

TEMA I: MÁQUINA ASÍNCRONA

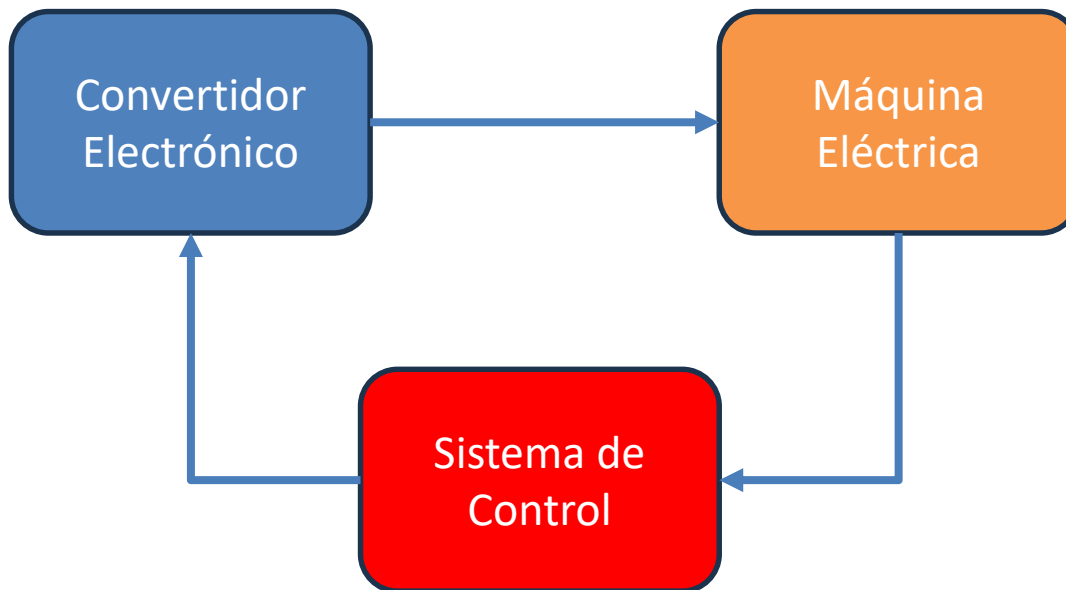
Tema I: MÁQUINA ASÍNCRONA

PRINCIPIOS GENERALES

Introducción: Accionamiento eléctrico

Un **accionamiento eléctrico** es aquel sistema capaz de convertir energía eléctrica en energía mecánica o viceversa, de una manera controlada.

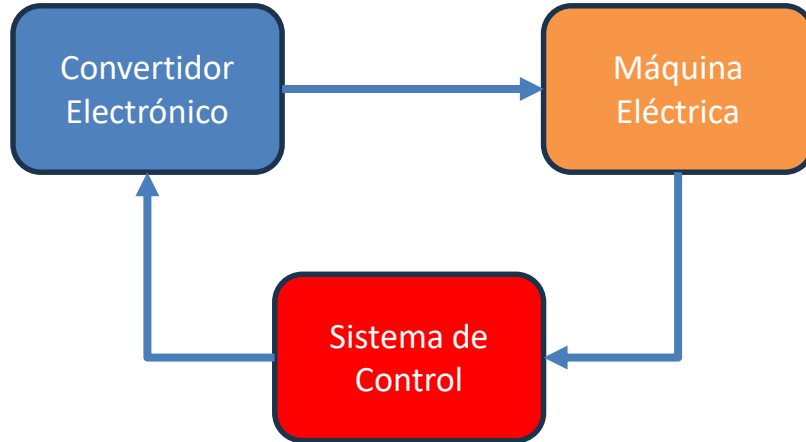
Los principales elementos que componen un accionamiento eléctrico son:



Introducción: Accionamiento eléctrico

Un **accionamiento eléctrico** es aquel sistema capaz de convertir energía eléctrica en energía mecánica o viceversa, de una manera controlada.

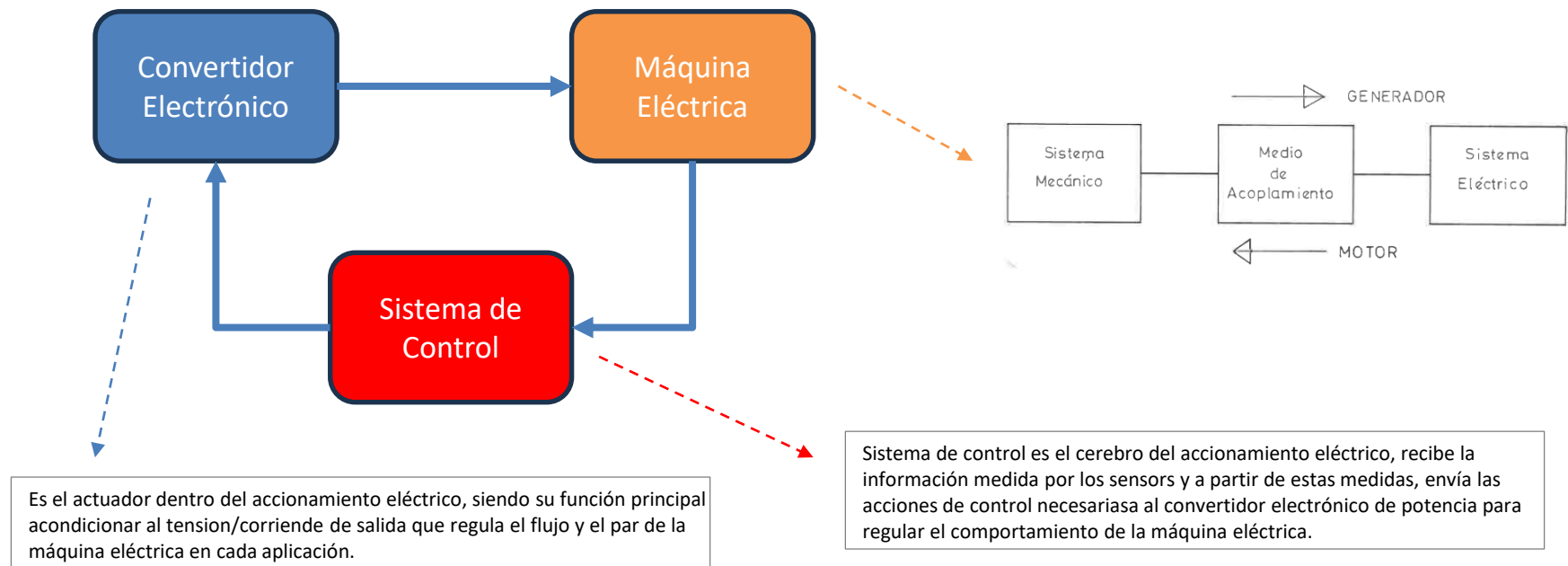
Los principales elementos que componen un accionamiento eléctrico son:



Introducción: Accionamiento eléctrico

Un **accionamiento eléctrico** es aquel sistema capaz de convertir energía eléctrica en energía mecánica o viceversa, de una manera controlada.

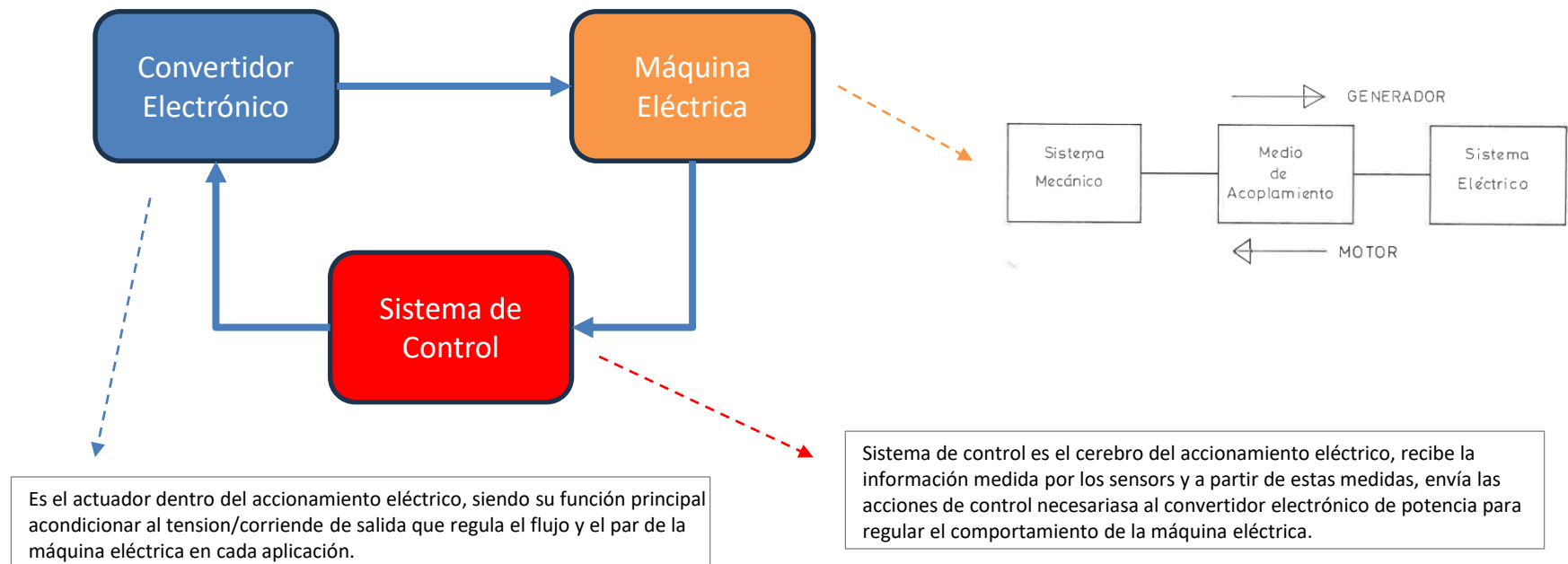
Los principales elementos que componen un accionamiento eléctrico son:



Introducción: Accionamiento eléctrico

Un **accionamiento eléctrico** es aquel sistema capaz de convertir energía eléctrica en energía mecánica o viceversa, de una manera controlada.

Los principales elementos que componen un accionamiento eléctrico son:



Introducción: Accionamiento eléctrico

Ejemplos de **accionamiento eléctricos**.

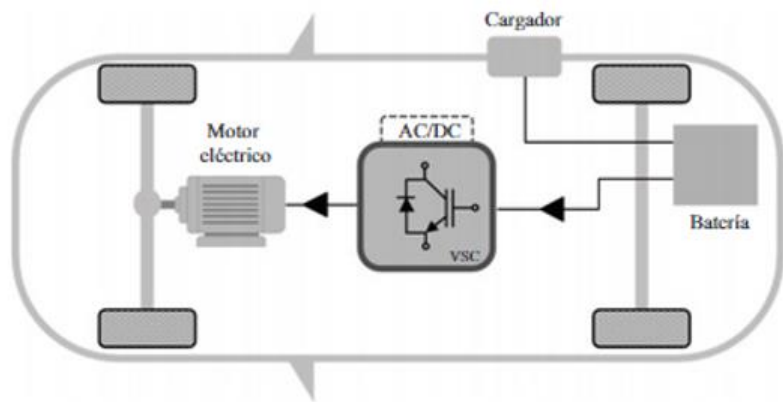


Figura 2.8. Vehículo eléctrico puramente eléctrico.

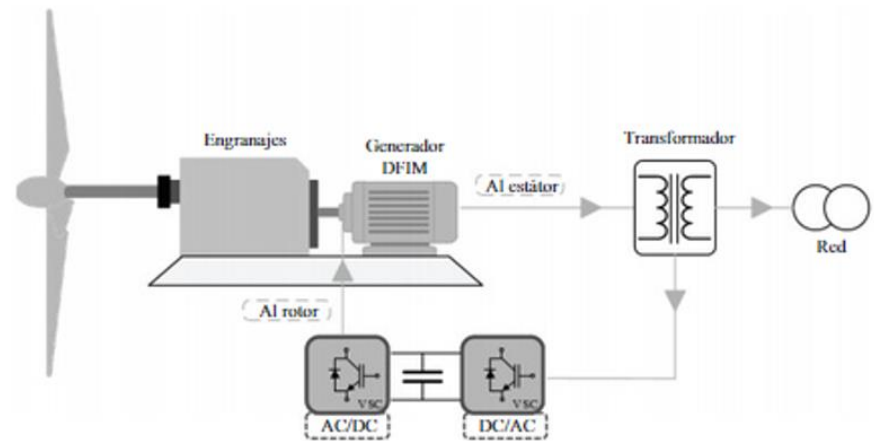


Figura 2.13. Sistema de conversión eólica de velocidad variable con generador doblemente alimentado.

Introducción: Accionamiento eléctrico

El acoplamiento entre el sistema mecánico y el eléctrico es a través de los campos magnéticos y eléctricos. La energía almacenada en ellos está asociada con la energía que se convierte.

La conversión electromecánica de energía depende de la existencia de la naturaleza de fenómenos de interacción entre campos eléctricos y magnéticos, por una parte y de la manifestación de fuerzas y movimiento por otra.:

Los principales fenómenos que pueden servir para este acoplamiento son:

1- Inducción electromagnética:

Si por un conductor situado en un campo magnético se hace circular una corriente eléctrica, se manifestará sobre él una fuerza mecánica. El proceso es reversible, si varía el flujo magnético concatenado con un circuito eléctrico se induce en éste una fuerza electromotriz.

2- Ferromagnetismo:

Al situar un material ferromagnético en el interior de un campo magnético se ejerce sobre él una fuerza que tiende a orientarlo según la dirección de máxima densidad de flujo. Cuando el campo magnético es producido por una corriente, el proceso de conversión de energía es reversible.

3- Fuerzas electrostáticas

4- Piezoelectricidad

5- Magnetoestricción

F.m.m. y campo magnético en el entrehierro de una máquina eléctrica

Inducción electromagnética

Una explicación general del fenómeno por el que se obtiene una f.e.m. inducida puede hallarse dos puntos de vista:

a) Ley de la inducción electromagnética de Faraday

$$e = B \cdot l \cdot v$$

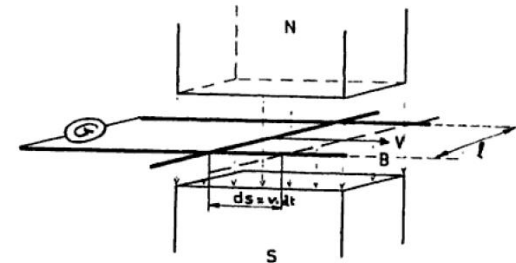
$$\vec{e} = l[\vec{v} \wedge \vec{B}]$$

b) Segunda ecuación de Maxwell

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} \quad e = -N \frac{d\phi_{med}}{dt}$$

$$d\Phi = B \cdot dS = B \cdot l \cdot v dt = d\psi$$

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = -B \cdot l \cdot v$$



Fuerza y par electromagnético

Use basa en la Ley de Biot y Savart (o Ley de Laplace)

$$F = B \cdot l \cdot I \cdot \text{sen}\alpha$$

α es el ángulo formado por el conductor y la dirección del campo magnético

$$\alpha = \frac{\pi}{2} \rightarrow F = B \cdot l \cdot I$$

La fórmula general para la fuerza electromagnética en forma vectorial es

$$\vec{F} = S \cdot l[\vec{\sigma} \wedge \vec{B}]$$

$\vec{\sigma}$ es la densidad de corriente (A/m²) y S la sección del conductor en m²

F.m.m. y campo magnético en el entrehierro de una máquina eléctrica

Si el conductor se halla sobre una superficie cilíndrica de radio r , como sucede en las máquinas eléctricas rotativas, el par de giro determinado por esta fuerza será

$$M = F \cdot r = B \cdot l \cdot I \cdot r$$

El par debido a la totalidad de los conductores de la máquina será la suma de todos los pares individuales y se denomina el par electromagnético interno de la máquina M_i .

Potencia electromagnética interna de la máquina: $P_i = M_i \cdot \Omega$

$$e = B \cdot l \cdot v$$

Si movemos un conductor por medio de una fuerza mecánica de forma que corte líneas de inducción, se creará una f.e.m. : generador eléctrico.

$$F = B \cdot l \cdot I$$

Si por un conductor, inmerso en un campo magnético normal a él, hacemos pasar una corriente procedente de una fuente de energía eléctrica, se crea una fuerza mecánica: motor eléctrico.

F.m.m. y campo magnético en el entrehierro de una máquina eléctrica

Teorema de Ampère y ley de Ohm en los circuitos magnéticos

Cuando una línea de inducción cerrada C , es abrazada por varios circuitos eléctricos, recorridos por distintas corrientes I_1, I_2, I_3, \dots sabemos por el teorema de Ampère que la circulación del campo magnético producido por estas corrientes, a lo largo del contorno C es

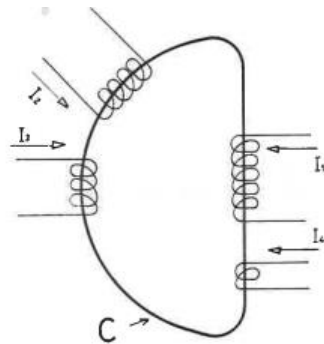


Fig. 2.02 Teorema de Ampère.

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I \quad A$$

Si solo hay un circuito eléctrico

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = N \cdot I \quad Av$$

En el caso de un toroide de hierro dulce, de sección recta constante S , y longitud media l , recubierto en su totalidad por el arrollamiento de N espiras, por las que pasa la corriente I , tendremos

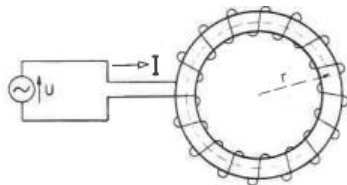


Fig. 2.03 Circuito magnético homogéneo.

$$H = \frac{N \cdot I}{l}$$

F.m.m. y campo magnético en el entrehierro de una máquina eléctrica

$$\phi = B \cdot S = \mu\mu_0 H \cdot S = \frac{N \cdot I}{\frac{l}{\mu\mu_0 S}} \quad \text{Wb}$$

Por analogía con el circuito eléctrico se designa:

f.m.m. = $N \cdot I$ Fuerza manemotriz o diferencia de potencial magnético del circuito y reluctancia magnética a

$$R = \frac{l}{\mu\mu_0 S} \quad f.m.m. = \phi \cdot R$$

F.m.m. y campo magnético en el entrehierro de una máquina eléctrica

Para calcular el flujo en el entrehierro de una máquina eléctrica, producido por unas corrientes eléctricas, debemos determinar en primer lugar la fuerza magnetomotriz de excitación fmm.

Para ello debemos conocer la intensidad de las corrientes y su distribución espacial.

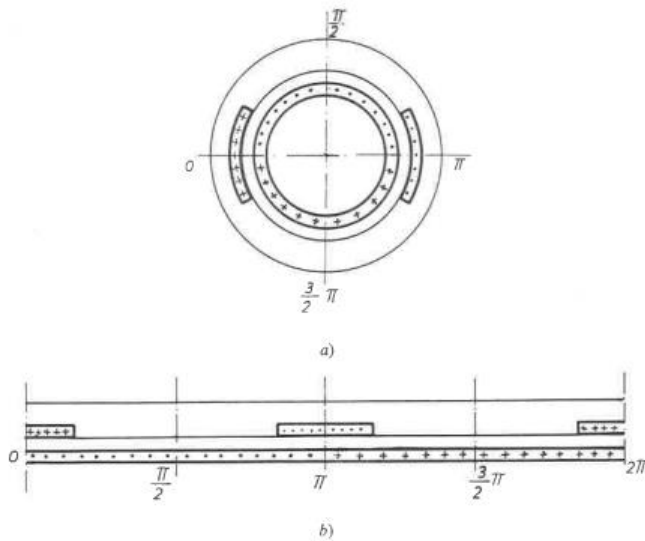


Fig. 4.01 Máquina eléctrica rotativa ideal de 2 polos.

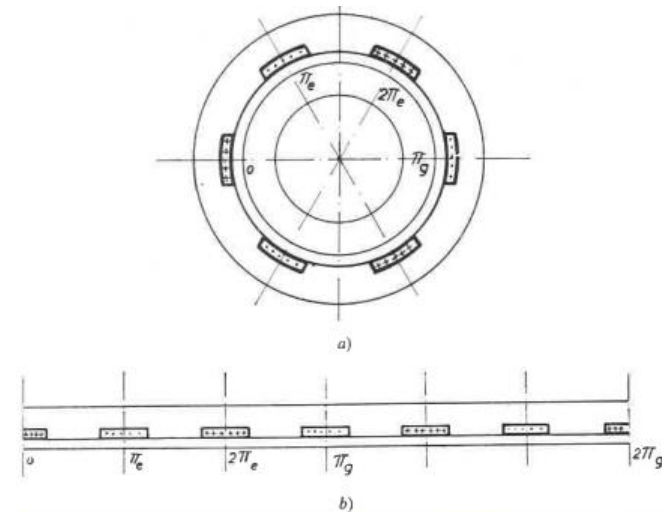


Fig. 4.02 Máquina rotativa eléctrica ideal de 6 polos y su esquema desarrollado.

F.m.m. y campo magnético en el entrehierro de una máquina eléctrica

Fuerza magnetomotriz de una bobina simple

a) Bobina de paso diametral

Para cualquier línea de inducción que tracemos, la f.m.m. total concatenada con la espira tiene el valor de la corriente I ,

f.m.m. = I

Al admitir la permeabilidad de las coronas magnéticas infinitas (reluctancia nula) la tensión magnética correspondiente a las mismas será nula y en consecuencia sólo habrá que considerar la tensión magnética de los dos entrehierros, uno en la zona N y el otro en la S, lo que implica:

$$\mathcal{F}_{aN} + \mathcal{F}_{aS} = I$$

En la zona N el flujo se dirige del estator al rotor, polo Norte, y en la zona S del rotor al estator, polo Sur.

Siendo el ancho de los polos el mismo y los entrehierros de igual longitud por razón de simetría y atendiendo al sentido del flujo se tiene

$$\mathcal{F}_{aN} = -\mathcal{F}_{aS}$$

Lo que implica

$$\mathcal{F}_{aN} = \frac{I}{2} \quad \text{y} \quad \mathcal{F}_{aS} = -\frac{I}{2}$$

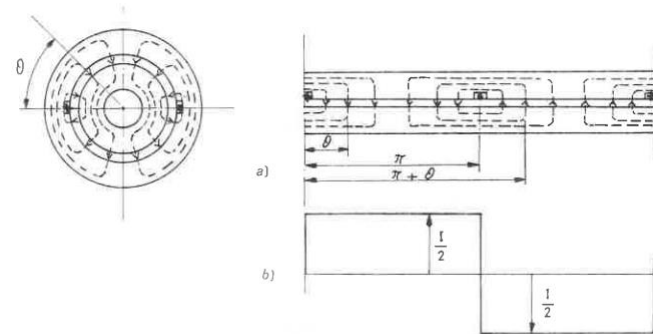


Fig. 4.03 Curva de f.m.m. de una espira de paso diametral.

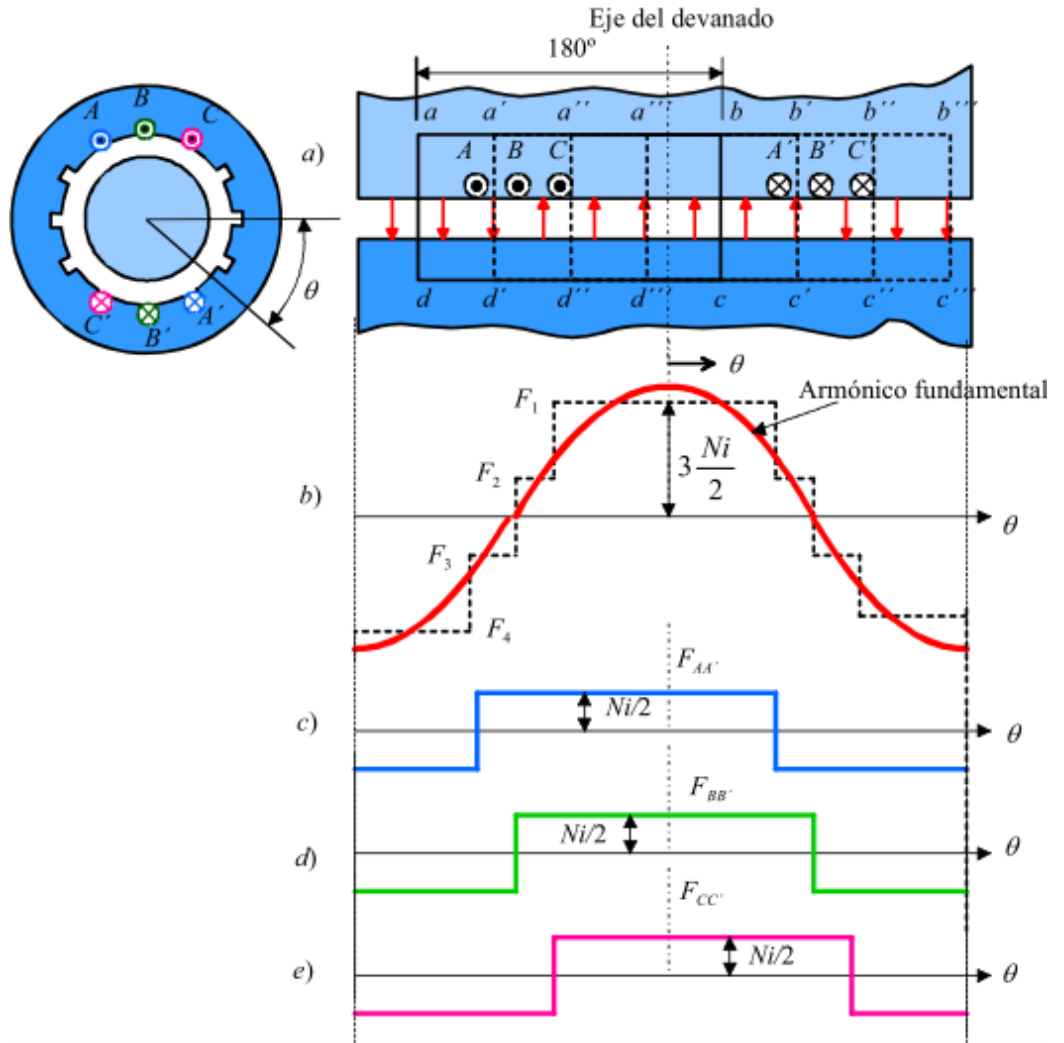
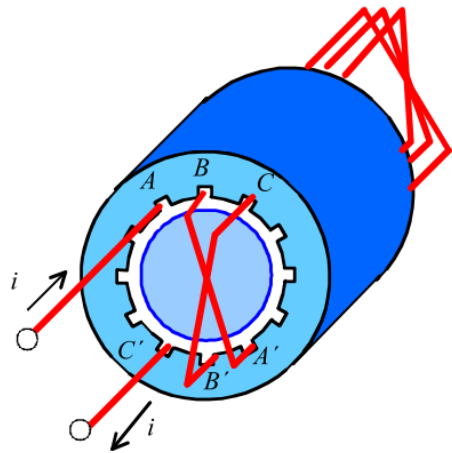
F.m.m. y campo magnético en el entrehierro de una máquina eléctrica

El campo magnético en el entrehierro de una máquina eléctrica es el resultado de las f.m.m.s. combinadas de los devanados inductor e inducido que actúan en esa región. En principio, es el devanado inductor el que produce el campo en el entrehierro, creando f.e.m.s. en el devanado del inducido, que dan lugar a corrientes cuando se cierra el circuito por un sistema exterior (generador). Al circular una intensidad por el devanado del inducido, se crea una f.m.m. de reacción de inducido, que al combinarse con la f.m.m. del inductor origina el campo magnético resultante en el entrehierro de la máquina.

En la práctica constructiva habitual de las máquinas eléctricas, con objeto de aprovechar toda la periferia tanto del estator como del rotor, las bobinas se distribuyen en ranuras, lo que permite no solamente una utilización más óptima de la máquina sino también una mejora en la calidad de la onda de f.m.m. e inducción, que se traducirá en una f.e.m. inducida en las bobinas de carácter más sinusoidal. En la siguiente figura vemos la f.m.m. producida por un devanado distribuido de tres bobinas.

F.m.m. y campo magnético en el entrehierro de una máquina eléctrica

Devanado de tres bobinas

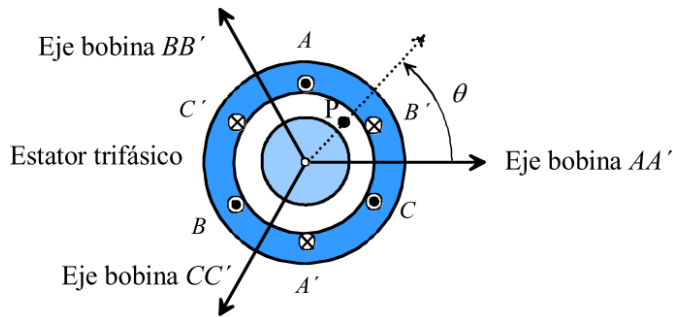


F.m.m. y campo magnético en el entrehierro de una máquina eléctrica

Campo magnético giratorio

Consideramos un sistema formado por tres devanados (en estator o rotor) que estén desfasados entre sí 120° eléctricos en el espacio.

Calculamos la f.m.m. que existe en un punto del entrehierro, determinado por θ , respecto al eje del devanado AA' , debido a la contribución de los tres arrollamientos, al circular por ellos un sistema de corrientes trifásicas equilibradas

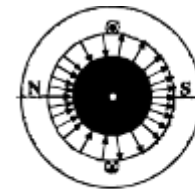


La f.m.m. producida por una corriente alterna en el entrehierro tiene una distribución senoidal en el espacio

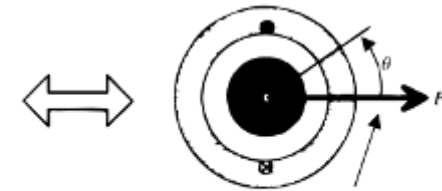
$$i_a = I_m \cos \omega t$$

$$i_b = I_m \cos(\omega t - 120^\circ)$$

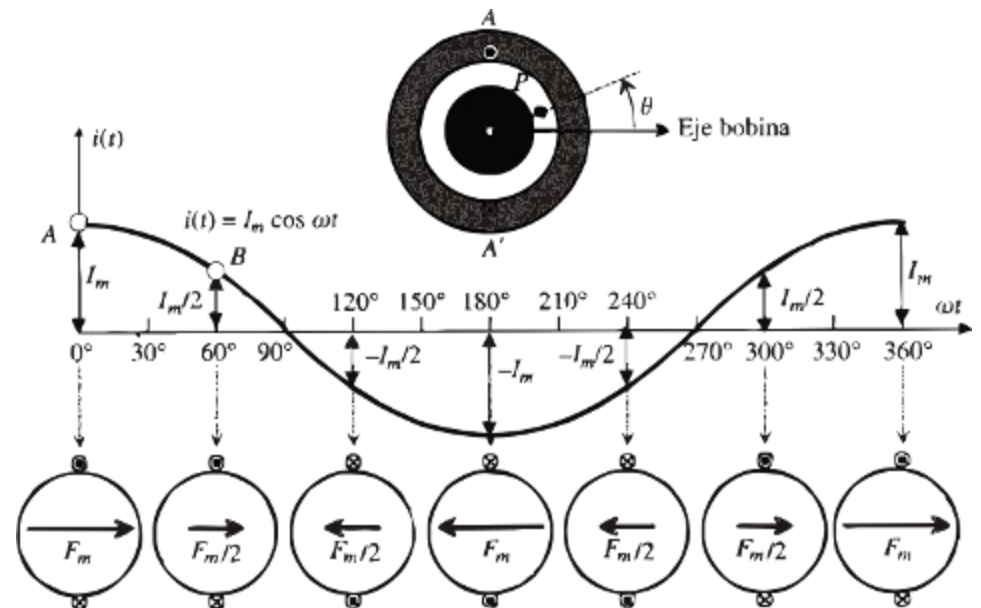
$$i_c = I_m \cos(\omega t + 120^\circ)$$



Distribución de la f.m.m. senoidal



Fasor espacial equivalente a la distribución senoidal

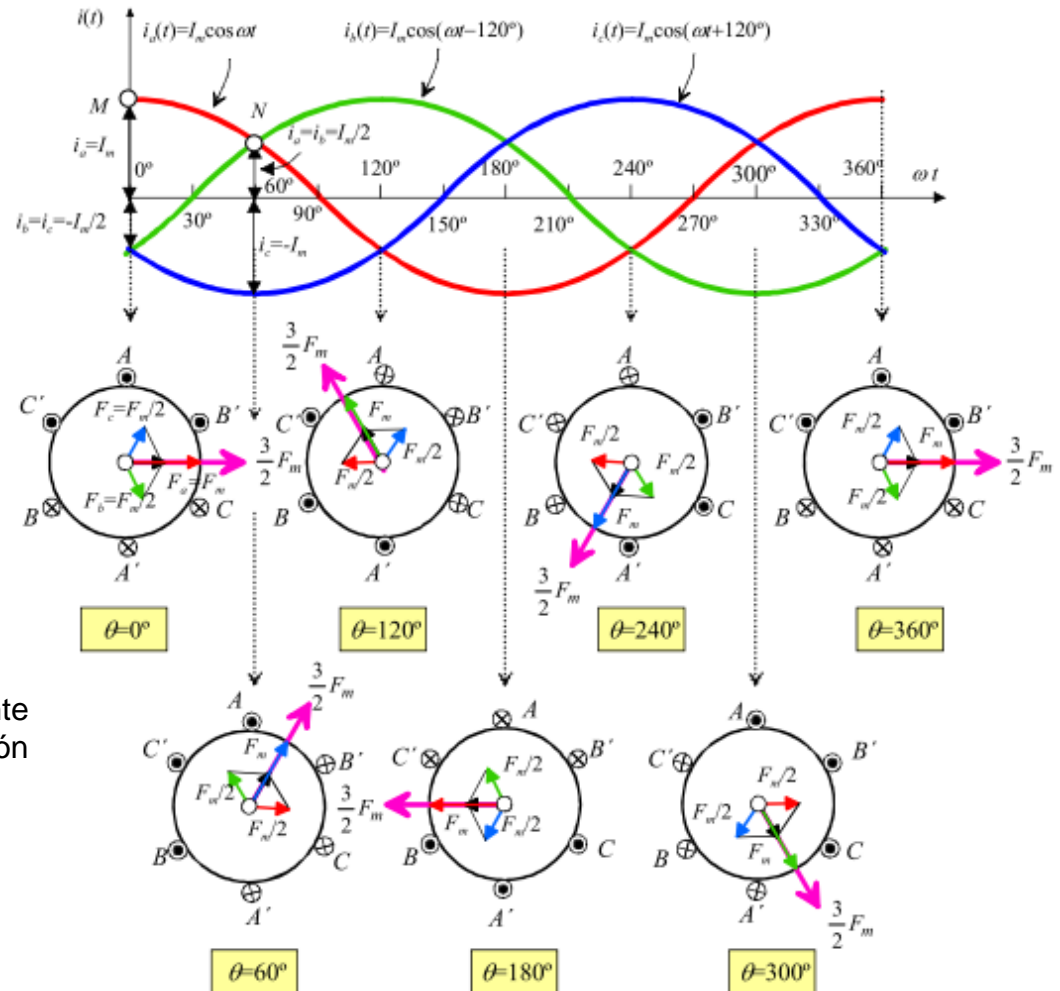
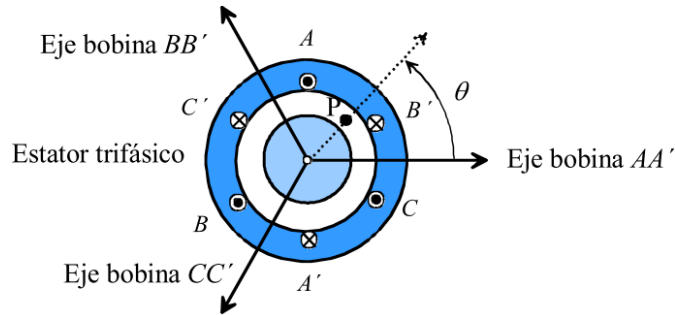


F.m.m. y campo magnético en el entrehierro de una máquina eléctrica

Campo magnético giratorio

Consideramos un sistema formado por tres devanados (en estator o rotor) que estén desfasados entre sí 120° eléctricos en el espacio.

Calculamos la f.m.m. que existe en un punto del entrehierro, determinado por θ , respecto al eje del devanado AA' , debido a la contribución de los tres arrollamientos, al circular por ellos un sistema de corrientes trifásicas equilibradas



La f.m.m. producida por una corriente alterna en el entrehierro tiene una distribución senoidal en el espacio

$$i_a = I_m \cos \omega t$$

$$i_b = I_m \cos(\omega t - 120^\circ)$$

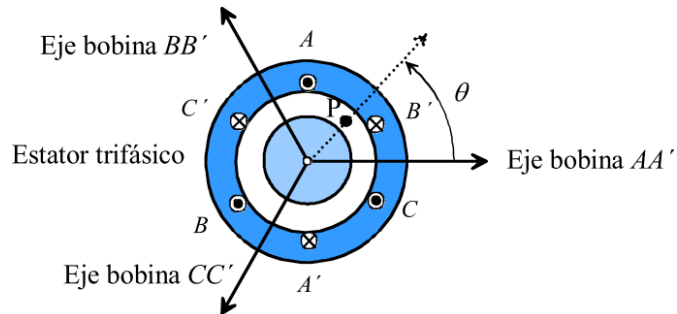
$$i_c = I_m \cos(\omega t + 120^\circ)$$

F.m.m. y campo magnético en el entrehierro de una máquina eléctrica

Campo magnético giratorio

Consideramos un sistema formado por tres devanados (en estator o rotor) que estén desfasados entre sí 120° eléctricos en el espacio.

Calculamos la f.m.m. que existe en un punto del entrehierro, determinado por θ , respecto al eje del devanado AA' , debido a la contribución de los tres arrollamientos, al circular por ellos un sistema de corrientes trifásicas equilibradas



La f.m.m. producida por una corriente alterna en el entrehierro tiene una distribución senoidal en el espacio

$$i_a = I_m \cos \omega t$$

$$i_b = I_m \cos(\omega t - 120^\circ)$$

$$i_c = I_m \cos(\omega t + 120^\circ)$$

$$F_a = [F_m \cos \omega t] \cos \theta$$

$$F_b = [F_m \cos(\omega t - 120^\circ)] \cos(\theta - 120^\circ)$$

$$F_c = [F_m \cos(\omega t + 120^\circ)] \cos(\theta + 120^\circ)$$

La onda de f.m.m. en el punto P será

$$F(\theta, t) = F_a + F_b + F_c$$

si

$$\cos A \cos B = \frac{1}{2} [\cos(A - B) + \cos(A + B)]$$

$$F(\theta, t) = \frac{3}{2} F_m \cos(\omega t - \theta) + \frac{F_m}{2} [\cos(\omega t + \theta) + \cos(\omega t + \theta - 120^\circ) + \cos(\omega t + \theta + 120^\circ)]$$

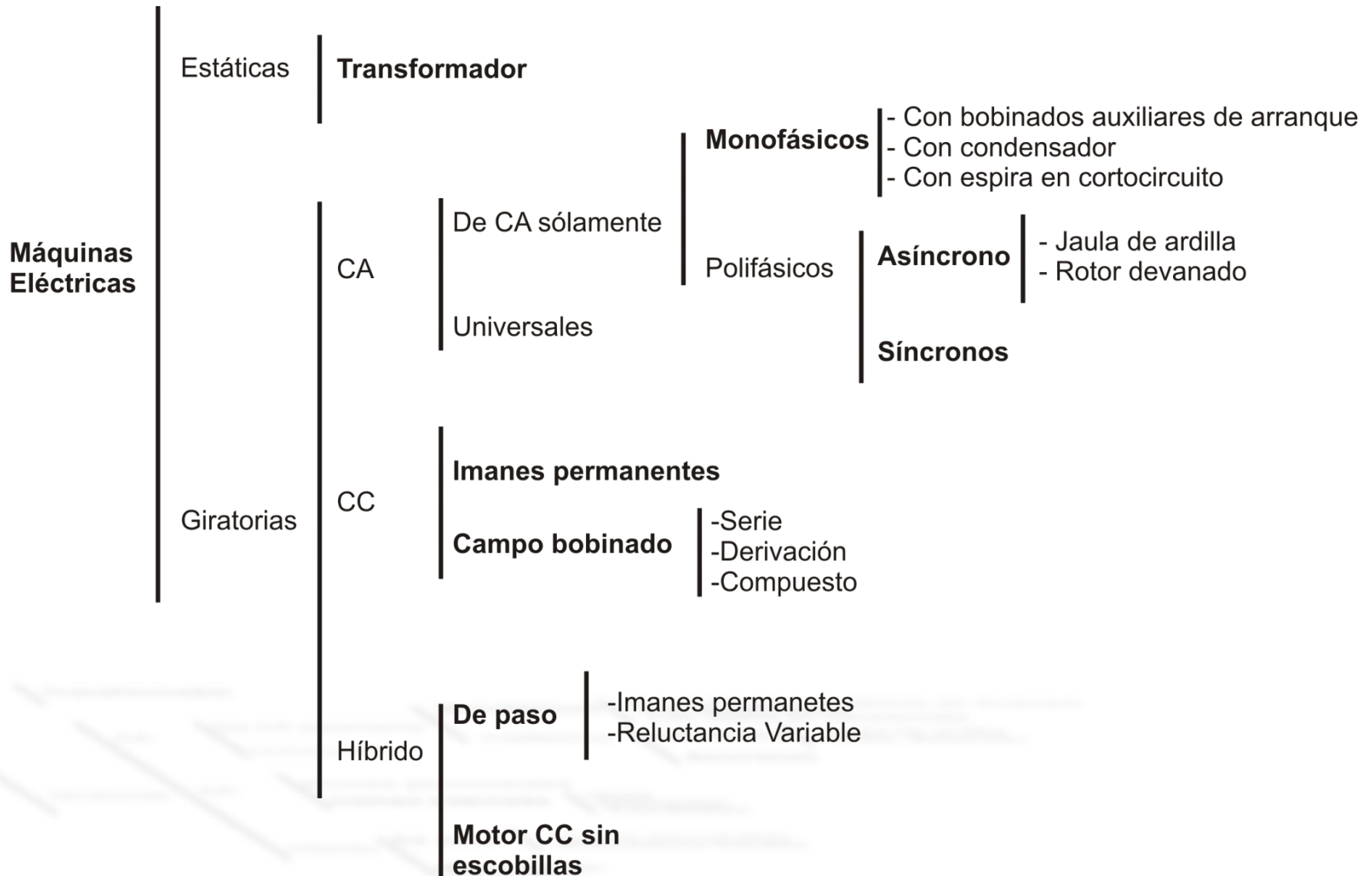
La f.m.m. resultante en el entrehierro

$$F(\theta, t) = \frac{3}{2} F_m \cos(\omega t - \theta)$$

Tema I: MÁQUINA ASÍNCRONA

ASPECTOS CONSTRUCTIVOS

INTRODUCCIÓN



Cuaderno Técnico Schneider n° 207 / p. 22

La tabla siguiente permite visualizar muy rápidamente el conjunto de motores eléctricos disponibles, sus principales características y campos de aplicación.

Hay que destacar la situación obtenida por los motores asíncronos trifásicos de jaula en los que el calificativo de «estándar» queda actualmente reforzado por una perfecta adaptación a la utilización conseguida en el desarrollo de dispositivos electrónicos que permiten la variación de velocidad.

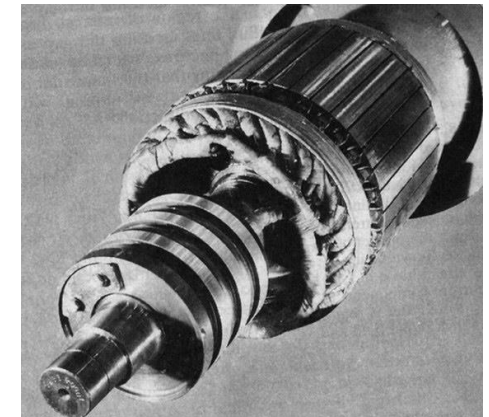
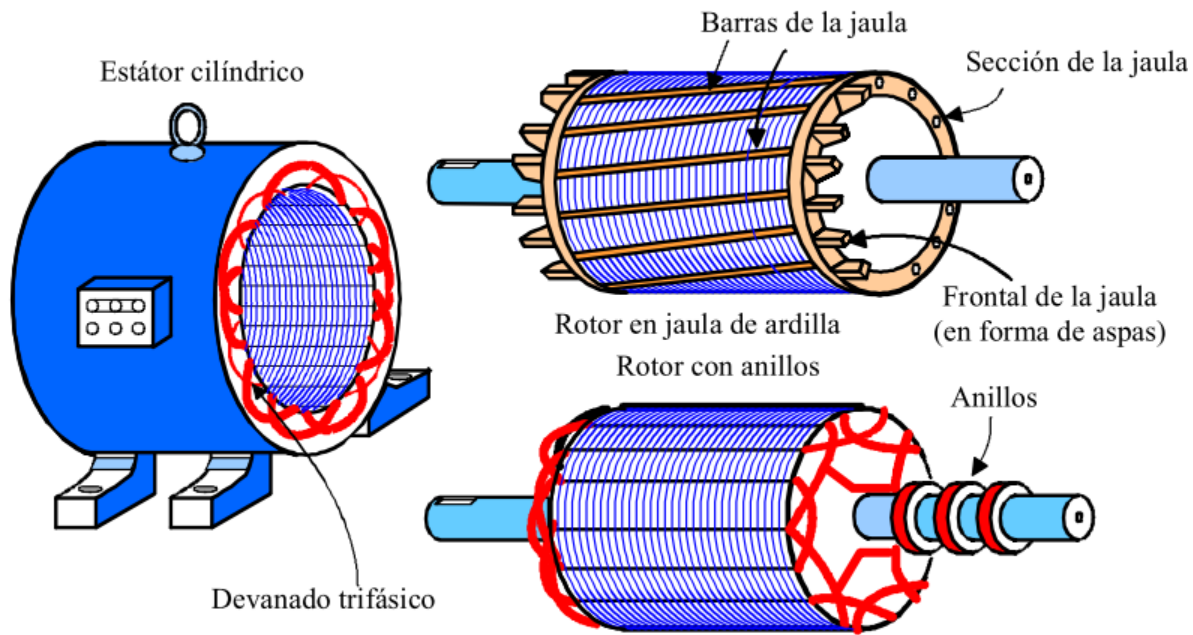
Tipo de motor	Asíncrono de jaula		Asíncrono con anillos	Síncrono con rotor bobinado	Paso a paso	De corriente continua	
	trifásico	monofásico			rotor tierras raras		
Coste del motor	Bajo	Fácil	Elevado	Elevado	Elevado	Bajo	Elevado
Motor estanco	Estándar	Posible	Bajo demanda; caro	Bajo demanda; caro	Estándar	Estándar	Posible, muy caro
Arranque directo en la red	Cómodo	Fácil	Dispositivo de arranque especial	Imposible a partir de algunos kW	No previsto	No previsto	No previsto
Variador de velocidad	Fácil	Muy raro	Posible	Frecuente	Siempre	Siempre	Siempre
Coste de la solución con variador de velocidad	Cada vez más económico	Muy económico	Económico	Muy económico	Bastante económico	Muy económico	Muy económico
Prestaciones con variador de velocidad	Cada vez mayores	Muy bajas	Medias	Elevada	Muy elevadas	Media a elevada	Elevada a muy elevadas
Empleo	Velocidad constante o variable	Normalmente, velocidad constante	Velocidad constante o variable	Velocidad constante o variable	Velocidad variable	Velocidad variable	Velocidad variable
Utilización industrial	Universal	Para pequeñas potencias	En disminución	En las grandes potencias en MT	Máquinas herramientas, gran dinámica	Posicionamiento en bucle abierto, para pequeñas potencias	En disminución

INTRODUCCIÓN: Aspectos constructivos



<https://www.youtube.com/watch?v=xGW3RHVGBmA>

INTRODUCCIÓN: Aspectos constructivos

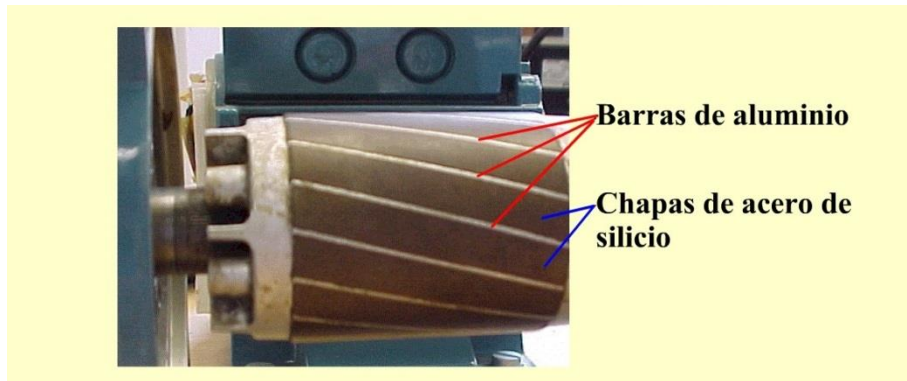


INTRODUCCIÓN: Aspectos constructivos



[Visita este enlace Acero eléctrico \(acero magnético, acero al silicio\)](#) (wikipedia)

Las máquinas eléctricas son construidas con láminas de acero al silicio. El silicio aumenta la resistencia eléctrica del acero (disminuye las pérdidas por corrientes de Foucault) y mejora sus propiedades magnéticas (disminuye las pérdidas por histéresis). Se construye en chapas laminadas en frío de 2 mm o menos de espesor, y están recubiertas de barniz o separadas por un papel. Con este aislamiento aumenta la resistencia eléctrica entre las láminas.



<http://losmejorestecnicosjunior.blogspot.com.es/2010/11/motor-asincromo-trifasico-jaula-de.html>

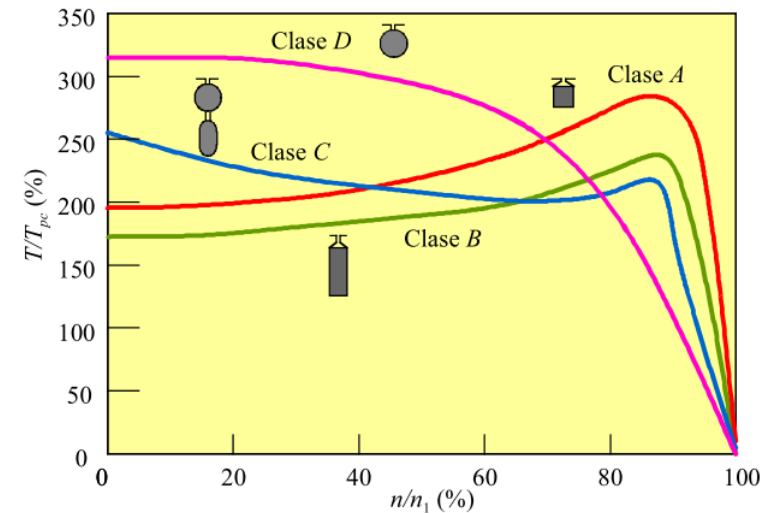
Clases de motores asíncronos de jaula de ardilla

Las propiedades de la construcción eléctrica y mecánica el rotor, en las cinco clases NEMA de motores de inducción de jaula de ardilla, se resume en la siguiente tabla.

Tabla 1: Características de los motores comerciales de inducción de jaula de ardilla de acuerdo con la clasificación en letras NEMA.

*Los voltajes citados son para el voltaje nominal en el arranque.

Clase NEMA	Par de arranque (# de veces el nominal)	Corriente de Arranque	Regulación de Velocidad (%)	Nombre de clase Del motor
A	1.5-1.75	5-7	2-4	Normal
B	1.4-1.6	4.5-5	3.5	De propósito general
C	2-2.5	3.5-5	4-5	De doble jaula alto par
D	2.5-3.0	3-8	5-8 , 8-13	De alto par alta resistencia
F	1.25	2-4	mayor de 5	De doble jaula, bajo par y baja corriente de arranque.



NEMA: The National Electrical Manufacturers Association is the largest trade association of electrical equipment manufacturers in the United States

Clases de motores asíncronos de jaula de ardilla

MOTORES DE INDUCCION DE JAULA DE ARDILLA **CLASE A**

- El motor clase A es un motor de jaula de ardilla normal o estándar fabricado para uso a velocidad constante.
- Tiene grandes áreas de ranuras para una muy buena disipación de calor, y barras con ranuras hondas en el motor.
- Durante el periodo de arranque, la densidad de corriente es alta cerca de la superficie del rotor; durante el periodo de la marcha, la densidad se distribuye con uniformidad. Esta diferencia origina algo de alta resistencia y baja reactancia de arranque, con lo cuál se tiene un par de arranque entre 1.5 y 1.75 veces el nominal (a plena carga).
- El par de arranque es relativamente alto y la baja resistencia del rotor producen una aceleración bastante rápida hacia la velocidad nominal.
- Tiene la mejor regulación de velocidad pero su corriente de arranque varía entre 5 y 7 veces la corriente nominal normal, haciéndolo menos deseable para arranque con línea, en especial en los tamaños grandes de corriente que sean indeseables.

Clases de motores asíncronos de jaula de ardilla

MOTORES DE INDUCCION DE JAULA DE ARDILLA **CLASE B**

- A los motores de clase B a veces se les llama motores de propósito general; es muy parecido al de la clase A debido al comportamiento de su deslizamiento-par.
- Las ranuras de su motor están embebidas algo más profundamente que en los motores de clase A y esta mayor profundidad tiende a aumentar la reactancia de arranque y la marcha del rotor. Este aumento reduce un poco el par y la corriente de arranque.
- Las corrientes de arranque varían entre 4 y 5 veces la corriente nominal en los tamaños mayores de 5 HP se sigue usando arranque a voltaje reducido. Los motores de clase B se prefieren sobre los de la clase A para tamaños mayores.
- Las aplicaciones típicas comprenden las bombas centrífugas de impulsión, las máquinas herramientas.

Clases de motores asíncronos de jaula de ardilla

MOTORES DE INDUCCION DE JAULA DE ARDILLA **CLASE C**

- Estos motores tienen un rotor de doble jaula de ardilla, el cual desarrolla un alto par de arranque y una menor corriente de arranque.
- Debido a su alto par de arranque, acelera rápidamente, sin embargo cuando se emplea en grandes cargas, se limita la disipación térmica del motor porque la mayor parte de la corriente se concentra en el devanado superior.
- En condiciones de arranque frecuente, el rotor tiene tendencia a sobre calentarse, se adecua mejor a grandes cargas repentinas pero de tipo de baja inercia.
- Las aplicaciones de los motores de clase C se limitan a condiciones en las que es difícil el arranque como en bombas y compresores de pistón.

Clases de motores asíncronos de jaula de ardilla

MOTORES DE INDUCCION DE JAULA DE ARDILLA CLASE D

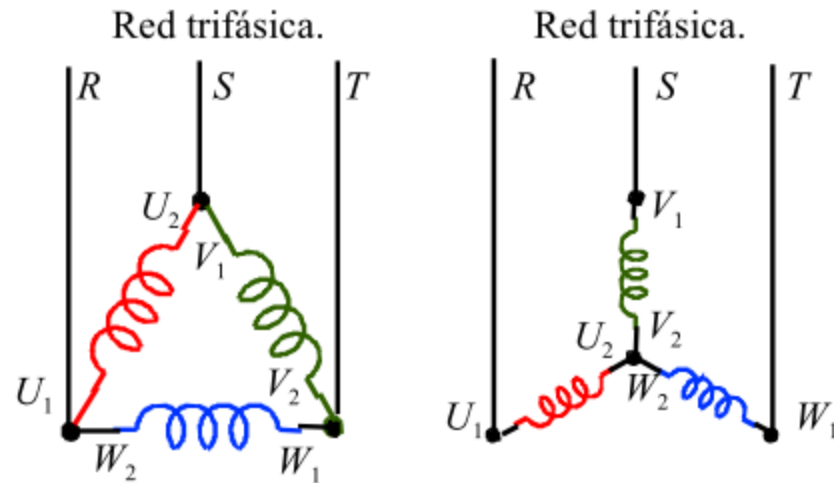
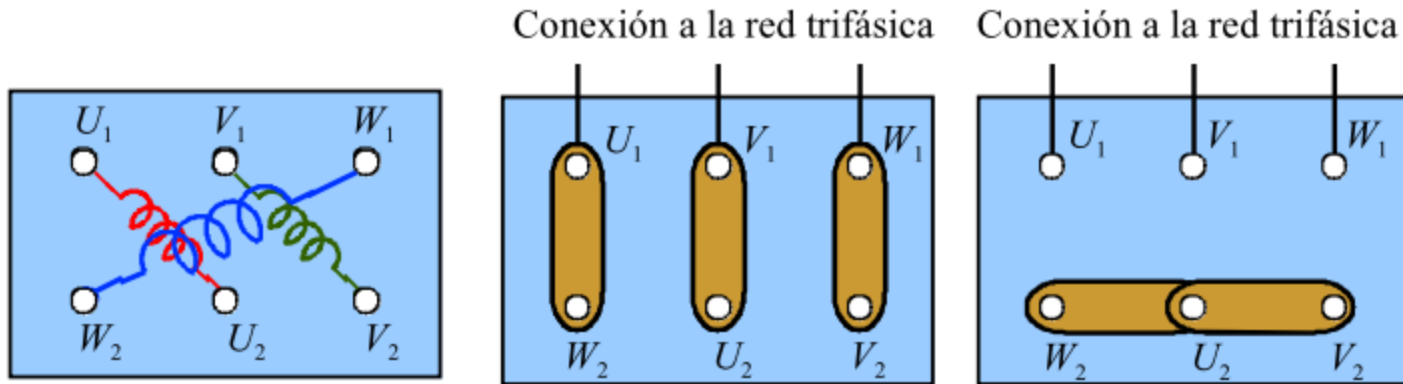
- Los motores comerciales de inducción de jaula de ardilla clase D se conocen también como de alto par y alta resistencia.
- Las barras del rotor se fabrican en aleación de alta resistencia y se colocan en ranuras cercanas a la superficie o están embebidas en ranuras de pequeño diámetro.
- La relación de resistencia a reactancia del rotor de arranque es mayor que en los motores de las clases anteriores.
- El motor está diseñado para servicio pesado de arranque, encuentra su mayor aplicación con cargas como cizallas o troqueles, que necesitan el alto par con aplicación a carga repentina.
- La regulación de velocidad en esta clase de motores es la peor.

Clases de motores asíncronos de jaula de ardilla

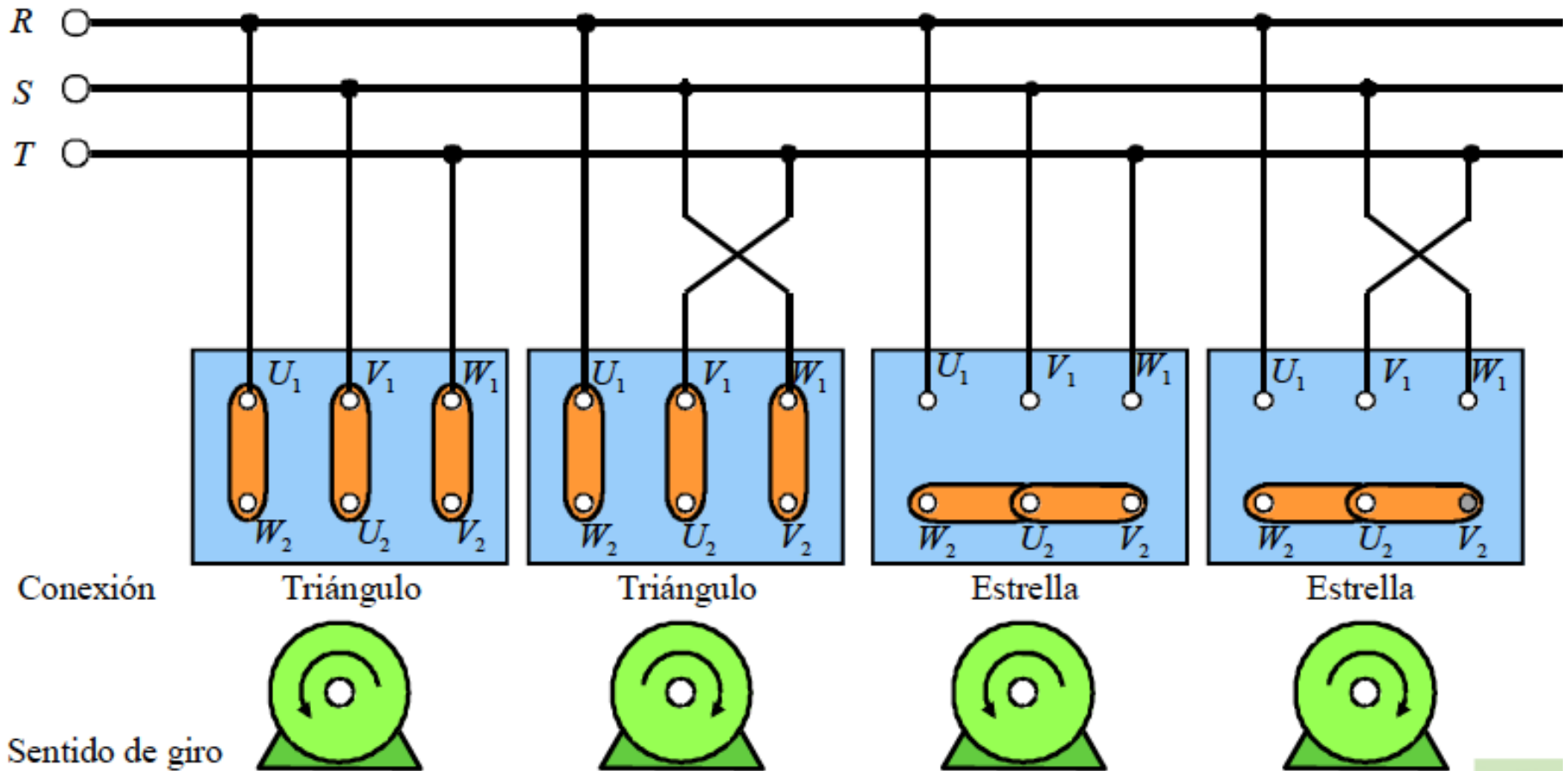
MOTORES DE INDUCCION DE JAULA DE ARDILLA CLASE F

- También conocidos como motores de doble jaula y bajo par. Están diseñados principalmente como motores de baja corriente, porque necesita la menor corriente de arranque de todas las clases. Tiene una alta resistencia del rotor tanto en su devanado de arranque como en el de marcha y tiende a aumentar la impedancia de arranque y de marcha, y a reducir la corriente de marcha y de arranque.
- El rotor de clase F se diseñó para remplazar al motor de clase B. El motor de clase F produce pares de arranque aproximadamente 1.25 veces el par nominal y bajas corrientes de arranque de 2 a 4 veces la nominal.
- Los motores de esta clase se fabrican de la capacidad de 25 hp para servicio directo de la línea.
- Debido a la resistencia del rotor relativamente alta de arranque y de marcha, estos motores tienen menos regulación de voltaje de los de clase B, baja capacidad de sobrecarga y en general de baja eficiencia de funcionamiento. Sin embargo, cuando se arrancan con grandes cargas, las bajas de corrientes de arranque eliminan la necesidad de equipo para voltaje reducido.

Conexión del bobinado del estátor



Conexión del bobinado del estátor y sentido de giro



Características de motores trifásicos de inducción de jaula

CARACTERÍSTICAS DE MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN CON ROTOR EN JAULA Y REFRIGERADOS POR SUPERFICIE											
Velocidad de sincronismo: 1500 r.p.m. Tensiones: 220/380V (para >7,5CV también a 500V).											
Aislamiento clase B (F). Protección IP44											
CV	kW	Peso (kg)	M.d.i. $J=GD^2/4$ (kg m ²)	Valores de servicio					Relaciones		
				Velocid. r.p.m.	Rend. η	cos ϕ	I_n a 380V	Par T_n N.m	T_s/T_n	I_s/I_n	T_{max}/T_n
1/2	0,37	6,0	0,0008	1375	66	0,76	1,12	2,5	2,0	3,7	-
3/4	0,55	8,0	0,0015	1400	71	0,80	1,47	3,7	2,3	4,7	-
1	0,75	9,4	0,0018	1400	74	0,79	1,95	5,1	2,5	5,0	-
2	1,5	15,6	0,0035	1410	76	0,81	3,7	10	2,4	5,3	2,6
4	3	24	0,0058	1410	79	0,83	7,0	20	2,6	6,0	2,7
7,5	5,5	50	0,023	1450	84	0,85	11,7	36	2,2	7,0	2,8
10	7,5	66	0,028	1450	86	0,85	15,6	49	2,4	7,9	3,3
20	15	110	0,07	1460	89	0,88	29	98	2,2	8,0	2,9
30	22	195	0,16	1460	90,5	0,85	43	147	2,6	6,0	2,3
50	37	320	0,5	1470	92,5	0,87	70	245	2,6	6,0	2,2
60	45	350	0,55	1470	93	0,87	85	298	2,6	6,0	2,2
100	75	630	1,5	1480	94	0,87	139	494	2,6	6,0	2,1
150	110	850	2,75	1485	94,5	0,87	205	722	2,6	6,0	2,1
180	132	960	3	1485	95	0,87	245	867	2,6	6,0	2,0
430	315	2020	13	1490	95,5	0,89	560	2060	2,2	7,0	2,4
545	400	2380	16	1490	96	0,89	715	2610	2,2	7,0	2,4

Tema I: MÁQUINA ASÍNCRONA

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Principio de funcionamiento

El devanado del estator está formado por 3 arrollamientos desfasados 120° en el espacio y de $2p$ polos, al introducir corriente trifásica a f_1 se produce un flujo giratorio cuya velocidad de sincronismo es

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} \text{ (r.p.m.)}$$

Este flujo giratorio inducirá f.e.m.s. en los conductores del rotor (Ley de Faraday)

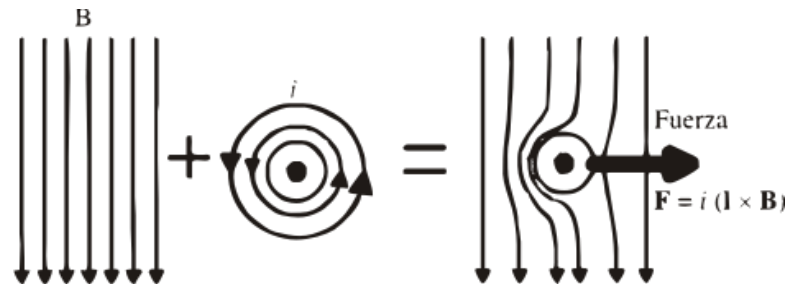
$$e = \bar{l} \bullet (\bar{v} \times \bar{B})$$

y si está su circuito eléctrico cerrado, aparecerán corrientes que reaccionarán con el flujo del estator, apareciendo en los mismos una fuerza (Ley de Laplace)

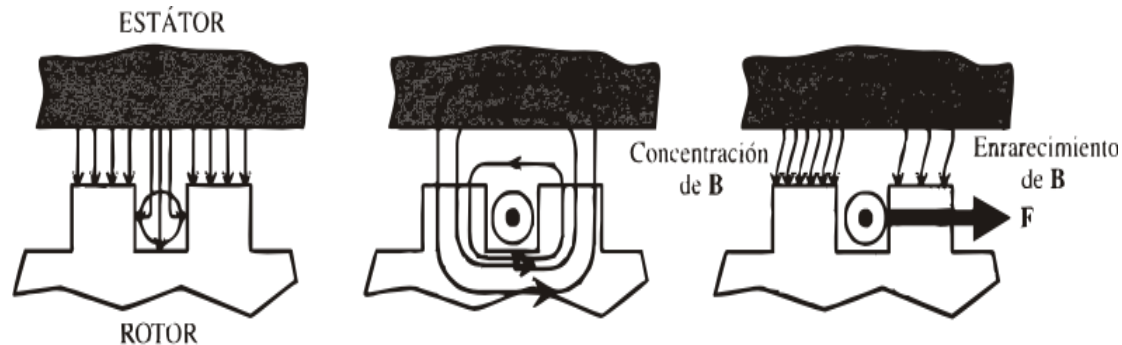
$$\bar{F} = i(\bar{l} \times \bar{B})$$

Multiplicando la fuerza por el radio del rotor e integrando está acción sobre el número total de conductores del rotor se obtiene el par total de la máquina, que tiende a mover el rotor siguiendo al campo giratorio del estator.

Principio de funcionamiento



En la realidad los conductores están dentro de unas ranuras. El campo se deforma pero no atraviesa al conductor, esta fuerza actúa realmente en los dientes y no en los conductores



El par hace que el rotor gire y se aproxima a la velocidad n_1 del campo, siendo menor la f.e.m. inducida en los conductores del rotor y por tanto se reducen las corrientes en el mismo, disminuyendo el par electromagnético de motor. El caso límite, en el que el rotor girase a la velocidad de sincronismo n_1 , no habría entonces movimiento del campo giratorio respecto al rotor. Por tanto, desaparece la f.e.m. inducida, $I=0$, Par=0

Principio de funcionamiento

■ La velocidad de sincronismo n_1 constituye el límite teórico, es decir, el motor gira a una velocidad inferior $n < n_1$.

Se define el deslizamiento

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

Al aumentar la carga mecánica del motor



el par resistente se hace mayor que el par interno y s aumenta



aumenta las corrientes del rotor



Par aumenta y se establece el equilibrio dinámico de los momentos resistentes y motor.

Principio de funcionamiento

La frecuencia de la corriente en el rotor es f_2

$$n_2 = n_1 - n \quad \text{velocidad relativa del rotor}$$

$$f_2 = f_1 - \frac{np}{60}$$

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{\frac{60f_1}{p} - n}{\frac{60f_1}{p}} = \frac{f_1 - \frac{np}{60}}{f_1} = \frac{f_2}{f_1}$$

$$\Rightarrow f_2 = sf_1$$

Si el rotor está parado $\Rightarrow f_2 = f_1 \quad (n = 0, s = 1)$

El valor eficaz de la f.e.m. inducida en estator: $E_1 = 4,44K_1 f_1 N_1 \phi_m$

El valor eficaz de la f.e.m. inducida en rotor parado: $E_2 = 4,44K_2 f_1 N_2 \phi_m$

K_1 y K_2 factor de devanado son factores reductores para tener en cuenta que las f.e.m.s de las espiras del devanado están distribuidas en ranuras por las periferias del estator y del rotor. (Debido al desfase entre espiras no se puede hacer una aritmética debe ser geométrica de las f.e.m.s de cada espira)

Principio de funcionamiento

Cuando el rotor gira y teniendo en cuenta que $f_2 = sf_1$ tenemos

$$E_{2s} = 4,44K_2 f_2 N_2 \phi_m = sE_2$$

La E_{2s} produce corrientes en el rotor de frecuencia f_2 , por lo que creará un campo giratorio, cuya velocidad respecto a su propio movimiento será

$$n_2 = \frac{60 f_2}{p}$$

(mismo número de polos del rotor que el estator)

La velocidad del campo del rotor respecto a un sistema de referencia en reposo es

$$n_2 + n$$

$$\Rightarrow n_2 + n = (n_1 - n) + n = n_1 \Rightarrow$$

El campo del rotor gira en sincronismo con el campo del estator

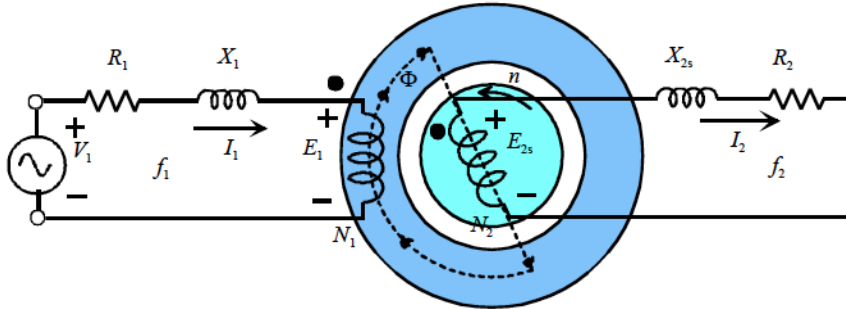
Realmente son las f.m.ms del estator y rotor las que interaccionan para producir el flujo resultante en el entrehierro.

Tema I: MÁQUINA ASÍNCRONA

MODELO: CIRCUITO EQUIVALENTE EN ESTACIONARIO

Circuito equivalente por fase del motor asíncrono trifásico

Es similar a un transformador con un secundario en cortocircuito



Ecuaciones de comportamiento eléctrico del estator y del rotor

$$\underline{V}_1 = \underline{E}_1 + R_1 \underline{I}_1 + jX_1 \underline{I}_1$$

$$\underline{E}_{2s} = R_2 \underline{I}_2 + jX_{2s} \underline{I}_2$$

donde R_1 y R_2 ohmios/fase son las resistencias de los arrollamientos. Los flujos de dispersión en los devanados del rotor y estator dan lugar a las autoinductancias: L_{d1} y L_{d2}

$$X_1 = L_{d1} \omega_1 = L_{d1} 2\pi f_1$$

Para rotor parado

$$\longrightarrow X_2 = L_{d2} \omega_1 = L_{d2} 2\pi f_1$$

Para rotor girando

$$\longrightarrow X_{2s} = L_{d2} \omega_2 = L_{d2} 2\pi f_2 = sX_2$$

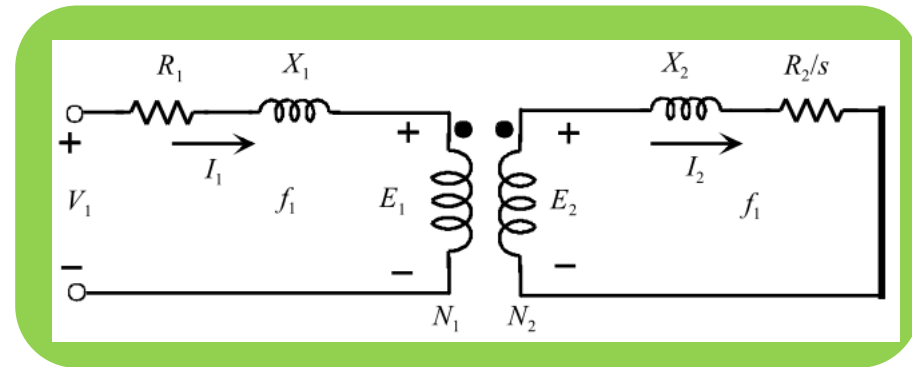
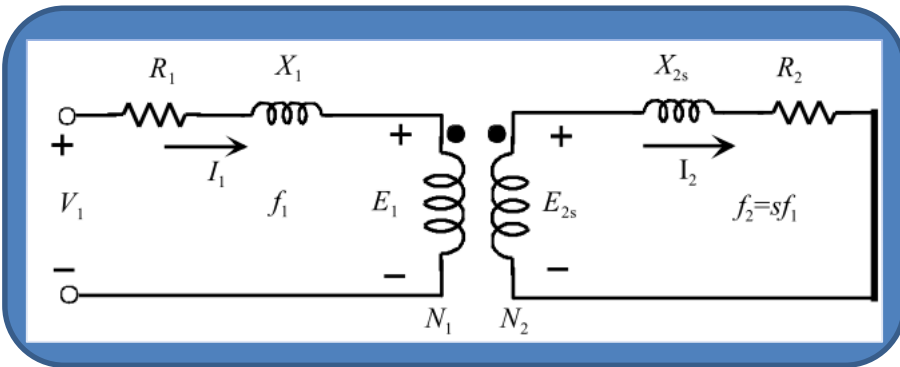
Circuito equivalente del motor asíncrono

Igual que en un transformador es obtener una red que explique el comportamiento de la máquina y hay que reducir las magnitudes de un devanado al otro, generalmente del rotor al estator.

La gran diferencia es que las frecuencias de las corrientes en el estator y en rotor son diferentes.

La corriente que circula por el rotor es:

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{R_2 + jX_{2s}} = \frac{sE_2}{R_2 + jsX_2} = \frac{E_2}{\frac{R_2}{s} + jX_2}$$

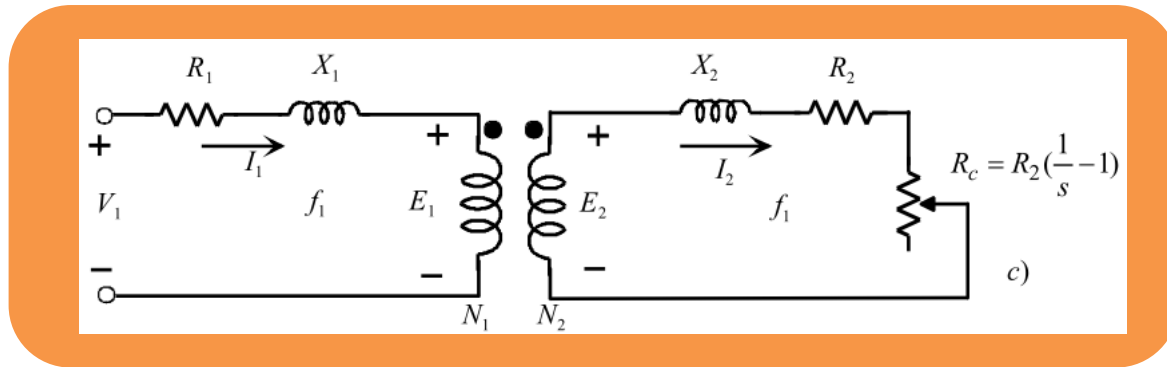


En este caso E_2 y X_2 son independientes del movimiento, este efecto se incluye en R_2/s , de tal manera que la frecuencia del rotor ficticio es f_1

Circuito equivalente del motor asíncrono

Para ver el cambio que ha producido en la resistencia del rotor transformamos la ecuación:

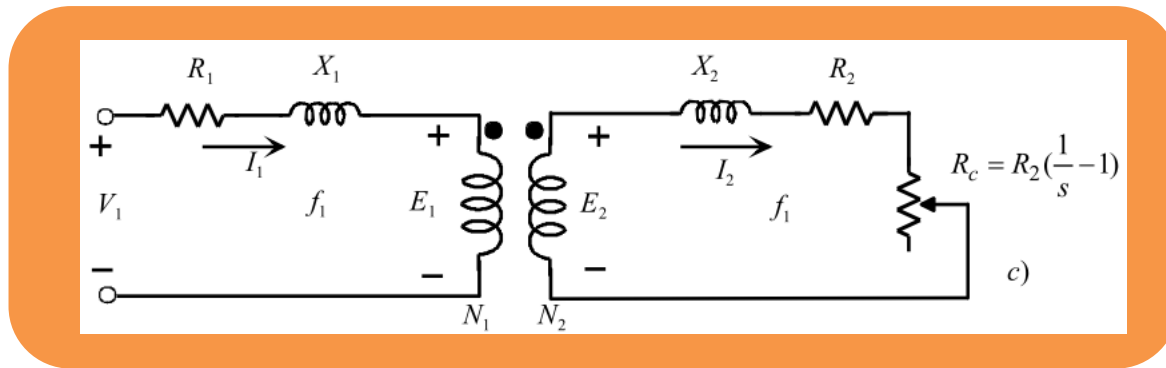
$$I_2 = \frac{E_{2s}}{R_2 + jX_{2s}} = \frac{sE_2}{R_2 + jsX_2} = \frac{E_2}{\frac{R_2}{s} + jX_2} = \frac{E_2}{R_2 + jX_2 + R_2\left(\frac{1}{s} - 1\right)}$$



Este circuito consta de la resistencia propia del rotor R_2 más otra $R_c = R_2\left(\frac{1}{s} - 1\right)$ que depende del movimiento.

- La R_c es la resistencia de carga y representa el efecto equivalente a la carga mecánica que lleve el motor.
- La potencia eléctrica disipada en R_c (multiplicada por el número de fases) es la potencia mecánica en el eje.

Circuito equivalente del motor asíncrono

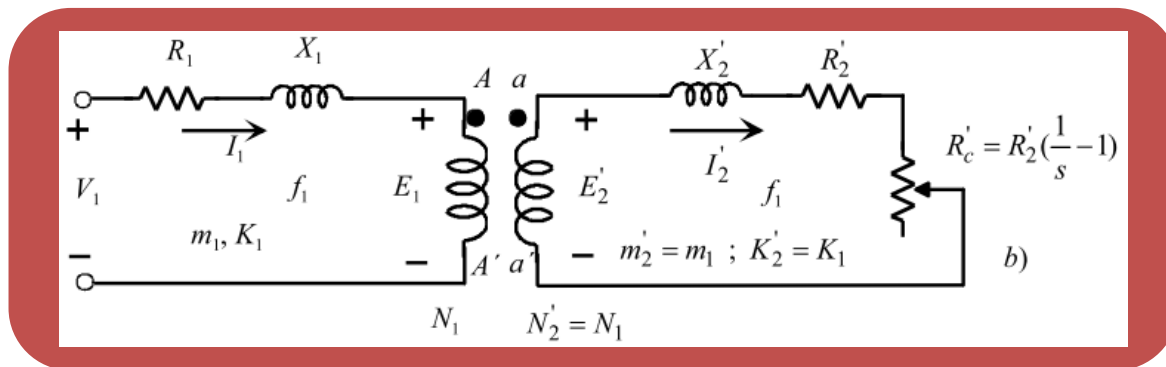


En este circuito todavía existen acoplamientos magnéticos. Hay que reducir el secundario (rotor) al primario (estator):

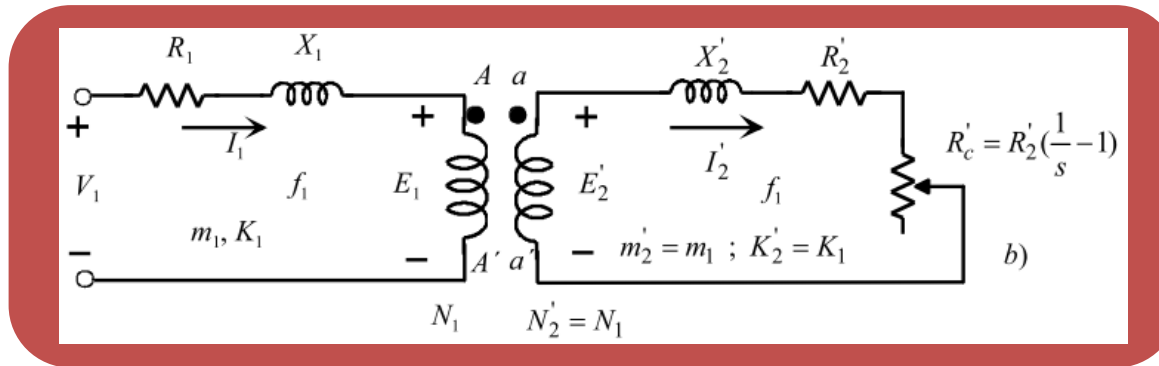
$$N'_2 = N_1$$

$$m'_2 = m_1$$

$$K'_2 = K_1$$



Circuito equivalente del motor asíncrono



Como consecuencia:

a) Fuerza electromotriz E'_2

$$E'_2 = 4.44K'_2 f_1 N'_2 \phi_m = 4.44K_1 f_1 N_1 \phi_m = E_1$$

Por tanto se puede unir el primario con el secundario

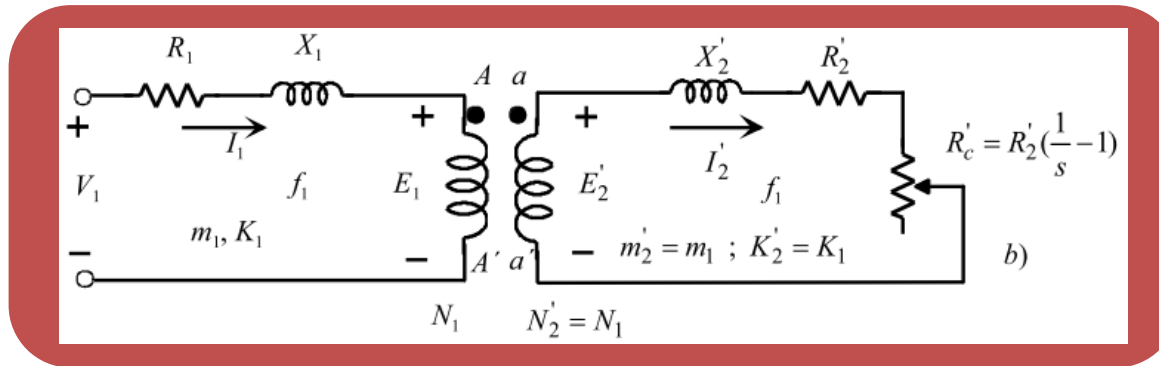
$$E_1 = 4.44K_1 f_1 N_1 \phi_m$$

$$E_2 = 4.44K_2 f_1 N_2 \phi_m$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{K_1 N_1}{K_2 N_2} = m_v \Rightarrow E'_2 = m_v E_2$$

Relación de transformación de tensiones

Circuito equivalente del motor asíncrono



b) Corriente I'_2

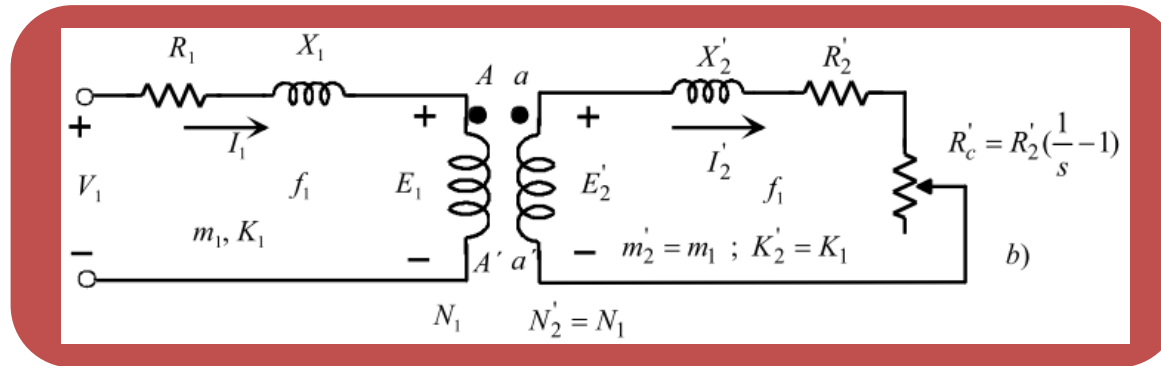
Los dos secundarios si son equivalentes deben suministrar la misma potencia retórica

$$m_2 E_2 I_2 = m'_2 E'_2 I'_2 = m_1 E'_2 I'_2 \quad \text{ya que } m'_2 = m_1.$$

$$I'_2 = \frac{m_2}{m_1} \frac{E_2}{E'_2} I_2 = \frac{m_2}{m_1} \frac{1}{m_v} I_2 = \frac{m_2 K_2 N_2}{m_1 K_1 N_1} I_2 \Rightarrow$$

$$I'_2 = \frac{I_2}{m_i} \quad \text{Relación de transformación de corrientes siendo} \quad m_i = \frac{m_1}{m_2} m_v$$

Circuito equivalente del motor asíncrono



c) Impedancias R'_2 , X'_2 , R'_c

Aplicando el principio de igualdad energética

Las pérdidas en el Cu:

$$m_2 R_2 I_2^2 = m'_2 R'_2 I'^2_2 = m_1 R'_2 I'^2_2$$

como
$$I'_2 = \frac{I_2}{m_i} \Rightarrow R'_2 = \frac{m_2}{m_i} m_i^2 R_2 \Rightarrow R'_2 = m_v m_i R_2$$

Por lo que $\underline{m_v} * \underline{m_i}$ la llamamos relación de transformación de impedancias.

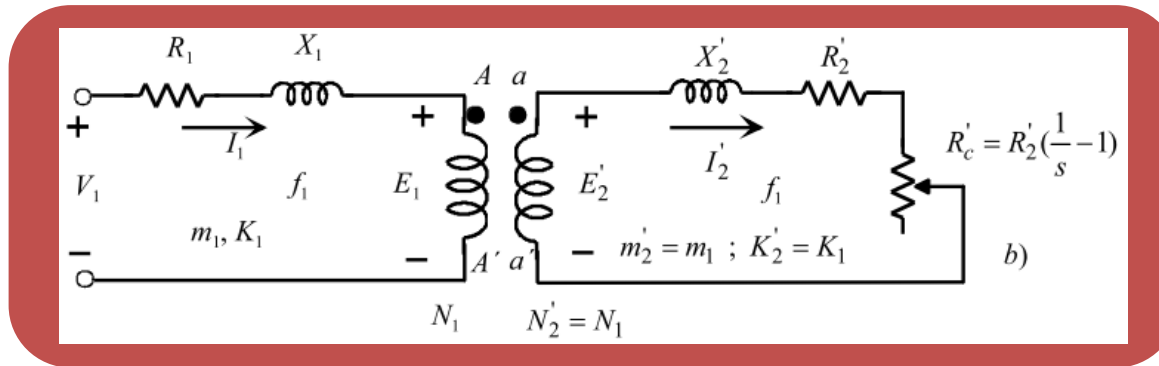
Análogamente

$$X'_2 = m_v m_i X_2$$

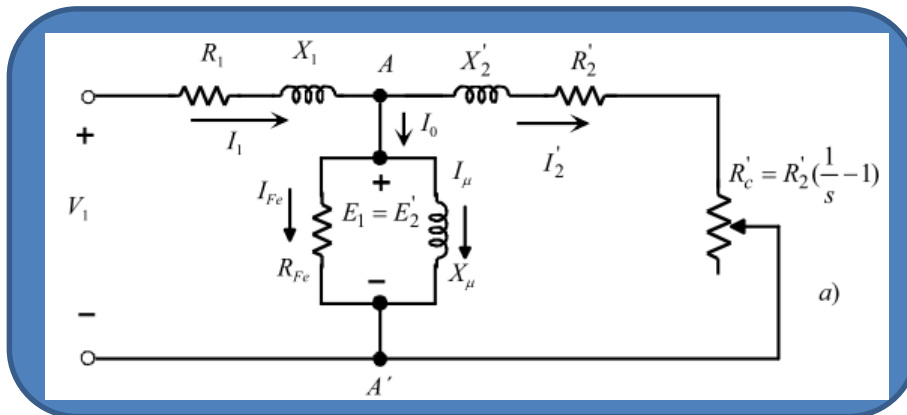
$$R'_c = m_v m_i R_c$$

Como $E'_2 = E_1$ se puede unir los terminales A-A' con a-a'

Circuito equivalente del motor asíncrono



Como $E'_2 = E_1$ se puede unir los terminales A-A' con a-a'



Circuito equivalente exacto

Circuito equivalente exacto donde

$$R'_2 = m^2 R_2$$

$$X'_2 = m^2 X_2$$

$$R'_c = m^2 R_c$$

La ecuación que relaciona las corrientes del estator y rotor

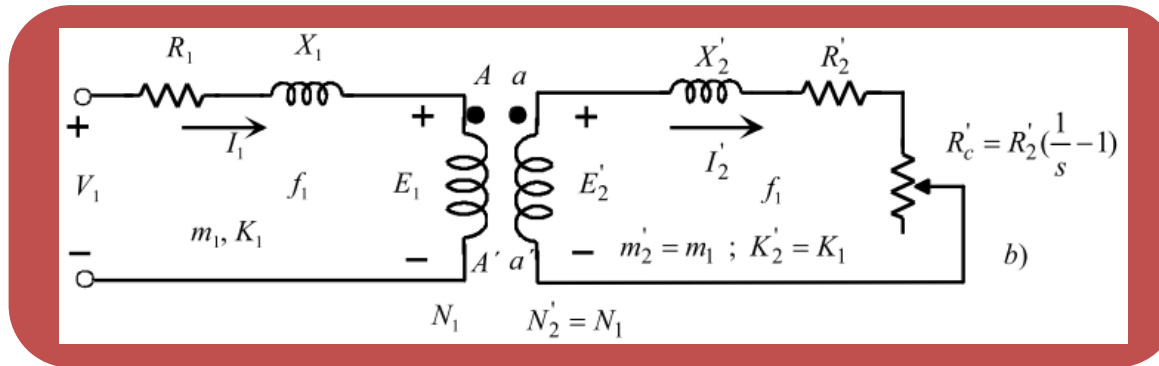
$$I_1 = I_o + I'_2 = I_o + \frac{I_2}{m_i}$$

y las ecuaciones eléctricas

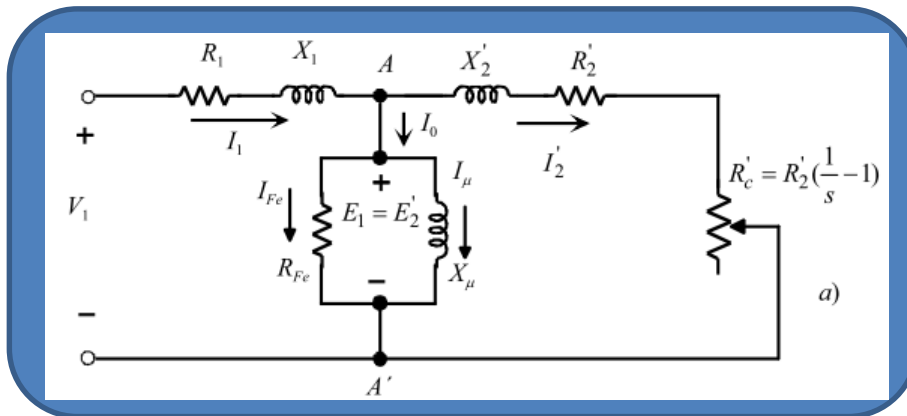
$$\underline{V}_1 = \underline{E}_1 + R_1 \underline{I}_1 + jX_1 \underline{I}_1$$

$$\underline{E}'_2 = R'_2 \underline{I}'_2 + R'_c \underline{I}'_2 + jX'_2 \underline{I}'_2$$

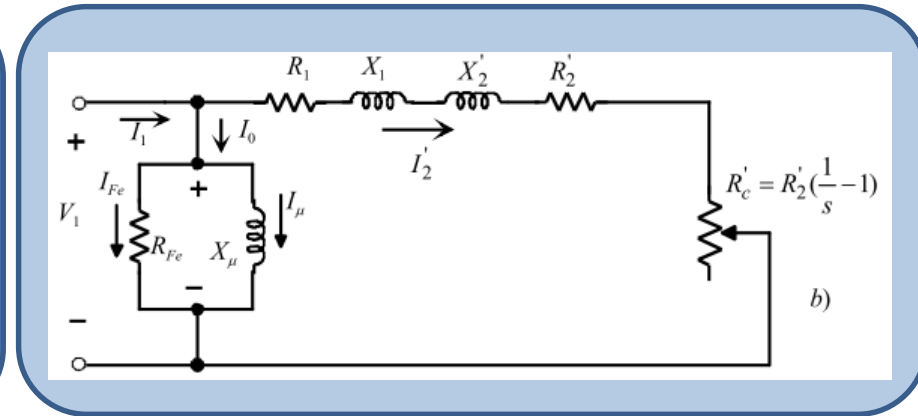
Circuito equivalente del motor asíncrono



Como $E_2' = E_1$ se puede unir los terminales A-A' con a-a'



Circuito equivalente exacto



Circuito equivalente aproximado, se puede utilizar en motores de más de 10 kW.

Circuito equivalente del motor asíncrono

Se puede tener un circuito equivalente aproximado más preciso reduciendo el valor de la tensión de alimentación.
Del circuito aproximado exacto

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

Y como
$$I_o = E_1 \frac{1}{\left(\frac{1}{R_{Fe}} + \frac{1}{jX_\mu}\right)^{-1}} = E_1 \left(\frac{1}{R_{Fe}} + \frac{1}{jX_\mu}\right) \approx \frac{E_1}{jX_\mu}$$

se ha despreciado I_{Fe} frente a la corriente de imanación I_μ .

Y como

$$I_1 = I_o + I'_2$$

$$\Rightarrow \underline{V}_1 = \underline{E}_1 + (R_1 + jX_1) \left(\frac{E_1}{jX_\mu} + \underline{I}'_2 \right)$$

Del circuito equivalente exacto

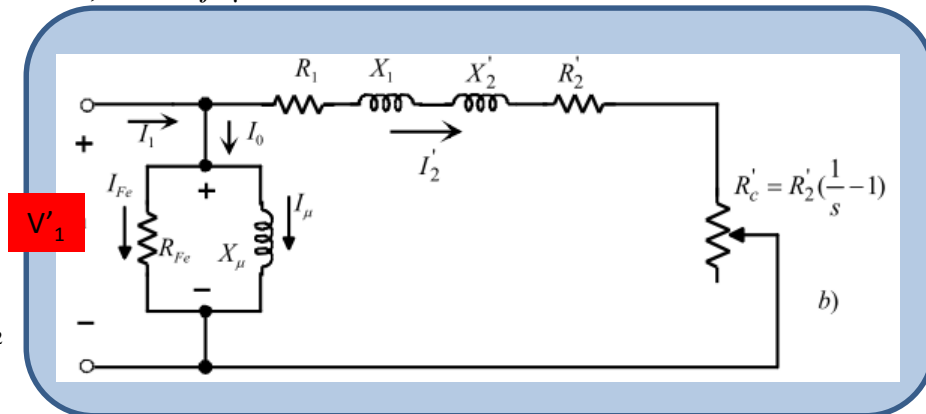
$$E_1 = E'_2 = \left(\frac{R'_2}{s} + jX'_2 \right) I'_2$$

$$\Rightarrow \underline{V}_1 = \left(R_1 + jX_1 + \frac{R'_2}{s} + jX'_2 \right) \underline{I}'_2 + \frac{R_1 + jX_1}{jX_\mu} \underline{E}_1$$

Como $X_\mu \gg R_1 \Rightarrow \frac{R_1 + jX_1}{jX_\mu} \approx \frac{X_1}{X_\mu}$

Y como $E_1 \leq V_1 \Rightarrow \underline{V}_1 \approx \left(R_1 + jX_1 + \frac{R'_2}{s} + jX'_2 \right) \underline{I}'_2 + \frac{X_1}{X_\mu} \underline{V}_1$

Agrupando
$$V'_1 = V_1 \left(1 - \frac{X_1}{X_\mu} \right) = \left(R_1 + jX_1 + \frac{R'_2}{s} + jX'_2 \right) I'_2$$



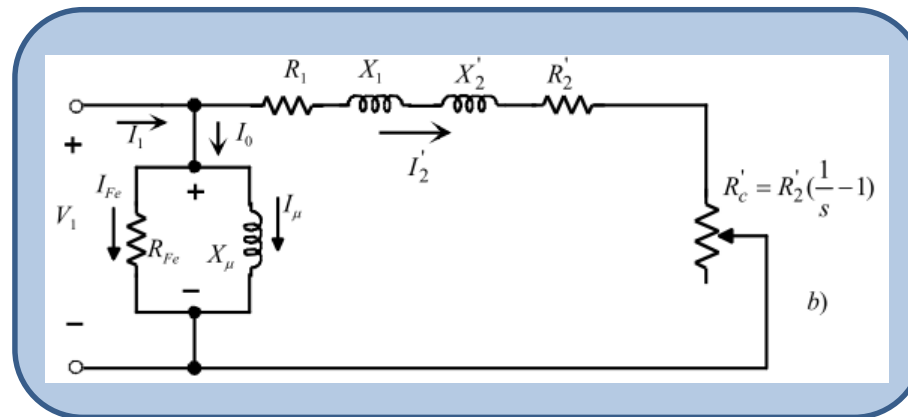
Tema I: MÁQUINA ASÍNCRONA

ENSAYOS DEL MOTOR ASÍNCRONO

Ensayos del motor asíncrono

Pruebas para determinar los parámetros del circuito equivalente

- Ensayo de vacío o de rotor libre
- Ensayo de cortocircuito o de rotor bloqueado

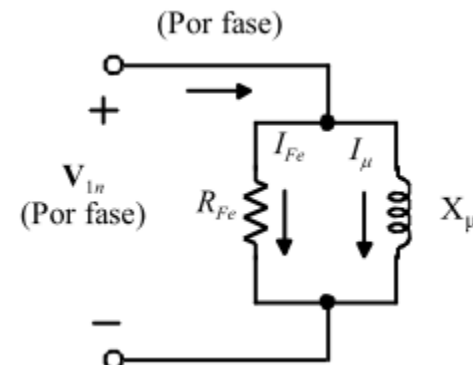
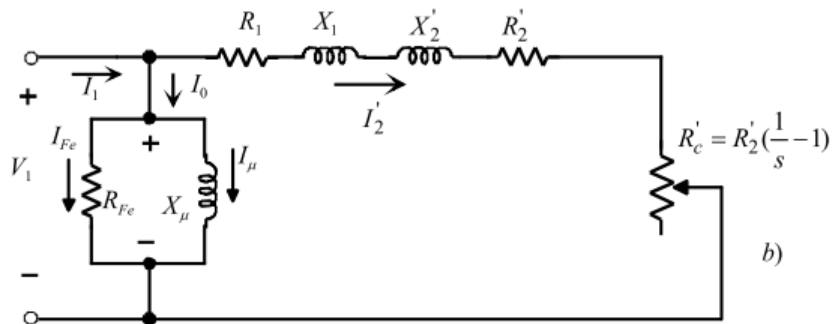


Ensayo de vacío o de rotor libre

1. El motor funciona sin ninguna carga mecánica en el eje.
2. Se debe aplicar la tensión asignada al primario V_{1n} , midiendo la potencia absorbida P_o y la corriente de vacío I_o .

En estas circunstancias el motor en vacío gira a una velocidad muy cercana a la del campo giratorio ($s \rightarrow 0$) por lo que la resistencia de carga $R'_c \rightarrow \infty$. Como no se ejerce ningún par de carga en el eje, la potencia disipada en esta resistencia es la pérdida mecánica en rozamiento y ventilación del motor.

Como I'_2 es pequeño porque R'_c es grande se pondrán despreciar las pérdidas en el Cu del devanado del rotor.



Ensayo de vacío o de rotor libre

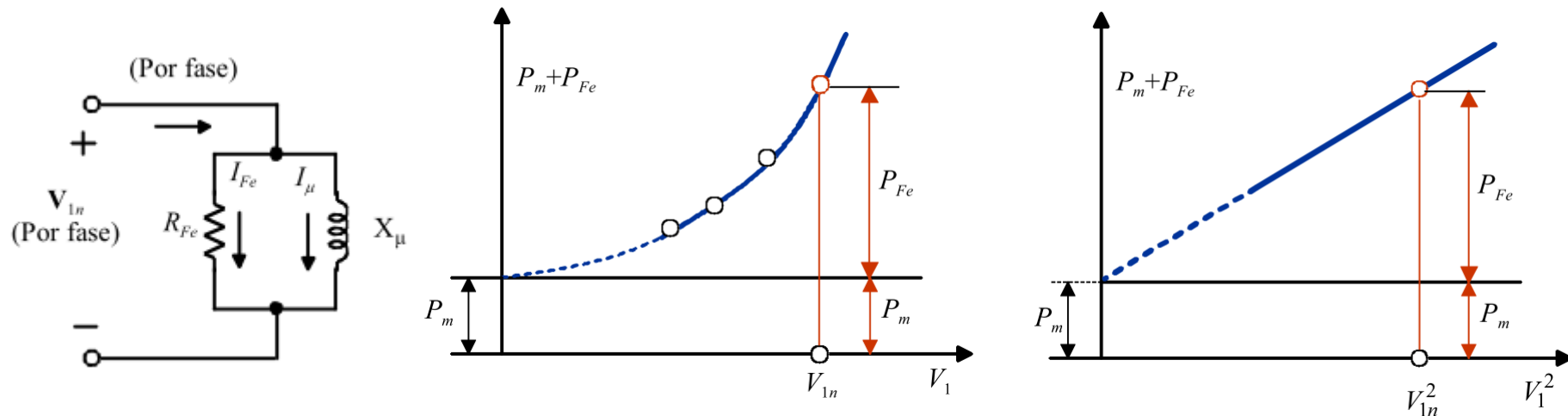
Como I'_2 es pequeño porque R'_c es grande se pondrán **despreciar** las pérdidas en el Cu del devanado del rotor.

$$P_o = P_{Fe} + P_m + P_{Cu1}$$

P_{Cu1} son pérdidas en el Cu del estator.

P_m pérdidas mecánicas.

P_{Cu1} se puede calcular si se mide la resistencia R_1 de cada fase del estator aplicando c.c. en una fase. En la práctica, se suele aumentar el valor anterior entre un 10 y 20 % para tener en cuenta el efecto "skin" en los conductores.



Ensayo de vacío o de rotor libre

Para determinar P_{Fe} y P_m se alimenta el motor con una tensión variable y se mide P_o , I_o , V_1 y se deduce

$$P_{Fe} + P_m = P_o - P_{Cu1} = P_o - m_1 R_1 I_o^2$$

Extrapolando la curva se tiene para $V_1=0$, las pérdidas mecánicas P_m , ya que las pérdidas en el Fe son nulas al no existir flujo.

Ahora podemos conocer las pérdidas en el Fe a la tensión asignada y calcular la rama paralelo del circuito equivalente.

Circuito equivalente en vacío

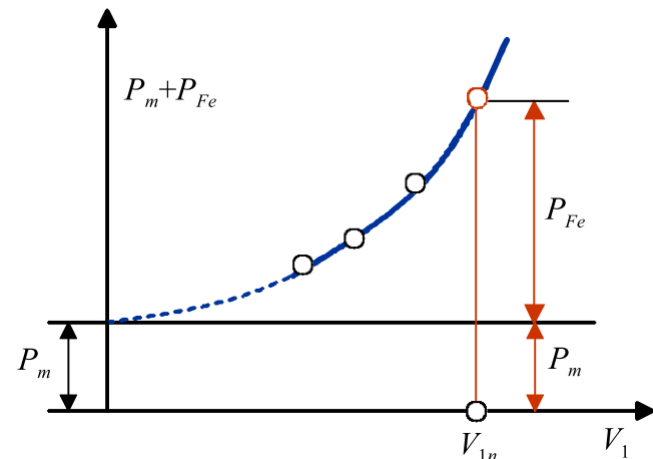
$$\cos \varphi_o = \frac{P_{Fe}}{m_1 V_{1n} I_o}$$

$$I_{Fe} = I_o \cos \varphi_o$$

$$I_\mu = I_o \text{sen} \varphi_o$$

$$\Rightarrow R_{Fe} = \frac{V_{1n}}{I_{Fe}}$$

$$X_\mu = \frac{V_{1n}}{I_\mu}$$

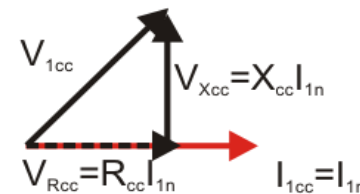
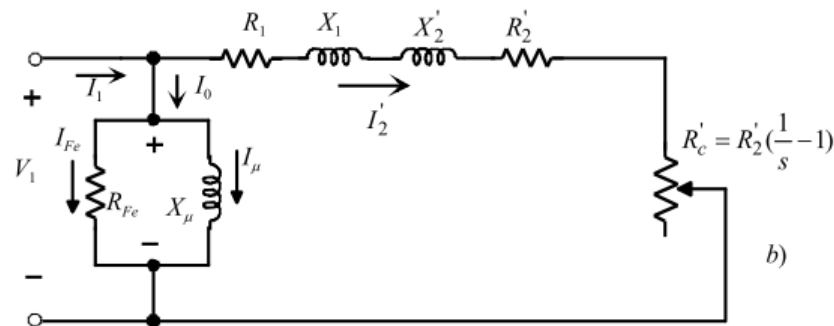
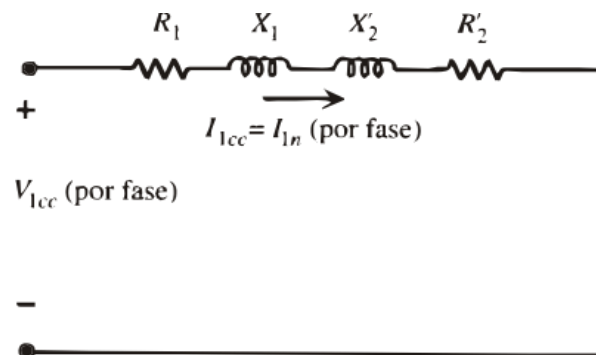


Ensayo de cortocircuito o de rotor bloqueado

1. Este ensaño se realiza bloqueando el rotor.
2. Al estátor se le aplica una tensión creciente desde cero hasta que la corriente absorbida sea $I_{1cc}=I_{1n}$ (por fase).

En estas circunstancias el motor en bloqueado la velocidad es nula, $n=0$ ($s \rightarrow 1$) por lo que la resistencia de carga $R'_c \rightarrow 0$.

Se mide V_{1cc} , I_{1cc} y P_{cc} (total)
 I_0 es despreciable frente a I_{1n}



Ensayo de cortocircuito o de rotor bloqueado

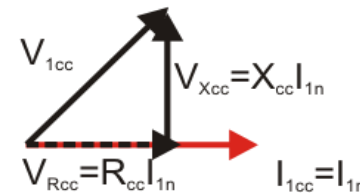
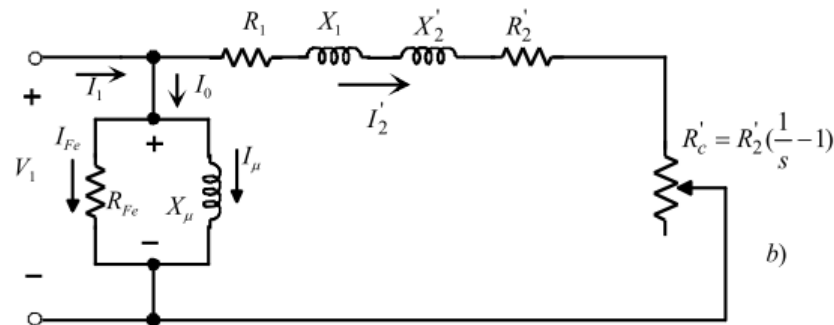
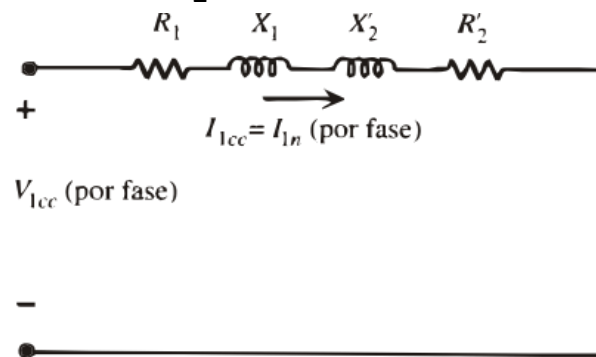
Del circuito equivalente en cortocircuito

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{m_1 V_{1cc} I_{1n}}$$

$$R_{cc} = R_1 + R'_2 = \frac{V_{Rcc}}{I_{1n}} = \frac{V_{1cc} \cos \varphi_{cc}}{I_{1n}}$$

$$X_{cc} = X_1 + X'_2 = \frac{V_{1cc} \operatorname{sen} \varphi_{cc}}{I_{1n}}$$

R_1 se determina con un ensayo de C.C. entonces se calcula R'_2 y obtenemos finalmente R'_c .



Ejemplo

www.abb.es/product/seitp322/98fbee3b9610af6c1257c690031ed1d.aspx?productLanguage=es&country=ES

ABB Power and productivity for a better world™ ABB en España

[Página principal](#)
[ABB en España](#)
[Productos y Servicios](#)
[Noticias](#)
[Empleo](#)
[Grupo ABB](#)

[Índice alfabético A-Z](#)
[Guía de Productos](#)
[Portales Industriales](#)
[Guía de Servicios](#)
[Contáctenos](#)

[Guía de productos](#)
[Motores y Generadores](#)
[Motores IEC de Baja Tensión](#)
[Motores de Aplicación General](#)
[Motores de Aluminio de Alta Eficiencia IE2](#)

Motores de Aluminio de Aplicación General de Alta Eficiencia IE2

[General](#)
[Herramientas](#)
[Contactos](#)

Los Motores IE2 de ABB de Aplicación General realizan todas [Descargas](#)



Type Test Report				Date of issue: 2011.12.28							
Customer:				Serial No.: 3GA100307T3702							
Customer ref.:				Type: M2AA 71A 2 Product Code: 3GAA071001-_SE							
Rating:				V	Hz	kW	r/min	A	cos φ	Duty	
3-Motor				230	D	50	0,37	2800	1,64	0,76	S1
Insul.cl.F				400	Y	50	0,37	2800	0,95	0,76	S1
IP55				460	Y	60	0,37	3400	0,84	0,71	S1
Resistance				Insulation resistance at 25,2 °C				Overload			
Line				R > 2000 Mohm 1000 V				Current 150 % 120s			
U ₁ - V ₁				Ambient: 17,8 °C				Torque 160 % 15s			
U ₁ - W ₁				42,04000 Ω				Speed 120 % 120s			
V ₁ - W ₁				42,14000 Ω				High-voltage test winding 2400 V 60 s			
				41,90000 Ω							

Ejemplo

Test	Torque [Nm]	Line		f[Hz]	Input		Output			
		U[V]	Y		I[A]	P1 [kW]	P2 [kW]	n[r/min]	cos φ	η [%]
No load test		400	Y	50	0,61	0,05		3000	0,12	
Locked rotor test		103	Y	50	1,00	0,13		0	0,75	
Thermal test (100% load)	1,3	400	Y	50	0,91	0,49	0,37	2787	0,77	74,80
Partial load points:										
~75% load	0,9	400	Y	50	0,80	0,37	0,28	2852	0,66	74,90
~50% load	0,6	400	Y	50	0,75	0,26	0,19	2910	0,50	70,80
~25% load	0,3	400	Y	50	0,84	0,17	0,09	2962	0,29	53,30
Temperature rise at rated load.				°C	[K]	Method		Measurement method		
Stator winding :					34,8	3		1 Resistance		
Frame :					27	3		2 Thermometer		
Bearing D-end :					21	3		3 Thermocouples		
Ambient Temperature :				25		3				
Manufactured and tested in accordance with rules of IEC 60034-1 and IEC 60034-2-1. PLL determined from residual loss.										
On behalf of customer										
On behalf of manufacturer		Date of test		5.2.2010						
Tested by Asea Brown Boveri, S.A., Fabrica Motores , 08192 Sant Quirze del Valles , Spain						Telephone		+34 93 728 85 00		
						Telefax		+34 93 728 85 33		

Computer print-out valid without signature.

ABB, Motors and Generators
www.abb.com/motors&generators

$$I_{Fe} = I_o \cos \varphi_o =$$

$$= 0.61 * 0.12 = 0.0732$$

$$I_{\mu} = I_o \sin \varphi_o =$$

$$= 0.61 * \sqrt{1 - 0.12^2} = 0.6056$$

$$\Rightarrow R_{Fe} = \frac{V_{In}}{I_{Fe}} = \frac{230}{0.0732} = 3142.08 \Omega$$

$$\Rightarrow X_{\mu} = \frac{V_{In}}{I_{\mu}} = \frac{230}{0.6056} = 379.79 \Omega$$

$$R_{cc} = R_1 + R'_2 = \frac{V_{Rcc}}{I_{In}} = \frac{V_{1cc} \cos \varphi_{cc}}{I_{In}} =$$

$$= \frac{59.4 * 0.75}{1} = 44.6 \Omega$$

$$X_{cc} = X_1 + X'_2 =$$

$$= \frac{V_{1cc} \sin \varphi_{cc}}{I_{In}} = 39.3 \Omega$$

Tema I: MÁQUINA ASÍNCRONA

BALANCE DE POTENCIAS

Balance de potencias

En un motor asíncrono existe una transformación de energía eléctrica en mecánica, que se transmite desde el estator al rotor, a través del entrehierro. Pero hay pérdidas en los diferentes órganos de la máquina.

- **La potencia que la máquina absorbe de la red**

$$P_1 = m_1 V_1 I_1 \cos \phi_1$$

Si V_1 tensión aplicada por fase, I_1 la corriente por fase, ϕ_1 desfase entre V_1 e I_1 .

- **P_1 llega al estator y parte se transforma en calor por efecto Joule en sus devanados**

$$P_{Cu1} = m_1 R_1 I_1^2$$

- **y otra parte se pierde en el hierro P_{Fe1}**

- **Siendo la disipación total en el estator** $P_{p1} = P_{Cu1} + P_{Fe1}$

- **Se considera que prácticamente todas las pérdidas ferromagnéticas se debe a las del estator porque las frecuencias de las corrientes en el rotor son muy reducidas**

$$P_{Fe} = P_{Fe1} = m_1 E_1 I_{Fe} \approx m_1 V_1 I_{Fe}$$

- **Potencia electromagnética que llegará al rotor a través del entrehierro**

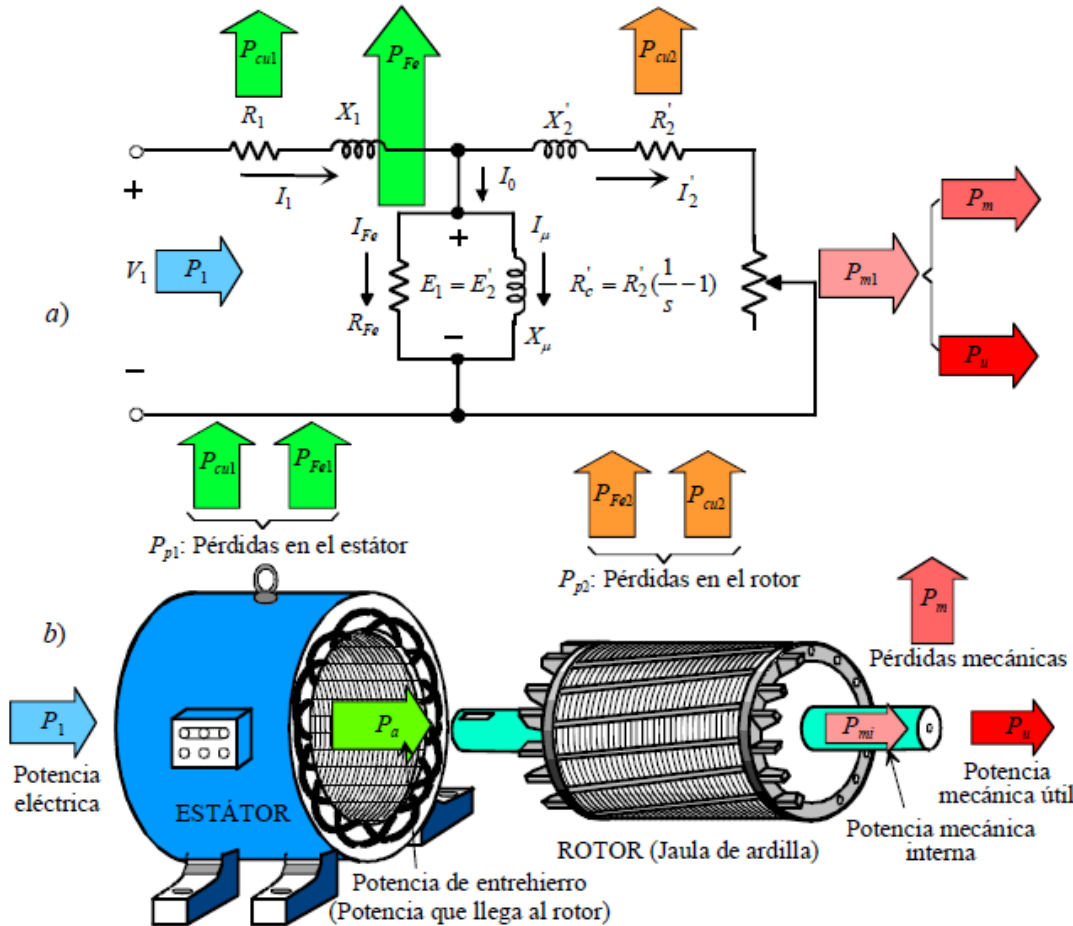
Potencia de entrehierro $P_a = P_1 - P_{p1} = P_1 - P_{Cu1} - P_{Fe}$

- **Pérdidas en el Cu del rotor** $P_{Cu2} = m_2 R_2 I_2^2 = m_1 R'_2 I_2'^2$

- **La potencia que llegará al árbol de la máquina se llama potencia mecánica interna** $P_{mi} = P_a - P_{Cu2}$

- **La potencia útil en el eje será** $P_u = P_{mi} - P_m$
- Siendo P_m las pérdidas mecánicas

Balance de potencias



$$P_{mi} = P_a - P_{Cu2}$$

$$P_{mi} = m_1 R'_c I_2'^2 = m_1 R'_2 \left(\frac{1}{s} - 1 \right) I_2'^2$$

$$\Rightarrow \frac{P_{Cu2}}{P_{mi}} = \frac{s}{1-s} \Rightarrow P_{Cu2} = s P_a$$

$$P_a = P_{mi} + P_{Cu2} = m_1 \frac{R'_2}{s} I_2'^2 = \frac{P_{Cu2}}{s} = \frac{P_{mi}}{1-s}$$

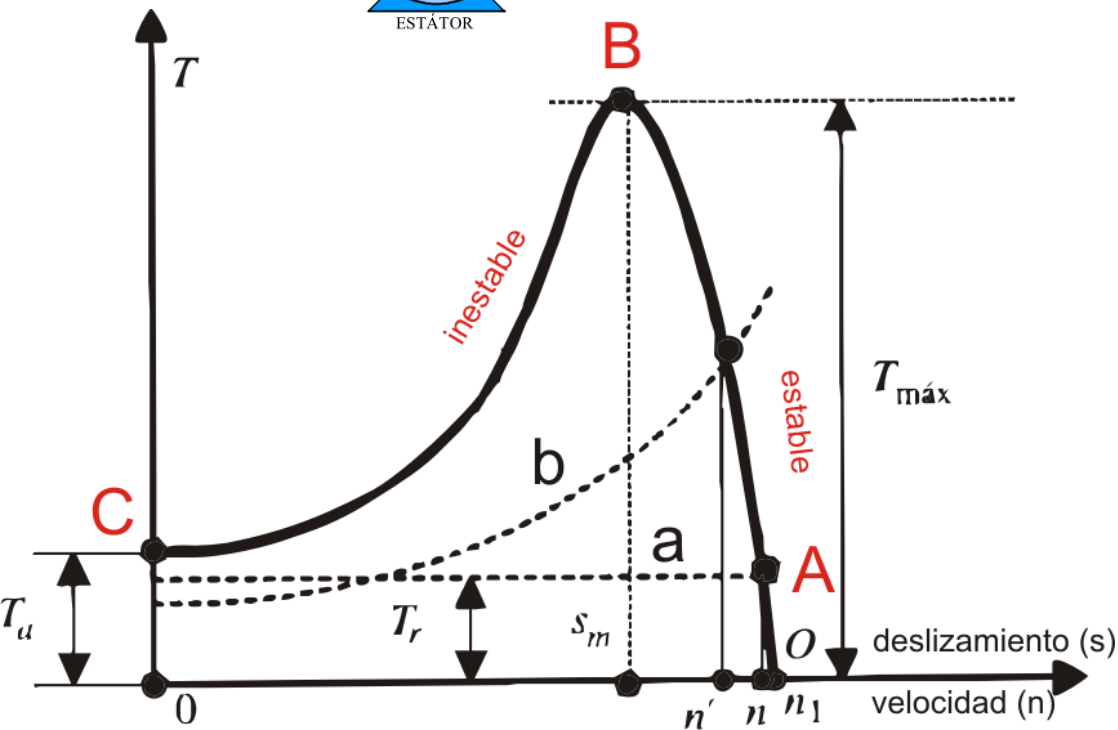
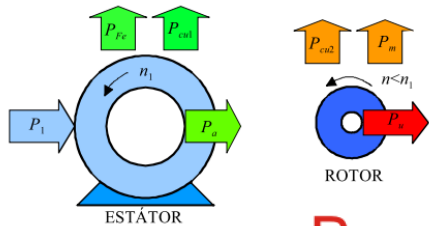
- El rendimiento del motor

$$\eta = \frac{P_u}{P_1} = \frac{P_u}{P_u + P_m + P_{Cu2} + P_{Fe} + P_{Cu1}}$$

Tema I: MÁQUINA ASÍNCRONA

PAR DE ROTACIÓN

Par de rotación



La zona estable corresponde a la parte de la curva en la que se obtiene un aumento del par conforme el motor disminuye su velocidad
 En la zona estable la velocidad disminuye muy poco con el par y por ello se puede decir que estas máquinas giran a una velocidad asíncrona prácticamente constante.

Punto O. Funcionamiento en sincronismo: $s=0$
 $\rightarrow T=0$ (imposible físicamente). La máquina a esta velocidad no podría ni tan siquiera vencer los pares resistentes de rozamiento.

Punto A. Régimen asignado o nominal: $s=s_n$
 $\rightarrow T=T_n$ se produce para s entre 3% y 8%

Punto B. Funcionamiento con par máximo: $s=s_m$
 $\rightarrow T=T_m$ se produce para s entre 15% y 30%

Punto C. Régimen de arranque: $s=1$
 $\rightarrow T=T_a$ la velocidad es cero, y par es de arranque.

$$\text{Capacidad de sobrecarga} = \frac{T_{\max}}{T_n} = \frac{\text{Par max}}{\text{Par nominal}}$$

$$\frac{T_a}{T_n} = \frac{\text{Par arranque}}{\text{Par nominal}}$$

$$1.8 \leq \frac{T_{\max}}{T_n} \leq 2.7$$

$$1.2 \leq \frac{T_a}{T_n} \leq 2$$

Par de rotación

El comportamiento de un motor asíncrono cuando pone en movimiento una carga mecánica en el eje depende de la relación del par resistente ofrecido por la carga y la velocidad de rotación. Las cargas se pueden clasificar en dos grupos:

✓ **Cargas con par resistente constante, independiente de la velocidad.**

Este par resistente lo poseen las grúas, los ascensores, los montacargas, las cintas transportadoras, etc.

✓ **Cargas con par resistente creciente con la velocidad.**

Generalmente son mecanismos en los que el par resistente es función del cuadrado de la velocidad. Ej. Bombas centrífugas, ventiladores, hélices, etc.

Si el par motor, T , es superior que el par resistente, T_r , hará que el motor se acelere. La aceleración continuará hasta que ambos pares se hagan iguales y en este momento la máquina habrá adquirido su velocidad de régimen, estado de equilibrio.

Si el sistema motor-carga ha alcanzado el equilibrio y ahora aumenta el par resistente se produce una reaceleración del rotor. El nuevo equilibrio se restablecerá para una velocidad menor a la que se vuelve a cumplir la igualdad de pares motor y resistente.

Si el par resistente aumenta hasta B le corresponde al par máximo del motor, un posterior aumento de la carga tendería a reducir la velocidad, pero al no estar compensado por un aumento del par electromagnético desarrollado por el motor, la máquina acabará parándose.

Tema I: MÁQUINA ASÍNCRONA

ARRANQUE

Arranque

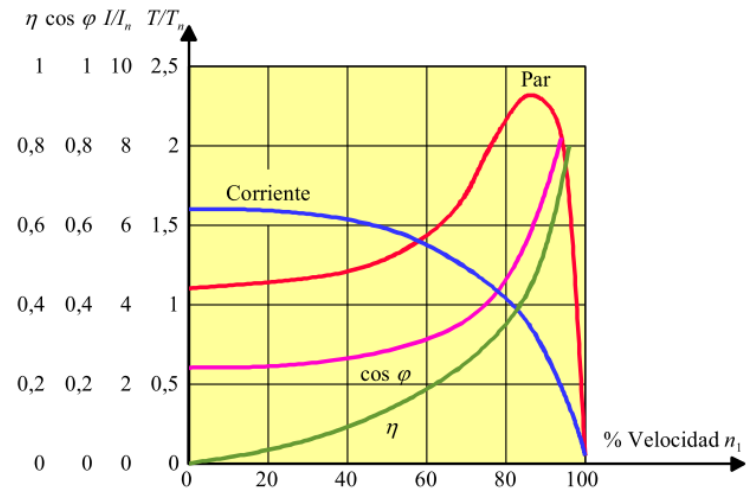
Se denomina arranque al proceso de puesta en marcha de una máquina eléctrica.

El proceso de arranque va acompañado de un consumo elevado de corriente, la $R'_c=0$ en $t=0$ pues $s=1$, y el motor ofrece una baja impedancia.

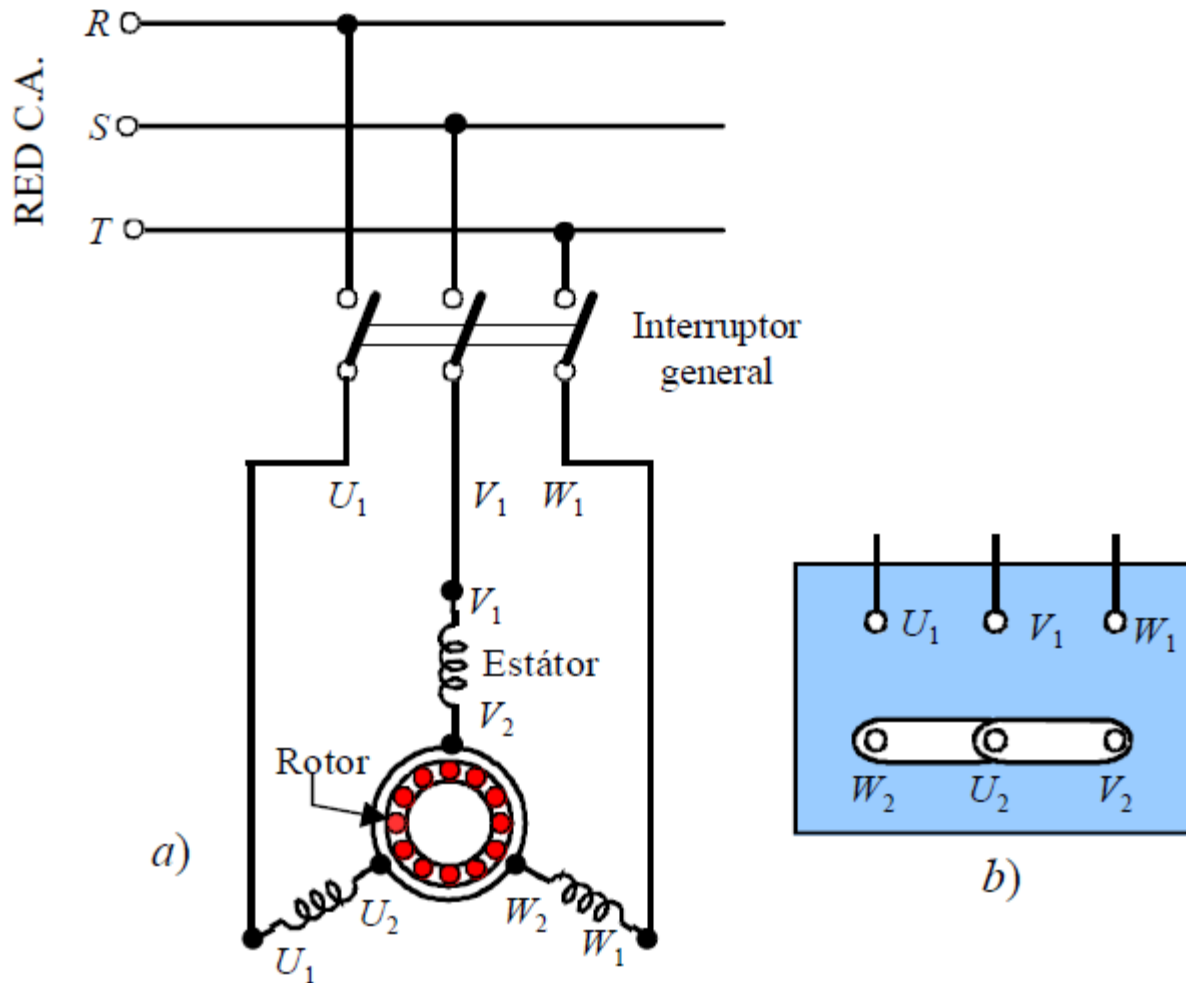
En España el RBT (Real Decreto 842/2002, 2 de agosto) en su instrucción ITC-BT-47 fija los límites de la relación corriente de arranque/corriente de plena carga para motores de c.a.

Potencia asignada del motor	$I_{\text{arranque}}/I_{\text{plena carga}}$
0.75 – 1.5 Kw	4.5
1.5 – 5.0 Kw	3.0
5.0 – 15.0 Kw	2.0
> 15.0 Kw	1.5

Para reducir las corrientes de arranque se emplean métodos especiales de arranque

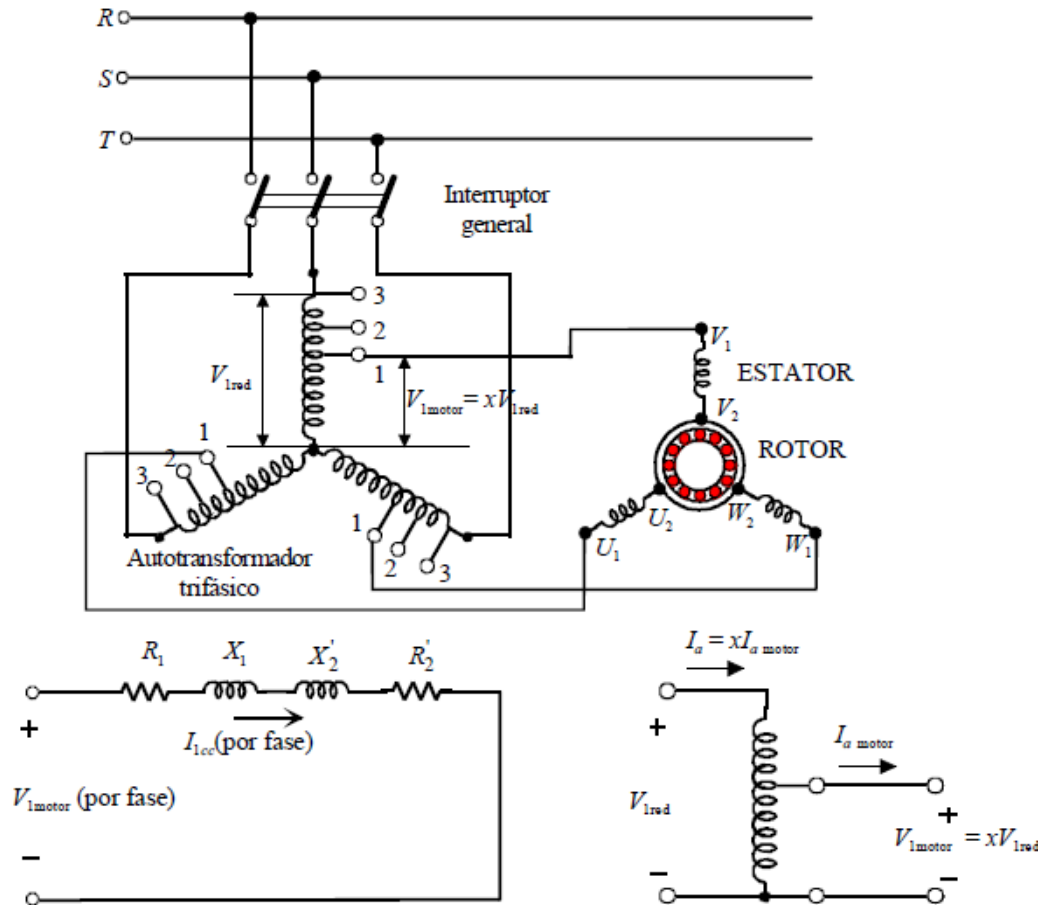


Arranque directo



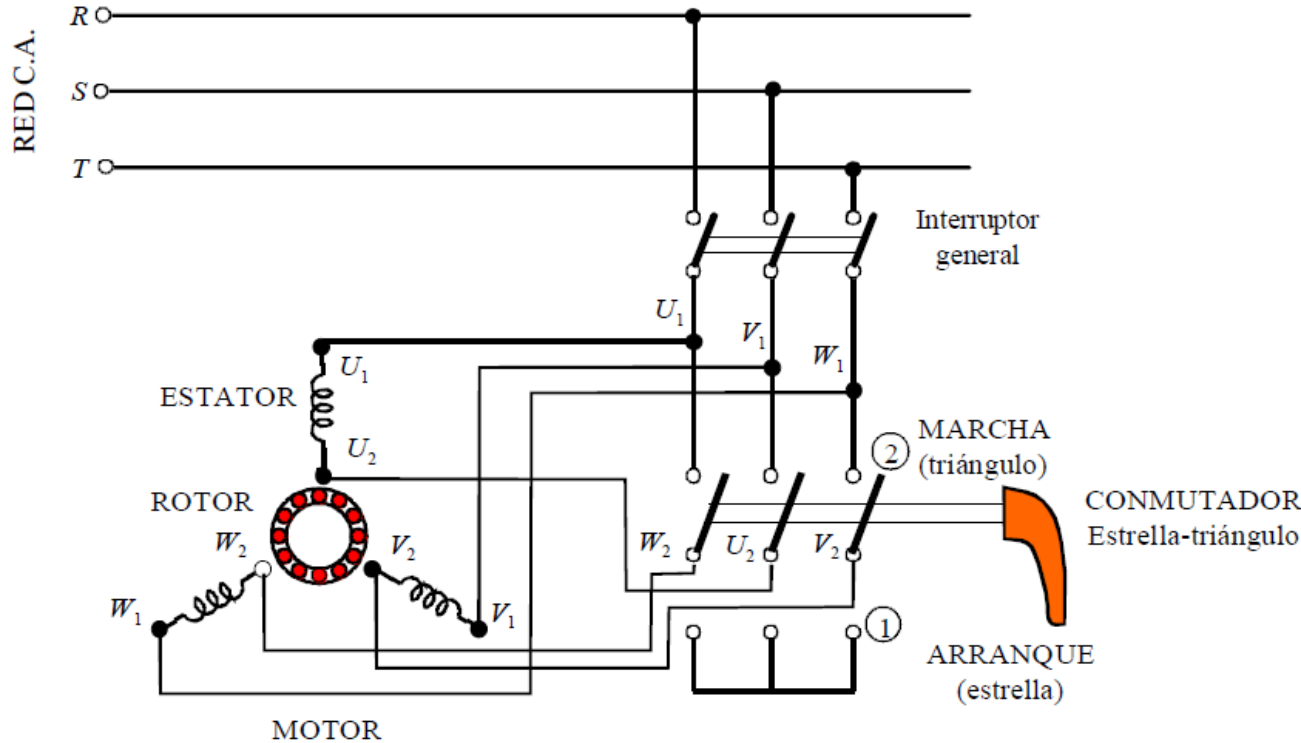
- Se emplea en los motores de pequeña potencia (<5 Kw)
- Esquema eléctrico del arranque directo en configuración estrella

Arranque por autotransformador



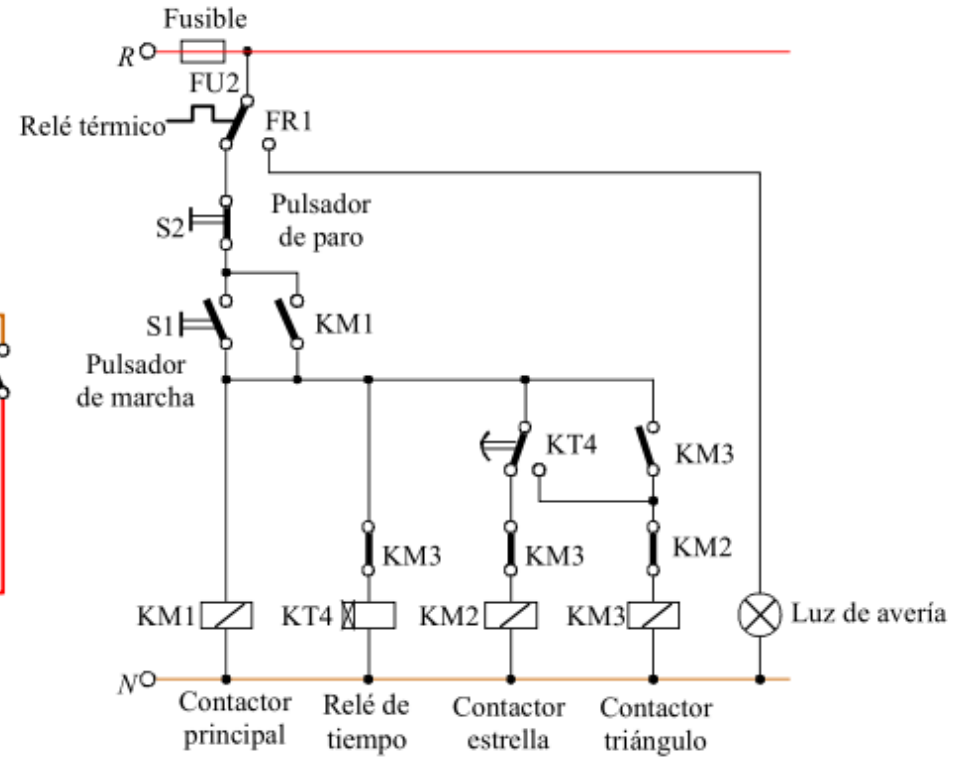
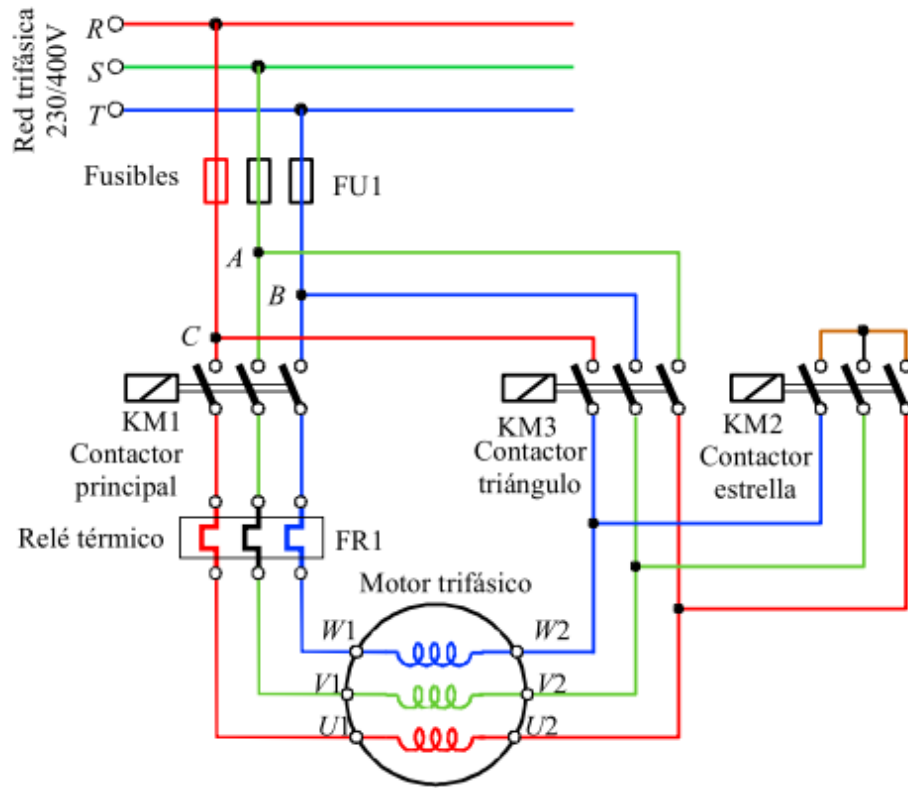
Consiste en intercalar un autotransformador entre la red y el motor, de tal forma que la tensión aplicada en el arranque sea sólo una fracción de la asignada.

Arranque con conmutación estrella-triángulo

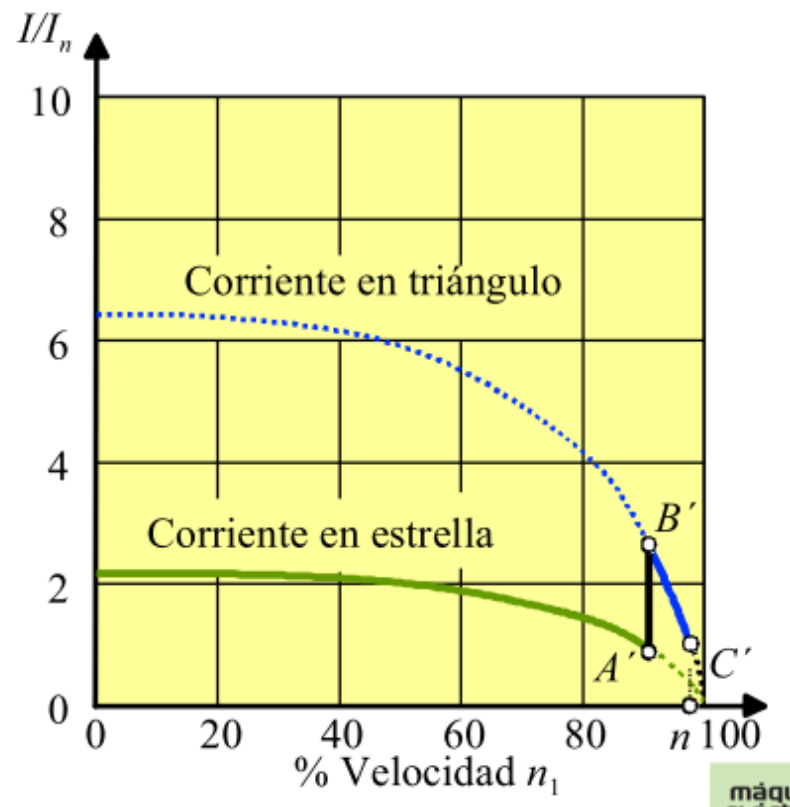
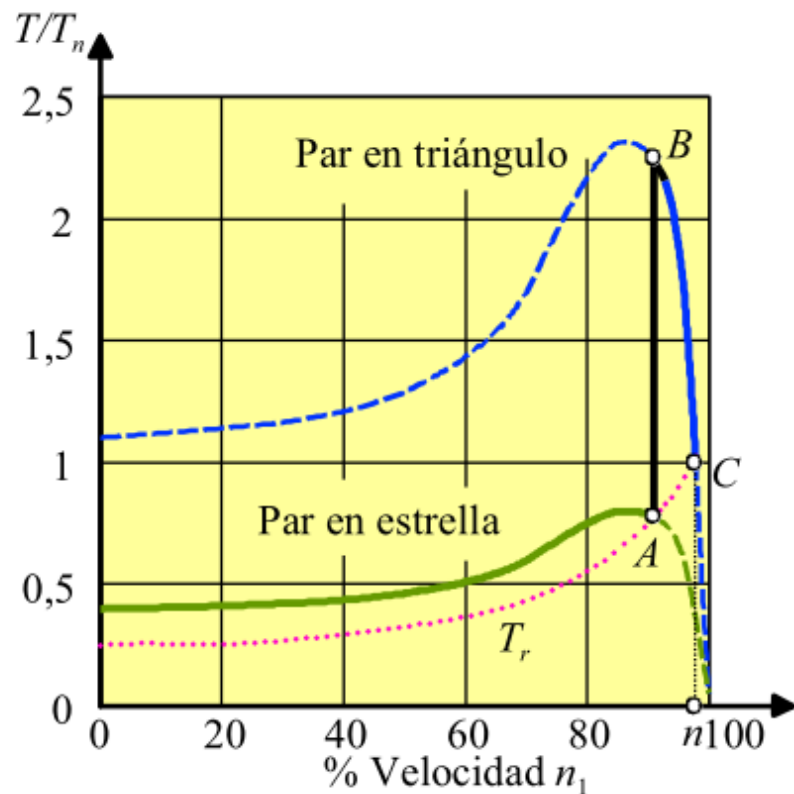


Es sólo aplicable en aquellos motores que están preparados para funcionar en triángulo con la tensión de la red. La máquina se conecta en Y en el arranque y se pone después en Δ

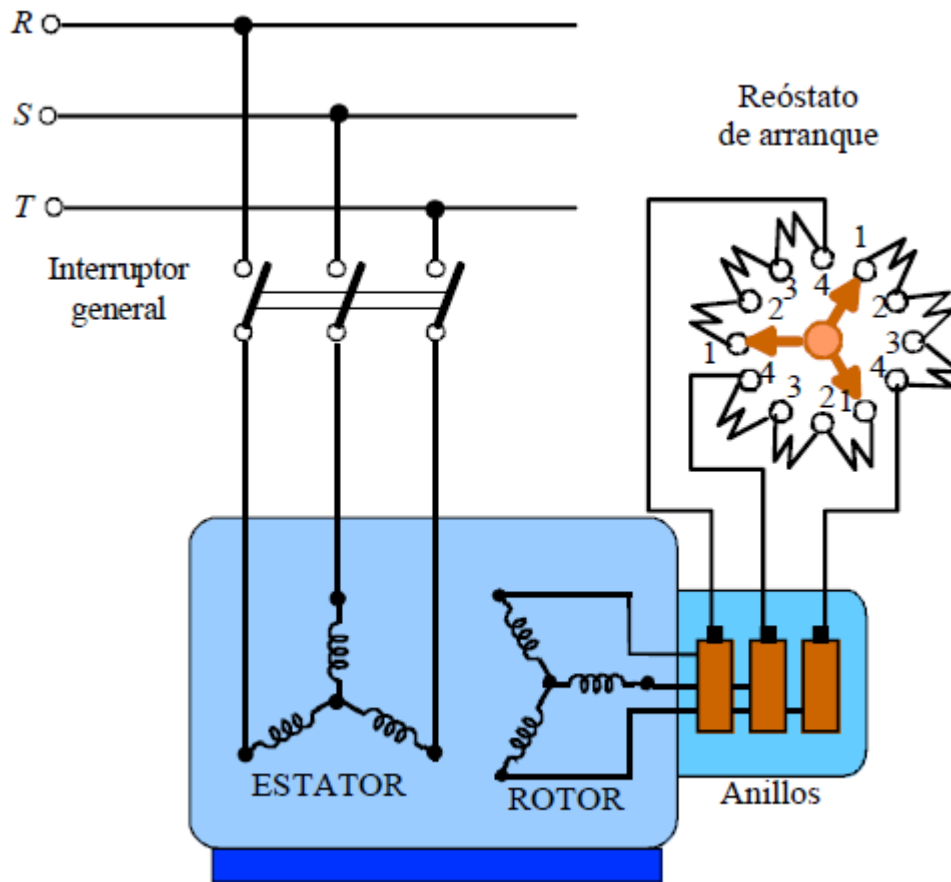
Arranque con conmutación estrella-triángulo



Arranque con conmutación estrella-triángulo

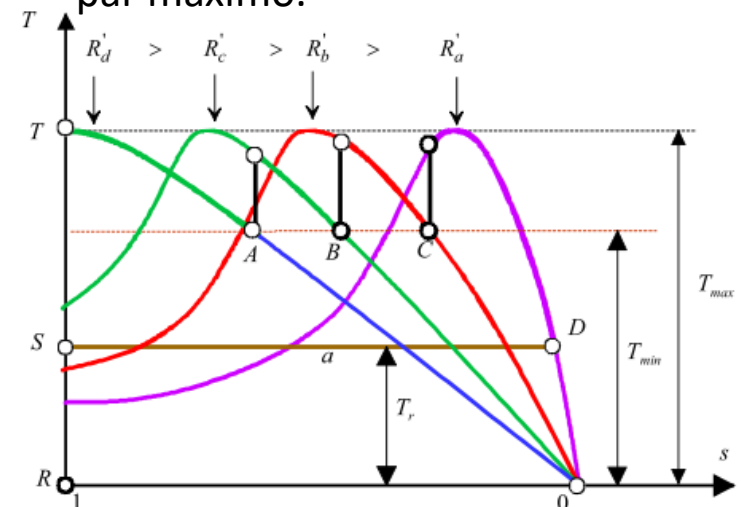


Arranque de los motores de rotor bobinado



Se puede reducir la corriente de arranque introduciendo una resistencia adicional a cada una de las fases del rotor, esto se hace con un reóstato trifásico.

La introducción de la resistencia en el rotor modifica las curvas, $T=f(s)$ desplazando el par máximo a valores mayores de deslizamiento, sin modificar el par máximo.



Motor de doble jaula de ardilla

Esta configuración utiliza el fenómeno de desplazamiento de la corriente en el devanado del rotor para mejorar las propiedades de arranque del motor.

El rotor está constituido por dos jaulas situadas en la misma ranura.

La jaula externa tiene una menor sección

Ambas jaulas están separadas entre sí por medio de una rendija delgada

La misión de la rendija es aumentar los flujos de dispersión de la jaula interior.

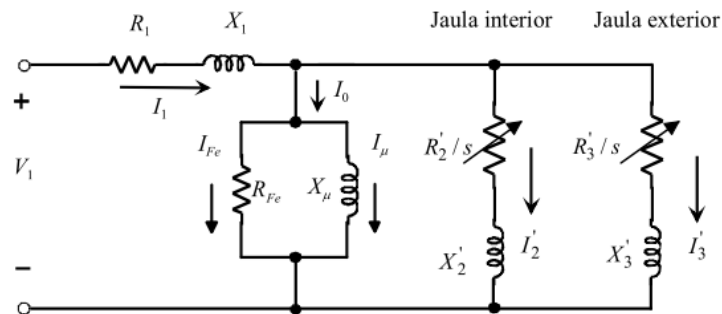
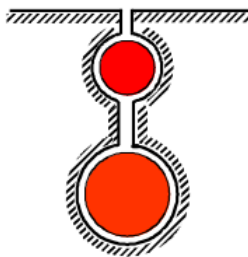
- La jaula externa tiene alta resistencia y baja reactancia
- La jaula interna tiene baja resistencia y gran reactancia

Las jaulas están unidas por los anillos o posee un solo anillo. Por tanto, la corriente retórica se distribuye entre cada jaula dependiendo de sus impedancias.

Funcionamiento del rotor:

En el arranque la frecuencia del rotor $f_2=f_1$ (estator). Por lo tanto, las reactancias son superiores a las resistencias. Esto hace que la corriente fluya en su mayor parte por la jaula que presenta menor resistencia, LA EXTERIOR.

A velocidades nominales la frecuencia retórica es muy pequeña. Por lo que las resistencias predominan frente a las reactancias, y de este modo la mayor parte de la corriente circula por la jaula interior, que tiene menor resistencia.



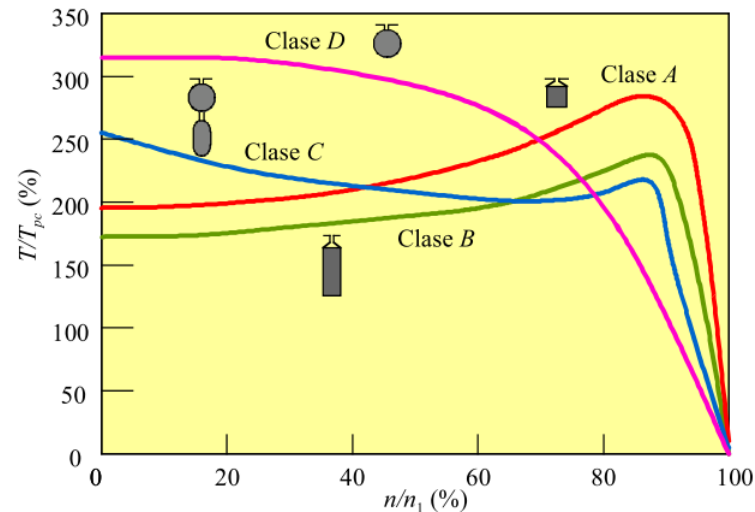
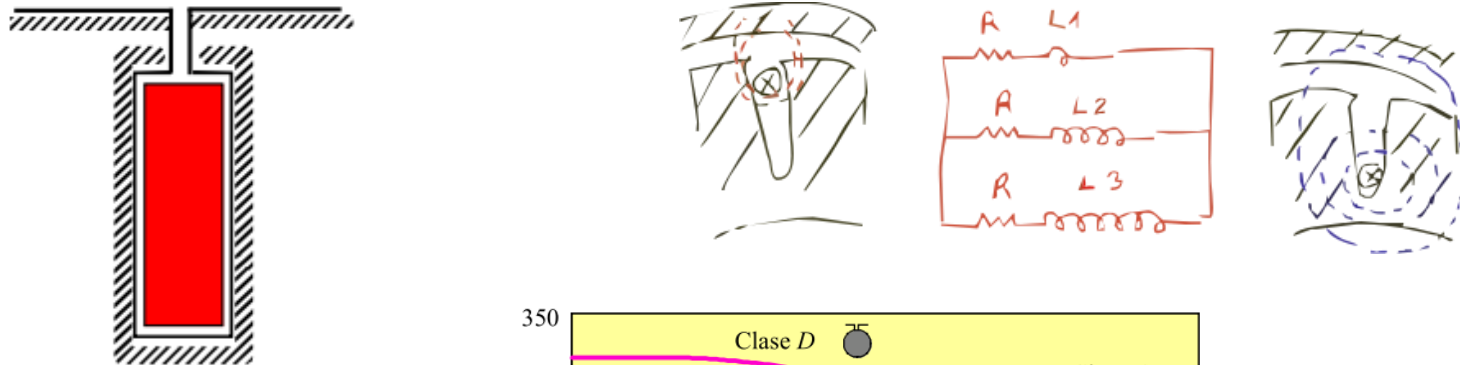
Motor de doble jaula de ardilla

Otra variedad:

Para conseguir un alto par de arranque hay que dotar al rotor de una simple jaula con ranuras profundas en las que se introducen conductores rectangulares o trapezoidales.

El cambio de resistencia se debe a la impedancia de dispersión.

En el arranque la frecuencia en el rotor es alta y la corriente circula por la parte externa de la ranura y a velocidades nominales circula por casi toda la barra por lo que la resistencia es menor



Tema I: MÁQUINA ASÍNCRONA

REGULACIÓN DE VELOCIDAD

Regulación de velocidad

Los principios generales que pueden aplicarse para controlar la velocidad de los motores asíncronos:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \Rightarrow n = n_1(1 - s) = \frac{60f_1}{p}(1 - s)$$

Por tanto la velocidad del rotor, n , depende del deslizamiento, la frecuencia y del número de pares de polos.

- Regulación por variación del número de polos
- Regulación por variación del deslizamiento
- Regulación por variación en la frecuencia

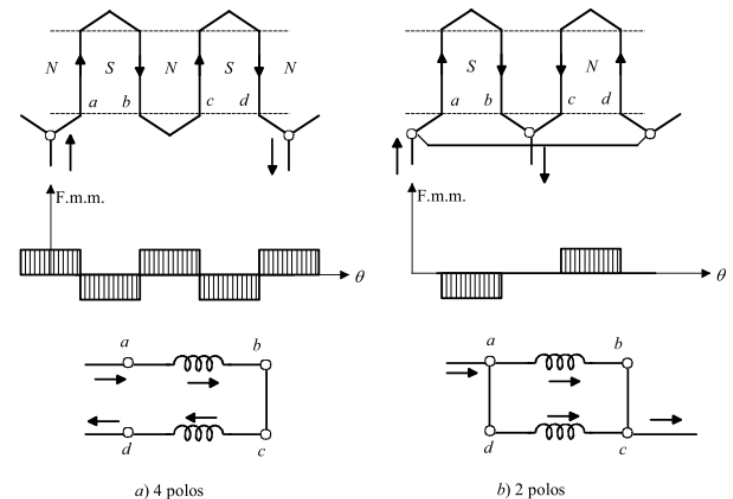
Regulación por variación del número de polos

Variando el número de polos del estator, cambia la velocidad del campo giratorio y por tanto la velocidad de rotación del motor.

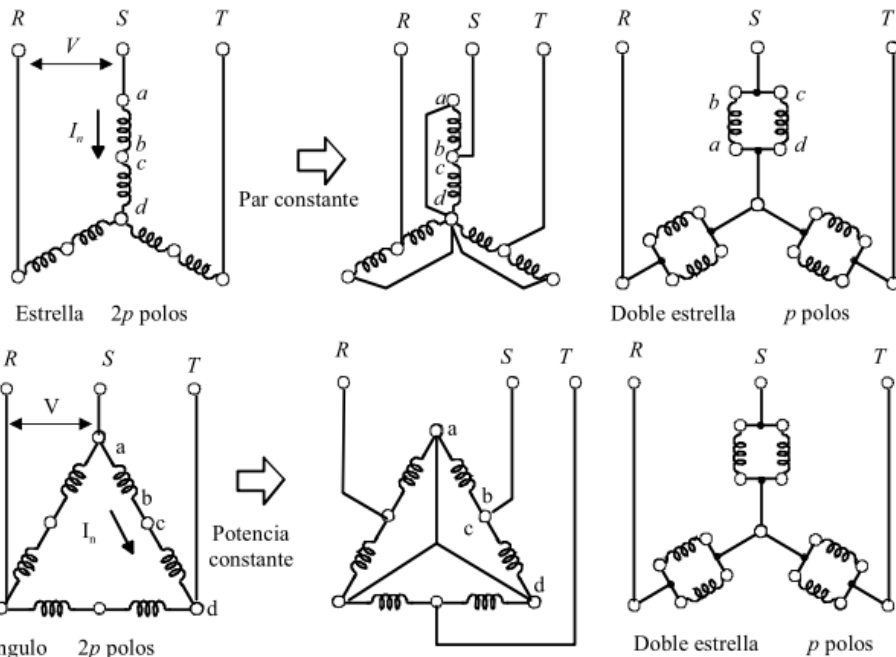
Se utiliza en general dos combinaciones diferentes, dando dos escalones de velocidad en relación 2:1

Para que el funcionamiento sea posible es preciso que el rotor sea de jaula de ardilla, ya que se adapta automáticamente por inducción su número de polos al del estator.

Estos motores son motores de conexión Dahlander.



Conexión Dahlander



El cambio de estrella a doble estrella se emplea en los accionamientos en los que el cambio de velocidad se hace con cargas que trabajan a par constante. Para demostrar esta afirmación deben compararse los dos esquemas en el supuesto de que la máquina trabaje en ambos casos con idéntico factor de potencia y las mismas corrientes en las bobinas. Para la estrella se cumple:

$$P_\lambda = \sqrt{3}VI_n \cos \varphi$$

$$P_{\lambda\lambda} = \sqrt{3}V2I_n \cos \varphi = 2P_\lambda$$

Como la velocidad es el doble

$$n_\lambda = \frac{n_{\lambda\lambda}}{2} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} T_\lambda \propto \frac{P_\lambda}{n_\lambda} \\ T_{\lambda\lambda} \propto \frac{P_{\lambda\lambda}}{n_{\lambda\lambda}} = \frac{2P_\lambda}{2n_\lambda} \end{array} \right\} \Rightarrow T_\lambda = T_{\lambda\lambda}$$

El cambio de triángulo a doble estrella se emplea en aplicaciones en que se conserva la potencia.

$$P_\Delta = \sqrt{3}V(\sqrt{3}I_n) \cos \varphi = 3VI_n \cos \varphi$$

$$P_{\lambda\lambda} = \sqrt{3}V2I_n \cos \varphi = \frac{2}{\sqrt{3}}P_\Delta = 1.155P_\Delta \approx P_\Delta$$

$$n_\Delta = \frac{n_{\lambda\lambda}}{2} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} T_\Delta \propto \frac{P_\Delta}{n_\Delta} \\ T_{\lambda\lambda} \propto \frac{P_{\lambda\lambda}}{n_{\lambda\lambda}} \approx \frac{P_\Delta}{2n_\Delta} \end{array} \right\} \Rightarrow T_{\lambda\lambda} = \frac{T_\Delta}{2}$$

La regulación de velocidad no resulta suave, sino escalonada, pero el procedimiento es económico, resultando unas características mecánicas más duras o rígidas. Ejemplos en ventiladores, extractores de polvo, ascensores, etc.

Regulación por variación del deslizamiento

La variación del deslizamiento se puede realizar controlando la tensión aplicada al rotor (pero afecta al par) o variando la resistencia del motor (pero produce grandes pérdidas por efecto Joule).

Existen otros sistemas basados en la regulación de la potencia de deslizamiento sP_a de la máquina (se devuelve la potencia sP_a a la red, ejemplos sistema Kramer, Scherbius, Scharage).

Regulación por variación en la frecuencia

La frecuencia se puede variar usando dispositivos como el SRC (rectificadores controlados de silicio o tiristores).

Mediante esta regulación se debe mantener el flujo constante para que el par se conserve por lo que debe variar V_1 con la frecuencia f_1 para mantener el flujo constante

$$\begin{aligned} \text{si } V_1 \approx E_1 &\Rightarrow V_1 = 4.44K_1f_1N_1\phi_m \\ \Rightarrow \phi_m = cte &\text{ si } \frac{V_1}{f_1} = cte \end{aligned}$$

Tema I: MÁQUINA ASÍNCRONA

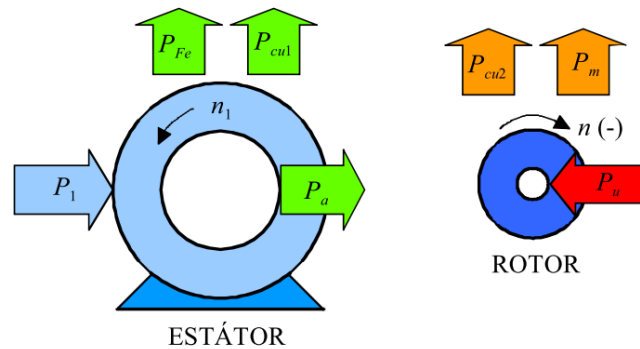
FRENADO

Frenado

Frenado por inversión del sentido de giro del campo del estátor

La inversión de la secuencia de las fases puede utilizarse para la parada rápida del motor pero, en este caso se debe cortar la alimentación del motor cuando se llega a la velocidad nula del motor. En esta aplicación, será preciso instalar un detector de la inversión del sentido de giro que dispara el contactor de alimentación cuando se alcanza la parada del motor.

Resulta interesante destacar que mientras en el modo regenerativo, el deslizamiento era negativo tolerando que la energía mecánica procedente de la carga (por ejemplo, tren que desciende una pendiente) se convirtiera en eléctrica y pasara a la red, en la inversión del campo del estator, en cambio, se trata de un proceso puramente disipativo, en el cual todas la energía cinética de rotación, almacenada en las partes en movimiento, se pierde y nos aparece en forma de calor que ha de ser disipado eficazmente, para no sobre-calentar el motor.



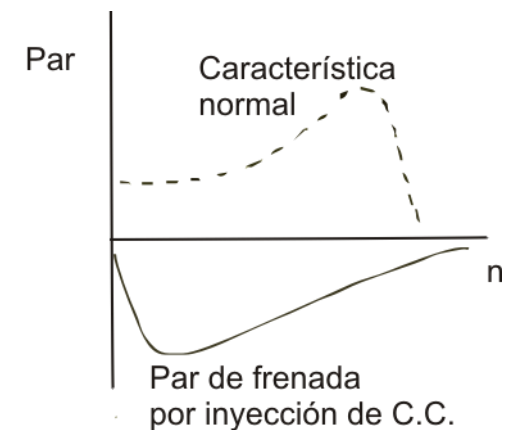
Frenado

Frenado por inyección de corriente continua.

Por esta razón, el método más utilizado para frenar eléctricamente un motor, no es el anterior sino el de inyectar una corriente continua en el estator, a través de dos de sus terminales. La corriente continua se obtiene a partir de un rectificador, alimentado por un transformador que nos da una baja tensión y una corriente relativamente alta.

Como la velocidad del campo $n=60f/p$ es proporcional a la frecuencia de la tensión de la red. Por otro lado, la corriente continua tiene una frecuencia CERO, el campo que genera la corriente inyectada, que se superpone a las corrientes alternas que estén circulando en cada instante, será estacionario. También hemos visto que el rotor trata de girar a la misma velocidad que el campo del estator. Luego, si el campo es estacionario y el rotor está girando aquel ejercerá un par de frenado que tiende a inmovilizar el motor. Una curva típica de par de frenado-velocidad que ejerce el campo continuo se ha dibujado en la siguiente figura, y se desprende que el par de frenado cae a cero cuando el rotor se para.

Este resultado está de acuerdo con lo que cabía esperar, ya que solo puede haber corrientes inducidas en el rotor y por tanto, existencia de par, si los conductores del rotor están cortando líneas de flujo. Lo mismo que en frenado por contracorriente, el frenado por inyección de corriente continua es un proceso disipativo en el que toda la energía cinética se convierte en calor en el interior del motor, calor que ha de ser evacuado convenientemente.



Tema I: MÁQUINA ASÍNCRONA

GENERADOR ASÍNCRONO

Generador asíncrono

Este tipo de generadores no está muy extendido; aunque de todas formas, se tiene una gran experiencia en tratar con máquinas asíncronas. La máquina asíncrona fue inicialmente diseñada como motor eléctrico. De hecho, una tercera parte del consumo mundial de electricidad es utilizado para hacer funcionar motores de inducción que muevan maquinaria en fábricas, bombas, ventiladores, compresores, elevadores, y otras aplicaciones donde se necesita convertir energía eléctrica en energía mecánica.

En una máquina asíncrona, para deslizamientos negativos, o sea, cuando el rotor gira en el mismo sentido, pero a más velocidad que lo hace el campo estatórico, el par motor, al ser negativo, se opone al giro y se mantendrá solamente si se aplica al eje un par que venza la acción resistente de aquel. En esta zona de trabajo la máquina se comporta como un generador de inducción que transforma la energía mecánica que procede del eje del motor, en energía eléctrica que se inyecta en la red.

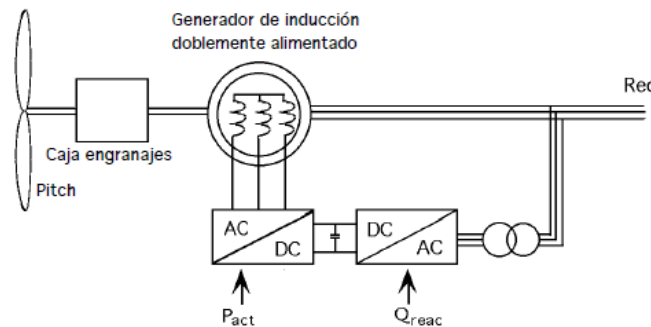
La primera consideración que debe destacarse de esta forma de trabajo es que debe quedarnos claro es que la máquina sólo genera energía eléctrica si está conectada a una red de alterna.

Si desconectamos un motor de inducción y tratamos de que genere simplemente haciendo girar su rotor, no obtendremos ninguna salida porque no se dispone del campo giratorio del estator ni del flujo correspondiente a este campo que sólo aparece cuando el motor toma la corriente magnetizante que precisa de la red de alterna.

Generador asíncrono

Desde hace unos años se han puesto a punto generadores de inducción auto-excitados, en los cuales esta corriente magnetizante se obtiene a partir de una batería de condensadores puesta en paralelo con la salida del estator que ahora no está conectada a red alguna sino a la carga que atiende.

Los generadores de inducción pueden tener interés cuando se quiere tener una cierta flexibilidad en la velocidad de giro a la que generamos la energía eléctrica ya que la frecuencia de las tensiones generadas viene fijada por la frecuencia de la red y no por la velocidad a la que gira el eje del generador. Se ha utilizado con éxito en GENERADORES EÓLICOS.



Campo de velocidades limitado entre -50% a + 30% alrededor de la velocidad sincrónica

Convertidor de energía a escala reducida (bajas pérdidas de energía) (bajo precio)

Control completo de energía activa P_{act} y de reactiva Q_{react} ; Necesita colector de anillos y caja de engranajes

Aerogenerador (Tipo V), con generador de inducción doblemente alimentado, convertidor para el rotor bobinado, caja multiplicadora y compensador de reactiva

Ver [Danish Wind Industry Association](#)

Generador asíncrono

Ejemplos de aerogeneradores con generadores asíncronos, utilizados en el ITER:

Made AE-46 Aerogenerador

Fabricante: [Made](#)
Diametro (m): 46
Altura (m): 43,5
Potencia (kW): 660
Rotor: de eje horizontal
Número de palas: 3
Paso de palas: fijo
Generador: asíncrono

Made AE-20

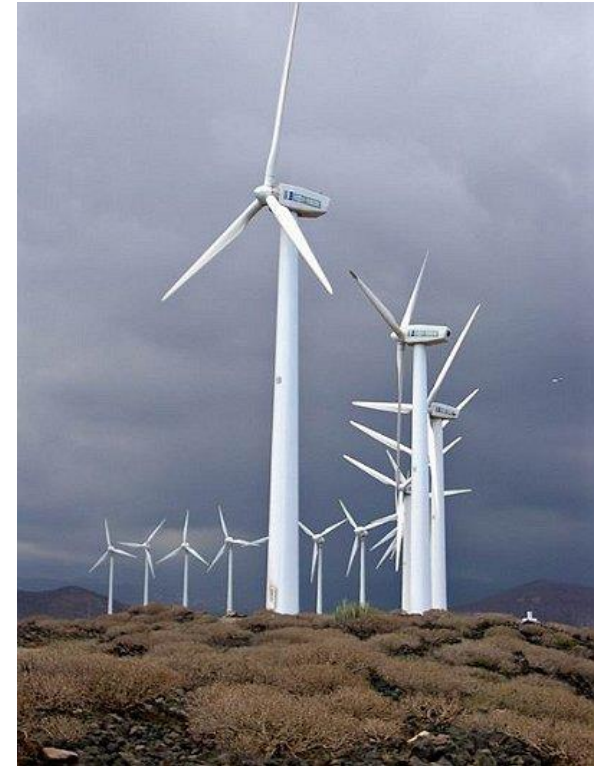
Fabricante: [Made](#)
Diametro (m): 20
Altura (m): 30
Potencia (kW): 150
Rotor: de eje horizontal
Energía generada/año (MWh): 2132
Paso de pala: fijo
Número de palas: 3
Generador: asíncrono

Ecotecnia (20-150)

Fabricante: [Ecotecnia](#)
Diametro (m): 20
Altura (m): 30
Potencia (kW): 150
Rotor: de eje horizontal
Energía generada/año (MWh): 1920
Número de palas: 3
Paso de pala: fijo
Generador: asíncrono

Vestas V-25

Fabricante: [Vestas](#)
Diametro (m): 25
Altura (m): 31
Potencia (kW): 200
Rotor: de eje horizontal
Energía generada/año (MWh): 2635,6
Número de palas: 3
Paso de pala: variable
Generator: asíncrono



Instituto Tecnológico y de Energías Renovables S.A.
Pol. Ind. de Granadilla, s/n C.P. 38600 - Granadilla de Abona
- Santa Cruz de Tenerife - España

Generador asíncrono

En otro ejemplo, cabe considerar un motor de inducción que acciona una grúa a través de un reductor de velocidad y supongamos que el gancho, sin carga se quiere que descienda. Debido al rozamiento no bajará por sí mismo, incluso después de liberado el freno de zapatas. Por tanto, al pulsar el botón de bajada se libera el freno mecánico y se aplica tensión al motor con lo que el gancho empieza a bajar y llega un momento en que el peso del gancho más el cable suspendido nos da un par mayor que el par de rozamiento por lo que se precisa un cierto par que contrarreste este efecto que podría llevarnos a un descenso incontrolado del gancho. Este par de compensación aparecerá de forma automática en cuanto supongamos que se alcanza la velocidad síncrona pues al superar ésta el motor ofrecerá resistencia (caso de generador) a seguir aumentando su velocidad. Luego ésta se ajustará a un valor ligeramente por encima de la velocidad síncrona.

Tema I: MÁQUINA ASÍNCRONA

MOTOR DE INDUCCIÓN MONOFÁSICO

Motor de Inducción monofásico

Formado por:

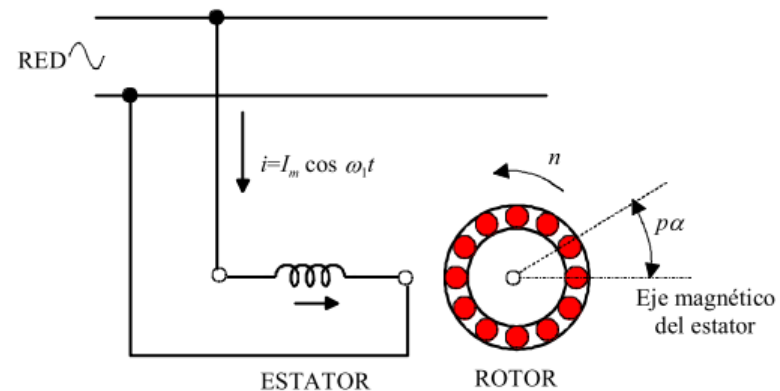
- rotor en jaula de ardilla.
- un estator con un devanado alimentado con corriente alterna monofásica.

Al introducir una corriente interna en el devanado del estator se produce una f.m.m. en el entrehierro, distribuida senoidalmente en el espacio y de carácter pulsatorio.

$$F(\alpha, t) = F_m \cos \omega_1 t \cos p\alpha$$

$$\alpha = w_m t \quad \text{grados geométricos}$$

$$\theta = p\alpha \quad \text{grados magnéticos}$$



La f.m.m. produce un campo magnético, el cual induce corrientes en el rotor.

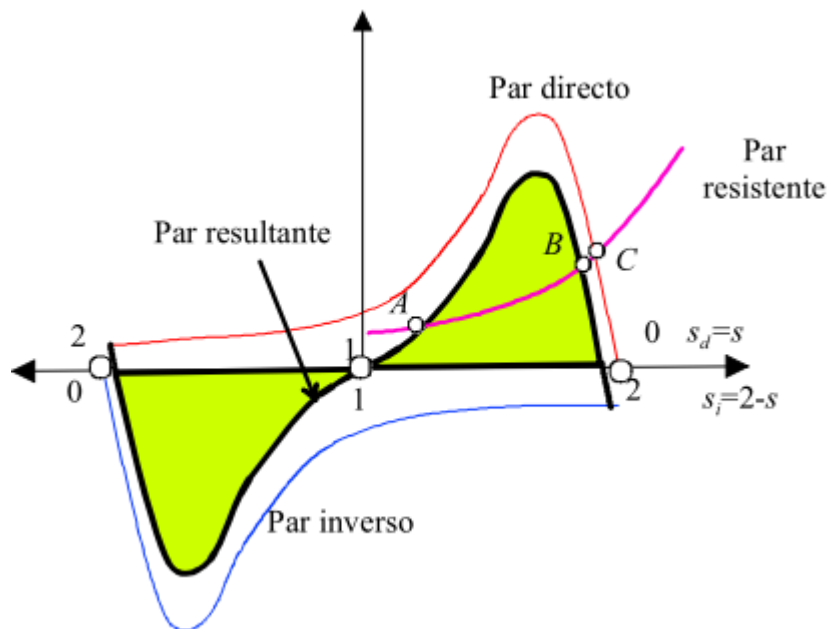
Según el teorema de Leblanc

$$F(\alpha, t) = \frac{1}{2} F_m [\cos(\omega_1 t + p\alpha) + \cos(\omega_1 t - p\alpha)]$$

Motor de Inducción monofásico

Según el teorema de Leblanc
$$F(\alpha, t) = \frac{1}{2} F_m [\cos(w_1 t + p\alpha) + \cos(w_1 t - p\alpha)]$$

Cada campo giratorio dará lugar a una característica par-deslizamiento análogo a la de los motores trifásicos.



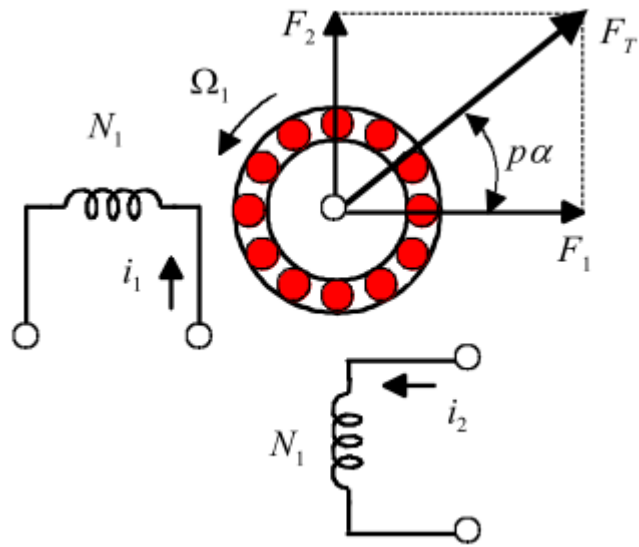
- En el arranque $s_d=s_i=1$ y $PAR=0$ por tanto el motor no puede despegar.

- Pero si por algún procedimiento se ayudara a girar el motor en un sentido, aparecerá par inmediatamente, que si es superior al par resistente pondrá en funcionamiento la máquina.

Si en el motor trifásico se desconecta una fase, se tendría un funcionamiento como el del monofásico, no hay par de arranque y la potencia y par máximos se reducen, y si actuara la carga sobre el eje se produce un calentamiento en los devanados

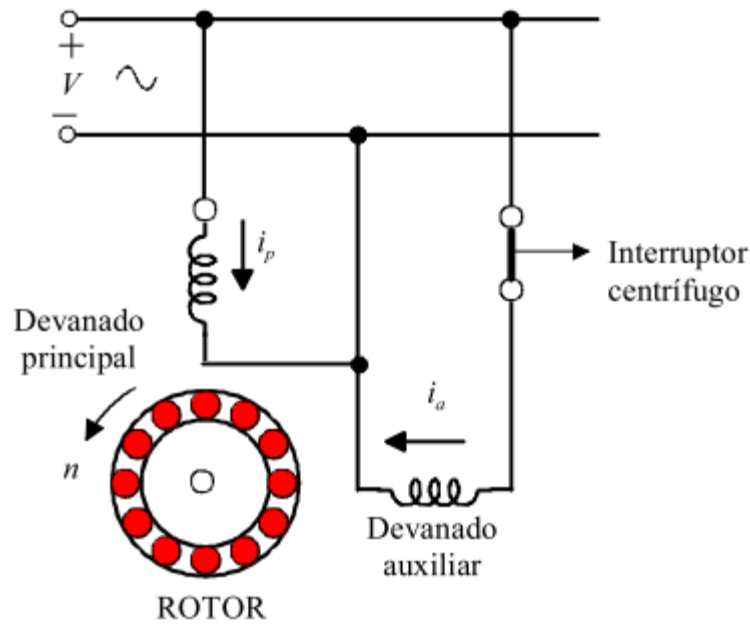
Arranque de los motores de inducción monofásicos

- El motor monofásico no tiene par de arranque y no puede por tanto iniciar la marcha por si mismo.
- Si se acciona el rotor y se le impulsa en cualquier sentido, la máquina desarrolla entonces un par interno que acelera el rotor hasta conseguir la velocidad de régimen.
- Se puede hacer el arranque por procedimiento eléctrico, si existe un campo giratorio único en el momento del arranque. Según el teorema de Ferraris, el método más simple sería preparar un devanado bifásico: dos devanados estáticos desfasados 90° eléctricos en el espacio que llevan corrientes desfasadas 90° eléctricos en el tiempo.



Si las corrientes de alimentación de los devanados del estator son diferentes o tienen bobinados diferentes o las corrientes tienen un desfase distinto a 90° el lugar geométrico de la f.m.m. es una elipse.

Procedimientos de arranque: Motor de fase partida

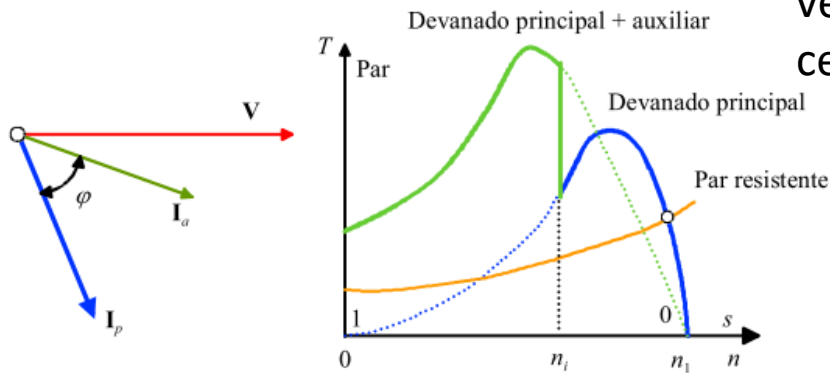


En el estator tiene 2 devanados desfasados 90° eléctricos en el espacio.

Devanado principal, cubre $2/3$ de las ranuras, tiene una gran reactancia y baja resistencia

Devanado auxiliar, cubre $1/3$ tiene alta resistencia y baja reactancia (se hace con un hilo más fino)

En la práctica $\phi \approx 30^\circ$ y los arrollamientos están desfasados 90° en el espacio el campo giratorio es eléctrico ($I_a \neq I_p, \phi \neq 90^\circ$). Este campo produce el despegue del motor y cuando la velocidad sea del 70% nominal el interruptor centrífugo desconecta el devanado auxiliar.



Procedimientos de arranque: Motor con arranque por condensador

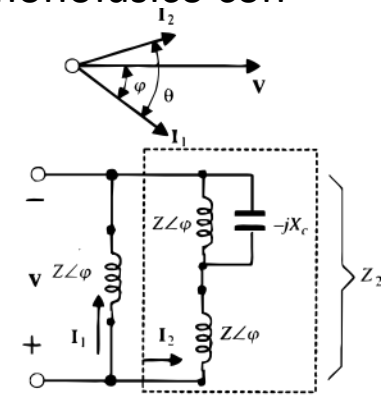
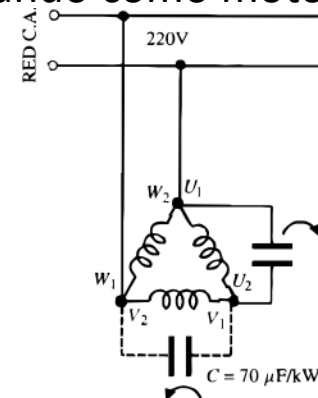
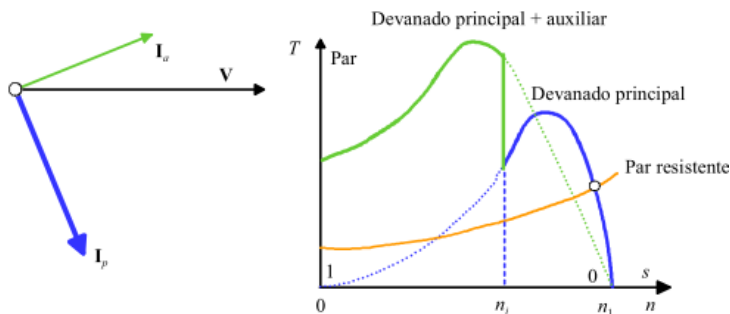
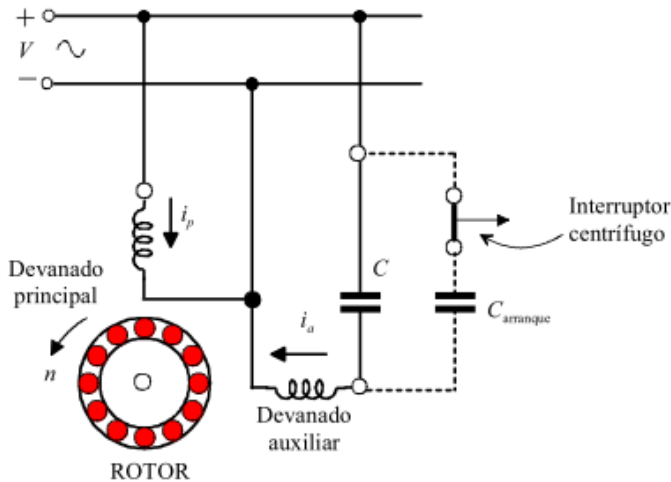


El devanado auxiliar lleva en serie un condensador y se consigue desfase en las corrientes de las bobinas casi de 90° .

Una vez arrancado se queda el condensador c que permite mejorar el f.d.p. del motor.

Este tipo de motores se emplean en compresores, bombas, algunos equipos de aire acondicionado, herramientas, etc.

Un motor trifásico se puede adoptar para trabajar en redes monofásicas empleando condensadores, es decir, funcionando como motor monofásico con condensador.

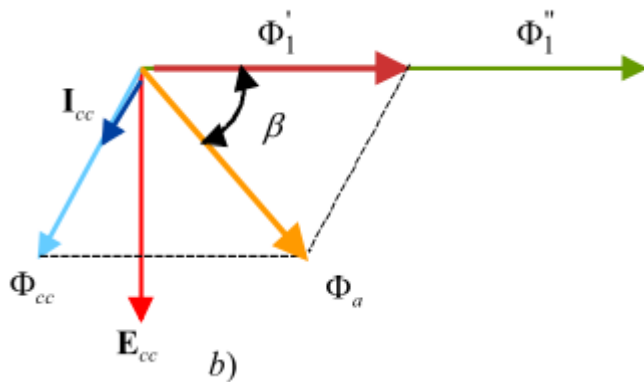
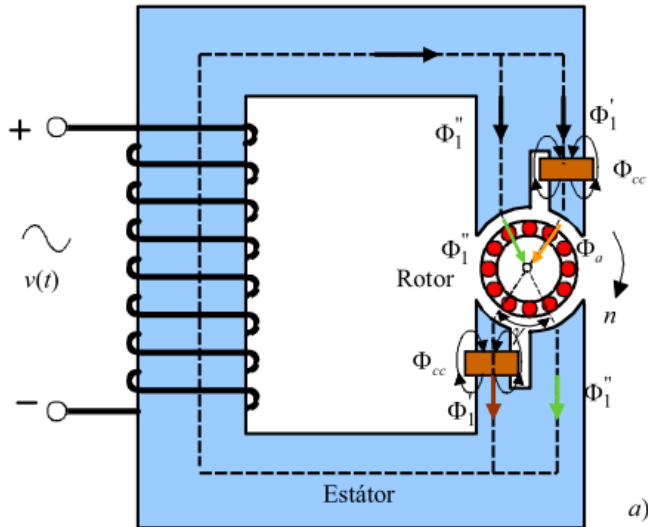


Procedimientos de arranque: Motor con espira de sombra

Es el modelo más sencillo y pequeño de los monofásicos.

Está formado por un estator de polos salientes que dispone de un devanado concentrado alimentado por una red monofásica y un rotor en forma de jaula de ardilla.

Parte de flujo principal del estator, Φ'_1 , atraviesa la espira de sombra induciendo una f.e.m., E_{cc} , que produce a su vez una corriente en retraso (por la reactancia) que produce un flujo Φ_{cc} que sumado a Φ'_1 da un flujo auxiliar Φ_a y como este y el flujo Φ''_1 , están desplazados se produce un campo giratorio y producirá un par de arranque.



Tema I: MÁQUINA ASÍNCRONA

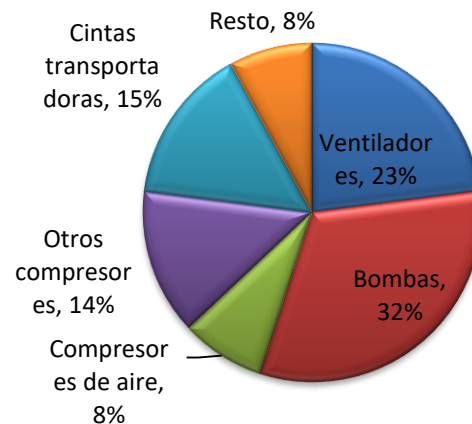
MOTORES DE ALTA EFICIENCIA

Motores de alta eficiencia

Los motores de alta eficiencia pueden proporcionar importantes ventajas, como ayudar a reducir los costes energéticos y a limitar las emisiones de carbono. En la UE, la introducción del programa europeo de clasificación de la eficiencia ha concentrado la atención en la eficiencia energética. El programa clasifica los motores en niveles de eficiencia EFF1 a EFF3, donde EFF1 es el nivel más alto. El programa ha tenido mucho éxito, ya que ha reducido el número de motores comerciales de baja eficiencia; muchos consideran la clasificación EFF1 no sólo como una señal de eficiencia, sino también como un distintivo general de calidad. Actualmente se está perfeccionando el programa para armonizar los métodos de verificación de eficiencia, de modo que sea más fácil comparar los motores de distintos fabricantes.

Diseñar y fabricar motores fiables, con buenas prestaciones de arranque y funcionamiento, implica conseguir un delicado equilibrio entre diversos factores: no sólo la eficiencia y los costes, sino también el diseño de cojinetes, ranuras y ventilador, el aumento de la temperatura, la vibración y el ruido. Sólo un equilibrio adecuado dará como resultado motores de alta calidad, eficientes y fiables, con peso óptimo y una larga vida útil.

En la siguiente figura se puede ver la distribución de consumo energético en los diferentes accionamientos.



Políticas energéticas

A nivel mundial existen diferentes tipos de normas aplicables a los motores, que dependen del país donde se comercialicen.

Bajo este potencial de ahorro y mejora del medio ambiente los diferentes países del mundo han desarrollado políticas energéticas para incentivar el uso de motores eléctricos de elevado rendimiento. Con intención de poder entender su evolución se presenta a continuación el modelo europeo y, comparativamente también, el modelo americano que fue uno de los pioneros.

Normativa sobre motores aplicables en cada país				
Normas	Entidad	País	Denominación	
NEMA	National Electrical Manufacturers Association	EE.UU.	NEMA MG1 Seguridad NEMA MG1 Eficiencia energética, valores mínimos	
CSA Standards	Canadian Standards Association	Canadá	C22.2 Nº 100-M1985 Seguridad C390-93 Eficiencia energética + ensayo, valores mínimos	
UL Standards	Underwriters Laboratories Inc.	EE.UU.	UL 1004 Seguridad	
IEEE Standards	Institute of Electrical	Internacional	IEEE112 B Método de ensayo	
IEC Standards	International Electrotechnical Commission	Internacional	IEC 60034-1 General IEC 60034-2 Método de ensayo	
CENELEC	European Committee for Electrotechnical	Unión Europea	EN 60034-1 General EN 60034-2 Método de ensayo	

Políticas energéticas sobre motores eficientes				
Título	Denominación	País	Fijación valores mínimos	Norma ensayo
Epact	Energy Policy Act	EE.UU.	Ley	NEMA MG1
EEAct	Energy Efficiency Act Energy Efficiency Regulations	Canadá	Ley	C390-93
EU Agreement	Acuerdo de los fabricantes europeos y la Dirección General de la Energía DG XVII	Unión Europea	Acuerdo voluntario	EN 60034-2 IEC-2

Políticas energéticas

En Estados Unidos el Departamento de Energía (DOE) promulgó la Ley EPact que obliga a partir del 24 de octubre de 1997 a que los motores que se comercialicen en este país sean según NEMA o Métricos y cumplan con un rendimiento mínimo dependiendo de la potencia y polaridad.

En estas leyes se establecen unos logotipos que indican qué normas cumple el motor.



C: el motor cumple las normas de Canadá CSA.

URUS: el motor cumple con la UL de EE.UU.

ENERGY: se cumple con los rendimientos mínimos indicados en la Energy Efficiency de la Ley EPact.

En Europa existe un acuerdo entre los fabricantes y la Dirección General de Energía, que establece a su vez unos logotipos que indican el rendimiento del motor.

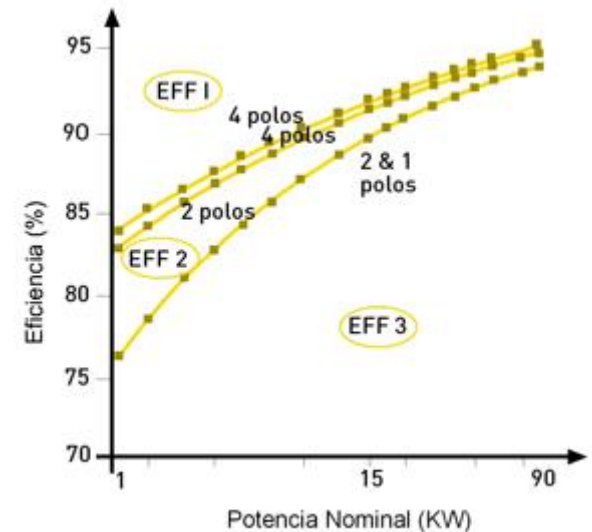


EFF1: motores de alto rendimiento.

EFF2: motores de rendimiento mejorado.

EFF3: motores de bajo rendimiento.

La distribución de las tres clases de rendimientos queda de la siguiente manera:



Diseño para la eficiencia y la fiabilidad

La clave para fabricar motores eficientes reduciendo al mínimo los costes totales durante la vida útil es garantizar que en cada etapa de diseño y fabricación alcance una alta calidad.

La eficiencia de un motor mide la conversión de la energía eléctrica en trabajo útil. La energía que se pierde se convierte en calor. Para aumentar la eficiencia es preciso reducir estas pérdidas. Las pérdidas de los motores se pueden clasificar en cinco categorías principales. Dos de éstas –las pérdidas en el hierro del núcleo y las pérdidas por resistencia aerodinámica y fricción– se clasifican como pérdidas no relacionadas con la carga, ya que permanecen constantes con independencia de la misma. Las pérdidas relacionadas con la carga, es decir, que varían con ella, son las pérdidas en el cobre del estator, las pérdidas en el rotor y las pérdidas de carga por dispersión. En todas estas pérdidas pueden influir diversas consideraciones de diseño y construcción, es decir, la calidad de los procesos de diseño y fabricación.

Las pérdidas en el hierro del núcleo se deben a la energía requerida para vencer la oposición del material del núcleo a la variación de los campos magnéticos. Los diseñadores pueden reducir estas pérdidas usando acero de mejor calidad y aumentando la longitud del núcleo, lo que reduce la densidad de flujo magnético.

Las pérdidas por resistencia aerodinámica y por fricción son causadas por la resistencia del aire y por el rozamiento de los cojinetes. En los motores de alta calidad, estas pérdidas se reducen seleccionando mejor los cojinetes y juntas y mejorando el diseño del flujo de aire y del ventilador. Éste ha de ser suficientemente grande para proporcionar una adecuada refrigeración, pero no demasiado grande, ya que se reduciría la eficiencia y aumentaría el ruido. En los motores de ABB, el tamaño de las paletas y el paso entre ellas varían según los modelos para obtener resultados óptimos.

Diseño para la eficiencia y la fiabilidad

De las pérdidas que varían con la carga, las pérdidas en el cobre del estator (conocidas como pérdidas I²R) son causadas por el calentamiento provocado por la circulación de corriente a través de la resistencia del devanado del estator. Entre las técnicas empleadas para reducir estas pérdidas está la optimización del diseño de las ranuras del estator. Las laminaciones del estator deben ser de acero de baja pérdida, lo más uniformes y delgadas posibles, para maximizar la intensidad de los campos magnéticos. Deben estar alineadas cuidadosamente para garantizar que los canales sean rectos. Naturalmente, cuanto más delgadas sean las laminaciones, tantas más caras serán de producir; además, una gran precisión de alineamiento exige técnicas de producción más especializadas. Las pérdidas en el rotor están causadas por las corrientes en el mismo y por las pérdidas en el hierro. En los motores de alta eficiencia, estas pérdidas se reducen aumentando el tamaño de las barras conductoras y los anillos terminales para reducir la resistencia. Las pérdidas de carga por dispersión resultan del flujo de fugas inducidas por las corrientes de carga y se pueden reducir mejorando la forma geométrica de las ranuras.

La alta calidad, especialmente la de los materiales utilizados, es la base de la fiabilidad. Por término medio, los materiales representan el 55% del coste de un motor. Puesto que más de la mitad del coste total se va en materiales, es obvio que los fabricantes que intenten reducir costes demasiado agresivamente, escatimarán en los materiales y sus productos serán menos fiables.

Diseño para la eficiencia y la fiabilidad

Las dos causas más frecuentes de averías de motores son los cojinetes y devanados, de modo que estos componentes son esenciales para determinar la fiabilidad global. En el caso de los cojinetes y devanados, la temperatura de operación en el interior del motor es el factor más importante sobre la vida útil del componente. Un motor eficiente y de alta calidad, funcionando a plena carga, puede experimentar un aumento normal de temperatura de 60–80°C, pero esta cifra puede llegar a ser de hasta 100°C en los motores de menor calidad. El aumento de temperatura puede ser mayor, sin provocar problemas, sólo en los motores diseñados especialmente para ello, que disponen de un sistema aislante apropiado que resiste las altas temperaturas. Para conseguir fiabilidad máxima es importante utilizar cojinetes de alta calidad (ver tabla). Los diseñadores han de seleccionar el tipo de cojinete adecuado para la aplicación y la carga concretas y a continuación elaborar un régimen de engrase apropiado para la aplicación en las condiciones de operación. Dado que la grasa se degrada con las altas temperaturas, es importante limitar el aumento de temperatura. Una reducción de 10–15°C de la temperatura de operación debe duplicar, en teoría, la vida útil de la grasa del cojinete.

Las temperaturas internas excesivas también afectan a la vida útil de los devanados. En este caso, es el aislamiento en el hilo de cobre el que se degrada por efecto de las altas temperaturas. Un aumento de 10°C en la temperatura de operación puede reducir a la mitad la vida útil del devanado. Por esta razón, la mayoría de los motores se fabrican con aislamiento de Clase F (155°C), pero se diseñan para funcionar a temperaturas no superiores a las de Clase B (130°C). El aumento de temperatura es un aspecto del rendimiento de los motores que se investiga permanentemente.

Diseño para la eficiencia y la fiabilidad

Otro factor de la fiabilidad del devanado es la tensión soportada, que mide la integridad del devanado. Los devanados suelen soportar una tensión en torno a 1.200 V, aunque se pueden suministrar motores que soportan 1.400 V o más si el devanado ha de resistir mayores picos de tensión, como es el caso de algunos accionamientos de velocidad variable. Así mismo, hay que tener presente que la fiabilidad también puede presentar aspectos distintos en diferentes entornos. En aplicaciones de motores en la industria del petróleo y gas, por ejemplo, la seguridad es fundamental para el propietario del proceso. Los motores funcionan generalmente en entornos muy duros y tienen que soportar condiciones extremas de calor o frío o ambientes polvorientos o húmedos.

Condiciones de los cojinetes para una fiabilidad óptima del motor
Suministrados por un fabricante fiable
Dimensionados adecuadamente para la carga y velocidad
Holgura interna adecuada para la temperatura de operación
Grasa adecuada para la temperatura de operación
Ser re-engrasables si existe un servicio de mantenimiento adecuado (en caso contrario suelen ser preferibles los cojinetes sellados de por vida)

Características de un buen devanado
Compacidad con buen índice de relleno de ranuras
Pequeñas proyecciones saliente
Hilo de cobre de alta calidad
Sistemas de devanado de alta calidad
Aislamiento de ranuras, sistemas de impregnación y sistemas de aislamiento de fases, de alta calidad

Selección del motor de alta eficiencia

Cuando se requiere un nuevo motor para llevar a cabo cualquier aplicación industrial, es habitual basar su selección principalmente según un criterio de coste de adquisición inicial. Sin embargo, la experiencia confirma que este criterio de elección repercute negativamente en los costes económicos futuros de su actividad mucho más pronto de lo que parece.

Para cada euro invertido en la compra de un motor, 100 euros más se gastarán en su funcionamiento durante los siguientes 10 años. Estos gastos implican principalmente consumos energéticos y también necesidades de mantenimiento. Por lo tanto, los costes de funcionamiento de un motor son mucho mayores que los de compra. Esta relación pone de relieve la importancia de otros criterios que aseguren un excelente desempeño futuro del motor en el momento de su elección a pesar de unos mayores costes de adquisición.

Un criterio clave es su calidad constructiva y su rendimiento energético, argumentos que repercutirán en los costes económicos futuros. En este sentido, un motor de 90 kW de alta eficiencia puede ahorrar, en comparación con un motor estándar, más de 20.000€ en el transcurso de su vida útil. Esto se da porque un motor de alta eficiencia presenta un rendimiento muy superior a un motor convencional, lo que conlleva un consumo notablemente menor.

En 3 meses, un motor puede haber consumido en electricidad lo equivalente a su precio de compra, de modo que la amortización de su inversión inicial es rápida y su elección queda totalmente justificada.

Además, la reglamentación europea relativa a motores eléctricos tiende a ser cada vez más restrictiva y obligar a la industria a usar motores de eficiencia mayor, tal y como actualmente está cambiando la clasificación energética de motores.

Selección del motor de alta eficiencia

Eficiencia energética

Los estándares de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC, por sus siglas inglesas) se están orientados a escala global. Los estándares IEC forman parte de un esfuerzo cuyos objetivos son unificar los estándares de prueba de motores así como los requisitos tanto de eficiencia como de etiquetado. IEC/EN 60034-30 define las clases de eficiencia energética (código IE) basadas en los métodos de prueba y lectura especificados en IEC/EN 60034-2-1.

Mientras que la IEC fija las directrices que definen las clases tanto de tests para motores y tests de eficiencia, no regula la eficiencia en sí, regulación que se deja bajo la Directiva Europea o bien bajo la legislación territorial vigente.

Tras el éxito de los esfuerzos y resultados conseguidos gracias a los estándares de rendimiento energético mínimo obligatorios (MEPS – Mandatory minimum Energy Performance Standard), por ejemplo en los Estados Unidos, la Unión Europea finalmente ha promulgado MEPS sobre los motores eléctricos en 2009 basados en el estándar IEC/EN 60034-30. Los EU MEPS especifican los niveles de eficiencia mínimos a ser cumplidos por los motores destinados a venderse en el mercado Europeo así como el calendario de implementación de dichos estándares.

Selección del motor de alta eficiencia

EU MEPS

Los EU MEPS para motores eléctricos fueron aprobados el 22 de julio de 2009 por el Parlamento Europeo. Fijan niveles de eficiencia obligatorios para motores eléctricos introducidos en el mercado Europeo.

Los EU MEPS cubren prácticamente la totalidad de motores trifásicos de inducción de 2, 4 y 6 polos de velocidad única con potencias comprendidas en el intervalo de 0,75 a 375 kW.

Calendario de implementación:

Calendario	Requisitos	Notas
Fase1: Desde el 16 de Junio, 2011	Los motores deben cumplir los niveles de eficiencia IE2	IE2 / Alta eficiencia - comparable a Eff1 (Acuerdo europeo CEMEP)
Fase2: Desde el 1 de Enero, 2015	Motores con potencias nominales de 7,5 a 375 kW deben cumplir O BIEN el nivel IE3 de eficiencia O BIEN el nivel IE2 de eficiencia si están equipados con un convertidor de velocidad variable.	IE3 / Eficiencia Premium - extrapolado desde IE2 con aproximadamente un 15% de pérdidas
Fase3: Desde el 1 de Enero, 2017	Motores con potencias nominales de 0,75 a 375 kW deben cumplir O BIEN el nivel IE3 de eficiencia O BIEN el nivel IE2 si están equipados con un convertidor de velocidad variable.	

Naturaleza de las pérdidas en los motores eléctricos

Se entiende por pérdidas, la potencia eléctrica que se transforma y disipa en forma de calor en el proceso de conversión de la energía eléctrica en mecánica que ocurre en el motor. Las pérdidas por su naturaleza se pueden clasificar en cinco áreas:

- pérdidas en el cobre del estator,
- pérdidas en el cobre del rotor,
- pérdidas en el núcleo,
- pérdidas por fricción y ventilación
- y pérdidas adicionales.

Pérdidas en los conductores

Las pérdidas en los conductores se dividen en dos zonas: estator (I^2R en las bobinas del estator) y rotor (I^2R en los bobinados del rotor). Estas pérdidas dependen del cuadrado de la corriente.

Pérdidas en los conductores del estator.

Estas pérdidas son una función de la corriente que fluye en el devanado del estator y la resistencia de ese devanado. Son mínimas en vacío y se incrementan al aumentar la carga.

En función del factor de potencia (FP), la corriente de línea en el estator puede expresarse como:

$$I_L = \frac{\text{potencia eléctrica de entrada}}{\sqrt{3} * \text{voltaje de línea} * \text{FP}}$$

Cuando se desea mejorar el comportamiento del motor, es importante reconocer la interdependencia entre la eficiencia (EF) y el factor de potencia (FP). Si se despeja el factor de potencia la ecuación se reescribe:

$$FP = \frac{\text{potencia mecánica de salida}}{\sqrt{3} * \text{voltaje de línea} * I_L * EF}$$

Naturaleza de las pérdidas en los motores eléctricos

Por lo tanto si se incrementa la eficiencia, el factor de potencia tendrá a decrecer. Para que el factor de potencia permanezca constante, la corriente del estator debe reducirse en proporción al aumento de la eficiencia. Si se pretende que el factor de potencia mejore, entonces la corriente debe disminuir más que lo que la eficiencia aumente. Desde el punto de vista del diseño, esto es difícil de lograr debido a que hay que cumplir otras restricciones operacionales como el momento máximo. Por otra parte la corriente de línea se puede expresar:

$$I_L = \frac{\text{potencia mecánica de salida}}{\sqrt{3} * \text{voltaje de línea} * FP * EF}$$

La expresión hace evidente que las pérdidas en el estator (I^2R) serán inversamente proporcionales al cuadrado de la eficiencia y del factor de potencia. Adicionalmente las pérdidas en los conductores del estator dependen de la resistencia del bobinado. Para un motor dado la resistencia del bobinado es inversamente proporcional al peso del bobinado del estator, es decir, a más material conductor en el estator menos pérdidas.

Naturaleza de las pérdidas en los motores eléctricos

Pérdidas en los conductores del rotor.

Son directamente proporcionales a la resistencia del bobinado rotórico, dependen del cuadrado de la corriente que circula en el bobinado rotórico (barras y anillos) y dependen del flujo magnético que atraviesa el entrehierro. Son prácticamente cero en vacío y se incrementan con el cuadrado de la corriente en el rotor y también se incrementan con la temperatura. Las pérdidas en el rotor se pueden expresar en función del deslizamiento:

$$\text{pérdidas del rotor} = \frac{s}{1-s} (\text{potencia mecánica de salida} + \text{pérdidas de fricción y ventilación})$$

Pérdidas en el núcleo magnético.

Estas pérdidas tienen dos componentes, las pérdidas por corrientes de Foucault y las pérdidas por el fenómeno de histéresis, incluyendo las pérdidas superficiales en la estructura magnética del motor. Las pérdidas en el núcleo del rotor debido al flujo magnético principal, son virtualmente cero.

Pérdidas por Histéresis.

Son causadas debido a la propiedad de remanencia que tienen los materiales magnéticos al ser excitados por un flujo magnético en una dirección. Como el flujo de excitación está cambiando de dirección en el núcleo magnético, la remanencia hace que se forme el ciclo de histéresis, cuya área está relacionada por la energía gastada en magnetizar y desmagnetizar el núcleo continuamente. Estas pérdidas dependen del flujo máximo de excitación, de la frecuencia de variación del flujo y de la característica del material que determina el ancho del ciclo de histéresis.

Pérdidas por Corrientes de Foucault

Son causadas por las corrientes inducidas o corrientes de Foucault que circulan en las laminas magnéticas del núcleo estático las que son inducidas por el flujo magnético giratorio estático. En efecto de acuerdo a la ley de Faraday el campo magnético variable en el tiempo crea campos eléctricos de trayectoria cerrada en el núcleo magnético y como el acero es un material conductor estos campos hacen circular corrientes (corrientes de Eddy) a través de su trayectoria cerrada, por esta razón el núcleo magnético se hace de láminas magnéticas. Por lo tanto estas pérdidas dependen del flujo magnético máximo, de la frecuencia de variación del flujo magnético y de la resistividad del acero magnético.

Pérdidas por fricción y ventilación.

Las pérdidas por fricción y ventilación son debidas a la fricción en los rodamientos y a las pérdidas por resistencia del aire al giro del ventilador y de otros elementos rotativos del motor.

La fricción en los rodamientos es una función de las dimensiones de este, de la velocidad, del tipo de rodamiento, de la carga y de la lubricación usada. Estas pérdidas quedan relativamente fijadas para un tipo de diseño, y debido a que constituyen un porcentaje pequeño de las pérdidas totales del motor, los cambios que se pueden hacer en el diseño para reducirlas no afectan significativamente la eficiencia del motor.

Pérdidas adicionales en carga.

Son pérdidas residuales difíciles de determinar por medio de mediciones directas o de cálculos. Estas pérdidas están relacionadas con la carga y generalmente se suponen que varían con el cuadrado del momento de salida.

La naturaleza de estas pérdidas es muy compleja. Están en función de muchos factores de diseño y de fabricación del motor. Algunos de los elementos que influyen en estas pérdidas son:

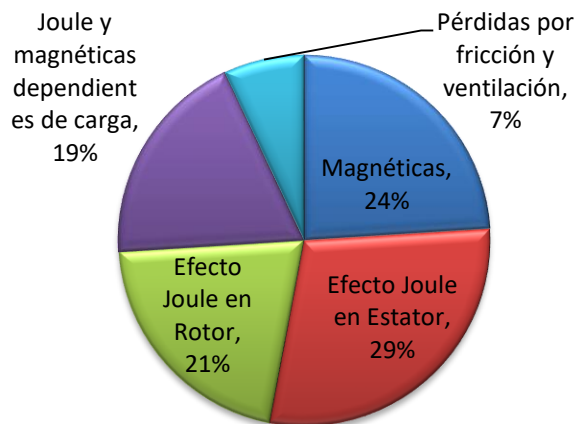
- el diseño del devanado,
- la relación entre la magnitud del entrehierro y la abertura de las ranuras;
- la relación entre el número de las ranuras del estator y del rotor,
- la inducción en el entrehierro;
- las condiciones en la superficie del rotor,
- el tipo de contacto superficial entre las barras
- y las laminaciones del rotor.

Naturaleza de las pérdidas en los motores eléctricos

Distribución de las pérdidas.

Dentro de un intervalo limitado de eficiencia, las distintas pérdidas analizadas son independientes unas de las otras. Sin embargo, cuando se procuran mejoras sustanciales en la eficiencia, se encuentra que las mismas están fuertemente entrelazadas. El diseño final de un motor es un balance entre las eficiencias pérdidas, con el objetivo de obtener una eficiencia elevada y aun poder satisfacer otros requerimientos operacionales como el momento de arranque, la corriente de arranque, el momento máximo y el factor de potencia.

La forma en que se distribuye relativamente estas pérdidas depende del tipo y tamaño del motor y, para tener una idea general, en la siguiente figura se muestra como se distribuyen las pérdidas en un motor EFF1 18,5 kW y rendimiento 92.2 %. En esta tabla se puede evidenciar que a potencia nominal resulta relativamente amplio el intervalo que varía cada una de las pérdidas dependiendo de la potencia del motor.



Motor de Potencia (HP)	5	50	100	200
Rendimiento (%)	83	90,5	91,5	93
Tipo de pérdidas (%)				
Magnéticas	29	20	13	15
Efecto Joule en Estator	40	38	28	30
Efecto Joule en Rotor	20	22	18	16
Joule y magnéticas dependientes de carga	7	12	27	29
Pérdidas por fricción y ventilación	4	8	14	10

Naturaleza de las pérdidas en los motores eléctricos

Mejoras energéticas para reducir las pérdidas.

- Pérdidas por efecto Joule en el estator:
 - Aumentar la cantidad de cobre.
 - Mayor tamaño de ranura.
 - Disminuir la Cabeza de bobina.
- Pérdidas magnéticas:
 - Mejorar la calidad de la chapa.
 - Disminuir el grosor de las chapas.
 - Mejorar los procesos de fabricación.
 - Aumento del entrehierro.
 - Mejorar el factor de bobinado.
- Pérdidas por efecto Joule en el rotor:
 - Aumentar la inducción en el entrehierro.
 - Aumentar el tamaño de las barras conductoras del rotor.
 - Aumentar la conductividad de las barras, utilizar rotores de cobre.
- Pérdidas por ventilación:
 - Ventiladores más eficientes.
 - Pérdidas por rozamiento:
 - Rozamientos de bajo nivel de pérdidas. Utilización de rodamientos con bajo nivel de pérdidas y rodamientos más pequeños.
- Pérdidas mecánicas:

En muchos no son debidas al propio motor sino que existe un sistema de transmisión que hace que debido a las pérdidas que en éste se originan, disminuya el rendimiento global del accionamiento. Este fenómeno se puede evitar controlando las tensiones de las transmisiones por correas. También hay que estudiar la posibilidad de sustituir el sistema de correas o de reductor con caja de engranajes por accionamiento directo mediante regulación de velocidad.

Naturaleza de las pérdidas en los motores eléctricos

- Pérdidas adicionales:

- ✓ Corrientes transversales.
- ✓ Corrientes circulares estator.
- ✓ Pérdidas armónicas en el rotor en carga.

Este tipo de pérdidas no dejan de ser pérdidas por efecto Joule y magnéticas que se originan en el cobre del estator, en el aluminio o cobre del rotor y en la chapa magnética y aunque son análogas a las indicadas anteriormente se tratan separadamente, ya que para su determinación se utilizan métodos diferentes a los utilizados en los apartados anteriores. Estas pérdidas se pueden reducir mediante la actuación sobre los siguientes parámetros:

- Modificación del número ranuras del rotor
- Inclinación ranuras del rotor
- Bobinado paso acortado
- Devanado 2 capas
- Conexión en triángulo/estrella
- Grupos en paralelo
- Resistencia transversal del rotor
- Forma de las ranuras del rotor
- Mejorando el mecanizado
- Actuando sobre el entrehierro

Mejoras prácticas recomendadas

Evitar el arranque y la operación simultánea de motores, sobre todo los de mediana y gran capacidad, para disminuir el valor máximo de la demanda.

Evitar la operación en vacío de los motores.

Verificar periódicamente la alineación del motor con la carga impulsada. Una alineación defectuosa puede incrementar las pérdidas por rozamiento y en caso extremo ocasionar daños mayores en el motor y en la carga.

Corregir la caída de tensión en los alimentadores. Una tensión reducida en los terminales del motor, genera un incremento de la corriente, sobrecalentamiento y disminución de su eficiencia. Las normas permiten una caída de tensión del 5%. Para ello utiliza conductores correctamente dimensionados.

Equilibrar la tensión de alimentación en los motores trifásicos de corriente alterna. El desequilibrio entre fases no debe exceder en ningún caso del 5%, pero mientras menor sea el desequilibrio, los motores operarán con mayor eficiencia.

Mantener bien ajustado y en óptimas condiciones el interruptor de arranque de los motores monofásicos de fase partida. El mal funcionamiento de este accesorio que se emplea para desconectar el devanado de arranque (y el condensador en los motores de arranque por condensador) provoca un sobrecalentamiento en los conductores ocasionando significativas pérdidas de energía y en caso extremo el fallo del motor.

Utilizar arrancadores a tensión reducida en aquellos motores que realicen un número elevado de arranques. Con esto se evita un calentamiento excesivo en los conductores y se logra disminuir las pérdidas durante la aceleración. Sustituir en los motores de rotor devanado, los reguladores con resistencias para el control de la velocidad, por reguladores electrónicos más eficientes, porque las resistencias llegan a consumir hasta un 20% de la potencia que el motor toma de la red.

Instalar equipos de control de la temperatura del aceite de lubricación de cojinetes de motores de gran capacidad a fin de minimizar las pérdidas por fricción y elevar la eficiencia.

No se recomienda rebobinar los motores más de 2 veces, porque puede variar las características de diseño del motor, lo cual incrementaría las pérdidas de energía.

Ahorro monetario de los motores de alta eficiencia

Una manera rápida de calcular el ahorro monetario de estos motores sería:

$$\text{Ahorro económico anual (€)} = h * \%Pot * \text{€/kWh} * (1/n_{std} - 1/n_{HEM})$$

Donde:

h = tiempo de utilización anual (en horas).

kW = potencia del motor (en kW).

%Pot = fracción de plena carga a que trabaja el motor.

€/kWh = coste de la electricidad (en €/kWh).

n_{std} = eficiencia de un motor estándar (EFF3).

n_{HEM} = eficiencia de un motor de alta eficiencia.

Si no se conoce la eficiencia del motor existente en la actualidad, una estimación razonable será suponer una eficiencia energética en el límite entre las de clases EFF2 y EFF3 para un motor que nunca se ha reparado.

Si el motor se ha reparado, se debe considerar una pérdida adicional de eficiencia del 0,5% por cada reparación.

Si se opera por debajo del 100% de la carga se utilizarán los valores de eficiencia para cargas parciales. Los fabricantes presentan en sus folletos los valores de la eficiencia para el 75% y el 50% de la plena carga.

- Ejemplo práctico

Sea un motor de 4 polos y 15kW, que acciona una bomba impulsora de agua de refrigeración, que trabaja a plena carga 6000h/año. Se supone que el coste de la electricidad es de 0.10€/kWh.

Los motores EFF1 y standard presentan una eficiencia del 91,8% y del 88,2% respectivamente.

$$\text{Ahorro anual} = 6000 \cdot 15 \cdot 100\% \cdot 0.14 \cdot (1 / 88.2 - 1 / 91.8)$$

$$\text{Ahorro anual de energía} = 560\text{€}$$

Ahorro monetario de los motores de alta eficiencia

Estudio cuantitativo de la inversión en un motor de alto rendimiento

En la tabla siguiente se presenta un estudio cuantitativo de las ventajas que supone la inversión en un motor eléctrico de alto rendimiento eff1, respecto a un motor de rendimiento mejorado eff2.

Tipo	AMHE 200LP2	AM 200 LLA2
Clase de Eficiencia	EFF1	EFF2
Rendimiento (%)	93,1	91.6
Potencia en eje (kW)	30	30
Potencia eléctrica (kW)	32,22	32,75
Precio Energía (€/kWh)	0.14	
Precio Motor (€)	2422,54	2202,14
Ahorro Eu/hora	0.0739	
Amortización Diferencia precio (horas)	2983 (124 días)	
Amortización Motor EFF1 (horas)	32792 (3,7 años)	

Esta diferencia de rendimiento hace que en tan sólo 124 días se ahorre la diferencia que costaría haber comprado un motor EFF1. Se tendría un ahorro anual de 4622 kWh y se evitaría emitir 2288 kg de CO₂/año.

Por tanto, los motores eléctricos, elemento principal en la industria moderna, pueden contribuir mucho a los esfuerzos por reducir el consumo de energía y las emisiones de CO₂. Se estima que los motores usan el 65 % de la electricidad consumida por la industria y que generar electricidad para impulsar estos motores produce 37 millones de toneladas anuales de CO₂. Dada la magnitud de estas cifras, incluso un pequeño aumento en la eficiencia de cada motor tiene un impacto positivo a escala mundial.

Aunque los modelos de alta eficiencia se venden con un sobreprecio de 5–7 % (tamaños mayores) o de 15–20 % (tamaños más pequeños), la inversión se recupera rápidamente gracias al menor consume de energía. La energía utilizada por un motor durante su vida útil puede costar hasta 100 veces el precio de compra del motor.

Sin embargo, la eficiencia representa sólo un aspecto del funcionamiento y los costes de energía son una parte de los costes totales durante la vida útil. La fiabilidad –y los costes de mantenimiento y tiempos muertos resultantes de una fiabilidad deficiente– puede ser aún más importante en algunas aplicaciones.

Accionamientos eficientes y ahorro de energía

De todos los recursos de los que depende la fabricación moderna, la energía es probablemente el más importante. Pero durante mucho tiempo se ha considerado este recurso como algo evidente, como algo garantizado. El encarecimiento de la energía y la preocupación por las emisiones de gases de efecto invernadero hace que los principales operadores estén valorando críticamente el uso que hacen de la energía.

En muchos sectores, el potencial de ahorro de energía es relativamente pequeño, de modo que una mejora de eficiencia energética de unos pocos puntos porcentuales se celebra como un gran éxito. Bajo tales condiciones, la perspectiva de conseguir importantes ahorros de energía parece poco prometedora. Sin embargo, existen tecnologías que pueden conseguir reducciones muy importantes. Entre ellas está, en primer lugar, un dispositivo que a primera vista carece de la espectacularidad de los procesos de gran volumen y alta potencia. Apenas hace ruido, no desarrolla altas temperaturas ni experimenta movimientos complejos. De hecho está alojado en un armario y generalmente ni siquiera es mencionado en una descripción del proceso global. Pero esta tecnología, aplicada en todas las instalaciones industriales relevantes del mundo, permitiría reducir el consumo de energía en un 42 %, un ahorro equivalente al consumo eléctrico de un país como España. Este dispositivo es el accionamiento de motor. Los accionamientos se utilizan para regular la velocidad de los motores eléctricos, que son responsables del 25 por ciento de toda la electricidad consumida en el mundo por la industria. ABB, el grupo líder en tecnologías electrotécnicas y de automatización, ha comunicado su estimación anual de los ahorros logrados con su base instalada de accionamientos. En 2011 se han ahorrado unos 310 millones de megavatios hora (MWh) por los accionamientos instalados por ABB, un aumento del 19 por ciento en relación con el año anterior. Los ahorros producidos por los accionamientos de ABB en 2011 corresponden a 260 millones de toneladas de emisiones de CO₂ cuando la electricidad se genera a partir de combustibles fósiles. Estos ahorros suponen aproximadamente 34.000 millones de dólares para los clientes norteamericanos. Son también equivalentes a la electricidad generada por más de 40 reactores nucleares y, en términos europeos, al consumo anual de 75 millones de viviendas norteamericanas.

El principio es sencillo: en el pasado, los motores que movían las bombas funcionaban permanentemente a plena potencia y la potencia de salida se regulaba por medio de válvulas. Un accionamiento regula el caudal controlando directamente la potencia eléctrica suministrada al motor y prescindiendo así de los controles basados en la fricción, con las consiguientes pérdidas. Los artículos que presentamos a continuación profundizan en diversas aplicaciones y dejan claro que la tecnología de accionamientos puede marcar, y de hecho marca, una gran diferencia.

Accionamientos eficientes y ahorro de energía

Dimensionar los sistemas

A pesar de haber sido estudiados y diseñados con gran cuidado, muchos sistemas no funcionan óptimamente. Una razón es, simplemente, que muchos sistemas se sobredimensionan, lo que significa costes más altos de explotación e inversión. Para ilustrar este hecho consideraremos el caso de un sistema con ventilador en una industria de transformación (sigue las figures que muestra más abajo).

Figura 1

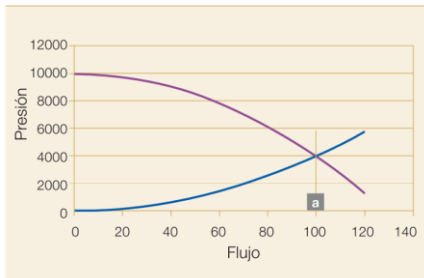


Figura 2

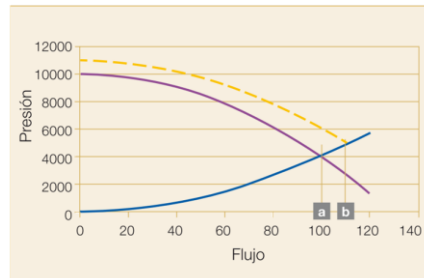


Figura 3

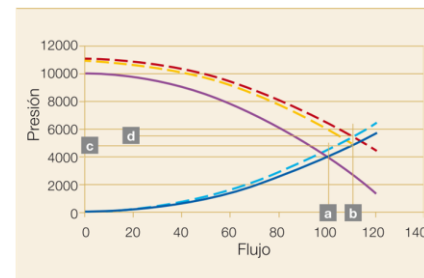
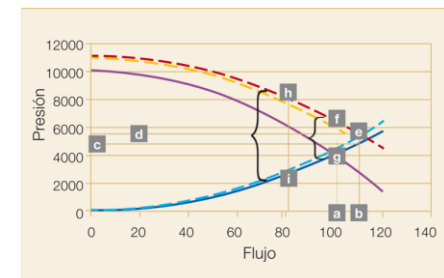


Figura 4



En este ejemplo se supone que la condición “real” de la aplicación, 100 unidades de caudal, requiere 4.000 unidades de presión figura 1, punto “a”.

Para tener más seguridad sobre el caudal máximo del ventilador se especifica al ingeniero una cifra de 110 unidades de caudal figura 2, punto “b”. Según el esquema supuesto del sistema, haría falta un ventilador con más capacidad (línea amarilla a trazos, figura 2), que pueda entregar 110 unidades de caudal y 5.000 unidades de presión. Al establecer la capacidad del ventilador, el ingeniero estima la caída de presión total que originarán estas 110 unidades de caudal figura 3, punto “c”. El valor calculado de la caída de presión se incrementa con un margen de un 10 % figura 3, punto “d”, ya que es difícil prever si el número supuesto de codos de 90° en el conducto se corresponderá con el estimado (es probable que el instalador tenga que añadir codos para derivar otros equipos). Además, la sección transversal del conducto puede ser dudosa. Una sección transversal más pequeña provocaría una caída de presión mayor. Por consiguiente, está justificado este margen del 10 %.

Accionamientos eficientes y ahorro de energía

Así pues, ¿cuáles serán los datos en las solicitudes de oferta? Caudal: 110 unidades a una presión de 6.000 unidades figura 4, punto “e”. Si las suposiciones iniciales eran correctas, el ventilador estará ahora fuertemente sobredimensionado.

Para un caudal de 100 unidades, la necesaria caída de presión adicional sobre el amortiguador ha de ser 3.000 unidades aproximadamente (figura 4, punto “f” menos punto “g”). Este valor equivale al 75 % de la presión total correcta que se ha supuesto. Sin embargo, es raro que se necesite el 100 % del caudal de diseño, excepto para ráfagas muy cortas. Suponiendo que la mayor parte del tiempo se requerirá el 80 % del caudal, la regulación adicional necesaria en el amortiguador será de aproximadamente 6.000 unidades (figura 4, punto “h” menos punto “i”), cifra equivalente al 150% de la presión total correcta que se ha supuesto.

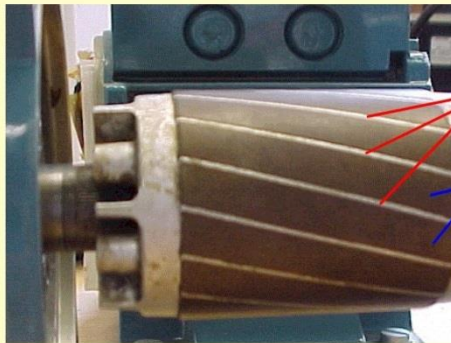
Las fases ilustradas en este ejemplo son más frecuentes de lo que pueda parecer. Un factor adicional es que a la hora de seleccionar un ventilador se ha de elegir entre una gama estándar de tamaños fijos. Normalmente se elige el tamaño inmediatamente superior.

El ventilador correctamente dimensionado para este ejemplo debe ser de $100 \times 4.000 = 400.000$ unidades de potencia. El caso anterior requiere un ventilador de al menos 660.000 unidades de potencia (165 % del valor óptimo). Corregir este exceso con el control de amortiguador conlleva grandes pérdidas de energía. Las pérdidas adicionales en el punto de 80 % de caudal ascienden a 480.000 unidades de potencia (120 % de la máxima potencia de un ventilador dimensionado correctamente). Utilizando un ventilador controlado por velocidad, en vez del control del amortiguador, se puede ahorrar casi toda esta energía.

¿Reconoces el rotor de un motor de inducción?



2) Construcción (rotor)



Barras de aluminio

Chapas de acero de silicio