

# Introducción a Electrotecnia

## UNCuyo 2019

### Unidad 6

Profesor Adjunto: Ing Marcos Saromé



**UNCUYO**  
UNIVERSIDAD  
NACIONAL DE CUYO

# Temas

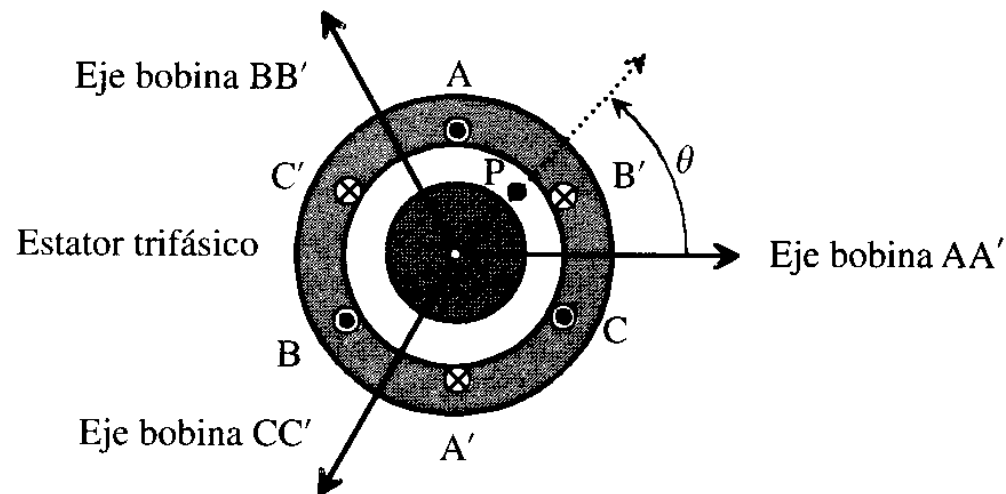
## **Unidad Temática 6: Máquina Asíncrona**

Campo giratorio. Motor asíncrono trifásico. Principio de funcionamiento Descripción, características, aplicaciones. Circuito equivalente. Característica cupla/velocidad. Potencia. Accionamiento. Arranque. Ensayos directo y a tensión reducida. Arranque estrella/triángulo, con autotransformador y con resistencias estáticas. Motor con rotor bobinado. Arranque con resistencias rotóricas.

Aplicaciones. Control de velocidad. Motor asíncrono monofásico. Descripción, características y aplicaciones. Ensayos directos e indirectos.

# Campo Giratorio

- Imaginar 3 devanados desfasados entre sí 120 grados eléctricos en el espacio.



- Si circula por ellos una corriente trifásica equilibrada

# Campo Giratorio

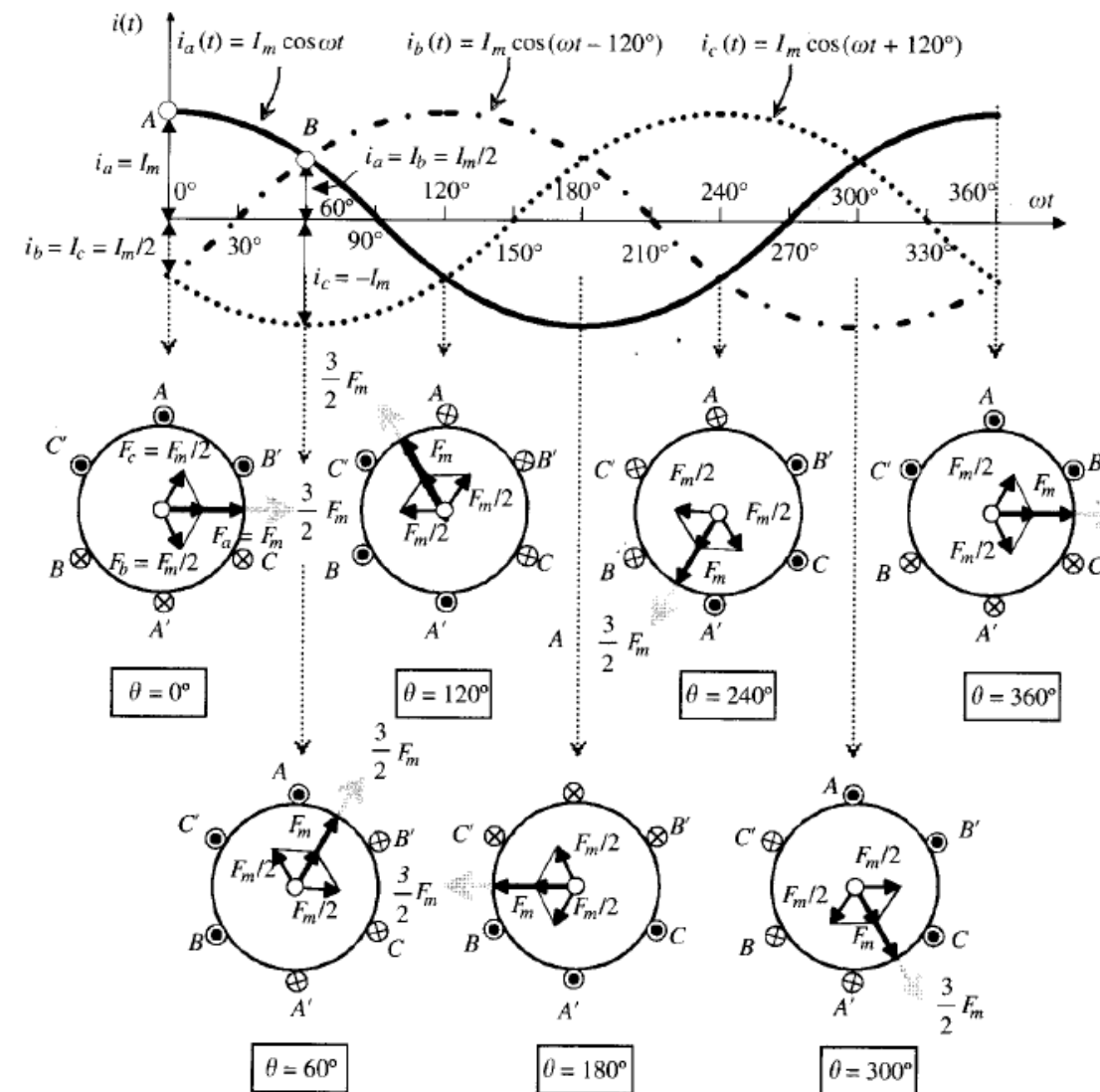
$$\mathcal{F}(\theta, t) = \frac{3}{2} F_m \cos (\omega t - \theta) = \frac{3}{2} F_m \cos (\omega t - p\alpha)$$

- Para un mismo punto del espacio  $\alpha = \text{cte}$  la f.m.m. varía en función del tiempo según una senoide de amplitud  $3/2 F_m$
- Para un mismo instante de tiempo  $t = \text{cte}$  la f.m.m. está distribuida sinusoidalmente en el entre hierro.

# Principio de Funcionamiento de Un transformador Ideal

- Se ha producido un campo magnético Giratorio que:

- Tiene una amplitud constante
- Gira a Velocidad Constante



## Campo Giratorio

- Si la máquina es bipolar, una variación de  $360^\circ$  eléctricos en el tiempo corresponde a un giro de  $360^\circ$  magnéticos.
- Si la máquina tiene  $2p$  polos  $\omega_m = \frac{\omega}{p}$

$$\omega_m = 2\pi \frac{n}{60} \quad ; \quad \omega = 2\pi f$$

- La velocidad de sincronismo en rpm será

$$n = \frac{60f}{p}$$

# Ejemplo 1

- Calcule la velocidad de sincronismo del campo de un bobinado trifásico, de 50Hz. En  $s^{-1}$  y rpm
- a) Para un bobinado de 1 par de polos (2 polos)
- b) Para un bobinado de 2 par de polos (4 polos)

# Demostración Analítica

Considerese un observador que viaje con la onda en un punto de fase constante  $\phi_0$  que es incluso la cresta de la onda.

$$\omega t - \theta = \theta_0 = 0$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega$$

$$\omega - p \frac{d\alpha}{dt} = 0$$

$$\omega_m = \frac{d\alpha}{dt} = \frac{\omega}{p}$$



# Cambio de Fase

Si se permutan dos corrientes cualesquiera de las fases que constituyen un sistema trifásico cambia el sentido de rotación del campo magnético

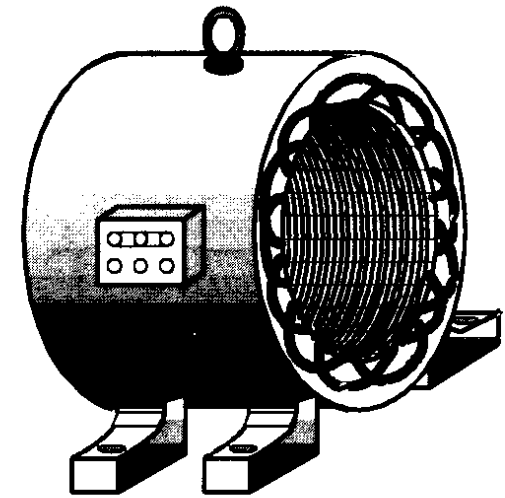
$$i_a = I_m \cos \omega t \quad ; \quad i_b = I_m \cos (\omega t + 120^\circ) \quad ; \quad i_c = I_m \cos (\omega t - 120^\circ)$$

$$\mathcal{F}(\theta, t) = \frac{3}{2} F_m \cos (\omega t + \theta) = \frac{3}{2} F_m \cos (\omega t + p\alpha)$$

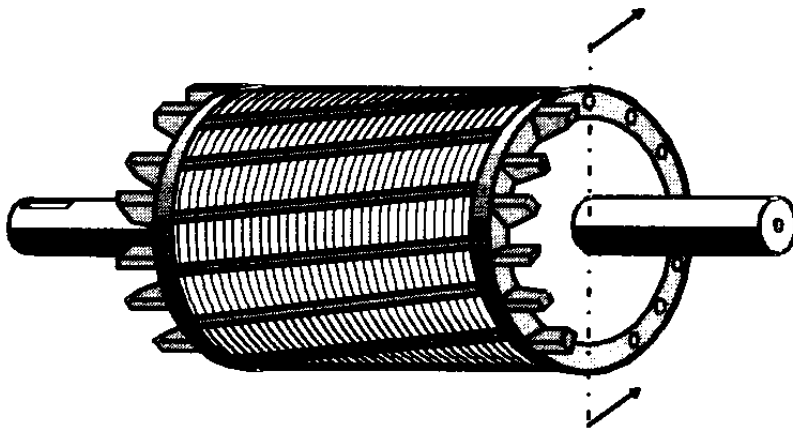
$$\omega_m = -\frac{d\alpha}{dt} = -\frac{\omega}{p} \quad ; \quad n = -\frac{60f}{p}$$

# Motor Asíncrono, Aspectos Constructivos

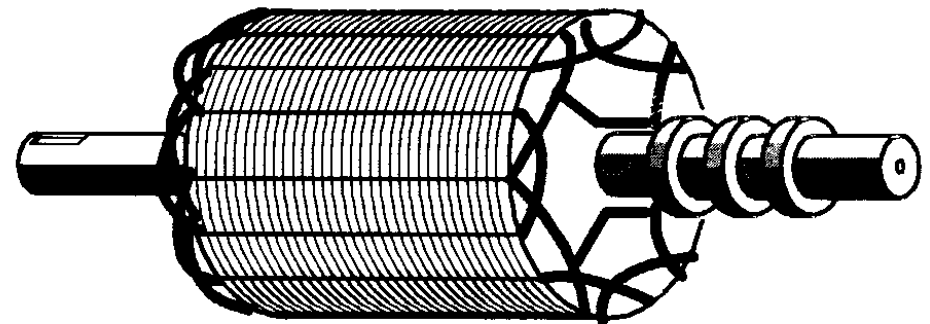
- Clasificación:
  - Rotor Jaula de Ardilla o en cortocircuito
  - Rotor Devanado o con anillos



**Figura 4.1.** Estátor de un motor asíncrono.

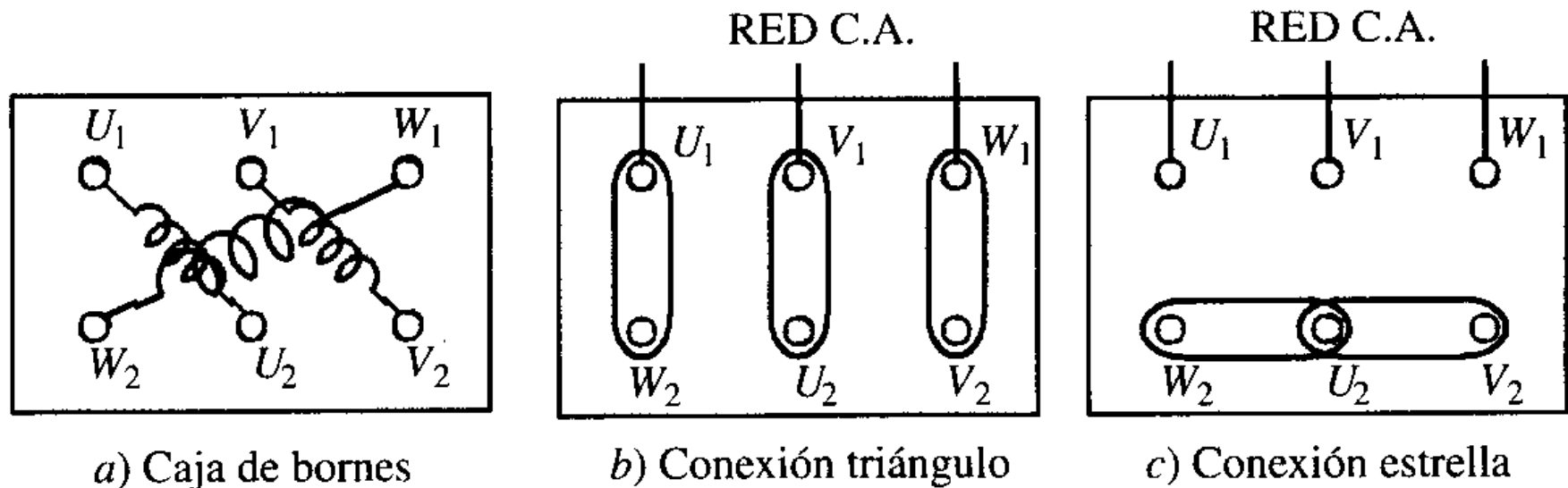


**Figura 4.2.** Rotor en jaula de ardilla.



**Figura 4.3.** Rotor devanado o con anillos.

# Placa de Conexión

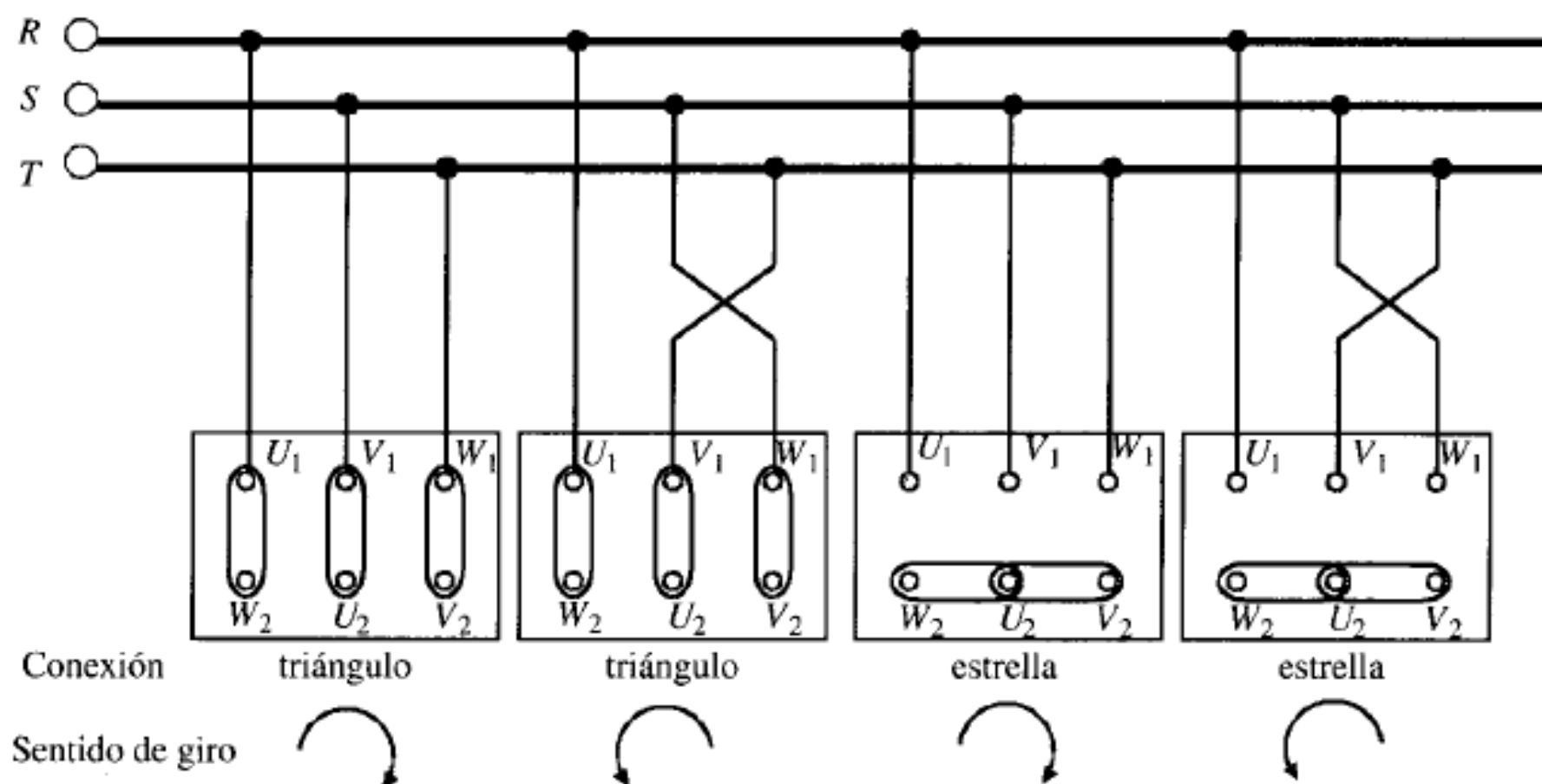


**Figura 4.4.** Placa de bornes. Conexiones estrella y triángulo.

- La conexión a Y se emplea cuando la máquina debe conectarse a la tensión más elevada de la placa.

# Ejemplo 2

- Un motor de 220/380 V se conectará en triángulo para una red de 380 V (tensión de línea)
- Un motor de 380/660V se conectará en estrella para una red de 380 (Tensión de línea)

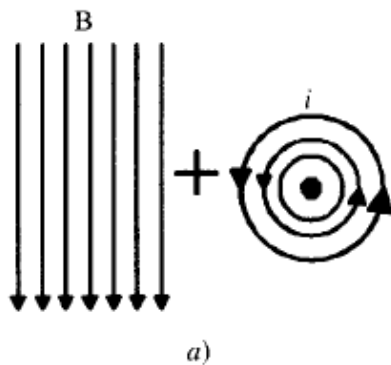


**Figura 4.6.** Esquemas desarrollados de las conexiones estrella y triángulo.

# Principio de Funcionamiento

- El devanado del estator está constituido por tres arrollamientos desfasados  $120^\circ$  en el espacio y de  $2p$  polos, al introducir por ellos corrientes de una red trifásica de frecuencia  $f_1$ .

Produce un flujo giratorio de velocidad dada por (vel de sincronismo):



$$n_1 = \frac{60f_1}{p}$$

# Principio de Funcionamiento

$$e = \int (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{L}$$

- Aparecen en los conductores del rotor una corriente producto de esta fem.
- La misma por ley de Laplace vale

$$\mathbf{F} = i(\mathbf{L} \times \mathbf{B})$$

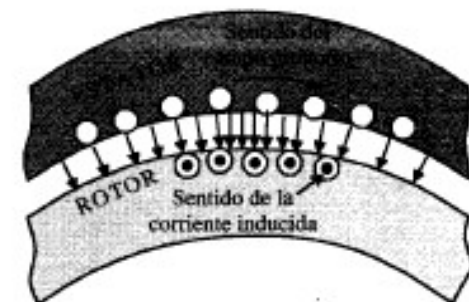
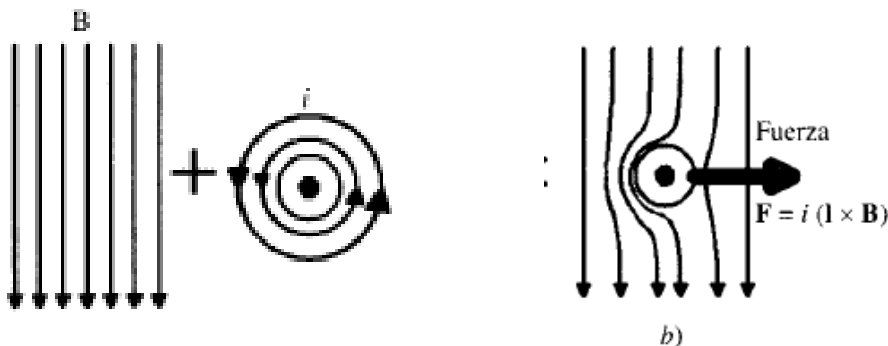


Figura 4.7. Sentido de la corriente inducida en los conductores del rotor.

# Principio de Funcionamiento

- Multiplicando la fuerza por el radio y por la cantidad de conductores se tiene el momento del motor.

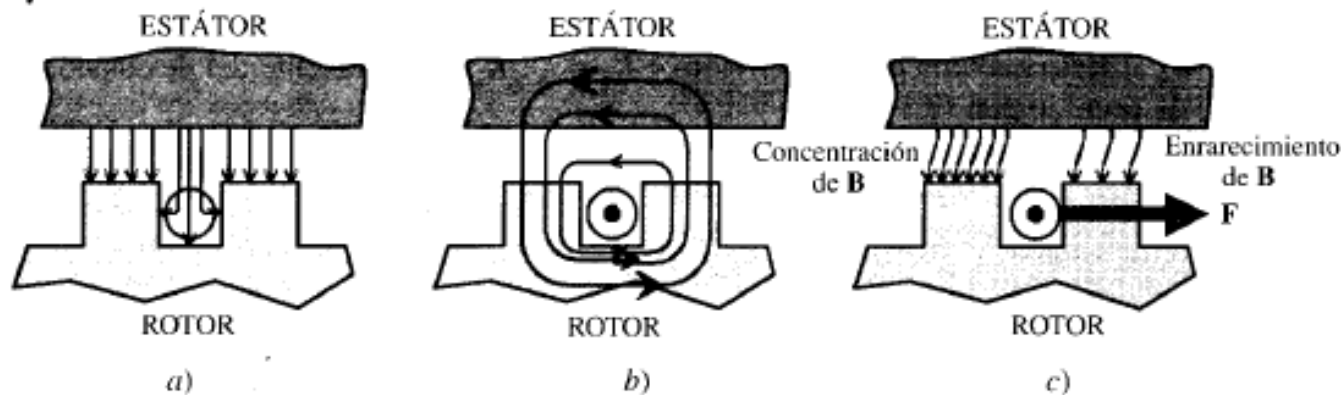


Figura 4.9. Determinación del sentido de la fuerza en un conductor situado dentro de una ranura.

Las fuerzas actúan en los dientes y no en los conductores.



# Deslizamiento

- Llamamos deslizamiento al cociente:

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

- En los motores industriales ronda entre 3 y 8%
  - La frecuencia del rotor está dada por

$$f_2 = s f_1$$

- En caso de rotor parado  $f_2 = f_1$

# Principio de Funcionamiento

- Las fmm en el rotor y el estator representan una analogía con respecto al transformador
- Si el gira en sentido del campo, la frecuencia del mismo no es  $f_1$  sino  $f_2$  menor que la anterior.

$$E_2 = 4,44 K_2 f_1 N_2 \Phi_m$$

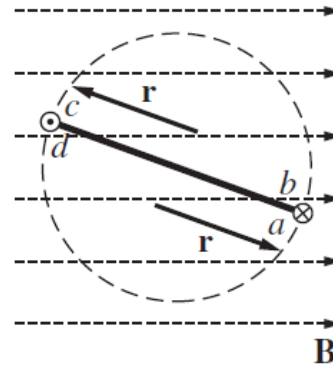
$$E_1 = 4,44 K_1 f_1 N_1 \Phi_m$$

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

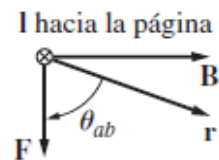
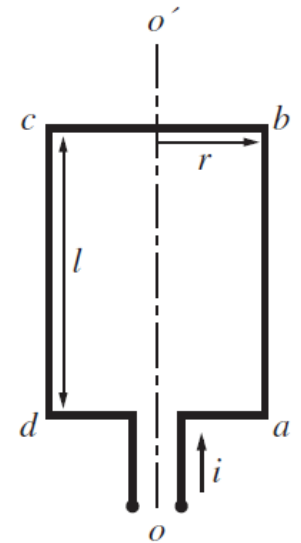
$$E_{2s} = s E_2$$

# Circuito Eléctrico Equivalente

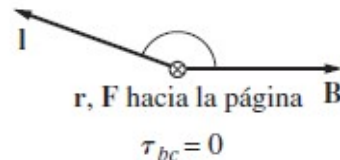
$$\mathbf{F} = i(\mathbf{l} \times \mathbf{B})$$



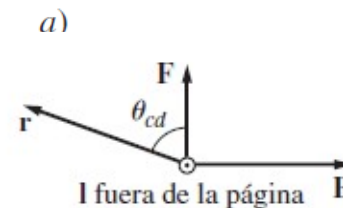
$\mathbf{B}$  es un campo magnético uniforme, alineado como se muestra. La  $\times$  en el alambre indica que la corriente fluye hacia la página, y el  $\bullet$  en el alambre indica que la corriente fluye hacia afuera de la página.



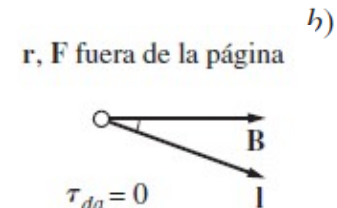
a)



b)



c)



d)

$$\tau_{\text{ind}} = 2 rilB \sin \theta$$

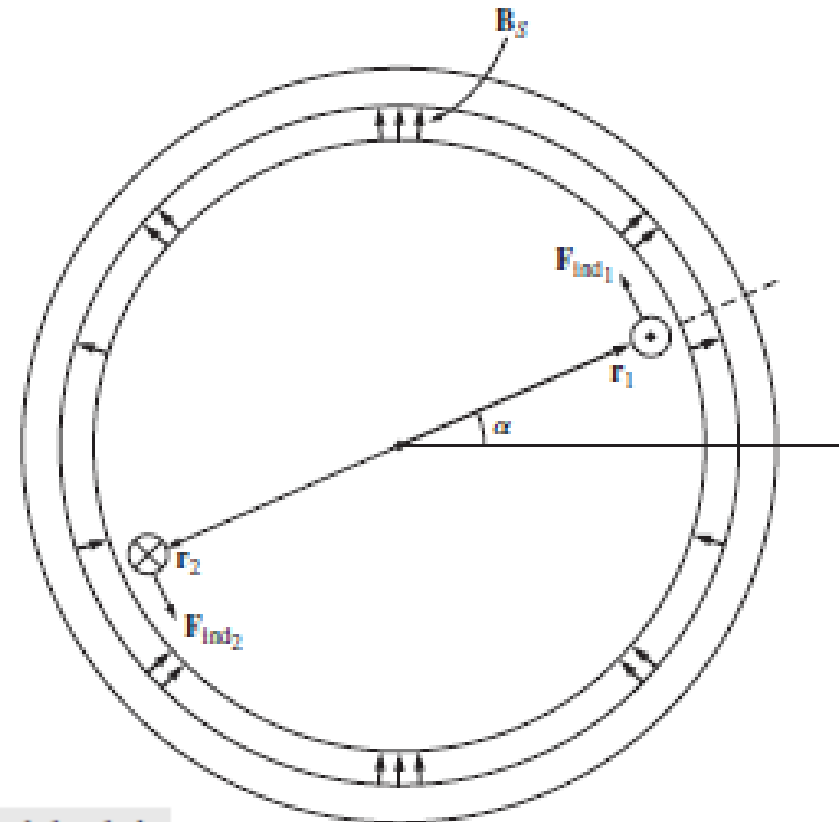
$$\tau_{\text{ind}} = k \mathbf{B}_{\text{esp}} \times \mathbf{B}_S$$

# Par Inducido en una máquina de c.a.

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

$$\tau_{\text{ind},1} = (\mathbf{r} \times \mathbf{F})$$

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



$$\tau_{\text{ind}} = 2rilB_S \sin \alpha \quad \text{en sentido contrario a las manecillas del reloj}$$

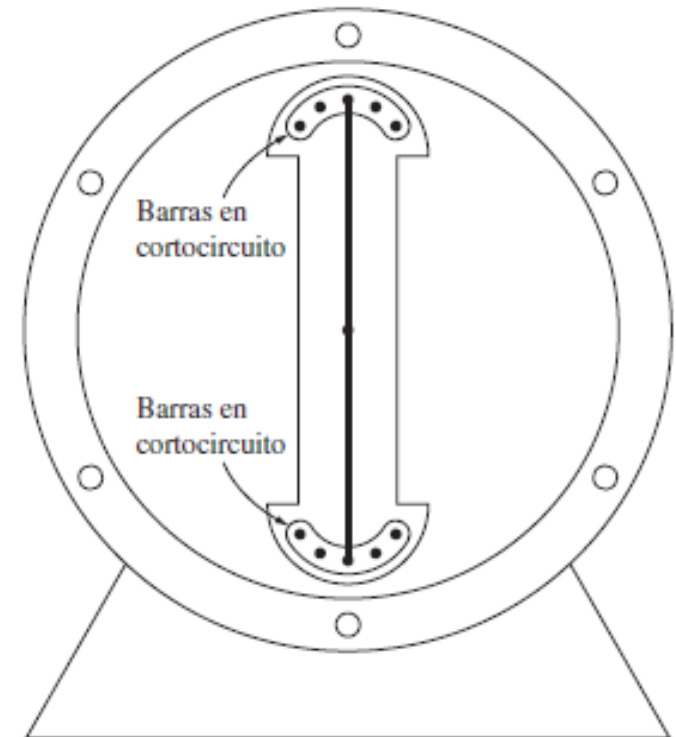
$$|\mathbf{B}_S(\alpha)| = B_S \sin \alpha$$

# Par Inducido en una máquina de c.a.

- Considerese que la corriente  $i$  que fluye en la bobina del rotor produce su propio campo magnético.  $H_R$
- El ángulo entre el pico de la densidad de flujo del estator  $B_s$  y el pico de la intensidad de magnetización del rotor  $H_R$  es  $\gamma$ .
-

# Par en un motor de inducción

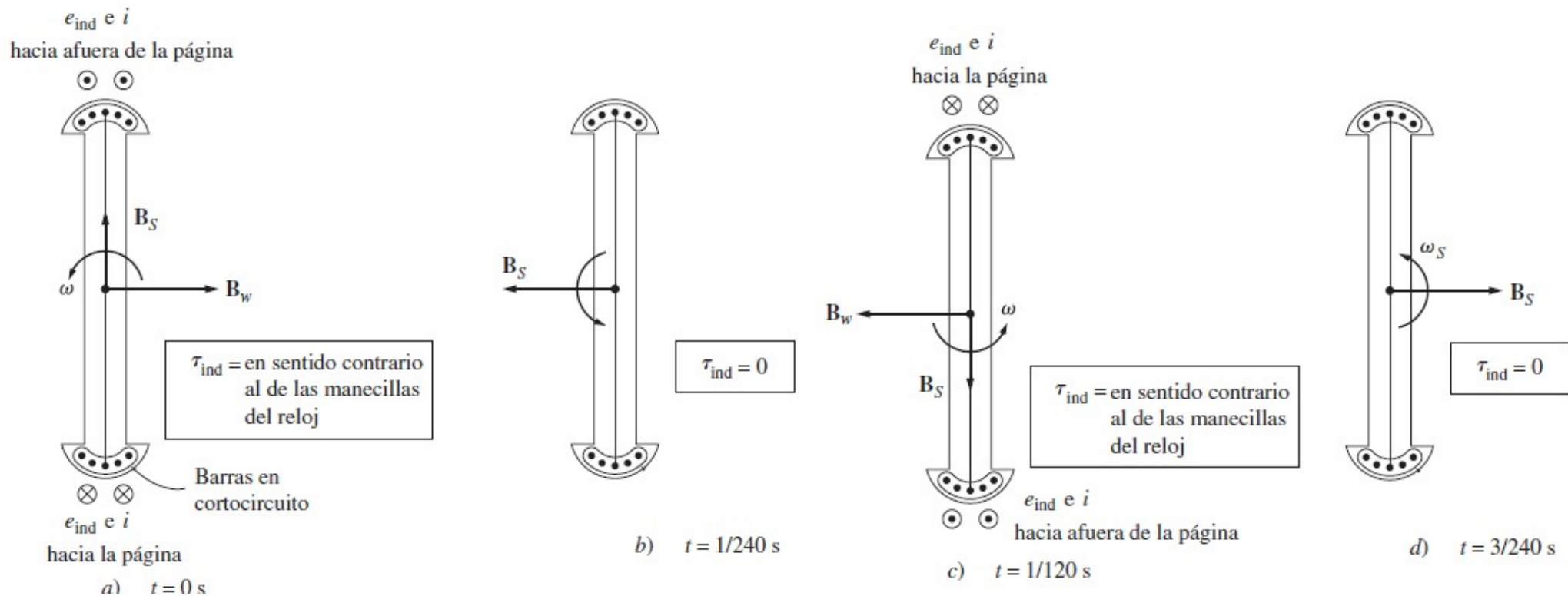
$$e_{\text{ind}} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l}$$



**FIGURA 5-18** Diagrama simplificado de una máquina con dos polos salientes que muestra los devanados de amortiguamiento.

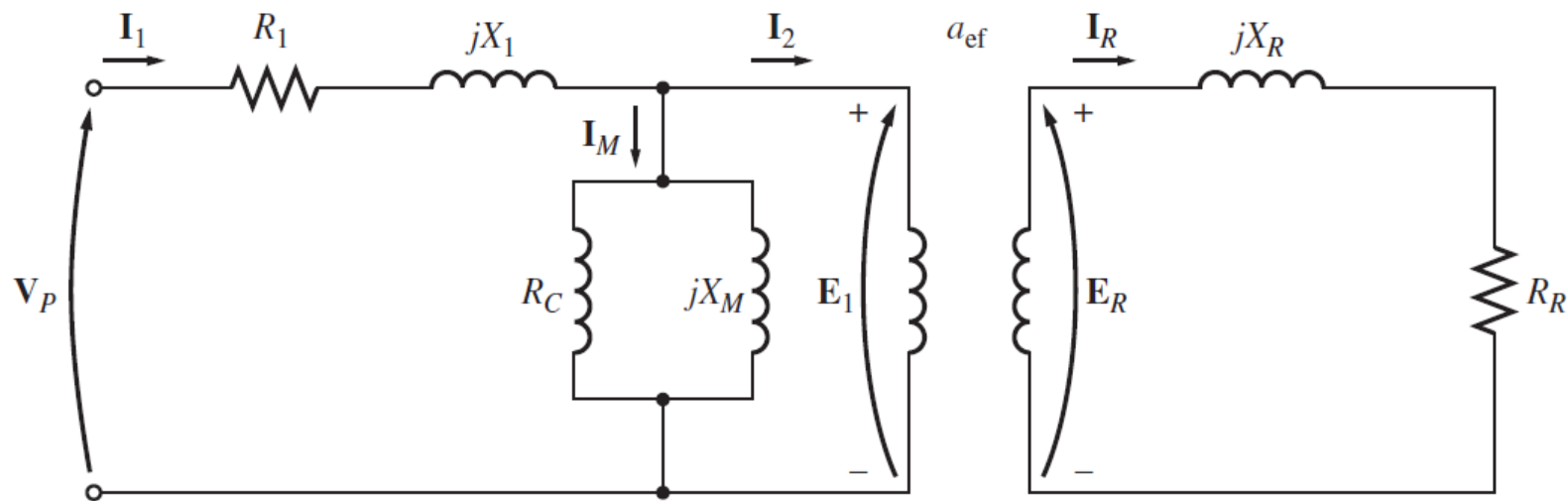
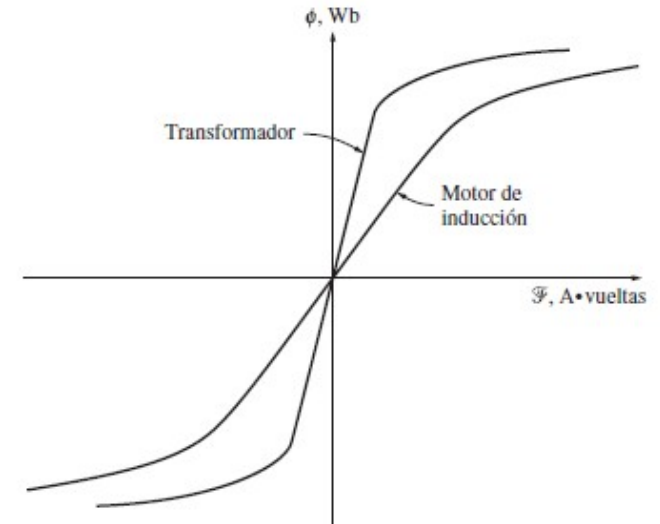
Extraído del capítulo 5 (motor asíncrono), arranque con devanado de amortiguamiento

# Par en un motor de inducción



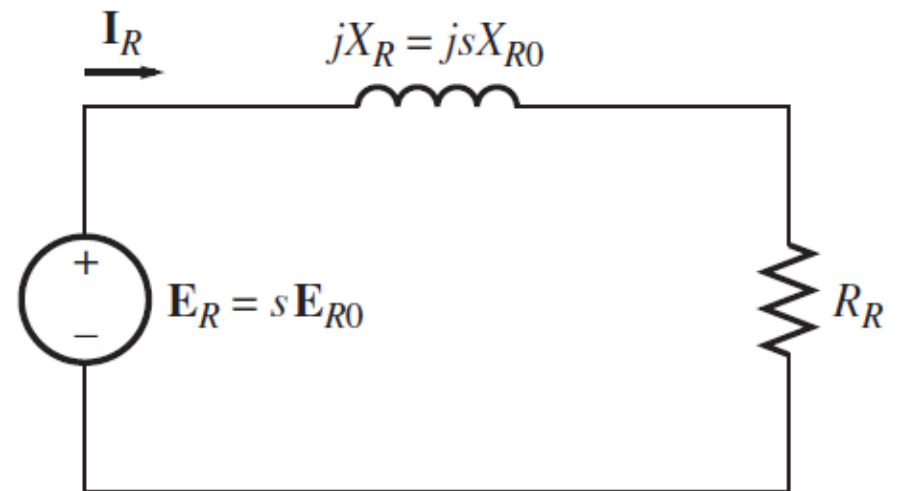
Extraído del capítulo 5 (motor asíncrono), arranque con devanado de amortiguamiento

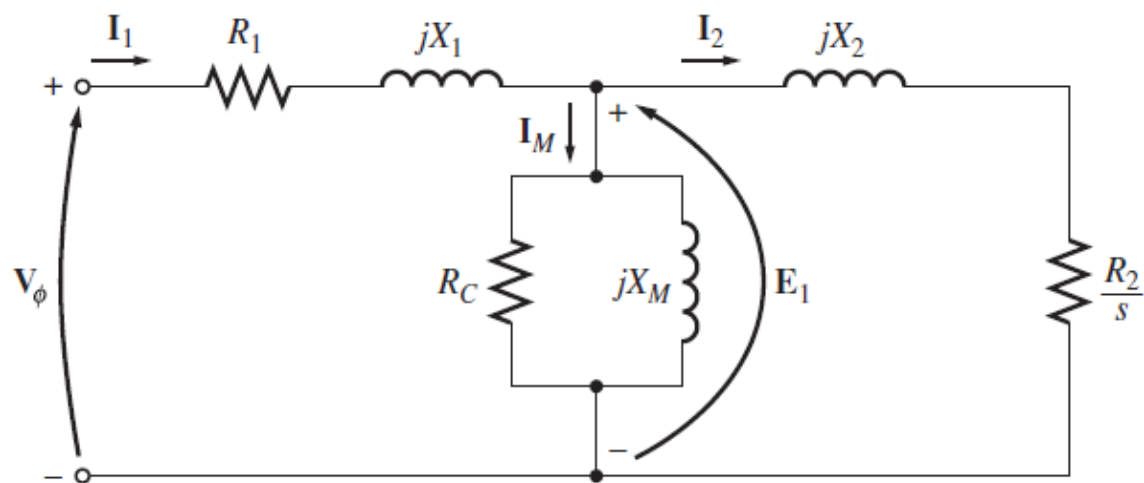
# Circuito Equivalente





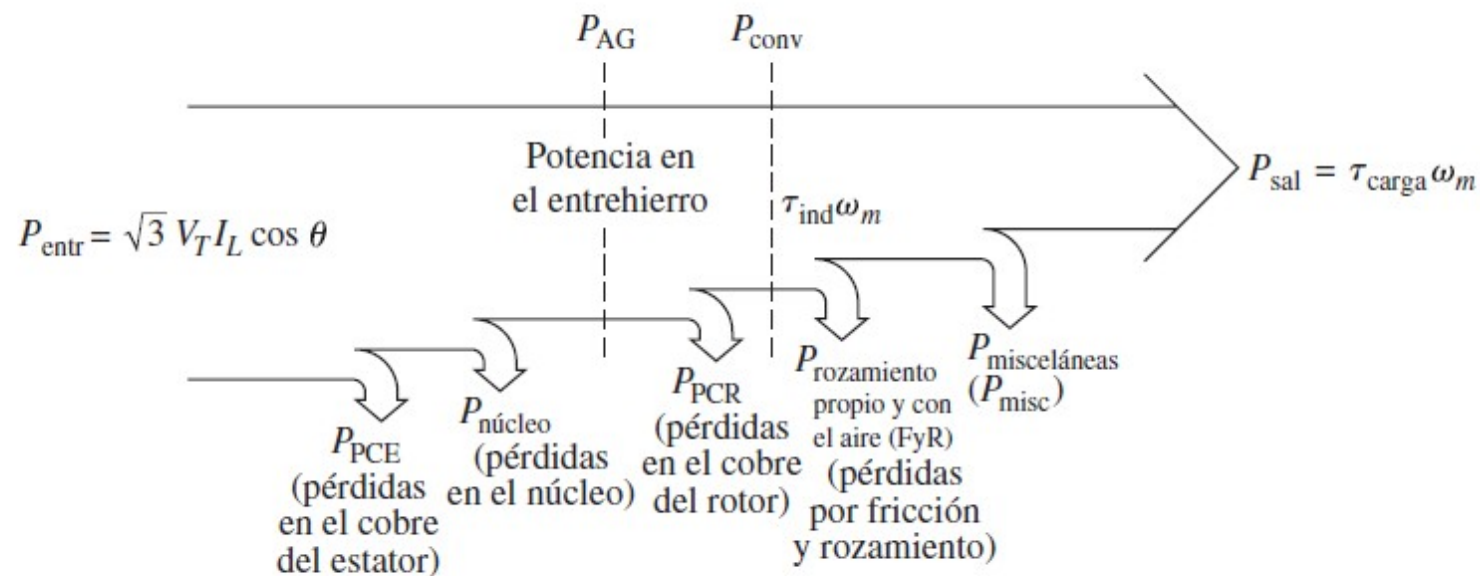
# Circuito Equivalente del Rotor





**FIGURA 6-12** Circuito equivalente por fase de un motor de inducción.

# Pérdidas y diagramas de flujos de potencias



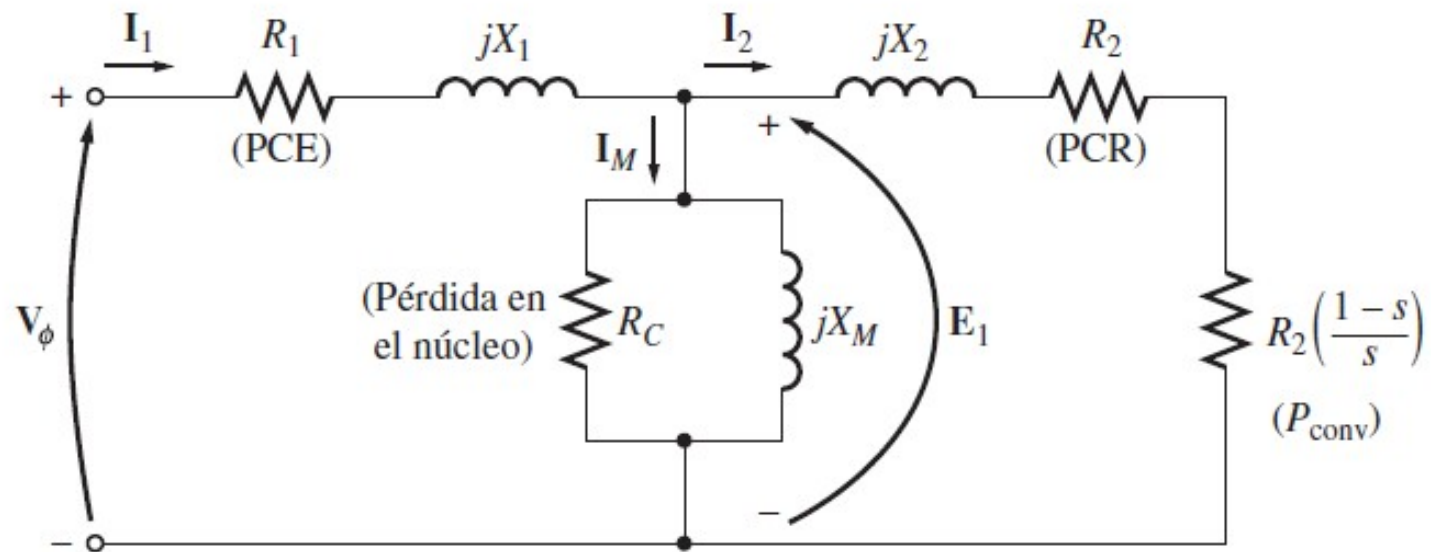
**FIGURA 6-13** Diagrama de flujo de potencia de un motor de inducción.

## Ejemplo 2

A un motor de inducción trifásico de 480 V, 60 Hz y 50 hp se le suministran 60 A con un factor de potencia de 0.85 en retraso. Las pérdidas de cobre del estator son de 2 kW y las pérdidas en el cobre del rotor son de 700 W. Las pérdidas por fricción y rozamiento con el aire son de 600 W, las pérdidas en el núcleo son de 1 800 W y las misceláneas son despreciables. Encuentre las siguientes cantidades:

- a) Potencia en el entrehierro  $P_{EH}$
- b) Potencia convertida  $P_{conv}$
- c) Potencia de salida  $P_{sal}$
- d) Eficiencia del motor

# Potencia y Par de Motor de Inducción



**FIGURA 6-14** Circuito equivalente por fase con pérdidas en el rotor y  $P_{núcl}$  separadas.

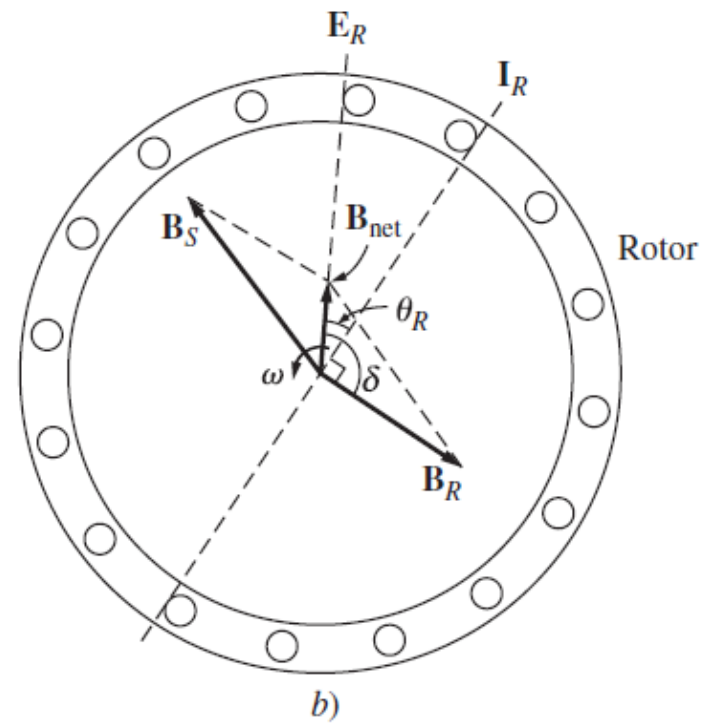
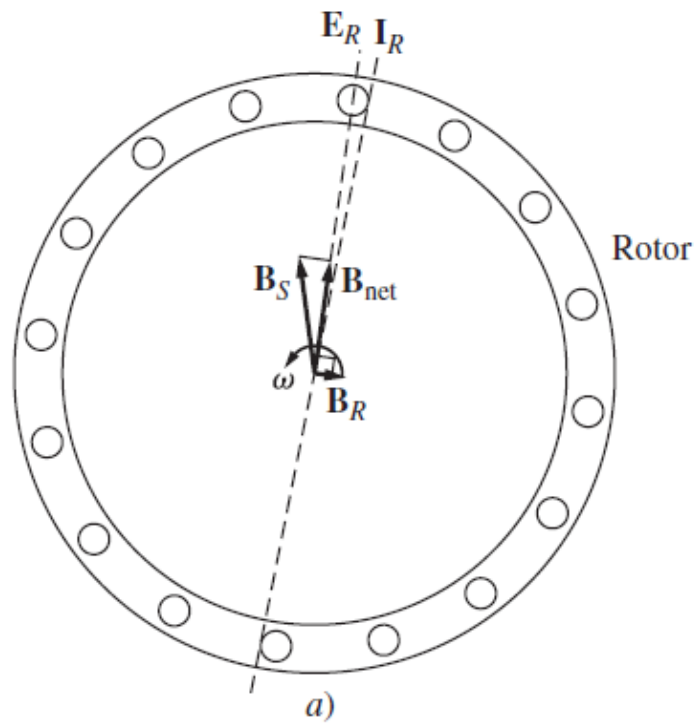
# Ejemplo 3

- Un motor de inducción con cuatro polos, de 460 V, 25 hp, 60 Hz, conectado en Y, tiene las siguientes impedancias en ohms por fase referidas al circuito del estator:
- $R_1=0.641$ ;  $X_1=1.106$  ;  $R_2=0.332$ ;  $X_2=0.464$   $X_M=26.3$
- Las pérdidas por rotación totales son de 1100 W y se supone que son constantes. Las pérdidas en el núcleo se agrupan con las pérdidas por rotación. Para un deslizamiento del rotor de 2.2% a voltaje y frecuencia nominales, encuentre las siguientes cantidades del motor:
  - a) Velocidad
  - b) Corriente del estator
  - c) Factor de potencia
  - d)  $P_{conv}$  y  $P_{sal}$
  - e)  $t_{ind}$  y  $t_{carga}$
  - f) Eficiencia

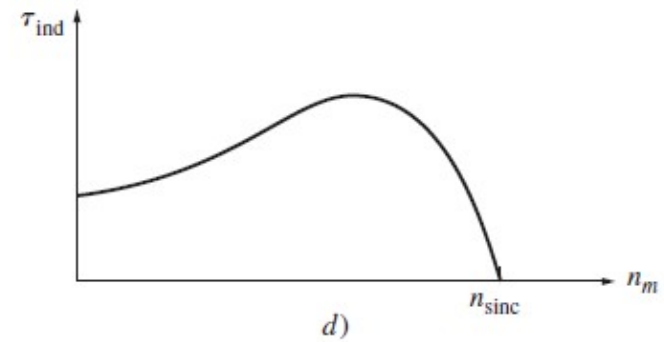
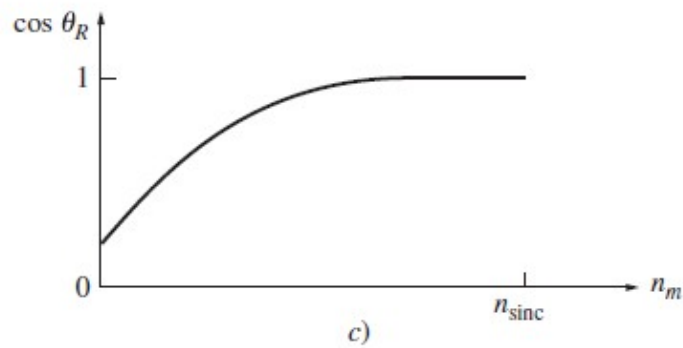
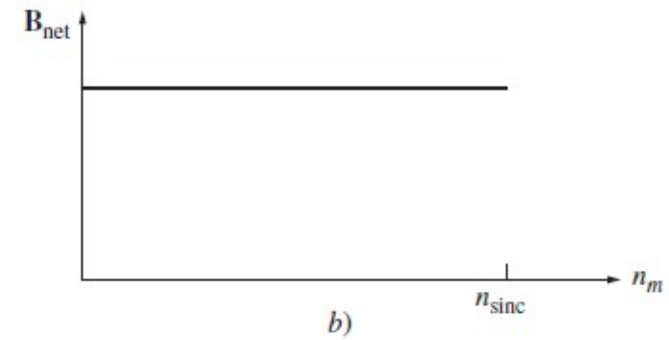
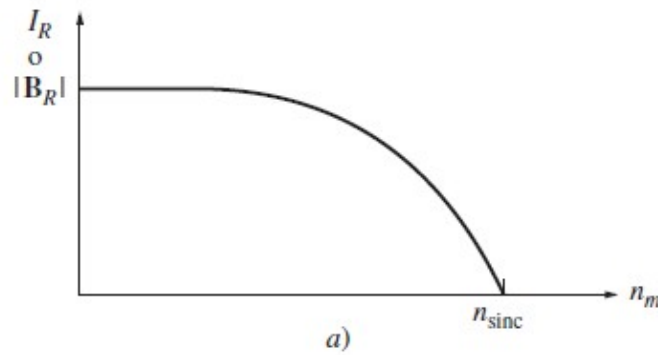
# Par inducido desde el punto de vista físico

$$\tau_{\text{ind}} = k \mathbf{B}_R \times \mathbf{B}_{\text{net}}$$

$$\tau_{\text{ind}} = k \mathbf{B}_R \times \mathbf{B}_{\text{net}} \sin \delta$$



# Par inducido desde el punto de vista físico

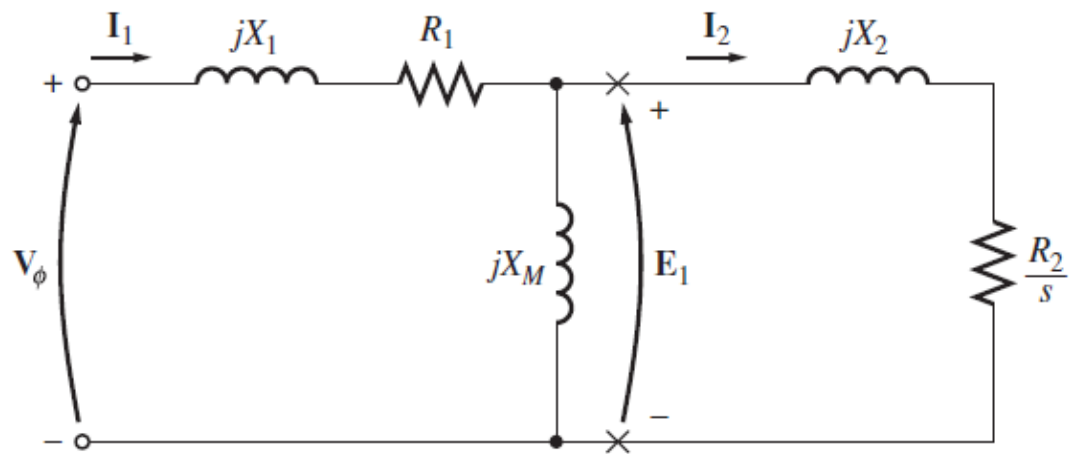




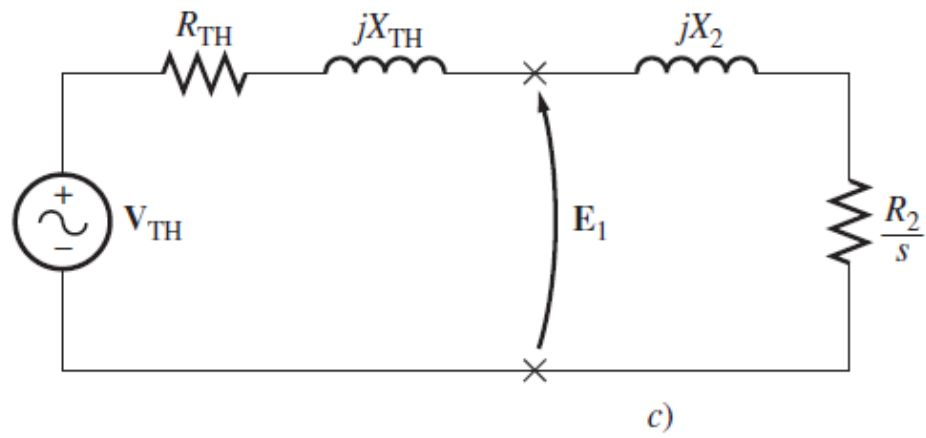
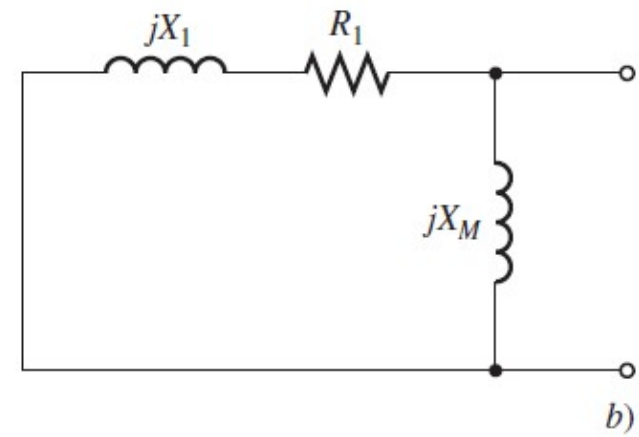
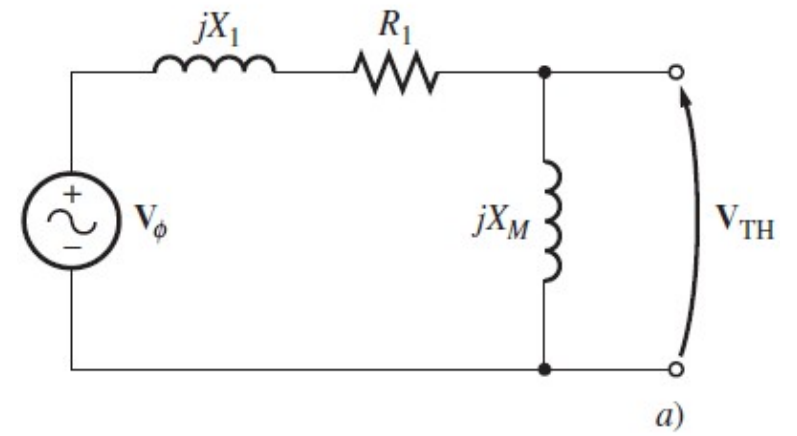
# Deducción del par inducido

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

$$\tau_{\text{ind}} = \frac{P_{\text{EH}}}{\omega_{\text{sinc}}}$$



**FIGURA 6-17** Circuito equivalente por fase de un motor de inducción.



# Características Par-Velocidad

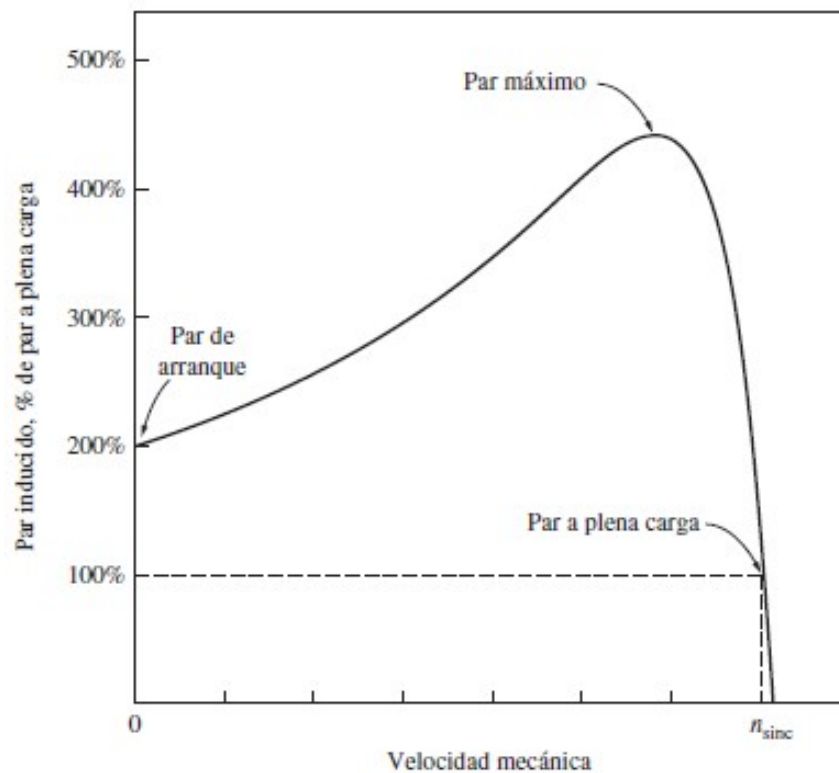
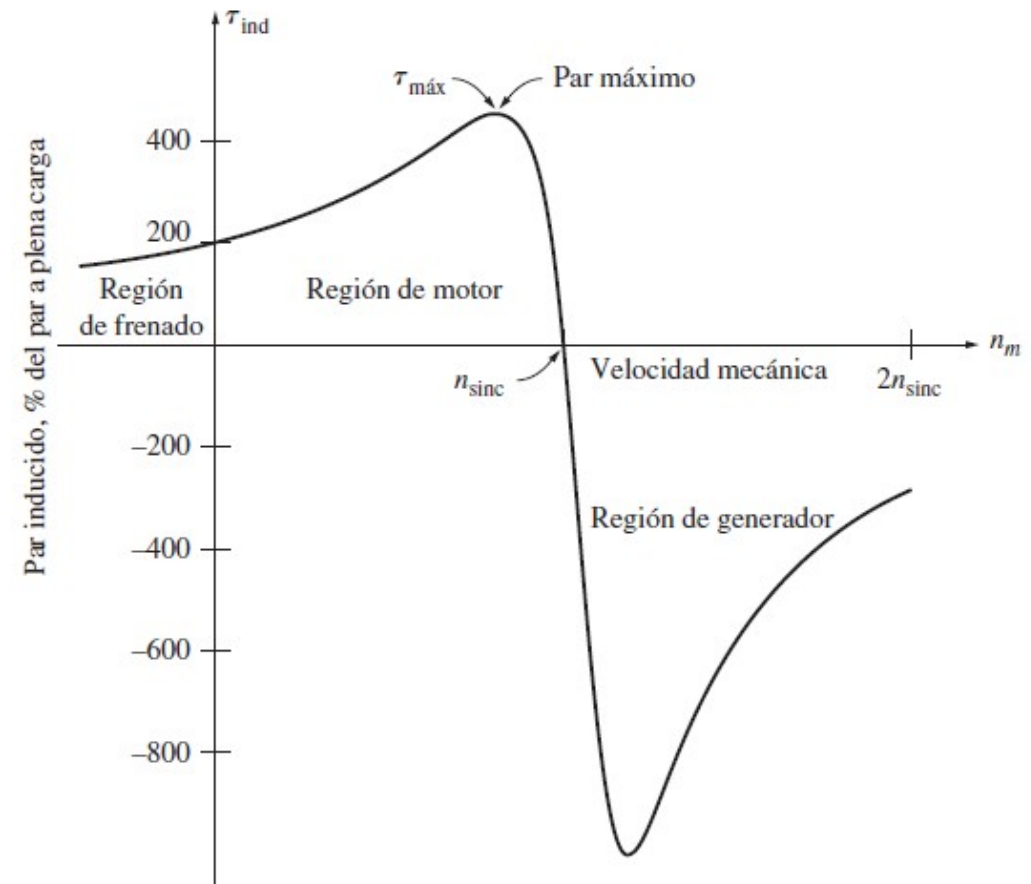
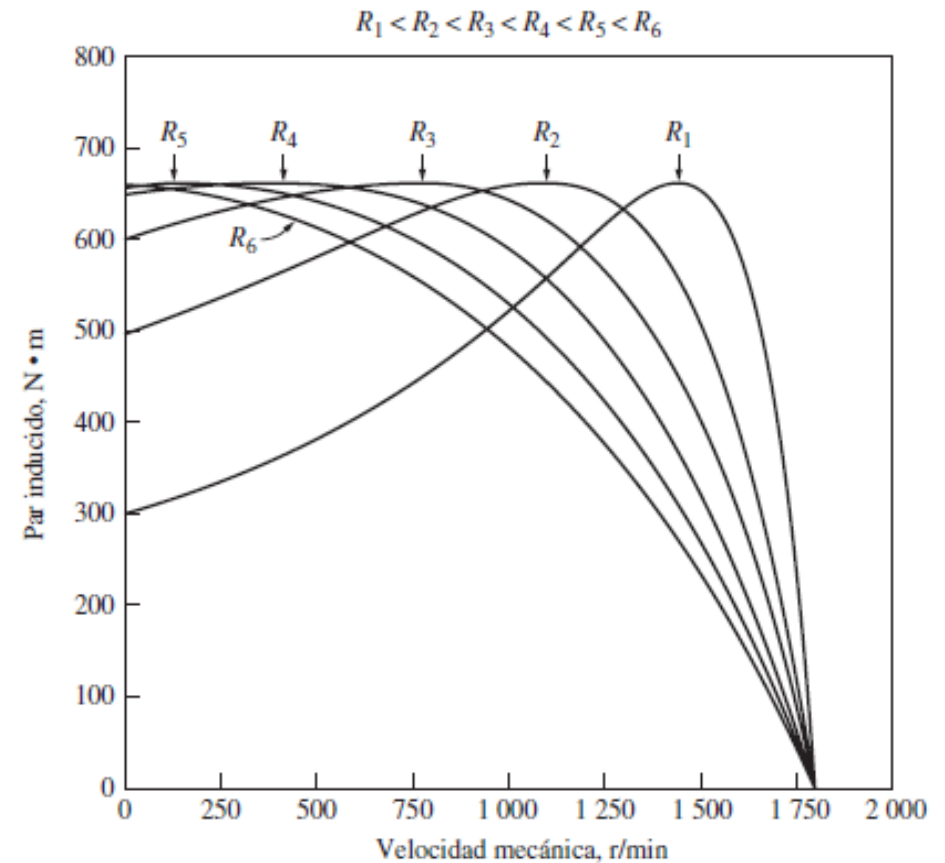
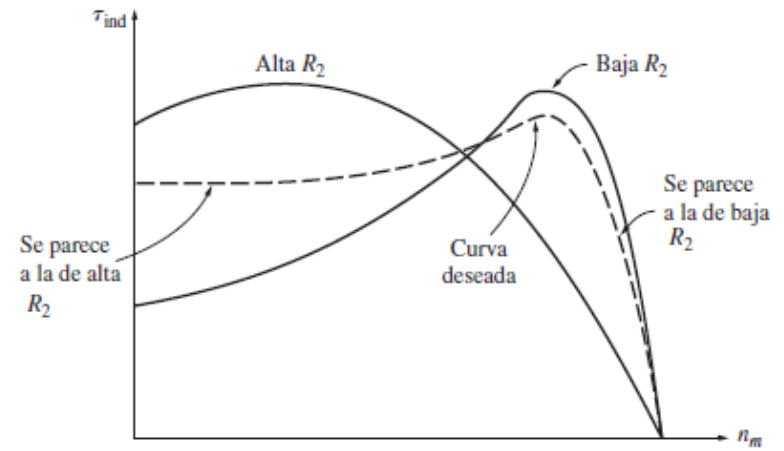


FIGURA 6-19 Curva característica par-velocidad de un motor de inducción típico.



# Características Par Velocidad





**FIGURA 6-24** Curva característica par-velocidad que combina los efectos de alta resistencia a bajas velocidades (deslizamiento alto) con efectos de baja resistencia a altas velocidades (deslizamiento bajo).

# Modificación de las Características de un motor jaula de ardilla

- Control de las características del motor mediante el diseño del rotor de jaula de ardilla

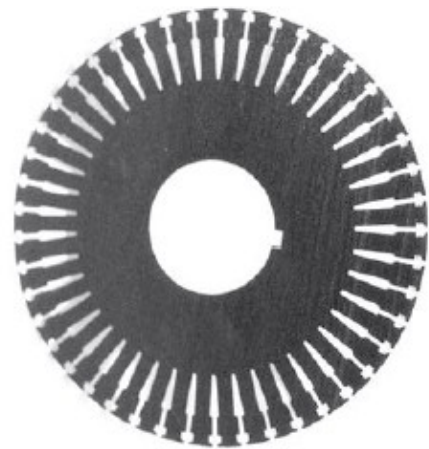
# Control de las características del motor mediante el diseño del rotor de jaula de ardilla



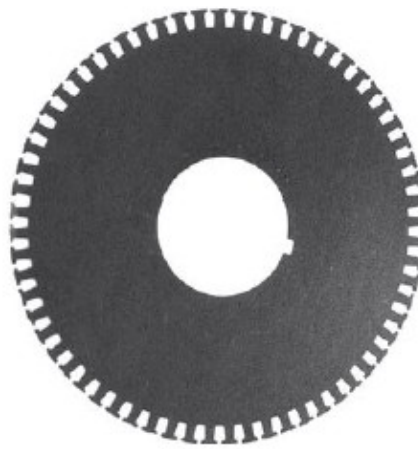
a)



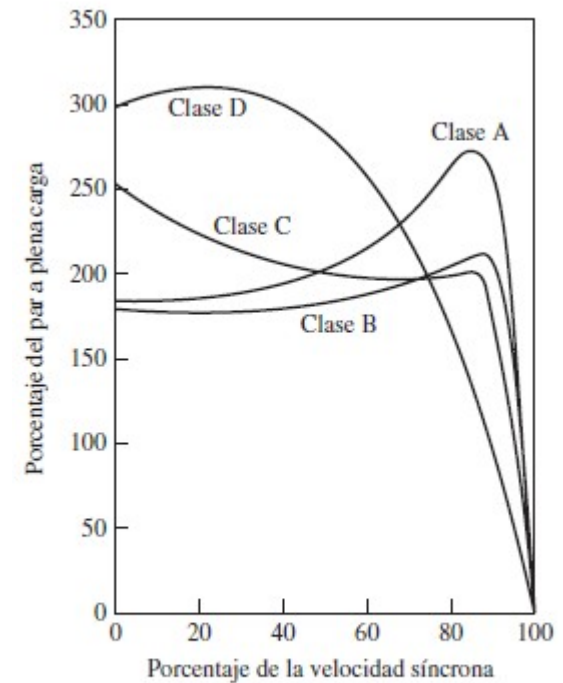
b)



c)

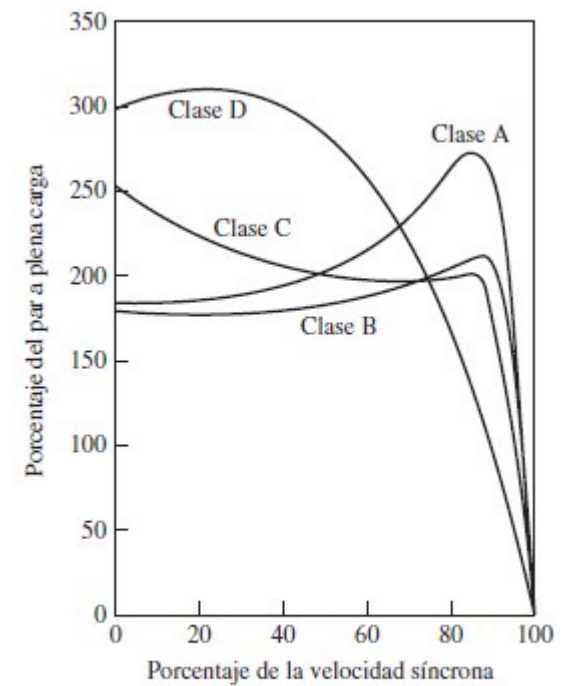
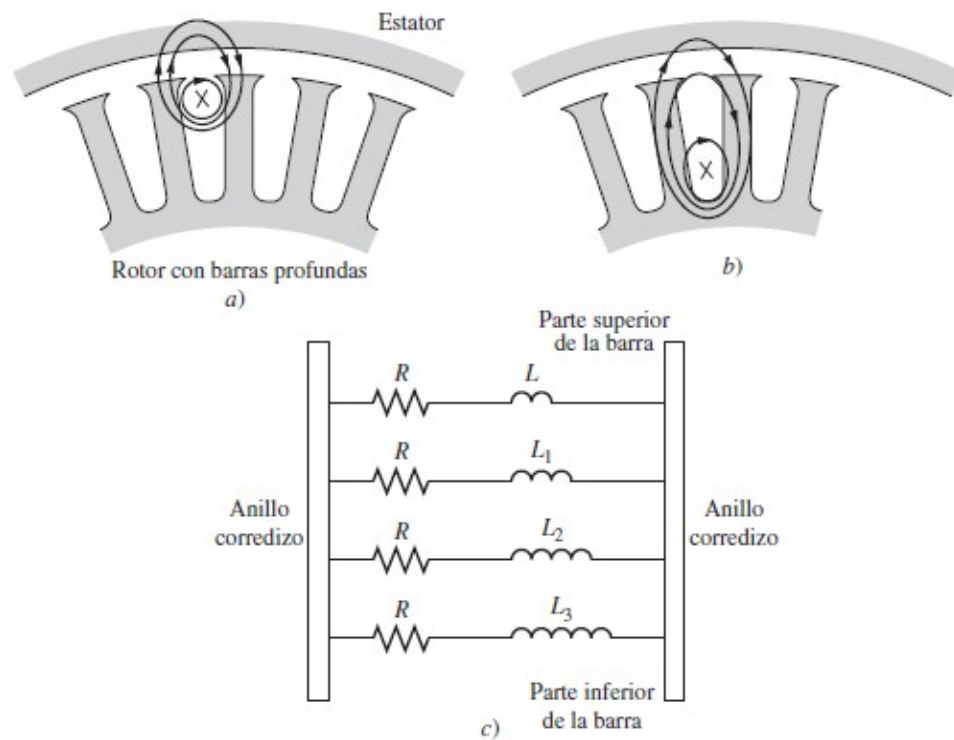


d)



**FIGURA 6-26** Curvas par-velocidad típicas para los diferentes diseños de rotor.

# Diseños de rotores de barra profunda y de doble jaula



**FIGURA 6-26** Curvas par-velocidad típicas para los diferentes diseños de rotor.



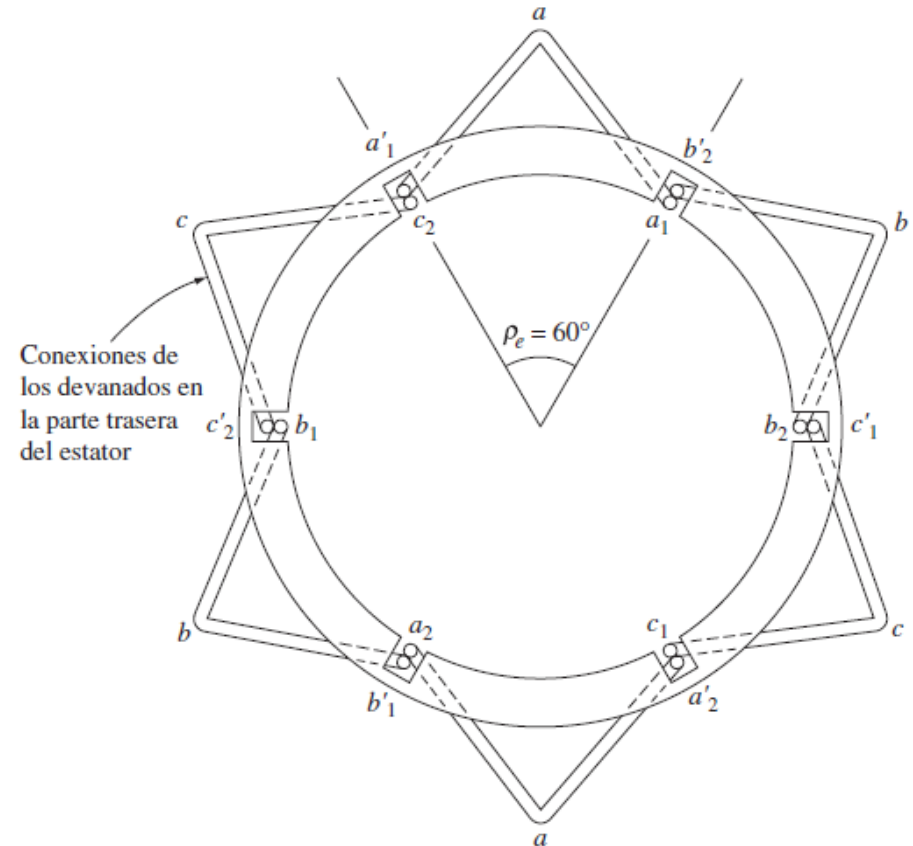
# Control de Velocidad

- Mediante el cambio de  $n^\circ$  de polos
- Mediante el cambio en la frecuencia de la línea
- Mediante el cambio del voltaje de línea
- Mediante el cambio de la resistencia del rotor

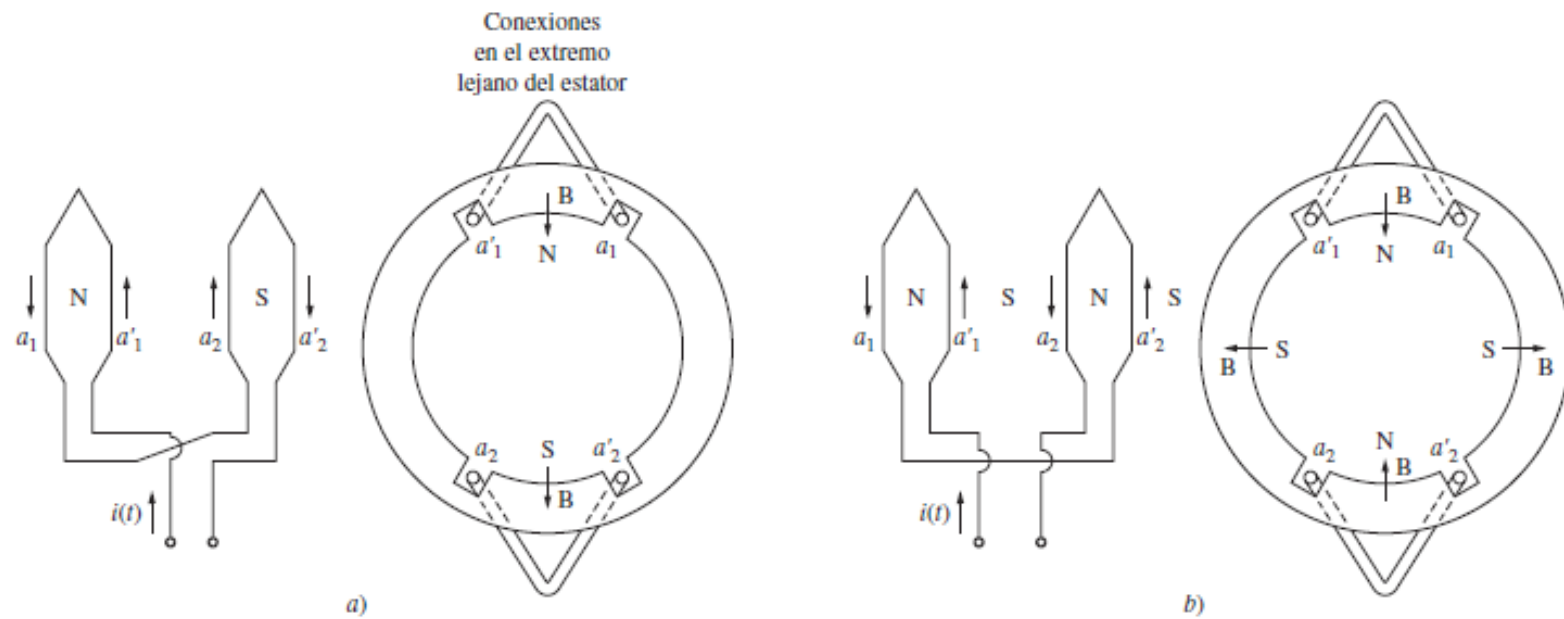
$$n_{\text{sinc}} = \frac{120 f_e}{P}$$

# Control de Velocidad por cambio en número de polos

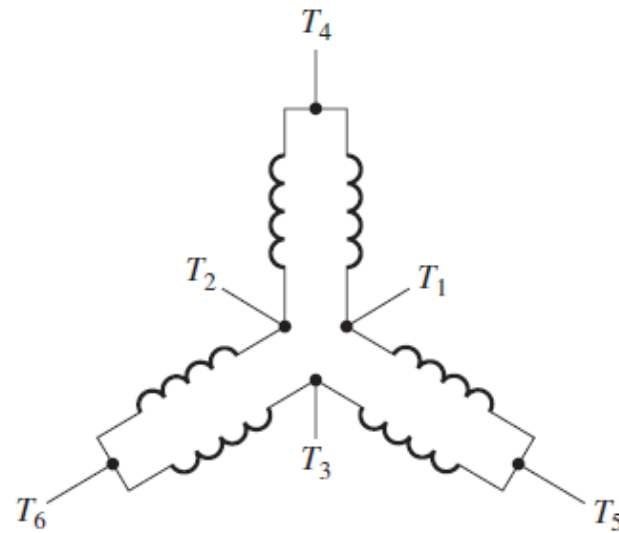
- Método de los polos consecuentes (2 velocidades relación de 2:1)
- Método de los devanados múltiples (permiten mayores velocidades, por ejemplo 4)



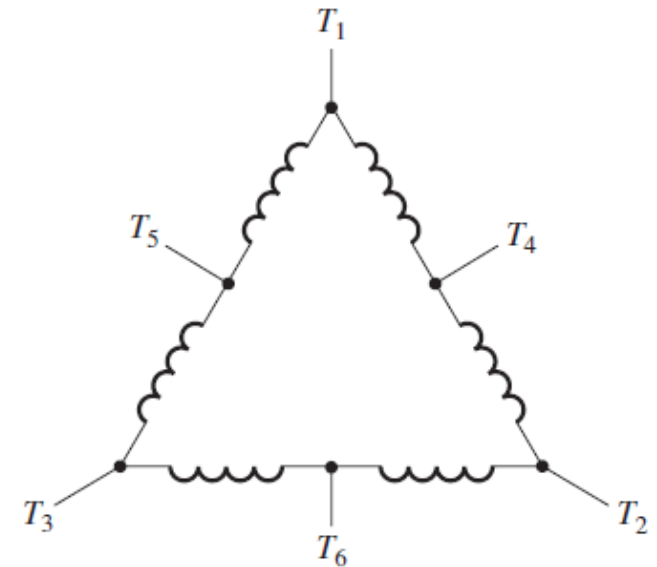
# Control de Velocidad por cambio en número de polos



# Control de Velocidad por cambio en número de polos

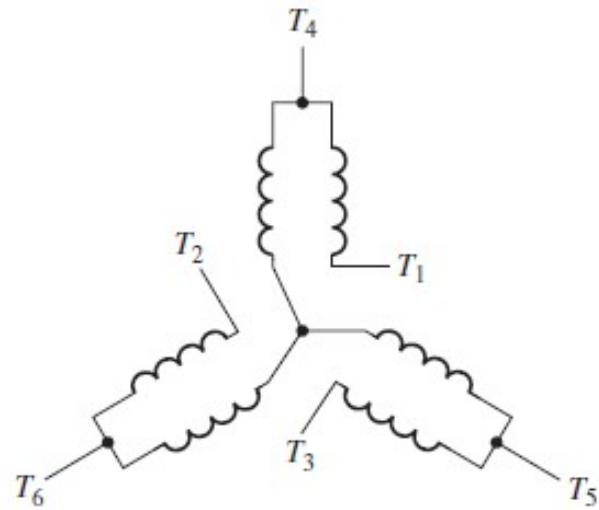


Velocidad	Líneas			
	$L_1$	$L_2$	$L_3$	
Baja	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4, T_5, T_6$ abiertos
Alta	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_1 - T_2 - T_3$ juntos

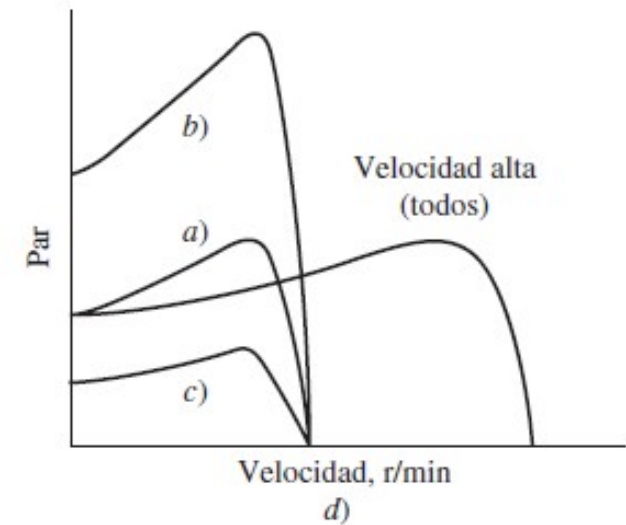


Velocidad	Líneas			
	$L_1$	$L_2$	$L_3$	
Baja	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_1 - T_2 - T_3$ juntos
Alta	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4, T_5, T_6$ abiertos

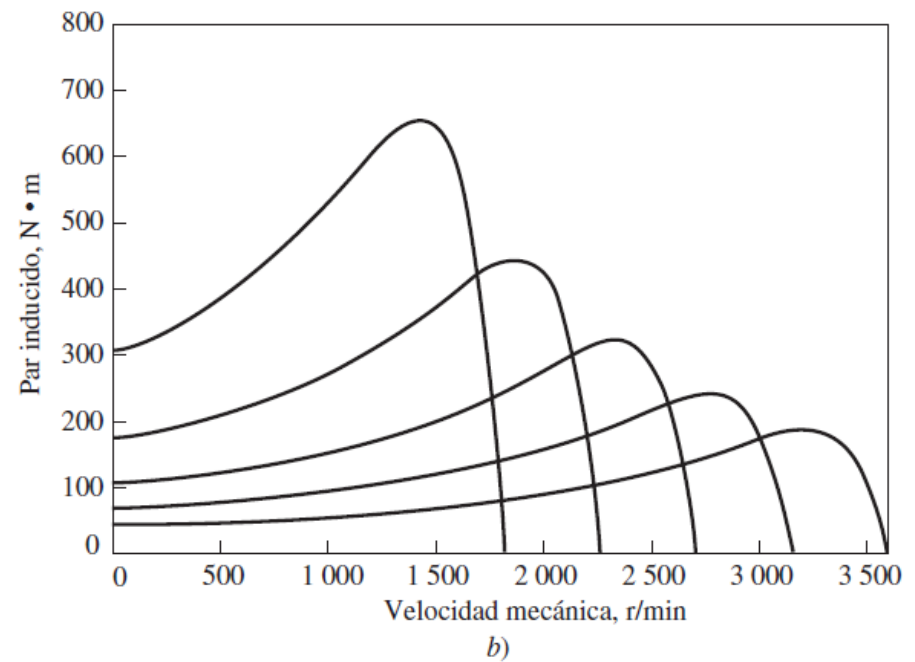
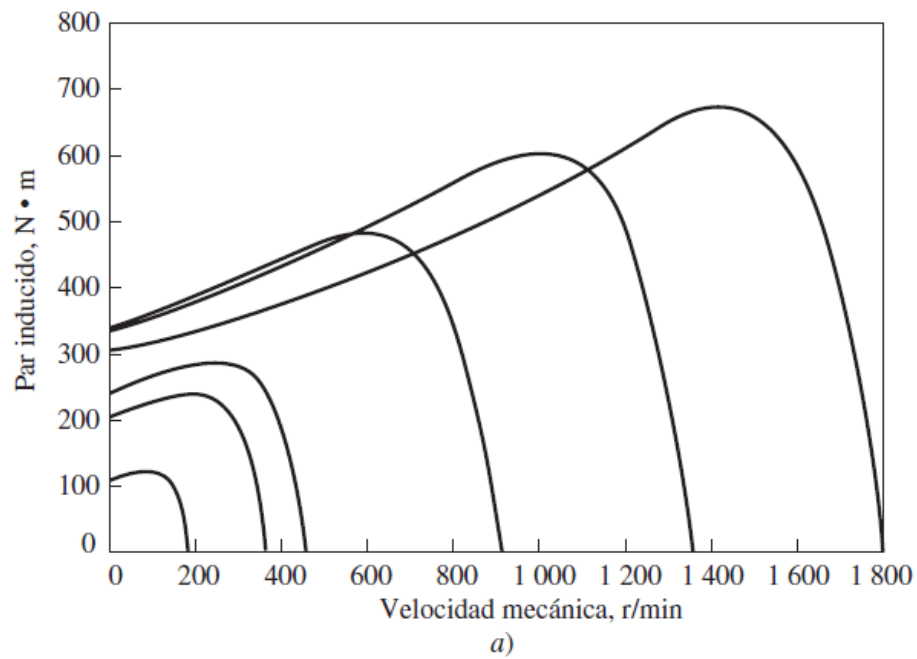
# Control de Velocidad por cambio en número de polos



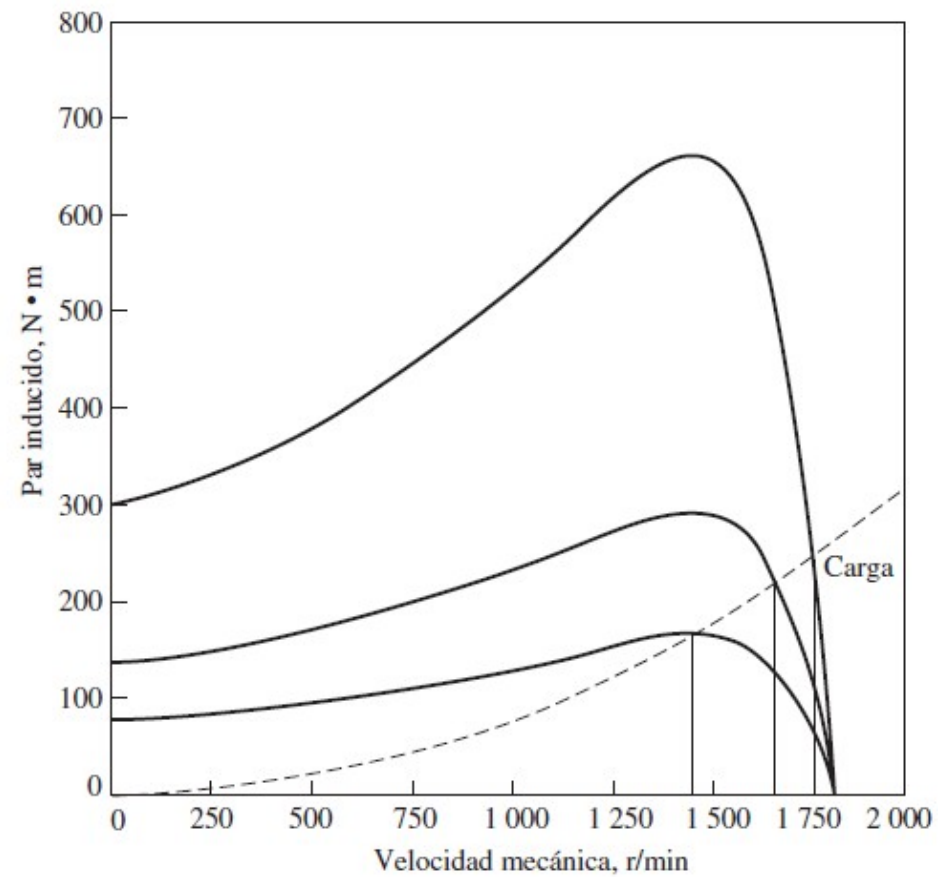
Velocidad	Líneas			
	$L_1$	$L_2$	$L_3$	
Baja	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4, T_5, T_6$ abiertos
Alta	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_1 - T_2 - T_3$ juntos



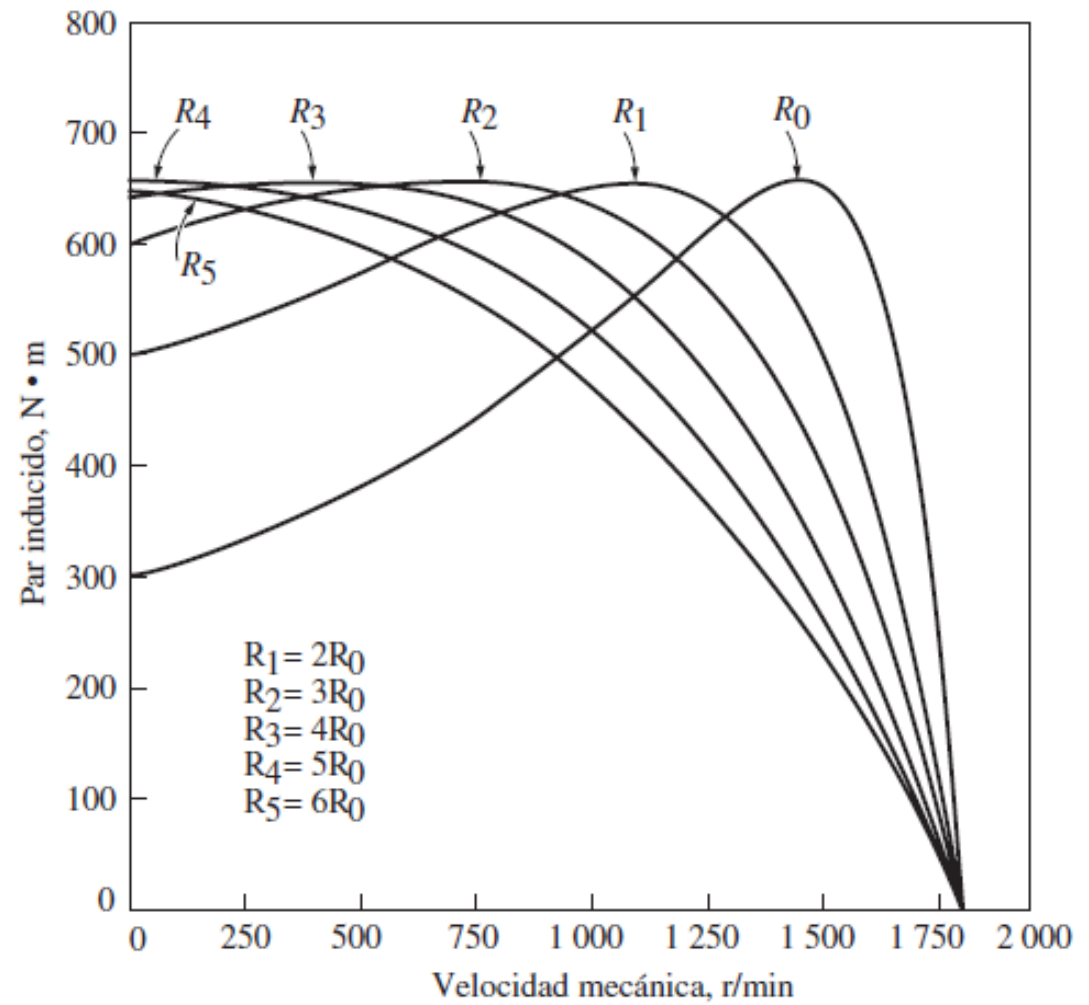
# Control de Velocidad mediante cambio en la frecuencia de línea



# Control de velocidad mediante el cambio del voltaje de línea



# Control de velocidad mediante el cambio de la resistencia del rotor

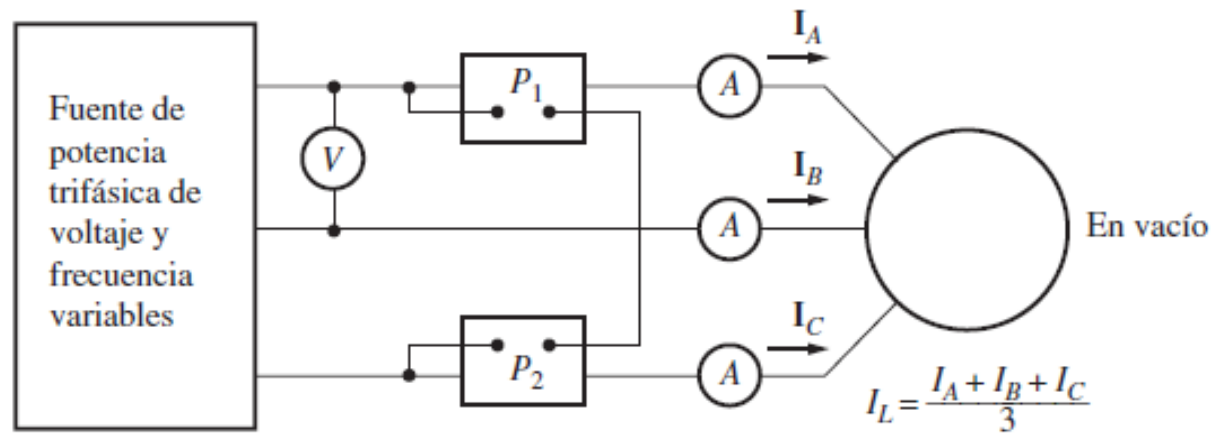




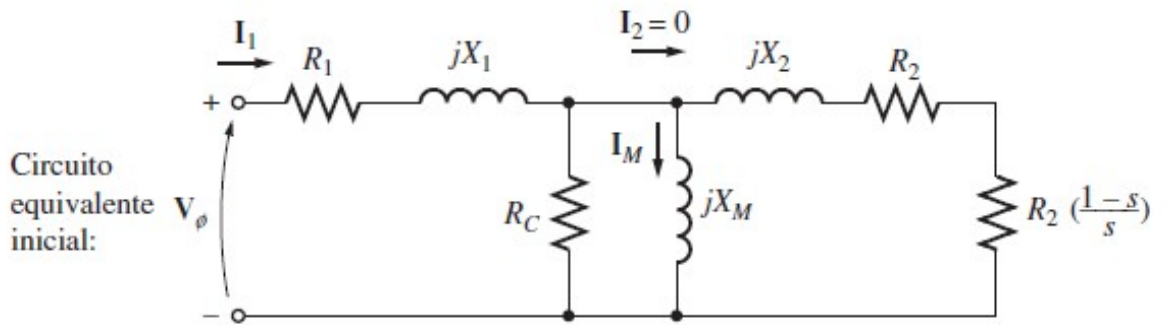
# Ensayos de Transformadores

- Ensayo en Vacío.
- Prueba de cc para determinar resistencia estatórica.
- Ensayo de Rotor Bloqueado.

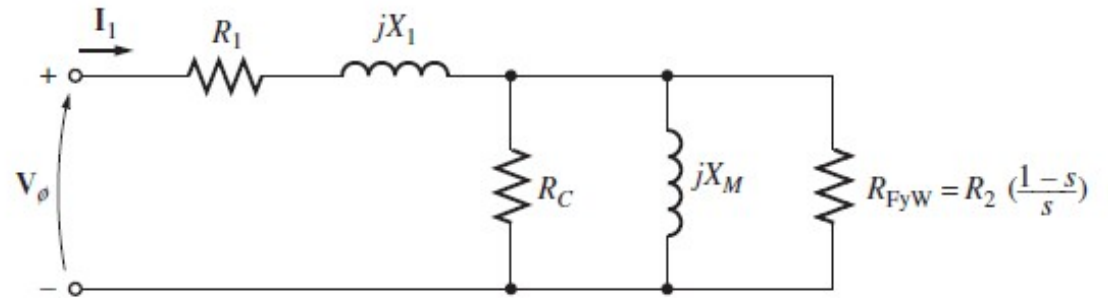
# Ensayo en Vacío



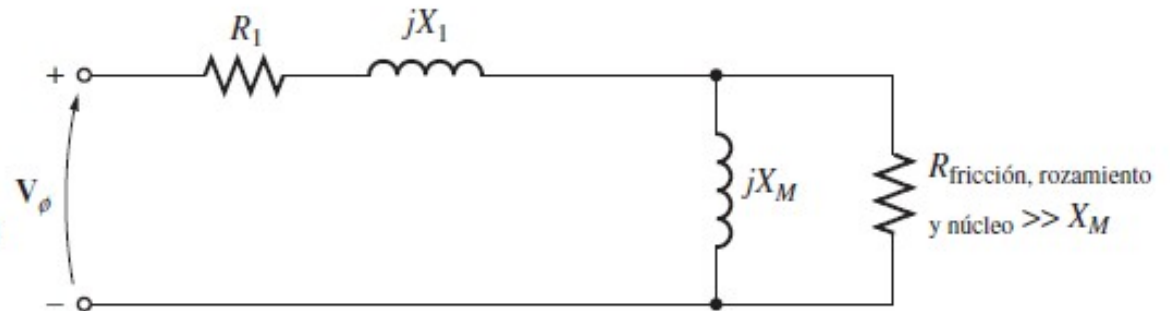
# Ensayo de Vacío



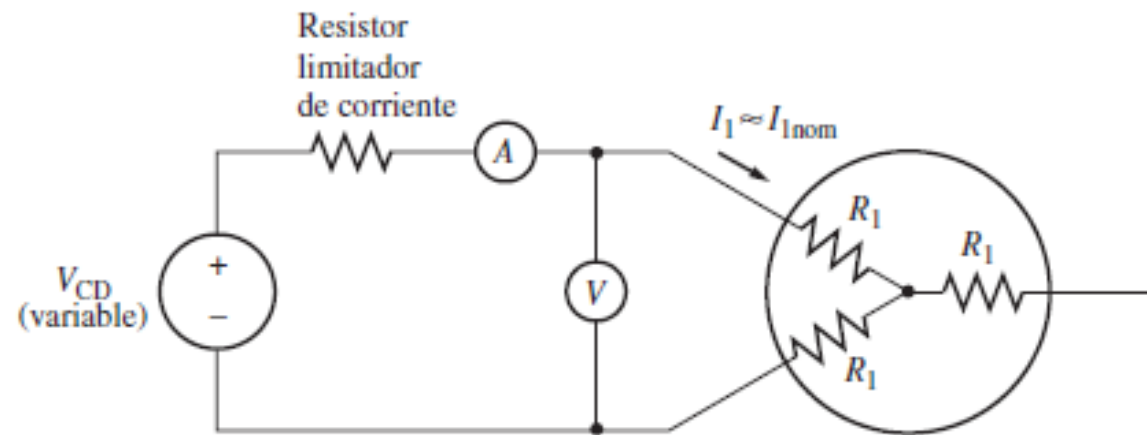
Puesto que  
 $R_2 \left(\frac{1-s}{s}\right) \gg R_2$   
 y  
 $R_2 \left(\frac{1-s}{s}\right) \gg X_2$ ,  
 este circuito  
 se reduce a:



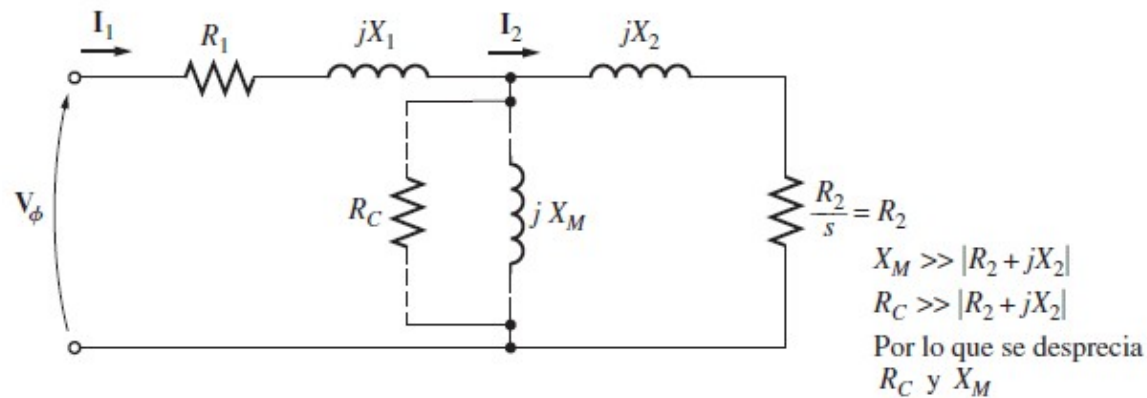
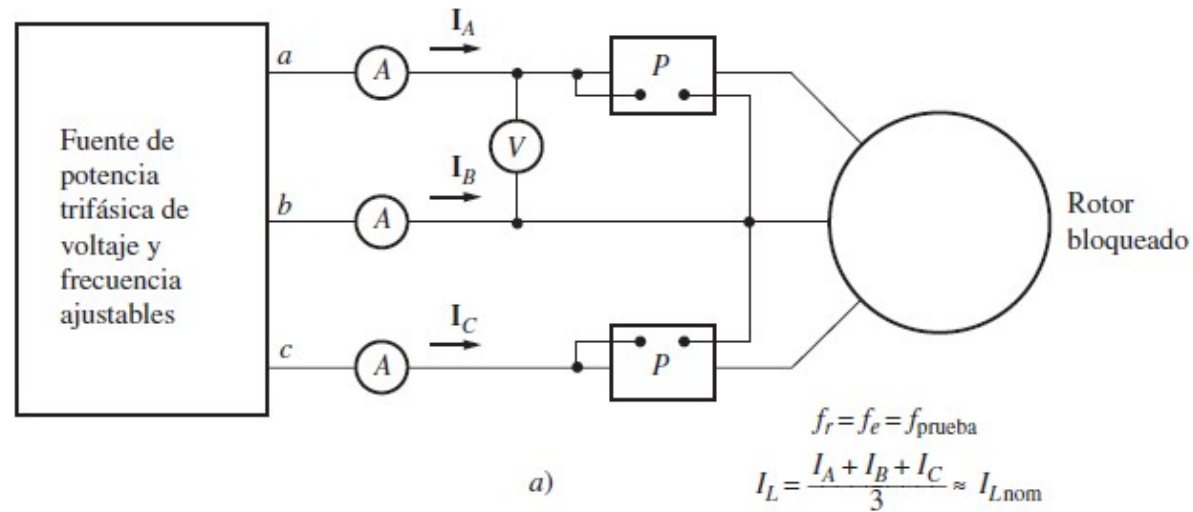
La combinación  
 de  $R_{FyW}$  y  $R_C$   
 da como resultado:



# Prueba de cd para determinar la resistencia del estator



# Prueba de Rotor Bloqueado



# Prueba de Rotor Bloqueado

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

**FIGURA 6-56** Reglas prácticas para dividir la reactancia del circuito del estator y del rotor.

# Bibliografía

- Máquinas Eléctricas 5Ed- Stephen Chapman , capítulo 6 (Fragmentos del capítulo 3 y 5)
- Máquinas Eléctricas 5 Ed– Fraile Mora – Capítulo 2 y 4