



# GUÍA DE ASIGNATURA DE MÁQUINAS AC

**INSTITUTO SUPERIOR TECNOLÓGICO  
"LUIS ROGERIO GONZÁLEZ"**

**TECNOLOGÍA SUPERIOR EN ELECTRICIDAD**

**MAYO 2022  
Azogues-Ecuador**

## **Descripción de la Asignatura**

Las Máquinas Eléctricas de corriente Alterna es una asignatura de carácter analítico, teórico y de cálculo que corresponde al eje de la formación profesional dentro de la malla curricular de la carrera tecnológica de nivel superior en Electricidad, encargada de la formación de técnicos competentes y comprometidos con el estudio y conocimiento íntegro de los aspectos de motores eléctricos para el desarrollo industrial que tiene el Ecuador de acuerdo con el cambio de la matriz productiva. La asignatura pretende fomentar conocimiento, destrezas habilidades considerando máquinas rotativas síncronas y asíncronas su principio de funcionamiento, aspectos constructivos, curvas par- velocidad, circuitos equivalentes, par, eficiencia y el comportamiento en la red eléctrica, siendo así la importancia del estudio de los mismos para los estudiantes ya que estos contenidos están relacionados directamente con la realidad nacional en la industria y mantenimiento de máquinas rotativas de esta manera el estudiante estará preparado para enfrentarse a la sociedad industrializada a la misma que se vincularán como profesionales competentes.

## Tabla de Contenidos

CAPÍTULO 1	3
1.3	
1.1 3	
1.2 7	
1.3 8	
1.4 10	
1.5 13	
1.6 14	
1.7 17	
1.8 19	
1.9 22	
1.10 25	
CAPÍTULO 2	23
2.26	
2.1 26	
2.2 27	
2.3 30	
2.4 33	
2.5 38	
2.6 40	
2.7 42	
2.8 49	
CAPÍTULO 3	44
3.49	
3.1 49	
3.2 51	
3.3 54	
3.4 55	
3.5 56	
3.6 58	
LISTA DE REFERENCIAS	55

# CAPÍTULO 1

## Tema del Capítulo: El Generador Síncrono.

**Resultado de Aprendizaje:** Entiende el principio de funcionamiento de las máquinas eléctricas de corriente alterna. Experimentar con las diferentes conexiones y configuraciones de las máquinas eléctricas de corriente alterna, como generadores y motores aplicándolos a diferentes entornos que pudiera presentarse en el ámbito práctico.

### 1. GENERADORES SÍNCRONOS

Los generadores síncronos son máquinas utilizadas para convertir potencia mecánica en potencia eléctrica ac. (Mora, 2003)

Las máquinas síncronas son máquinas eléctricas cuya velocidad de rotación  $n$  (*r.p.m*) está vinculada rígidamente con la frecuencia  $f$  de la red de corriente alterna con la cual trabaja, de acuerdo con la expresión. (Mora, 2003)

$$n = \frac{60f}{p} \text{ Ecuación 1(Mora, 2003)}$$

Donde  $p$  es el número de pares de polos de la máquina.

Las frecuencias industriales de las tensiones generadas oscilan entre los 50 Hz en Europa y 60 Hz en gran parte de América(Mora, 2003).

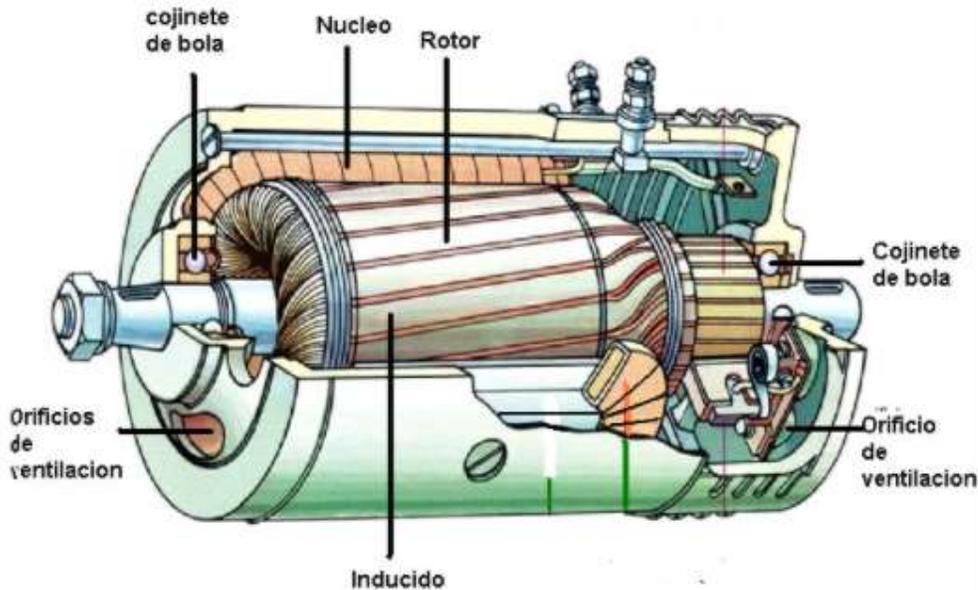
En la generación de energía eléctrica a pequeña escala se utilizan alternadores acoplados a motores de combustión interna, que se utilizan como equipos de emergencia en hospitales, aeropuertos, salas de ordenadores, centrales telefónicas, etc., y que entran en servicio al momento de la falta la tensión de la red(Mora, 2003).

#### 1.1 Aspectos constructivos

Las máquinas síncronas, al igual que los demás tipos de máquinas eléctricas, están constituidos por dos devanados independientes(Chapman, 2000).

- a) Un devanado inductor, construido en formas de arrollamiento concentrado o bien distribuido en ranuras, alimentado por corriente continua, que da lugar a los polos de la máquina(Chapman, 2000).
- b) Un devanado inducido distribuido formando un arrollamiento trifásico recorrido por corriente alterna(Chapman, 2000).

# LA MAQUINA SINCRONA



De igual manera dos términos muy utilizados para describir los *devanados de una máquina* son *devanados de campo* y *devanados de armadura*. Los devanados de campo se consideran a los devanados que producen campo magnético principal de la máquina y el devanado de armadura se aplica a los devanados donde se induce el voltaje principal. En las máquinas síncronas, los devanados de campo están sobre el rotor llamados *devanados del rotor* y *devanados de campo* de igual manera se utilizan los términos *devanados estáticos* y *devanados de armadura*(Chapman, 2000).

En esencia, el rotor de un generador síncrono es un gran electroimán. Los polos magnéticos del rotor pueden ser contruidos salientes y no salientes. Polos salientes significa *proyectado hacia afuera* o *prominente*, por otro lado un polo saliente es un polo magnético contruido al mismo nivel de la superficie del rotor(Chapman, 2000).

En la Figura 1 y Figura 3-a se muestra un rotor de polos salientes, mientras que en la Figura 2 y Figura 3-b se muestra un rotor de polos no salientes. Los rotores de polos no salientes se utilizan en rotores de dos y cuatro polos, mientras que los rotores de polos salientes se utilizan en rotores de cuatro o más polos(Chapman, 2000).

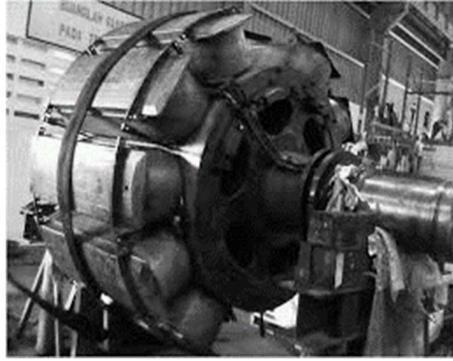


Figura 1. Rotor de polos salientes(Wildi, 2006).

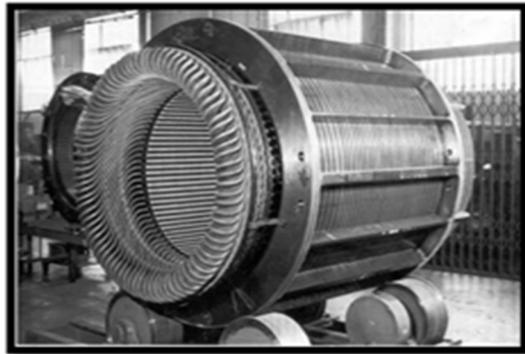


Figura 2. Rotor de polos no salientes (lisos o cilíndricos)(Wildi, 2006)

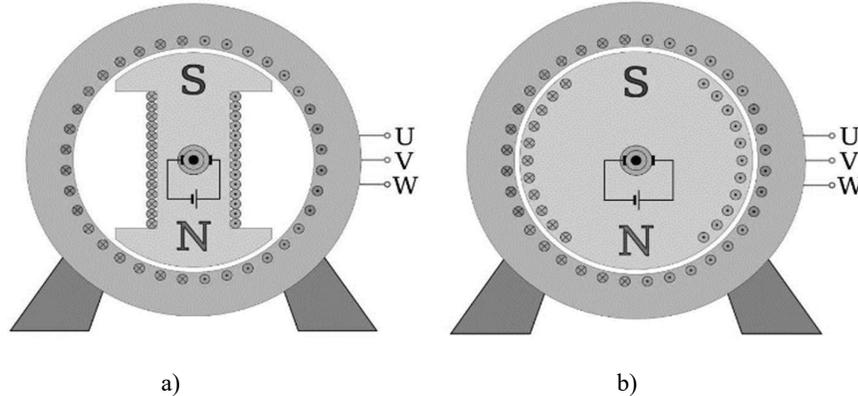


Figura 3. a) Máquina de polos saliente; b) Máquina de rotor cilíndrico(Chapman, 2000).

El rotor está sujeto a campos magnéticos variables, se construye con láminas delgadas agrupadas para reducir las pérdidas por corrientes parásitas(Chapman, 2000).

Se debe suministrar una corriente dc al circuito de campo del rotor, puesto que el rotor está girando, se requiere un arreglo especial para entregar potencia dc a sus devanados de campo(Chapman, 2000).

Existen dos formas comunes de suministrar esta potencia dc:

1. Suministrar la potencia dc desde una fuente externa al rotor por medio de anillos rozantes y escobillas(Chapman, 2000).

2. Suministrar la potencia dc desde una fuente dc especial montada directamente en el eje del generador síncrono(Chapman, 2000).

En la Figura 4 se muestran los anillos rozantes son anillos metálicos que circundan el eje de la máquina pero se encuentran aislados de él, un extremo del devanado del rotor dc está unido a cada uno de los dos anillos rozantes colocados sobre un eje de la máquina síncrona y una escobilla estacionaria se desliza sobre cada anillo rozante(Chapman, 2000).

Una escobilla es un bloque de un compuesto de carbón grafitado que conduce la electricidad libremente y tiene muy baja fricción para no desgastarse con el anillo rozante, en la Figura 5 se muestran los anillos rozantes y las escobillas, estos componentes crean algunos problemas cuando se utilizan para suministrar potencia dc a los devanados de campo de la máquina síncrona pues exigen más mantenimiento en la máquina ya que se deben revisar con regularidad las escobillas debido a su desgaste. A pesar de estos problemas, los anillos rozantes y las escobillas se utilizan en todas las máquinas síncronas(Chapman, 2000).

En generadores y motores grandes, se utilizan *excitadores o excitatrices sin escobillas* para suministrar las corriente de campo dc a la máquina. Un excitador sin escobillas es un generador ac pequeño cuyo circuito de campo está montado en el estator y su circuito de armadura está montado sobre el eje del rotor(Chapman, 2000).

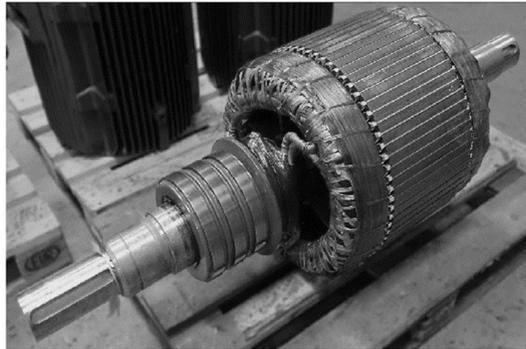


Figura 4. Rotor con anillos rozantes(Wildi, 2006)



Figura 5. Rotor con anillos rozantes y escobillas(Wildi, 2006).

Los hidrogeneradores están movidos por turbinas hidráulicas cuyo tipo y velocidad de giro dependen de las características del salto de agua, en saltos de gran altura se emplean turbinas *Pelton* que impulsan a grupos de eje horizontal que giran a velocidades comprendidas entre 750 y 375 rpm, en saltos medios se utilizan turbinas *Francis* con una disposición vertical del grupo, de tal forma que las velocidades de sincronismo son menores que con alturas elevadas, pudiendo llegar a valores cercanos de 150 rpm y en saltos de pequeña altura < 30m se emplean turbinas *Kaplan* con eje vertical, donde la velocidad del grupo es generalmente inferior a 100rpm, las potencias medias de los generadores hidráulicos oscilan entre 150 y 300MVA y se han llegado a construir unidades de 750 MVA(Mora, 2003).

## 1.2 Voltaje Interno Generado por un Generador Síncrono

El voltaje inducido en un estator esta dado como:

$$E_A = \sqrt{2}\pi N_C \Phi f \text{ Ecuación 2 (Chapman, 2000)}$$

Este voltaje depende del flujo  $\Phi$  en la máquina, de la frecuencia o velocidad de rotación y de la construcción de la máquina, se puede simplificar esta ecuación para enfatizar en las cantidades que varían durante la operación de la máquina(Chapman, 2000).

$$E_A = K\Phi\omega \text{ Ecuación 2 (Chapman, 2000)}$$

Donde K es una constante que representa la construcción de la máquina. Si  $\omega$  se expresa en radianes eléctricos por segundo,

$$K = \frac{N_C}{\sqrt{2}} \text{ Ecuación 3 (Chapman, 2000)}$$

Mientras que si se expresa en radianes mecánicos por segundo,

$$K = \frac{N_C P}{\sqrt{2}} \text{ Ecuación 4 (Chapman, 2000)}$$

El voltaje interno generado  $E_A$  es directamente proporcional al flujo y a la velocidad, pero el flujo en si depende de la corriente que fluye en el circuito de campo del rotor(Chapman, 2000).

La corriente de campo  $I_F$  está relacionada con el flujo  $\Phi$ , como se muestra en la Figura 6-a, puesto que  $E_A$  es directamente proporcional al flujo, por lo que el voltaje  $E_A$  está relacionada con corriente de campo, como se muestra en la Figura 6-b, esta se denomina curva de magnetización o característica de circuito abierto de la máquina(Chapman, 2000).

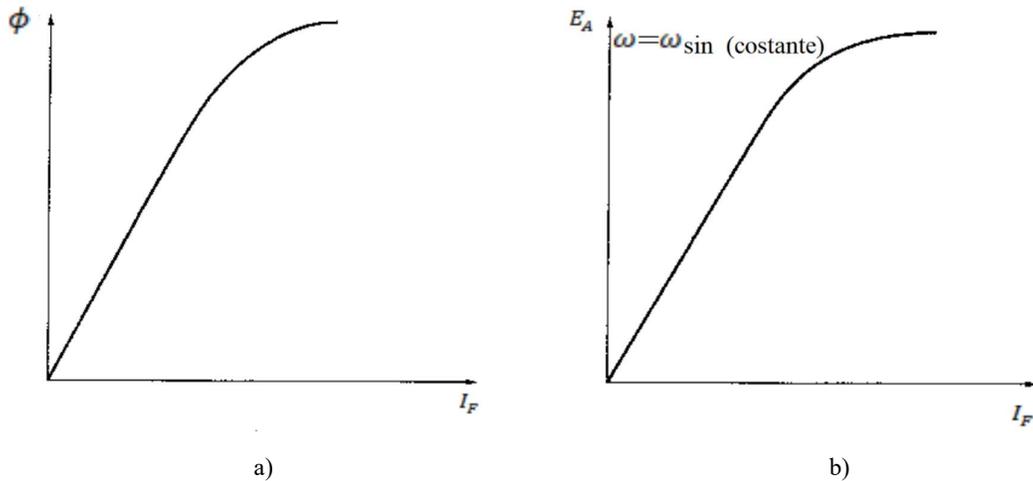


Figura 6-a. Gráfica del flujo contra la corriente de campo en un generador síncrono (Chapman, 2000).

Figura 6-b. Curva de magnetización de un generador síncrono (Chapman, 2000).

El voltaje  $E_A$  es el voltaje interno generado, en una fase del generador síncrono. Sin embargo, este voltaje  $E_A$  no usualmente es el voltaje que aparece en los terminales del generador. En efecto, la única vez en la cual el voltaje interno  $E_A$  es el mismo que el voltaje de salida  $V_\phi$  es cuando no fluye corriente de armadura en la máquina (Chapman, 2000).

Existen varios factores que ocasionan la diferencia entre  $E_A$  y  $V_\phi$ :

1. La distorsión de campo magnético del entrehierro debido a que la corriente que fluye en el estator, llamada *reacción del inducido* (Chapman, 2000).
2. La autoinductancia de las bobinas de armadura (Chapman, 2000).
3. La resistencia de las bobinas de la armadura (Chapman, 2000).
4. El efecto de la forma de los polos salientes del rotor (Chapman, 2000).

### 1.3 Reacción del Inducido

El efecto de reacción del inducido se da cuando gira el rotor de un generador, se induce un voltaje  $E_A$  en las bobinas estáticas del mismo. Si se conecta una carga en los terminales del generador, fluye una corriente, pero el flujo de corriente trifásica estática produce un campo magnético propio de la máquina, este campo magnético *estático* distorsiona el campo magnético del rotor cambiando el voltaje de fase resultante. Este efecto se le conoce como *reacción del inducido* debido a que la corriente del inducido (estator) afecta al campo magnético que la produce en primera instancia en la Figura 7 se visualiza los especificado anteriormente (Chapman, 2000).

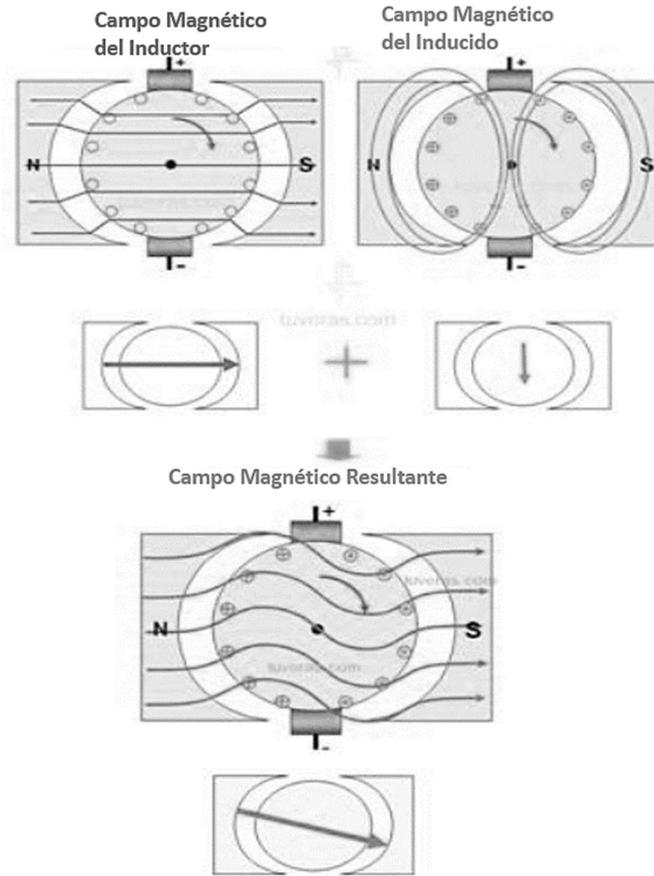


Figura 7. Secuencia del efecto de reacción del inducido(Cordero).

EL voltaje de reacción del inducido puede expresarse como:

$$I_{stat} = -jXI_A \text{ Ecuación 5 (Chapman, 2000)}$$

Y el voltaje en una fase es:

$$V_\phi = E_A - jXI_A \text{ Ecuación 6 (Chapman, 2000)}$$

Observese en la figura 8, la ley de voltajes de Kirchhoff para este circuito es:

$$V_\phi = E_A - jXI_A \text{ Ecuación 7 (Chapman, 2000)}$$

Además los efectos de la reacción del inducido, los devanados del estator tienen una autoinductancia y una resistencia. Si llamamos  $L_A$  la autoinductancia del estator (y  $X_A$  a su correspondiente reactancia) mientras que la resistencia del estator llamada  $R_A$  la diferencia toral entre  $E_A$  y  $V_\phi$  está dado por:

$$V_\phi = E_A - jXI_A - jX_A I_A - R_A I_A \text{ Ecuación 8 (Chapman, 2000)}$$

Los efectos de la reacción del inducido y la autoinductancia de la máquina son representados por reactancias, y es costumbre combinarlas en una sola llamada *reactancia sincrónica* de la máquina.

$$X_S = X + X_A \text{ Ecuación 9 (Chapman, 2000)}$$

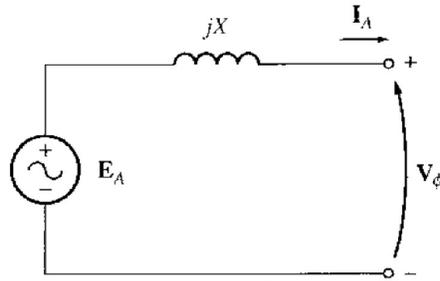


Figura 8. Circuito sencillo de parámetros del generador síncrono(Chapman, 2000).

La ecuación final que describe a  $V_\phi$  es:

$$V_\phi = E_A - jX_S I_A - R_A I_A \quad \text{Ecuación 10 (Chapman, 2000)}$$

### 1.4 Circuito Equivalente de un Generador Síncrono

El circuito equivalente de un generador trifásico se muestra en la Figura 9, donde aparece una fuente dc de potencia alimentando el circuito de campo del rotor, modelado por la inductancia de la bobina y la resistencia en serie(Chapman, 2000).

En serie con  $R_F$  se encuentra una resistencia ajustable  $R_{adj}$  que controla el flujo de la corriente de campo, el resto del circuito equivalente consta de los modelos para cada fase. Cada fase tiene un voltaje interno generado con una inductancia en serie con  $X_S$  (resultado de la suma de la reactancia del inducido y la autoinductancia de la bobina y una resistencia en serie  $R_A$ ), aunque los voltajes y las corrientes de las tres fases están desfasados  $120^\circ$ , en lo demás son idénticas(Chapman, 2000).

Estas tres fases se pueden conectar bien sea en Y o en  $\Delta$ , como se muestra en la figura 10-a y 10-b, si se conecta en Y, el voltaje en los terminales  $V_T$  estará relacionado con el voltaje de fase(Chapman, 2000).

$$V_T = \sqrt{3}V_\phi \quad \text{Ecuación 11 (Chapman, 2000)}$$

Si las bobinas se conectan en  $\Delta$ ,

$$V_T = V_\phi \quad \text{Ecuación 12 (Chapman, 2000)}$$

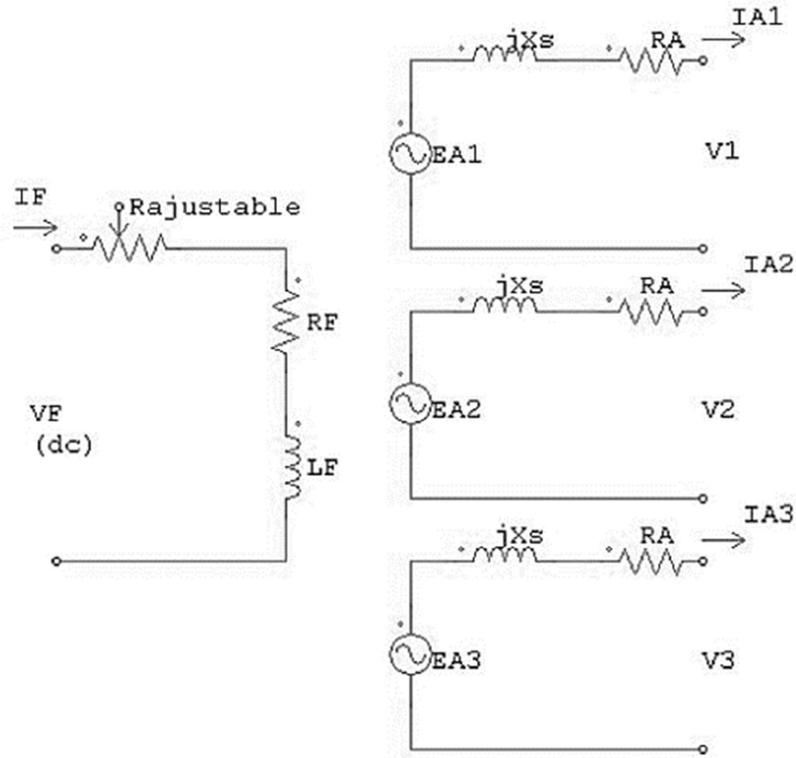


Figura 9. Circuito equivalente completo de un generador síncrono trifásico(Sánchez, 2018).

Donde:

$R_F$ : Es la resistencia de los devanados del rotor.

$L_F$  : Es la inductancia del rotor.

$R_{adj}$ : Es la resistencia que controla el flujo de campo.

Los voltajes  $V_1$ ,  $V_2$  y  $V_3$  están  $120^\circ$  desfasados entre sí.

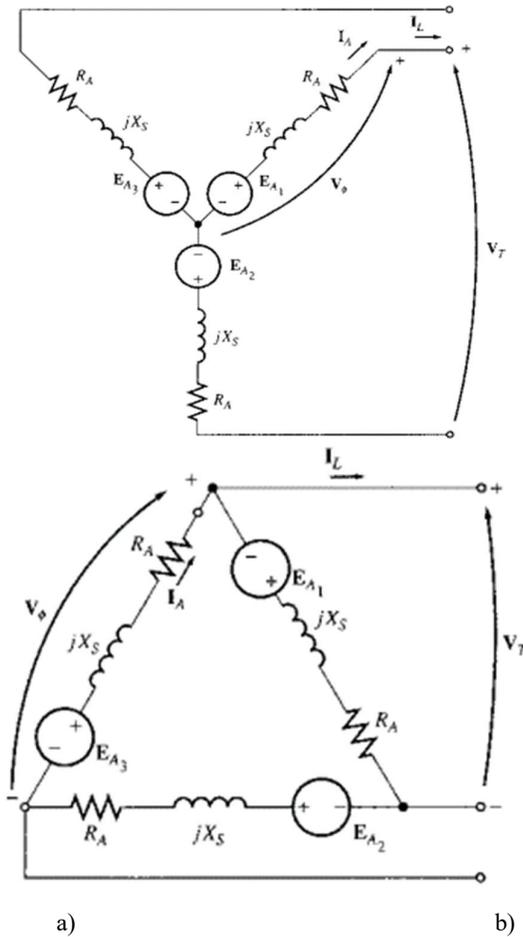


Figura 10-a. Circuito equivalente del generador conectado en Y (Chapman, 2000).

Figura 10-b. Circuito equivalente del generador conectado en Δ (Chapman, 2000).

El hecho de que las tres fases de los generadores sincrónicos sean idénticas en todos los aspectos en el ángulo de fase, conducen a utilizar normalmente el *circuito equivalente por fase*. EL circuito equivalente por fase de esta máquina se muestra en la Figura 1. Se debe tener en cuenta un factor importante al utilizar el circuito equivalente por fase: las tres fases tienen igual voltaje i corriente *sólo* cuando las cargas conectadas a ellas *están balanceada*, si las cargas sobre el generador no están balanceadas, se requieren técnicas de análisis más sofisticadas que están fuera del alcance de este folleto (Chapman, 2000).

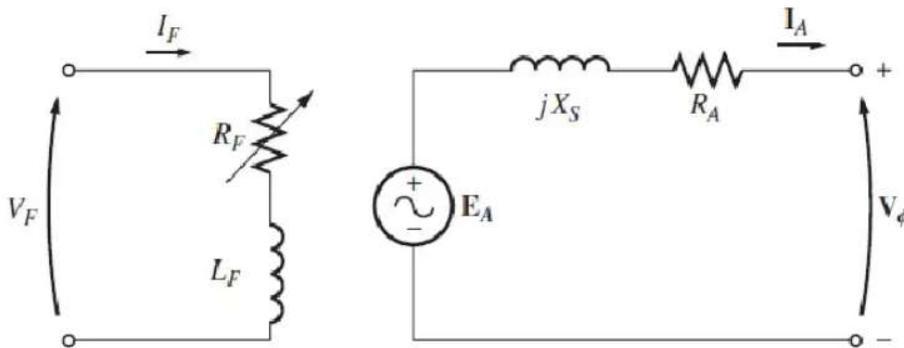


Figura 11. Circuito equivalente por fase de un generador sincrónico (Chapman, 2000).

La resistencia interna del circuito de campo y la resistencia externa variable se han combinado en una sola resistencia(Chapman, 2000).

### 1.5 Diagrama Fasorial de un Generador Síncrono

Debido a que los voltajes en un generador sincrónico son alternos, usualmente se expresan como fasores. Puesto que los fasores tienen magnitud y ángulo, la relación entre ellos debe ser expresada por un dibujo bidimensional. Cuando los voltajes en una fase ( $E_A, V_\phi, jX_S I_A$  y  $R_A I_A$ ) y la corriente  $I_A$  en la fase se grafican de tal forma que se muestre las relaciones entre ellos, el dibujo resultante se llama *diagrama fasorial*(Chapman, 2000).

El diagrama a fasorial de un alternador determina de forma gráfica la relación existente entre la f.e.m. y la tensión en los diversos regímenes de funcionamiento de la máquina(Mora, 2003).

En la Figura 12 se muestra esas relaciones cuando el generador está alimentando una carga cuyo factor de potencia es igual a la unidad (carga puramente resistiva). En la Ecuación 8, el voltaje total  $E_A$  difiere del voltaje en los terminales de la fase  $V_\phi$  por las caídas de voltaje resistiva e inductiva. Todos los voltajes y corrientes están referenciados a  $V_\phi$ , el cual se asumen arbitrariamente con ángulo de  $0^\circ$ .

Este diagrama fasorial se puede comparar con los diagramas fasoriales de generadores que operan con factores de potencia en atraso y en adelanto. La Figura 13-a muestra el diagrama fasorial con factor de potencia en atraso y Figura 13-b con factor de potencia en adelanto(Chapman, 2000).

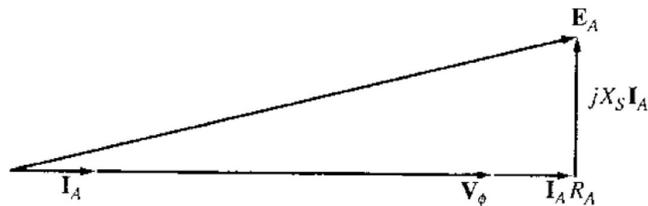


Figura 12. Diagrama fasorial de un generador sincrónico con factor de potencia unitario(Chapman, 2000).

Cabe hacer notar que *para un voltaje de fase y una corriente del inducido dados*, se requiere mayor voltaje interno generado  $E_A$  para cargas en atraso que para cargas en adelanto, entonces se requiere mayor corriente de campo con cargas en atraso para mantener el mismo voltaje en terminales porque(Chapman, 2000),

$$E_A = K\phi\omega \quad \text{Ecuación 13 (Chapman, 2000)}$$

y  $\omega$  debe ser constante para mantener constante la frecuencia.

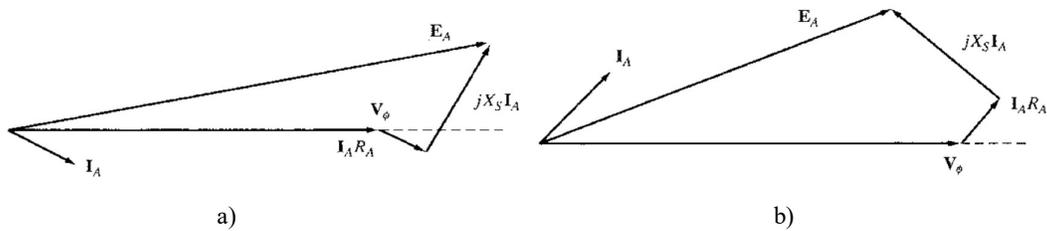


Figura 13-a. Diagrama fasorial de un generador sincrónico con factor de potencia en atraso(Chapman, 2000).

Figura 13-b. Diagrama fasorial de un generador sincrónico con factor de potencia en adelanto(Chapman, 2000).

Alternativamente, para una corriente de campo y una magnitud de corriente de carga dadas, el voltaje en los terminales es menor para cargas en atraso y mayor para cargas en adelanto(Chapman, 2000).

En las máquinas sincrónicas reales, dado que la reactancia sincrónica es mucho mayor que la resistencia del devanado  $R_A$  está se desprecia con una frecuencia en el estudio *cuantitativo* de las variaciones de voltaje, para hallar resultados numéricos exactos, se debe considerar  $R_A$

*ADDIN EN.CITE < EndNote >< Cite >< Author > Chapman </Author >< RecNum > 1 </RecNum >< DisplayText > (Chapman) </DisplayText >< record >< rec - number > 1 </rec - number >< foreign - keys >< key app = "EN" db - id = "5zvsaa9tcrwp0de25sexa0z5e9sp2fvstpe0" timestamp = "1570118156" > 1 </key ></foreign - keys >< ref - type name = "Book" > 6 </ref - type >< contributors >< authors >< author > Stephen J. Chapman </author ></authors >< tertiary - authors >< author > Mc Graw Hill </author ></tertiary - authors ></contributors >< titles >< title > Máquinas Eléctricas </title ></titles >< edition > Tercera Edición </edition >< section > 768 </section >< dates ></dates >< urls ></urls >< language > Español </language ></record ></Cite >< Cite >< Author > Chapman </Author >< RecNum > 1 </RecNum >< record >< rec - number > 1 </rec - number >< foreign - keys >< key app = "EN" db - id = "5zvsaa9tcrwp0de25sexa0z5e9sp2fvstpe0" timestamp = "1570118156" > 1 </key ></foreign - keys >< ref - type name = "Book" > 6 </ref - type >< contributors >< authors >< author > Stephen J. Chapman </author ></authors >< tertiary - authors >< author > Mc Graw Hill </author ></tertiary - authors ></contributors >< titles >< title > Máquinas Eléctricas </title ></titles >< edition > Tercera Edición </edition >< section > 768 </section >< dates ></dates >< urls ></urls >< language > Español </language ></record ></Cite ></EndNote >*

*Error! Marcador no definido. [2] .*

## 1.6 Excitación

Actualmente los sistemas clásicos de excitación han sido sustituidos por otros sistemas de excitación que utilizan de una manera u otros dispositivos electrónicos varios(García, 2013):

- Diodos.
- Transistores.
- Amplificadores magnéticos.
- Etc.

Con estos nuevos procedimientos, algunos en periodo de ensayo, se consiguen ventajas importantes, tales como: mayor velocidad de respuesta, menor oscilación en la tensión del alternador, etc.(García, 2013).

Existen diferentes sistemas de excitación:

**a) Sistemas de excitación con excitatriz de corriente directa:**

Los pequeños grupos electrógenos o plantas de emergencia usan aún sistemas de excitación a base de pequeños generadores de corriente directa acoplados directamente al eje del generador, estos pequeños generadores de corriente directa en realidad generan corriente alterna y la rectifican por medio de un conmutador sobre el que se deslizan las escobillas en la Figura 14-a y Figura 14b se muestra este sistema(García, 2013).

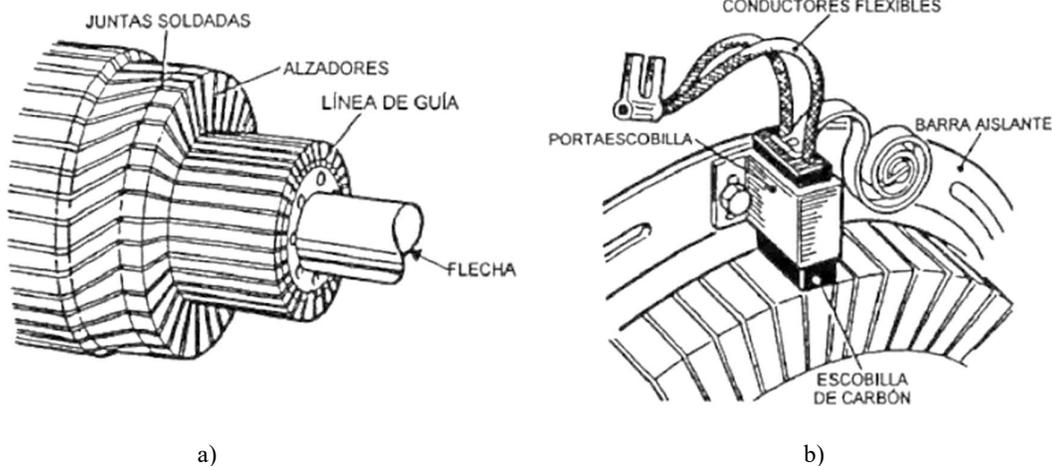


Figura 14-a. Conmutador mostrando sus partes(García, 2013).

Figura 14-b. Montaje de porta escobillas(García, 2013).

Uno de los problemas que presentan los sistemas de excitación a base de generadores de corriente continua es que requieren mayor mantenimiento que otros sistemas de excitación que se denominan “rotatorios sin escobillas”, o bien, estáticos(García, 2013).

Este inconveniente ha hecho que para los generadores de tamaño relativamente grandes, no sean recomendables para los servicios de emergencia, además de que, desde el punto de vista de operación, presentan otros problemas que eventualmente pueden afectar la calidad de la forma de onda(García, 2013).

**b) Sistema de excitación de excitatriz sin escobillas:**

Este tipo opera bajo el mismo principio que el anterior, solo que ahora se eliminan las escobillas y el conmutador, véase en la Figura 15 de hecho la excitatriz es un generador de ca en los devanados rotatorios se rectifica por medio de diodos montados sobre la estructura rotatoria. El voltaje en dc producido por los rectificadores rotatorios se aplica directamente a los devanados de campo del generador, el regulador de voltaje controla la corriente de campo para obtener el voltaje deseado en las terminales(García, 2013).

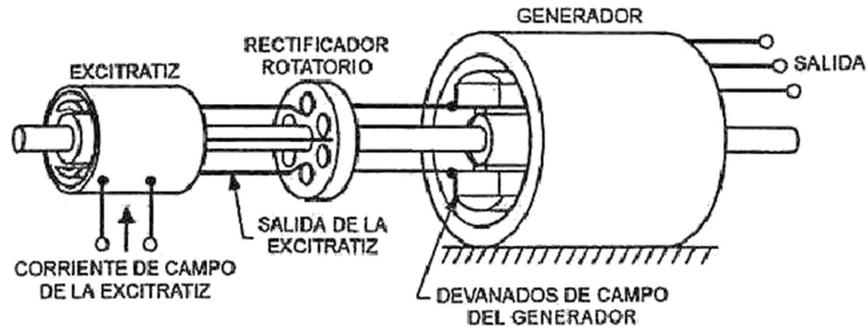


Figura 15. Excitatriz sin escobillas(García, 2013).

Las ventajas sobre el sistema de excitación clásica (corriente continua) son(García, 2013):

- ✓ Apenas requiere mantenimiento(García, 2013).
- ✓ No existe problema de polvo de carbón ya que este sistema moderno no hay escobillas de ningún tipo(García, 2013).
- ✓ Al sistema no le afecta la contaminación atmosférica, dado que todos sus componentes se encuentran cerrados herméticamente(García, 2013).
- ✓ No se requiere reposición de escobillas, limpieza del colector(García, 2013).

### c) Sistema de excitación “excitatriz estática”:

Consiste en que el devanado de campo del rotor es alimentado desde una fuente de alimentación a transformador y rectificadores que toma la tensión y corriente de salida del estator véase la Figura 16. El transformador, de tipo especial, posee dos devanados primarios, llamados de tensión e intensidad, que se conectan en paralelo y en serie a los bornes de salida del estator. El transformador convierte la tensión de salida a una más baja ( $30V_{approx}$ ), que se rectifica y aplica al rotor por medio de escobillas y anillos deslizantes. Es un sistema con autorregulación intrínseca, ya que al tener el bobinado serie, al aumentar el consumo sobre el generador, aumenta el flujo del transformador y por lo tanto aumenta la excitación del generador(García, 2013).

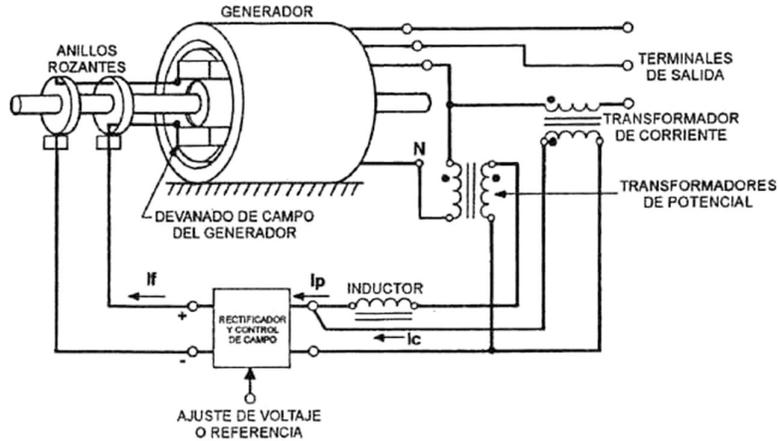


Figura 16. Sistema de excitación estático(García, 2013).

### 1.7 Potencia y Par en los Generadores Síncronos

Un generador síncrono es una máquina síncrona que se utiliza como generador. Convierte potencia mecánica en potencia eléctrica trifásica. La fuente de la potencia mecánica, el motor primario, puede ser un motor diésel, una turbina de vapor, una turbina hidráulica u otro equipo similar. Cualquiera que sea la fuente, debe tener la propiedad básica de mantener su velocidad constante sin importar la demanda de potencia. Si esto no se cumple, entonces la frecuencia resultante del sistema de potencia podría presentar fallas(Chapman, 2000).

No toda la potencia mecánica que entra en un generador síncrono se convierte en potencia eléctrica que sale de la máquina. La diferencia entre la potencia de entrada y la potencia de salida representa las pérdidas en la máquina. En la Figura 17 se muestra el diagrama de flujo de potencia de un generador síncrono. La potencia de entrada es la potencia al eje en el generador  $P_{in} = \tau_{app}\omega_m$ , mientras que la potencia mecánica convertida internamente en eléctrica está dada por(Chapman, 2000):

$$P_{conv} = \tau_{ind}\omega_m \text{ Ecuación 14 (Chapman, 2000)}$$

$$P_{conv} = 3E_A I_A \cos(\gamma) \text{ Ecuación 15 (Chapman, 2000)}$$

donde  $\gamma$  es el ángulo entre  $E_A$  e  $I_A$ , La diferencia entre la potencia de entrada al generador y la potencia convertida en el generador representa las pérdidas mecánicas, en el núcleo, y es las pérdidas misceláneas de la máquina(Chapman, 2000).

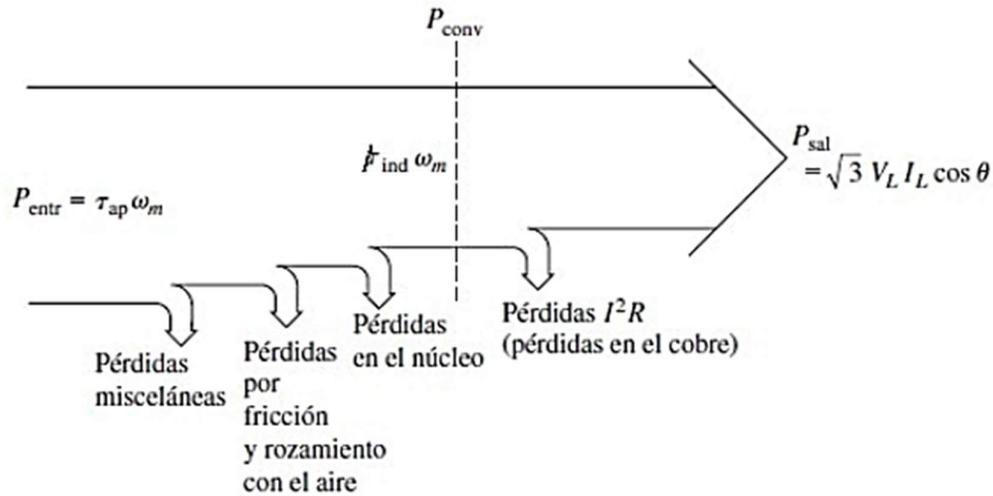


Figura 17. Diagrama de potencia en un generador síncrono(Chapman, 2000).

La potencia eléctrica de salida real de un generador síncrono se puede expresar en cantidades de línea a línea como(Chapman, 2000):

$$P_{sal} = \sqrt{3}V_T I_L \cos(\theta) \text{ Ecuación 16 (Chapman, 2000)}$$

Y en cantidades de fase como

$$P_{sal} = 3V_\phi I_A \cos(\theta) \text{ Ecuación 17 (Chapman, 2000)}$$

La potencia reactiva de salida puede ser expresada en cantidades de línea a línea como:

$$Q_{sal} = \sqrt{3}V_T I_L \sin(\theta) \text{ Ecuación 18 (Chapman, 2000)}$$

O en cantidades de fase como

$$Q_{sal} = 3V_\phi I_A \sin(\theta) \text{ Ecuación 19 (Chapman, 2000)}$$

Si se desprecia la resistencia del inducido  $R_A$  (debido a que  $X_S \gg R_A$ ), entonces se puede deducir una ecuación muy útil para obtener una aproximación de la potencia de salida del generador. Para deducir esta ecuación se debe examinar el diagrama fasorial de la Figura 18, que muestra un diagrama fasorial simplificado de un generador en el que se desprecia la resistencia del estator. Nótese que se puede expresar el segmento vertical  $bc$  se puede expresar como  $E_A \sin \delta$  o  $X_S I_A \cos \theta$ . Por lo tanto(Chapman, 2000),

$$I_A \cos \theta = \frac{E_A \sin \delta}{X_S} \text{ Ecuación 20 (Chapman, 2000)}$$

Al sustituir esta expresión en la ecuación 17 se obtiene

$$P = \frac{3V_\phi E_A \sin \delta}{X_S} \text{ Ecuación 21 (Chapman, 2000)}$$

Debido a que en la ecuación 21 se supuso que las resistencias son cero, eso quiere decir que no hay pérdidas eléctricas en el generador y la ecuación es igual para  $P_{con}$  y  $P_{sal}$  (Chapman, 2000).



El circuito equivalente de un generador sincrónico que se ha derivado contiene tres cantidades que deben determinarse para describir completamente el comportamiento de un generador sincrónico real(Chapman, 2000).

1. La relación entre flujo y corriente de campo (y por lo tanto entre corriente de campo y  $E_A$ ) (Chapman, 2000).
2. La reactancia sincrónica(Chapman, 2000).
3. La resistencia del inducido(Chapman, 2000).

En este apartado se describe una técnica sencilla para determinar estas cantidades en un generador sincrónico(Chapman, 2000).

El primer paso consiste en realizar la **prueba de circuito abierto** del generador, para llevar a cabo este ensayo, se hace girar el generador a su velocidad nominal desconectando todo los terminales de cualquier carga y se coloca la corriente de campo en cero. Entonces se incrementa gradualmente la corriente de campo en pasos y se mide el voltaje en los terminales en cada paso durante la prueba. Con los terminales abiertos  $I_A = 0$  por lo que  $E_A$  es igual a  $V_\phi$ . Con esta información es posible elaborar una gráfica de  $E_A$  o  $V_T$  contra  $I_F$ . Este gráfico es llamado *características de circuito abierto (OCC)* del generador(Chapman, 2000).

La Figura 19-a muestra una característica típica de estas, nótese que en principio la curva es casi perfectamente lineal hasta observar una saturación a altas corrientes de campo. Dado que el hierro no saturado en el marco de la máquina sincrónica tiene una reluctancia varias miles de veces menor que la reluctancia del entrehierro, al principio casi *toda* la fuerza magnetomotriz se ejerce a través del entrehierro el incremento en el flujo resultante es lineal, cuando finalmente el hierro se satura, su reluctancia se incrementa en forma dramática: el flujo se incrementa mucho más despacio cuando se incrementa la fuerza magnetomotriz. La porción lineal de una OCC se llama *línea de entrehierro* de la característica(Chapman, 2000).

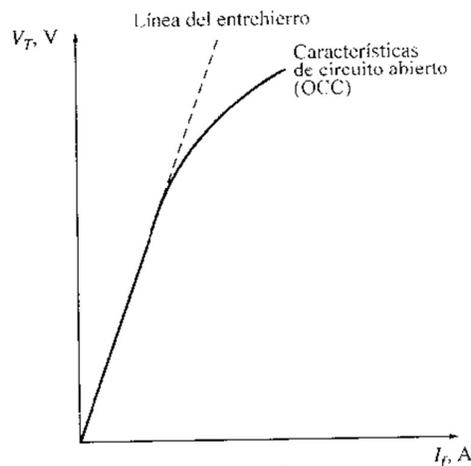


Figura 18-a. Curva característica del circuito abierto (OCC) de un generador sincrónico(Chapman, 2000).

El segundo paso del proceso es llevar a cabo la **prueba de cortocircuito**, para esta prueba, se ajusta la corriente de campo nuevamente en cero y se cortocircuitan los terminales del generador por medio de un grupo de amperímetros. Luego, cuando se incrementa la corriente de campo, se mide la corriente del inducido  $I_A$  o la corriente de línea  $I_L$ . LA característica de corriente de inducido contra la corriente de campo se llama *característica de cortocircuito (SCC)* y se muestra

en la Figura 18-b, en esencia es una línea recta. Para entender porque es una línea recta, obsérvese el circuito equivalente de la Figura 11 cuando los terminales de la máquina están cortocircuitados. Tal circuito se muestra en la Figura 19-a, nótese que cuando los terminales están cortocircuitados, la corriente del inducido  $I_A$  esta dada por(Chapman, 2000):

$$I_A = \frac{E_A}{R_A + jX_S} \text{ Ecuación 25 (Chapman, 2000)}$$

Y su magnitud está dada por:

$$I_A = \frac{E_A}{\sqrt{R_A^2 + X_S^2}} \text{ Ecuación 26 (Chapman, 2000)}$$

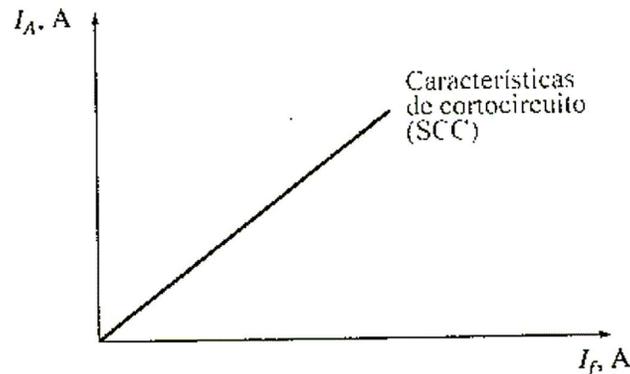


Figura 18-b. Curva característica de cortocircuito (SCC) de un generador síncrono(Chapman, 2000).

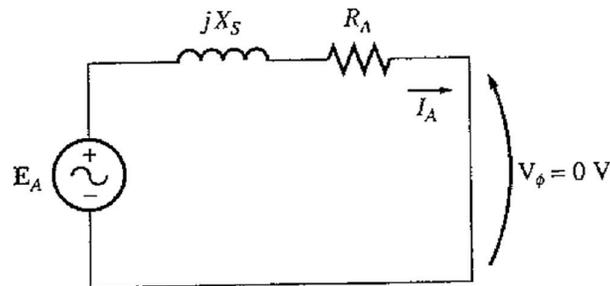


Figura 19-a. Circuito equivalente de un generador síncrono durante la prueba de cortocircuito(Chapman, 2000).

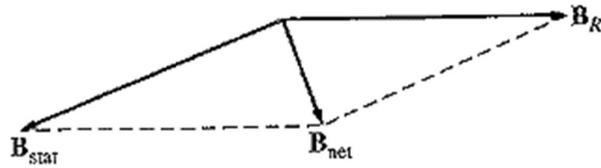
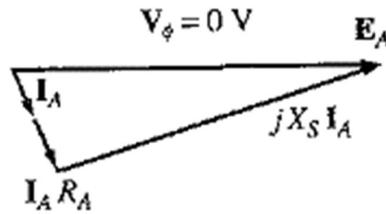
El diagrama fasorial resultante se muestra en la Figura 19-b y los campos magnéticos correspondientes se muestran en la figura 19-c.

Para entender la información proporcionada por estas características nótese que, cuando  $V_\phi$  igual a cero en la Figura 19-b, la *impedancia interna de la máquina* está dada por

$$Z_S = \sqrt{R_A^2 + X_S^2} = \frac{E_A}{I_A} \text{ Ecuación 27 (Chapman, 2000)}$$

Puesto que  $X_S \gg R_A$ , esta ecuación se reduce a

$$X_S \approx \frac{E_A}{I_A} = \frac{V_{\phi OC}}{I_A} \text{ Ecuación 28 (Chapman, 2000)}$$



a) b)

Figura 19-b. Diagrama fasorial resultante.

Figura 19-c. Campos magnéticos durante la prueba de cortocircuito.

Si  $E_A$  e  $I_A$  son conocidos para una situación dada, se puede hallar la reactancia sincrónica  $X_S$  (Chapman, 2000).

Un método *aproximado* para determinar la reactancia sincrónica  $X_S$  para una corriente de campo dada es (Chapman, 2000):

1. Obtenga el voltaje interno generado  $E_A$  de la característica OCC para esa corriente de campo (Chapman, 2000).
2. Obtenga la corriente de cortocircuito  $I_{A,SC}$  para esa corriente de campo de las características SCC (Chapman, 2000).
3. Encuentre  $X_S$  aplicando la ecuación 28 (Chapman, 2000).

### 1.9 Generador síncrono bajo carga

El comportamiento de un generador síncrono depende del tipo de carga que tiene que alimentar. Existen muchos tipos de carga, pero todas se pueden reducir a dos categorías básicas (Wildi, 2006).

1. Cargas aisladas, alimentadas por un solo generador (Wildi, 2006).
2. El bus infinito o barra conductora infinita (Wildi, 2006).

En este módulo se estudiará con cargas aisladas, por lo tanto considere un generador trifásico que suministra potencia a una carga que tiene un factor de potencia retrasado la Figura 20 representa el circuito equivalente de una fase, para construir el diagrama fasorial de este circuito, enumeramos los hechos siguientes (Wildi, 2006):

1. La corriente  $I$  está retrasada un ángulo  $\theta$  con respecto al voltaje terminal  $E$  (Wildi, 2006).
2. El  $\cos(\theta) = \text{factor de potencia de la carga}$  (Wildi, 2006).

3. EL voltaje  $E_x$  a través de la reactancia síncrona está adelantado  $90^\circ$  con respecto a la corriente  $I$ , la cual está dada por la expresión  $E_x = jIX_s$  (Wildi, 2006).
4. EL voltaje  $E_0$  generado por el  $\Phi$  es igual a la suma fasorial de  $E$  más  $E_x$  (Wildi, 2006).
5.  $E_0$  y  $E_x$  son voltajes que existen en el interior de los devanados del generador síncrono y no es posible medirlos directamente(Wildi, 2006).
6. El flujo  $\Phi$  es el producido por la corriente directa de excitación  $I_x$  (Wildi, 2006).

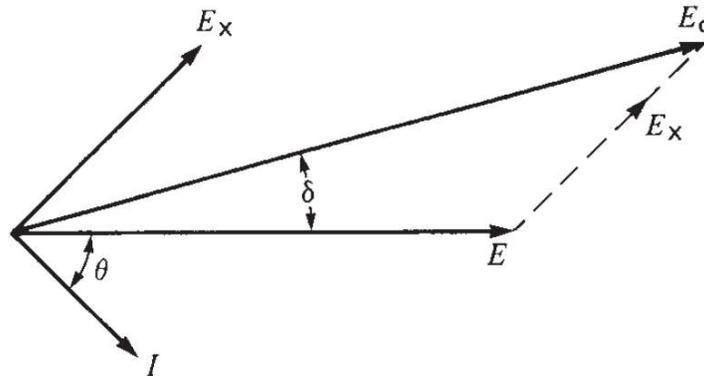


Figura 20. Diagrama fasorial de una carga con factor de potencia retrasado(Wildi, 2006).

El diagrama fasorial resultante de la Figura 20, observe que  $E_0$  está adelantado  $\delta$  grados con respecto a  $E$ . Además el voltaje  $E_0$  generado internamente es más grande que el voltaje terminal(Wildi, 2006).

En algunos casos la carga es un tanto capacitiva, para que la corriente  $I$  este adelantada un ángulo  $\theta$  con respecto al voltaje terminal, por lo tanto cambiará el diagrama fasorial como se muestra en la Figura 21. El voltaje  $E_x$  a través de la reactancia síncrona sigue  $90^\circ$  adelantada de la corriente, además  $E_0$  de nuevo es igual a la suma fasorial  $E$  y  $E_x$ , sin embargo el voltaje terminal ahora es *más grande* que el voltaje inducido  $E_0$  (Wildi, 2006).

En realidad, la reactancia inductiva  $X_s$  entra en resonancia parcial con la reactancia capacitiva de la carga, el voltaje terminal más alto no produce más potencia(Wildi, 2006).

Si la carga es totalmente capacitiva, se puede producir un voltaje terminal muy alto con una pequeña corriente de excitación(Wildi, 2006).

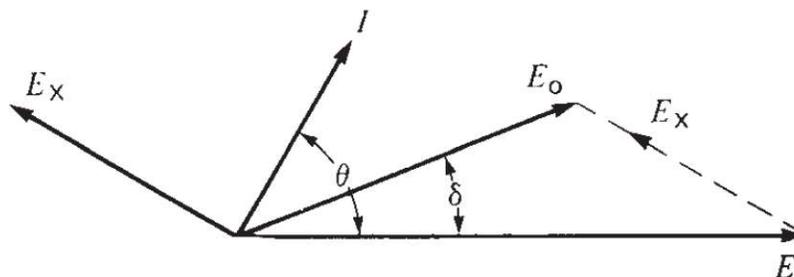


Figura 21. Diagrama fasorial de una carga con factor de potencia adelantado(Wildi, 2006).

### Ejemplo1:

Un generador trifásico síncrono produce un voltaje de línea de circuito abierto de 6928V cuando la corriente directa de excitación es de 50A. Entonces los terminales de dc se ponen en cortocircuito y se ve que las corrientes de línea con 800A(Wildi, 2006).

- Calcule la reactancia síncrona por fase(Wildi, 2006).
- Calcule el voltaje terminal si se conecta tres resistencias de  $12\Omega$  en Y a través de los terminales(Wildi, 2006).

**Solución:**

a)

El voltaje inducido de línea a neutro es

$$E_0 = E_L / \sqrt{3}$$

$$E_0 = 6928 / \sqrt{3}$$

$$E_0 = 4000V.$$

Cuando los terminales están en cortocircuito, la única impedancia que limita el flujo de corriente es la producida por la reactancia síncrona.

Por lo tanto

$$X_s = \frac{E_0}{I} = 4000 / 800$$

$$X_s = 5\Omega$$

La reactancia síncrona por fase es entonces  $5\Omega$ .

b)

El circuito equivalente se muestra en la Figura 22

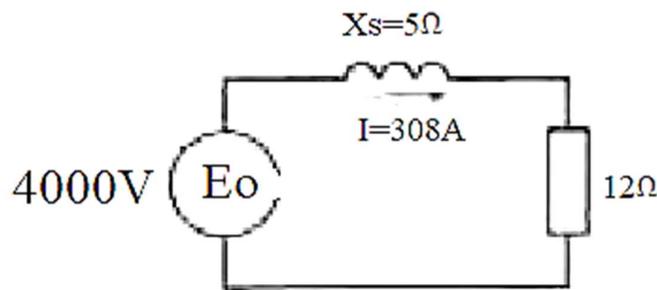


Figura 22. Circuito equivalente(Wildi, 2006).

La impedancia del circuito es

$$Z_s = \sqrt{R_A^2 + X_s^2}$$

$$Z_s = \sqrt{12^2 + 5^2}$$

$$Z_s = 13\Omega$$

La corriente es

$$I = \frac{E_0}{Z} = \frac{4000}{13}$$

$$I = 308A$$

El voltaje a través del resistor de carga es

$$E = IR = 308 \times 12$$

$$E = 3696V$$

El voltaje de línea bajo carga es

$$E_L = \sqrt{3}E$$

$$E_L = \sqrt{3} \times 3696$$

$$E_L = 6402V$$

### 1.10 Sincronización de un generador

Con frecuencia es necesario conectar dos o más generadores en paralelo para abastecer una carga común. Por ejemplo, como los requerimientos de potencia de un gran sistema de suministro eléctrico aumentan durante el día, los generadores se conectan en sucesión al sistema para proporcionar potencia adicional(Wildi, 2006).

Más tarde, cuando disminuye la demanda, se seleccionan algunos generadores y se desconectan temporalmente del sistema hasta la potencia aumenta de nuevo al siguiente día. Por lo tanto, los generadores síncronos se conectan y se desconectan con regularidad de una gran red eléctrica de potencia en su respuesta a las demandas de los clientes(Wildi, 2006).

Se dice que esta red es un bus *infinito* porque contiene tantos generadores esencialmente conectados en paralelo que ni el voltaje ni la frecuencia de la red se pueden alterar(Wildi, 2006).

Antes de conectar un generador a un bus infinito (o en paralelo a otro generador), debemos *sincronizarlos*. Se dice que un generador está sincronizado cuando satisface las siguientes condiciones(Wildi, 2006):

1. La frecuencia del generador es igual a la frecuencia del sistema(Wildi, 2006).
2. EL voltaje del generador es igual al voltaje del sistema(Wildi, 2006).
3. El voltaje del generador está en fase con el voltaje del sistema(Wildi, 2006).
4. La secuencia de fases del generador es igual que la del sistema(Wildi, 2006).

Para sincronizar un alternador se procede de acuerdo a los siguientes pasos:

1. Se ajusta el regulador de velocidad de la turbina de modo que la frecuencia del generador se aproxime a la frecuencia del sistema(Wildi, 2006).
2. Se ajusta la excitación de modo que el voltaje  $E_0$  del generador sea igual al voltaje  $E$  del sistema(Wildi, 2006).
3. Se observa el ángulo de fase entre  $E_0$  y  $E$  por medio de un *sincronoscopio*(Wildi, 2006).
4. El cortacircuito de la línea se cierra y conecta el generador(Wildi, 2006).
5. En estaciones de generación moderna la sincronización se realiza de forma automática(Wildi, 2006).

## CAPÍTULO 2

### **Tema del Capítulo: El Motor Asíncrono Trifásico.**

**Resultado de Aprendizaje:** Analiza desde el punto de vista técnico las diferencias entre valores medidos en el laboratorio y los obtenidos en la teoría y se obtiene conclusiones al respecto.

## **2. EL MOTOR ASÍNCRONO TRIFÁSICO**

### **2.1 Introducción**

El principio de funcionamiento de las máquinas asíncronas se basa en el concepto del campo magnético giratorio, los motores asíncronos o de inducción son un tipo de motores eléctricos de corriente alterna. El primer prototipo de motor eléctrico capaz de funcionar con corriente alterna fue desarrollado y construido por el ingeniero Nikola Tesla y presentado en el American Institute of Electrical Engineers (Instituto Americano de Ingenieros Eléctricos, actualmente IEEE) en 1888, posteriormente a principio del siglo

XX se impuso el sistema trifásico europeo, frente al bifásico americano, por lo que las máquinas asíncronas empezaron (y son) trifásicas(Mora, 2003).

La diferencia de la máquina asíncrona con las demás tipos de máquinas se debe a que no existe corriente conducida a uno de los arrollamientos, la corriente que circula por uno de los devanados (generalmente situado en el rotor) se debe a la f.e.m inducida por acción del flujo del otro, y por esta razón se denominan *máquinas de inducción* . También reciben el nombre de *máquinas asíncronas* debido a que la velocidad de giro del rotor no es la del sincronismo impuesta por la frecuencia de la red. La importancia de los motores asíncronos se debe a su construcción simple y robusta, sobre todo en el caso del rotor jaula de ardilla, que les hace trabajar en las circunstancias más adversas, dando un excelente servicio con pequeño mantenimiento(Mora, 2003).

Actualmente se puede decir que más del 80% de los motores eléctricos industriales emplean este tipo de máquina, trabajando con una frecuencia de alimentación constante, sin embargo, históricamente su inconveniente más grave ha sido la limitación para regular su velocidad, además no permite la regulación de potencia reactiva, en diversas aplicaciones como la tracción eléctrica, trenes de laminación, etc., eran sustituidos por motores dc, que eran los más idóneos para este servicio(Mora, 2003).

## 2.2 Aspectos constructivos

La máquina asíncrona o de inducción al igual que cualquier otro dispositivo de conversión electromecánica de la energía de tipo rotativo, está formada por un estator y un rotor(Mora, 2003).

En el estator se coloca normalmente el inductor, alimentado por una red mono o trifásica. El rotor es el inducido, y las corrientes que circulan por él aparecen como consecuencia de la interacción con el flujo del estator. Dependiendo del tipo de rotor, estas máquinas se clasifican en: *a) rotor en jaula de ardilla o en cortocircuito, y b) rotor devanado o con anillos*(Mora, 2003).

El estator está formado por un apilamiento de chapas de acero al silicio que disponen de unas ranuras en su periferia interior en las que se sitúa un devanado trifásico distribuido, alimentado por una corriente del mismo tipo, de tal forma que se obtiene un flujo giratorio de amplitud constante distribuido senoidalmente por el entrehierro. El estator está rodeado por la carcasa, tal como indica la Figura 23, disponiéndose en ésta las correspondientes patas de fijación y los anillos o cáncamos de elevación y transporte(Mora, 2003).

El rotor está constituido por un conjunto de chapas apiladas, formando un cilindro, que tienen unas ranuras en la circunferencia exterior, donde se coloca el devanado(Mora, 2003).

En el tipo en forma de jaula de ardilla se tienen una serie de conductores de cobre o aluminio puestos en cortocircuito por dos anillos laterales (el nombre de jaula proviene del aspecto que tomaría este devanado si se omitiera el apilamiento de hierro); en la actualidad, en las máquinas pequeñas, se aplica un método de fundición de aluminio, con el que se producen al mismo tiempo las barras del rotor y los anillos laterales, resultando un conjunto como el que se muestra en la Figura 24. En el caso de rotor devanado o con

anillos, se tiene un arrollamiento trifásico similar al situado en el estator, en el que las tres fases se conectan por un lado en estrella y por el otro se envían a unos anillos aislados entre sí, como se muestra en la Figura 25, esta disposición hace posible la introducción de la resistencia externa por los anillos para limitar las corrientes de arranque, mejorar las características del par y controlar la velocidad(Mora, 2003).

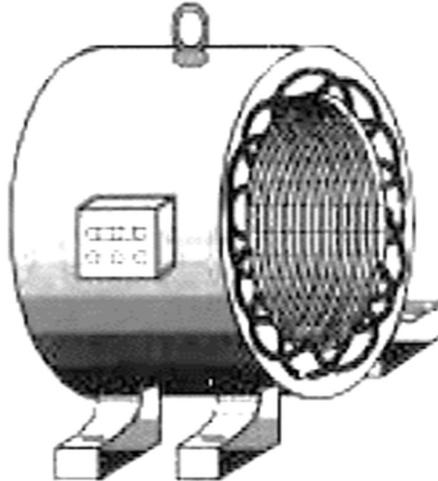


Figura 23. Estator de un motor asíncrono(Mora, 2003).

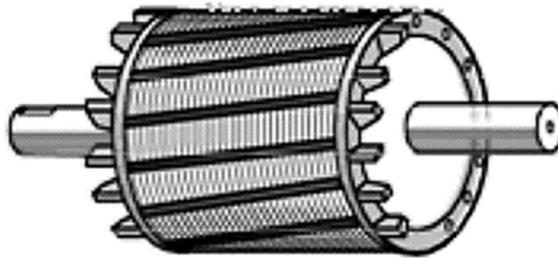


Figura 24. Rotor jaula de ardilla(Mora, 2003).

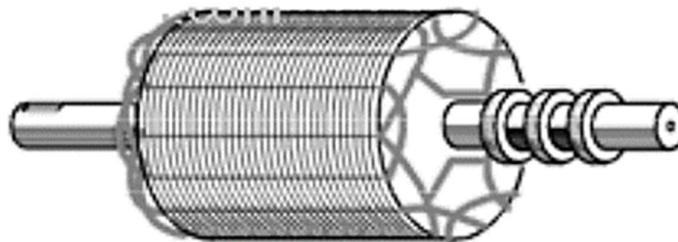


Figura 25. Rotor devanado o con anillos(Mora, 2003).

La máquina asíncrona, además de disponer de un estator y un rotor, está dotada de otros elementos mecánicos necesarios para su funcionamiento: tapas o cubos, rodamientos, carcasa, etc. En los motores de mediana y gran potencia existe un ventilador en el eje, cuya misión es producir una refrigeración forzada de la máquina(Mora, 2003).

A veces la carcasa tiene forma ondulada para mejorar la evacuación del calor que se produce como consecuencia de las pérdidas que aparecen en el motor. Un detalle importante a considerar en los motores asíncronos trifásicos es la disposición de los terminales del devanado del estator en la llamada caja de bornes de la máquina. A esta

caja o placa se llevan los extremos de los bobinados, en la forma que se muestra en la Figura 26-a(Mora, 2003).

De acuerdo con la Norma UNE-EN 60034-8, los principios de los arrollamientos se designan con las letras U1, V1y W1 antiguamente U, V y W y los extremos finales con U2, V2 y W2 antiguamente X, Y, Z respectivamente. Debe destacarse que los terminales de la misma fase no están enfrentados en la regleta e bornes, y esto se debe a que esta disposición facilita el conexionado de la máquina, haciendo uso de unas láminas de latón adecuadas, tal como muestran las Figuras 26-b y 26-c. Se observa que en la conexión en triángulo se unen los terminales U1 con W2; V1 con U2 y W1con V2 mientras que en la conexión en estrella se unen entre sí los terminales w con u y u con v en este caso, solamente serían necesarias dos láminas de latón para hacer los puentes correspondientes, pero se utilizan los tres, dos de ellos superpuestos, para poder disponer de las tres láminas cuando se necesite hacer la conexión en triángulo del motor). Los esquemas desarrollados de ambas conexiones se muestran en la Figura 27(Mora, 2003).

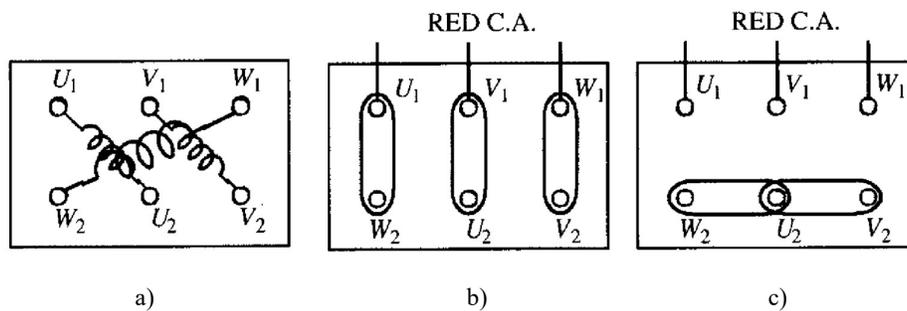


Figura 26-a. Caja de bornes(Mora, 2003).

Figura 26-b. Conexión triángulo(Mora, 2003).

Figura 26-c. Conexión estrella(Mora, 2003).

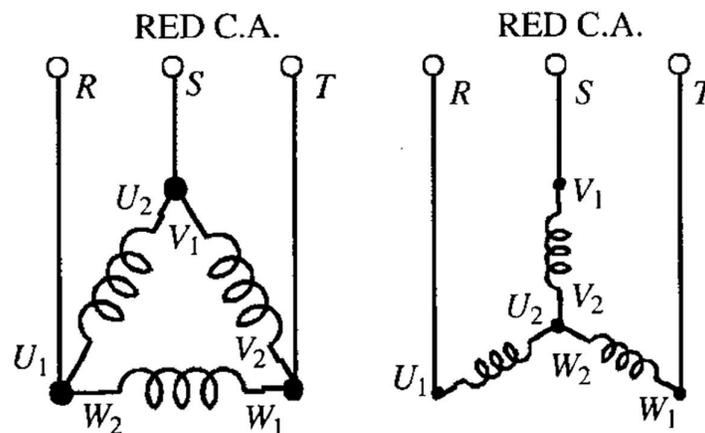


Figura 27. Conexión de placa de bornes(Mora, 2003).

**La conexión en estrella se emplea cuando la máquina ha de conectarse a la tensión más elevada indicada en su placa de características utilizando la conexión en triángulo para la tensión más baja(Mora, 2003).**

Por ejemplo, si se tiene un motor asíncrono en cuya placa aparecen los valores 30 CV, 220/380V 69,2/40A 1450 r.p.m., quiere decir que la potencia asignada es de 30 CV,

girando a plena carga a 1450 r.p.m., se puede conectar a una red de 220 V, disponiendo sus terminales en **triángulo** (tensión más baja), y entonces absorbe a plena carga una corriente de línea de 69,2A también se puede alimentar por una red de 380 V pero para ello han de conectarse los devanados en **estrella** (tensión más alta), de tal forma que entonces la máquina consume una corriente (a plena carga) de 40 A(Mora, 2003).

Los cambios en la conexión esa anteriores se justifican por la necesidad de que la máquina trabaje en ambos casos con las mismas tensiones en los arrollamientos. Para invertir el giro del motor es preciso cambiar el sentido de movimiento del campo giratorio, lo cual se logra intercambiando entre sí dos cualquiera de los cables que se unen a la red de alimentación. En la Figura 28 se muestran una serie de conexiones típicas, indicando los sentidos de giro correspondientes(Mora, 2003).

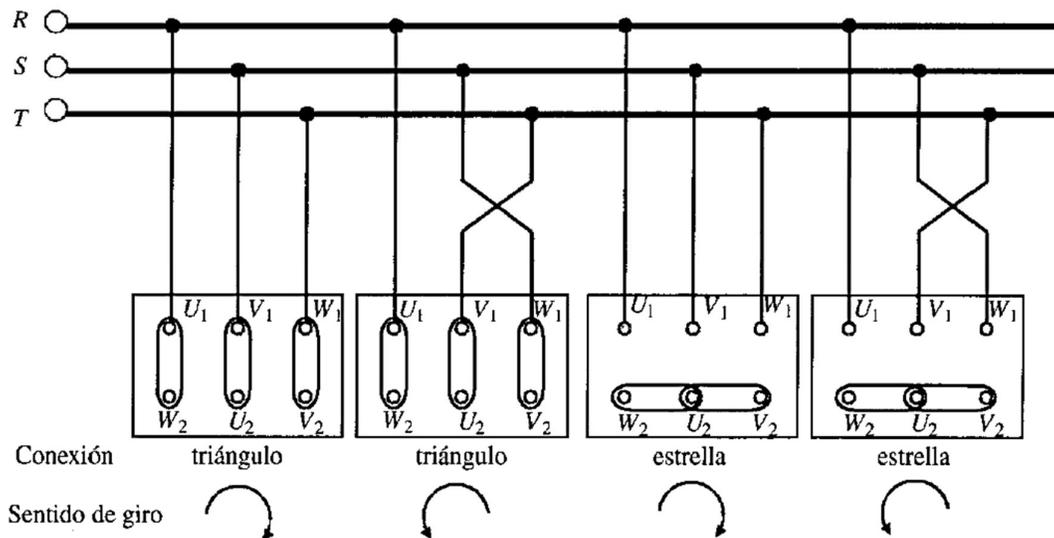


Figura 28. Esquemas desarrollados de las conexiones estrella y triángulo(Mora, 2003).

### 2.3 Principio de Funcionamiento

Generalmente la máquina asíncrona suele funcionar como motor, y a este régimen de funcionamiento nos referimos en lo sucesivo, mientras no se diga lo contrario. El devanado del estator está constituido por tres arrollamientos desfasados 120° en el espacio y de 2p polos; al introducir por ellos corrientes de una red trifásica de frecuencia  $f_1$ , se produce una onda rotativa de f.m.m. distribuida senoidalmente por la periferia del entrehierro, que produce un flujo giratorio cuya velocidad viene expresada, de acuerdo con (2.68), por(Mora, 2003)

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} \text{ (r.p.m)} \text{ Ecuación 29 (Mora, 2003)}$$

que recibe el nombre de velocidad de sincronismo. Este flujo giratorio inducirá f.e.m.s. en los conductores del rotor, y si está su circuito eléctrico cerrado, aparecerán corrientes que reaccionarán con el flujo del estator(Mora, 2003).

El momento total de estas fuerzas origina el par de rotación de la máquina, que obliga a girar al rotor siguiendo el movimiento del campo giratorio, de tal forma que cuanto más se aproxima a la velocidad  $n_1$  del campo, tanto menor resulta la f.e.m. inducida en los

conductores del rotor y, en consecuencia, resultan también reducidas las corrientes en el mismo, provocando esto una disminución del **par interno** o par electromagnético del motor. Si como caso límite, el rotor girase a la velocidad de sincronismo  $n_1$ , no habría entonces movimiento del campo giratorio respecto del rotor, desapareciendo con ello la f.e.m. inducida y como consecuencia de esto se anularía la corriente y el par. De este modo la velocidad de sincronismo  $n_1$  constituye el límite teórico al que puede girar el rotor. El motor debe girar a una velocidad inferior a la de sincronismo ( $n < n_1$ ), es decir, su velocidad de régimen es **asíncrona**, a este fenómeno se le conoce con el nombre de **deslizamiento**(Mora, 2003)

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \text{ Ecuación 30 (Mora, 2003)}$$

cuyo valor está comprendido en los motores industriales entre el 3 y el 8 por 100 a plena carga. Al aumentar la carga mecánica del motor, el par resistente se hace mayor que el par interno y el deslizamiento aumenta; esto provoca un aumento en las corrientes del rotor, gracias a lo cual aumenta el par motor y se establece el equilibrio dinámico de los momentos resistente y motor(Mora, 2003).

**Nota práctica de laboratorio:** Para medir la velocidad de giro de un motor asíncrono se utilizan tacómetros de tipo mecánico o en la actualidad de tipo óptico; sin embargo, esta medida no es lo suficientemente precisa para la determinación del deslizamiento, ya que al ser la diferencia  $n_1 - n$  muy pequeña cualquier error de lectura tiene como consecuencia un error importante en el deslizamiento. Es por este motivo que en los ensayos de laboratorio se mide la velocidad del rotor por métodos estroboscópicos o modernamente con encoders acoplados al eje del motor(Mora, 2003).

Las frecuencias de las corrientes del rotor están relacionadas con la frecuencia del estator por medio de la expresión(Mora, 2003):

$$f_2 = s f_1 \text{ Ecuación 31 (Mora, 2003)}$$

En el caso de que el rotor esté parado, se cumple  $n = 0$ , es decir,  $s = 1$  lo que indica que en estas circunstancias las frecuencias del estator y del rotor coinciden, esto es(Mora, 2003):

$$f_2 = f_1 \text{ Ecuación 32 (Mora, 2003)}$$

Cuando el rotor gira a la velocidad  $n$ , en el sentido del campo giratorio, el deslizamiento ya no es la unidad y las frecuencias de las corrientes del rotor son iguales a  $f_2$ . Denominando  $E_{2s}$  a la nueva f.e.m. inducida en este devanado, se cumplirá(Mora, 2003):

$$E_2 = 4,44 k_2 f_1 N_2 \Phi_m \text{ Ecuación 33 (Mora, 2003)}$$

$$E_{2s} = 4,44 k_2 f_2 N_2 \Phi_m \text{ Ecuación 34 (Mora, 2003)}$$

Y de forma similar, si se denomina  $E_1$  al valor eficaz de la f.e.m. inducida por fase del estator, se tendrá:

$$E_1 = 4,44 k_1 f_1 N_1 \Phi_m \text{ Ecuación 35 (Mora, 2003)}$$

Obteniendo entre Ecuación 33 y Ecuación 34:

$$E_{2s} = sE_2 \text{ Ecuación 36 (Mora, 2003)}$$

expresión que relaciona las f.e.m.s. inducidas en el rotor, según se considere que está en movimiento,  $E_{2s}$ , o parado,  $E_2$ . La f.e.m. anterior  $E_{2s}$ , producirá unas corrientes en el rotor de frecuencia  $f_2$ , de tal forma que éstas a su vez crearán un campo giratorio, cuya velocidad respecto a su propio movimiento será(Mora, 2003):

$$n_2 = \frac{60f_2}{p} \text{ Ecuación 37 (Mora, 2003)}$$

ya que el rotor está devanado con el **mismo número de polos que el estator**. Como la máquina gira a  $n$  r.p.m., la velocidad del campo giratorio del rotor respecto a un referencial en reposo será  $n_2 + n$ . Si se tienen en cuenta las Ecuaciones 29 y Ecuación 31 resulta(Mora, 2003):

$$f_2 = sf_1 = \frac{n_1 - n}{n_1} \cdot \frac{pn_1}{60} = \frac{p(n_1 - n)}{60} \text{ Ecuación 38 (Mora, 2003)}$$

y al comparar con la Ecuación 36 se reduce:

$$n_2 = n_1 - n \text{ Ecuación 39 (Mora, 2003)}$$

en consecuencia, la velocidad absoluta del campo será:

$$n_2 + n = (n_1 - n) + n = n_1 \text{ Ecuación 40 (Mora, 2003)}$$

lo que indica que el campo del rotor gira en sincronismo con el campo del estator.

No es necesario, sin embargo, que el número de fases del estator y del rotor deban ser iguales, ya que el campo giratorio dentro del cual se mueve el rotor es independiente del número de fases del estator. Los motores con rotor devanado o con anillos se construyen normalmente para tres fases, es decir, igual que las del estator; sin embargo, el motor en jaula de ardilla está formado por un gran número de barras puestas en cortocircuito, dando lugar a un devanado polifásico, en general de  $m_2$  fases(Mora, 2003).

Como quiera que el sentido de transferencia de la energía en un motor asíncrono se produce de estator a rotor por inducción electromagnética de un modo similar al que se obtenía entre el primario y el secundario de un transformador, esto hace que la analogía se traslade no solamente a la simbología de las magnitudes implicadas sino incluso también, en algunos autores, a las propias denominaciones. De ahí que al estudiar motores asíncronos se consideren homónimas las expresiones: estator y primario, rotor y secundario(Mora, 2003).

El circuito equivalente desarrollado para el transformador será la guía para deducir el circuito equivalente del motor. Si se desea establecer las ecuaciones de comportamiento eléctrico del estator y del rotor, será preciso tener en cuenta que los arrollamientos tienen unas resistencias  $R_1$  y  $R_2$  ohmios/fase y que además existen flujos de dispersión en los devanados del estator y rotor que dan lugar a las autoinducciones  $L_{d1}$  y  $L_{d2}$ . En consecuencia, las reactancias de los arrollamientos en reposo, cuando la pulsación de la red es  $\omega_1 = 2\pi f_1$ , serán(Mora, 2003):

$$X_1 = L_{d1}\omega_1 = L_{d1}2\pi f_1 ; X_2 = L_{d2}\omega_1 = L_{d2}2\pi f_1 \text{ Ecuación 41 (Mora, 2003)}$$

Sin embargo, al girar el rotor la frecuencia secundaria cambia al valor  $f_2$ , dando lugar a la reactancia  $X_{2s}$ , que en función de  $X_2$  vale:

$$X_{2s} = L_{d2}\omega_2 = L_{d2}2\pi f_2 = sX_2 \text{ Ecuación 42 (Mora, 2003)}$$

En la Figura 29 se muestra un esquema simplificado por fase del motor en el que se muestran los parámetros anteriores. Se observa que el primario está alimentado por la red de tensión  $V_1$  y debe vencer las caídas de tensión en la impedancia de este devanado y el flujo común a estator y rotor induce en los arrollamientos f.e.m.s.  $E_1$  y  $E_{2s}$ , cuyas magnitudes se indican en la Ecuación 34 y Ecuación 35(Mora, 2003).

Es importante examinar la figura 29 las polaridades de las f.e.m.s. con la correspondencia de los terminales homólogos de estator y rotor, señalados con un punto, y también los sentidos de las corrientes primaria y secundaria, que se han asignado de un modo similar al explicado en los transformadores, *actuando la f.m.m. secundaria en contra (efecto desmagnetizante) respecto de la f.m.m. primaria* (ya que la corriente  $I_1$  entra por punto y la corriente  $I_2$  sale por punto)(Mora, 2003).

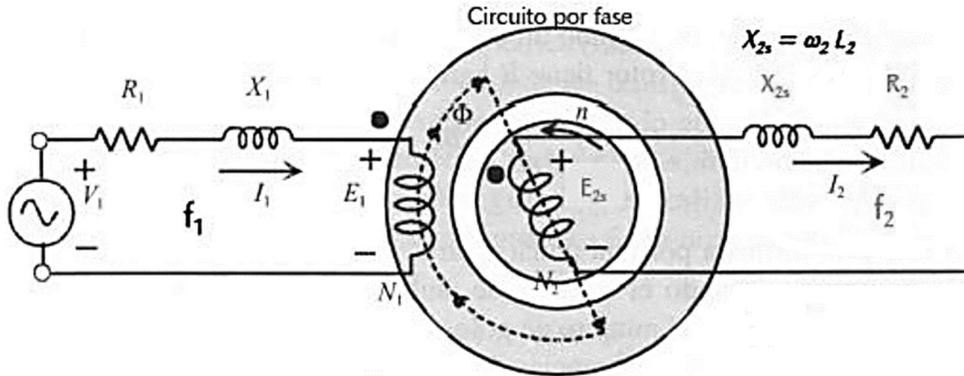


Figura 29. Circuito equivalente por fase del motor asíncrono trifásico(Mora, 2003).

La impedancia del rotor está formada por la resistencia  $R_2$  y la reactancia  $X_2$ , estando este devanado cerrado en cortocircuito. Las ecuaciones eléctricas correspondientes se obtendrán aplicando el segundo lema de Kirchhoff a las mallas de primario y secundario, resultando(Mora, 2003):

$$V_1 = E_1 + R_1 I_1 + jX_1 I_1 ; E_{2s} = R_2 I_2 + jX_{2s} I_2 \text{ Ecuación 43 (Mora, 2003)}$$

Debe tenerse en cuenta además que las frecuencias de ambos circuitos son diferentes y de valores  $f_1$  y  $f_2$ , respectivamente(Mora, 2003).

## 2.4 Circuito Equivalente del motor asíncrono

El circuito equivalente de un motor asíncrono tiene como objetivo, al igual que en el caso de transformadores, el obtener una red que explique el comportamiento de la máquina, pero en la que no aparezca la acción transformadora entre los circuitos de primario y secundario, lo cual trae consigo el reducir las magnitudes de un devanado al otro, generalmente del rotor al estator. En el transformador la operación se hacía directamente debido a que las frecuencias de los arrollamientos eran idénticas, pero en el motor

aparentemente se tiene una dificultad, ya que las frecuencias de las corrientes del estator y del rotor son diferentes, como se observa claramente en la Figura 29. En este circuito, la corriente que circula por el rotor, de acuerdo con la segunda Ecuación 43, será (Mora, 2003):

$$I_2 = \frac{E_2}{R_2 + jX_{2s}} \quad \text{Ecuación 44 (Mora, 2003)}$$

que teniendo en cuenta las igualdades Ecuación 36 y Ecuación 42 se convierte en:

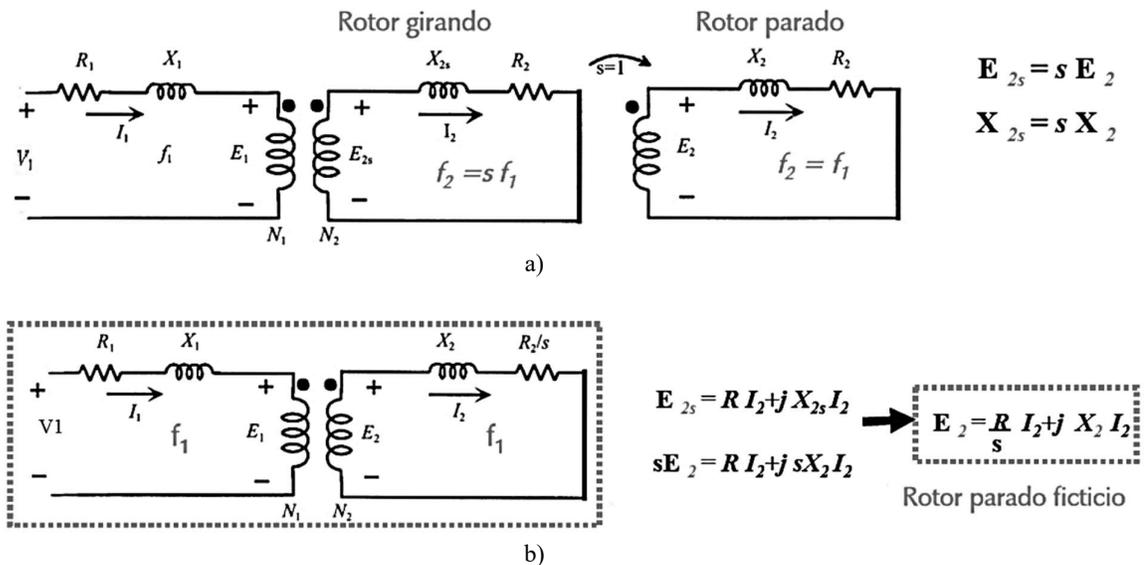
$$I_2 = \frac{sE_2}{R_1 + jsX_2} = \frac{E_2}{\frac{R_2}{s} + jX_2} \quad \text{Ecuación 45 (Mora, 2003)}$$

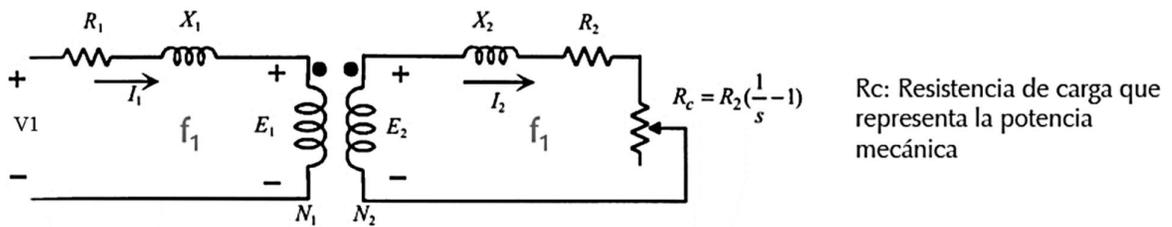
Para visualizar mejor estos cambios se han preparado los circuitos de la Figura 30. El caso a) es una repetición del esquema de la Figura 29, en el que para mayor claridad se ha omitido la figura de la máquina. La ecuación de la corriente en el rotor responde a la Ecuación 44. En la Figura 30-b se ha modificado el circuito del rotor para adaptarlo a la Ecuación 45; nótese en este nuevo secundario que  $E_2$  y  $X_2$  son, respectivamente, la f.e.m. y la reactancia del rotor en reposo, independientes del movimiento; el efecto de éste se incluye en  $R/s$ , de tal modo que la frecuencia de este **rotor estacionario ficticio** es  $f_1$ . Para ver el cambio que se ha producido en la resistencia del rotor se puede hacer una transformación de la Ecuación 45 (Mora, 2003):

$$I_2 = \frac{E_2}{R_2 + jX_2 + R_2\left(\frac{1}{s} - 1\right)} \quad \text{Ecuación 46 (Mora, 2003)}$$

En la Figura 30-c se muestra el circuito correspondiente a la expresión anterior, que consta de la resistencia propia del rotor  $R_2$  más otra resistencia  $R_c$  de valor (Mora, 2003):

$$R_c = R_2 \left( \frac{1}{s} - 1 \right) \quad \text{Ecuación 47 (Mora, 2003)}$$





c)  
 Figura 30. Desarrollo del circuito equivalente de un motor asíncrono(Mora, 2003).

que depende del movimiento (del valor del deslizamiento). La resistencia  $R_e$  se denomina **resistencia de carga** y representará el **efecto equivalente** a la carga mecánica que lleve el motor, o de otro modo la potencia eléctrica disipada en  $R_c$  (multiplicada por el número de fases) representará la potencia desarrollada por el motor en su movimiento de rotación, es decir, la potencia mecánica en el eje(Mora, 2003).

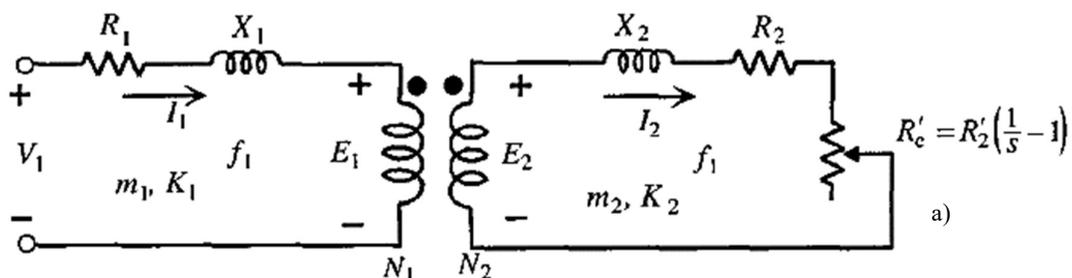
El circuito final obtenido de la Figura 30-c no reúne todavía las ventajas analíticas de un circuito eléctrico, ya que existen acoplamientos magnéticos. Es preciso, al igual que se hacía en transformadores, reducir el secundario al primario (en nuestro, caso reducir o trasladar el rotor al estator)(Mora, 2003).

Recuérdese que en el caso de transformadores para hacer este cambio se requería considerar un nuevo secundario en el que se elegía un número de espiras  $N'_2 = N_1$  y de este modo se modificaban las magnitudes secundarias a los nuevos valores(Mora, 2003):

$$E'_2 = mE_2; I'_2 = \frac{I_2}{m}; R'_2 = m^2R_2; X'_2 = m^2X_2 \text{ Ecuación 48 (Mora, 2003)}$$

En la situación del motor el proceso es más complejo debido a la influencia de los factores de devanado y a que en general los números de fases del estator y rotor no coinciden(Mora, 2003).

En la Figura 31-a se ha repetido el esquema de la Figura 30-c y en la Figura 31-b se ha utilizado un secundario equivalente en el que las magnitudes correspondientes se han señalado con tilde. En cada caso se han indicado en los circuitos el número de fases y factores de devanado tanto del estator como del rotor(Mora, 2003).



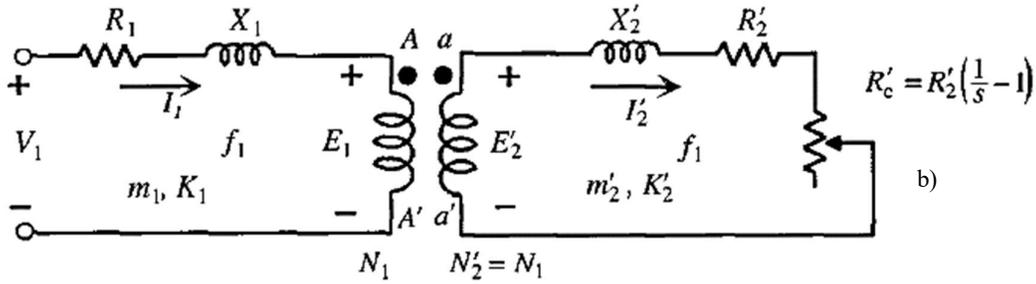


Figura 31. Circuito equivalente reducido al estator(Mora, 2003).

Para centrar el tema y a modo de recapitulación: sabemos que disponemos de un motor asíncrono cuyo circuito inicial equivalente por fase es el mostrado en la Figura 31-a, con los siguientes parámetros(Mora, 2003):

ESTATOR (primario):  $\{m_1, k_1, N_1, E_1, V_1, I_1, R_1, X_1\}$

ROTOR (secundario):  $\{m_2, k_2, N_2, E_2, V_2, I_2, R_2, X_2\}$  Ecuación 49 (Mora, 2003)

En la Figura 31-b se ha mostrado un circuito equivalente, en el que se conserva intacto el primario pero en el que las magnitudes del secundario son(Mora, 2003):

ROTOR EQUIVALENTE:  $\{m_2, K_2, N_2', E_2', V_2', I_2', R_2', X_2'\}$  Ecuación 50 (Mora, 2003)

Si este nuevo rotor se quiere reducir al estator, para conseguir una simplificación posterior, se tendrán que adaptar sus parámetros a los del primario, lo que significa proceder a las igualdades siguientes(Mora, 2003):

$$m_2' = m_1 ; K_2' = K_1 ; N_2' = N_1 \text{ Ecuación 51 (Mora, 2003)}$$

Como consecuencia de ello, los nuevos parámetros del rotor serán:

a) **Fuerza electromotriz  $E_2'$ :**

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{K_1 N_1}{K_2 N_2} = m_v \text{ Ecuación 52 (Mora, 2003)}$$

que se denomina **relación de transformación de tensiones**, por consiguiente:

$$E_2' = m_v E_2 \text{ Ecuación 53 (Mora, 2003)}$$

que determina la f.e.m del nuevo rotor  $E_2'$  frente a la real  $E_2$ .

b) **Corriente  $I_2'$ :**

$$m_2 E_2 I_2 = m_2' E_2' I_2' = m_1 E_2' I_2' \text{ Ecuación 54 (Mora, 2003)}$$

y teniendo en cuenta la Ecuación 53 da lugar a:

$$I_2' = \frac{m_2}{m_1} \frac{1}{m_v} ; I_2 = \frac{m_2 K_2 N_2}{m_1 K_1 N_1} ; I_2' = \frac{I_2}{m_i} \text{ Ecuación 55 (Mora, 2003)}$$

donde  $m_i$  es igual a

$$m_i = \frac{m_1 K_1 N_1}{m_2 K_2 N_2} = \frac{m_1}{m_2} m_v \quad \text{Ecuación 56 (Mora, 2003)}$$

que se determina **relación de transformación de corrientes**.

**c) Impedancias  $R'_2, X'_2, R'_c$ :**

Para ver la regla de transformación de impedancias deberá aplicarse el principio de igualdad energética. Si se consideran, por ejemplo, las pérdidas en el cobre en los circuitos de la Figura 31 se pueden escribir (Mora, 2003):

$$m_2 R_2 I_2' = m_2' R_2' I_2' = m_1 R_2' I_2' \quad \text{Ecuación 57 (Mora, 2003)}$$

y teniendo en cuenta la Ecuación 55 y Ecuación 56 resultará:

$$R_2' = m_v m_i R_2 \quad \text{Ecuación 58 (Mora, 2003)}$$

y de un modo análogo:

$$X_2' = m_v m_i X_2 \quad ; \quad R_c' = m_v m_i R_c \quad \text{Ecuación 59 (Mora, 2003)}$$

donde el producto  $m_v m_i$  constituye la **denominada relación de transformación de impedancias**.

Puede comprobar que si coinciden las fases del estator y del rotor, coinciden entonces las relaciones de transformación de tensiones y corrientes ( $m_v = m_i$ ) (Mora, 2003).

El esquema correspondiente se muestra en la Figura 32-a, donde se ha dibujado la rama paralelo por la que se derivará la corriente de vacío del motor de un modo análogo a lo que ocurría en el caso de un transformador. La ecuación que relaciona las corrientes de estator y rotor se obtienen del esquema de la Figura 32-a, aplicando el primer lema de Kirchhoff en el nudo A, lo que da lugar a (Mora, 2003):

$$I_1 = I_0 + I_2' = I_0 + \frac{I_2}{m_i} \quad \text{Ecuación 60 (Mora, 2003)}$$

y las ecuaciones eléctricas de primario y secundario correspondiente serán:

$$V_1 = E_1 + R_1 I_1 + jX_1 I_1 \quad ; \quad E_2' = R_2' I_2' + R_c' I_2' + jX_2' I_2' \quad \text{Ecuación 61 (Mora, 2003)}$$

Al igual que sucedía con los transformadores, se obtiene una gran ventaja analítica si se traslada la rama de vacío a los terminales de entrada, lo que da lugar al circuito equivalente aproximado de la Figura 32-b. Los errores que ahora se obtienen con esta aproximación son superiores a los que resultaban en el transformador; esto se debe a la presencia del entrehierro en los motores, que hace que la corriente de vacío sea ahora del 35% al 40% de la asignada, mientras que en el caso del transformador era del orden del 3% al 8% de la asignada. Con el circuito equivalente aproximado se obtienen corrientes en el rotor que son apreciablemente más altas que los valores reales. De todos modos, la aproximación realizada es normalmente aceptable (al menos en cálculos preliminares) para motores de más de 10 kW (Mora, 2003).

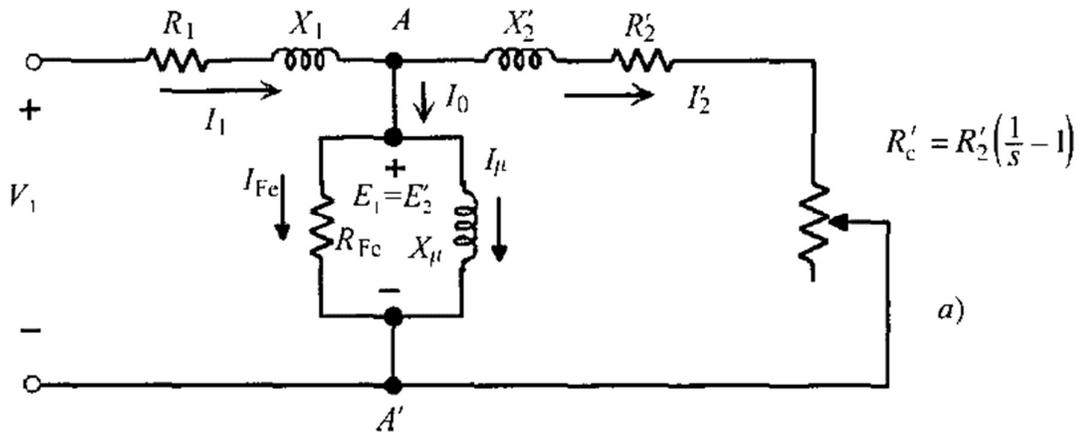


Figura 32-a. Circuito equivalente exacto(Mora, 2003).

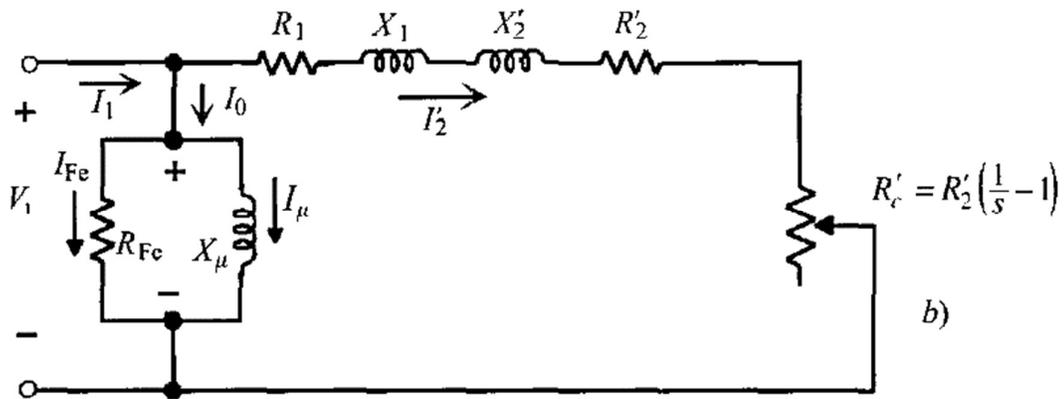


Figura 32-b. Circuito equivalente aproximado(Mora, 2003).

## 2.5 Circuito Equivalente Aproximado con ajuste de tensión.

Se puede conseguir un circuito equivalente aproximado más preciso que el de la Figura 32-b reduciendo el valor de la tensión de alimentación, tal como se demuestra a continuación. Si se parte del circuito equivalente exacto de la Figura 32-a y se tiene en cuenta la primera ecuación 61, se puede escribir(Mora, 2003):

$$V_1 = E_1 + (R_1 + jX_1)I_1 \quad \text{Ecuación 62 (Mora, 2003)}$$

y dado que se cumple Ecuación 60:

$$I_1 = I_0 + I_2 \quad \text{Ecuación 63 (Mora, 2003)}$$

donde el valor de  $I_0$  según el circuito equivalente exacto es igual a:

$$I_0 = E_1 \left[ \frac{1}{R_{Fe}} + \frac{1}{jX_\mu} \right] \approx \frac{E_1}{jX_\mu} \quad \text{Ecuación 64 (Mora, 2003)}$$

lo que representa que se desprecia la corriente  $I_{Fe}$  frente a la corriente de imanación  $I_\mu$ . Sustituyendo la Ecuación 63 y 64 en la Ecuación 62 resulta:

$$V_1 = E_1 + (R_1 + jX_1) \left[ \frac{E_1}{jX_\mu} + I_2' \right] \text{ Ecuación 65 (Mora, 2003)}$$

y de acuerdo con la segunda ecuación 61, que es simplemente la aplicación del segundo lema de Kirchhoff al circuito de la Figura 32-a, se tiene:

$$E_1 = E_2' = \left( \frac{R_2'}{s} + jX_2' \right) I_2' \text{ Ecuación 66 (Mora, 2003)}$$

que al llevar a la Ecuación 65 nos da:

$$V_1 = \left[ R_1 + jX_1 + \frac{R_2'}{s} + jX_2' \right] I_2' + \frac{R_1 + jX_1}{jX_\mu} E_1 \text{ Ecuación 67 (Mora, 2003)}$$

y dado que normalmente  $X_\mu \gg R_1$  y admitiendo que  $E_1$  es un poco menor pero con un valor cercano a  $V_1$  en el rango de funcionamiento normal, la ecuación anterior se transforma en(Mora, 2003):

$$V_1' = V_1 \left( 1 - \frac{X_1}{X_\mu} \right) = \left[ R_1 + jX_1 + \frac{R_2'}{s} + jX_2' \right] I_2' \text{ Ecuación 68 (Mora, 2003)}$$

que responde al circuito de la Figura 4.14, que es análogo al de la Figura 32-b pero en el que se ha corregido la tensión primaria para obtener valores más reales de las corrientes  $I_1$  e  $I_2'$  ADDIN EN.CITE < EndNote >< Cite >< Author > Mora </Author >< RecNum > 2 </RecNum >< DisplayText > (Mora) </DisplayText >< record >< rec - number > 2 </rec - number >< foreign - keys >< key app = "EN" db - id = "5zvsaa9tcrwp0de25sexa0z5e9sp2fvstpe0" timestamp = "1570118586" > 2 </key ></foreign - keys >< ref - type name = "Book" > 6 </ref - type >< contributors >< authors >< author > Jesús Fraile Mora </author ></ authors >< tertiary - authors >< author > Mc Graw Hill </author ></ tertiary - authors ></contributors >< titles >< title > Máquinas Eléctricas </title ></titles >< edition > Quinta Edición </ edition >< section > 769 </section >< dates ></dates >< urls ></urls >< language > Español </language ></record ></Cite ></EndNote > ¡Error! Marcador no definido. [1](Mora, 2003).

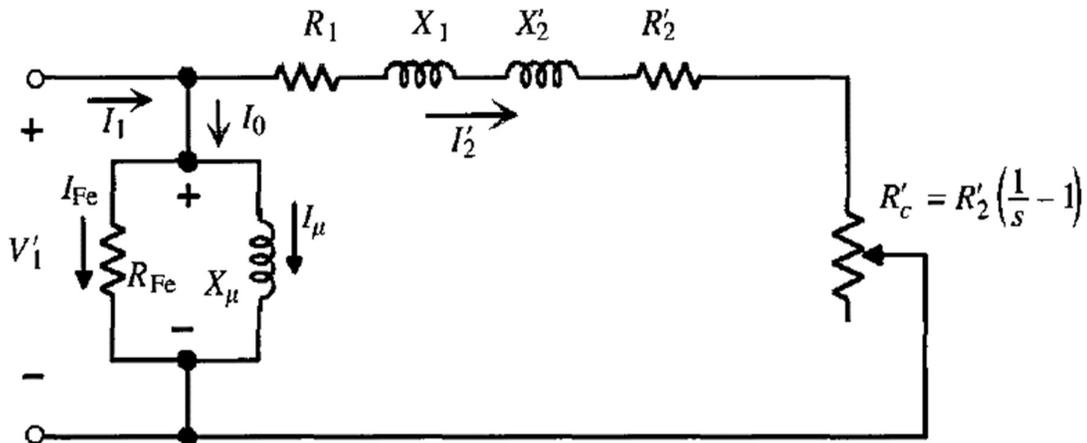


Figura 33. Circuito equivalente aproximado corregido(Mora, 2003).

## 2.6 Ensayos de Motor Síncrono

Los ensayos del motor asíncrono permiten determinar los parámetros del circuito equivalente de la máquina. De forma similar al transformador, existen dos tipos de pruebas, denominadas: *a) ensayo de vacío* y *b) ensayo de cortocircuito* (Mora, 2003).

### a) Ensayo de vacío o rotor libre

Consiste en hacer funcionar el motor sin ninguna carga mecánica en el eje, es decir, la máquina trabaja a rotor libre. Se debe aplicar la tensión asignada al primario  $V_{1n}$ , midiendo la potencia absorbida  $P_0$  y la corriente de vacío  $I_0$ . Existe una gran diferencia entre este ensayo en el motor asíncrono y el correspondiente del transformador. Obsérvese que si la máquina pudiera funcionar en esta prueba a la velocidad de sincronismo  $n = n_1$ , el deslizamiento sería igual a cero, lo que indicaría, en el circuito equivalente exacto de la Figura 32-a, que la resistencia de carga  $R'_c$  se hace infinita y, en consecuencia,  $I'_2$  sería nula. Sin embargo, y como ya se ha explicado anteriormente, el motor asíncrono no puede girar a la velocidad de sincronismo, ya que  $I'_2$  sería nula y no existiría ningún par electromagnético en el eje. En estas circunstancias lo que sucede realmente es que el motor en vacío gira a una velocidad muy cercana a la del campo giratorio, lo que indica, desde el punto de vista del circuito de la Figura 32-a, que la resistencia de carga  $R'_c$ ; tiene un valor muy elevado pero no infinito; como no se ejerce ningún par de carga en el eje, la potencia disipada en esta resistencia representa la pérdida en rozamiento y ventilación del motor. Como quiera además que  $I'_2$  es de pequeño valor debido a la alta impedancia de  $R'_c$ , se podrán desprestigiar las pérdidas en el cobre del devanado del rotor. Denominando  $P_{cu1}$  las pérdidas en el cobre del estator en este ensayo,  $P_{Fe}$  a las pérdidas en el hierro y  $P_m$  a las pérdidas mecánicas se cumplirá (Mora, 2003):

$$P_0 = P_{Fe} + P_m + P_{cu1} \quad \text{Ecuación 68 (Mora, 2003)}$$

Para determinar cada una de las pérdidas anteriores es preciso completar el ensayo de vacío con medidas adicionales; las pérdidas en el cobre  $P_{cu1}$  pueden calcularse si se mide previamente la resistencia  $R_1$  de cada una de las fases del estator (esta operación se realiza introduciendo c.c. en una fase del primario, midiendo tensión y corriente, la ley de Ohm da el valor de  $R_1$ . En la práctica, para tener en cuenta el *efecto pelicular* o *skin* en los conductores, se suele aumentar el valor anterior entre un 10% y un 20%). Para determinar  $P_{Fe}$  y  $P_m$  es preciso alimentar el motor por una tensión variable, comenzando con el valor nominal o asignado  $V_{1n}$  o algo superior y reduciendo hasta un valor que puede tomarse entre el 30% y el 50% de  $V_{1n}$ ; en cada escalón de tensión se deben medir los valores de  $P_0$ ,  $I_0$  y  $V_1$ , y a partir de ellos se deducen las pérdidas  $P_{Fe} + P_m$  en cada etapa, de acuerdo con m ecuación (Mora, 2003):

$$P_{Fe} + P_m = P_0 - P_{cu1} = P_0 - m_1 R_1 I_0^2 \quad \text{Ecuación 68 (Mora, 2003)}$$

Conocidas las pérdidas  $P_{FE}$  (separada de  $P_m$ ) se podrá calcular la rama paralelo del circuito equivalente, como muestra la Figura 34, que absorberá la potencia  $P_{Fe}$  de acuerdo con las siguientes expresiones aproximadas (Mora, 2003):

$$\cos \cos (\varphi_0) = \frac{P_{Fe}}{m_1 V_{1n} I_0} ; I_{Fe} = I_0 \cos \cos (\varphi_0) ; I_\mu = I_0 (\varphi_0) \quad \text{Ecuación 69 (Mora, 2003)}$$

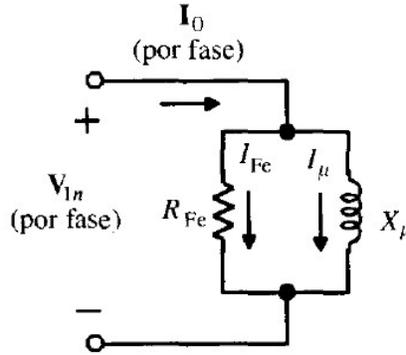


Figura 34. Circuito equivalente vacío(Mora, 2003).

De donde se deduce:

$$R_{Fe} = \frac{V_{1n}}{I_{Fe}} ; X_{\mu} = \frac{V_{1n}}{I_{\mu}} \text{ Ecuación 70 (Mora, 2003)}$$

### b) Ensayo de cortocircuito o de rotor bloqueado

Este ensayo se realiza bloqueando el rotor impidiéndole que gire, es decir,  $n = 0$ , por lo que se tendrá:  $s = 1$ ,  $R_c = 0$ , lo que indica que el motor se comporta como un transformador con el secundario en cortocircuito. Al estator se le aplica una tensión creciente, partiendo de cero, hasta que la corriente absorbida sea la asignada,  $I_{1cc} = I_{1n}$  (por fase), midiendo a la vez la tensión aplicada  $V_{1cc}$  (fase) y la potencia absorbida  $P_{cc}$  (total). La corriente de vacío  $I_0$  es entonces despreciable frente a  $I_{1n}$  debido a la pequeña tensión necesaria, resultando el circuito equivalente de la Figura 35, que se obtiene al despreciar la rama paralelo del esquema de la Figura 32 y hacer  $R'_c$ , debido a que en estas condiciones el deslizamiento es la unidad(Mora, 2003).

De las medidas efectuadas puede obtenerse el f.d.p. en cortocircuito:

$$\cos \cos (\varphi_{cc}) = \frac{P_{cc}}{m_1 V_{1cc} I_{1n}} \text{ Ecuación 71 (Mora, 2003)}$$

Y de aquí resultan los valores:

$$R_{cc} = R_1 + R'_2 = \frac{V_{1cc}}{I_{1n}} \cos \cos (\varphi_{cc}) ; X_{cc} = X_1 + X'_2 = \frac{V_{1cc}}{I_{1n}} (\varphi_{cc}) \text{ Ecuación 72 (Mora, 2003)}$$

En consecuencia, el ensayo de cortocircuito permite obtener los parámetros de la rama serie del motor. Como quiera además que  $R_1$  se ha determinado con un ensayo en dc., la primera Ecuación 72 permitirá calcular  $R'_2$ , valor que es necesario conocer, ya que está incluido en  $R'_c$ . Si se desea utilizar en el estudio del motor el circuito equivalente exacto Figura 32-a, habrá que repartir la cantidad  $X_{cc}$  entre  $X_1$  y  $X'_2$ . A falta de información se elegirá  $X_1 = X'_2$ (Mora, 2003).

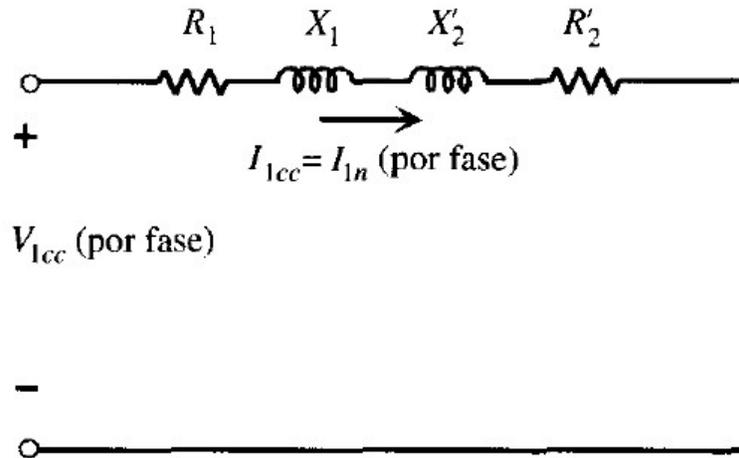


Figura 35. Circuito equivalente en cortocircuito(Mora, 2003).

## 2.7 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, y el proceso de conversión está inevitablemente ligado con las pérdidas en los diferentes órganos de la máquina. Vamos a analizar el balance de energía que se produce en el funcionamiento del motor(Mora, 2003).

La potencia que la máquina absorbe de la red, si  $V_1$  es la tensión aplicada por fase,  $I_1$  la corriente por fase y  $\varphi_1$  el desfase entre ambas magnitudes, será(Mora, 2003):

$$P_1 = m_1 V_1 I_1 \cos(\varphi_1) \quad \text{Ecuación 73 (Mora, 2003)}$$

Esta potencia llega al estator, y una parte se transforma en calor por efecto Joule en sus devanados, cuyo valor es(Mora, 2003):

$$P_{cu1} = m_1 R_1 I_1^2 \quad \text{Ecuación 74 (Mora, 2003)}$$

y la otra parte se pierde en el hierro:  $P_{Fe1}$ . La suma de ambas pérdidas representa la disipación total en el estator(Mora, 2003):

$$P_{p1} = P_{cu1} + P_{Fe1} \quad \text{Ecuación 75 (Mora, 2003)}$$

Como quiera que las frecuencias de las corrientes en el rotor son muy reducidas, debido a que los deslizamientos en la máquina suelen ser pequeños (por ejemplo, para  $s = 5\%$  con  $f_1 = 50\text{Hz}$ , resulta una  $f_1 = 2,5\text{Hz} \ll f_1$ ), se considera entonces que prácticamente es el hierro del estator el único origen de las pérdidas ferromagnéticas. De acuerdo con el circuito equivalente del motor de la Figura 32-a, se podrá escribir(Mora, 2003):

$$P_{Fe} = P_{Fe1} = m_1 E_1 F_{Fe} \approx m_1 V_1 F_{Fe} \quad \text{Ecuación 76 (Mora, 2003)}$$

La potencia electromagnética que llegará al rotor a través del entrehierro, y que denominaremos  $P_a$  (potencia en el entrehierro), tendrá una magnitud(Mora, 2003):

$$P_a = P_1 - P_{p1} = P_1 - P_{cu1} - P_{Fe} \text{ Ecuación 77 (Mora, 2003)}$$

En el rotor aparecen unas pérdidas adicionales debidas al efecto Joule,  $P_{cu2}$ , y de valor:

$$P_{cu2} = m_2 R_2 I_2^2 = m_1 R_2' I_2^2 \quad \text{Ecuación 78 (Mora, 2003)}$$

Las pérdidas en el hierro del rotor son despreciables debido al pequeño valor de  $f_2$ . La potencia que llegará al árbol de la máquina, denominada potencia mecánica interna,  $P_{mi}$ , será (Mora, 2003):

$$P_{mi} = P_a - P_{cu2} \quad \text{Ecuación 79 (Mora, 2003)}$$

que teniendo en cuenta el significado de la resistencia de carga  $R_c'$ ; del circuito equivalente, se podrá poner (Mora, 2003):

$$P_{mi} = m_1 R_2' \left( \frac{1}{s} - 1 \right) I_2^2 \quad \text{Ecuación 80 (Mora, 2003)}$$

La potencia útil en el eje será algo menor, debido a las pérdidas mecánicas por rozamiento y ventilación; denominando  $P_m$  a estas pérdidas y  $P_u$  a la potencia útil, resultará (Mora, 2003):

$$P_u = P_{mi} - P_m \quad \text{Ecuación 81 (Mora, 2003)}$$

En la Figura 36-a y Figura 36-b se muestra, en la parte superior, el circuito equivalente exacto del motor y en la parte inferior un dibujo simplificado de la máquina. En cada caso se muestran, con flechas, las pérdidas que se producen en las diversas partes del motor. Obsérvese en ambos casos que se obtiene una potencia útil de salida a partir de una potencia de entrada  $P_1$ . El rendimiento del motor vendrá expresado por el cociente (Mora, 2003):

$$\eta = \frac{P_u}{P_1} = \frac{P_u}{P_u + P_m + P_{cu2} + P_{Fe} + P_{cu1}} \quad \text{Ecuación 82 (Mora, 2003)}$$

Existen algunas relaciones útiles entre las potencias anteriores; por ejemplo, el cociente entre  $P_{cu2}$  y  $P_{mi}$  teniendo en cuenta la Ecuación 78 y Ecuación 80, resulta ser (Mora, 2003):

$$\frac{P_{cu2}}{P_{mi}} = \frac{s}{1-s} \quad \text{Ecuación 83 (Mora, 2003)}$$

Por otra parte, la potencia que atraviesa el entrehierro  $P_a$  se puede poner:

$$P_a = P_{mi} + P_{cu2} = m_1 \frac{R_2'}{s} I_2^2 = \frac{P_{cu2}}{s} = \frac{P_{mi}}{1-s} \quad \text{Ecuación 84 (Mora, 2003)}$$

que relaciona  $P_a$  con  $P_{cu2}$ . Estas relaciones facilitan al estudio analítico de la máquina y la realización de ejercicios prácticos.

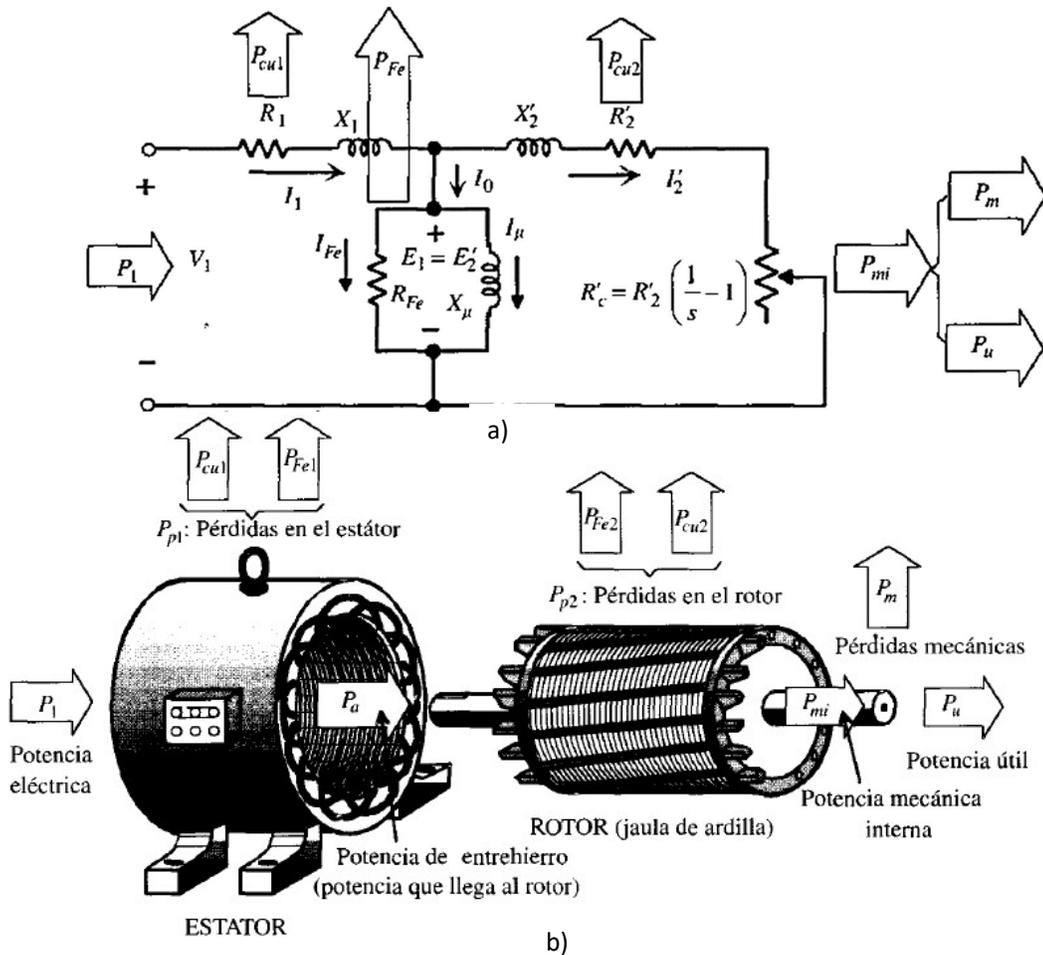


Figura 36-a. Circuito equivalente exacto(Mora, 2003).

Figura 36-b. Distribución de potencias en el motor(Mora, 2003).

### Ejemplo 2:

Un motor asíncrono trifásico de rotor devanado,  $2p = 4$  polos, se conecta a una red trifásica de 380 V de tensión compuesta. El estator y el rotor están conectados en estrella. La relación de transformación de tensiones coincide con la de corrientes y es igual a 2,5. Los parámetros del circuito equivalente del motor por fase son:  $R_1 = 0,5\Omega$ ;  $X_1 = 1,5\Omega$ ;  $R_2 = 0,1\Omega$ ;  $X_2 = 0,2\Omega$ ;  $R_{Fe} = 360\Omega$ ;  $X_\mu = 40\Omega$ . Las pérdidas mecánicas son de 250W. Si el deslizamiento a plena carga es del 5%:

Calcular, utilizando el circuito equivalente exacto del motor: 1) Corriente del estator; 2) Corriente del rotor; 3) Corriente  $I_0$ ; 4) Pérdidas en el hierro; 5) Potencia activa y reactiva absorbida por el motor de la red; 6) Potencia mecánica interna; 7) Potencia mecánica útil; 8) Rendimiento del motor; 9) Corriente de arranque y su f.d.p.

El circuito equivalente exacto del motor por fase es el mostrado en la Figura 37, en el que la rama paralelo del circuito se sitúa entre el estator y el rotor. Los cálculos eléctricos en esta situación son más laboriosos que con el circuito equivalente aproximado, como se va a apreciar en el desarrollo del problema.

La impedancia del rotor reducida al estator, teniendo en cuenta que  $m_v = m_i = 2,5$  es:

$$R'_2 = m^2 R_2 = 2,5^2 * 0,1 = 0,625\Omega ; X'_2 = 2,5^2 * 0,2 = 1,25\Omega$$

El valor de la impedancia de carga, teniendo en cuenta que el deslizamiento es igual a 0,05, será:

$$R'_c = R_2 \left( \frac{1}{s} - 1 \right) = 0,625 \left( \frac{1}{0,05} - 1 \right) = 11,575\Omega$$

Para este problema conviene comenzar calculando el valor de la impedancia total del rotor  $Z_r$  mostrada en la Figura 37.

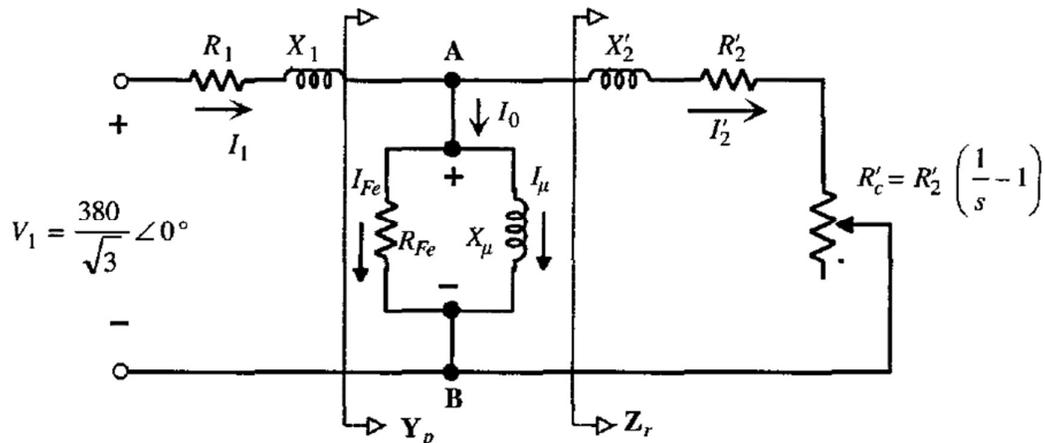


Figura 37. Circuito equivalente exacto del ejercicio propuesto(Mora, 2003).

$$Z_r = (R'_2 + jX'_2) + R'_c = (0,625 + j1,25) + 11,875$$

$$Z_r = 12,5 + j1,25 = 12,56\angle 5,71^\circ\Omega$$

que corresponde a una admitancia  $Y_r$ :

$$Y_r = \frac{1}{Z_r} = \frac{1}{12,56\angle 5,71^\circ} = 0,0796\angle -5,71^\circ = 0,0792 - j0,0079 \text{ siemens}$$

la admitancia total del paralelo  $Y_p$  mostrada en la Figura 37 vale:

$$Y_p = \frac{1}{R_{Fe}} + \frac{1}{jX_\mu} + Y_r$$

$$Y_p = \frac{1}{360} + \frac{1}{j40} + (0,0792 - j0,0079)$$

$$Y_p = 0,082 - j0,033 = 0,088\angle -21,9^\circ \text{ siemens}$$

que corresponde a una impedancia  $Z_p = \frac{1}{Y_p} = 11,36\angle 21,9^\circ \Omega$

la impedancia total del motor que se observa desde los terminales de entrada es:

$$Z_{total} = (R_1 + jX_1) + Z_p = (0,5 + j1,5) + 11,36\angle 21,9^\circ$$

$$Z_{total} = 11,04 + j5,74 = 12,44 \angle 27,47^\circ \Omega$$

Si se toma como referencia la tensión de alimentación:

$$V_1 = \frac{380}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ = 219,39 \angle 0^\circ V$$

1. La corriente del estator será:

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_{total}} = \frac{219,39 \angle 0^\circ}{12,44 \angle 27,47^\circ} = 17,63 \angle -27,47^\circ A$$

2. Para determinar la corriente  $I_2$  del rotor debe calcularse previamente la d.d.p entre nudos A y B del circuito equivalente de la figura 37, y cuyo valor es:

$$V_{AB} = Z_p I_1 = 11,36 \angle 21,9^\circ * 17,63 \angle -27,47^\circ = 200,28 \angle -5,57^\circ V$$

La corriente reducida al estator vale:

$$I_2 = \frac{V_{AB}}{Z_r} = \frac{200,28 \angle -5,57^\circ}{12,56 \angle 5,71^\circ} = 15,95 \angle -11,28^\circ A$$

3. Las corrientes por las ramas en paralelo son:

$$I_{Fe} = \frac{V_{AB}}{R_{Fe}} = \frac{200,28 \angle -5,57^\circ}{360} = 0,556 \angle -5,57^\circ A$$

$$I_\mu = \frac{V_{AB}}{jX_\mu} = \frac{200,28 \angle -5,57^\circ}{j40} \approx 5 \angle -95,57^\circ A$$

Por lo que la corriente  $I_0$  es:

$$I_0 = I_{Fe} + I_\mu = 0,556 \angle -5,57^\circ + 5 \angle -95,57^\circ A$$

$$I_0 = 5,03 \angle -89,23^\circ A$$

4. De acuerdo con lo anterior, las pérdidas en el hierro serán:

$$P_{Fe} = 3V_{AB}I_{Fe} = 3 * 200,28 * 0,556 = 334,1W$$

También se puede calcular:

$$P_{Fe} = 3R_{Fe}I_{Fe}^2 = 3 * 360 * 0,556^2 \approx 334,9W \text{ (errores de redondeo)}$$

5. Potencia compleja absorbida por el motor de la red es:

$$S_1 = 3V_1 I_1^* = 3 * 219,36 \angle 0^\circ * 17,63 \angle +27,47^\circ$$

$$S_1 = 10295,4 + j5352,6$$

$$P_1 = 10295,4W$$

$$Q_1 = 5352,6VAR$$

Siendo el f.d.p del motor  $\cos \cos (27,47^\circ) = 0,887$

6. La potencia mecánica interna del motor se calcula a partir de:

$$P_{mi} = 3R_c I_2^2 = 3 * 11,875 * 15,95^2 \approx 9063,1W$$

7. Las pérdidas mecánicas son 250W, la potencia útil en el eje del rotor es:

$$P_u = P_{mi} - P_m = 9063,1 - 250 = 8813,1W$$

8. El rendimiento del motor es:

$$\eta = \frac{P_u}{P_1} = \frac{8813,1}{10295,4} = 85,6\%$$

9. La corriente de arranque se obtendrá del circuito de la figura 37 haciendo  $s = 1$ : la impedancia del rotor vale en este caso:

$$Z_r = R_2 + jX_2 = 0,625 + j1,25 = 1,398 \angle 63,43^\circ \Omega$$

Que corresponde a una admitancia  $Y_r = 1/Z_r = 0,716 \angle -63,43^\circ$  siemens

La admitancia en paralelo:

$$Y_p = \frac{1}{R_{Fe}} + \frac{1}{jX_\mu} + Y_r$$

$$Y_p = \frac{1}{360} + \frac{1}{j40} + (0,716 \angle -63,43) = 0,739 \angle -64,09 \text{ siemens}$$

que corresponde a una impedancia  $Z_p = \frac{1}{Y_p} = 1,353 \angle 64,09^\circ = 0,591 + j1,217 \Omega$

$$Z_{total} = (R_1 + jX_1) + Z_p = (0,5 + j1,5) + 0,591 + j1,217 = 2,93 \angle 68,12^\circ \Omega$$

Y por lo tanto la corriente absorbida por el motor en el arranque será:

$$I_{arranque} = \frac{V_1}{Z_{total}} = \frac{219,39 \angle 0^\circ}{2,93 \angle 68,12^\circ} = 74,93 \angle -68,12^\circ A$$

Es decir, la corriente es de 74,96<sup>a</sup> y tiene un f.d.p;  $\cos \cos (\varphi) = \cos \cos (68,12^\circ) = 0,373$

Obsérvese que la corriente de arranque es varias veces la asignada. En nuestro caso, teniendo en cuenta los resultados de los apartados 1) y 9), resulta ser:

$$\frac{I_{arranque}}{I_1} = \frac{74,93}{17,63} = 4,25$$

## 2.8 Par de rotación

Si es  $P_u$  la potencia mecánica útil desarrollada por el motor y  $n$  la velocidad en r.p.m. a la que gira el rotor, el par útil  $\tau$  (*torque* en inglés) en N.m en el árbol de la máquina será el cociente entre  $P_u$  y la velocidad angular de giro  $\omega = 2\pi n/60$ , expresando  $n$  en r.p.m.(Mora, 2003):

$$\tau = \frac{P_u}{2\pi \frac{n}{60}} \text{ Ecuación 85 (Mora, 2003)}$$

Si se desprecian las pérdidas mecánicas del motor, la potencia útil coincide con la mecánica interna y el par anterior se puede poner también(Mora, 2003):

$$\tau = \frac{P_{mi}}{2\pi \frac{n}{60}} \text{ Ecuación 86 (Mora, 2003)}$$

De la definición de deslizamiento se deduce:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \approx n = n_1(1 - s) \text{ Ecuación 87 (Mora, 2003)}$$

y la expresión del par se convierte en:

$$\tau = \frac{P_{mi}}{2\pi \frac{n_1}{60}(1-s)} \text{ Ecuación 88 (Mora, 2003)}$$

y teniendo en cuenta la Ecuación 84 resulta:

$$\tau = \frac{P_a}{2\pi \frac{n_1}{60}} \text{ Ecuación 89 (Mora, 2003)}$$

## CAPÍTULO 3

### Tema del Capítulo: El Motor Asíncrono Monofásico.

**Resultado de Aprendizaje:** Aplica los conocimientos de las máquinas de corriente alterna en casos reales que pueden presentarse en el entorno industrial.

## 3. EL MOTOR ASÍNCRONO MONOFÁSICO

### 3.1 Principio de funcionamiento

Básicamente, un motor de inducción monofásico está formado por un rotor en jaula de ardilla análogo al de los motores trifásicos y un estator en el que se dispone un devanado alimentado con ca. monofásica. Normalmente se construyen con potencias inferiores a 1CV (caballo de vapor) y por ello reciben también el nombre de motores fraccionarios. El campo de aplicación está muy restringido y se limita en su mayoría a las instalaciones domésticas: lavadoras, ventiladores, tocadiscos, etc. En la Figura 38 se muestra el esquema de conexiones básico. Al introducir una corriente alterna en el devanado del

estator se produce una fuerza magnetomotriz (f.m.m.) en el entrehierro, distribuida senoidalmente en el espacio y de carácter pulsatorio, cuya expresión es(Mora, 2003)

$$F(\alpha, t) = F_m \cos(\omega_1 t) \cos(p\alpha) \text{ Ecuación 90 (Mora, 2003)}$$

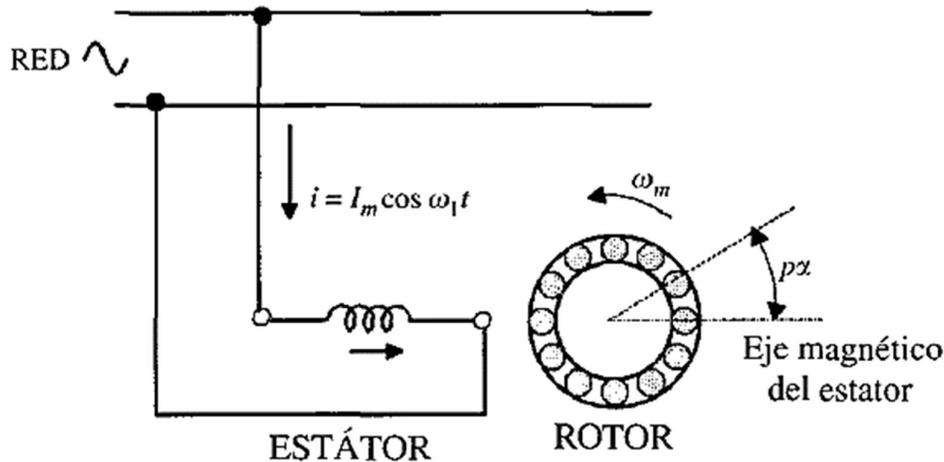


Figura 38. Motor asíncrono monofásico(Mora, 2003).

La f.m.m. anterior produce un campo magnético proporcional en el entrehierro, el cual induce a su vez corrientes en el rotor, como si fuera el circuito secundario de un transformador, de tal forma que los pares de rotación originados por la acción recíproca de las intensidades de las dos mitades del arrollamiento del rotor con el campo inductor del estator son opuestas entre sí, y en consecuencia, el par resultante que actúa sobre el rotor en reposo es nulo. La ausencia de par inicial de arranque representa la particularidad característica del motor monofásico y por ello esta máquina **no puede arrancar por sí misma**(Mora, 2003).

Cada campo giratorio dará lugar a una característica par-deslizamiento para los motores trifásicos. Si el motor gira en el sentido del campo positivo directo (uno de ellos elegido arbitrariamente) a velocidad  $n$ , el deslizamiento de este campo  $s_d$  tendrá un valor(Mora, 2003):

$$s_d = s = \frac{n_1 - n}{n_1} = 1 - \frac{n}{n_1} \text{ Ecuación 91 (Mora, 2003)}$$

mientras que el deslizamiento correspondiente del campo inverso  $s_i$ , será:

$$s_i = s = \frac{n_1 - (-n)}{n_1} = 1 + \frac{n}{n_1} = 2 - s \text{ Ecuación 92 (Mora, 2003)}$$

expresión que relaciona los deslizamientos de ambos campos.

Las características  $T = f(s)$  para cada uno de los sistemas giratorios y su resultante se muestran en la Figura 39. Debe observarse que el campo directo produce un par positivo, mientras que el campo inverso crea un par negativo. En el arranque,  $s_d = s_i = 1$ , se tiene un par nulo y en consecuencia, como ya se ha indicado, el motor no puede *despegar*; sin embargo, y como muestra la Figura 39, si por cualquier procedimiento se ayudará a girar el rotor en un sentido, aparecerá inmediatamente un par de arranque que si es superior al par resistente pondrá en funcionamiento la máquina(Mora, 2003).

Por ejemplo, si el motor llevara conectada una carga cuyo par resistente es del tipo ventilador, como muestra la Figura 39, y se moviera el rotor por un medio mecánico exterior de tal forma que se sobrepasara el punto *A*, en este momento, al ser el par motor superior al par resistente, la máquina se acelerará hasta obtener el régimen estable en el punto *B*. Se observa que la velocidad final que se obtiene es inferior a la que resultaría con un motor trifásico con idéntica curva (punto *C*), y de ahí que estos motores trabajen con un deslizamiento relativamente elevado (Mora, 2003).

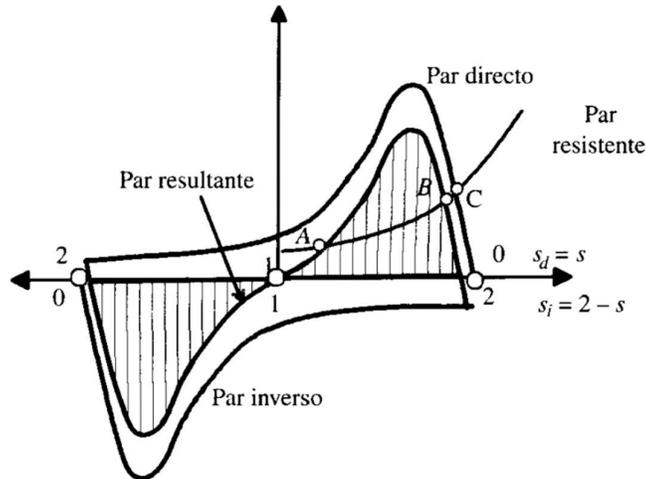


Figura 39. Curva par-velocidad de un motor asíncrono monofásico (Mora, 2003).

**Si en un motor trifásico se desconecta una fase, se tendría un funcionamiento análogo al descrito aquí, ya que la máquina trabajaría como motor monofásico.** En estas condiciones no hay par de arranque; la potencia y el par máximo se reducen considerablemente, y si la carga actuara en el eje con el par nominal, se produciría un calentamiento excesivo en los devanados (Mora, 2003).

### 3.2 Circuito Equivalente

Podemos obtener el circuito equivalente de un motor asíncrono monofásico teniendo en cuenta el ya conocido de un motor trifásico (Figura 32-a) y la teoría del doble campo giratorio desarrollada en el punto anterior. Por razones didácticas se va a proceder a un desarrollo heurístico de tipo semicuantitativo evitando el empleo de las componentes simétricas trifásicas que en rigor se necesitan. De acuerdo con la teoría del doble campo giratorio, se puede considerar que el motor monofásico de la Figura 38 es equivalente a dos motores trifásicos iguales, cuyos rotores están situados en un mismo árbol (Figura 40) y cuyos estatores están conectados en serie de tal modo que los campos magnéticos creados por ellos giran en el espacio en sentidos contrarios (refiérase en la Figura 40 la inversión de una fase en el estator del motor 2 respecto del 1) (Mora, 2003).

Si se considera el rotor parado, el circuito equivalente del motor monofásico será el mostrado en la Figura 40-a (se han considerado despreciables las pérdidas en el hierro). Este circuito no es más que el correspondiente al motor trifásico (Fig. 32-a) para un deslizamiento nulo;  $E_1$  representa la f.e.m. inducida en el devanado del estator debida al campo alternativo existente en el entrehierro (Mora, 2003).

De acuerdo con el esquema de la Figura 40, el circuito equivalente de la Figura 41-a se puede poner como se muestra en la Figura 41-b, que consiste en dos mitades idénticas conectadas en serie, cada una correspondiente a cada campo giratorio.

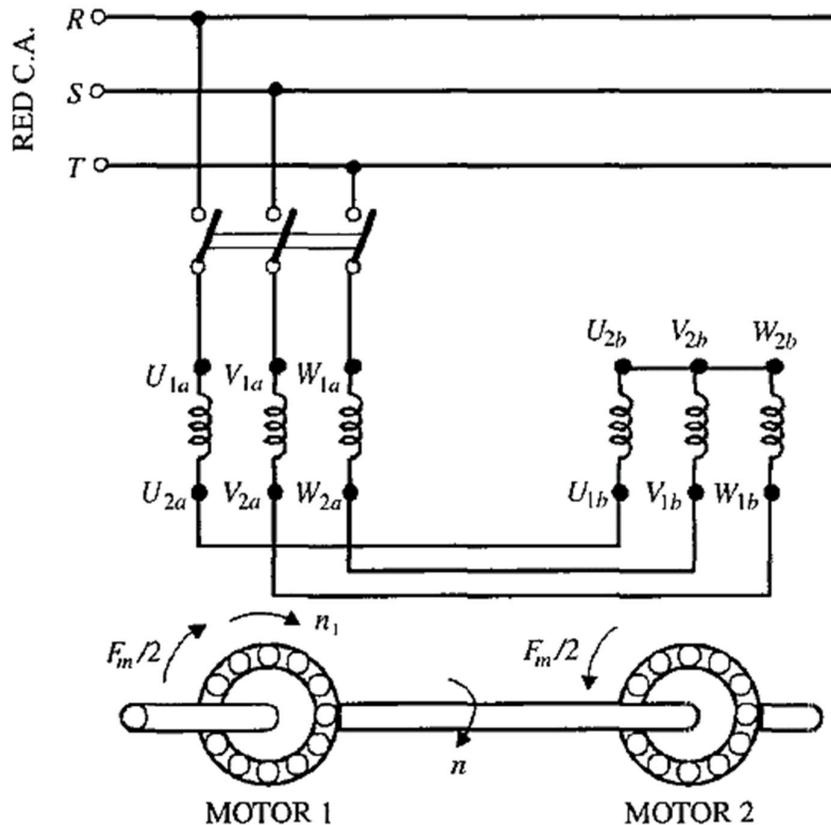


Figura 40. Equivalencia de un motor monofásico con dos trifásicos que giren en sentidos contrarios(Mora, 2003).

Se han denominado

$E_{1d}$  y  $E_{1i}$  las f.e.m.s. inducidas en el estator debidas a cada campo; comparando ambas figuras resulta(Mora, 2003):

$$E_1 = E_{1d} + E_{1i} \text{ Ecuación 93 (Mora, 2003)}$$

Si el motor está parado ( $n = 0$ ), los deslizamientos de la máquina respecto a cada campo giratorio serán iguales a la unidad, como así lo confirman las Ecuaciones 91 y 92. En esta situación los circuitos equivalentes de los motores componentes que definen el motor monofásico serán idénticos. En definitiva, lo que sucede en la Figura 41 es que se cumple(Mora, 2003):

$$E_{1d} = E_{1i} = \frac{E_1}{2} \text{ Ecuación 94 (Mora, 2003)}$$

Cuando el rotor gira a la velocidad  $n$  respecto al campo directo, los deslizamientos correspondientes serán, según las Ecuación 91 y 92:

$$s_d = s ; s_i = 2 - s \text{ Ecuación 95 (Mora, 2003)}$$

y de ahí que las resistencias rotóricas se modifiquen de un modo diferente para cada campo(Mora, 2003).

En la Figura 41-b se muestran a la derecha los nuevos valores de estas resistencias. En esta situación las impedancias  $Z_d$  y  $Z_i$  son desiguales, de hecho se tiene  $Z_d \gg Z_i$ , por lo que  $E_{1d} \gg E_{1i}$ , y el efecto sobre el motor es que el campo directo predomina sobre el campo inverso, lo que provoca un par electromagnético neto. En definitiva, lo que ocurre cuando gira el motor es que aumenta la amplitud del campo giratorio directo mientras que disminuye la amplitud del campo inverso(Mora, 2003).

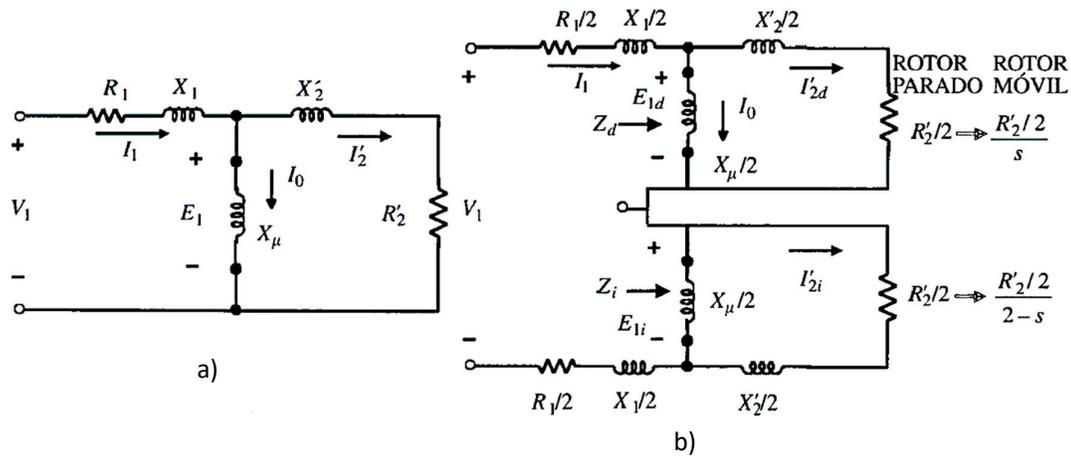


Figura 41. Desarrollo del circuito equivalente del motor asíncrono monofásico(Mora, 2003).

Para que el motor monofásico pueda arrancar se necesita que los dos campos giratorios tengan diferentes amplitudes en condiciones estacionarias. Esto requiere, como se explicará en el párrafo siguiente, que se incorpore un bobinado adicional al motor monofásico y que se denomina devanado auxiliar, que se sitúa a 90° eléctricos respecto al otro bobinado, denominado devanado principal (se trata, en definitiva, de preparar un pseudomotor bifásico). El devanado auxiliar tiene menos espiras que el devanado principal y se construye con hilo más delgado(Mora, 2003).

Este devanado auxiliar se desconecta de la red una vez que el motor ha comenzado a girar. Con el circuito equivalente a rotor móvil del motor monofásico mostrado en la Figura 40-b se puede hacer un análisis cuantitativo de esta máquina de un modo similar al que se utilizó en el análisis del motor trifásico. En el caso del motor monofásico se dispone de dos **resistencias de carga de campo directo e inverso**(Mora, 2003):

$$R'_{cd} = \frac{R_2}{2} \left( \frac{1}{s} - 1 \right) = \frac{R_2}{2} \frac{1-s}{s} ; R'_{ci} = \frac{R_2}{2} \left( \frac{1}{2-s} - 1 \right) = \frac{R_2}{2} \frac{1-s}{2-s} \text{ Ecuación 96 (Mora, 2003)}$$

que dan lugar a las potencias mecánicas internas:

$$(P_{mi})_d = R'_{cd} I_{2d}^2 ; (P_{mi})_i = R'_{ci} I_{2i}^2 \text{ Ecuación 97 (Mora, 2003)}$$

lo que corresponde a una potencia mecánica total:

$$P_{mi} = (P_{mi})_d + (P_{mi})_i = \frac{R_2}{2} (1 - s) \left[ \frac{I_{2d}^2}{s} - \frac{I_{2i}^2}{2-s} \right] \text{ Ecuación 98 (Mora, 2003)}$$

y a un par neto en el eje:

$$\tau = \frac{P_{mi}}{\omega_1(1-s)} = \frac{1}{\omega_1} \frac{R_2}{2} \left[ \frac{I_{2d}^2}{s} - \frac{I_{2i}^2}{2-s} \right] \text{ Ecuación 99 (Mora, 2003)}$$

La potencia activa absorbida por el motor de la red será, según el circuito de la Figura 40-b:

$$P_1 = V_1 I_1 \cos(\varphi_1) \text{ Ecuación 100 (Mora, 2003)}$$

donde  $\varphi_1$  indica el desfase entre la tensión aplicada  $V_1$  y la corriente absorbida  $I_1$ . Por consiguiente, el rendimiento del motor será:

$$\eta = \frac{P_{mi}}{P_1} \text{ Ecuación 101 (Mora, 2003)}$$

El alumno puede obtener cualquier otra potencia analizando simplemente el circuito equivalente de la Figura 40-b.

### 3.3 Arranque de los motores de inducción monofásicos

Hemos visto en la Figura 39 que el motor monofásico no tiene par de arranque y que por tanto no puede iniciar la marcha por sí mismo. Por otro lado, se advierte en la misma figura que 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. Un procedimiento simple sería, si el motor trabajara en vacío, moverlo en cualquier sentido con un par motor exterior; esto se puede realizar en la práctica mediante una polea a la que se arrolla una cuerda, y al tirar de ésta se conseguirá el impulso inicial para que arranque la máquina; el sentido de giro dependerá del sentido de arrollamiento de la cuerda sobre la polea. En motores pequeños trabajando en vacío es suficiente, para arrancar el motor, mover el eje con los dedos de una mano (mucho cuidado con esta operación). De cualquier modo, estos procedimientos mecánicos para conseguir el despegue de un motor monofásico no son prácticos y por consiguiente están desechados(Mora, 2003).

Afortunadamente, se puede conseguir el arranque de un motor monofásico por procedimientos eléctricos. La clave de la solución está en conseguir un campo giratorio único en el momento del arranque. Un sistema bifásico consiste, como se muestra en la Figura 42, en dos devanados estatóricos desfasados  $90^\circ$  eléctricos en el espacio que llevan corrientes desfasadas  $90^\circ$  eléctricos en el tiempo. Si en el caso de la Figura 42 las corrientes son de la forma(Mora, 2003):

$$i_1 = \sqrt{2}I \cos(w_1 t) ; i_2 = \sqrt{2}I \cos(w_1 t - 90^\circ) = \sqrt{2}I \sin(w_1 t) \text{ Ecuación 102 (Mora, 2003)}$$

Si las corrientes que alimentan los dos devanados del estator (el rotor es siempre en jaula de ardilla) tienen amplitudes diferentes o si los bobinados tienen diferente número de espiras, se sigue obteniendo una f.m.m. giratoria, pero su amplitud va variando con la posición, ofreciendo un valor máximo en el eje de un devanado y un valor mínimo en el eje del otro(Mora, 2003).

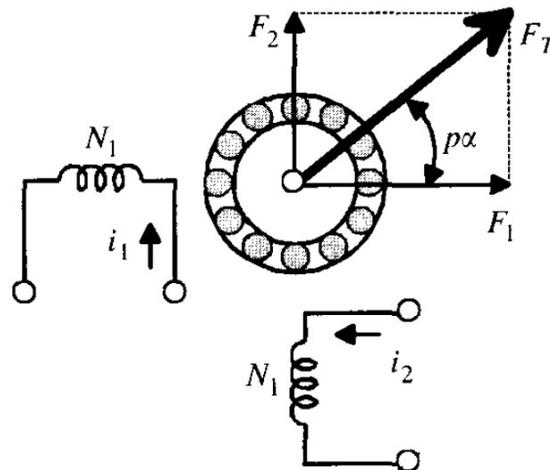


Figura 42. F.m.m.s en un motor bifásico(Mora, 2003).

Si además las corrientes de los devanados tienen un desfase distinto a  $90^\circ$  eléctricos, el lugar geométrico de f. m. m. sigue siendo una elipse en la que los ejes principales no se corresponden con los ejes de las bobinas. Esta última combinación es la que generalmente se emplea en el arranque de los motores reales, debido a la dificultad en conseguir con una única red monofásica dos corrientes desfasadas  $90^\circ$  eléctricos(Mora, 2003).

Los procedimientos de arranque de los motores asíncronos monofásicos que constituyen los diversos tipos existentes en el mercado son: a) motores de fase partida; b) motores con condensador.

### 3.4 Motor fase partida

En este motor se sitúan en el estator dos devanados desfasados  $90^\circ$  eléctricos en el espacio Figura 43. El primer devanado, denominado **principal**, cubre los  $2/3$  de las ranuras y tiene gran reactancia y baja resistencia, mientras que el otro, denominado **auxiliar**, cubre el resto del estator y tiene alta resistencia y baja reactancia (se realiza con hilo más delgado), de tal forma que está en serie con un interruptor centrífugo situado en el eje del motor(Mora, 2003).

El diagrama fasorial de las corrientes que atraviesan los arrollamientos se muestra en la Figura 44-a, donde se ha tomado la tensión de la red como referencia de fase. Se observa que el ángulo formado por  $V$  e  $I_p$  es superior al que existe entre  $V$  e  $I_a$ , en virtud de la mayor reactancia del devanado principal. En la práctica, el ángulo  $\varphi$  que forman las corrientes es próximo a los  $30^\circ$ , y como los arrollamientos están desfasados  $90^\circ$  en el espacio, resulta un campo giratorio de naturaleza elíptica debido a que los módulos de  $I_a$  e  $I_p$ , no son iguales y no forman entre sí  $90^\circ$ ; este campo giratorio produce el despegue del motor, y cuando la velocidad del rotor alcanza un valor del orden de  $70\%$  del nominal,

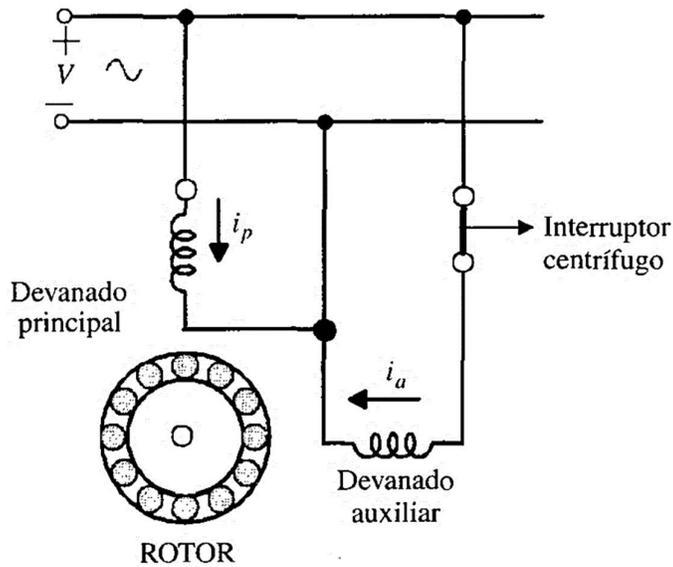


Figura 43. Motor fase partida(Mora, 2003).

el interruptor centrífugo desconecta el devanado auxiliar, que al estar realizado con un hilo delgado no es capaz de soportar un funcionamiento continuo. De esta forma el motor queda funcionando como monofásico(Mora, 2003).

En la Figura 44-b se muestra la curva por velocidad de este motor, en la que se indica el instante (correspondiente a la velocidad  $n_i$ ) en el que actúa el interruptor centrífugo y se desconecta el devanado auxiliar. Obsérvese que la curva par-velocidad cuando actúan los dos devanados es similar a la de un motor trifásico y produce un par de arranque, mientras que la curva correspondiente cuando funciona sólo el devanado principal tiene un par de arranque nulo. Este tipo de motores se utiliza en ventiladores, bombas centrífugas, lavadoras, etc. Se construyen generalmente desde potencia 50 W hasta 500 W(Mora, 2003).

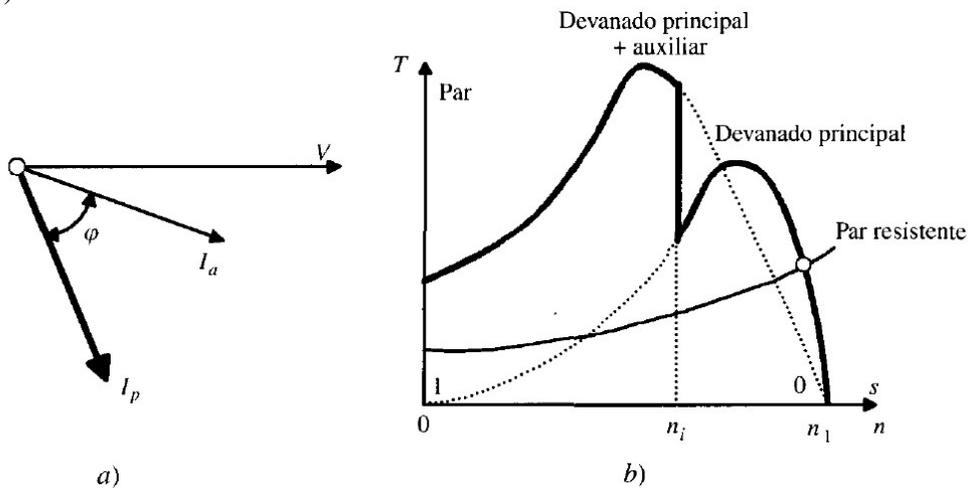


Figura 44-a. Diagrama fasorial motor fase partida(Mora, 2003).

Figura 44-b. Curva par-velocidad de un motor fase partida(Mora, 2003).

### 3.5 Motor con arranque por condensador

En este tipo de motor, el devanado auxiliar lleva en serie un condensador Figura 45. El empleo de este condensador tiene grandes ventajas, ya que pueden conseguirse desfases en las corrientes de las bobinas que se acercan casi a los  $90^\circ$ . En la Figura 46-a se muestra el diagrama fasorial de las corrientes, en el que se ha tomado la tensión de la red como referencia; se observa que la corriente del devanado principal se retrasa respecto a la tensión debido a su carácter inductivo, mientras que la corriente en el devanado auxiliar se adelanta respecto a la tensión debido a su carácter capacitivo(Mora, 2003).

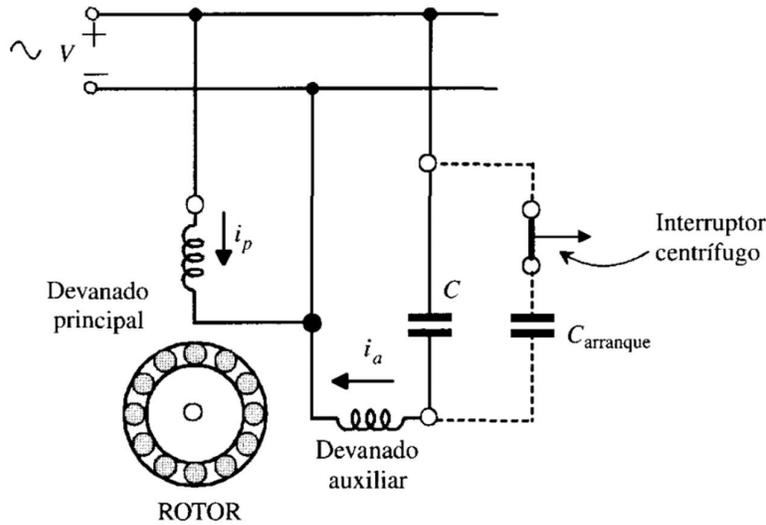


Figura 45. Motor monofásico de arranque por condensador(Mora, 2003).

En la Figura 46-b se muestra la curva par-velocidad de este motor, que si se compara con la Figura 44-b se desprende que el motor con condensador ofrece un par de arranque considerablemente mayor que en el caso del montaje con fase partida. Los condensadores empleados son del tipo electrolítico y permanecen conectados únicamente durante el período de arranque. Una vez desconectado el condensador el motor queda funcionando como monofásico empleando el devanado principal(Mora, 2003).

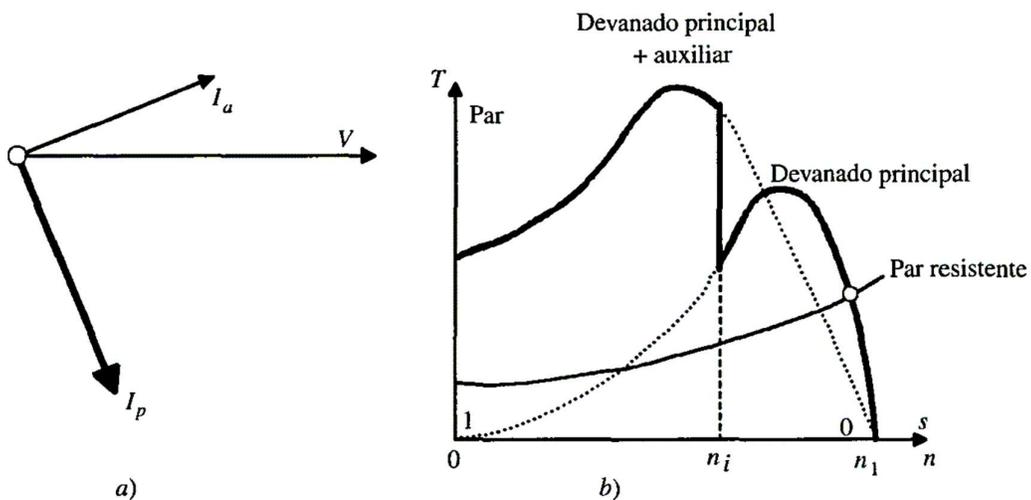


Figura 46-a. Diagrama fasorial motor monofásico con condensador(Mora, 2003).

Figura 46-b. Curva par-velocidad de un motor monofásico con condensador(Mora, 2003).

A veces, con objeto de mejorar las características del par y el f.d.p. de la máquina, se emplean condensadores de papel impregnados con aceite que trabajan de forma continua, como se indica en la Figura 45(Mora, 2003).

También se puede emplear una solución mixta, con un condensador electrolítico para el arranque y otro de papel para régimen continuo. Por ejemplo, un motor de 1/2 CV lleva un condensador electrolítico de  $250\mu F$  para el arranque y un condensador de papel impregnado de aceite de  $115\mu F$  para el régimen normal. Este tipo de motores se emplean en compresores, bombas, algunos tipos de máquinas herramienta, equipos de refrigeración y aire acondicionado, etc.(Mora, 2003).

### 3.6 Motor con espira de sombra

Constituye el modelo más sencillo y corresponde al tipo de motor monofásico más pequeño. Está formado por un estator de polos salientes Figura 47-a que dispone de un devanado concentrado alimentado por una red monofásica y un rotor en forma de jaula de ardilla(Mora, 2003).

Alrededor de cada polo y abrazando parte del mismo se coloca una espira de sombra; parte del flujo principal del estator,  $\Phi'_1$ , atraviesa esta espira, induciendo una f.e.m.  $E_{cc}$  que a su vez produce una corriente  $I_{cc}$  en retraso (por presentar una pequeña reactancia), que da lugar a un flujo  $\Phi_{cc}$  que sumado vectorialmente con  $\Phi'_1$ ; Figura 47-b da como resultado un flujo auxiliar  $\Phi_a$  desfasado  $\beta$  grados en el tiempo, respecto al flujo  $\Phi'_1$ , que atraviesa la otra parte del polo(Mora, 2003).

Ambos flujos  $\Phi_a$  y  $\Phi'_1$  se encuentran desplazados también en el espacio un ángulo  $\gamma$ ; en consecuencia se produce un campo giratorio (de naturaleza elíptica) que se dirige hacia la espira de sombra, dando origen a un par en el eje. Debido a la pequeña magnitud de este par, las aplicaciones de este motor son muy limitadas: ventiladores de uso doméstico, equipos de aire acondicionado, tocadiscos, máquinas fotocopiadoras, proyectores de diapositivas, etc. Se fabrican con potencias que llegan hasta 1/20 kW(Mora, 2003).

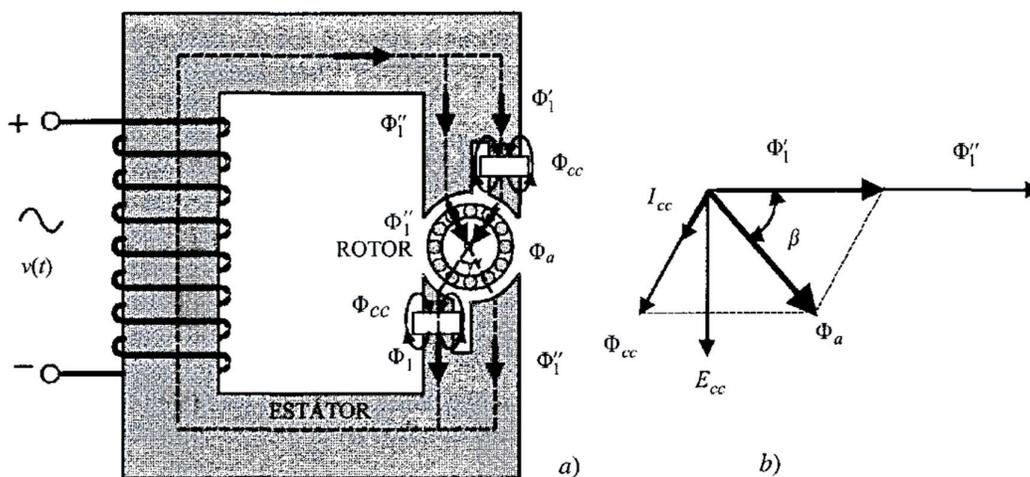


Figura 47-a. Motor con espira sombra(Mora, 2003).

Figura 47-b. Diagrama fasorial de flujos y corriente(Mora, 2003).

### Ejemplo 3:

Un motor asíncrono monofásico de 1.800 W, 220 V, 50 Hz, 4 polos, tiene los siguientes parámetros del circuito equivalente:  $R_1 = 3\Omega$  ;  $X_1 = 5\Omega$  ;  $R_2' = 1,5\Omega$  ;  $X_2' = 2\Omega$  ;  $X_\mu = 100\Omega$ ; se desprecian las pérdidas en el hierro y mecánicas. Si el motor se conecta a una red de 220 V, 50 Hz y trabaja con un deslizamiento del 5%, calcular: 1) corriente absorbida por el motor y su factor de potencia; 2) potencia mecánica desarrollada; 3) par en el eje; 4) rendimiento.

1. EL circuito equivalente del motor se visualiza en la Figura 41, en el que los valores de las resistencias totales del rotor (propia + carga) para cada campo son:

$$\frac{R_2'}{2s} = \frac{1,5}{2 * 0,05} = 15\Omega ; \frac{R_2'}{2(2-s)} = \frac{1,5}{2(2-0,05)} = 0,385\Omega$$

De este modo las impedancias  $Z_d$  y  $Z_i$  son, respectivamente.

$$Z_d = j \frac{X_\mu}{2} \text{ paralelo con } \left( \frac{R_2'}{2s} + j \frac{X_2'}{s} \right)$$

$$Z_d = \frac{j50(15 + j1)}{15 + j51} = 14,14 \angle 20,21^\circ \Omega$$

$$Z_i = j \frac{X_\mu}{2} \text{ paralelo con } \left( \frac{R_2'}{2(2-s)} + j \frac{X_2'}{s} \right)$$

$$Z_i = \frac{j50(0,385 + j1)}{0,385 + j51} = 1,05 \angle 69,37^\circ \Omega$$

Si se toma la tensión como referencia, la corriente absorbida por el motor será:

$$I_1 = \frac{V_1}{R_1 + jX_1 + Z_d + Z_i}$$

$$I_1 = \frac{220 \angle 0^\circ}{3 + j5 + 14,14 \angle 20,21^\circ \Omega + 1,05 \angle 69,37^\circ \Omega} = 11,07 \angle -33,13^\circ A$$

y por tanto, el motor absorbe una corriente de 11,07 A con un f.d.p. de:

$$\cos 33,13^\circ = 0,837$$

2. Por la regla de divisores de corriente, se obtiene las intensidades:

$$I_{2d}' = 11,07 \angle -33,13^\circ \frac{j50}{15 + j51} = 10,41 \angle -16,73^\circ A$$

$$I_{2i}' = 11,07 \angle -33,13^\circ \frac{j50}{0,385 + j51} = 10,85 \angle -32,7^\circ A$$

Por lo tanto la potencia mecánica interna total es:

$$P_{mi} = 1544,24 - 43,01 = 1501,23W$$

La potencia de 1544,24 W indica la potencia mecánica producida por el campo directo, mientras que la de 43,01 W representa la potencia debida al campo inverso. De este modo el campo directo produce un 1029 de la potencia total, mientras que el campo inverso contribuye al -0,029 de la potencia total desarrollada por el motor.

3. El par en el eje es:

$$\tau = \frac{1501,33}{2\pi \frac{1425}{60}} = 10,46 N.m$$

4. La potencia absorbida por el motor de la red será:

$$P_1 = 220 * 11,07 * 0,837 = 2038,3W$$

Lo que proporciona una eficiencia de:

$$\eta = \frac{1501,23}{2038,43} = 73,65\%$$

que es claramente inferior al que poseen los motores trifásicos. En la práctica el rendimiento de los motores monofásicos oscila entre el 60% y el 80%.

## LISTA DE REFERENCIAS

- Cordero, I. Reacción del Inducido. from <https://www.monografias.com/trabajos91/reaccion-induccion-y-conmutacion/reaccion-induccion-y-conmutacion.shtml>
- Chapman, S. J. (2000). *Máquinas Eléctricas* (M. G. Hill Ed. Tercera Edición ed.).
- García, M. Á. M. (2013). *Uso de herramientas didácticas para la materia de máquinas eléctricas de la carrera de ingeniería mecánica eléctrica (plan 2012) del módulo industrial como apuntes de apoyo*. Retrieved from [https://www.academia.edu/25755327/UNIVERSIDAD\\_NACIONAL\\_AUT%C3%93NOMA\\_DE\\_M%C3%89XICO](https://www.academia.edu/25755327/UNIVERSIDAD_NACIONAL_AUT%C3%93NOMA_DE_M%C3%89XICO)
- Mora, J. F. (2003). *Máquinas Eléctricas* (M. G. Hill Ed. Quinta Edición ed.).
- Sánchez, D. P. B. (2018). Generadores Síncronos. from <https://slideplayer.es/slide/12208467/>
- Wildi, T. (2006). *Máquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia* (Pearson Ed. Sexta Edición ed.).