MOTOR ASÍNCRONO TRIFÁSICO

1.- INTRODUCCIÓN

En esta práctica se estudiará el motor asíncrono trifásico. Es este el motor que más ampliamente se utiliza en entornos industriales (máquinas-herramientas, grúas, ascensores, compresores, ventiladores, etc.) debido a su robustez, escaso mantenimiento, precio y tipo de alimentación (red trifásica disponible a través de la red de suministro de energía eléctrica)

2.- OBJETIVOS

- Que el alumno conozca el principio de funcionamiento de los motores asíncronos trifásicos.
- Que el alumno conozca el circuito equivalente del motor asíncrono trifásico, así como su curva par-velocidad y las expresiones que definen a dicha curva.
- Que el alumno sepa realizar los ensayos a rotor parado y a rotor libre de un motor asíncrono trifásico.
- Que el alumno conozca las diferentes técnicas de arranque y de inversión de giro mediante la utilización de automatismos.

3.- FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Los motores asíncronos son máquinas rotativas de flujo variable y sin colector. El campo inductor está generado por corriente alterna. Generalmente, el inductor está en el estator y el inducido en el rotor.

Son motores que se caracterizan porque son mecánicamente sencillos de construir, lo cual los hace muy robustos y sencillos, apenas requieren mantenimiento, son baratos y, en el caso de motores trifásicos, no necesitan arrancadores (arrancan por sí solos al conectarles la red trifásica de alimentación) y no se ven sometidos a vibraciones por efecto de la transformación de energía eléctrica en mecánica, ya que la potencia instantánea absorbida por una carga trifásica es constate e igual a la potencia activa. Estas son las principales ventajas que hacen que sea ampliamente utilizado en la industria.

Como inconvenientes, podemos mencionar que son motores que tienen bajos pares de arranque, que presentan una zona inestable de funcionamiento y que el control de velocidad en amplios rangos es complejo.

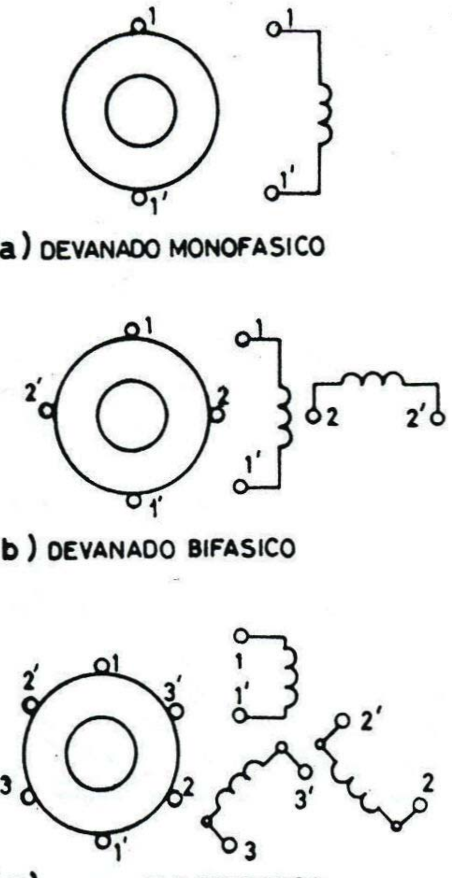
Se pueden clasificar atendiendo a varios criterios, así tenemos:

1. Según el número de devanados en el estator:

   - Monofásicos: tienen un sólo devanado en el estator. Se utilizan en aplicaciones tanto en el hogar como en la industria (bombas, ventiladores, lavadoras, electrodomésticos en general, pequeñas máquinas-herramientas, etc.)

- Bifásicos: tienen dos devanados en el estator. Estos devanados están desfasados $\pi/(2P)$, siendo P el número de pares de polos de la máquina, en el espacio. Se suelen utilizar en aplicaciones de control de posición.

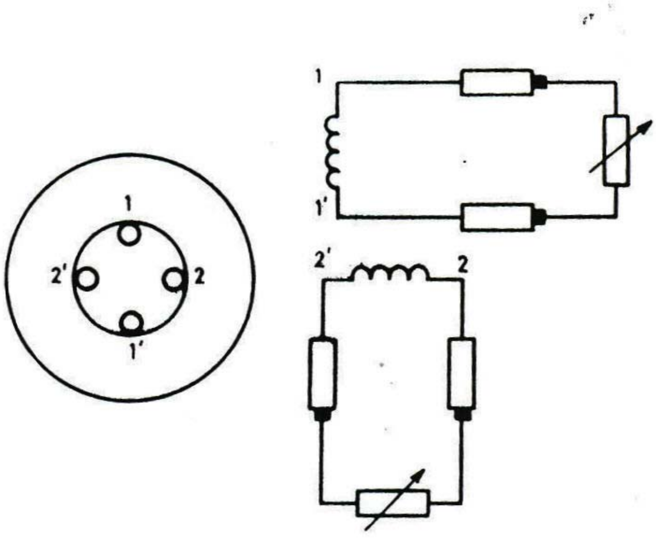
- Trifásicos: tienen tres devanados en el estator. Estos devanados están desfasados $2\cdot\pi/(3P)$, siendo P el número de pares de polos de la máquina, en el espacio. Se suelen utilizar en aplicaciones industriales: máquinas-herramientas (tornos, fresadoras, cepilladoras, etc.), grúas, bombas, compresores, ventiladores, etc.



(a) DEVANADO MONOFASICO

(b) DEVANADO BIFASICO

(c) DEVANADO TRIFASICO

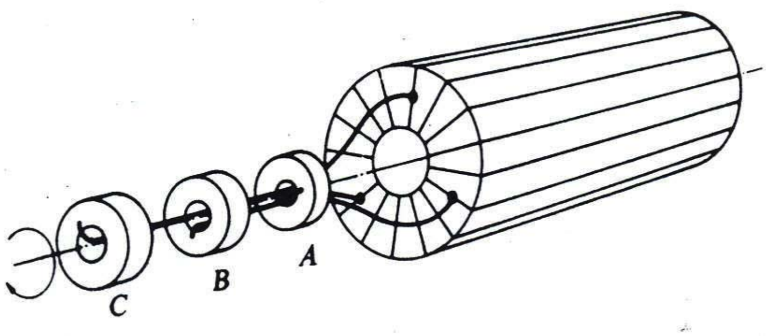


Rotor devanado de dos fases.

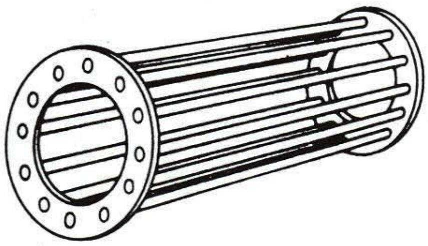
Según el tipo de inducido

- Rotor devanado: los devanados del rotor son similares a los del estator con el que está asociado. El número de fases del rotor no tiene porqué ser el mismo que el del estator, lo que sí tiene que ser igual es el número de polos.

  Los devanados del rotor están conectados a anillos colectores montados sobre el mismo eje.



- Rotor en jaula de ardilla: es el más utilizado. Los conductores del rotor están igualmente distribuidos por la periferia del rotor. Los extremos de estos conductores están cortocircuitados, por tanto no hay posibilidad de conexión del devanado del rotor con el exterior.



A continuación se adjuntan una serie de fotografías correspondientes a diferentes despieces de un motor asíncrono trifásico:

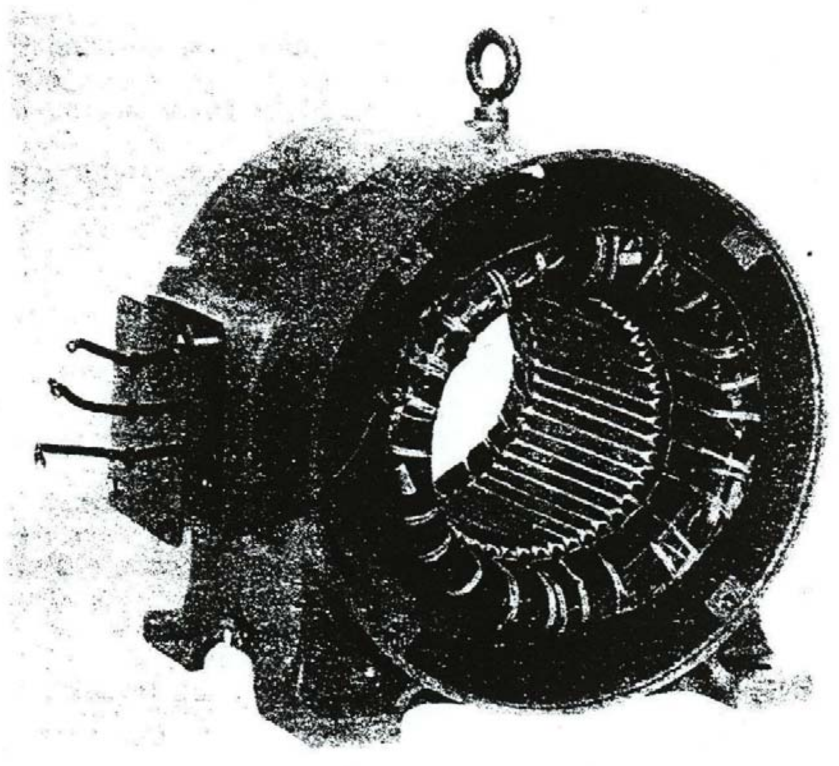


Fig. 17.1. Estator de un motor trifásico de inducción de 2 kW, 1725 rpm, 60 Hz. (Brook Crompton Parkinson Ltd.)

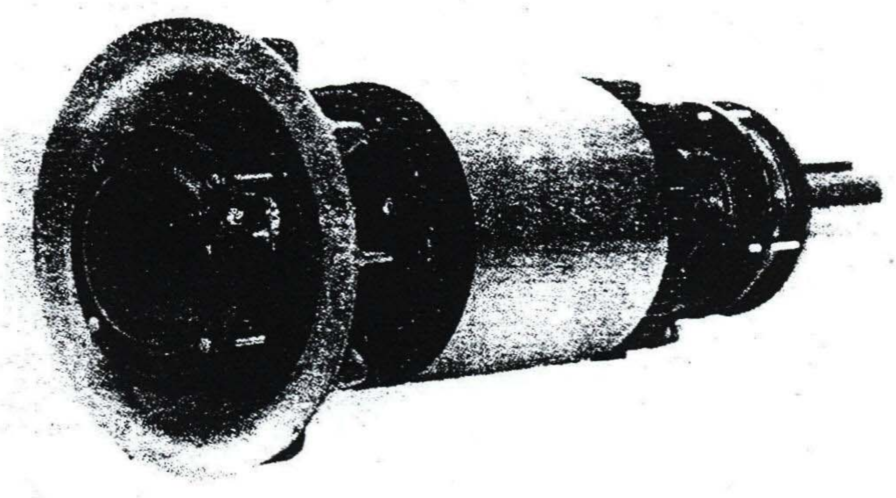
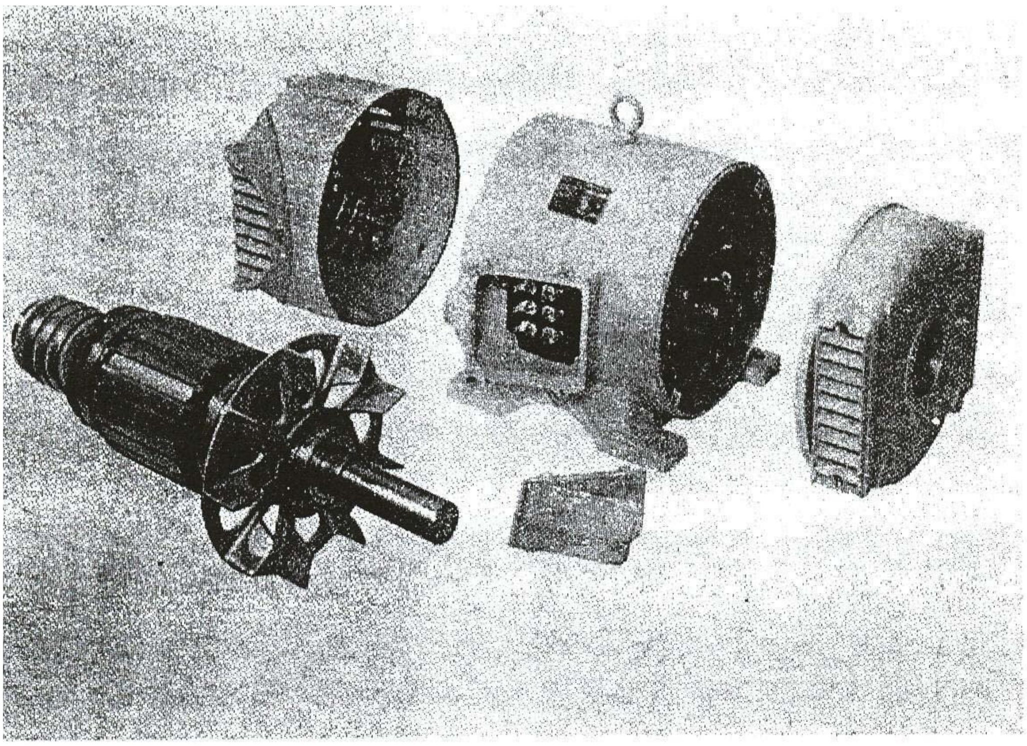
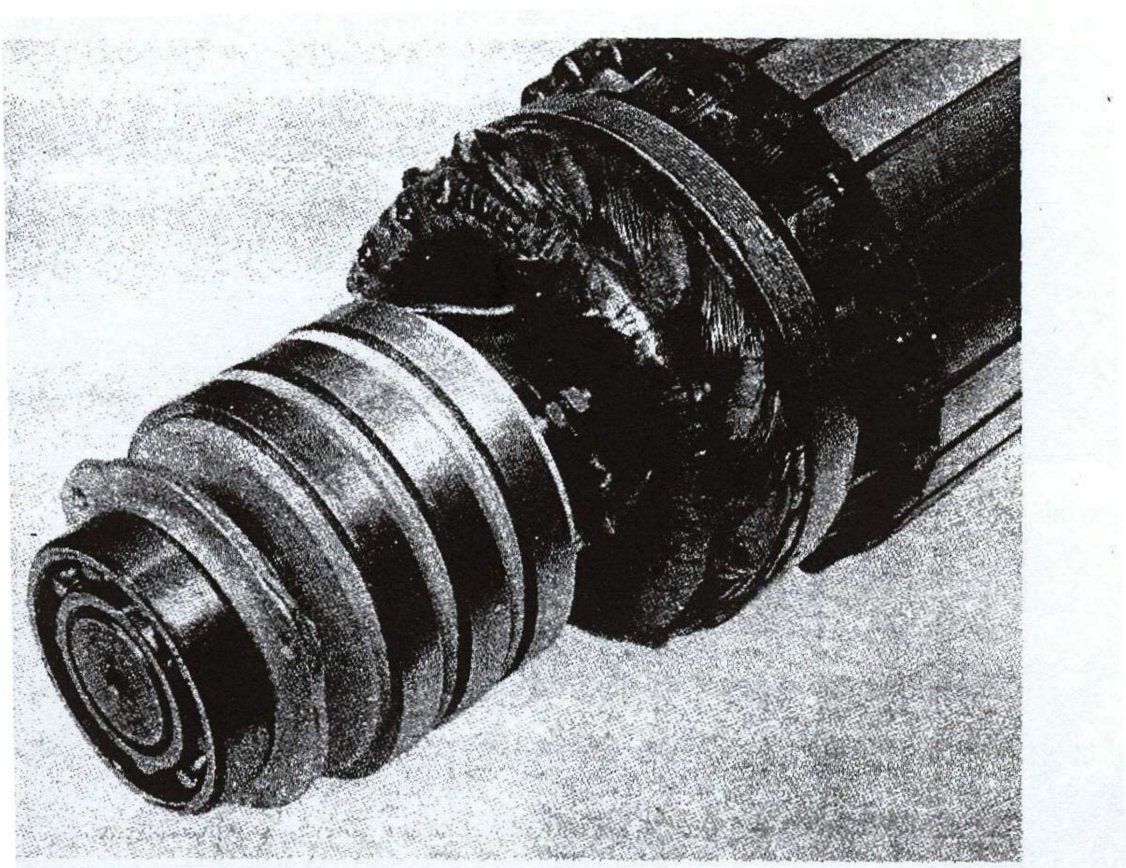


Fig. 17.2. Rotor de jaula de ardilla de un motor trifásicc de inducción de 2 kW, 1725 rpm, 60 Hz (Brook Crompton Parkinson Ltd.)



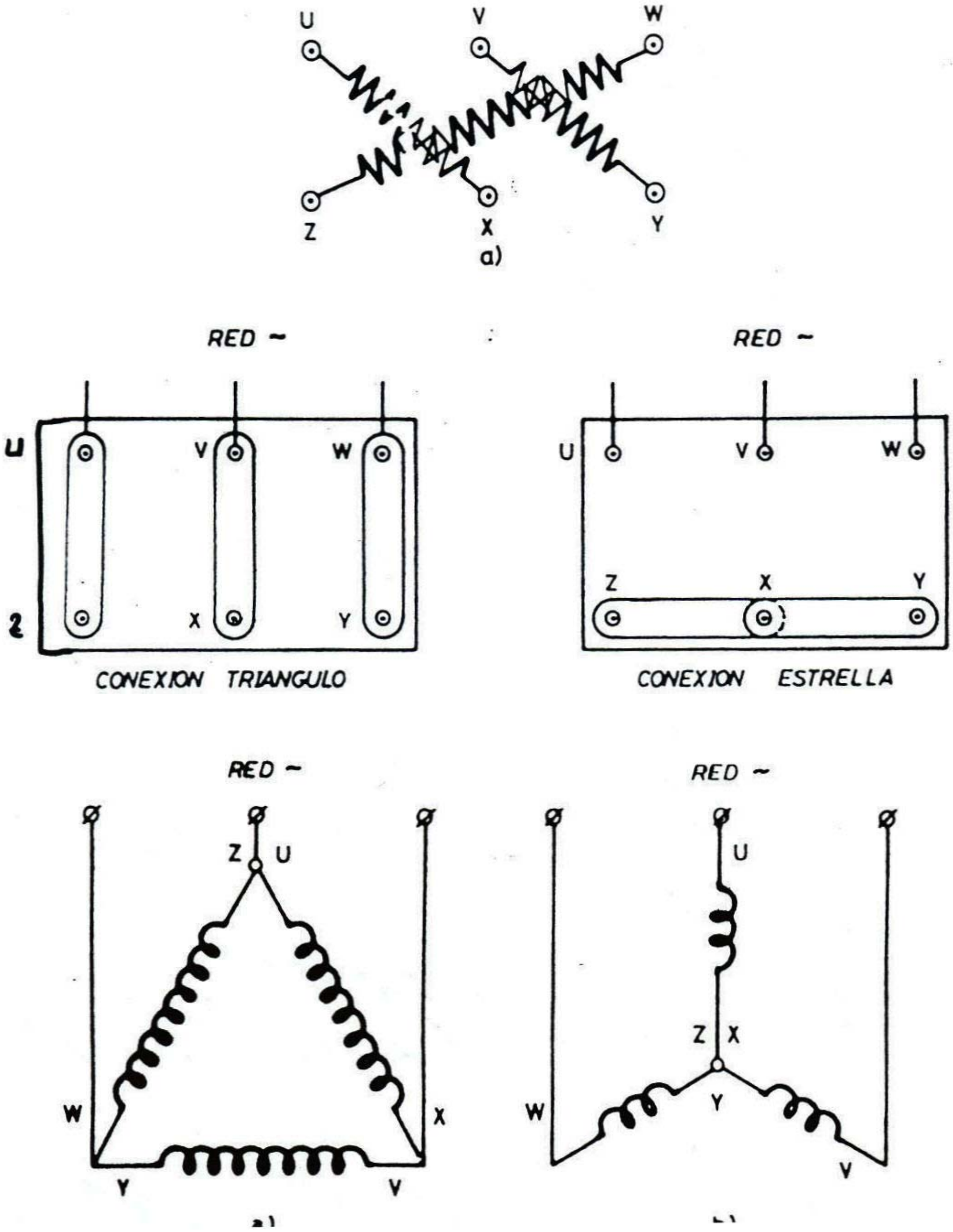
4.`a) Despiece de un motor de inducción de rotor bobinado, de 3,5 kW



Rotor visto desde el lado de los anillos rozantes. (Brook Crompton

CAJA DE BORNES DEL MOTOR ASÍNCRONO

Generalmente, los fabricantes de motores asíncronos trifásicos, en la caja de bornes de sus motores colocan el principio y el final de cada uno de los devanados del estator con el objeto de que el motor se pueda utilizar para diferentes tensiones de línea, tal y como se puede observar en la figura adjunta.

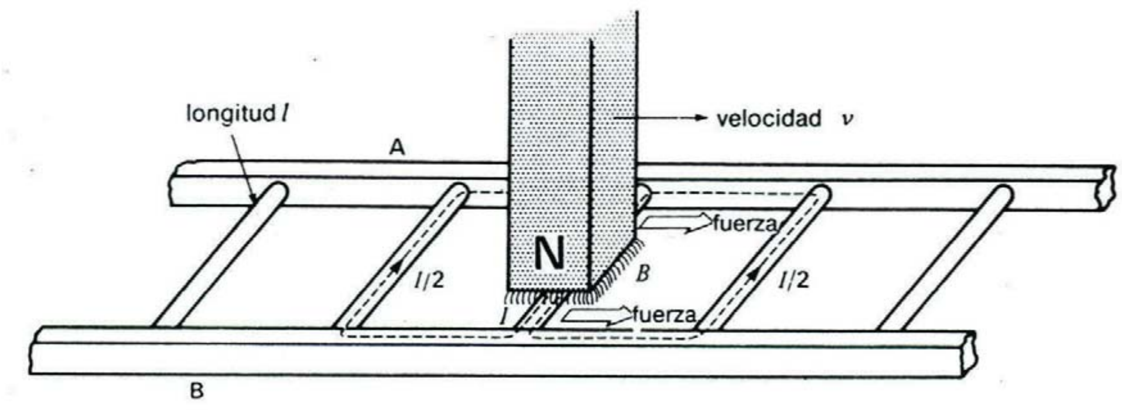


Nótese que la distribución de los puntos de conexión permite utilizar chapas de un mismo tamaño para realizar las conexiones tanto en estrella como en triángulo de los devanados del estator. Además, con la simple inspección de la disposición de estas chapas de conexión, es fácil saber cuál es el conexionado realizado.

En la chapa de características del motor, además de la velocidad nominal de giro se incluirán la tensión y la corriente absorbida por el motor en las dos configuraciones posibles.

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Para explicar el funcionamiento de un motor asíncrono trifásico, nos vamos a servir de un símil sencillo. Supongamos que tenemos un imán moviéndose a lo largo de una escalerilla conductora tal y como se indica en la figura adjunta:



Este imán en su desplazamiento a velocidad *v* provoca una variación de flujo sobre los recintos cerrados que forman los peldaños de la escalera. Esta variación de flujo genera una f.e.m., definida por la Ley de Faraday, e= **-** (dϕ / dt), que a su vez hace que por dichos recintos circule una corriente *i*. Esta corriente eléctrica provoca la aparición de una fuerza sobre la escalera definida por

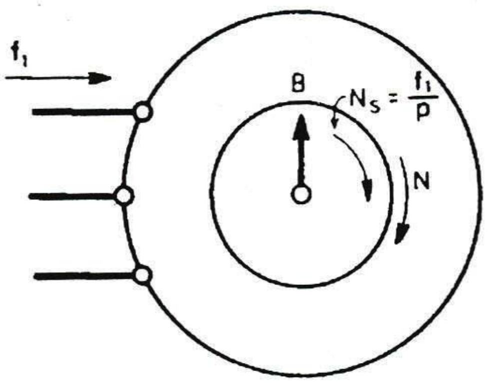
f= i·(**l** x **B**)   (en negrita: vectores)

Que hace que la escalera se desplace en el mismo sentido que lo hace el imán.

Ha de tenerse en cuenta que la escalera nunca podrá desplazarse a la velocidad del imán, debido a dos razones fundamentalmente: la primera porque hay unas pérdidas por rozamiento que se lo impiden y la segunda, que en el supuesto caso de que se desplazase a la misma velocidad que el imán, la variación de flujo sobre los recintos cerrados sería nula, y por tanto la f.e.m. inducida también y por tanto la fuerza resultante también sería nula.

Si se desea que la escalera se desplace en sentido contrario basta con que el imán se desplace en sentido contrario para conseguir este efecto.

Una vez analizado este caso sencillo, analicemos el motor asíncrono. Para seguir el paralelismo con el caso anterior, nótese que la escalera no es más que el desarrollo lineal de un rotor en jaula de ardilla. Ahora bien, ¿cómo se puede generar el efecto del imán que se desplaza alrededor del rotor? Para conseguir este efecto (campo giratorio de amplitud y velocidad de giro constante), utilizamos corrientes trifásicas equilibradas, tal y como se observa en la figura adjunta



Sean:

$i_a = I_0 \cdot \cos(\omega_1 \cdot t)$
$i_b = I_0 \cdot \cos(\omega_1 \cdot t - 2\cdot\pi/3)$
$i_c = I_0 \cdot \cos(\omega_1 \cdot t + 2\cdot\pi/3)$

Las corrientes trifásicas equilibradas introducidas por cada uno de los devanados del motor.

Estas corrientes generan los siguientes campos magnéticos:

$i_a \Rightarrow \quad B_a = K \cdot i_a \cdot \cos(\theta)$
$i_b \Rightarrow \quad B_b = K \cdot i_b \cdot \cos(\theta - 2\cdot\pi/3)$
$i_c \Rightarrow \quad B_c = K \cdot i_c \cdot \cos(\theta + 2\cdot\pi/3)$

El campo magnético resultante es

$$B_{TOTAL} = B_a + B_b + B_c = (3/2) \cdot K \cdot I_0 \cdot \cos(p \cdot \theta - \omega_1 \cdot t),$$

Que es un campo giratorio de amplitud constante, $(3/2) \cdot K \cdot I_0$, y de velocidad de giro, alrededor del rotor, también constante y de valor

$$\omega_s = \omega_1 / P$$

Donde ω_1 es el valor de la frecuencia de las corrientes inductoras del estator, y P es el número de pares de polos de la máquina.

A ω_s se le denomina *velocidad de sincronismo* (es la velocidad de giro del campo giratorio)

CAMBIO DEL SENTIDO DE GIRO DE UN MOTOR ASÍNCRONO TRIFÁSICO

Para invertir el sentido de giro de un motor asíncrono trifásico, basta con invertir el sentido de giro del campo magnético giratorio, para lo cual hay que intercambiar dos fases cualesquiera entre sí, de tal forma que si las corrientes trifásicas equilibradas son de la forma:

$i_a = I_0 \cdot \cos(\omega_1 \cdot t)$; se introduce por el devanado *a*
$i_b = I_0 \cdot \cos(\omega_1 \cdot t - 2 \cdot \pi/3)$; se introduce por el devanado *c*
$i_c = I_0 \cdot \cos(\omega_1 \cdot t + 2 \cdot \pi/3)$; se introduce por el devanado *b*

Estas corrientes generan los siguientes campos magnéticos:

$i_a \Rightarrow B_a = K \cdot i_a \cdot \cos(\theta)$
$i_b \Rightarrow B_b = K \cdot i_b \cdot \cos(\theta + 2 \cdot \pi/3)$
$i_c \Rightarrow B_c = K \cdot i_c \cdot \cos(\theta - 2 \cdot \pi/3)$

El campo magnético resultante es:

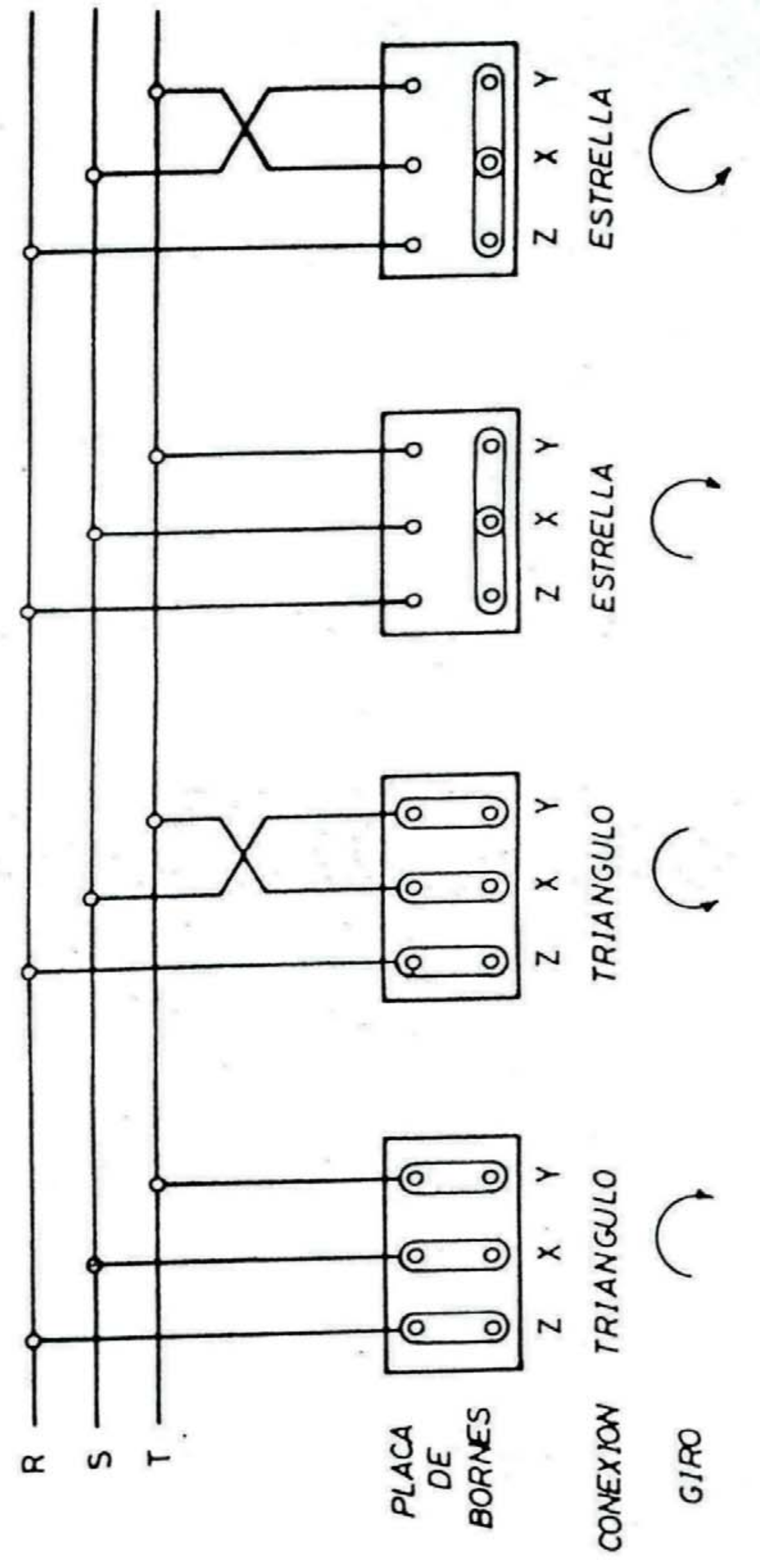
$$B_{TOTAL} = B_a + B_b + B_c = (3/2) \cdot K \cdot I_0 \cdot \cos(p \cdot \theta + \omega_1 \cdot t),$$

Que es un campo giratorio de amplitud constante, $(3/2) \cdot K \cdot I_0$, y de velocidad de giro, alrededor del rotor, también constante y de valor:

$$\omega_s = \omega_1 / P$$

Pero de sentido contrario al del caso anterior.

En la figura de la página adjunta se muestra un ejemplo de la inversión de giro.


R
S
T
PLACA DE BORNES
CONEXION
GIRO
TRIANGULO
TRIANGULO
ESTRELLA
ESTRELLA
Z X Y

DESLIZAMIENTO

Como anteriormente se argumentó, un motor asíncrono no puede alcanzar por sí mismo la velocidad de sincronismo. Para medir la relación entre la velocidad de giro del eje del rotor y la velocidad de giro del campo giratorio se define el *deslizamiento* de la siguiente forma:

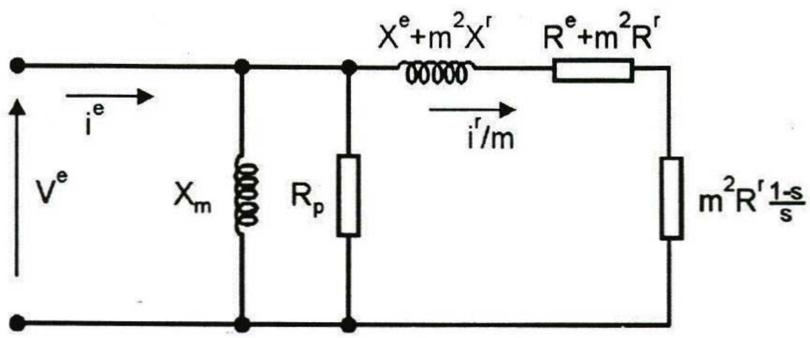
$$s= [\omega_s - \omega] / \omega_s$$

De donde, la velocidad de giro de la máquina, ω, pude escribirse como

$$\omega= \omega_s\cdot(1 - s)$$

CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN MOTOR ASÍNCRONO TRIFÁSICO

El circuito equivalente **POR FASE** de un motor asíncrono trifásico es el siguiente:



En el que:

- R^e y R^r representan las resistencias de los devanados del estator y del rotor respectivamente.
- X^e y X^r representan las inductancias de los devanados del estator y del rotor respectivamente.
- $m^2 \cdot R^r \cdot [(1\text{-}s) / s]$ es una resistencia ficticia que representa la potencia eléctrica que se transforma en potencia mecánica total (incluye a la potencia mecánica útil disponible en el eje y la potencia de pérdidas mecánicas empleadas en vencer rozamientos)

Hay que hacer notar, que al igual que se hizo en el caso del circuito equivalente del transformador, la rama paralelo R_P // X_M se ha colocado a la entrada del circuito equivalente, puesto que se supone que I_V, intensidad de vacío, es pequeña en relación con la corriente nominal absorbida por el estator, $I^e{}_N$, sin embargo en el caso del motor asíncrono, esta aproximación no es tan buena porque en un motor existe entrehierro (espacio entre el estator y el rotor), alcanzando la I_V valores típicos entre el 30 y el 45% de la corriente nominal de estator.

NOTAS SOBRE EL CIRCUITO EQUIVALENTE POR FASE

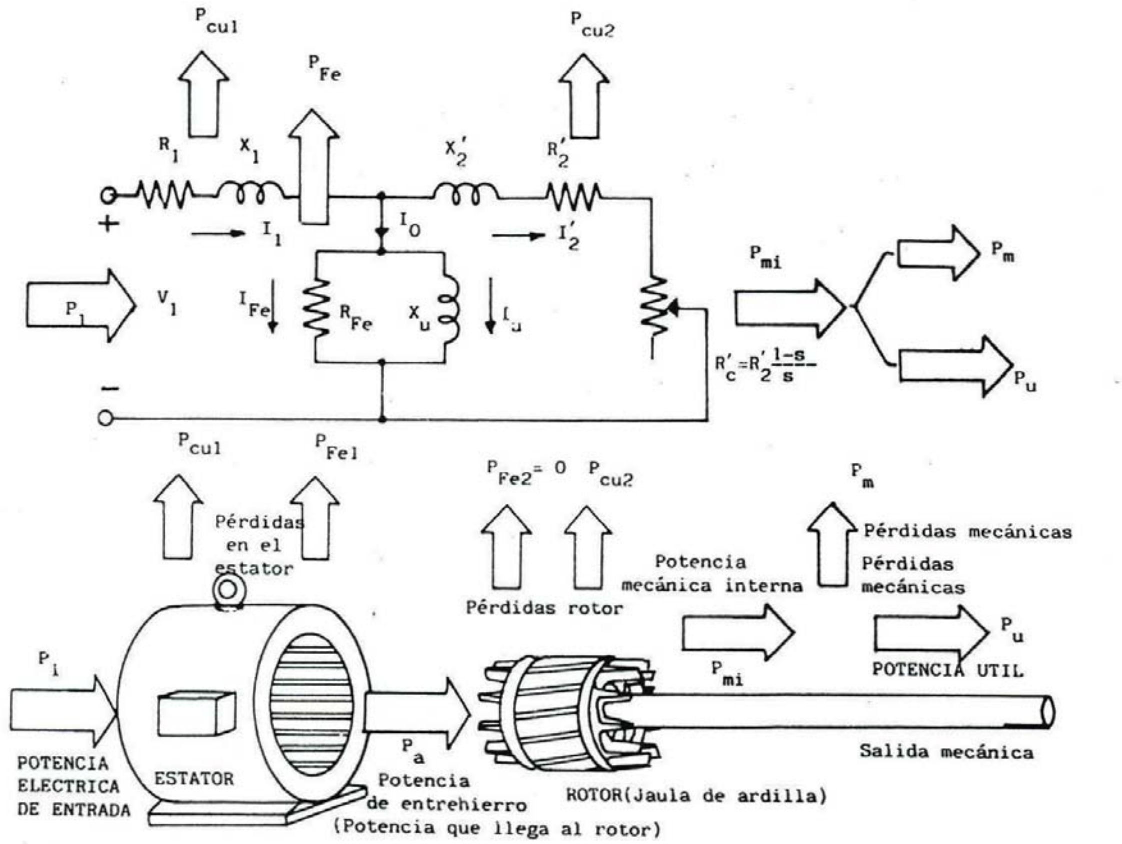
- Has de tener en cuenta que todos los valores de corriente y de tensión son de FASE, los valores de línea los debes de calcular aplicando las relacionas ya conocidas.

- Los valores de los parámetros del circuito equivalente, resistencias e inductancias, son valores de FASE

- Los valores de las potencias son de fase. Deberás multiplicarlos por tres para obtener los valores totales.

BALANCE DE POTENCIA EN UN MOTOR ASÍNCRONO

Analicemos la siguiente figura:



La expresión de la potencia mecánica total en función de los parámetros del circuito equivalente es:

$$P_{\text{MECÁNICA TOTAL}} = P_{\text{MECÁNICA ÚTIL}} + P_{\text{PÉRDIDAS MECÁNICAS}} = 3 \cdot m^2 \cdot R^r \cdot [(1-s) / s] \cdot (I^r / m)^2$$

Manipulando adecuadamente la expresión anterior se obtiene la siguiente fórmula general de la potencia mecánica total desarrollada por un motor asíncrono:

$$P_{\text{MECÁNICA TOTAL}} = [\ 3 \cdot m^2 \cdot R^r \cdot (1-s) \cdot s \cdot (V^e{}_{\text{FASE}})^2] / (sR^e + m^2 \cdot R^r\ )^2 + s^2 \cdot (\ X^e + m^2 \cdot X^r\ )^2\ ]$$

ENSAYOS EN LAS MÁQUINAS ASÍNCRONAS TRIFÁSICAS

Al igual que ocurría en el caso del transformador, los datos que el fabricante indica en la chapa de características del motor son insuficientes para obtener los parámetros del circuito equivalente por fase, por ello es necesario someter al motor a los siguientes ensayos:

- Ensayo a rotor parado (similar al ensayo en cortocircuito del transformador)
- Ensayo a rotor libre (similar al ensayo en vacío del transformador)

ENSAYO A ROTOR PARADO

Condiciones del ensayo: se bloquea el rotor de la máquina, de tal forma que $\omega = 0 \Rightarrow s = 1 \Rightarrow m^2 \cdot R^r \cdot [(1-s) / s] = 0$ (indica que no hay transformación de energía eléctrica en energía mecánica)

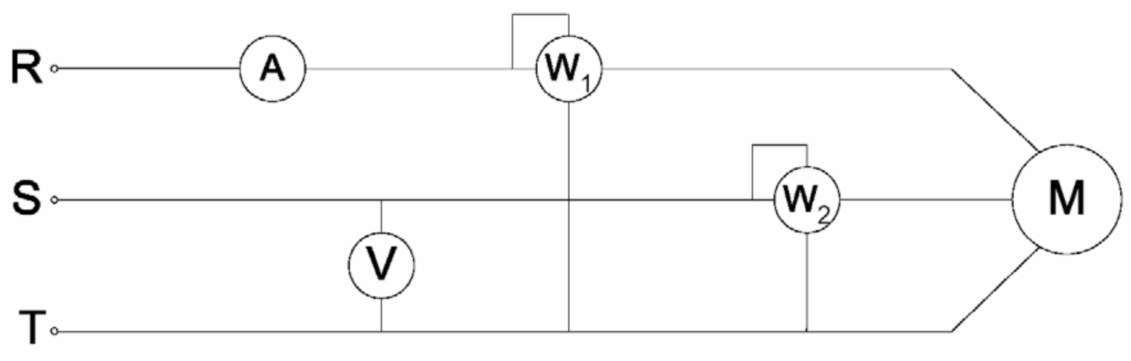
Con el rotor bloqueado, se comienza a aplicar tensión por el estator hasta que la corriente por el estator sea la nominal, en estas condiciones se cumple que:

$$V^e = V^e_{CC}$$

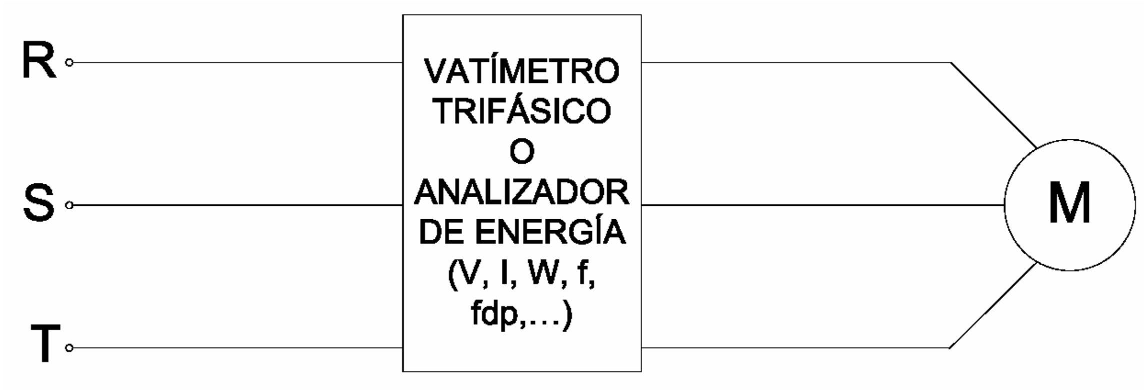
$$I^e = I^e_N$$

Medidas a realizar: en las condiciones anteriores se mide la tensión del estator: V^e_{CC}, la corriente absorbida por el motor: I^e_N y la potencia total absorbida, por el método de los dos vatímetros o conexión Arón.

Montaje a realizar:



Si tu puesto de laboratorio dispusiera de un analizador de red trifásico, que incluye tanto un vatímetro trifásico, como un voltímetro y un amperímetro, el montaje a realizar sería:



Si realizamos el balance de potencias, tenemos que:

$P_{ABSORBIDA} = P_{CU} + P_{FE} + P_{MECÁNICA\ TOTAL} = P_{CU} + P_{FE} + P_{MECÁNICA\ ÚTIL} + P_{PÉRDIDAS\ MECÁNICAS}$

(en valores totales, es decir los de fase multiplicados por tres)

$P_{MECÁNICA\ TOTAL} = P_{MECÁNICA\ ÚTIL} + P_{PÉRDIDAS\ MECÁNICAS} = 0$ (rotor parado)

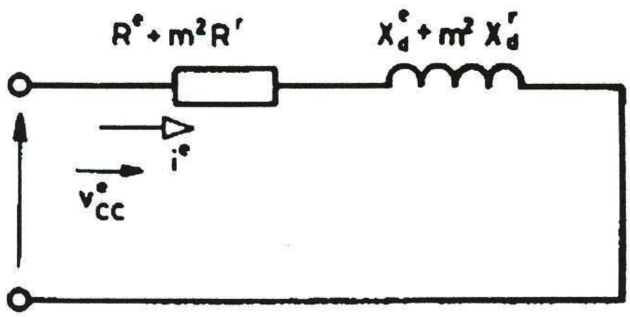
$P_{FE} <<<$ (debido a que $V^e_{CC} << V^e_N$) $\Rightarrow P_{FE} << P_{CU}$

P_{CU} son las pérdidas en el cobre nominales.

Por tanto,

$P_{ABSORBIDA} = P_{CU}$

El circuito equivalente que nos queda, en el caso del ensayo en cortocircuito es:



Circuito equivalente en el ensayo con el rotor parado.

De donde, se tiene que:

$$R^e + m^2 \cdot R^r = P_{CU\ DE\ FASE} / (I^e{}_{N\ DE\ FASE})^2$$

$$X^e + m^2 \cdot X^r = \sqrt{\ [(V^e{}_{CC\ DE\ FASE}/I^e{}_{N\ DE\ FASE})^2 - (R^e + m^2 \cdot R^r\ )^2\ ]}$$

ENSAYO A ROTOR LIBRE

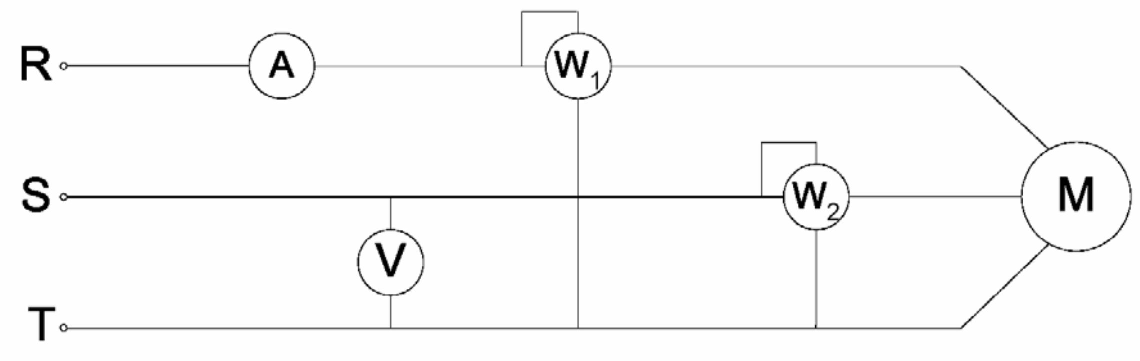
Condiciones del ensayo: se deja girar libremente el rotor del motor, sin carga mecánica acoplada a su eje. En estas condiciones la velocidad de giro del motor estará muy cercana a la velocidad de sincronismo, de tal forma que $\Rightarrow s \rightarrow 0 \Rightarrow m^2 \cdot R^r \cdot [(1-s) / s] \rightarrow$ es muy grande, mucho mayor en módulo que la rama serie que tiene asociada ($(R^e + m^2 \cdot R^r) + j \cdot (X^e + m^2 \cdot X^r)$).

La tensión que se aplica es la nominal, es decir

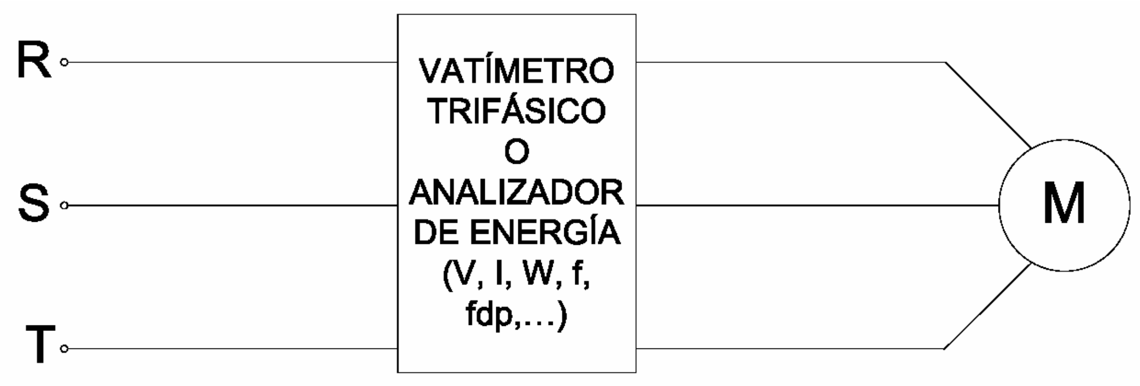
$$V^e = V^e_N$$

Medidas a realizar: en las condiciones anteriores se mide la tensión del estator: V^e_N, la corriente absorbida por el motor: I^e y la potencia total absorbida, por el método de los dos vatímetros o conexión Arón.

Montaje a realizar:



En el caso de que tu puesto de laboratorio disponga de un analizador de red trifásico, que incluye un vatímetro trifásico, un amperímetro y un voltímetro, el montaje a realizar sería:



Si realizamos el balance de potencias, tenemos que:

$P_{ABSORBIDA} = P_{CU} + P_{FE} + P_{MECÁNICA\ TOTAL} = P_{CU} + P_{FE} + P_{MECÁNICA\ ÚTIL} + P_{PÉRDIDAS\ MECÁNICAS}$

(en valores totales, es decir los de fase multiplicados por tres)

$P_{MECÁNICA\ TOTAL} = P_{MECÁNICA\ ÚTIL} + P_{PÉRDIDAS\ MECÁNICAS} = P_{PÉRDIDAS\ MECÁNICAS}$

($P_{MECÁNICA\ ÚTIL} = 0$ puesto que no hay carga mecánica acoplada al eje)

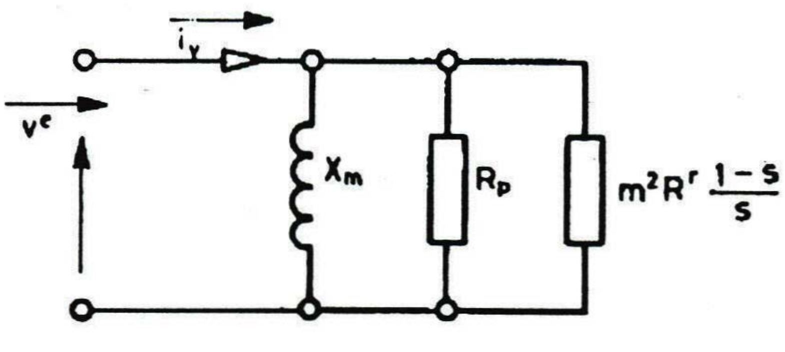
P_{CU} <<< (debido a que la corriente absorbida $(I^r/m) << (I^r/m)_{NOMINAL}$)

$\Rightarrow P_{CU} << P_{FE} + P_{PÉRDIDAS\ MECÁNICAS}$

Por tanto,

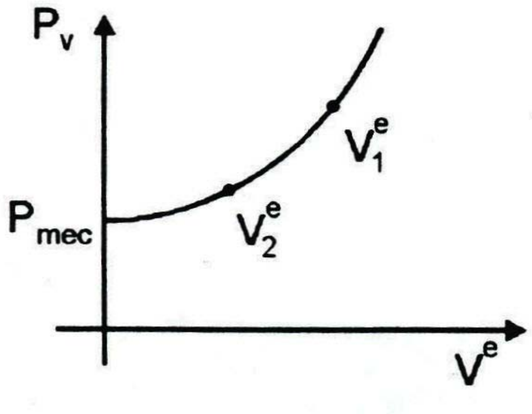
$$P_{ABSORBIDA} = P_{FE} + P_{PÉRDIDAS\ MECÁNICAS}$$

El circuito equivalente que nos queda, en el caso del ensayo en cortocircuito es:



P_{FE} son las pérdidas en el hierro nominales y $P_{PÉRDIDAS\ MECÁNICAS}$ son las pérdidas mecánicas nominales.

El problema que se plantea en este ensayo es que la potencia absorbida por el motor funcionando a rotor libre, que es la potencia medida por los dos vatímetros en conexión Arón, es la suma de las pérdidas en el hierro más las pérdidas mecánicas. Es necesario separarlas, para ello, se procederá de la siguiente forma: comenzando por la tensión nominal de alimentación, se irán realizando sucesivas medidas de potencia a diferentes tensiones, hasta llegar a una tensión de alimentación de aproximadamente el 25% de la tensión nominal, construyendo una gráfica como la que se muestra en la figura adjunta.



Una vez construida la gráfica anterior, se prolongará dicha curva hasta que corte al eje de ordenadas. El punto de corte nos indica las pérdidas mecánicas. Por tanto a la tensión nominal de alimentación, las pérdidas en el hierro serán la potencia total absorbida menos las pérdidas mecánicas, es decir:

$$P_{FE} = P_{ABSORBIDA} - P_{PÉRDIDAS\ MECÁNICAS}$$

Nótese que las pérdidas mecánicas se consideran constantes para diferentes valores de tensión de alimentación porque una vez que el motor comienza a girar lo hace prácticamente a la misma velocidad, muy cercana a la de sincronismo, para diferentes tensiones de alimentación, con lo que las pérdidas mecánicas se pueden considerar constantes.

Una vez separadas las pérdidas en el hierro de las pérdidas mecánicas, tenemos que:

$$R_p = (V^e_{N\ DE\ FASE})^2 / P_{FE\ DE\ FASE}$$

$$X_M = 1/ \sqrt{\ [(I_{V\ DE\ FASE}/V^e_{N\ DE\ FASE})^2 - (1/R_P)^2\ ]}$$

CURVA PAR-VELOCIDAD EN UN MOTOR ASÍNCRONO TRIFÁSICO

Como sabemos, el par electromecánico desarrollado por un motor está determinado por la relación:

$$C = P_{MECÁNICA\ TOTAL}/\omega$$

Teniendo en cuenta que:

$$P_{MECÁNICA\ TOTAL} = [\ 3\cdot m^2\cdot R^r\cdot(1\text{-}s)\cdot s\cdot (V^e{}_{FASE})^2] \ / \ (sR^e + m^2\cdot R^r\ )^2 + s^2\cdot(\ X^e + m^2\cdot X^r\ )^2\ ]$$

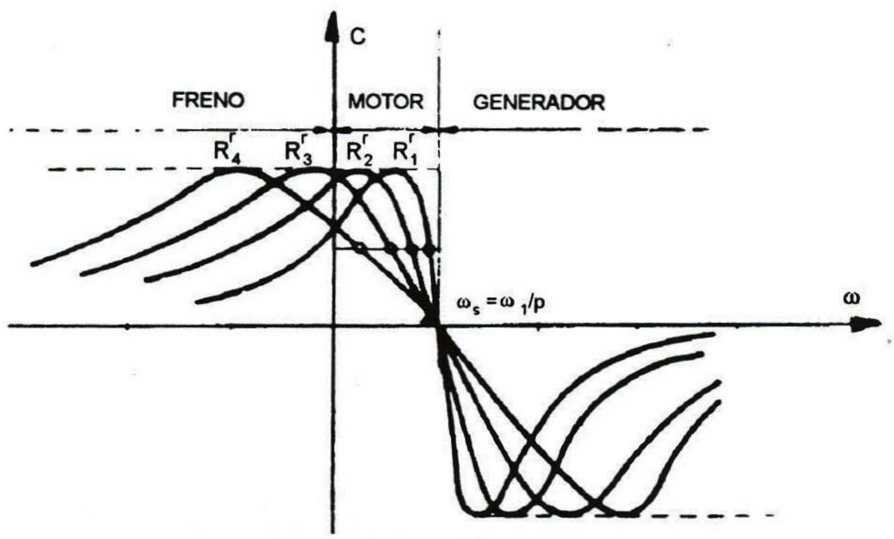
Y que la velocidad de giro es:

$$\omega = \omega_s\ \cdot(1 - s) = \ (\omega_1 \ / \ P)\cdot\ (1 - s)$$

Trabajando adecuadamente la expresión del par se llega a:

$$C_{ELECTROMECÁNICO\ TOTAL} = [\ 3\cdot P\cdot m^2\cdot R^r\cdot s\cdot\ (V^e{}_{FASE})^2] \ / \ [\omega_1\cdot\ [(sR^e + m^2\cdot R^r\ )^2 + s^2\cdot(\ X^e + m^2\cdot X^r\ )^2\ ]\ ]$$

Si representamos esta última ecuación, obtenemos la siguiente familia de curvas:



En la familia de curvas anterior tienen especial importancia los siguientes puntos (C-ω):

- Punto ($C_{ARRANQUE}$, ω= 0): es el punto de par de arranque, en el que

$\omega = 0 \Rightarrow s=1 \Rightarrow$

$C_{\text{ELECTROMECÁNICO TOTAL}} = C_{\text{ARRANQUE}} \Rightarrow$

$C_{\text{ARRANQUE}} = [\ 3 \cdot P \cdot m^2 \cdot R^r \cdot (V^e{}_{\text{FASE}})^2] / [\omega_1 \cdot [(R^e + m^2 \cdot R^r)^2 + (X^e + m^2 \cdot X^r)^2\ ]\ ]$

- Punto ($C = 0$, $\omega = \omega_s$): es el punto de par nulo, en el que

$\omega = \omega_s \Rightarrow s=0 \Rightarrow P_{\text{MECÁNICA TOTAL}} = 0 \Rightarrow C_{\text{ELECTROMECÁNICO TOTAL}} = 0$

- Punto ($C_{\text{MÁXIMO}}$, $\omega = \omega_{\text{Cmáximo}}$): es el punto de par máximo, que limita la zona estable del motor asíncrono en el que

  $\omega = \omega_{\text{Cmáximo}} = (\omega_1/P) \cdot (1 - s_{\text{Cmáx}}) \Rightarrow s_{\text{Cmáximo}} = \pm[\ m^2 \cdot R^r] / [\sqrt{[(R^e)^2 + (X^e + m^2 \cdot X^r)^2}\ ]$

  En la expresión anterior el signo "+" se emplea cuando la máquina funciona como motor y el signo "-" para cuando la máquina funciona como generador.

  Si en la expresión general del par sustituimos el valor del deslizamiento por:

  $s_{\text{Cmáximo}} = \pm[\ m^2 \cdot R^r] / [\sqrt{[(R^e)^2 + (X^e + m^2 \cdot X^r)^2}\ ]$

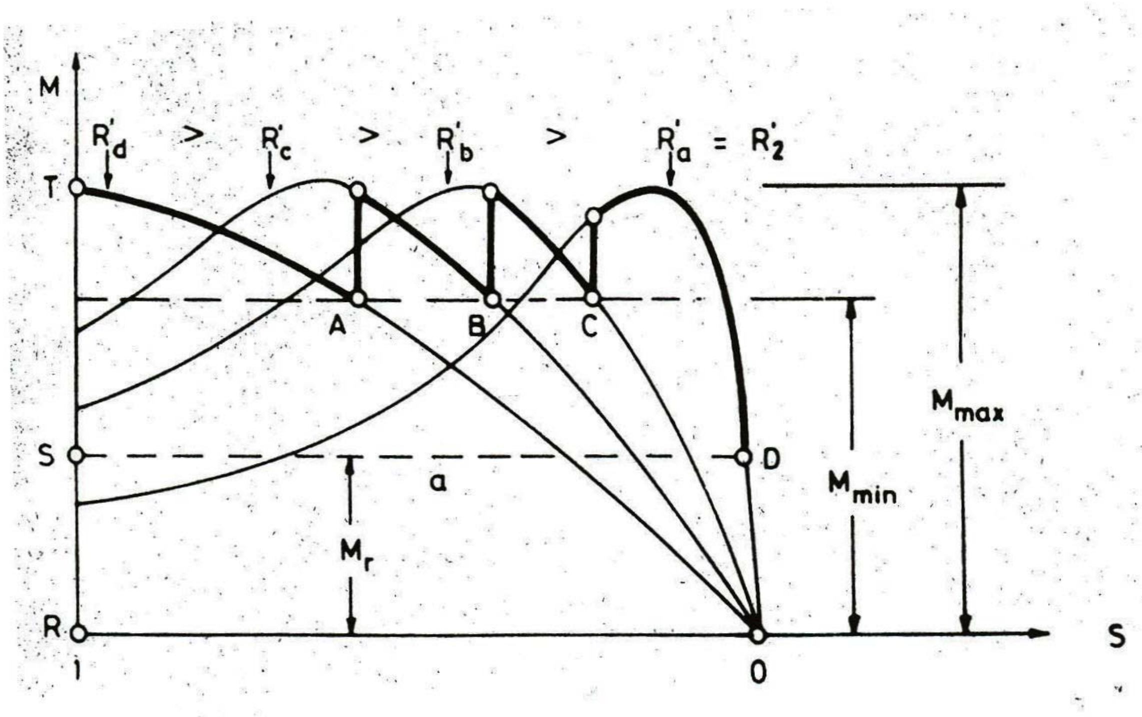
  Obtenemos la expresión que nos da el valor del par máximo en función de los parámetros del circuito equivalente del motor, que es de la forma:

  $C_{\text{ELECTROMECÁNICO TOTAL}} = C_{\text{MÁXIMO}} \Rightarrow$

  $C_{\text{MÁXIMO}} = [\ 3 \cdot P \cdot (V^e{}_{\text{FASE}})^2] / [2 \cdot \omega_1 \cdot [\pm(R^e) + [\sqrt{[(R^e)^2 + (X^e + m^2 \cdot X^r)^2}\ ]\ ]\ ]$

  Con el mismo criterio en la utilización de los signos que se comentó anteriormente.

En la expresión del $C_{\text{MÁXIMO}}$, se observa que éste no depende de la resistencia del rotor $m^2 \cdot R^r$, aunque el deslizamiento máximo sí depende de este factor, es decir que el par máximo no depende de la resistencia del rotor, pero sí la velocidad a la que éste se produce, por lo que variando este parámetro, conectando en serie una determinada resistencia, para el caso de motores de rotor devanado, se puede obtener una familia de curvas C-ω como las representadas en la figura adjunta.



Finalmente, hay que hacer notar que en la curva C-ω, hay una zona de funcionamiento inestable, que es la comprendida en el siguiente rango de velocidades:

$$0 < \omega < \omega_{Cmáximo}$$

Ya que en este rango de velocidades la pendiente de la curva es positiva, y a una disminución de la velocidad ω le corresponde también una disminución del par.