

Capítulo 4

Máquinas de corriente alterna**1 – INTRODUCCIÓN**

A diferencia de las máquinas de corriente continua, las máquinas de corriente alterna, tanto generadores como motores, y ya sean devanados mono o trifásicos, **llevan sin excepción un devanado de trabajo fijo distribuido en las ranuras del paquete de chapas y un sistema que produce un campo magnético rotativo**, el cual es excitado por corriente continua. El rotor, explicado más detalladamente luego, gira a una velocidad igual o menor que la velocidad de rotación del campo magnético (llamada velocidad de sincronismo n_s), dando lugar a los dos tipos de máquinas de corriente alterna estudiadas en este capítulo; llamándose **síncronas** a las primeras (es decir, a las que giran velocidad n_s) y **asíncronas** a las segundas.

Por último, diremos que en las máquinas de corriente alterna, los grados eléctricos son los que resultan de asignar el número **360** al doble del ángulo cubierto por un paso polar (τ_p), pues la **fem** inducida **E** es sinusoidal y recorre medio ciclo cuando pasa de un polo a otro, justamente la distancia τ_p . En las máquinas bipolares, los grados geométricos son iguales a los eléctricos.

2 – MÁQUINAS SÍNCRONAS

Las máquinas síncronas son máquinas eléctricas cuya velocidad de rotación n_s (en revoluciones por minuto rpm) está vinculada rígidamente con la frecuencia **f** de la red de corriente alterna con la cual trabaja, de acuerdo con la expresión

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \text{ [rpm]} \quad (2 - 1)$$

donde **p** es el número de pares de polos de la máquina y **f** es la frecuencia en [Hz].

Las máquinas síncronas se encuentran sometidas al principio de reciprocidad electromagnética, pudiendo funcionar tanto en régimen generador como en régimen motor. Sin embargo, en la práctica de las instalaciones eléctricas es más frecuente su empleo como generadores, para producir energía eléctrica de corriente alterna (**alternadores**) en las centrales eléctricas a partir de fuentes primarias de energía hidráulica, térmica o nuclear.

Las máquinas síncronas pueden funcionar también convirtiendo energía eléctrica en mecánica, lo que da lugar al régimen de marcha como **motor síncrono**. Estos motores se emplean en aquellos accionamientos industriales que requieren velocidades de transmisión constantes, teniendo además la ventaja frente a los motores asíncronos de poder regular simultáneamente el factor de potencia con el cual trabaja, ya que se evita la colocación de condensadores para reducir la potencia reactiva absorbida por la instalación. Cuando la máquina síncrona trabaja con factor de potencia capacitivo se dice que funciona como compensador o **condensador síncrono**.

2.1 – Aspectos constructivos

Las máquinas síncronas están constituidas por dos devanados independientes:

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

Dependiendo de la potencia podemos clasificar a los generadores síncronos como de **inductor fijo** (potencias que no superan los 10 [KVA]) e **inductor móvil** (para potencias que pueden llegar a 1000-1500 [MVA]). En ambos casos rotor y estator son los mismos, solo que en el primero (de los casos) el devanado inductor se coloca en el estator (por eso se le llama de inductor fijo) y en el segundo se coloca en el rotor (y es por eso que se le llama de inductor móvil).

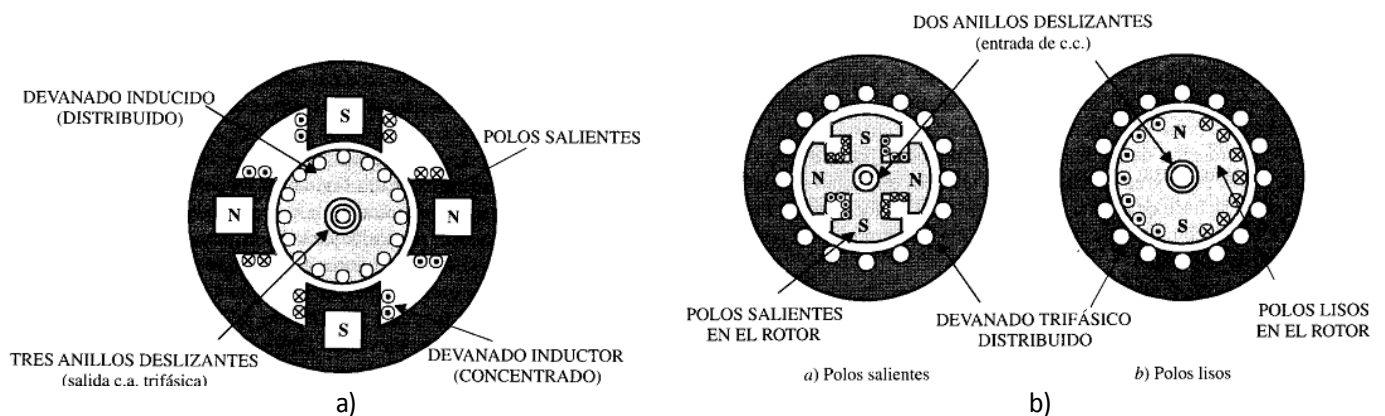


Figura 2-1: a) Máquina síncrona de baja potencia con el inductor en el rotor y b) tipos constructivos de máquinas síncronas.

2.2 – Funcionamiento

2.1 – 1: Fuerza electromotriz en los devanados

El valor de la fem inducida en cada lado de un devanado responde a la ecuación general de la fem

$$E = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{\max} \quad [V] \quad (2-2)$$

Donde **f** la podemos calcular mediante la ecuación (2 – 1). El número total de espiras se encuentra distribuido en devanados que a su vez se colocan en el inducido (estator) uniformemente, por lo que la variación de flujo no alcanza a todas las espiras al mismo tiempo; por ende a la tensión resultante (**E_t**) se la debe obtener mediante la suma vectorial de las tensiones individuales.

Veremos qué pasa con la tensión resultante en un estator de una espira, dos espiras y espiras distribuidas uniformemente a lo largo de un determinado arco.

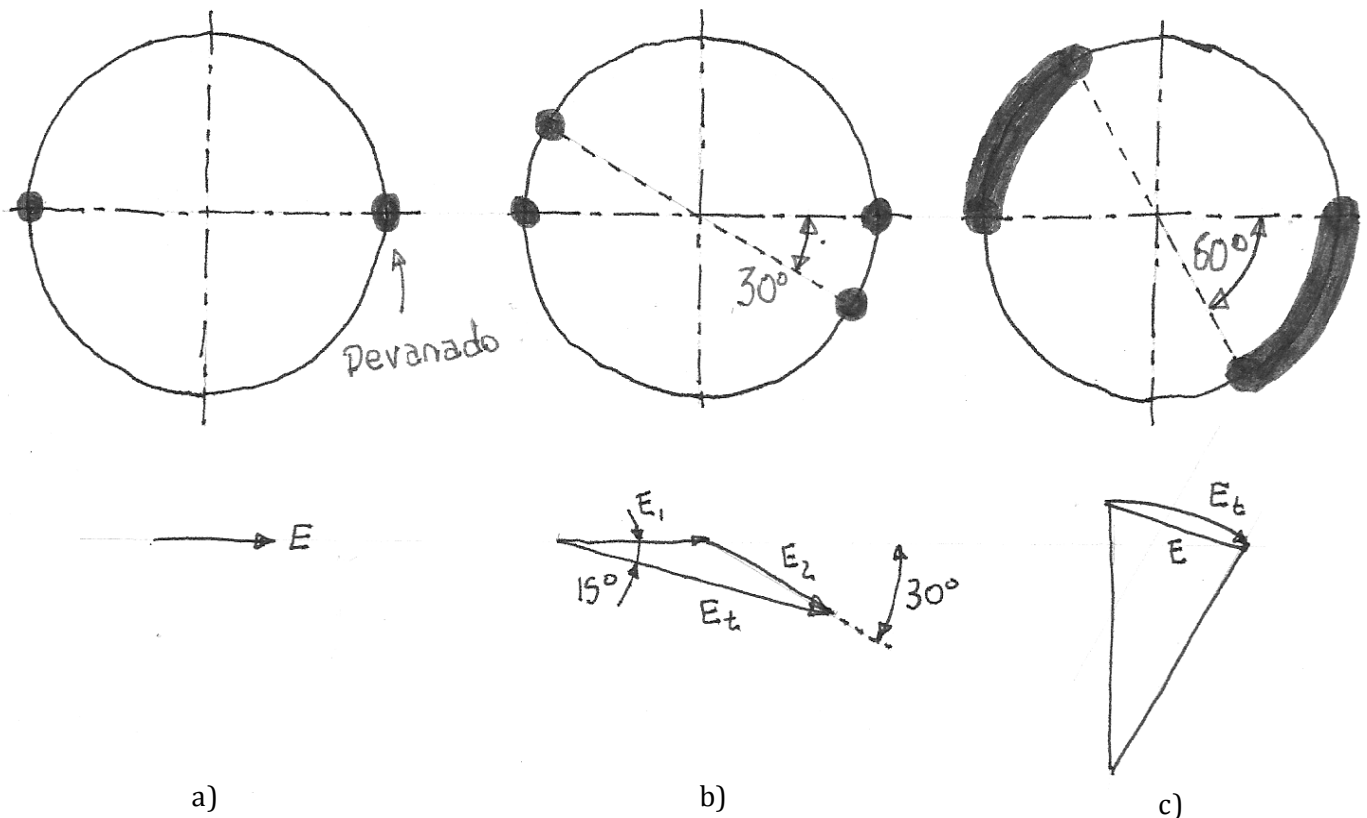


Figura 2-2: Cálculo de la **fem** resultante E_t en un motor de **a)** 1 devanado, **b)** 2 devanados separadas una distancia de 30° y **c)** espiras uniformemente distribuidas en un paso polar de 60° .

- **Caso 1 (un devanado):** en la [Figura 2-1a](#) vemos que hay una espira, el paso polar es de $\tau_p = 180^\circ$. La **fem** resultante tiene la magnitud (E) y sentido mostrada en la misma figura.
- **Caso 2 (dos devanados):** en la [Figura 2-1b](#) vemos en cambio que el número total de espiras del caso anterior se distribuye en dos devanados separados por una distancia de 30° . En cada una de ellos se inducirá una **fem** igual a $E_1 = E_2 = 0,5 \cdot E$ y mediante trigonometría obtenemos el valor de la **fem** resultante

$$E_t = E_1 \cdot \cos 15^\circ + E_2 \cos 15^\circ = 0,996 \cdot E_1 + 0,996 \cdot E_2 = 0,996 \cdot E$$

- **Caso 3 (devanado distribuido a lo largo de un arco):** en la [Figura 2-1c](#) vemos el caso que se da en la práctica, donde el número de los devanados conectados en serie es tan alto y la separación entre ellos tan chica que permite sumarlos colocándolos en un arco continuo. Con esto podemos prescindir del número de bobinas y obtener la tensión resultante.

Hay otra consideración a tener en cuenta en los devanados distribuidos, y es que el valor de la fem resultante será siempre menor a la que obtendríamos si concentráramos todos los devanados en uno solo. La fem E se encuentra así multiplicada por un factor, llamado factor de distribución ξ_d y que depende de la distribución de los devanados. Así, la fem total será

$$E_t = \xi_d \cdot E = \xi_d \cdot 4,44 \cdot f \cdot N \cdot \Phi \text{ [V]} \quad (2-3)$$

2.1 – 2: Campos rotantes

Trataremos aquí de encontrar el campo resultante debido a la iteración de corrientes en los devanados de un sistema polifásico. Para ello estudiaremos el caso más común: el sistema trifásico, donde cada uno de sus devanados se encuentra separado a 120° , en donde para que los grados eléctricos y geométricos coincidan usaremos una máquina bipolar. Llegaremos a la conclusión de que el campo resultante gira con una velocidad angular y módulo constante.

La [Figura 2-3c](#) muestra la disposición esquemática de un motor trifásico. En donde cada devanado se encuentra representado por círculos diametralmente opuestos y los puntos y cruces indican por donde

sale y entra respectivamente la corriente del devanado en cuestión. La corriente que atraviesa cada devanado genera una onda fundamental de **fmm** cuyo módulo y dirección puede encontrarse aplicando la regla de la mano derecha. Por ejemplo, la corriente $i_a(t)$ que cruza el devanado **A-A'**, que entra (en la Figura 2-3b) por **A'** y sale por **A**, va a generar una onda fundamental de fmm cuya dirección y sentido se la obtiene mediante la regla de la mano derecha, queda así definido entonces el **eje de la bobina A-A'**. Lo mismo ocurre para los otros dos ejes.

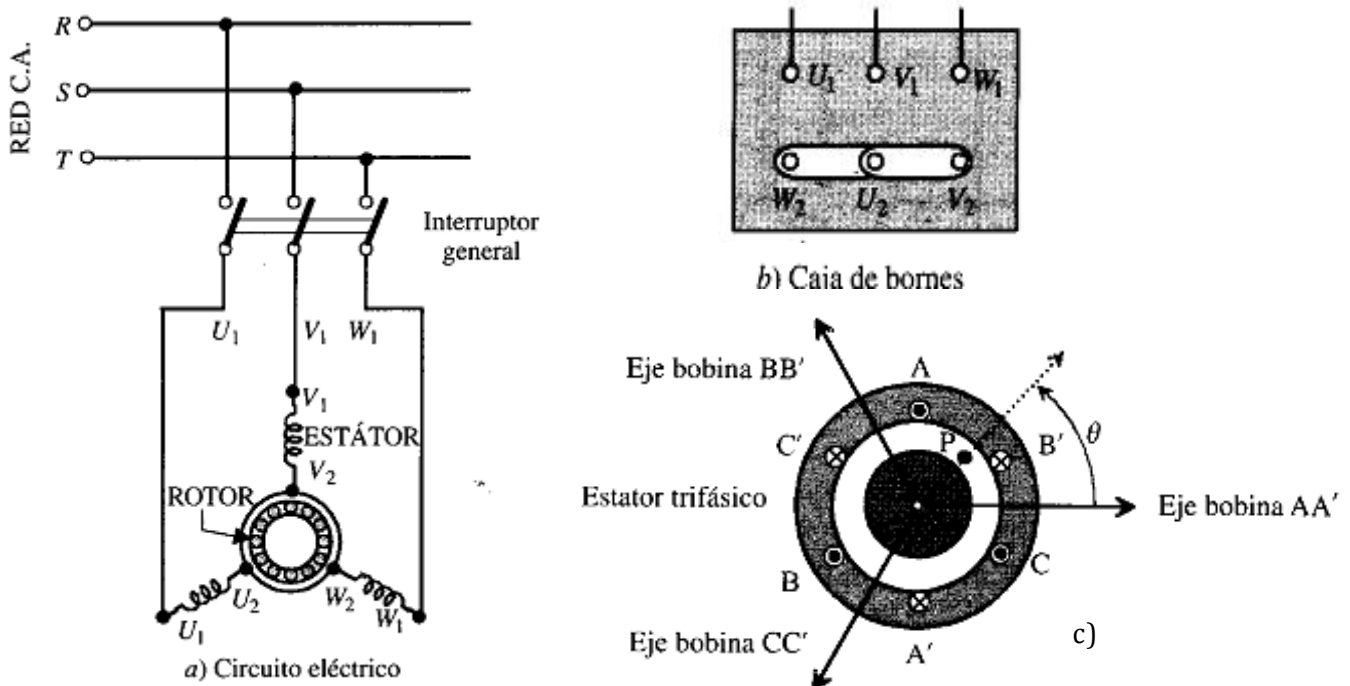


Figura 2-3: a) Conexión de un motor trifásico a la red, b) caja de bornes y c) disposición de los devanados en el motor, desfasados en el espacio 120° eléctricos.

Nos interesa saber la **fmm** que existe en un punto **P** situado a un ángulo θ del eje **A-A'** debido a la contribución de las corrientes que atraviesan los devanados. Dichas corrientes están equilibradas y, como dijimos, desfasadas 120° eléctricos unas de otras.

$$i_a(t) = I_m \cdot \cos(\omega t) \quad i_b(t) = I_m \cdot \cos(\omega t - 120^\circ) \quad i_c(t) = I_m \cdot \cos(\omega t + 120^\circ) \quad (2-4)$$

La **fmm** que se produce en el punto **P** debido a los tres devanados serán la suma de cada contribución, es decir **fmm=fmm_a+fmm_b+fmm_c** y cada una de éstas será

$$\begin{aligned} fmm_a(\theta, t) &= F_m \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos(\theta) \\ fmm_b(\theta, t) &= F_m \cdot \cos(\omega t - 120^\circ) \cdot \cos(\theta - 120^\circ) \\ fmm_c(\theta, t) &= F_m \cdot \cos(\omega t + 120^\circ) \cdot \cos(\theta + 120^\circ) \end{aligned} \quad (2-5)$$

Donde **F_m** es el valor máximo de la **fmm**. La **fmm_b** está multiplicada por el factor **cos(θ-120°)** pues es la proyección del eje **B-B'** sobre la recta donde se encuentra **P**, teniendo en cuenta el desfase espacial. El factor **cos(ωt-120°)** se debe a que esta **fmm** es provocada por la corriente **i_b**, la cual tiene un desfase eléctrico de 120° respecto a **i_a**.

En consecuencia, la onda de **fmm** resultante en **P** será la suma de las anteriores

$$fmm = fmm_a + fmm_b + fmm_c = F_m \cos(\omega t) \cos(\theta) + F_m \cos(\omega t - 120^\circ) \cos(\theta - 120^\circ) + F_m \cos(\omega t + 120^\circ) \cos(\theta + 120^\circ)$$

Por igualdad trigonométrica llegamos a

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

Los términos entre corchetes representan fasores de igual magnitud y desplazados 120° entre sí, por lo que su resultante se anula, quedando

$$f_{mm} = \frac{3}{2} \cdot F_m \cos(\omega t - \theta) \quad (2-6)$$

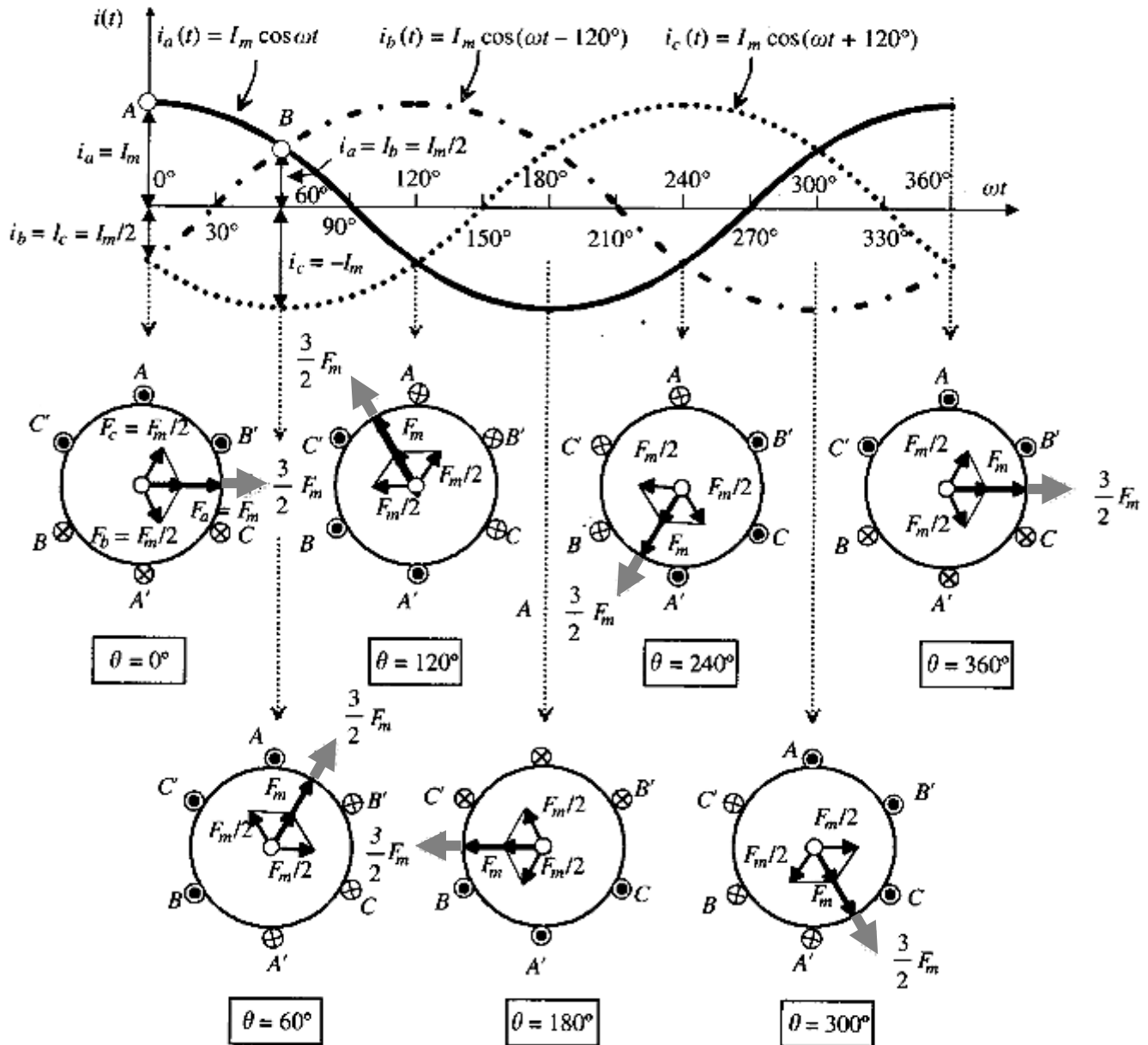


Figura 2-4: fem de un devanado trifásico alimentado con corrientes trifásicas.

Observemos que para el caso particular de querer saber la **fmm** en el eje **A-A'** positivo (esto es, para $\theta=0^\circ$), ésta valdrá

$$f_{mm} = \frac{3}{2} \cdot F_m \cos \omega t$$

Pero esto podría ser representado como la parte real de un fasor de magnitud $(3/2)F_m$ que se mueve a velocidad ωt

$$f_{mm} = \frac{3 \cdot F_m}{2} e^{j\omega t} \quad (2-7)$$

Es decir, que la **fmm** tiene el carácter de una onda que se mueve alrededor del entrehierro, es decir es giratoria, además su módulo es constante. La Figura 2-4 muestra los valores de corriente en el tiempo arriba y los valores de las **fmm**s abajo.

2.1 – 3: Funcionamiento y diagrama vectorial

Una característica importante del funcionamiento en vacío de la máquina síncrona, es la curva $E_o=f(I_e)$, que expresa la **fem** en los bornes de la máquina estando desconectada la carga en función de la corriente de excitación. La determinación de esta curva se realiza por vía experimental, necesitamos entonces hacer girar la máquina a la velocidad de sincronismo por medio del motor primario: turbina, diesel, etc., y entonces debemos cambiar gradualmente la corriente de excitación desde cero hasta un cierto valor máximo correspondiente a la saturación, y desde este último nuevamente hasta cero. Los valores medidos de la fem E_o en función de la corriente de excitación I_e se representan mediante dos ramas, una ascendente y otra descendente, de la característica. Sin embargo, esta divergencia es pequeña y depende de la influencia de la histéresis en los polos y en el yugo de la máquina. La característica en vacío representa la curva media entre ambas ramas y tiene la forma indicada en la [Figura 2-5a](#).

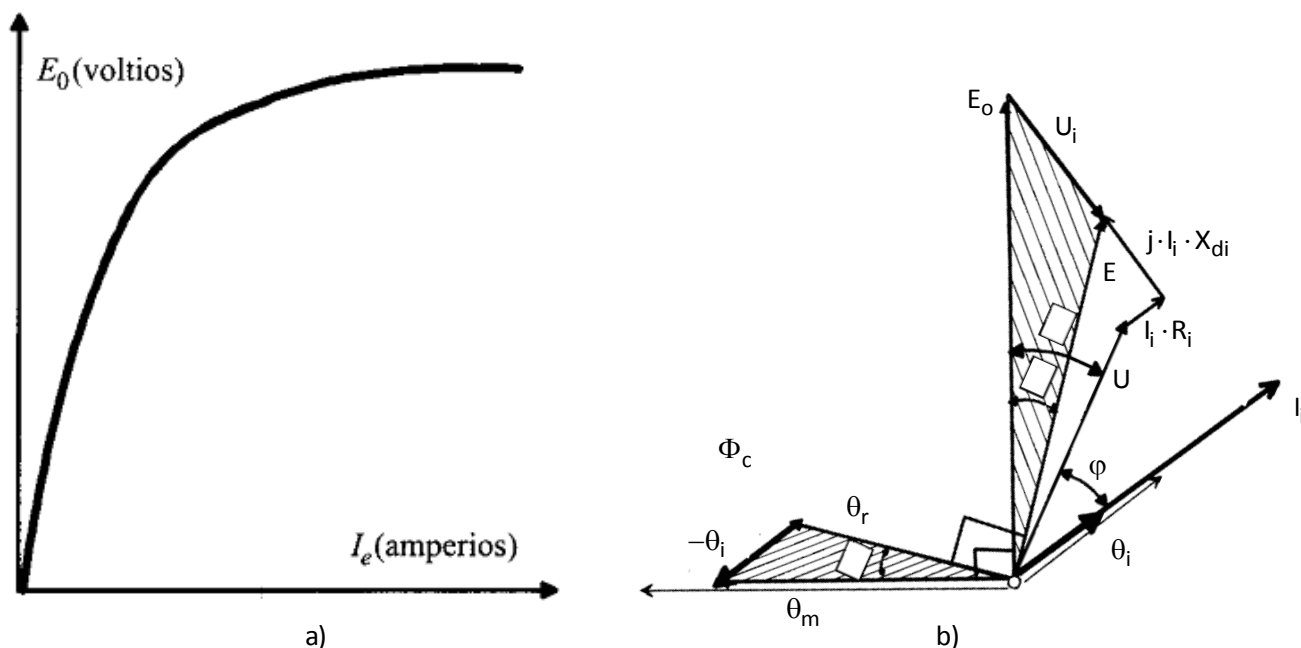


Figura 2-5: a) curva de vacío de un alternador en vacío y b) diagrama fasorial de un alternador en carga.

- **Diagrama fasorial en vacío:** la excitación del rotor θ_m produce un flujo Φ_m que se encuentra en fase con el primero. Este flujo a su vez, engendra una fem E_o retrasada 90° respecto del mismo.
- **Diagrama fasorial en carga (Figura 2-5b):** a la excitación θ_m del rotor ahora se le añade una excitación θ_i , que es la excitación (o fmm) del inducido, estas dos fmm se deben sumar vectorialmente para obtener la excitación resultante θ_c , cuya dirección define la del flujo resultante Φ_c . Este flujo engendra, como en el caso anterior, una fem resultante E atrasada 90° respecto de θ_c .

Partiendo del diagrama anterior, ahora debemos tener en cuenta la reacción del inducido U_i , de la cual sus causas y características fueron estudiadas en el capítulo 3. Esta tensión U_i adelanta (puesto que es una reacción) a la excitación del inducido θ_i .

La corriente (I_i) y excitación (θ_i) del inducido están en fase, puesto que en cada fase del devanado, la fmm combinada con las tres fases están en fase (valga la redundancia) con la corriente de fase considerada (valga otra vez la redundancia).

Para obtener la tensión U presente en los bornes del estator, debemos tener en cuenta la caída de tensión por reactancia $I_i X_d$ y por resistencia $I_i R_i$, caídas que deben ser restadas vectorialmente a E para obtener U . Las caídas por reactancia se proyectan grandes, del orden del 12 al 18% del valor de la tensión nominal en los bornes, para proteger las máquinas síncronas en caso de cortocircuito; las caídas por resistencia resultan despreciable, pues son del orden del 1 al 2%.

2.3 – Acoplamiento en paralelo de generadores

Esta sub-sección trata sobre la conexión en paralelo de una o más máquinas síncronas a la red, las condiciones que se deben dar y los métodos para que se cumplan las mismas.

Para conectar dos máquinas de la misma potencia, debemos tener en cuenta que:

- Las **fem** y polaridad del alternador –a conectar– sean iguales a las de la red;
- Si se conecta más de un sistema, sus frecuencias sean iguales y
- Las secuencias de las fases en los puntos en que se conectan sean iguales.

Para cumplir estas condiciones, utilizamos secuenciadores especiales, los más comunes son los de lámparas en fase, y los hay de dos tipos: de **lámpara apagada** y de **lámpara prendida**.

La [Figura 2-6a](#) muestra un secuenciador de lámpara apagada y la [Figura 2-6b](#) muestra uno de lámpara encendida. En el primer caso las lámparas, si las condiciones se cumplen, estarán apagadas, puesto que al estar en fase, su diferencia de potencial es 0 (cero). El segundo caso es la misma porquería salvo que las lámparas de la fase **S** y **R** están cruzadas, entonces, aquí la primera lámpara se mantendrá apagada y las otras dos brillarán al máximo.

Cuando por X motivos no se cumplen las condiciones enumeradas, las lámparas en ambos casos titilarán a una frecuencia igual a la diferencia de frecuencia entre la de la máquina y la de la red.

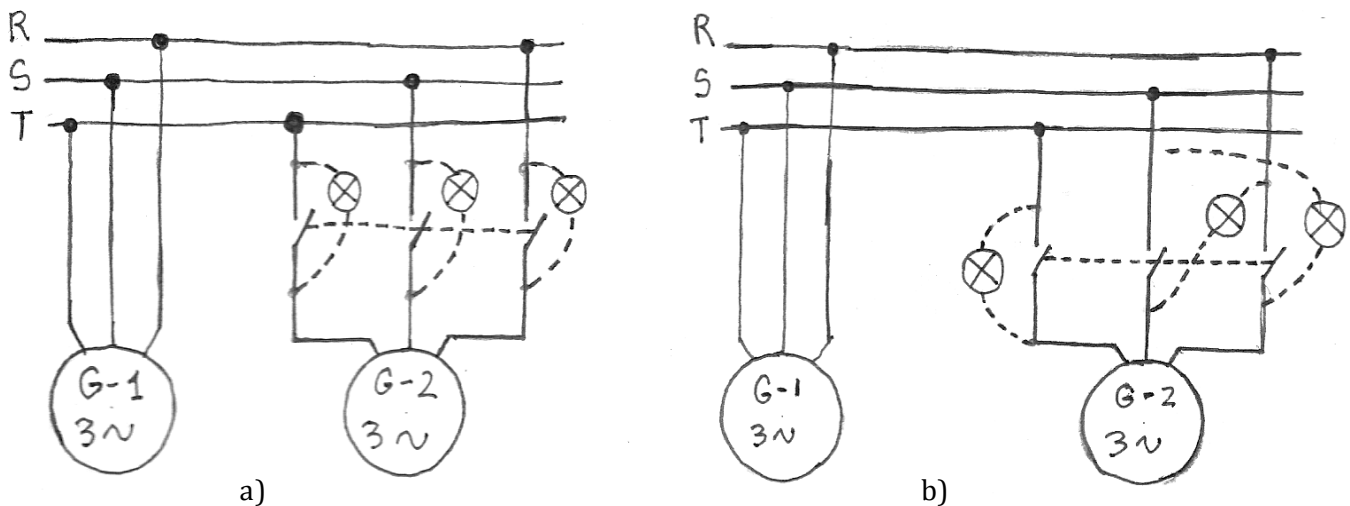


Figura 2-6: a) Secuenciador de lámpara apagada y b) de lámpara encendida.

3 – MOTORES ASÍNCRONOS

3.1 – Aspectos constructivos

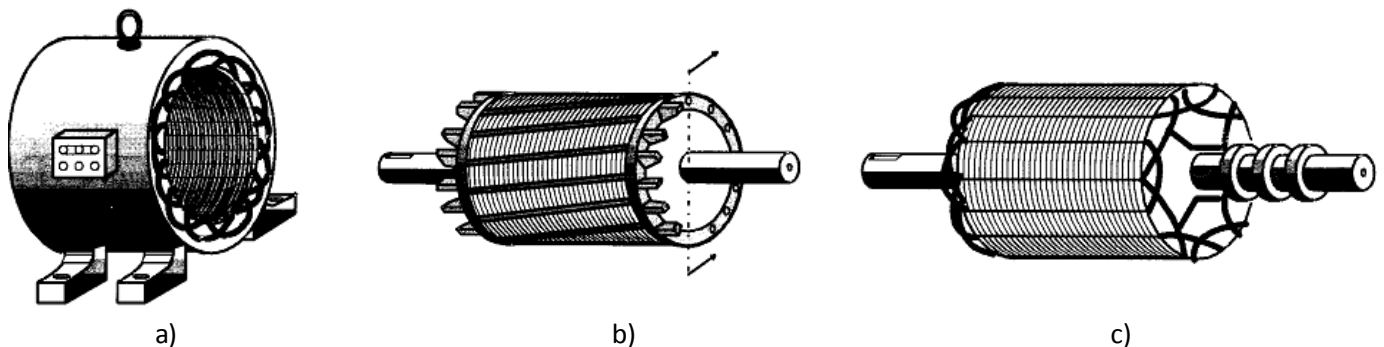


Figura 3-1: a) Estator de un motor asíncrono, b) rotor en jaula de ardilla y c) rotor bobinado.

La máquina asíncrona está conformada por un estator y un rotor. 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 bobinado** o con anillos.

Los dos elementos más importantes a estudiar son el estator (inductor) y el rotor (inducido):

- 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 Φ giratorio de amplitud constante distribuido sinusoidalmente por el entrehierro. El estator está rodeado por la carcasa, tal como indica la [Figura 3-1a](#), disponiéndose en ésta las correspondientes patas de fijación y los anillos de elevación y transporte.
- 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. En el caso de **rotor bobinado**, 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 muestra la [Figura 3-1c](#). Esta disposición hace posible la introducción de resistencias externas (reóstatos) por los anillos para limitar las corrientes de arranque, mejorar las características del par y controlar la velocidad. 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 [Figura 3-1b](#). Debido a su sencillez y su bajo costo, han ido apareciendo, para elevadas potencias, diferentes tipos especiales que poseen la característica, durante el arranque, de absorber una corriente moderada y desarrollar un mayor par interno. Algunos de estos tipos especiales son con rotor a simple jaula de ardilla, rotor de gran reactancia y rotor de doble jaula de ardilla.

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. 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.

El entrehierro de estos motores debe ser pequeño, del orden de **0,3 [mm]** para motores de hasta **1 [KW]** y de aproximadamente **1 [mm]** para motores de hasta **100 [KW]**, a fin de poder conseguir un valor reducido de la corriente de vacío y **cos φ** .

3.2 – Funcionamiento

3.2 – 1: Principio de funcionamiento

En la máquina asíncrona, a diferencia de los demás tipos de máquinas, **no existe corriente conducida a uno de los devanados**. La corriente que circula por uno de los devanados (por lo general el que se sitúa en el rotor) se debe a la **fem** inducida por la acción del flujo del otro, y por esta razón se denominan máquinas de inducción. También reciben el nombre de máquinas asíncronas puesto que la velocidad de giro del rotor no es la velocidad de sincronismo impuesta por la frecuencia de la red, sino que es siempre menor.

Generalmente la máquina asíncrona suele funcionar como motor. 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**, se produce una onda rotativa de **fmm** distribuida sinusoidalmente por la periferia del entrehierro, que produce un flujo giratorio cuya velocidad es

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \text{ [rpm]} \quad (3 - 1)$$

que recibe el nombre de **velocidad de sincronismo**. Este flujo giratorio inducirá **fems** en los conductores del rotor, y si está su circuito eléctrico cerrado, aparecerán corrientes que reaccionarán con el flujo del estator.

La interacción entre el campo magnético giratorio y estas corrientes es tal que produce la aparición¹ de fuerzas, el momento total de estas fuerzas es el que origina el par interno de rotación de la máquina, que obliga al rotor a seguir el movimiento del campo giratorio, de tal forma que cuanto más se aproxima a la velocidad de sincronismo n_s del campo, tanto menor resulta la fem 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. En el caso límite, cuando la velocidad del rotor n_r sea igual a la de sincronismo (es decir $n_r = n_s$), no habría entonces desplazamiento relativo del campo giratorio respecto del rotor, desapareciendo con ello la fem inducida y como consecuencia de esto se anularía la corriente y el par. De este modo la velocidad de sincronismo n_s constituye el límite teórico al que puede girar el rotor. El motor debe girar a una velocidad inferior a la de sincronismo ($n_r < n_s$), es decir, su velocidad de régimen es asíncrona.

Por último definiremos el **desplazamiento S** (o deslizamiento) como

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (3-2)$$

cuyo valor en motores industriales está comprendido entre **0,03** y **0,08** a plena carga.

3.2 – 2: Régimen de funcionamiento

Básicamente, una máquina asíncrona puede funcionar en tres regímenes: de motor, de generador y de freno electrodinámico.

- **Régimen de motor:** la máquina funciona como motor cuando la velocidad del rotor n_r va desde **0** hasta n_s (velocidad de sincronismo), es decir **S** varía entre **1** y **0**. Aquí, la energía eléctrica de la red aplicada al estator, se convierte en energía mecánica en el eje de la máquina.
- **Régimen de generador:** la máquina funciona como generador cuando n_r supera el valor de n_s , es decir que se aplica al eje de la máquina una fuerza tal que $n_r > n_s$. **S** varía entre **0** y **-∞**.
- **Régimen de freno electrodinámico:** en este caso, el rotor comienza a girar en sentido contrario a la del campo giratorio del estator; n_r puede ir, teóricamente, desde 0 hasta **-∞** y **S** variará entonces desde **1** hasta **+∞**. Supongo, y esto es una apreciación personal, que esto se usa cuando se quiere frenar la máquina, entonces en lugar de hacer girar el rotor en sentido contrario, lo que se invierte es el giro del campo rotatorio.

Si graficamos la ecuación (3-2) la cosa se vuelve un poco –no tanto– más clara.

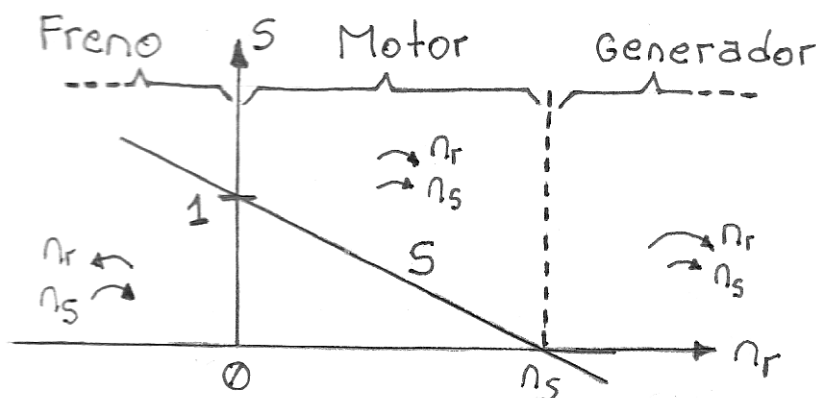


Figura 3-2: Régimen de funcionamiento de un motor asíncrono, gráfico de n_r vs n_s .

¹ Este es un desarrollo que tiene en cuenta la ley de Laplace, pues al circular corriente por un devanado aparece una fuerza **F** tal que **F=i(LxB)**. Omito este desarrollo ya que en el libro de Ubal no figura.

3.2 – 3: Marcha y diagrama vectorial

En lo que sigue, podemos hacer una analogía con los transformadores. Así podremos también hacer el circuito equivalente para darnos una idea de cómo es el diagrama vectorial. Estableceremos la equivalencia entre el primario de un transformador y el estator, el núcleo del transformador sería el entrehierro del motor y por último el secundario vendría a ser el rotor. Así, el subíndice 1 en los gráficos se refiere a las variables del estator (primario) y el subíndice 2 a las del rotor (secundario). Existirán, sin embargo, inexactitudes en esta analogía, pues el motor es una máquina rotativa la cual genera una nueva clase de pérdidas debido al rozamiento de los cojinetes. También la corriente de vacío es mucho más grande en el motor que en el transformador.

En vacío: en lo que refiere a las corrientes, aparecen también aquí I_μ e I_{Fe} , cuya suma (vectorial) nos da la corriente de excitación. Pero esta no es la de vacío, pues debe contrarrestar los amperes-vueltas del secundario, es decir sumarse una corriente I_r (o I_2) que aparece en el rotor (de ahí el subíndice r) para vencer el par de rozamiento. Por lo tanto, I_e será la suma de I_r e I_o .

$$I_o + I_r = I_e = I_{Fe} + I_\mu \quad (3-3)$$

La corriente I_o multiplicada por la impedancia del devanado del estator ($R_1 + jX_{d1}$) nos da la caída de tensión en el estator, la cual es sumada a $-E_1$ (que es una parte de la tensión de línea) para obtener la tensión U_1 en los bornes del estator.

$$U_1 = I_o (R_1 + jX_{d1}) - E_1 \quad (3-4)$$

En el rotor aparece una pequeña fem E_{2n} necesaria para vencer las caídas de tensión en el devanado del rotor ($R_2 + jX_{d2n}$), multiplicando esta impedancia por I_r nos da como resultado E_{2n} .

$$E_{2n} = I_r (R_2 + jX_{d2n}) \quad (3-5)$$

Esta nueva tensión en el rotor E_{2n} e inductancia X_{d2n} son valores que aparecen debido a lo explicado a continuación.

En el rotor, la tensión que se desarrolla depende de la fórmula

$$E_{2n} = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{\max} [V] \quad (3-6)$$

Donde f es la frecuencia del rotor que, al girar el mismo a una velocidad menor a la del campo rotante del estator, será menor (la frecuencia) a la de sincronismo (estator). Específicamente

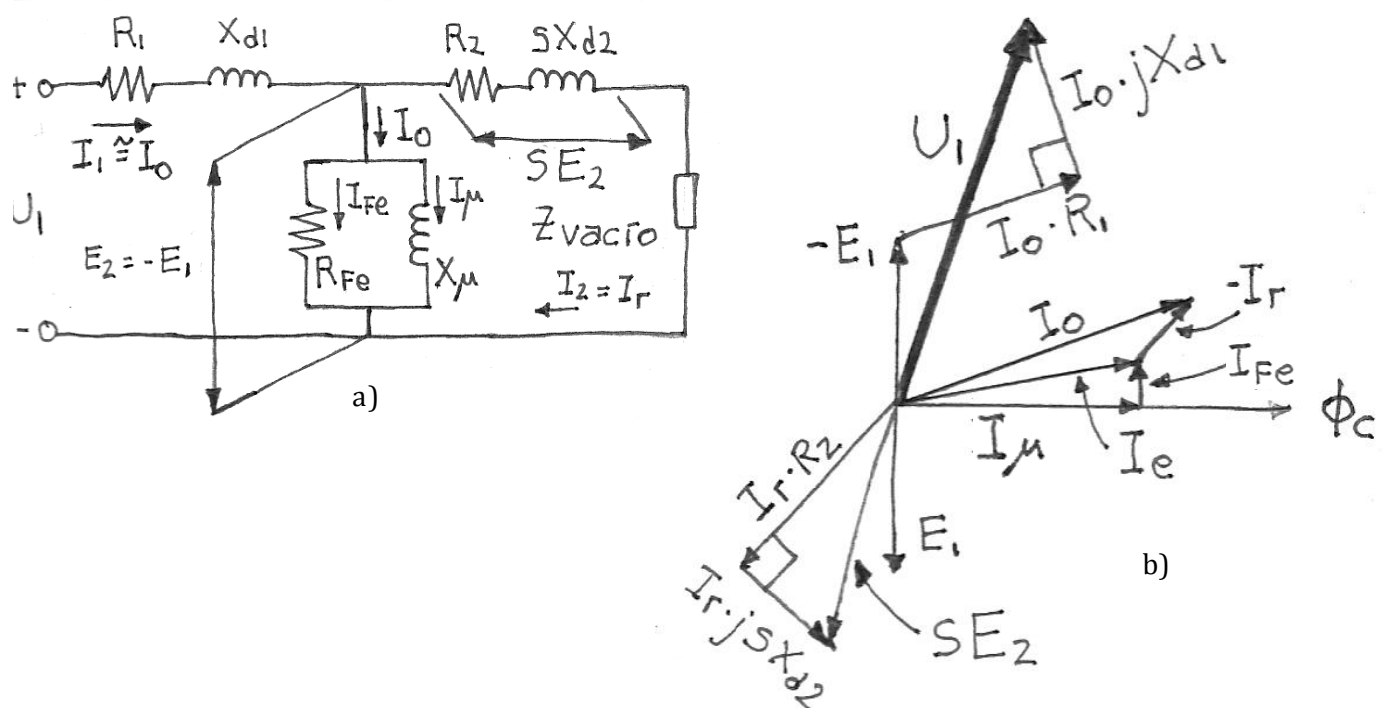


Figura 3-3: a) Circuito equivalente y b) diagrama vectorial de un motor asíncrono en vacío.

$$f_{\text{rotor}} = S \cdot f_{\text{estator}} \quad (3-7)$$

Entonces reemplazando este valor en la ecuación de E_{2n} nos queda

$$E_{2n} = 4,44 \cdot f_{\text{rotor}} \cdot N \cdot \Phi_{\text{max}} = 4,44 \cdot S \cdot f_{\text{estator}} \cdot N \cdot \Phi_{\text{max}} = S \cdot (4,44 \cdot f_{\text{estator}} \cdot N \cdot \Phi_{\text{max}}) = S \cdot E_2 \quad (3-8)$$

Con la inductancia sucede algo similar, pues su valor depende de la frecuencia –en este caso del rotor– y su valor será

$$X_{d2n} = 2\pi \cdot f_{\text{rotor}} \cdot L = 2\pi \cdot S \cdot f_{\text{estator}} \cdot L = S \cdot (2\pi \cdot f_{\text{estator}} \cdot L) = S \cdot X_{d2} \quad (3-9)$$

Entonces la ecuación (3-5) nos queda

$$S \cdot E_2 = I_r (R_2 + j \cdot S \cdot X_{d2}) \quad (3-10)$$

La Figura 2-6 representa el circuito equivalente y su diagrama vectorial. Donde $Z_{\text{vacío}}$ es la carga (pequeña) que representa la resistencia de los rozamientos del cojinete.

En carga: en carga sucede algo parecido, solo que aparece una corriente I_2 (o la I_r se vuelve más grande) que aumenta hasta ser capaz de producir el nuevo par requerido. Con el aumento de I_r (o I_2 , es lo mismo) aumentará también I_1 (corriente del estator) de la misma forma y por idénticas razones que en el caso del transformador. Esto provoca un aumento de φ_2 y por ende una disminución del $\cos \varphi$.

I_1 ya no será lo sino que será la suma entre I_o e I_e .

$$I_1 = I_o + I_e = I_o + I_{Fe} + I_{\mu} \quad (3-11)$$

La corriente I_{2n} la podemos obtener como el cociente entre E_{2n} y $(R_2 + jX_{d2n})$, ambos valores calculados antes (ecuaciones (3-8) y (3-9)), entonces

$$I_r = I_{2n} = \frac{E_{2n}}{R_2 + j \cdot X_{d2n}} = \frac{S \cdot E_2}{R_2 + j \cdot S \cdot X_{d2}} = \frac{E_2}{\frac{R_2}{S} + j \cdot X_{d2}} = \frac{E_2}{R_2 + j \cdot X_{d2} + \frac{R_2}{S} - R_2} \quad (3-12)$$

El rotor se comporta como si estuviera conectado a una cierta resistencia ficticia $R_c = R_2(1/S-1)$. En cuanto a la tensión E_2 , ésta se reparte como

$$E_2 = E_2 + SE_2 - SE_2 = \underbrace{SE_2}_{\text{distribuido en el devanado del rotor}} + \underbrace{(1-S)E_2}_{\text{distribuido en la carga}} \quad (3-13)$$

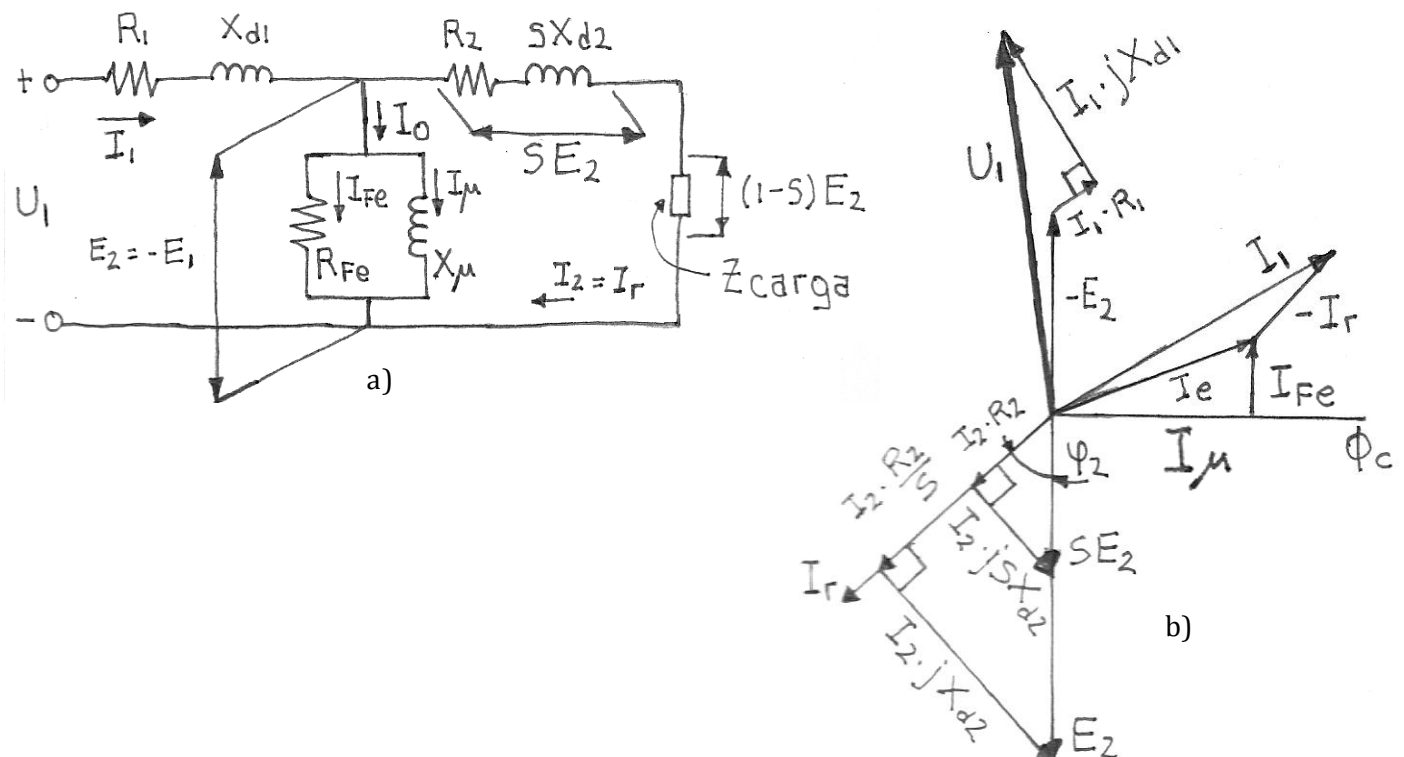


Figura 3-4: a) Circuito equivalente y b) diagrama vectorial del motor asíncrono con carga.

Y el circuito equivalente y su diagrama vectorial nos quedan así conformados.

Pero Ubal no dice nada en el libro de la resistencia ficticia R_c ni de la tensión en la carga $(1-S)E_2$, así que en el final ni hay que nombrarlas.

3.3 - Puesta en marcha de motores trifásicos

Dos cosas debemos tener en cuenta a la hora de poner en marcha una máquina asíncrona, una es la **magnitud del par de arranque** y la otra la **magnitud de la corriente de arranque**.

Para que la máquina comience a girar, necesitamos que el par de arranque sea mayor al par resistente de la carga. Cuando esto ocurra se obtiene un momento de aceleración que obliga al rotor a girar a una velocidad cada vez mayor, hasta alcanzar el régimen permanente, que es cuando pares motor y resistente se igualan.

Este proceso consume mucha corriente, pues la resistencia de carga equivalente R_c en el momento inicial (cuando el rotor comienza a moverse) es nula, por lo que prácticamente la máquina se encuentra en cortocircuito.² La corriente máxima permitida varía de país en país y de la potencia de la red de alimentación, pero para no complicarnos diremos que el cociente entre el módulo de la corriente de arranque I_a y el módulo de la corriente nominal (a plena carga) I_n debe ser menor a **6,5**. O sea

$$\frac{I_a}{I_n} < 6,5 \quad (3 - 14)$$

Los métodos para reducir la corriente de arranque en el momento de la puesta en marcha dependen del tipo de rotor (bobinado o jaula de ardilla). Aquí veremos los siguientes:

- Arranque del motor asíncrono con rotor bobinado
- Arranque del motor asíncrono con rotor jaula de ardilla, que a su vez se subdivide en
 - Arranque con ayuda de conmutación estrella triángulo
 - Arranque con ayuda de auto transformador

3.3 – 1: Arranque del motor asíncrono con rotor bobinado (reóstato)³

En motores con este tipo de rotor podemos reducir la corriente de arranque introduciendo una resistencia adicional (reóstato) en cada una de las fases del rotor. La operación se realiza con la ayuda de un reóstato trifásico, como se indica en la [Figura 3-5a](#), donde se ha supuesto que los devanados de la máquina están conectados en estrella.⁴

En el arranque se introduce toda la resistencia adicional (posición 1), de esta forma aumenta la impedancia de la máquina y se reduce la corriente inicial; conforme el motor inicia su marcha, se va eliminando resistencia del reóstato pasando el mando móvil a las posiciones 2, 3 y 4, que conforman una serie de contactos, en la última posición queda cortocircuitado el rotor y finaliza la operación de arranque. En esta situación, para reducir las pérdidas mecánicas del motor y también el desgaste de anillos y escobillas, **estas máquinas llevan a menudo dispositivos para levantar las escobillas y poner en cortocircuito los anillos**. En la actualidad la operación de arranque se realiza automáticamente por medio de contactores y relés de tiempo que van eliminando secuencialmente las resistencias adicionales.

² Esto se justifica (la $R_c = 0$) haciendo el circuito equivalente de una máquina asíncrona, desarrollo similar al hecho en el caso de los transformadores. Desarrollo que omito aquí porque en el libro de Ubal no está.

³ En el grafico vemos que el eje de las abscisas es S , y no el tiempo transcurrido en el cual se produce los cambios en los contactos. Si bien es cierto que a medida que va pasando el tiempo, S disminuye, no tengo la más puta idea de si $-S$ es proporcional al tiempo transcurrido

⁴ Aunque en el final sí o sí hay que hacer la conexión en estrella. Si ponés en triángulo el rotor y/o el estator Ubal te va a decir que está mal.

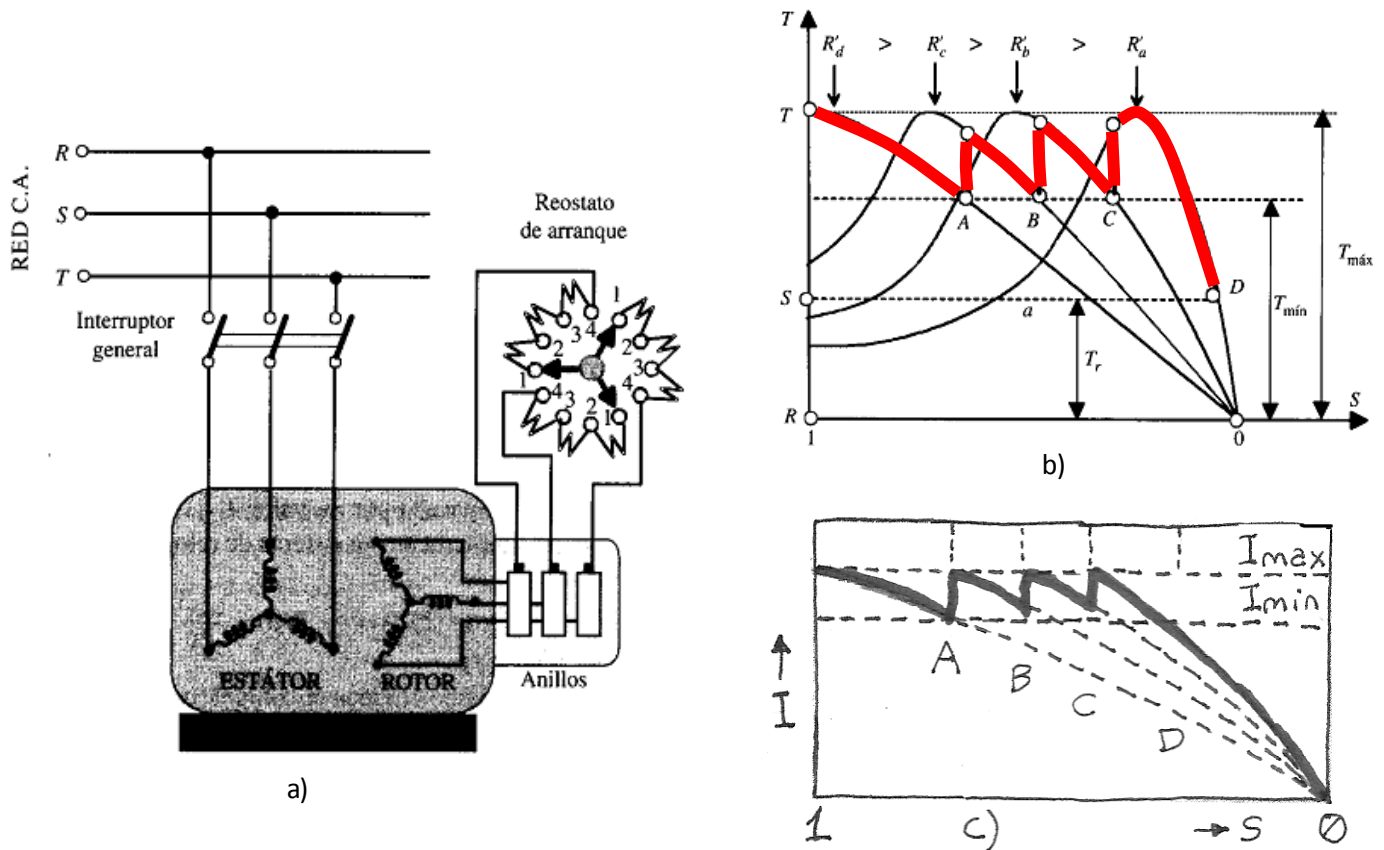


Figura 3-5: a) circuito de conexión del reóstato para la puesta en marcha de un motor asíncrono con rotor bobinado, b) par motor **M** (o **T** en el gráfico) en función del deslizamiento y c) corriente del rotor en función del deslizamiento.

La introducción de resistencia en el rotor modifica las curvas **T** (momento o par,⁵ también designado con **M**) vs **S**, desplazando el par máximo a valores de mayor deslizamiento, pero sin modificar el par máximo, como se muestra en la [Figura 3-5b](#).

En dicha figura hemos representado esta situación por una resistencia total reducida del rotor de valor **R'a**. Si suponemos que las cuatro curvas mostradas en la [Figura 3-5b](#) correspondan a las posiciones de los cuatro comandos (1, 2, 3 y 4) de la [Figura 3-5b](#), podemos analizar de una forma combinada el proceso de arranque de la máquina. Supongamos que para ello que el par resistente es constante e igual a **T_r** (curva **a**) de la [Figura 3-5b](#). En el instante de la puesta en marcha el par de la carga (segmento **SR**) es inferior al par de arranque de la máquina (segmento **TR**) en la posición del comando 1; la diferencia entre estos pares provoca el «despegue» del rotor y la máquina se va acelerando siguiendo la curva del par que corresponde a la resistencia **R'a**, según el camino señalado con trazo rojo en la [Figura 3-5b](#); conforme se va conmutando el reóstato de arranque, el par del motor pasa de una curva a la siguiente, y se han indicado por medio de los puntos **A**, **B** y **C** los momentos en que se producen estos cambios, hasta llegar al régimen estable de funcionamiento en el punto **D**. Las conmutaciones se han producido en los instantes en que el par pasaba por un valor **T_{mín}**, pero podría haberse elegido un criterio de corriente mínima, o simplemente un sistema de tiempo que conmutara cada resistencia en un tiempo predeterminado.

En la [Figura 3-5c](#) podemos ver cómo es la gráfica de la corriente a medida que el rotor va aumentando la velocidad (disminución de **S**). La corriente de arranque **I'a** es menor que la corriente (en este caso **I'a**) que circularía por el rotor si no estuviera el reóstato.

⁵ En realidad lo que sucede es que en el libro de donde saqué la figura sale **T** y en el libro de Ubal sale **M**, pero ambos se refieren al par motor.

En el libro explica que la secuencia de disminución de las resistencias se hace en forma progresiva, esto equivale a decir que pasa desde el contacto A al D –Figura 3-5a– progresivamente logrando así infinitos valores de resistencia y por ende infinitas curvas en la Figura 3-5b. También en el libro, Ubal utiliza una serie de artilugios para lograr poner al par **M** (que en el caso del gráfico es **T**) en función de **S**.

La **fem** en el rotor **SE₂** es aproximadamente igual a la caída de tensión en la resistencia óhmica del devanado del rotor si despreciamos la caída en la inductancia.

$$S \cdot E_2 \approx I_2 (R_2 + R'_d) \quad (3 - 15)$$

Donde **R'_d** es la resistencia añadida en serie al rotor. Por otro lado, la expresión del par **M** es

$$M = \Phi \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 \quad (3 - 16)$$

Si despejamos **I₂** de esta ecuación y la reemplazamos en la primera y luego despejamos **M** tenemos

$$M = T = \frac{E_2 \cdot S}{\Phi \cdot \cos \varphi_2 \cdot (R_2 + R'_d)} \quad (3 - 17)$$

En donde tenemos a **M** en función de **S**, donde podríamos llegar a pensar que **M** es proporcional a **S**, pero lo que sucede en realidad es que al variar **S**, varía también **φ₂**. Lo que tendríamos que hacer es poner a **φ₂** en función de **S** y ahí veríamos que **M** describe la forma mostrada en la Figura 3-5b. Pero dicha proeza escapa a este modesto apunte, además Ubal apenas si te pide que hagas bien el gráfico en el final, ni siquiera que lo expliques.

3.3 – 2: Arranque de los motores a jaula de ardilla

Los motores a jaula de ardilla son más económicos, poseen una caída mínima de tensión y mayor rendimiento; pero su mayor desventaja es la gran corriente necesaria en el arranque además de poseer un bajo par de arranque. Los métodos para ponerlo en marcha son dos: arranque con ayuda de autotransformador y arranque con ayuda de conmutación estrella triángulo.

Arranque con ayuda de autotransformador

Consiste en intercalar un autotransformador entre la red y el motor, de tal forma que la tensión aplicada en el arranque sea sólo una fracción de la asignada. El proceso se puede realizar en dos o tres escalones y con tensiones no inferiores al **40**, **60** y **75%** de la tensión de la línea. En la Figura 3-6a se muestra un arranque por autotransformador, con dos etapas de tensión (posición **1** y **2**, pues en la **3** la máquina se encuentra conectada a la red). **El funcionamiento es esencialmente igual a la del caso de arranque de motor con rotor bobinado, solo que el reóstato es ahora reemplazado por el autotransformador, en donde sus devanados funcionan como bobinas de choque y su resistencia hace las veces de resistencia del reóstato.** Pero como esto solo no alcanza, en lugar de aumentar dicha resistencia, lo que hacemos es disminuir la tensión aplicada, lo cual conseguimos con la división de tensión que produce el autotransformador.

En la posición **1** del conmutador se alimenta el autotransformador con la tensión de la red, aplicando al motor solamente una fracción de esta tensión de la red (etapa de arranque). Cuando la máquina ha aumentado su velocidad hasta un valor adecuado, cercano al asignado, el conmutador se pasa a la posición **2**, lo que eleva la tensión que llega al motor y éste sigue aumentando de velocidad. Finalmente se pasa el conmutador a la posición **3**, de tal forma que la tensión de la red queda aplicada directamente al estator del motor.

Aunque no se demuestra en este texto, el par interno es directamente proporcional al cuadrado de la tensión aplicada en el momento de la puesta en marcha del motor, la relación entre el par de arranque con autotransformador **T_{a,aut}** y el que se obtiene en conexión directa **T_a**, será

$$T_{a,aut} = x^2 \cdot T_a \quad (3 - 18)$$

donde x indica la fracción de tensión, respecto a la asignada, que se aplica con autotransformador. Por ello, si se aplica una tensión del 70% de la asignada, el par de arranque con autotransformador es el 49% del par con arranque directo ($0,7^2=0,49$). De aquí se desprende que este método de puesta en marcha solamente es posible en los casos en que el par resistente ofrecido por la carga no sea muy elevado. En la [Figura 3-6b](#) podemos ver el gráfico de corriente de arranque vs velocidad, que es esencialmente la misma que para el caso del arranque con rotor bobinado (resistencias en el rotor). La [Figura 3-6c](#) en cambio, las curvas tienen la misma forma que las curvas del caso anterior ([Figura 3-5b](#)), solo que difieren en que aquí, una curva es superior a otra en todo momento, lo cual no sucede en el otro caso (ni puta idea del porqué).

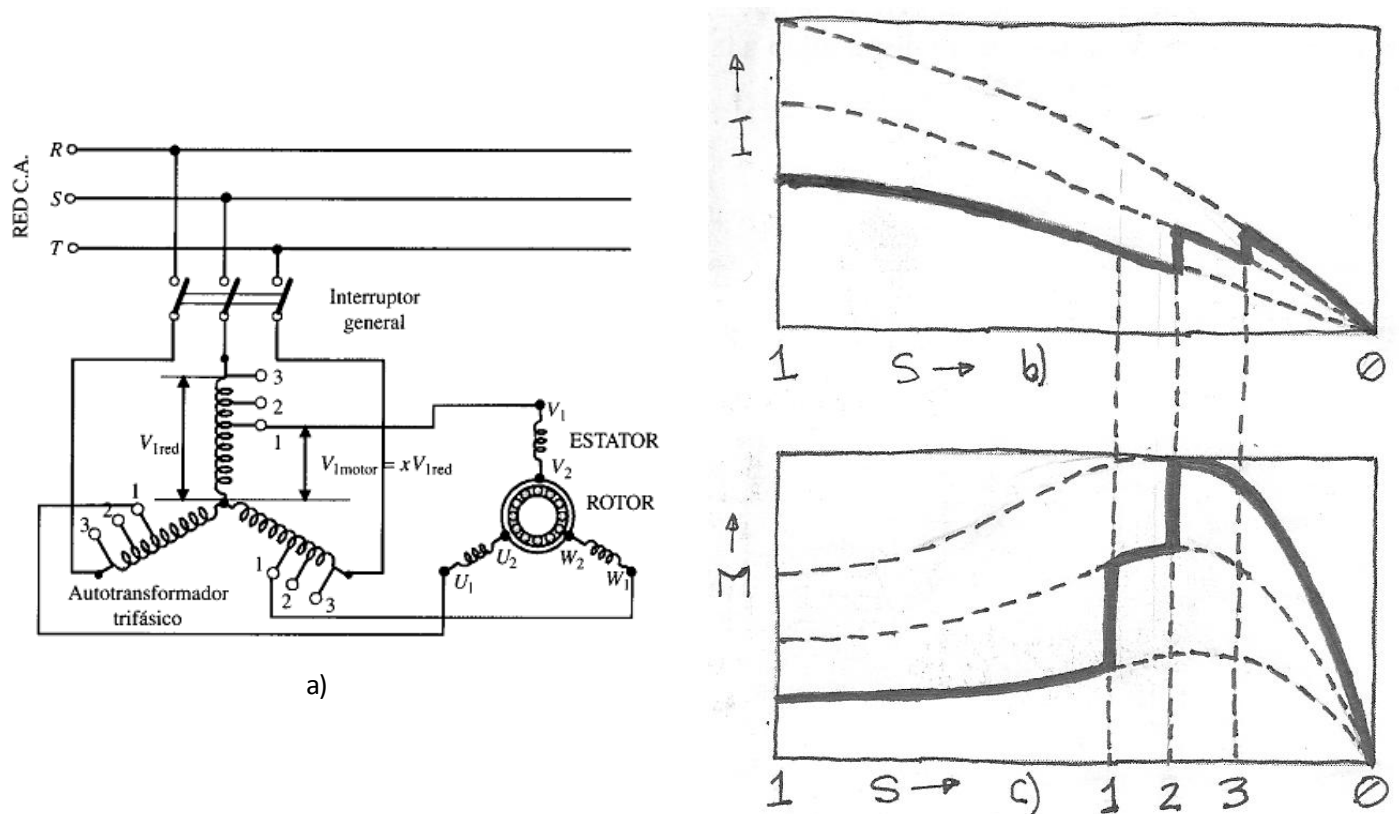


Figura 3-6: a) circuito de conexión para el arranque por autotransformador, b) corriente vs deslizamiento y c) par motor vs deslizamiento.

Nota: en el gráfico mostrado en la [Figura 3-6a](#), es distinto al de la figura que está en el libro de Ubal, pero en esencia es lo mismo. La posición 1 del interruptor de selección del autotransformador se corresponde con la primera etapa que figura en el libro de la materia, puesto que los finales de bobina están conectados a un punto medio y la posición 3 se corresponde a la tercera etapa, puesto que la máquina se encuentra conectada directamente a la red. La única diferencia entre la figura de este texto y la del libro del Ubal es que en la primera hay un escalón más en la selección de fracción de tensión de red, que es justamente la posición 2.

Arranque con ayuda de conmutación estrella triángulo

Este método solamente se puede utilizar en aquellos motores que estén preparados para funcionar en triángulo con la tensión de la red. ¿Por qué debe ser así? Porque la tensión que recibe cada devanado en conexión estrella es $1/\sqrt{3}$ veces menor a la de la línea, esta tensión iguala a de la red cuando se pasa a la conexión triángulo, así que la máquina debe estar preparada para poder soportar dicho aumento de tensión.

La máquina se conecta en estrella en el momento del arranque y se pasa después a triángulo cuando está en funcionamiento. La operación se realiza en la actualidad con contactores, con un circuito de fuerza y otro de mando o control; se requieren tres contactores: uno, denominado principal, para la alimentación de los principios de bobina de los devanados del motor; otro contactor se encarga de rea-

lizar la conexión del devanado en estrella, y el tercero ejecuta la conexión triángulo; además se necesita circuito de control de tiempo (que podría tratarse de un relé temporal o bien un circuito electrónico) para ajustar el momento en que se realiza la conmutación.

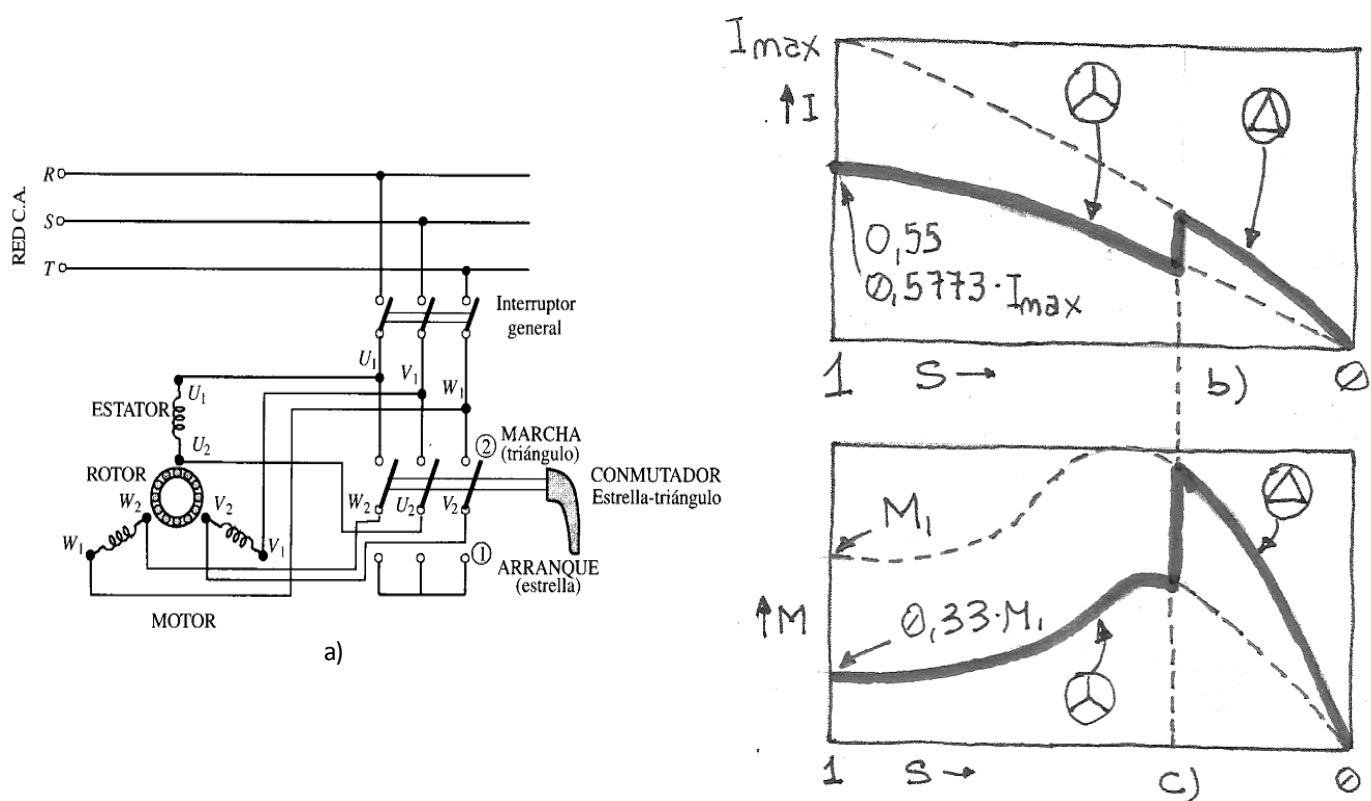


Figura 3-7: a) esquema de conexión para el arranque estrella triángulo, b) corriente vs deslizamiento y c) par motor vs deslizamiento.

Para facilitar la comprensión de este sistema de arranque, en la [Figura 3-7a](#) se muestra el esquema de un circuito que utiliza un conmutador manual especial, que hoy en día no se usa pero nos sirve para entender el funcionamiento del arranque debido a su simplicidad. La posición 1 del conmutador de la figura se emplea para el arranque y conecta los devanados en estrella; el estator recibe la alimentación por U_1 , V_1 y W_1 y el conmutador puentea los terminales U_2 , V_2 y W_2 . Una vez que la máquina alcanza una velocidad estable el conmutador se pasa a la posición 2, puenteando los terminales U_1 con W_2 , V_2 con U_2 y W_2 con V_2 , y la máquina queda en triángulo.

Observamos con esto que en el momento de la puesta en marcha, se aplica al motor una tensión por fase de una magnitud $1/\sqrt{3}$ de la asignada. Desde el punto de vista analítico, equivale este método a un caso particular del arranque por autotransformador cuando $x=1/\sqrt{3}$. Por procedimientos que no vienen al caso podemos demostrar que **la corriente de arranque en estrella es el 57,73% (este valor sale de hacer $(1/3)^{1/3}$) de la corriente de arranque que absorbería el motor si se conectara en triángulo. Con respecto al par de arranque, se ve disminuido a la tercera parte**, cosa que debemos tener en cuenta si el motor va a arrancar con carga.

3.4 – Motor asíncrono monofásico

El motor asíncrono monofásico asíncrono (también llamado motor monofásico a inducción) es una máquina de construcción sencilla y económica y su campo de acción son los accionamientos que requieran pequeñas potencias y siempre que no sea necesaria alguna condición particular de cupla o velocidad. Poseen la ventaja de que no tienen partes rozantes (anillo o escobillas) por lo que tampoco tienen desgaste e interferencia radioeléctricas.

Se trata de un circuito magnético muy simple y un rotor igual a los motores trifásicos tipo jaula (cortocircuito), no se utilizan aquí rotores bobinados. En las [Figura 3-8a y b](#) vemos la disposición de estos motores y esquema respectivamente.

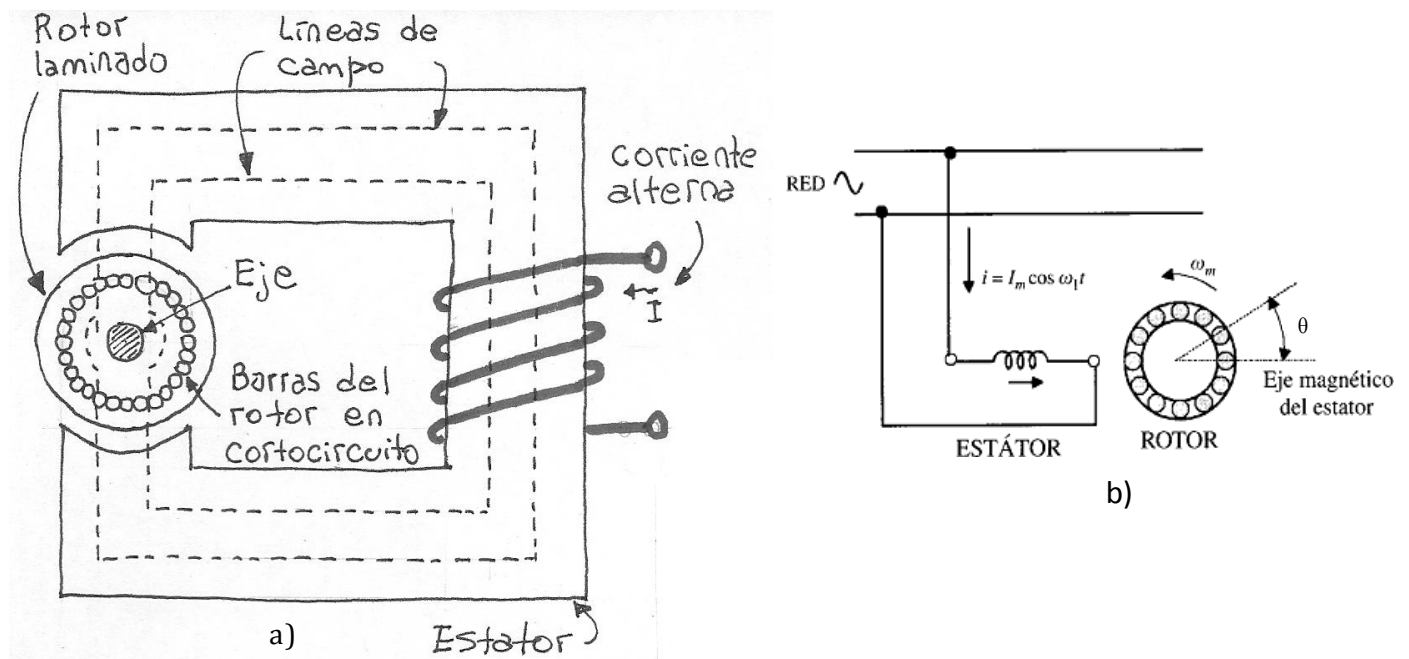


Figura 3-8: a) Disposición y b) esquema de un motor monofásico para potencias pequeñas.

3.4 – 1: Teoría del doble campo giratorio

Si a la bobina de la [Figura 3-8a](#) aplicamos una corriente alterna sinusoidal $i_a(t) = I_m \cdot \cos(\omega t)$, en el circuito magnético se producirá un campo alterno de valor

$$\Phi(t) = \Phi_m \cdot \cos \omega t \quad (3-19)$$

La **dirección** del eje de este flujo será **fija en el espacio**, aunque su magnitud y sentido cambien. La fórmula de Euler nos permite hacer

$$\cos \omega t = \frac{e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}}{2} \quad (3-20)$$

Reemplazando en la ecuación (3-19) nos queda

$$\Phi(t) = \frac{\Phi_m}{2} e^{j\omega t} + \frac{\Phi_m}{2} e^{-j\omega t} \quad (3-21)$$

Es decir, que **el campo alterno de este motor se puede descomponer en la suma de dos campos rotantes, de magnitudes (igual a la mitad de la magnitud original) y velocidades iguales y constantes pero de sentido opuesto de giro**. En la figura se muestra esta descomposición. Si consideramos ahora el valor del campo (o flujo) en un punto que está sobre la periferia del estator a un ángulo θ del eje de Φ , entonces el flujo en este punto será

$$\Phi(\theta) = \Phi_m \cos \theta \quad (3-22)$$

Combinando esta ecuación con la ecuación (3-19) y aplicando algo de igualdades trigonométricas, tenemos que el flujo en función de θ y de t será

$$\Phi(\theta, t) = \frac{\Phi_m}{2} [\cos(\omega t + \theta) + \cos(\omega t - \theta)] \quad (3-23)$$

En realidad esta ecuación se parece en sus variables a la ecuación (2-7), en la que usé F_m en lugar de Φ_m , se trata de la misma variable (campo o flujo) En la [Figura 3-9a](#) vemos los fasores correspondien-

tes a cada uno de los términos de la ecuación (3 – 21) y en la Figura 3-9b vemos el par motor que resulta a la acción de estos dos fasores. Para el campo rotante directo ($e^{j\omega t}$), cuando $S=0$, se corresponde con la velocidad sincrónica $n=n_s$ y no existirá par motor alguno; cuando $S=1$ (o $n=0$), existe un par motor que tenderá a hacer girar el motor hacia la derecha (sentido horario); y para $S=2$ ($n=-n_s$) el par motor tendrá un valor menor al par de arranque. Queda así conformada la curva par motor vs deslizamiento de la Figura 3-9b en donde se señala la curva con **par directo**. Con respecto al faser inverso ($e^{-j\omega t}$) podemos hacer el mismo análisis y así quedará conformada la curva de la Figura 3-9b denotada con “**par inverso**”. Esta curva está reflejada horizontalmente porque los valores del par motor respecto a S son inversos a los del faser directo, también está reflejada verticalmente porque el par motor actúa en sentido contrario (tiende a hacer girar el motor en sentido antihorario).

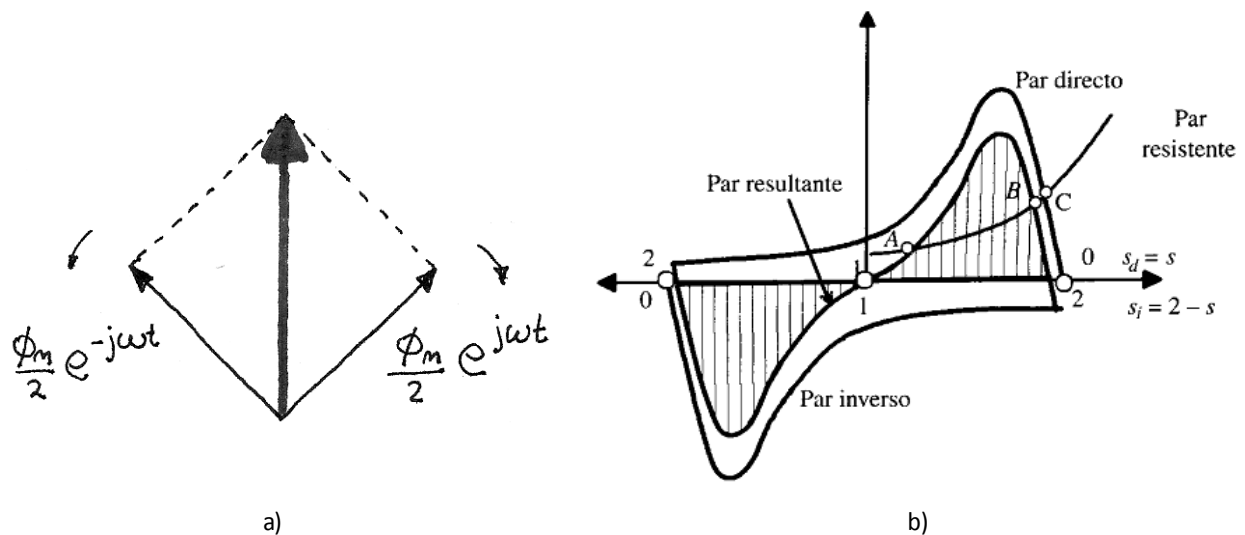


Figura 3-9: a) Doble campo giratorio y b) par motor resultante.

Cuando $S=1$, el par de arranque de los fasores son iguales pero de sentido contrario, esto hace que el rotor se quede en ese estado de equilibrio, por lo tanto **un motor monofásico no puede (si no es ayuda de por medio) girar en ningún sentido**. Si ahora, por acción de una fuerza externa, el rotor gira a una velocidad tal que el deslizamiento provoque situarse en el punto **A**, la acción combinada (sumada) de los pares directo e inverso, dará como resultado el punto **A** justamente que se sitúa sobre lo que se denomina **par resultante**. Observamos de aquí que la velocidad final que obtenemos es inferior a la que resultaría con un motor con idéntica curva (punto **C**), y de ahí que estos motores trabajen con un deslizamiento relativamente elevado.

Por último diremos que **si en un motor trifásico desconectamos una fase, tendremos un funcionamiento análogo al descrito aquí, ya que la máquina trabajaría como un motor monofásico**.

3.4 – 2: Puesta en marcha y funcionamiento

Ya dijimos que el motor monofásico de por sí, no puede generar un par para que gire en ningún sentido, es por esto que debemos colocar un mecanismo auxiliar a fin de sacar al rotor del estado de reposo. Este mecanismo es por lo general otro devanado, llamado devanado auxiliar (el del motor monofásico se llama devanado principal) que es colocado a 90° eléctricos en el espacio, por el que circula una corriente desfasada 90° eléctricos en el tiempo respecto al devanado principal. Esta configuración la vemos en la Figura 3-10a, donde el devanado principal ocupa $2/3$ de las ranuras y tiene gran reactancia y baja resistencia; el devanado auxiliar ocupa el resto de las ranuras del estator y tiene una reactancia y alta resistencia y está en serie con el interruptor centrífugo de la figura. El esquema de este motor bifásico está en la Figura 3-10b, en donde $\Phi_1 = \Phi_p$ es el flujo o campo del devanado principal, $\Phi_2 = \Phi_a$ es el campo del devanado auxiliar, su suma vectorial producirá el campo rotante Φ_T cuya magnitud es variable, el lugar geométrico de este campo es una elipse con diámetros mínimo y máximo que suceden en los ejes del campo del devanado auxiliar y principal respectivamente. Si las corrientes no están desfasadas 90°

eléctricos (combinación usada en el arranque de motores reales), el lugar geométrico del campo resultante sigue siendo una elipse cuyos ejes principales no se corresponden a los ejes de los devanados. Las corrientes del devanado principal y auxiliar están representadas por $i_1=i_p$ e $i_2=i_a$ respectivamente.

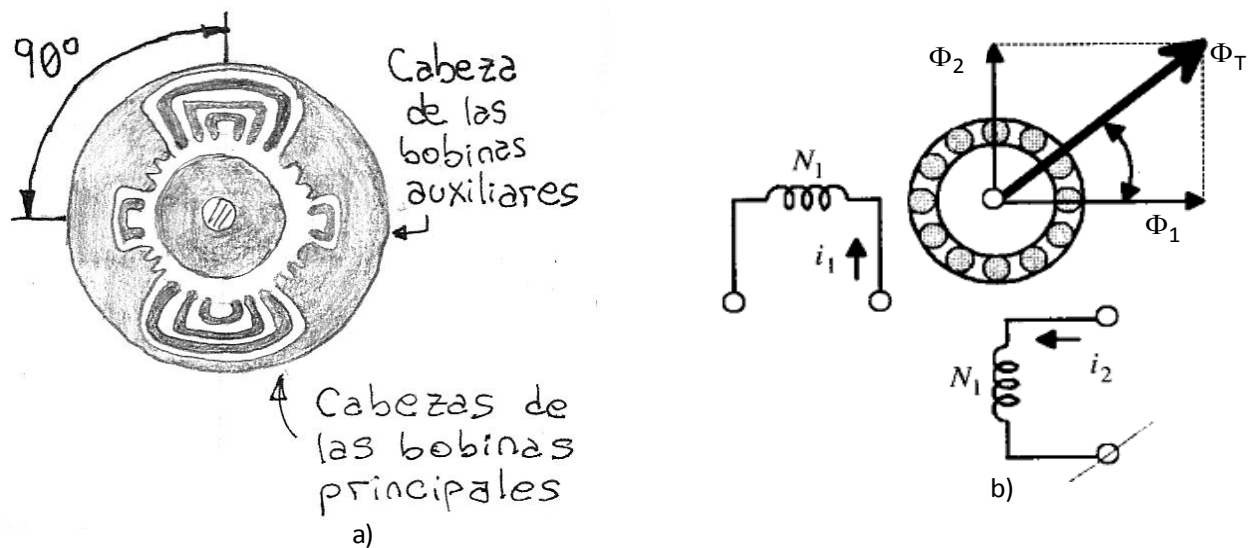


Figura 3-10: a) Esquema básico del motor asíncrono monofásico de dos polos (principal y auxiliar) y b) campos en un motor bifásico.

Diversos son los procedimientos para dar arranque a estos motores, de los cuales veremos solo uno: el motor por arranque por condensador, del cual se desprende un caso particular que es el motor monofásico con bobina de reactancia.

Motor por arranque por condensador

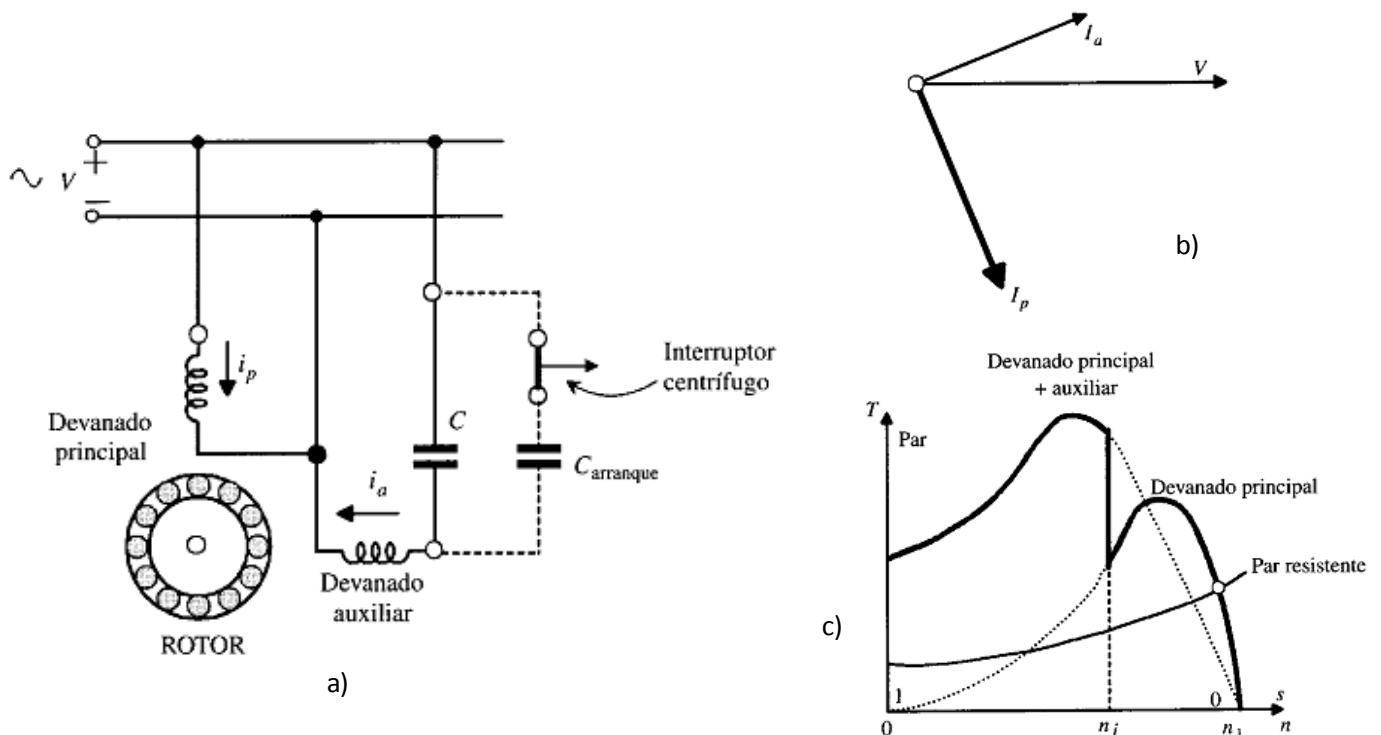


Figura 3-11: a) esquema de un motor monofásico de arranque por condensar, b) su diagrama vectorial y c) su curva par motor vs deslizamiento.

En este caso se utiliza el diagrama de la Figura 3-11a en donde al devanado auxiliar se le conecta un condensador C en serie, con esto conseguimos una desfase de las corrientes muy cercano a los 90° . En la Figura 3-11b vemos el diagrama fasorial, en donde I_a adelanta a la tensión de la red V por su carácter inductivo e I_p atrasa respecto de V debido a su carácter capacitivo. En la Figura 3-11c vemos que la curva

par motor vs deslizamiento es considerablemente mayor que la del motor sin el condensador. Cuando es necesario un par de arranque alto, podemos agrandar el valor del condensador en serie con el devanado auxiliar, conectando un condensador de arranque en paralelo con **C**, el cual se desconectará una vez que el motor alcance una determinada velocidad.

Motor con bobina de reactancia

El desfase de 90° de las corrientes podemos obtenerlo mediante una combinación de bobinas y condensadores. Dicha combinación la podemos sacar de un motor trifásico convencional, dando origen así al otro tipo de arranque: el motor con bobina de reactancia. En la **Figura 3-12** vemos el esquema correspondiente, un devanado se conecta directamente a la red, mientras que los dos restantes se conectan en serie a la red, pero previamente conectamos un condensador en paralelo con estos últimos (devanados); dependiendo con qué bobina está conectado el condensador, el rotor girará en un sentido o en otro tal como lo indica la **Figura 3-12a**.

El motor trifásico en estas condiciones arranca por sí mismo con las mismas características que un motor monofásico normal. Conseguimos con la disposición anterior que los campos de ambos juegos de devanados estén a 90° separados en el espacio, simulando el devanado **W₁W₂** el devanado principal y la unión en serie de los devanados **U₁U₂** con **V₁V₂** el devanado auxiliar, en el que colocamos un condensador en paralelo con una de éstas últimas.

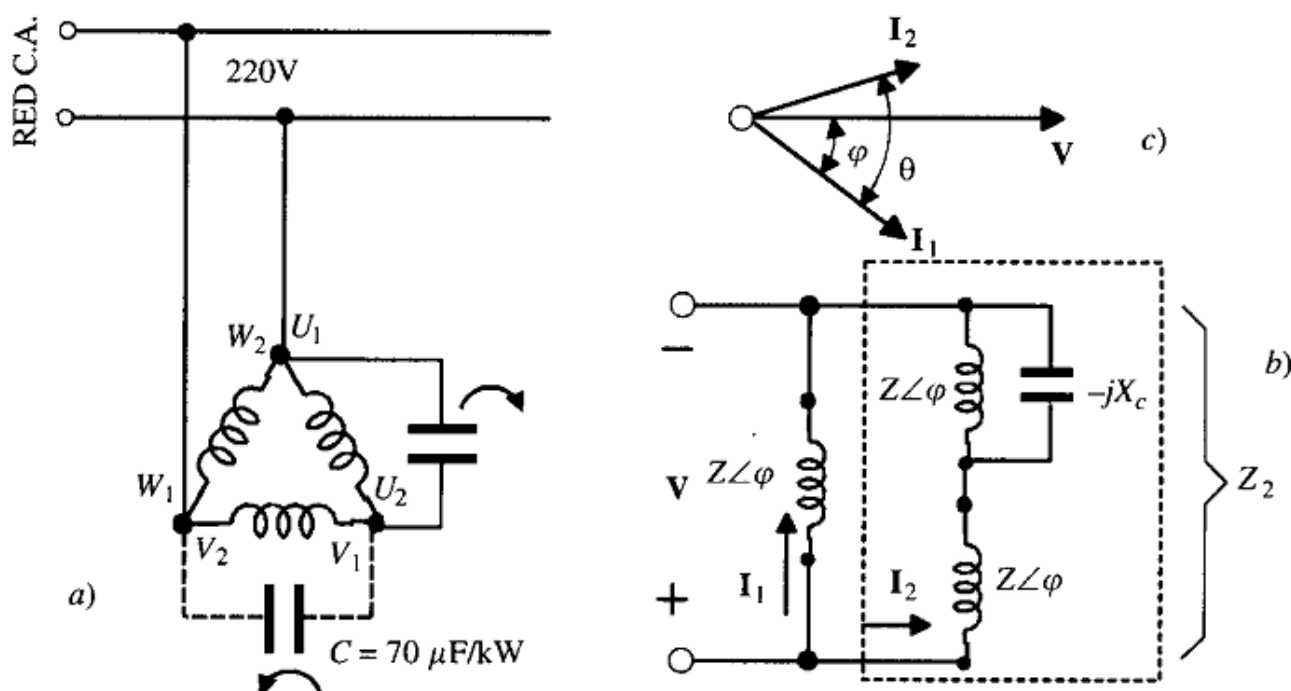


Figura 3-12: Adaptación de un motor trifásico para trabajar como monofásico, **a)** esquema, **b)** circuito equivalente y **c)** diagrama fasorial.