

## Motores asincrónicos

### Principio de funcionamiento

El motor asincrónico trifásico es un mecanismo al cual ingresa energía en forma de un conjunto de corrientes trifásicas, y se convierte en energía mecánica bajo la forma de un movimiento giratorio, de velocidad ligeramente variable con la carga aplicada en su eje.

El estator de un motor trifásico a inducción, es igual al de un alternador; por lo tanto si le aplicamos un sistema trifásico de corriente aparecerá un campo rotante. La velocidad de este campo es constante y función de la frecuencia, y para un número cualquiera de polos del bobinado estatórico; valdrá:

$$N_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad p: \text{Pares de polos estatoricos}$$

Supongamos ahora que en el espacio afectado por el campo rotante, colocamos un conductor rectangular cerrado eléctricamente en corto circuito, y vinculado mecánicamente a un eje coincidente con el eje del estator.

En la figura A vemos este sistema, donde el campo rotante se ha representado por medio de dos polos exteriores que giran produciendo el flujo magnético  $\Phi$ . En el espacio abarcado por esta espira el flujo estará variando a causa del campo giratorio, induciendo una fem, y produciendo una corriente. Se trata entonces de una espira en corto circuito afectada por un flujo variable, en la que se induce una fem, y a causa de esta, una corriente debido a que es un circuito cerrado, esto a su vez produce un par de fuerzas en la espira que configuran una cupla, que procura que la espira acompañe al campo.

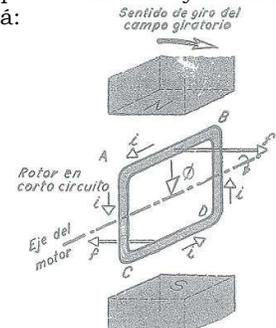


Figura - A

Veamos ahora la figura B, dentro del campo rotante tenemos un sistema compuesto por una espira abierta, cuyos dos terminales se conectan a dos anillos rozantes, los que a su vez son continuamente frotados por dos escobillas, las que llevan conexiones a una resistencia exterior regulable. Por medio de la resistencia exterior es posible regular la corriente en la espira sin impedir que gire. En definitiva, este sistema es igual al del anterior ejemplo, con la diferencia de que permite regular en marcha las características del órgano rotante, y por consiguiente, las características de marcha del motor. Este esquema elemental nos sirve para comprender el motor asincrónico con rotor bobinado o con anillos.

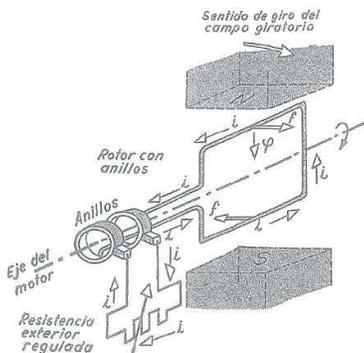


Figura - B

Es posible verificar que si el rotor llegase a girar con la misma velocidad del campo rotante, esa decir, si el rotor alcanzase la velocidad sincrónica, no habría variación de flujo en la espira, no habría fem, no habría corriente, no habría cupla, y el motor trataría de disminuir su velocidad. Pero al hacerlo, se produciría una variación de flujo y cupla, que lo haría girar. Por lo tanto, la base de la existencia de la cupla motora es la diferencia de velocidad entre el campo rotante y el rotor. A esa diferencia se la llama resbalamiento, y porcentualmente se expresa por:

$$s = \frac{N_s - N}{N_s} 100$$

La velocidad del motor se ha señalado con la letra N. Entonces la esencia de la cupla es la condición:  $N_s > N$  razón por la cual son llamados asincrónicos.

Llamando velocidad relativa a la diferencia tenemos:  $N_R = N_s - N = s \cdot N_s$

El resbalamiento puede tomar diversos valores, en los motores a rotor en corto circuito vale desde 1% hasta 15%, y en los de rotor bobinado es variable pudiendo llegar al 50%.

Para un mejor aprovechamiento del espacio, en los rotores se colocan varias espiras en corto circuito, y cada una de ellas contribuye con su cupla. Por lo tanto, la parte activa de un rotor en corto circuito presenta el aspecto de la figura C. De igual manera, el motor con rotor bobinado no tiene una sola espira, sino que por lo regular tiene un bobinado trifásico análogo a como se ilustra en la figura D. dicho bobinado se conecta en estrella en el mismo rotor, y los terminales  $u, v, w$ , se conectan a los anillos rozantes.

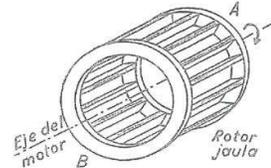


Figura - C

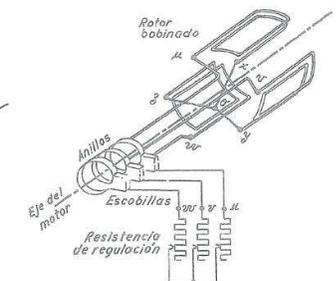


Figura - D

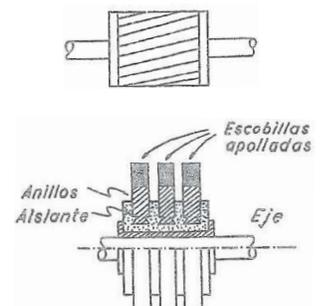
### Principales Aspectos Constructivos

El circuito magnético de estas máquinas está constituido por el estator, el rotor y el entrehierro. El estator está construido con los criterios clásicos en estatores; no obstante, en los motores asincrónicos se cuida mucho que el entrehierro sea lo más reducido posible. El número de ranuras del estator no es el mismo que en el rotor; esto se hace así para disminuir al máximo las vibraciones y cuplas parasitas.

Además, las ranuras del rotor no siguen la línea paralela al eje, sino que están ligeramente inclinadas para mejorar la estabilidad de la marcha.

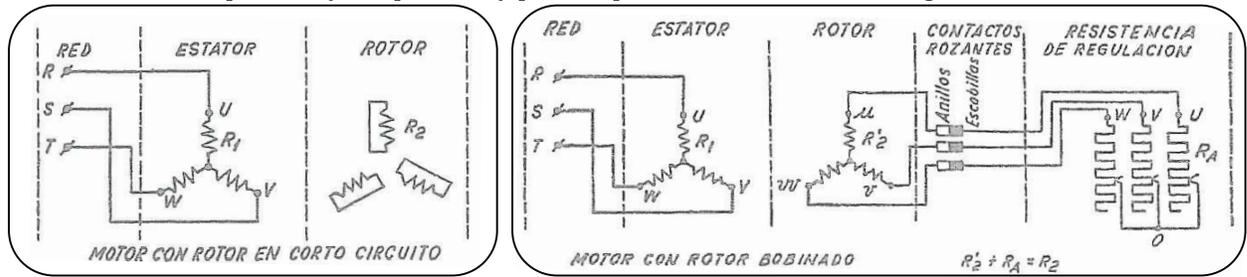
En cuanto a los rotores, el tipo bobinado se ejecuta con chapa de hierro al silicio por lo regular la misma usada para el estator. En los rotores en corto circuito, o también llamados jaula, existe un paquete magnético con ranuras donde se colocan las barras de cobre, las que se sueldan a los anillos frontales. En los motores pequeños de gran serie constructiva, la jaula se hace de aluminio fundido en forma tal que los extremos constituyan también las aletas de ventiladores.

El conjunto se arma con dos tapas laterales, una de ellas más amplias para dar cabida a los anillos rozantes. Los anillos se fabrican de diversos modos, uno de ellos se aprecia en la siguiente figura.

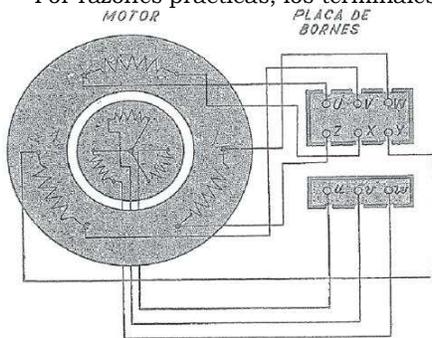


## Conexiones

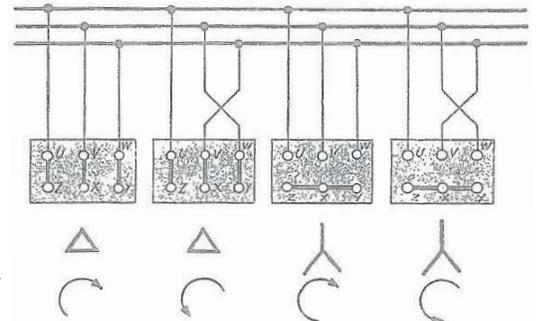
En la siguiente figura vemos el esquema de conexiones de un motor asincrónico con rotor en corto circuito, en este el estator está conectado en estrella; y el rotor, siendo en sí mismo una jaula con un número de barras, no puede representarse con rigurosidad como un determinado circuito eléctrico; no obstante es costumbre dibujarlo como si se tratase de tres fases conectadas cada una en corto circuito. De igual manera el motor con rotor bobinado, no requiere mayor explicación y puede representarse también de la siguiente forma.



Por razones prácticas, los terminales de los bobinados se agrupan en un lugar común denominada placa de bornes o de terminales. En esta, las letras de los finales de fase X Y Z, no están alineadas con las de principio de fase UVW. Esto se hace para lograr una fácil conexión en triángulo uniendo los terminales que se enfrentan.



Si se cruzan dos conexiones en la alimentación se cambia la secuencia de la terna de alimentación, y con ello el sentido de giro del campo rotante, logrando que le rotor gire en el otro sentido.



Un detalle muy importante es que si un motor ha sido construido para trabajar con una tensión de fase de 220V, se lo podrá conectar:

- Triángulo a red de 3 X 220
- Estrella a red de 3 X 380

Su placa característica indicara 220/380

## Circuito equivalente y diagrama vectorial

Cada fase del motor asincrónico puede tratarse como un transformador, donde el estator es el primario y el rotor el secundario. Pero la principal diferencia con el transformador es que el primario está en movimiento relativo respecto al secundario. Esta circunstancia se puede tener en cuenta con facilidad, introduciendo el resbalamiento en todos los razonamientos.

$$s = \frac{N_s - N}{N_s} 100$$

$$N_R = N_s - N = N_s \cdot s$$

Donde:

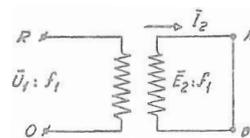
$N_s$ : Velocidad sincrónica o del campo rotante

$N_R$ : Velocidad relativa

$N$ : Velocidad del rotor

$s$ : Resbalamiento

**Rotor bloqueado ( $N = 0$ )**



$$f_2 = f_1 = \frac{N_s \cdot p}{60}$$

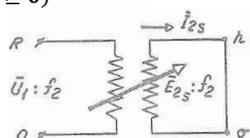
En cada fase del rotor (secundario) se induce una fem:

$$E_2 = -2,22 \cdot k_r \cdot k_d \cdot Z_f \cdot f_1 \cdot \Phi$$

Donde los factores son iguales a la de los alternadores. El campo es el campo rotante del estator (primario). Para este estado de funcionamiento cada fase del bobinado rotorico, presenta una reactancia de dispersión, que vale:

$$X_2 = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot L_2$$

**Rotor en marcha ( $N_s \geq N \geq 0$ )**



$$f_2 = \frac{N_R \cdot p}{60} = \frac{(s \cdot N_s) \cdot p}{60}$$

$$f_2 = f_1 \cdot s$$

La fem que se inducirá será:

$$E_{2s} = -2,22 \cdot k_r \cdot k_d \cdot Z_f \cdot (s \cdot f_1) \cdot \Phi \Rightarrow E_{2s} = s \cdot E_2$$

La reactancia de dispersión en cada fase del rotor será:

$$X_{2s} = 2 \cdot \pi \cdot (s \cdot f_1) \cdot L_2 \Rightarrow X_{2s} = s \cdot X_2$$

Tenemos así la fem y la reactancia de dispersión en cada fase del secundario para cualquier valor de resbalamiento  $s$

La impedancia de cada fase del rotor será:

$$Z_{2s} = R_2 + jX_{2s} = R_2 + j s X_2$$

La corriente que circulara por una fase del motor en marcha es:

$$I_{2s} = \frac{E_{2s}}{Z_{2s}} = \frac{s \cdot E_2}{s \cdot \left( \frac{R_2}{s} + jX_2 \right)} = \frac{E_2}{\frac{R_2}{s} + jX_2}$$

Sumando y restando  $R_2$  se tiene:

$$I_{2s} = \frac{E_{2s}}{Z_{2s}} = \frac{E_2}{(R_2 + jX_2) + \left( \frac{R_2}{s} - R_2 \right)}$$

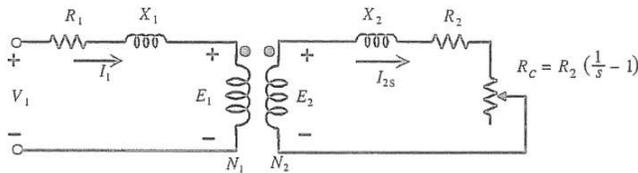
Obsérvese que el rotor se comporta como si estuviese conectada una cierta resistencia ficticia

$$R_c = \frac{R_2}{s} - R_2 = R_2 \left( \frac{1-s}{s} \right)$$

Entonces:

$$I_{2s} = \frac{E_2}{Z_2 + R_c}$$

En la figura tenemos el circuito según estas conclusiones.



La potencia que desarrolla la resistencia ficticia  $R_c$ , es la que el motor desarrolla en el eje en forma mecánica, para una fase, y que se invierte en potencia útil más pérdidas mecánicas, o sea:

$$P_m = 3 \cdot R_2 \frac{1-s}{s} \cdot I_{2s}^2 = P + p_{mec}$$

Donde:

$P_m$ : Potencia que el motor desarrolla

$P$ : Potencia útil

$p_{mec}$ : Pérdidas mecánicas

El circuito anterior obtenido no reúne todavía las ventajas analíticas de un circuito eléctrico ya que existen acoplamientos magnéticos. Al igual que se hacía en los transformadores es necesario reducir el primario al secundario, en nuestro caso del rotor al estator.

En la situación del motor, el proceso es más complicado, debido a la influencia de los factores de devanado ( $k_r, k_d$ ) ya que en general los números de fases de estator ( $m$ ) y rotor no coinciden. Como consecuencia de esto los nuevos parámetros del secundario referido al primario serán:

Relación de transformación de tensiones  $k_v = \frac{E_1}{E_2} \Rightarrow E_{2e} = k_v \cdot E_2$

Relación de transformación de corrientes  $k_i = \frac{m_1}{m_2} \cdot k_v \Rightarrow I_{2e} = -\frac{I_2}{k_i}$

Relación de transformación de impedancias  $k_\Omega = k_v \cdot k_i \Rightarrow R_{2e} = k_\Omega \cdot R_2$

El esquema correspondiente se muestra en la siguiente figura, en este se ha dibujado la rama paralelo por la que se deriva la corriente de vacío del motor al igual que lo que ocurre en un transformador.

Entonces:

$$I_1 = I_0 + I_{2e}$$

$$I_0 = \frac{-E_1}{R_0 + jX_0} = -E_1(G_0 - jB_0)$$

Donde:

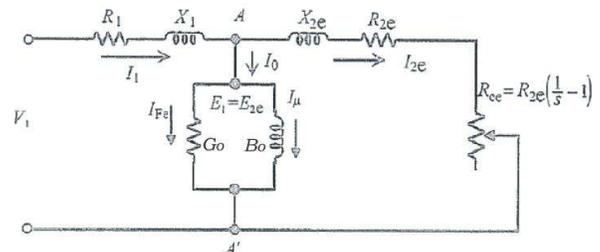
$(R_0 + jX_0)$ : impedancia de excitación

$(G_0 - jB_0)$ : admitancia de excitación

Entonces las expresiones serán:

$$V_1 = E_1 + I_1(R_1 + jX_1)$$

$$V_1 = I_1 \left[ R_1 + jX_1 + \frac{1}{G_0 - jB_0 + \frac{1}{(R_{2e} + jX_{2e}) + R_{2e} \left( \frac{1-s}{s} \right)}} \right]$$

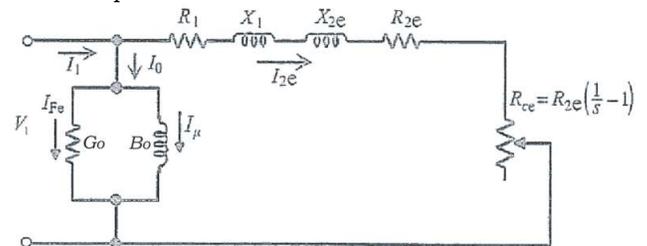
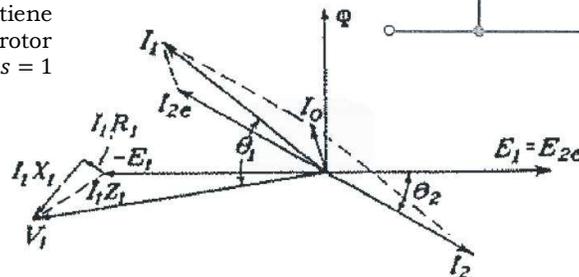


La siguiente figura es el circuito equivalente aproximado. Los errores que ahora se cometen con esta

aproximación son superiores a los que resultaban del 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. Con este circuito se obtienen corrientes en el rotor que son apreciablemente más altas que los valores reales. De todos modos es aceptable para motores de más de 10 kw.

La relación  $k$  se obtiene mediante ensayos a rotor bloqueado, donde  $s = 1$  entonces  $k = E_1/E_2$

Su diagrama vectorial es:



**Potencia y Cupla del Motor Asíncrono**

• **Potencia**

La potencia por fase suministrada al motor desde la línea es:  $P_1 = V_1 I_1 \cdot \cos \theta_1$

Una parte de esta potencia, que asciende a  $I_{2e}^2 (R_1 + R_{2e})$  vatios por fase, se consume como pérdidas óhmicas en los devanados primario y secundario, mientras la restante se convierte en potencia mecánica; pero no toda la potencia mecánica desarrollada de esta forma resulta útil en el eje, ya que existen otras pérdidas debidas a: resistencias pasivas, histéresis y corrientes parasitas en el núcleo. Las pérdidas por histéresis y Foucault son tenidas en cuenta mediante la admitancia de excitación  $Y_0$ , y que según el diagrama vectorial se elevan a  $V_1 I_0 \cdot \cos \theta_0$  vatios por fase. Por lo tanto, la potencia mecánica neta de salida por fase es:

$$P_{mec} = P_1 - P_{perd}$$

$$P_{mec} = P_1 - (P_{cu} + P_{fe})$$

$$P_{mec} = V_1 I_1 \cdot \cos \theta_1 - I_{2e}^2 (R_1 + R_{2e}) - V_1 I_0 \cdot \cos \theta_0$$

En el diagrama se observa que:  $I_1 \cdot \cos \theta_1 = I_0 \cdot \cos \theta_0 + I_{2e} \cdot \cos \theta_2$

Remplazando, se tiene:

$$P_{mec} = V_1 (I_0 \cdot \cos \theta_0 + I_{2e} \cdot \cos \theta_2) - I_{2e}^2 (R_1 + R_{2e}) - V_1 I_0 \cdot \cos \theta_0$$

$$P_{mec} = V_1 I_{2e} \cdot \cos \theta_2 - I_{2e}^2 (R_1 + R_{2e})$$

Según el circuito se deduce que:

$$I_{2e} = \frac{V_1}{Z_e} = \frac{V_1}{\sqrt{(R_1 + R_{2e} + R_{2e} \frac{1-s}{s})^2 + (X_1 + X_{2e})^2}}$$

$$\cos \theta_2 = \frac{R_1 + R_{2e} + R_{2e} \frac{1-s}{s}}{Z_e}$$

$$P_{mec} = V_1 \frac{V_1}{Z_e} \cdot \frac{R_1 + R_{2e} + R_{2e} \frac{1-s}{s}}{Z_e} - \frac{V_1^2}{Z_e^2} (R_1 + R_{2e})$$

$$P_{mec} = \frac{V_1^2}{Z_e^2} \cdot \left( R_1 + R_{2e} + R_{2e} \frac{1-s}{s} \right) - \frac{V_1^2}{Z_e^2} (R_1 + R_{2e})$$

$$P_{mec} = \frac{V_1^2}{Z_e^2} \cdot \left[ R_1 + R_{2e} + R_{2e} \frac{1-s}{s} - R_1 - R_{2e} \right]$$

$$P_{mec} = \frac{V_1^2}{Z_e^2} \cdot \left[ R_{2e} \frac{1-s}{s} \right]$$

Como  $I_{2e}^2 = \frac{V_1^2}{Z_e^2}$

Entonces:

$$P_{mec} = I_{2e}^2 \cdot R_{2e} \frac{(1-s)}{s}$$

Significa que la potencia mecánica desarrollada por fase puede considerarse como las pérdidas óhmicas en una resistencia ficticia del secundario de  $R_{2e} \cdot (1-s)/s$  ohmios por fase.

Reemplazando:  $I_{2e}^2 = \frac{V_1^2}{Z_e^2} = \frac{V_1^2}{(R_1 + R_{2e}/s)^2 + (X_1 + X_{2e})^2}$

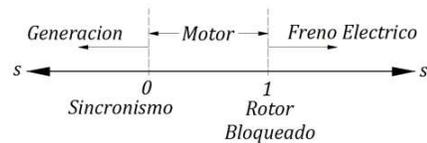
$$P_{mec} = \frac{V_1^2 \cdot R_{2e}}{(R_1 + R_{2e}/s)^2 + (X_1 + X_{2e})^2} \frac{(1-s)}{s}$$

Si multiplicamos por  $s$  al numerador y denominador, se tiene:  $P_{mec} = \frac{V_1^2 \cdot R_{2e} \cdot s \cdot (1-s)}{(s \cdot R_1 + R_{2e})^2 + s^2 (X_1 + X_{2e})^2}$

Expresión que demuestra que cuando  $s = 0$  (sincronismo) y también cuando  $s = 1$  (reposo), la  $P_{mec} = 0$ . Además, el signo de  $P_{mec}$  depende de la magnitud y signo de  $s$ , de acuerdo con la siguiente tabulación:

Valor de $s$	Signo de $P_{mec}$
$s = 0$	$P_{mec} = 0$ (Sincronismo)
$0 < s < 1$	Positivo
$s < 0$	Negativo
$s > 1$	Negativo
$s = 1$	$P_{mec} = 0$ (Reposo)

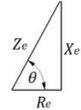
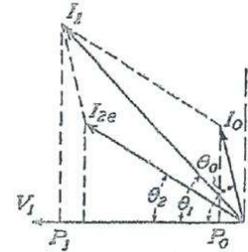
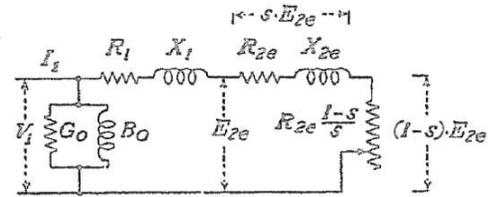
$$s = \frac{N_s - N}{N_s}$$



Cuando el deslizamiento se encuentra entre cero y la unidad, la velocidad del motor está entre reposo y sincronismo, el sentido de la rotación es el mismo que el del campo magnético giratorio. Por tanto el signo positivo de  $P_{mec}$  indica *acción motriz*.

Cuando el deslizamiento es menor que cero, es decir, es negativo, el rotor está siendo impulsado hacia adelante en el mismo sentido que el campo giratorio y la velocidad real es mayor que la velocidad de sincronismo. Por tanto, se ha invertido el sentido relativo de rotación entre el rotor y el campo magnético, por lo que las fem y las corrientes del rotor están, asimismo, invertidas, lo que indica que la maquina ha variado de acción motriz a acción generatriz. El signo negativo de  $P_{mec}$  esta de acuerdo con esta inversión de la función.

Cuando  $s$  es mayor que la unidad, el rotor está siendo impulsado hacia atrás dentro del campo magnético giratorio hacia adelante. La fem del rotor continuando teniendo el mismo sentido que en reposo (o que a cualquier velocidad entre sincronismo y reposo), pero se hace mayor en magnitud a causa de la gran velocidad relativa con que corta las líneas de inducción. La maquina se ha convertido en un freno eléctrico, de lo que proviene el signo negativo de  $P_{mec}$ .



• Cupla

La cupla o torque es el cociente entre la potencia y la velocidad angular

$$c = \frac{m \cdot P_{mec}}{w}$$

Siendo  $m$  el número de fases, y  $w$  la velocidad angular:

$$\bullet w = \frac{2\pi \cdot N}{60} \left[ \frac{rad}{sg} \right]$$

Entonces:

$$c = \frac{m \cdot P_{mec}}{2\pi \cdot N} = \frac{60 \cdot m \cdot P_{mec}}{2\pi \cdot N}$$

Remplazando  $\bullet s = \frac{N_s - N}{N_s} \Rightarrow N = N_s(1 - s)$

$$c = \frac{60 \cdot m \cdot P_{mec}}{2\pi \cdot N_s(1 - s)}$$

Llamando  $\bullet k = \frac{60 \cdot m}{2\pi \cdot N_s}$

Obtenemos:

$$c = \frac{k \cdot P_{mec}}{(1 - s)}$$

Siendo

$$\bullet P_{mec} = I_{2e}^2 \cdot \frac{(1-s)}{s} R_{2e}$$

Entonces

$$c = \frac{k \cdot I_{2e}^2 (1-s)}{(1-s)s} R_{2e} \Rightarrow \boxed{c = k \cdot I_{2e}^2 \frac{R_{2e}}{s}}$$

Esta ecuación establece que el producto del par motor por el deslizamiento es proporcional a las pérdidas totales en el cobre del secundario.

El máximo par que el motor puede desarrollar se establece mediante la derivada  $dc/ds = 0$ , que nos conduce al valor del deslizamiento  $s$  para cupla máxima:

$$s_{max} = \pm \frac{R_{2e}}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_{2e})^2}}$$

Por el teorema de la máxima transferencia de potencia.

El signo positivo corresponde a la acción motriz y el negativo a la acción generatriz  $\boxed{s = \frac{N_s - N}{N_s}}$

$$c = k \cdot I_{2e}^2 \frac{R_{2e}}{s}$$

Remplazando en la expresión de la cupla

$$\bullet I_{2e} = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + \frac{R_{2e}}{s})^2 + (X_1 + X_{2e})^2}}$$

$$c = k \cdot \frac{U_1^2}{(R_1 + \frac{R_{2e}}{s})^2 + (X_1 + X_{2e})^2} \cdot \frac{R_{2e}}{s}$$

Siendo:

$$\bullet s_{max} = \frac{R_{2e}}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_{2e})^2}}$$

Entonces:

$$c = k \cdot \frac{U_1^2 \cdot \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_{2e})^2}}{(R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_{2e})^2})^2 + (X_1 + X_{2e})^2}$$

Desarrollando el cuadrado del denominador

$$c = k \cdot \frac{U_1^2 \cdot \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_{2e})^2}}{R_1^2 + 2 \cdot R_1 \cdot \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_{2e})^2} + [R_1^2 + (X_1 + X_{2e})^2] + (X_1 + X_{2e})^2}$$

Llamando  $X$  a  $(X_1 + X_{2e})$ , y  $R$  a  $R_1$

$$c = k \cdot \frac{U_1^2 \cdot \sqrt{R^2 + X^2}}{R^2 + 2 \cdot R \cdot \sqrt{R^2 + X^2} + (R^2 + X^2) + X^2}$$

$$c = k \cdot \frac{U_1^2 \cdot \sqrt{R^2 + X^2}}{2 \cdot R \cdot \sqrt{R^2 + X^2} + 2R^2 + 2X^2} = \frac{U_1^2 \cdot \sqrt{R^2 + X^2}}{2 \cdot R \cdot \sqrt{R^2 + X^2} + 2[R^2 + X^2]} = \frac{U_1^2 \cdot \sqrt{R^2 + X^2}}{2 \cdot R \cdot \sqrt{R^2 + X^2} + 2[\sqrt{R^2 + X^2}]^2} = \frac{U_1^2}{2 \cdot R + 2\sqrt{R^2 + X^2}}$$

Entonces:

$$c_{max} = k \cdot \frac{U_1^2}{2 \cdot [R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_{2e})^2}]}$$

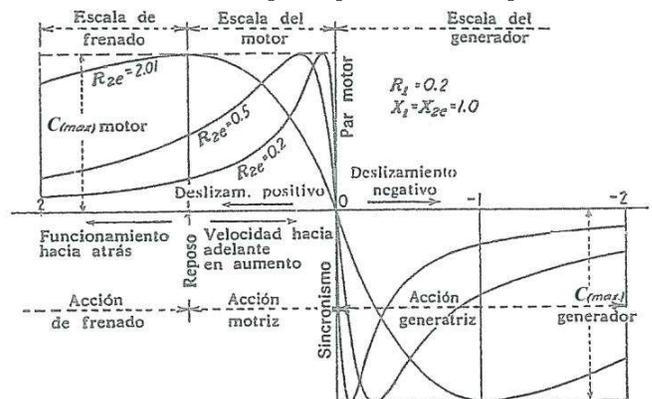
Observamos que la cupla máxima no depende de  $R_{2e}$  pero si de el lugar "s" donde esta se produce. La cupla máxima caracteriza la carga que obligara a detener el motor. Cuando se desee que el par máximo se produzca al arrancar, la ecuación será:

$$s_{max} = \frac{R_{2e}}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_{2e})^2}} = 1$$

Expresión que muestra que la resistencia del rotor tendrá que ser igual a  $R_{2e} = \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_{2e})^2}$ . Como en general, la resistencia del primario  $R_1$  es suficientemente pequeña en comparación con la reactancia, la expresión queda  $R_{2e} \approx X_1 + X_{2e}$ .

En el siguiente diagrama cupla deslizamiento, se han representado diferentes curvas según el valor de la resistencia del rotor  $R_{2e}$ .

Se observa que el par máximo no se altera por la variación de la resistencia, pero si los valores de  $s$  en las cuplas máximas.

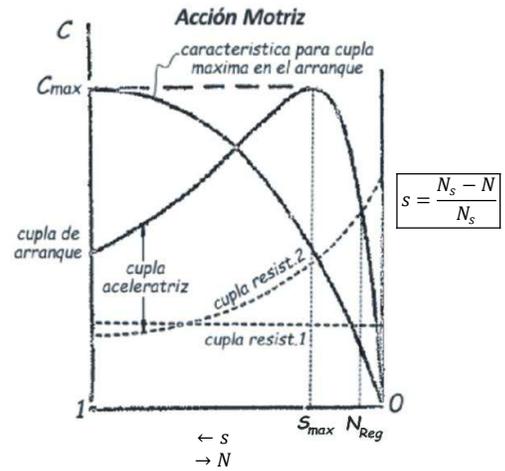


La cupla resistente es el par resistente ofrecido por la carga. Esta puede ser:

*Cupla resistente constante, independiente de la velocidad*, la curva par-velocidad de estos mecanismos está representada por una recta horizontal. Este tipo de par resistente lo poseen las grúas, ascensores, montacargas, y otros tipos de mecanismos en los que el par resistente principal sea el de rozamiento.

*Cupla resistente creciente con la velocidad*, generalmente son mecanismos en los que el par resistente es función del cuadrado de la velocidad y por ello presentan una curva de tipo parabólico. Este tipo de par se presenta en las bombas centrifugas, ventiladores, hélices, etc.; es decir, en el movimiento de fluidos.

La cupla aceleratriz obtenida de la diferencia entre la cupla motora y resistente  $c_{ace.} = C - c_{res.}$ , hace que el rotor se acelere hasta que ambas cuplas sean iguales, en este momento, la maquina habrá adquirido su velocidad de régimen  $N_{Reg}$  (equilibrio dinámico).



**Ensayos del motor asíncrono**

• **Ensayo de vacío o de rotor libre**

Consiste en hacer funcionar sin ninguna carga mecánica en el eje, es decir, la maquina trabaja a rotor libre. Se debe aplicar la tensión asignada al primario  $V_{1n}$ , midiendo la potencia absorbida  $P_o$  y la corriente de vacío  $I_o$ . 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, que la resistencia de carga  $R_{ce}$  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  $I_{2e}$  es de pequeño valor debido a la alta impedancia de  $R_{ce}$ , se podrán despreciar 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:

$$P_o = P_{Fe} + P_m + P_{cu1}$$

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 (con un puente de Weahstone) la resistencia  $R_1$  de cada una de las fases del estator. Para determinar  $P_{Fe}$  y  $P_m$  es preciso alimentar el motor por una tensión variable, comensando con el valor nominal 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  $P_o$ ,  $I_o$  y  $V_1$ , y a partir de ellos se deducen las pérdidas  $P_{Fe} + P_m$  en cada etapa, de acuerdo con la ecuación:

$$P_{Fe} + P_m = P_o - P_{cu1} = P_o - m R_1 I_o^2$$

Al representar  $P_m + P_{Fe}$  en función de  $V_1$  se obtiene una curva de tipo parabólico, como se indica en la figura A.

Extrapolando esta curva, hasta que corte el eje de ordenadas, se obtiene para  $V_1 = 0$ , el valor de las pérdidas mecánicas  $P_m$ , ya que entonces las pérdidas en el hierro son nulas al no existir flujo. El valor de las pérdidas en el hierro a la tensión asignada vendrá dado por la ordenada existente entre la curva  $P_m + P_{Fe}$  y la horizontal  $P_m$  a esa tensión, como muestra la figura anterior. Para reducir errores en la extrapolación de la curva parabólica de la figura A, es mas practico representar  $P_m + P_{Fe}$  en función del cuadrado de la tensión  $V_1$ , tal como se muestra en la figura B. En este caso la curva se transforma en una línea recta, cuya ordenada en el origen representa la pérdida mecánica del motor  $P_m$ .

Conocidas las pérdidas  $P_{Fe}$  (separada de  $P_m$ ) se podrá calcular la rama paralelo del circuito equivalente (brazo de excitación).

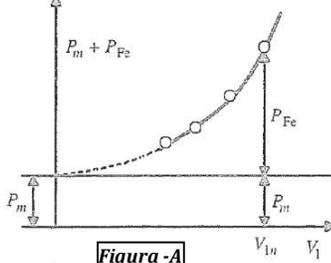
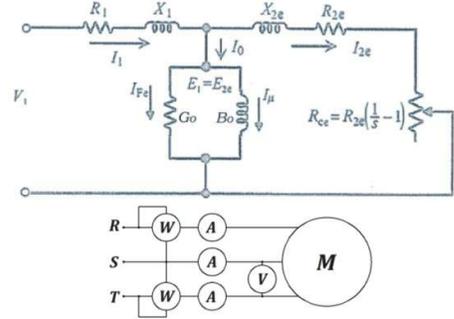


Figura-A

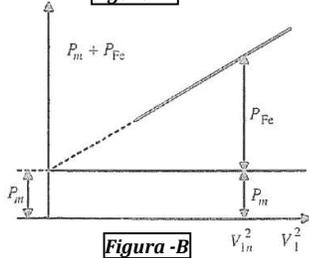


Figura-B

$$\cos \varphi_o = \frac{P_{Fe}}{m V_{1n} I_o}; \quad I_{Fe} = I_o \cos \varphi_o; \quad I_{\mu} = I_o \sin \varphi_o$$

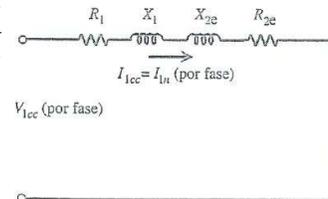
De donde se deduce:  $G_o = \frac{I_{Fe}}{V_{1n}}; \quad B_o = \frac{I_{\mu}}{V_{1n}}$

Entonces la potencia de entrada cuando el motor funciona sin carga se consume en la alimentación de las siguientes pérdidas:

- ✓ Pérdidas en el cobre del devanado del estator  $R_1 I_o^2$
- ✓ Pérdidas en el núcleo en el hierro del estator
- ✓ Pérdidas en el núcleo del rotor, consistentes casi totalmente en la histéresis, ya que el deslizamiento es tan pequeño que las corrientes parasitas son despreciables
- ✓ Pérdidas por altas frecuencias en los dientes del estator y del rotor
- ✓ Pérdidas mecánicas

• **Ensayo de cortocircuito o rotor bloqueado**

Este se realiza bloqueando el rotor impidiéndole que gire, es decir,  $N = 0$ , por lo que se tendrá:  $s = 1$ ,  $R_{ce} = 0$ , lo que indica que el motor se comporta como un transformador con el secundario en cortocircuito. Al estator se 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  $I_o$  es entonces despreciable frente a  $I_{1n}$  debido a la pequeña tensión necesaria, resultando el circuito equivalente de la figura, que se obtiene al despreciar la rama paralelo. Las conexiones son las mismas que en el ensayo en vacío. De las medidas efectuadas puede obtenerse el factor de potencia en cortocircuito:



$$\cos \varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{m V_{1cc} I_{1n}}$$

Y de aquí resultan los valores:

$$R_{cc} = R_1 + R_{2e} = \frac{V_{1cc}}{I_{1n}} \cos \varphi_{cc}; \quad X_{cc} = X_1 + X_{2e} = \frac{V_{1cc}}{I_{1n}} \sin \varphi_{cc}$$

En consecuencia, el ensayo de cortocircuito permite obtener los parámetros de la rama serie del motor. Como  $R_1$  se ha determinado mediante el Puente de Weahstone, la primera ecuación ( $R_{cc}$ ) permitirá calcular  $R_{2e}$ . Si se desea utilizar en el estudio del motor el circuito equivalente exacto, habrá que repartir la cantidad  $X_{cc}$  entre  $X_1$  y  $X_{2e}$ . A falta de información se eliga  $X_1 = X_{2e}$

Balance de potencias

La potencia que la maquina 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:

$$P_1 = m_1 V_1 I_1 \cos \varphi_1$$

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

$$P_{cu1} = m_1 R_1 I_1^2$$

Y la otra parte se pierde en el hierro:  $P_{Fe1}$ . La suma de ambas pérdidas representa la disipación total en el estator  $P_{p1}$ :

$$P_{p1} = P_{cu1} + P_{Fe1}$$

Como las frecuencias de las corrientes en el rotor son muy reducidas, debido a que los deslizamientos en la maquina suelen ser pequeños

(Por ejemplo, para  $s = 5\%$  con  $f_1 = 50Hz$ , resulta una  $f_2 = f_1 \cdot s = 2,5Hz \ll f_1$ ), 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, se podrá escribir:

$$P_{Fe} = P_{Fe1} = m_1 E_1 I_{Fe} \approx m_1 V_1 I_{Fe}$$

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

$$P_a = P_1 - P_{p1} = P_1 - P_{cu1} - P_{Fe}$$

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

$$P_{cu2} = m_2 R_2 I_2^2 = m_1 R_{2e} I_2^2$$

La potencia que llegara al eje de la maquina, denominada potencia mecánica interna,  $P_{mi}$ , será:

$$P_{mi} = P_a - P_{cu2}$$

Que teniendo en cuenta el significado de la resistencia de carga  $R_{ce}$  del circuito equivalente, se podrá poner:

$$P_{mi} = m_1 R_{2e} \left( \frac{1}{s} - 1 \right) I_2^2$$

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, resultara:

$$P_u = P_{mi} - P_m$$

El rendimiento del motor vendrá expresado por el cociente:

$$\eta = \frac{P_u}{P_1} = \frac{P_u}{P_u + P_m + P_{cu2} + P_{Fe} + P_{cu1}}$$

