



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

MÁQUINAS ELÉCTRICAS: MOTOR DE INDUCCIÓN

EDUARDO MOJICA NAVA, Ph.D.

PAAS-UN Research Group
Department of Electrical and Electronics Engineering
National University of Colombia
2013



CONSTRUCCIÓN DEL MOTOR

Principal característica: No se requiere corriente DC de campo para operar la máquina.

- Se usa como motor, porque como generador tiene muchas desventajas.
- La construcción del rotor es diferente (el estator es igual)
 - Rotor jaula de ardilla
 - Rotor Devanado (más costoso, más mantenimiento, poco utilizado)

Rotor Jaula de Ardilla

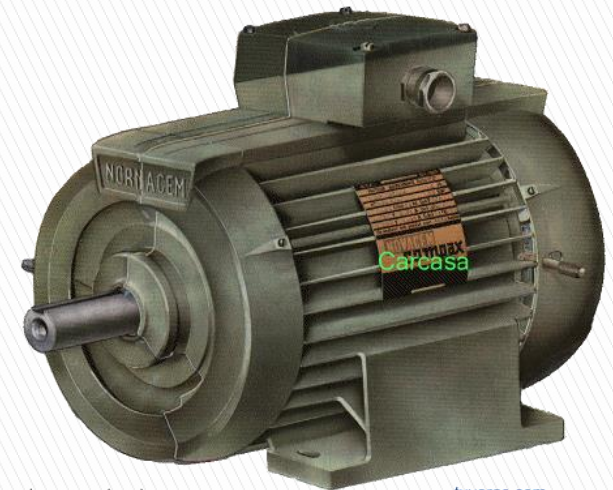
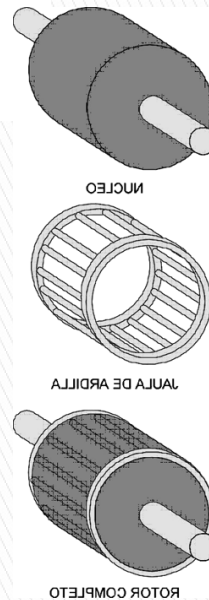
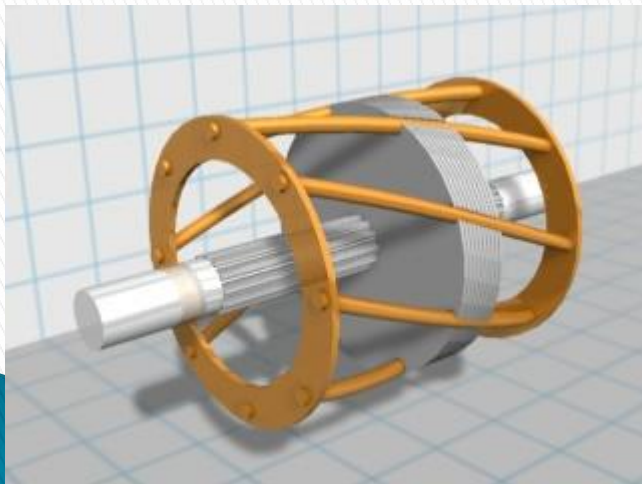
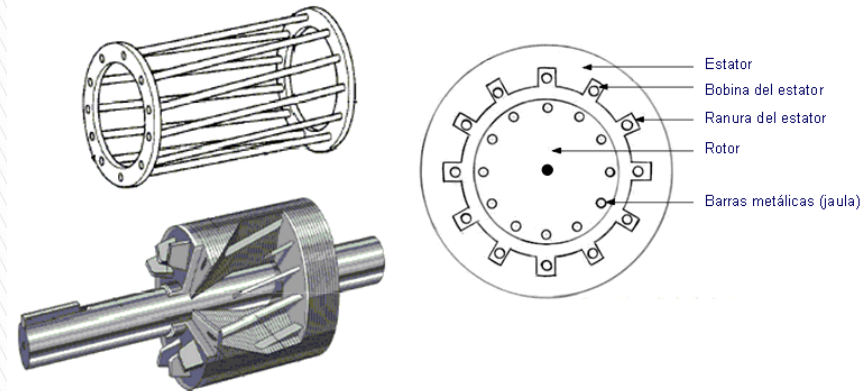
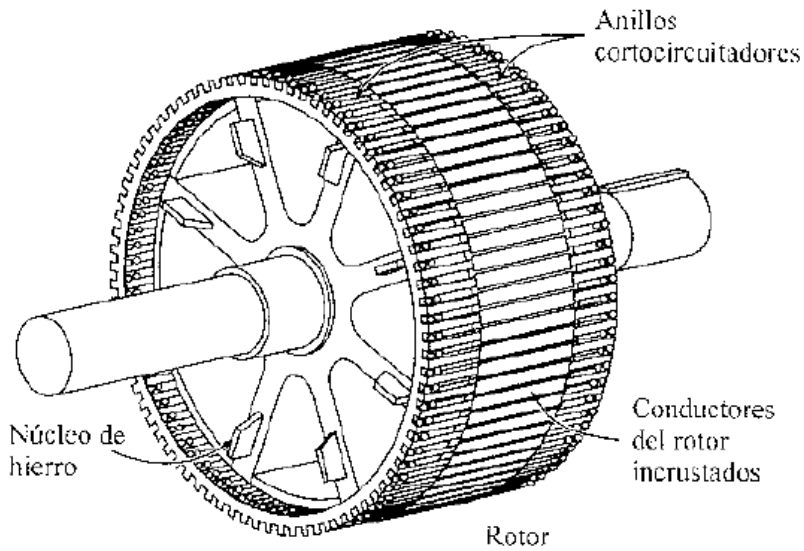
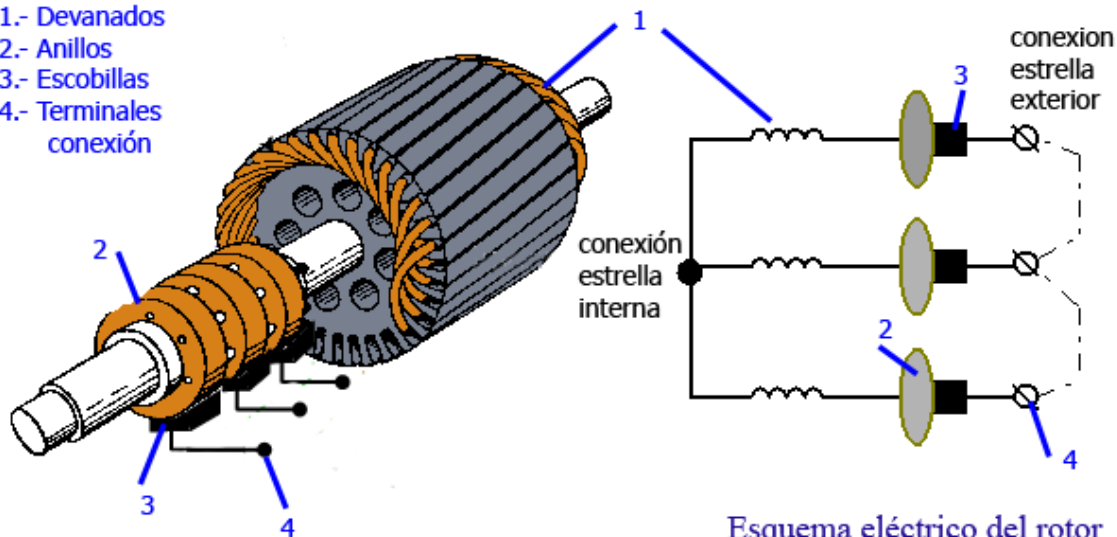


imagen animada

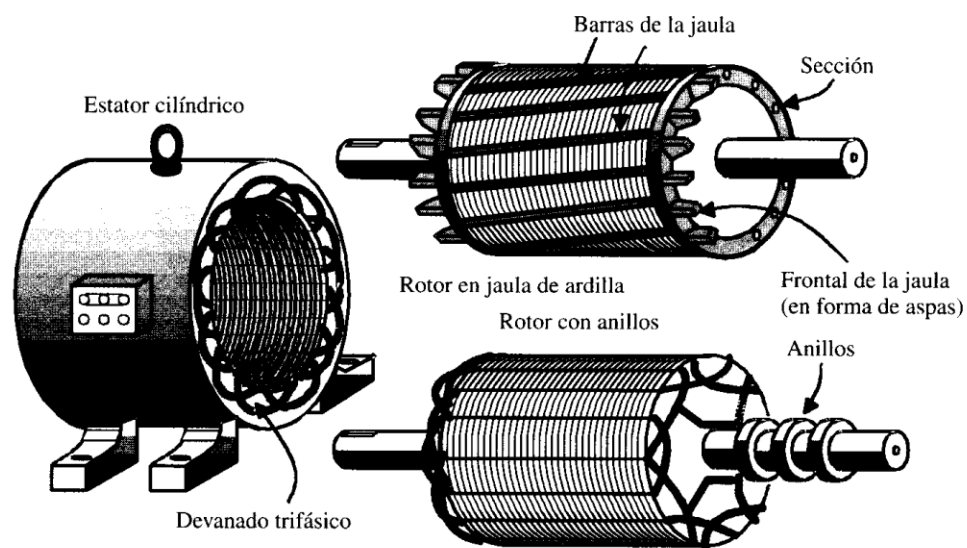
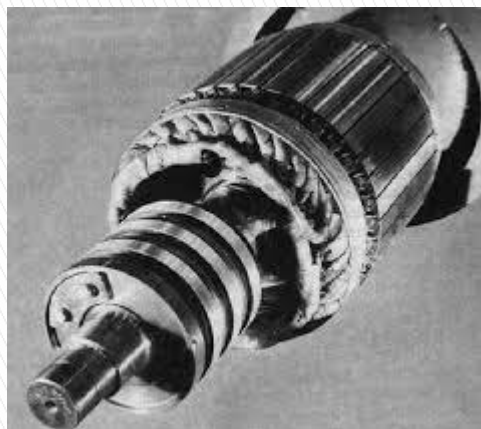
tuveras.com

Rotor Devanado

- 1.- Devanados
- 2.- Anillos
- 3.- Escobillas
- 4.- Terminales conexión



Esquema eléctrico del rotor



Tipos de máquinas asíncronas o de inducción.

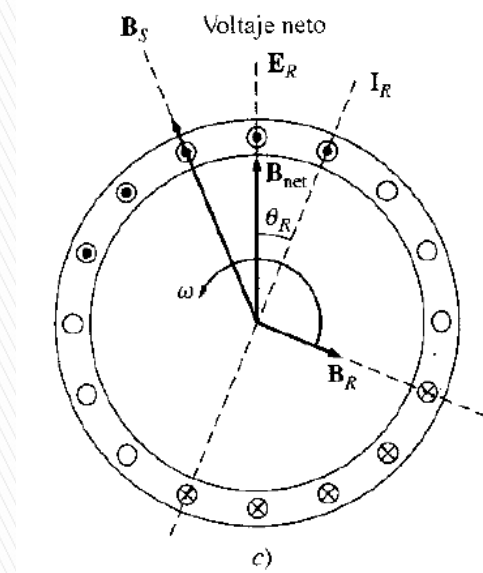
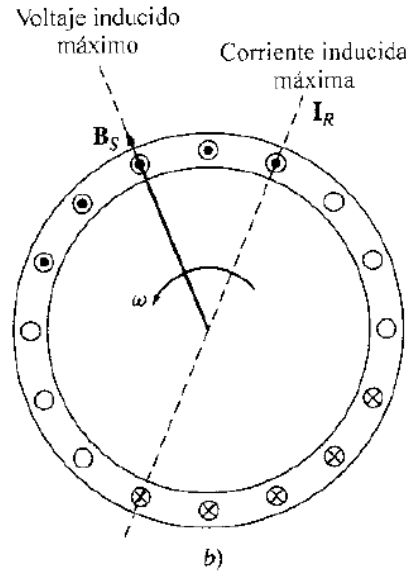
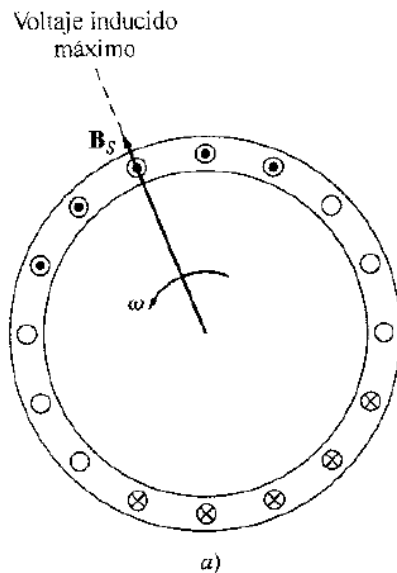


Conceptos Básicos

Desarrollo del Par Inducido

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

Velocidad de rotación del campo magnético B_s



$$\tau_{\text{ind}} = k B_R \times B_S$$

Par inducido

Nota: Un motor de inducción puede acelerarse hasta una velocidad cercana a n_{sinc} pero no alcanzarla (se detendría). B_s y B_r si van a la n_{sinc}

Conceptos Básicos

Deslizamiento del Rotor

- ▶ **Velocidad de deslizamiento** (movimiento relativo entre el rotor y los campos magnéticos):

$$n_{\text{des}} = n_{\text{sinc}} - n_m$$

donde n_{des} = velocidad de deslizamiento de la máquina
 n_{sinc} = velocidad de los campos magnéticos
 n_m = velocidad mecánica del eje del motor

- ▶ **Deslizamiento:**

$$s = \frac{n_{\text{des}}}{n_{\text{sinc}}} (\times 100\%)$$

$$s = \frac{\omega_{\text{sinc}} - \omega_m}{\omega_{\text{sinc}}} (\times 100\%)$$

$$s = \frac{n_{\text{sinc}} - n_m}{n_{\text{sinc}}} (\times 100\%)$$

$$n_m = (1 - s)n_{\text{sinc}}$$

$$\omega_m = (1 - s)\omega_{\text{sinc}}$$

Conceptos Básicos

Frecuencia Eléctrica en el Rotor

$$f_r = s f_e$$

$$f_r = \frac{P}{120} (n_{\text{sinc}} - n_m)$$

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

Ejemplo 7-1 Un motor de inducción de 208V, 10 hp, cuatro polos, 60 Hz conectado en Y, tiene un deslizamiento de 5% a plena carga.

- a) ¿Cuál es la velocidad sincrónica de este motor?
- b) ¿Cuál es la velocidad del rotor de este motor, con carga nominal?
- c) ¿Cuál es la frecuencia del rotor de este motor, con carga nominal?
- d) ¿Cuál es el par al eje de este motor, con carga nominal?

CIRCUITO EQUIVALENTE

- ▶ Similar al circuito equivalente de un transformador
- ▶ Conocida como máquina de excitación única (la potencia es suministrada sólo por el circuito del estator)

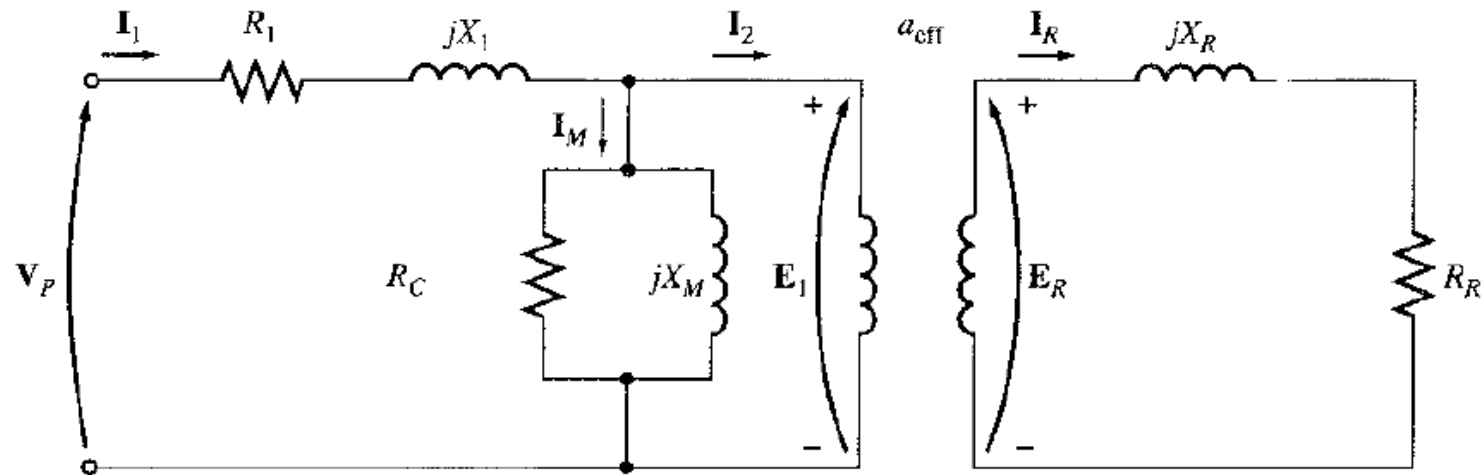


Figura 7-7

Modelo transformador de un motor de inducción con el rotor y el estator conectados por un transformador ideal de relación de vueltas a_{eff} .

Modelo del Rotor

- La magnitud del voltaje inducido para cualquier deslizamiento:

$$E_R = sE_{R_0}$$

$$f_r = sf_e$$

$$X_R = \omega_r L_R = 2\pi f_r L_R$$

El flujo de corriente:

$$\mathbf{I}_R = \frac{\mathbf{E}_R}{R_R + jX_R}$$

$$\mathbf{I}_R = \frac{\mathbf{E}_R}{R_R + jsX_{R_0}}$$

$$\mathbf{I}_R = \frac{\mathbf{E}_{R_0}}{R_R/s + jX_{R_0}}$$

$$\begin{aligned} X_R &= 2\pi sf_e L_R \\ &= s(2\pi f_e L_R) \\ &= sX_{R_0} \end{aligned}$$

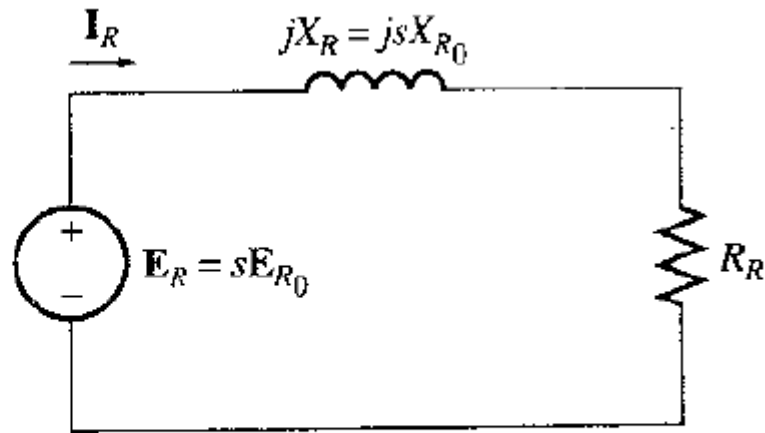


Figura 7-9

Circuito modelo del rotor de un motor de inducción.

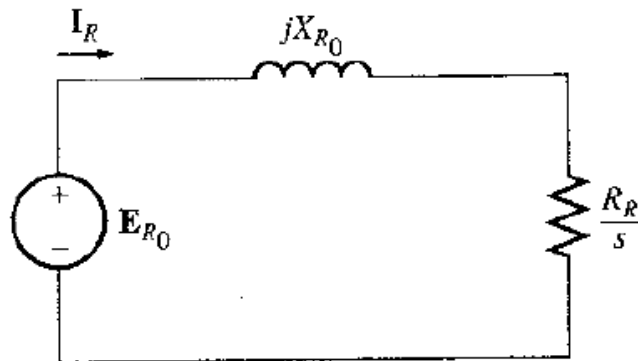
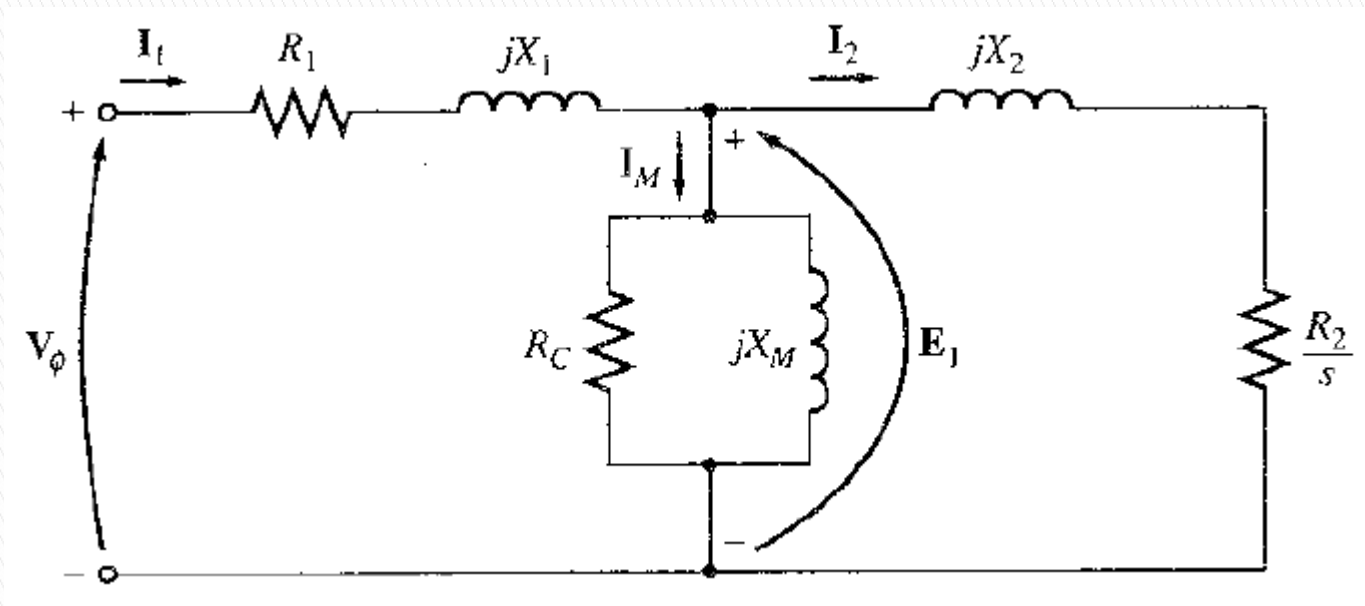


Figura 7-10

Circuito modelo del rotor con todos los efectos de frecuencia (deslizamiento) concentrados en la resistencia R_R .

Circuito Equivalente Final

- Referir al lado del estator la parte del rotor.



$$\mathbf{E}_1 = \mathbf{E}'_R = a_{\text{eff}} \mathbf{E}_{R_0}$$

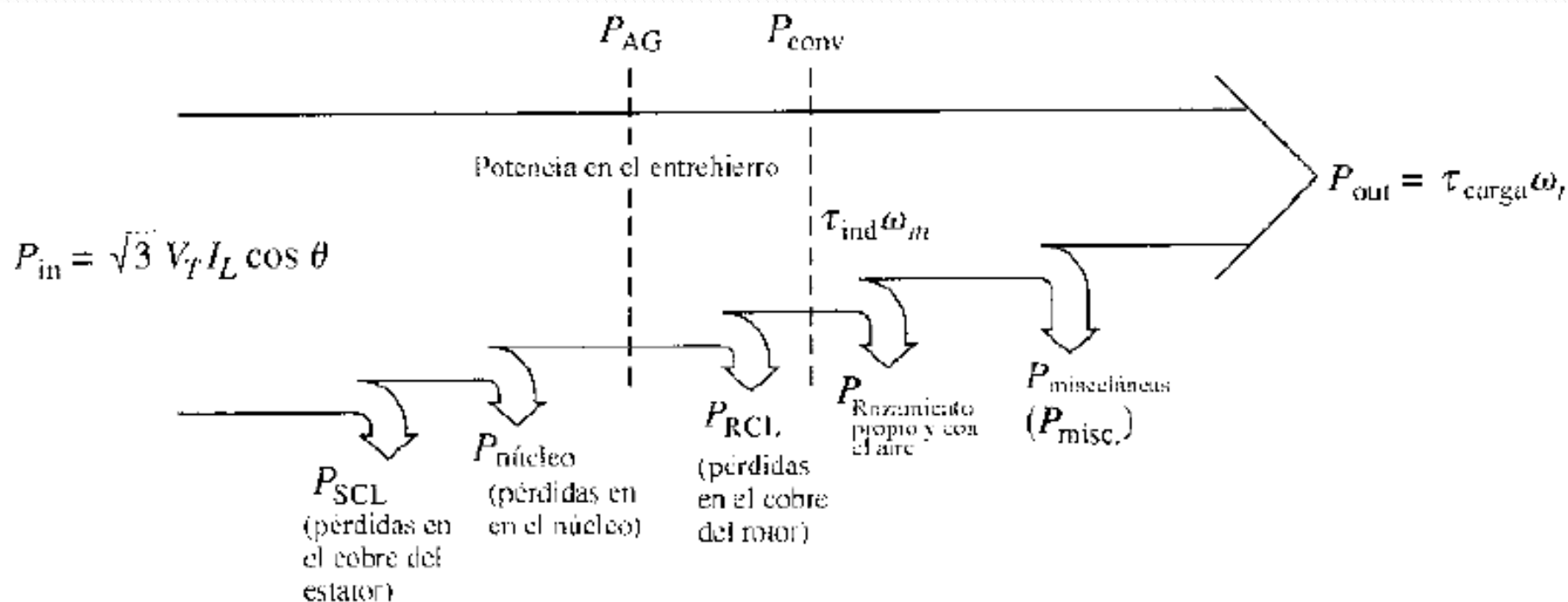
$$\mathbf{I}_2 = \frac{\mathbf{I}_R}{a_{\text{eff}}}$$

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

$$X_2 = a_{\text{eff}}^2 X_{R_0}$$

$$Z_2 = a_{\text{eff}}^2 \left(\frac{R_R}{s} + jX_{R_0} \right)$$

Pérdidas y Flujo de Potencia



Ejemplo 7-2 Un motor de inducción de 480 V, 60 Hz, 50 hp, trifásico, toma 60 A con un factor de potencia de 0.85 en atraso. Las pérdidas en el cobre del estator son 2 kW, y 700 W en el cobre del rotor. Las pérdidas por rozamiento propio y con el aire son 600 W, las pérdidas en el núcleo son 1800 W y las pérdidas misceláneas son despreciables. Encuentre las siguientes cantidades:

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

Potencia y Par

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

Las pérdidas en el núcleo están dadas por

$$P_{\text{núcleo}} = 3E_1^2 G_C$$

de modo que la potencia en el entrehierro puede encontrarse como

$$P_{AG} = P_{in} - P_{SCL} - P_{\text{núcleo}}$$

$$P_{AG} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s}$$

Las pérdidas resistivas reales en el circuito rotor están dadas por la ecuación

$$P_{RCL} = 3I_R^2 R_R$$

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

$$\begin{aligned} P_{\text{conv}} &= P_{AG} - P_{RCL} \\ &= 3I_2^2 \frac{R_2}{s} - 3I_2^2 R_2 \\ &= 3I_2^2 R_2 \left(\frac{1}{s} - 1 \right) \end{aligned}$$

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

Par

El par inducido está dado por la ecuación

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

Este par es llamado también *par desarrollado* de la máquina.

$$\tau_{\text{ind}} = \frac{(1 - s)P_{\text{AG}}}{(1 - s)\omega_{\text{sinc}}}$$

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

Circuito con las pérdidas separadas

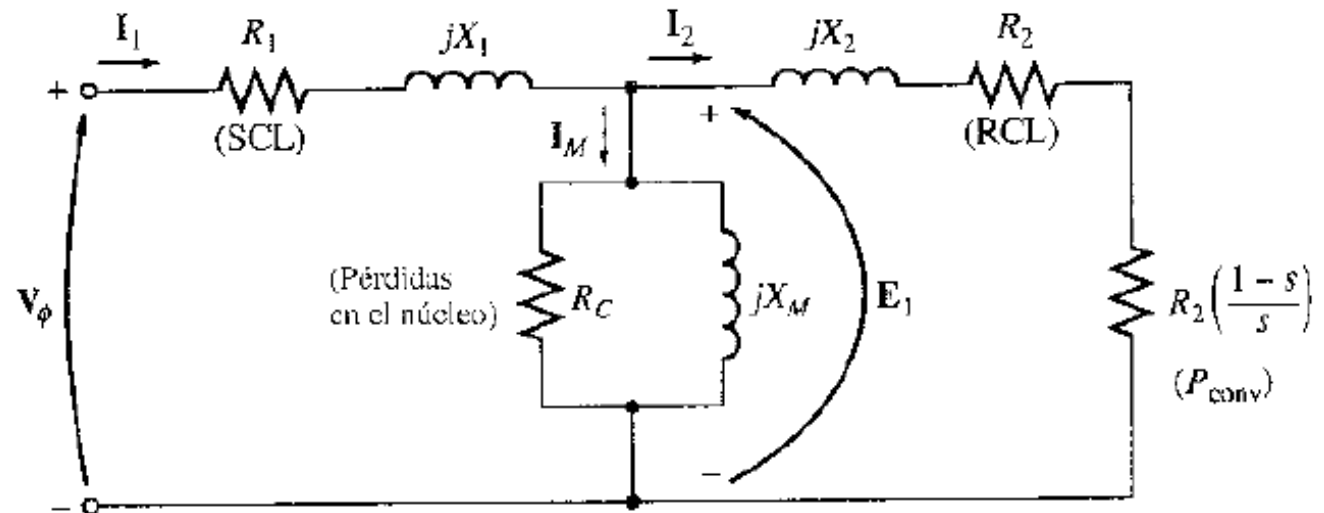


Figura 7-14

Circuito equivalente por fase con las pérdidas en el rotor y las pérdidas en el cobre separadas.

Ejemplo 7-3 Un motor de inducción de 460 V, 25 hp, 60 Hz, cuatro polos, conectado en Y, tiene las siguientes impedancias en ohms por fase, referidas al circuito del estator:

$$\begin{aligned} R_1 &= 0.641 \, \Omega & R_2 &= 0.332 \, \Omega \\ X_1 &= 1.106 \, \Omega & X_2 &= 0.464 \, \Omega & X_M &= 26.3 \, \Omega \end{aligned}$$

Las pérdidas rotacionales totales son 1100 W y se suponen constantes. Las pérdidas en el núcleo están agrupadas con las pérdidas rotacionales. Para un deslizamiento del rotor del 2.2% a voltaje y frecuencia nominales, encuentre del motor

- a) La velocidad
- b) La corriente del estator
- c) El factor de potencia
- d) P_{conv} y P_{out}
- e) τ_{ind} y τ_{carga}
- f) La eficiencia