueba en vacío



1. El motor gira en vacío (sin carga conectada)
2. La única carga del motor son las pérdidas por fricción y ventilación y toda la P_{conv} es consumida por éstas pérdidas mecánicas
3. El deslizamiento es muy pequeño

Determinación de los parámetros del motor: Prueba en vacío

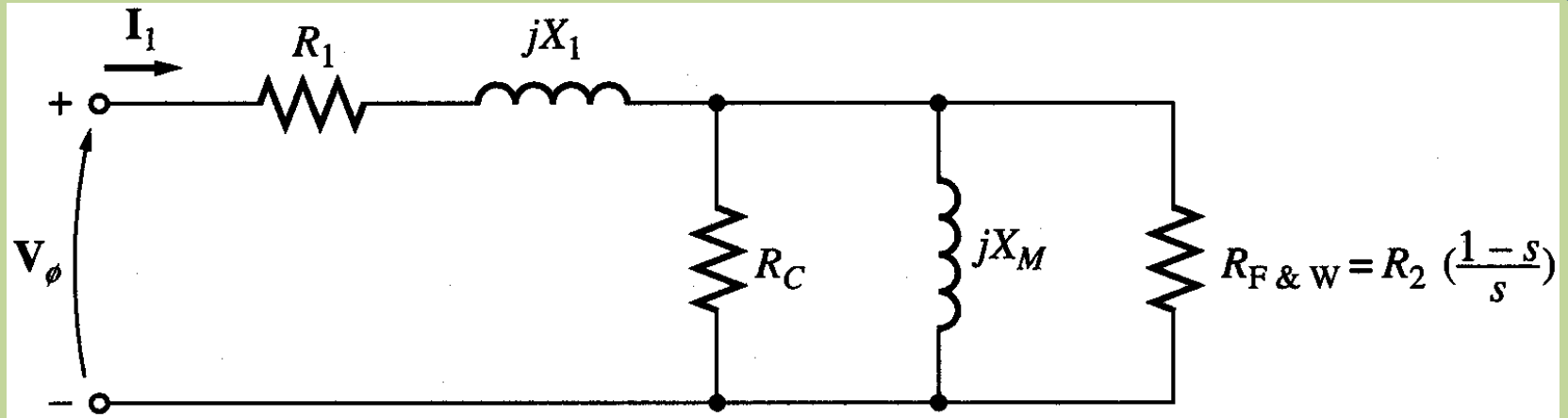


4. A deslizamientos pequeños

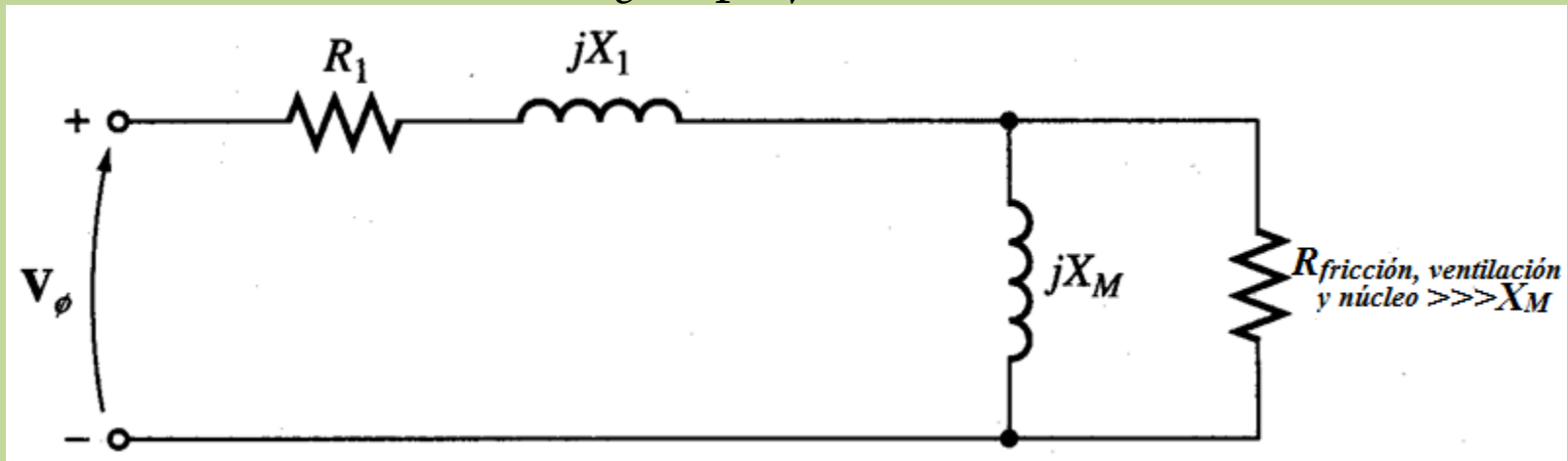
$$\frac{R_2(1-s)}{s} \gg R_2 \text{ y } \frac{R_2(1-s)}{s} \gg jX_2$$

El circuito equivalente se reduce a...

Determinación de los parámetros del motor: Prueba en vacío



5. Combinando R_C R_{F+V} obtenemos.....



Determinación de los parámetros del motor: Prueba en vacío

6. En condiciones de vacío, la potencia de entrada medida debe ser igual a las pérdidas en el motor
7. Las pérdidas en el cobre del rotor P_{RCL} se desprecian ya que I_2 es muy pequeña debido a que $R_2(1-s)/s$ es muy grande
8. La potencia de entrada es igual a

$$P_{ent} = P_{cu,e} + P_{núcleo} + P_{F y V} = 3I_1^2 R_1 + P_{rot}$$

Donde $P_{rot} = P_{núcleo} + P_{F y V}$

Determinación de los parámetros del motor: Prueba en vacío

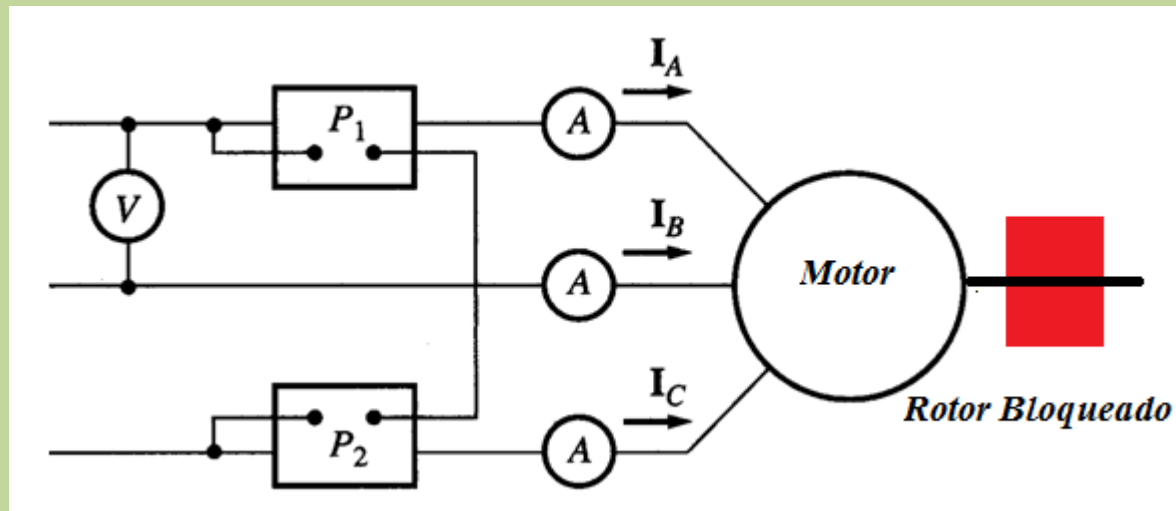
9. La impedancia de entrada equivalente es aproximadamente

$$|Z_{eq}| = \frac{V_{\phi}}{I_{1,vacío}} \approx X_1 + X_M$$

Si X_1 se puede encontrar en otra etapa, la impedancia de magnetización X_M será conocida

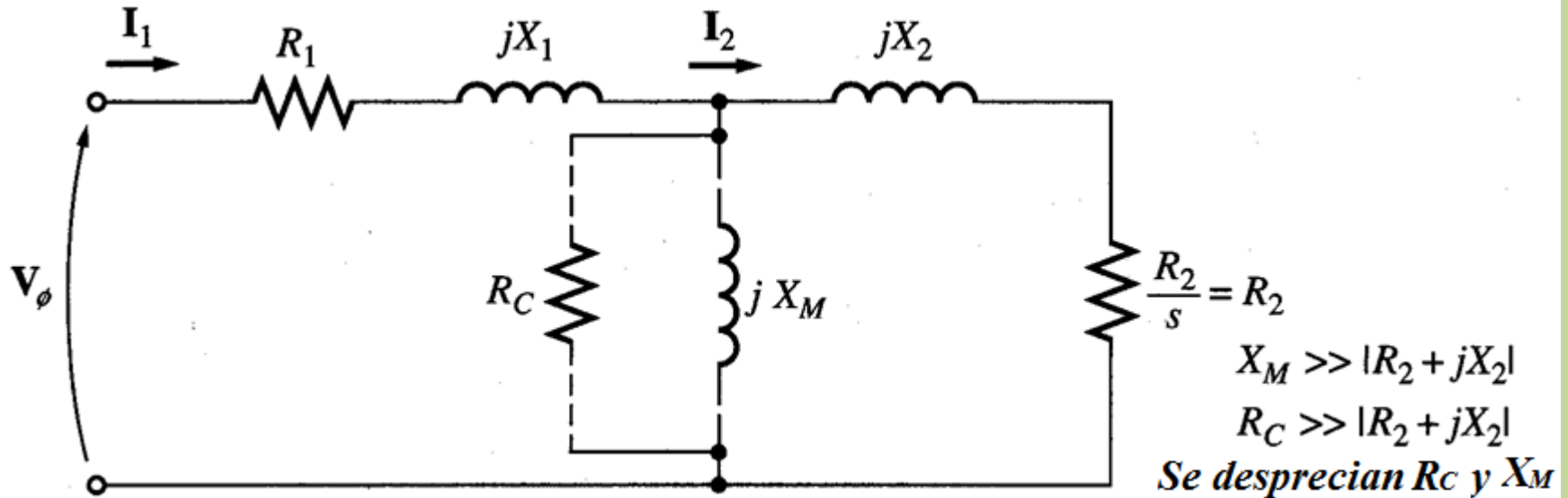
Determinación de los parámetros del motor: Prueba a rotor bloqueado

En esta prueba, se usan los mismos instrumentos que la Prueba en Vacío



Determinación de los parámetros del motor: Prueba a rotor bloqueado

En esta prueba, el rotor se bloquea para que no pueda girar. Al igual que en la prueba en vacío, se miden el voltaje, la corriente y la potencia consumida



Determinación de los parámetros del motor: Prueba a rotor bloqueado

El voltaje aplicado se ajusta para que la corriente del estator sea igual a la corriente nominal

El factor de potencia a rotor bloqueado se encuentra como

$$FP = \cos \theta = \frac{P_{ent}}{\sqrt{3}V_L I_L}$$

La magnitud de la impedancia total es

$$|Z_{RB}| = \frac{V_\phi}{I}$$

Determinación de los parámetros del motor: Prueba a rotor bloqueado

$$|Z_{RB}| = R_{RB} + jX_{RB} = |Z_{RB}|\cos\theta + j|Z_{RB}|\sin\theta$$

$$R_{RB} = R_1 + R_2 \quad X'_{RB} = X'_1 + X'_2$$

Donde X'_1 y X'_2 son las reactancias del rotor a la frecuencia de prueba. Ya conocida R_1

$$R_2 = R_{RB} - R_1$$

$$X_{RB} = X'_{RB} \frac{f_{nom}}{f_{prueba}} = X_1 + X_2$$

Determinación de los parámetros del motor: Prueba a rotor bloqueado

	X_1 y X_2 como función de X_{LR}	
Diseño del Rotor	X_1	X_2
Rotor devanado	$0.5 X_{LR}$	$0.5 X_{LR}$
Diseño A	$0.5 X_{LR}$	$0.5 X_{LR}$
Diseño B	$0.4 X_{LR}$	$0.6 X_{LR}$
Diseño C	$0.3 X_{LR}$	$0.7 X_{LR}$
Diseño D	$0.5 X_{LR}$	$0.5 X_{LR}$

