

# **CAPITULO 1. Motores de Inducción.**

## **1.1 Introducción.**

*Los motores asíncronos o de inducción, son prácticamente motores trifásicos. Están basados en el accionamiento de una masa metálica por la acción de un campo giratorio. Están formados por dos armaduras con campos giratorios coaxiales: una es fija, y la otra móvil. También se les llama, respectivamente, estator y rotor [2].*

*El devanado del rotor, que conduce la corriente alterna que se produce por inducción desde el devanado del estator conectado directamente, consiste de conductores de cobre o aluminio vaciados en un rotor de laminaciones de acero. Se instalan anillos terminales de cortocircuito en ambos extremos de la “jaula de ardilla” o bien en uno de los extremos en el caso del rotor devanado [6].*

Los motores de inducción de rotor devanado son menos utilizados, debido a su mayor costo, y a que requieren de más mantenimiento que los de jaula de ardilla.

## **1.2 Producción del campo magnético rotatorio.**

Debido a que el sistema eléctrico industrial utiliza fuentes trifásicas de energía, la máquina de inducción se construye normalmente con tres devanados, distribuidos y desfasados espacialmente  $120^\circ$ . En cada una de las tres bobinas desfasadas espacialmente, se inyectan corrientes alternas senoidales desfasadas en el tiempo  $120^\circ$  unas de otras [7].

Cada bobina produce un campo magnético estático en el espacio. La amplitud de este campo se encuentra en la dirección del eje magnético de la bobina y varía senoidalmente en el tiempo. La combinación de los campos pulsantes producidos por las

tres corrientes desfasadas temporalmente, circulando por las tres bobinas desfasadas espacialmente, se traduce en un campo magnético distribuido senoidalmente en el espacio, que rota a la velocidad de variación de las corrientes en el tiempo (figura 1.1) [7].

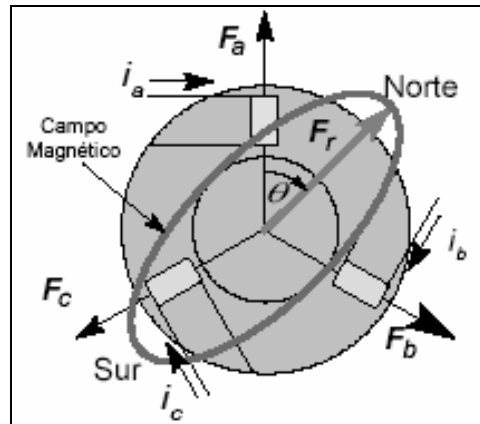


Figura 1.1. Distribución senoidal del campo magnético rotatorio [7].

Puesto que el periodo o intervalo de tiempo de la variación senoidal de la corriente es el mismo en los conductores, la velocidad del campo magnético rotatorio (S), varía directamente con la frecuencia (f), pero inversamente con el número de polos (P) :

$$S = 120f / P = 120f / 2n \tag{1.1}$$

Ya que el número de polos sólo depende de n, o sea el devanado que se emplee, la velocidad es en realidad una función de la frecuencia [6].

### 1.2.3 Desarrollo del par inducido.

Cuando se aplican al estator un conjunto trifásico de voltajes, se generan un conjunto de corrientes trifásicas que producen un campo magnético  $B_S$  que rota en

dirección contraria a las manecillas del reloj. Éste induce voltaje en las barras del rotor, y este voltaje está dado por la ecuación:

$$e_{ind} = (v \times B) \cdot l \quad (1.2)$$

en donde  $v$  es la velocidad de la barra, relativa al campo magnético;  $B$  es el vector de densidad de flujo magnético; y  $l$ , la longitud del conductor en el campo magnético.

El movimiento relativo del rotor con respecto al campo magnético del estator ( $B_s$ ) induce voltaje en una barra del rotor. El flujo magnético del rotor produce un campo magnético del rotor  $B_R$ . El par en la máquina,  $\tau_{ind}$ , está dado por:

$$\tau_{ind} = k B_R \times B_S \quad (1.3)$$

y la dirección es en sentido contrario a las manecillas del reloj, por lo tanto el rotor se acelera en esa dirección. En operación normal, los campos magnéticos del estator y del rotor giran a la velocidad sincrónica, mientras que el rotor gira a una velocidad menor [9].

### **1.3 Deslizamiento de la máquina de inducción.**

El deslizamiento de una máquina de inducción, se define como la velocidad relativa entre el campo magnético producido por las corrientes inyectadas en el estator y la velocidad mecánica del rotor, por unidad de la velocidad del campo:

$$s = \frac{(S - S_r) \times 100}{S} \quad (1.4)$$

Siendo  $s$  el porcentaje de deslizamiento para fines de cálculo.  $S$  es la velocidad síncrona ( $120f/P$ ) en rpm del campo magnético rotatorio producida por el estator; y  $S_r$  es la velocidad del rotor en rpm [6].

En general, a la velocidad del campo se le denomina velocidad síncrona de la máquina, y el deslizamiento indica qué tan cerca se encuentra la máquina de esta velocidad. Si el rotor de la máquina gira a una velocidad mayor que la síncrona, el deslizamiento se hace negativo. Cuando se conocen todos los parámetros del modelo de una máquina de inducción y la fuente de alimentación, el deslizamiento determina el punto de operación. Por esta razón se utiliza esta variable para definir el estado de la máquina [7].

#### **1.4 Circuito equivalente de la máquina de inducción.**

El circuito equivalente de un motor de inducción es muy similar al de un transformador, debido a la acción de transformación que ocurre al inducirse corrientes en el rotor, desde el estator.

##### **1.4.1 El modelo transformador de un motor de inducción.**

En la figura 1.2 se muestra un circuito equivalente transformador, por fase, de un motor de inducción. La resistencia del estator es  $R_1$  y la reactancia de dispersión es  $X_1$ .  $E_1$  es el voltaje primario del estator, acoplado al secundario  $E_R$  mediante un transformador ideal con relación de vueltas  $a_{\text{eff}}$ . El voltaje  $E_R$  producido en el rotor ocasiona un flujo de corriente en el rotor.  $R_C$  es el componente de pérdidas en el núcleo y  $jX_M$  se refiere a la

reactancia de magnetización,  $R_R$  y  $jX_R$  son las impedancias del rotor. Asimismo,  $I_1$  constituye la corriente de línea,  $I_M$  la corriente de magnetización.  $I_R$  es el flujo de corriente en el rotor e  $I_2$  es la corriente rotórica.[9].

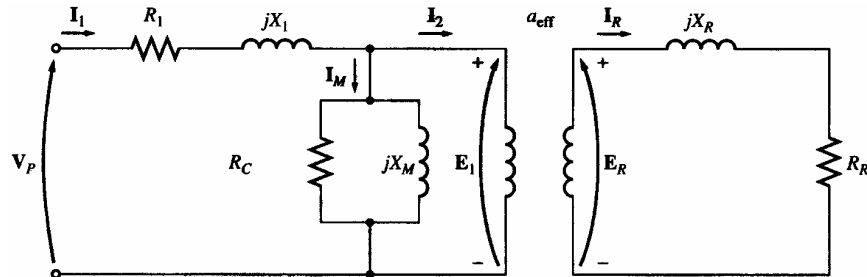


Figura 1.2. Modelo transformador de un motor de inducción con el rotor y el estator conectados por un transformador ideal de relación de vueltas  $a_{\text{eff}}$  [9].

### 1.4.2 Circuito modelo del rotor.

*Cuanto mayor sea el movimiento relativo entre los campos magnéticos del rotor y del estator, mayor será el voltaje resultante en el rotor y la frecuencia del rotor. El mayor movimiento relativo ocurre cuando el rotor se encuentra estacionario, condición llamada de rotor detenido o de rotor bloqueado, de modo que en esta condición se inducen el máximo voltaje y la máxima frecuencia del rotor. El mínimo voltaje (0 V) y la mínima frecuencia (0 Hz) ocurren cuando el motor se mueve con la misma velocidad que el campo magnético del estator, caso en que no hay movimiento relativo [9].*

El voltaje y la frecuencia del rotor son directamente proporcionales al deslizamiento del rotor, por lo que el voltaje y la frecuencia inducidos para cualquier deslizamiento son:

$$E_R = sE_{R0} \tag{1.5}$$

$$f_r = sf_e \quad (1.6)$$

en donde  $E_{R0}$  es el voltaje a rotor bloqueado,  $s$  es el deslizamiento y  $f_e$  es la frecuencia de línea.

La reactancia del rotor ( $X_R$ ) no es constante como lo es la resistencia ( $R_R$ ); por lo que depende de la inductancia ( $L_R$ ), de la frecuencia ( $\omega_r$ ) y de la corriente del rotor:

$$X_R = \omega_r L_R = 2\pi f_r L_R \quad (1.7)$$

Sustituyendo en la ecuación 1.4:

$$X_R = 2\pi s f_e L_R = s(2\pi f_e L_R) = sX_{R0} \quad (1.8)$$

en donde  $X_{R0}$  es la reactancia a rotor bloqueado [9].

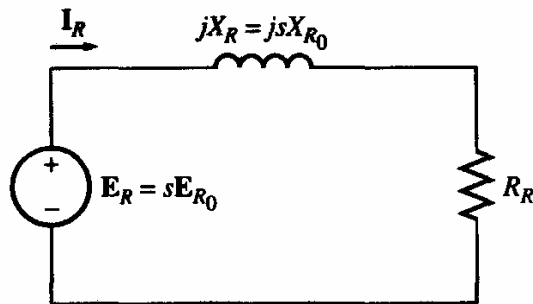


Figura 1.3. Circuito modelo del rotor [9].

Finalmente obtenemos el circuito equivalente del rotor en la figura 1.3. El flujo de corriente en el rotor se calcula como:

$$I_R = \frac{E_R}{R_R + jX_R} \quad (1.9)$$

$$I_R = \frac{E_R}{R_R + jsX_{R0}} \quad (1.10)$$

$$I_R = \frac{E_{R0}}{R_R/s + jX_{R0}} \quad (1.11)$$

De esta última ecuación, es posible calcular la impedancia equivalente del rotor; desde el punto de vista de que se encuentra alimentada por la fuente de voltaje  $E_{R0}$ :

$$Z_{R,eq} = R_R/s + jX_{R0} \quad (1.12)$$

para obtener el circuito equivalente del rotor en el que el voltaje  $E_{R0}$  es constante y la impedancia del rotor contiene todos los efectos de la variación del deslizamiento (figura 1.4) [9].

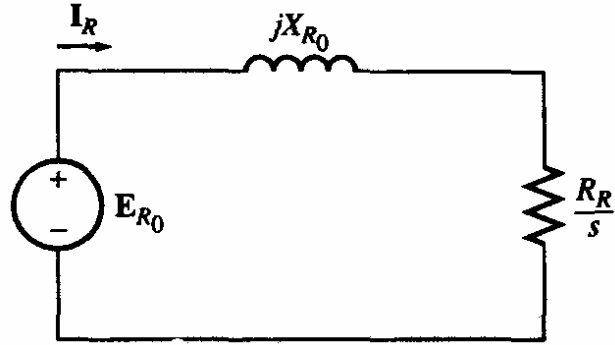


Figura 1.4. Circuito modelo del rotor con todos los efectos de la frecuencia (deslizamiento) concentrados en la resistencia  $R_R$  [9].

### 1.4.3 Circuito equivalente final.

Para obtener el circuito equivalente por fase, es necesario referir en el estator, el modelo del rotor. Si la relación de vueltas de un motor de inducción es  $a_{eff}$ , el voltaje transformado es:

$$E_1 = E'_R = a_{eff} E_{R0} \quad (1.13)$$

y la corriente e impedancia rotóricas son:

$$I_2 = \frac{I_R}{a_{eff}} \quad (1.14)$$

$$Z_2 = a_{eff}^2 \left( \frac{R_R}{s} + jX_{R0} \right) \quad (1.15)$$

y si se definen:



$$R_2 = a_{eff}^2 R_R \quad (1.16)$$

$$X_2 = a_{eff}^2 X_{R0} \quad (1.17)$$

obtenemos finalmente el circuito equivalente por fase de la figura 1.5.

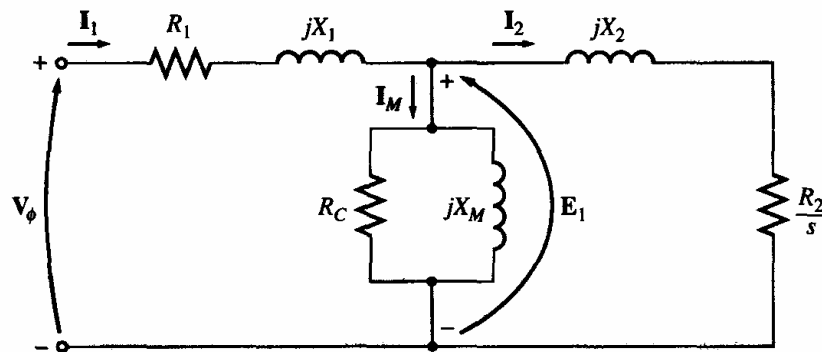


Figura 1.5. Circuito equivalente por fase en un motor de inducción [9].

### 1.5 Característica par-velocidad del motor de inducción.

En la figuras 1.6 y 1.7 se presentan las curvas características par-velocidad del motor de inducción. La información que proveen, se resume a continuación:

1. El par inducido del motor es cero a la velocidad sincrónica.
2. La curva par-velocidad es aproximadamente lineal entre vacío y plena carga; ya que cuando crece el deslizamiento, crecen linealmente: la corriente rotórica, el campo magnético del rotor, y el par inducido.

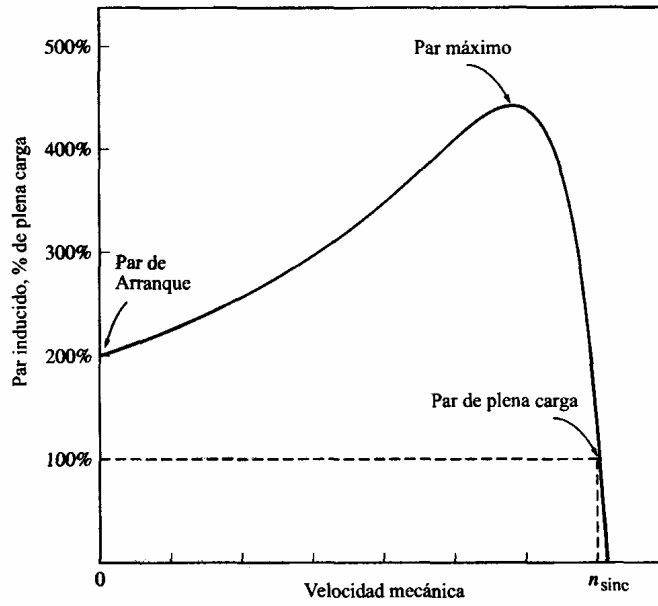


Figura 1.6. Curva característica típica de un motor de inducción [9].

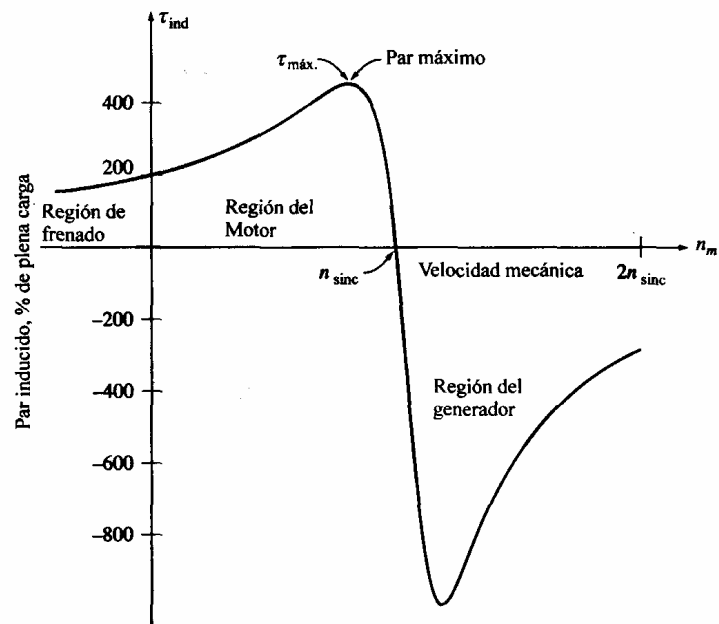


Figura 1.7. Curva característica par-velocidad de un motor de inducción, que muestra los rangos extendidos de operación (región de frenado y región de regeneración) [9].

3. El par máximo o de desviación, equivale a 2 ó 3 veces el par nominal y no puede ser excedido.
4. El par de arranque es ligeramente mayor al par de plena carga.
5. Para un deslizamiento dado, el par inducido varía con el cuadrado del voltaje aplicado.
6. La máquina de inducción opera como generador cuando la velocidad del rotor es mayor que la sincrónica. Entonces la dirección del par inducido se invierte, convirtiendo potencia mecánica en potencia eléctrica.
7. Para frenar con rapidez el motor, se conmutan dos fases, que significa invertir la dirección de rotación del campo magnético.

### **1.6 Clases de diseño de motores de inducción.**

La National Electric Manufacturers Association (NEMA) y la International Electrotechnical Comision (IEC), han desarrollado un sistema de identificación mediante letras para los motores comerciales, según las curvas características par-velocidad para cada diseño:

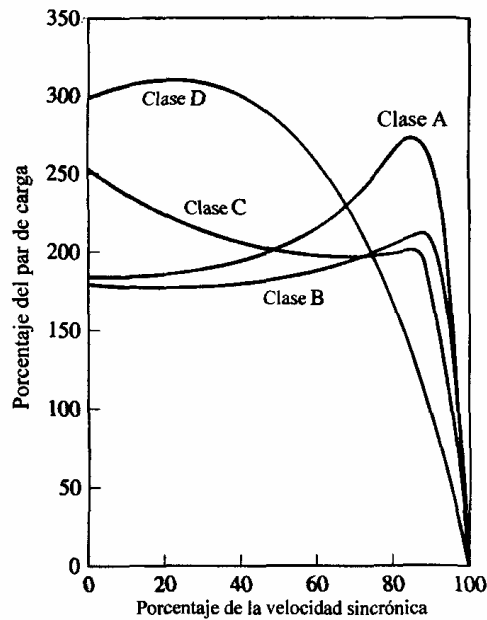


Figura 1.8. Curvas características típicas para diferentes diseños de motores [9].

DISEÑO CLASE A. Es un motor de jaula de ardilla para usarse a velocidad constante. Sus principales características son:

- Buena capacidad de disipación de calor.
- Alta resistencia y baja reactancia al arranque.
- El par máximo está entre 200% y 300% del par de plena carga y ocurre a un bajo deslizamiento.
- Aceleración bastante rápida hacia la velocidad nominal.
- Presenta la mejor regulación de velocidad, entre el 2 y 4%.
- Desafortunadamente su corriente de arranque varía entre 5 y 7 veces la corriente nominal.
- Han sido reemplazados por los motores de diseño clase B en los últimos años.
- Se utilizan en ventiladores, sopladores, bombas, tornos, etc.

DISEÑO CLASE B. Se les llama motores de propósito general y a este tipo pertenecen la mayoría de los motores con rotor de jaula de ardilla. A continuación se resumen sus características:

- Par de arranque normal, baja corriente de arranque y bajo deslizamiento.
- Produce casi el mismo par de arranque que el diseño anterior.
- El par máximo es mayor o igual al 200% el par de carga nominal.
- Deslizamiento bajo (menor del 5%).
- Se prefieren sobre los diseños de clase A por requerir poca corriente de arranque.

DISEÑO CLASE C.

- Alto par de arranque (entre 2 y 2.5 veces el nominal) con bajas corrientes de arranque (de 3.5 a 5 veces la nominal).
- Son construidos con un rotor de doble jaula (más costosos).
- Bajo deslizamiento (menos del 5%) a plena carga.
- Debido a su alto par de arranque, acelera rápidamente.
- Cuando se emplea con cargas pesadas, se limita la disipación térmica del motor, ya que la mayor parte de la corriente se concentra en el devanado superior.
- Tiende a sobrecalentarse con arranques frecuentes.

- Se utilizan para cargas con alto par de arranque, como bombas, compresores y transportadores.

#### DISEÑO CLASE D.

- También conocidos como de alto par y alta resistencia.
- Alto par de arranque (275% o más del nominal) y baja corriente de arranque.
- Alto deslizamiento a plena carga.
- La alta resistencia del rotor desplaza el par máximo hacia una velocidad muy baja.
- Diseñado para servicio pesado de arranque, en especial grandes volantes utilizados en troqueladoras o cortadoras.

También existen las clases E y F, llamados motores de inducción de arranque suave, pero obsoletos hoy en día.

#### **1.7 Tendencias en el diseño de motores de inducción.**

El motor de inducción moderno se construyó entre 1888 y 1895, cuando Nicola Tesla recibió la patente de sus ideas sobre los motores de inducción. Poco después se introdujo el rotor de jaula de ardilla, y hacia 1896 estuvieron disponibles en el mercado motores de inducción trifásicos plenamente reconocidos y funcionales [9].

Los esfuerzos de mejoramiento de diseño en aquella época hasta 1970, eran enfocados a disminuir el costo de construcción: calidad de los aceros, técnicas de fundición, etc. Este enfoque se debió principalmente a que la electricidad no era tan costosa; por lo tanto, el criterio a seguir para comprar un motor, era su costo directo [9].

Desde el ascenso del costo de los combustibles en 1973; el costo de operación de las máquinas ha sido cada vez más importante, dejando a un lado los costos de instalación. Por lo que el nuevo énfasis ha sido la eficiencia del motor [9].

Para aumentar la eficiencia de los motores se utilizan técnicas conducentes a reducir las pérdidas en el cobre, reducir la densidad de flujo magnético para reducir las pérdidas en el núcleo. Reducir la temperatura de operación utilizando más acero en el estator, reducir las corrientes parásitas, etc [9].