

# **Unidad 5**

**MÁQUINAS ELÉCTRICAS:  
de INDUCCIÓN (ASINCRÓNICAS)**

**ELECTROTECNIA Y MÁQUINAS ELÉCTRICAS**

**(INGENIERÍA MECÁNICA)**

**M - 14**

Ing. Julián J. Ronco (Prof. Adj.)

Ing. Jorge C. Ronco (Prof. Adj.)

Mauro Curli (Aux.)

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

## 5.1 INTRODUCCIÓN

*“La máquinas de inducción o asincrónica, se basa en el principio de acción de un campo magnético giratorio sobre un arrollamiento en cortocircuito.”*

Lo que diferencia a estas máquinas de los demás tipos de máquinas es que no existe corriente conducida a uno de los arrollamientos. La corriente que circula por uno de los devanados (generalmente ubicado en el rotor), se debe a la fem inducida por la acción del flujo del otro, y por esta razón se las denomina también **máquinas de inducción**. También reciben el nombre de **máquinas asincrónicas**, debido a que la velocidad de giro del rotor no es la de sincronismo impuesta por la frecuencia de la red.

Desarrollaremos primero lo correspondiente a la máquina de inducción trifásica, desarrollando al final del capítulo el funcionamiento y arranque de los motores monofásicos.

## 5.2 ASPECTOS CONSTRUCTIVO

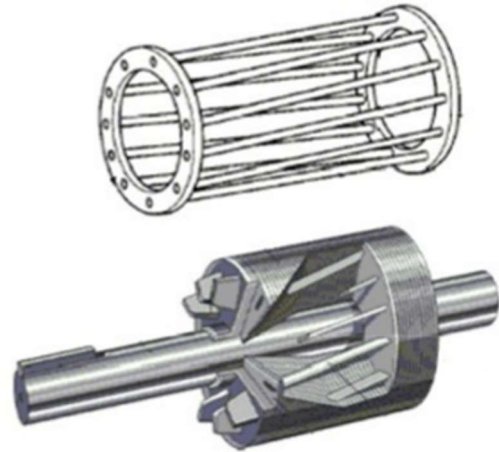
El núcleo de una máquina de inducción o asincrónica estará compuesta por dos partes: una fija denominada *estator*, generalmente aloja el inductor alimentado por una red monofásica o trifásica; y otra móvil denominada *rotor*, donde se coloca el devanado inducido, cuyas corrientes que circulan por él se deberán a la interacción con el flujo del estator.

El **estator** de una máquina de inducción trifásica está formado por un apilamiento de chapas de acero al silicio (similar al transformador), que disponen de ranuras en su periferia interior donde se sitúan tres devanados, uno por fase, conformando un sistema trifásico, el cual, alimentado por un sistema eléctrico también trifásico, produce un campo magnético giratorio de amplitud constante distribuido sinusoidalmente por el entrehierro.

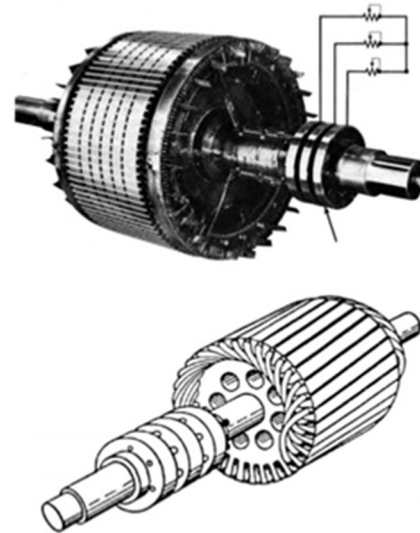


Por su parte, el **rotor** también estará formado por un conjunto de chapas apiladas formando un cilindro, que tiene unas ranuras en la circunferencia exterior. Según como esté conformado su arrollamiento, se diferencian dos tipos diferentes de rotores:

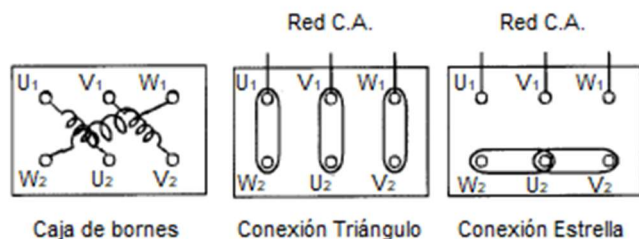
- **Rotor en jaula de ardilla o cortocircuito:** los conductores se componen de barras de cobre o aluminio puestos en cortocircuito en sus extremos por dos anillos laterales. Las varillas se colocan sin aislación en las ranuras. En máquinas pequeñas, se producen mediante inyección de aluminio, produciendo al mismo tiempo las barras y los anillos laterales, provistos de salientes a modo de paletas de ventilación.



- **Rotor bobinado o con anillos rozantes:** consta de un arrollamiento trifásico similar al del estator, en el que en uno de sus extremos las fases se conectan generalmente en estrella (pudiéndose conectar en triángulo), mientras que los otros se envían a unos anillos aislados entre sí. Mediante estos anillos, el devanado se conecta al circuito exterior por medio de escobillas rozantes. El circuito exterior es un reóstato trifásico que permite variar la resistencia efectiva del rotor ( $R_2$ ), usado fundamentalmente para la puesta en marcha (arranque).



Un detalle importante en los motores asíncronos trifásicos es la disposición de los terminales del devanado del estator en su caja de bornes. A esta caja se llevan ambos extremos de los arrollamientos de cada fase, los que podrán conectarse en estrella o triángulo, como se muestra en la siguiente figura:



Ver que los terminales de la misma fase no están enfrentados entre sí, esto es para poder usar las planchuelas del mismo tamaño para ambas conexiones.

### 5.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Como la máquina de inducción suele funcionar generalmente como motor, comenzaremos analizando su funcionamiento como tal.

El devanado del estator (inductor) está constituido por tres arrollamientos desfasados  $120^\circ$  en el espacio, que al ser alimentados por un sistema trifásico de tensiones origina en ellos la circulación de corrientes:

$$I_u = I_{m\acute{a}x} \text{ sen } \omega t$$

$$I_v = I_{m\acute{a}x} \text{ sen}(\omega t - 120^\circ)$$

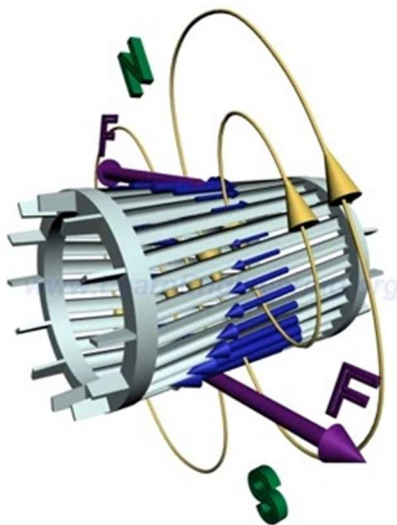
$$I_w = I_{m\acute{a}x} \text{ sen}(\omega t - 240^\circ)$$

de frecuencia  $f_1$ , desfasadas  $120^\circ$  en el tiempo. Cada una de estas corrientes producirá una fuerza magnetomotriz (fmm) fija en el espacio y variable en el tiempo, las que interactuando simultáneamente producirán, por razones que escapan al análisis del curso, una fmm distribuida sinusoidalmente por la periferia del entrehierro, que produce a su vez un campo magnético giratorio cuya velocidad mecánica de giro en rpm viene expresada por:

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}$$

A esta velocidad se la denomina **velocidad sincrónica** o de sincronismo.

Si reemplazamos los arrollamientos del estator por un imán periférico que se mueve a la velocidad  $n_1$ , esto equivaldría al campo magnético giratorio que producen los mismos:



De acuerdo a la Ley de Faraday, al desplazarse relativamente este campo respecto a los arrollamientos del rotor, creará en estos una fem:

$$e_r = -N_r \frac{d\Phi}{dt} = \int (v \wedge B) \cdot dl = (v \wedge B) \cdot L$$

y al estar el circuito del rotor cerrado sobre sí mismo, circulará por el mismo una corriente inducida, generada por esta  $e_r$ .

Al circular corriente por los conductores del rotor, al estar sumergidos en un campo magnético, aparecerán en estos las fuerzas de reacción correspondientes:

$$F = \int i(dl \times B) = i(L \times B)$$

Estas fuerzas intentarán hacer girar al rotor en el mismo sentido que el del campo rotante del inductor, pero nunca podrá alcanzar la velocidad de éste (sincrónica), ya que de hacerlo no habría variación de flujo abarcado por las bobinas del rotor, desapareciendo con ello la fem inducida y como consecuencia de ello, se anularían tanto la corriente como el par correspondiente. De este modo, la velocidad de sincronismo  $n_1$  constituye el límite teórico al que puede girar el rotor.

### 5.3.1 DESLIZAMIENTO

De lo anterior se define deslizamiento, característica de la velocidad del rotor, a la siguiente expresión:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

Cuando el motor funciona sin carga (vacío),  $s$  es aproximadamente cero, por ser la velocidad muy próxima a la de sincronismo. En plena carga, su valor está comprendido en los motores industriales entre el 3 y 8%. Con el rotor en reposo (parado),  $s = 1$ .

Partiendo de dicha ecuación, se puede deducir que la velocidad del rotor en función del deslizamiento viene dada por:

$$n = n_1 - s n_1 = n_1(1 - s)$$

resultando entonces:

➤ Velocidad del campo rotórico respecto al rotor:  $n_2 = (n_1 - n) = s n_1$

➤ Frecuencia de la fem rotórica:  $f_2 = s f_1$

Podemos comprobar que, cuando el rotor está parado ( $n = 0$  y  $s = 1$ ), la frecuencia de las fems y las corrientes inducidas en él ( $f_2$ ) será igual a la de las corrientes inductoras ( $f_1$ ) creadoras del campo. Sin embargo, cuando comienza a girar, la velocidad relativa con la que los arrollamientos del rotor "ven" al campo magnético comienza a disminuir, disminuyendo a su vez la frecuencia de las corrientes inducidas  $f_2$  ( $n > 0$  y  $s < 1$ ). Una vez que el rotor alcanza su velocidad de funcionamiento,  $s$  será muy pequeño, por lo que la frecuencia de las corrientes inducidas en el rotor será mucho más pequeña, del orden de 1 a 3Hz.

Pese a lo que pueda pensarse, el campo magnético generado por las corrientes inducidas en el rotor girará siempre a la misma velocidad (la velocidad de sincronismo  $n_1$ ), independientemente que el rotor esté parado o girando a cualquier velocidad:

➤ Velocidad del campo rotórico respecto al estator =  $n_2 + n = (n_1 - n) + n = n_1$

Debe quedar claro que: "La interacción de los campos rotantes (inductor e inducido) solo es posible si ambos giran en sincronismo, a la velocidad  $n_1$ ".

### 5.3.2 FEMS INDUCIDAS EN ESTATOR Y ROTOR (EFICACES)

Los valores eficaces de las fems inducidas en los arrollamientos primario y secundario respectivamente, serán:

- En el estator:  $E_1 = 4.44 k_1 f_1 N_1 \Phi_m$
- En el rotor parado:  $E_2 = 4.44 k_2 f_1 N_2 \Phi_m \quad (f_2 = f_1)$
- En el rotor en movimiento:  $E_{2s} = 4.44 k_2 f_2 N_2 \Phi_m = s E_2$

A diferencia del transformador su composición depende de:

- $k_1$  y  $k_2$  corresponden a los coeficientes que representan factores reductores para tener en cuenta: la distribución de las espiras en la periferia del estator y rotor respectivamente; la inclinación de las ranuras; el paso de bobina; etc. En los transformadores todas las espiras son concentradas, siendo este coeficiente igual a la unidad.
- $f_1$  es la frecuencia de la red de alimentación (fija), mientras que  $f_2$ , como se vio, depende del deslizamiento.
- el entrehierro del motor es mucho más grande que en el transformador.

Al aumentar la carga mecánica del motor asíncrono, el motor tiende a moverse más lentamente y el deslizamiento aumenta, lo que provoca el crecimiento de  $E_{2s}$  (proporcional a  $s f_1$ ) y el consecuente incremento de las corrientes del rotor. Finalmente, esto produce que se incremente el par del motor hasta establecer el equilibrio de los pares motor y resistente:

$$C_{motriz} = C_{resistente}$$

### 5.3.3 INVERSIÓN DEL SENTIDO DE GIRO

El sentido de rotación del campo magnético se determina con la sucesión de fases (secuencia) del sistema trifásico que alimenta al arrollamiento del estator, el cambio de secuencia hace variar el sentido de rotación del campo magnético de la máquina y en consecuencia el sentido de rotación del rotor.

De este modo, para invertir el sentido de rotación del motor, bastará sólo con modificar la conexión del estator con la red, intercambiando la conexión de dos de las fases.

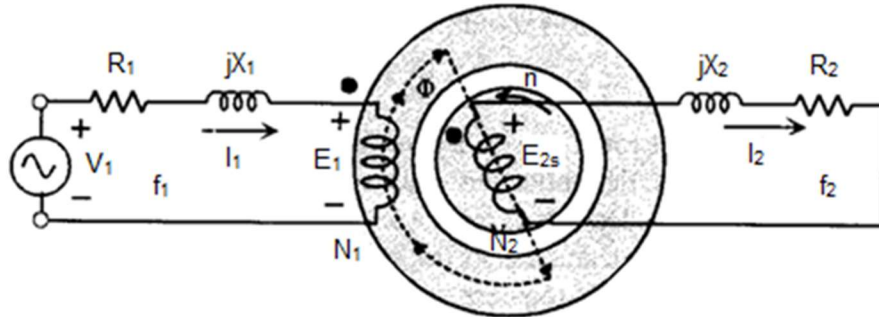
### 5.4 CIRCUITO EQUIVALENTE

Al igual que en el caso de transformadores, puede obtenerse una red que explique el comportamiento de la máquina en donde no aparezca la acción transformadora entre los circuitos primario, en este caso el estator, y secundario, el rotor.

Pese a que, en este caso, las frecuencias de los arrollamientos del estator y del rotor no son iguales como en el caso del transformador (salvo cuando el rotor está detenido,  $s = 1$ ), el circuito equivalente del motor puede deducirse a partir del circuito equivalente del transformador, debido a la similitud de interacción entre ambos devanados.

Como en todo circuito equivalente, lo que se pretende es obtener una aproximación al comportamiento real de funcionamiento del motor que, al ser analizado por la teoría de circuitos eléctricos, tenga un planteamiento analítico sencillo.

El motor de inducción trifásico, como sucede con el transformador trifásico, se estudia a través de un circuito monofásico equivalente:



Como se estudió, el primario (estator) induce una fem  $E_{2s}$  en el secundario (rotor), cuya frecuencia depende de la velocidad relativa del campo respecto al mismo. Esta fem, a su vez, hará circular por el rotor una corriente  $I_2$ , tal que:

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{R_2 + jX_{2s}}$$

donde puede advertirse que la reactancia secundaria también depende de la frecuencia rotórica  $f_2 = sf_1$ :

$$X_{2s} = L_{d2}\omega_2 = L_{d2} 2\pi f_2 = sX_2$$

La corriente  $I_2$  puede también de la siguiente manera:

$$I_2 = \frac{sE_2}{R_2 + jsX_2} = \frac{E_2}{\frac{R_2}{s} + jX_2}$$

Ahora, la ecuación de esta intensidad tiene unos parámetros de fem ( $E_2$ ) y de reactancia ( $X_2$ ) que están referidos a la frecuencia  $f_1$  del estator. Pero para tener en cuenta estos cambios, la nueva resistencia del rotor es ahora  $R_2/s$  en vez de  $R_2$ ;  $R_2/s$  puede descomponerse en dos componentes:

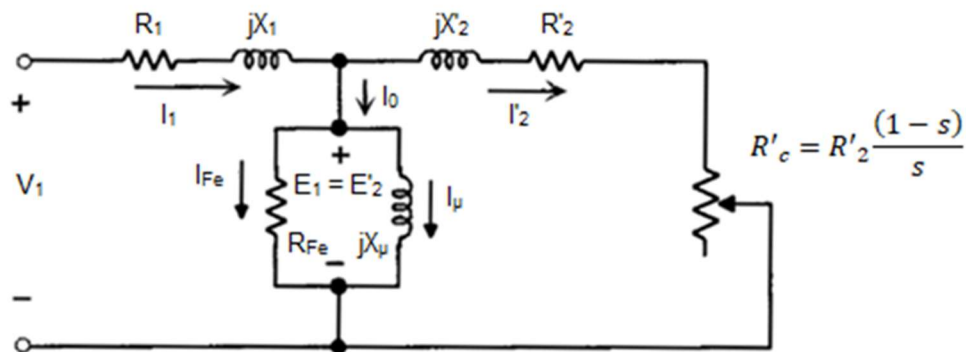
$$\frac{R_2}{s} = R_2 + R_2 \frac{(1-s)}{s} = R_2 + R_c$$

Donde  $R_c = R_2 \frac{(1-s)}{s}$  depende del deslizamiento y se denomina *resistencia de carga* y representará el efecto equivalente a la carga mecánica que lleve el motor o, de otro modo, la potencia eléctrica disipada en  $R_c$  (multiplicada por el número de fases) representará la potencia desarrollada por el motor en su movimiento de rotación, es decir la potencia mecánica en el eje.

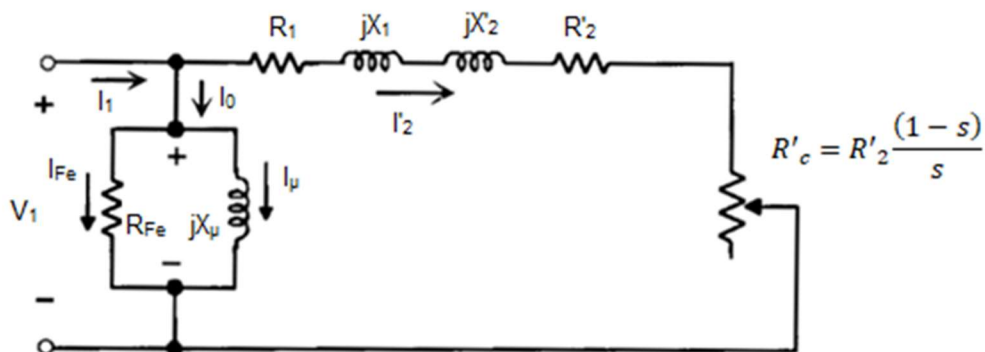
Para llegar al circuito equivalente con las ventajas analíticas que un circuito eléctrico representa, al igual que es hacia en los transformadores, hay que reemplazar el acoplamiento magnético entre ambos arrollamientos por un acoplamiento eléctrico, refiriendo el secundario al primario (referir el rotor al estator).

**Aclaración:** en la situación del motor, este proceso es más complejo debido a la influencia de los factores de devanado y a que, en general, los números de fase de estator y rotor no coinciden. Como su análisis excede a los conocimientos requeridos por la cátedra, el mismo no es presentado. El mismo, en caso de requerir su consulta, se encuentra en el libro de seguimiento de la cátedra: "*Máquinas Eléctricas*, Jesús Fraile Mora".

Por lo tanto, el **circuito equivalente exacto** se podrá representar de la siguiente forma:



Al igual que sucedía con los transformadores, es posible trabajar con el **circuito equivalente aproximado**, con todas las ventajas analíticas que esto significa:



**Observación:** tener en cuenta que, en los motores, debido a la presencia del entrehierro, la corriente de vacío necesaria para establecer el campo magnético principal será del orden del 35 al 40% de la nominal, frente al 3 al 8% requerida en los transformadores. De esta manera, el uso del circuito equivalente aproximado presentará mayores errores de cálculo. De todos modos, para motores de más de 10kW la aproximación es normalmente aceptable.

## 5.5 ENSAYOS DEL MOTOR ASICRÓNICO

Al igual que para el transformador, para hallar los parámetros del circuito equivalente de la máquina de inducción, se recurre a los siguientes ensayos:

- **Medición de resistencia  $R_1$ :** la resistencia del estator se puede obtener mediante un ensayo con corriente continua. En el caso de los motores con rotor bobinado, lo mismo puede realizarse para obtener la resistencia rotórica  $R_2$ .
  
- **Ensayo de vacío o rotor libre:** consiste en hacer funcionar el motor sin ninguna carga en el eje, donde  $s \rightarrow 0$ , por lo que  $R_c = R_2 \frac{(1-s)}{s} \rightarrow \infty$ .  
Mediante este ensayo se obtienen los parámetros correspondientes a la rama paralelo del circuito equivalente.
  
- **Ensayo de cortocircuito o de rotor bloqueado:** en este ensayo se bloquea el rotor impidiéndole que gire, es decir,  $n = 0$ , por lo que en esta situación se tendrá que  $s = 1$  y  $R'_c = 0$ , lo que indica que el motor se comporta como un transformador con el secundario en cortocircuito.  
Mediante este ensayo se obtienen los parámetros correspondientes a la rama serie del circuito equivalente.

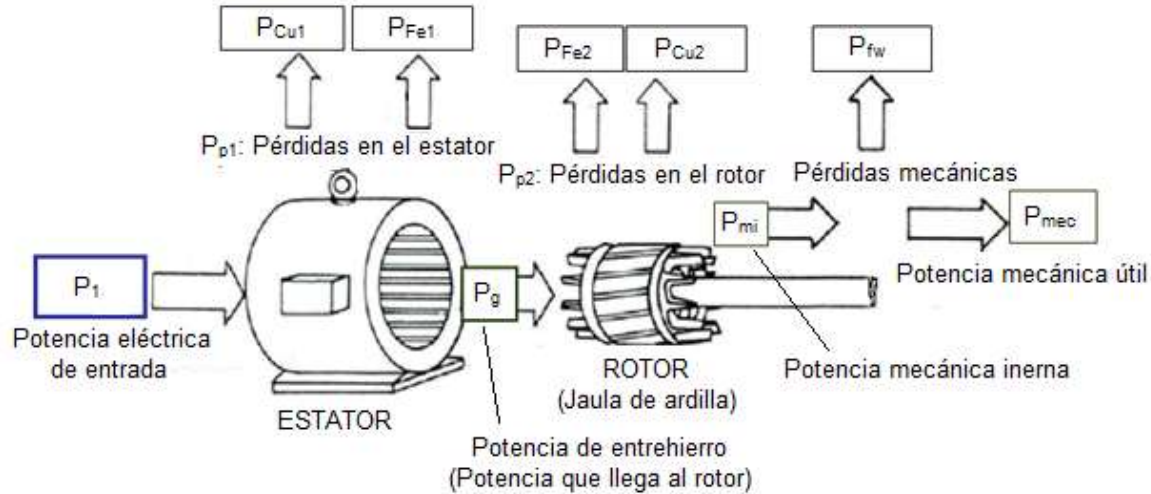
**Nota:** ambos ensayos, de vacío y de cortocircuito, deben contemplar diferencias significativas con los ensayos del transformador. Si el alumno desea profundizar en las mismas, puede recurrir al libro de referencia: “*Máquinas Eléctricas*, Jesús Fraile Mora”.

## 5.6 CURVAS CARACTERÍSTICAS – MODOS DE FUNCIONAMIENTO

Analizaremos aquí las ecuaciones y curvas características de la máquina de inducción, para describir luego los tipos de funcionamiento de la misma.

### 5.6.1 PAR Y POTENCIA

El balance de potencias de un motor asincrónico se ve representado en la siguiente figura:



Si  $P_1$  es la potencia entregada al motor y  $P_{p1} = (P_{Cu1} + P_{Fe1})$  es la potencia de pérdidas en el estator, entonces la potencia electromagnética que llega al rotor (**potencia en el entrehierro**) será:

$$P_g = P_1 - P_{p1} = P_1 - P_{Cu1} - P_{Fe1}$$

Tener en cuenta que, debido a que los deslizamientos en la máquina suelen ser pequeños, será  $f_2 \ll f_1$ , por lo que se considera que el hierro del estator es el único origen de las pérdidas ferromagnéticas (la obtenidas en el ensayo en vacío); esto es,  $P_{Fe2}$  despreciable.

La **potencia mecánica interna** (en el eje), la que llega al árbol (eje) de la máquina, será:

$$P_{mi} = P_g - P_{Cu2}$$

Como se dedujo en la obtención del circuito equivalente, la potencia mecánica interna (en el eje del motor) viene representada por la potencia eléctrica disipada en  $R_c$  (multiplicada por el número de fases):

$$P_{mi} = m_1 I_2'^2 R_2' \frac{(1-s)}{s} = m_1 \frac{V_1^2}{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2} R_2' \frac{(1-s)}{s}$$

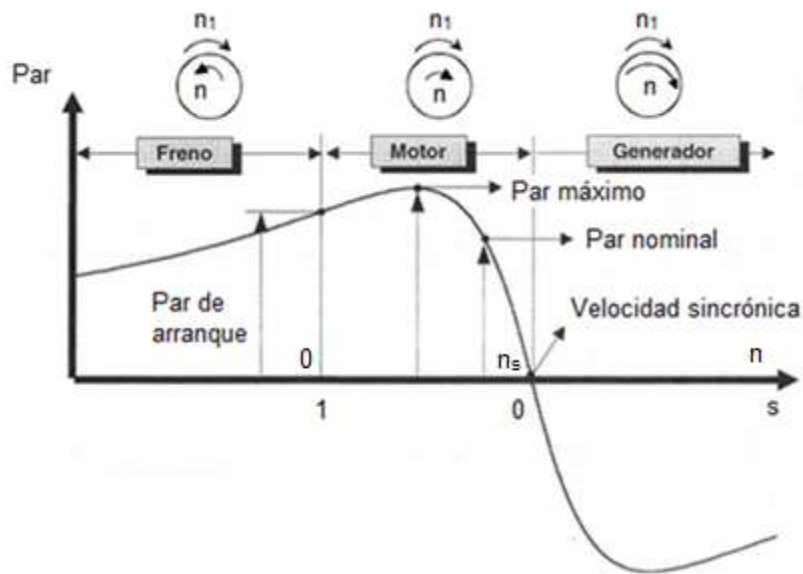
Entonces, el **par electrodinámico (T)** puede calcularse como el cociente entre  $P_{mi}$  y la velocidad angular de giro  $\omega_r = 2\pi n/60$ :

$$T = \frac{P_{mi}}{\omega_r} = \frac{P_{mi}}{2\pi \frac{n}{60}}$$

Reemplazando y considerando que  $n = n_1(1 - s)$ :

$$T = \frac{m_1 \frac{R'_2}{s} U_1^2}{2\pi \frac{n_1}{60} \left[ \left( R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right]}$$

Es posible ver que para cada valor de  $s$  (o velocidad) se tiene un valor de par distinto, quedando el diagrama  $T = f(s)$ , denominado *par-deslizamiento* (o *par-velocidad*) como se muestra en la siguiente figura:



Se observa que el par se hace cero cuando  $s = 0$  y  $s = \infty$ ; por otra parte, si derivamos la ecuación del par e igualamos a cero ( $\frac{dT}{ds} = 0$ ) se podrá determinar el valor del par máximo que puede desarrollar el motor, así como el deslizamiento para el cual se da:

$$\frac{dT}{ds} = 0 \Rightarrow s_m = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_{cc}^2}}$$

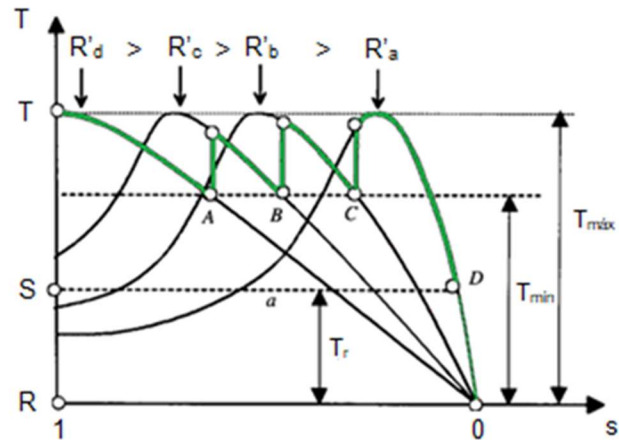
El signo negativo, como se verá más adelante, corresponde al funcionamiento como generador. Se obtiene el valor del par máximo de la máquina:

$$T_{m\acute{a}x} = \pm \frac{m_1 U_1^2}{2\pi \frac{n_1}{60} 2 \left[ \pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{cc}^2} \right]}$$

El signo (+) expresa el valor máximo como motor y el signo (-) como generador.

Puede apreciarse que el par máximo no depende de la resistencia rotórica  $R'_2$ ; pero el deslizamiento  $s_m$  al cual se produce dicho par máximo es proporcional a la misma. En consecuencia, se puede conseguir que el par máximo se de en diferentes velocidades mediante la introducción de resistencia adicionales. En particular, si se logra hacer  $s_m = 1$ , se obtiene el par máximo en el arranque.

Es obvio que la posibilidad de modificar la  $R'_2$  se puede realizar sólo en los motores de rotor bobinado.

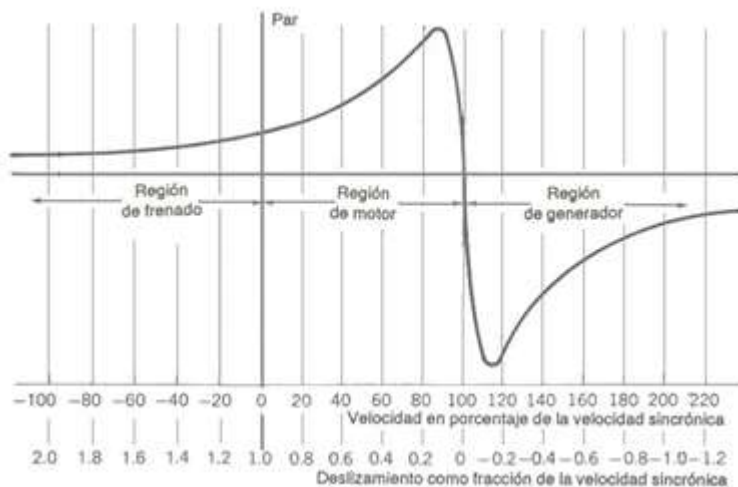


A su vez, se puede apreciar en las ecuaciones que el par motor es proporcional a  $V_1^2$ , de manera que el mismo es muy sensible a las caídas de tensión en la red de alimentación. En casos de importantes bajas de tensión puede ocurrir que el par motor no pueda vencer al par resistente, por lo que el motor se detiene o no arranca, según sea el caso.

### 5.6.2 MODOS DE FUNCIONAMIENTO

En la curva par-deslizamiento analizada en el ítem anterior se distinguen, dependiendo del valor del deslizamiento, tres zonas distintas que caracterizan tres modos de funcionamiento: motor, generado y freno.

A la derecha volvemos a representar dicha curva para todos los valores de  $s$  y su velocidad de giro en relación a la velocidad del campo sincrónico.



#### a) Régimen motor

Este es el modo de funcionamiento más característico de la máquina, corresponde al rango de deslizamientos comprendidos entre 0 y 1. En este caso, tanto la  $P_{mi}$  (potencia mecánica en el eje) como el par son positivos y el motor gira en el mismo sentido que el campo magnético.



Otra característica del generador asincrónico es que no necesita regulación de tensión, porque esta viene impuesta por la red externa. Esto hace que este generador sea una buena alternativa en centrales eólicas o en pequeñas centrales hidráulicas de caudal variable.

Sin embargo, al no poseer esta máquina de un circuito independiente de excitación, necesita obligatoriamente estar conectada a la red para conseguir el campo magnético del estator, no pudiendo entonces funcionar (en principio) como un generador aislado. Solo podrá funcionar como generador asincrónico sin conectarse a la red, mediante un sistema de autoexcitación, mediante el empleo de una batería de condensadores que aporten la energía reactiva necesaria.

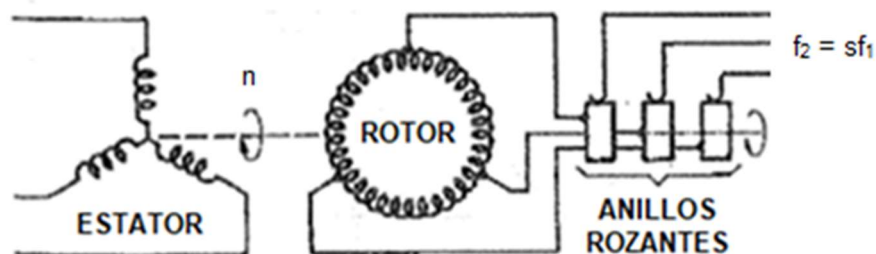
### c) Régimen de freno

En este modo de funcionamiento, la máquina trabaja con deslizamientos superiores a la unidad, lo que corresponde a velocidades negativas. En esta situación el rotor gira en sentido contrario al campo giratorio, de modo que la máquina recibe energía eléctrica de la red y energía mecánica por el eje.

Este régimen de frenado se utiliza en la práctica cuando se desea parar rápidamente un motor. La maniobra se realiza invirtiendo dos fases de la alimentación ("*frenado a contramarcha o contracorriente*"), de forma que el campo giratorio pase súbitamente a girar en sentido contrario al del rotor. Un cuidado adicional al utilizar esta maniobra, es que se pueden producir corrientes incluso muy superiores a las de arranque, por lo que los motores utilizados en estos casos deben estar preparados para ello.

### d) Convertidor de frecuencia rotativo

Por último, otro modo de funcionamiento se presenta cuando la máquina de inducción es de rotor bobinado. Si abrimos al mismo y fijamos su velocidad mediante un motor externo adosado al eje, podemos acceder y utilizar la fem ( $E_2$ ) inducida en él, para alimentar una carga a la frecuencia obtenida ( $f_2$ ). Recordar que la frecuencia de la fem rotórica depende del deslizamiento ( $f_2 = sf_1$ ).



## 5.7 ARRANQUE

Se denomina *arranque* al proceso de puesta en marcha de una máquina eléctrica, el cual, en un motor de inducción se produce cuando se conecta la tensión adecuada a los devanados del estator. Para que esto suceda, es preciso que el par de arranque sea superior al par resistente de la carga para que se obtenga un momento de aceleración que obligue a girar al rotor a una velocidad cada vez más elevada, obteniendo el régimen permanente cuando se igualan ambos pares.

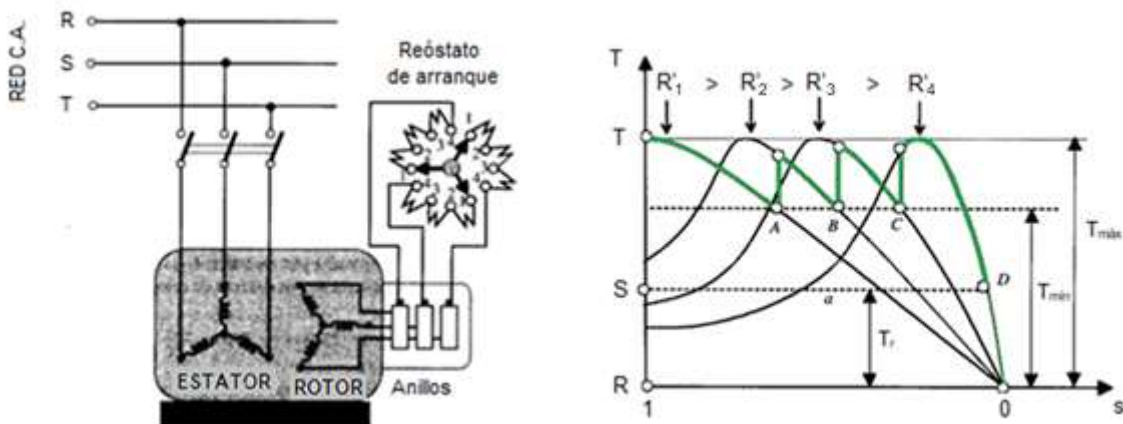
Este proceso va acompañado de un consumo elevado de corriente, del orden de 4 a 8 veces la corriente nominal, ya que el motor ofrece una baja impedancia (analizar circuito equivalente para  $s = 1$ ), entando prácticamente en cortocircuito.

Por lo general, los devanados de los motores soportan sin problemas estas corrientes de arranque, ya que las barras del rotor tienen suficiente sección y, por otra parte, el arranque dura unos pocos segundos, por lo que la temperatura no se eleva demasiado. Sin embargo, estas corrientes deben limitarse para no perturbar o sobrecargar las redes que los alimentan, ya que pueden ocasionar caídas de tensión en las líneas que perjudiquen a otras cargas, como también poner en riesgo la aislación de los alimentadores.

Para reducir las corrientes de arranque de un motor, se emplean diferentes métodos de arranque, según la máquina sea de rotor bobinado o de jaula de ardilla.

### 5.7.1 ARRANQUE DE MOTORES DE ROTOR BOBIANDO

En este tipo de motores, la corriente de arranque se puede reducir introduciendo una resistencia adicional en cada una de las fases del rotor, con la ayuda de un reóstato trifásico externo como se muestra a continuación:



En el arranque se introduce toda la resistencia adicional (posición 1), por lo que aumenta la impedancia de la máquina y se reduce la corriente inicial; conforme el motor inicia su marcha, se va eliminando resistencia del reóstato. En el último contacto (posición 4) solo está interviniendo la resistencia rotórica propia de los devanados y finaliza la operación de arranque.

Como se analizó en el punto anterior, además de reducir las corrientes de arranque, este procedimiento permite desplazar el par máximo a valores de mayor deslizamiento, pudiendo darse el mismo en el arranque. Esto facilita el arrastre de la carga, disminuyendo el tiempo de arranque hasta alcanzar las condiciones nominales del motor.

### 5.7.2 ARRANQUE DE MOTORES DE JAULA DE ARDILLA

Los motores de jaula de ardilla pueden arrancarse mediante cuatro formas: a) directo; b) autotransformador; c) estrella-triángulo; d) arranque suave.

#### **a) Arranque directo**

Como su nombre lo indica, el motor se arranca conectándolo directamente a la tensión de red. En este caso, la corriente de arranque no estará limitada durante el proceso de arranque, alcanzando los valores indicados en la planilla de datos técnicos elaborada por el fabricante. Por dicha razón, este tipo de arranque se emplea únicamente en los motores de pequeña potencia (< 5kW).

**Nota:** Existen diversas combinaciones de equipos (maniobra y protección) para conseguir este tipo de arranque, los cuales se analizarán en detalle en el proyecto de instalación de la cátedra.

#### **b) Arranque por autotransformador**

Consiste en intercalar un autotransformador entre la red y el motor, de forma que la tensión aplicada en el arranque sea solo una fracción de la nominal, para luego ir elevándola (2 o 3 escalones) hasta alcanzar sus valores de funcionamiento nominales.

Es importante tener en cuenta que, al disminuir la tensión en el arranque, lo mismo ocurrirá con el par motor, pero éste lo hará de manera cuadrática. Debe entonces asegurarse que el par de arranque para la tensión reducida sea superior al par resistente, de lo contrario la máquina no arrancará.

#### **c) 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. La máquina se conecta en estrella en el momento del arranque y se pasa después a triángulo cuando está en funcionamiento. Esta operación, generalmente se realiza con automatismos de contactores (esto se verá en detalle en el proyecto de instalaciones).

Con este procedimiento de arranque, se aplica al motor una tensión por fase de magnitud  $1/\sqrt{3}$  de la nominal; pero cuidado, esto provocará una reducción del par motor a la tercera parte de su valor. A su vez, con este método se consigue una reducción de la corriente de arranque a  $1/3$  de su valor de arranque directo.

#### **d) Arranque suave**

Con el avance de la electrónica de potencia, actualmente es común el uso de *arrancadores suave*, los cuales permiten controlar la tensión de forma progresiva desde 0 a la tensión nominal en el arranque, y al revés para la parada. De esta forma, se consigue la adaptación del motor al comportamiento de la carga, lo que evita los golpes mecánicos que se producen al aplicar escalones de tensión o arranque directo.

En el proyecto de instalaciones de la cátedra se explicará la forma de selección y utilización de estos equipos.

### **5.7.3 MOTORES DE DOBLE JAULA DE ARDILLA**

En estos motores, el rotor está constituido por dos jaulas: una externa, situada más cerca del entrehierro, tiene menor sección que la otra y presenta una alta resistividad; y otra interna, que será de mayor sección y menor resistividad. El fin de esta configuración

es conseguir aumentar la resistencia rotórica ( $R_2$ ) durante el arranque, utilizando el fenómeno de desplazamiento de la corriente.



Con estas configuraciones, se consigue que la reactancia de dispersión del rotor sea mayor para la jaula interior que para la exterior, ya que la misma posee un camino de total material ferromagnético, mientras que en la exterior las líneas de flujo se cierran por el aire.

De este modo, la corriente rotórica se distribuirá entre cada jaula dependiendo de las impedancias de las mismas.

En el momento del arranque, la frecuencia del rotor  $f_2$  coincide con la del estator, de modo que las reactancias son muy superiores a las resistencias. Como consecuencia de ello, la corriente fluye en su mayor parte por la jaula que presenta menor reactancia (la exterior). A velocidades normales las frecuencias rotóricas son despreciables, por lo que predominan las resistencias frente a las reactancias y, de este modo, la mayor parte de la corriente circula por la jaula interior que tiene menos resistencia. Con todo ello, se consigue que en el arranque la resistencia sea alta, lo que conduce a un alto par de arranque y una baja corriente. A la velocidad nominal, la resistencia es baja, con lo que se consigue un buen rendimiento.

Con este tipo de motor no es necesario ningún método auxiliar en el arranque, pudiéndose conectar al mismo directamente a la red.

## 5.8 REGULACIÓN DE LA VELOCIDAD

En algunas aplicaciones de los motores de inducción trifásicos, es preciso regular su velocidad dentro de unos márgenes determinados.

Recordemos que la velocidad del motor viene definida por la expresión:

$$n = n_1(1 - s) = \frac{60f_1}{p}(1 - s)$$

lo que indica que la velocidad de estos motores depende del deslizamiento, del número de pares de polos y de la frecuencia de alimentación.

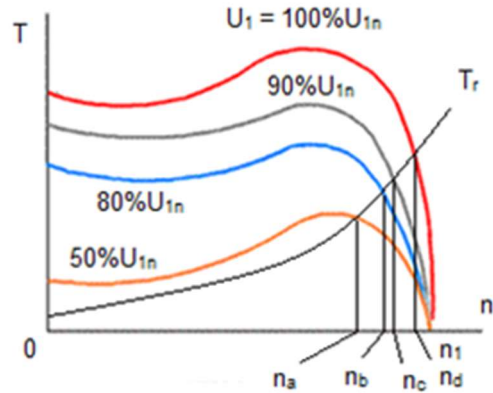
### 5.8.1 REGULACIÓN POR VARIACIÓN DE DESLIZAMIENTO

El control sobre el deslizamiento se refiere a los métodos empleados para regular la velocidad del motor sin cambia la frecuencia, los cuales se describen brevemente a continuación:

#### **Regulación por control de la tensión aplicada al estator**

En algunas ocasiones, se puede conseguir regular la velocidad mediante una ligera modificación de la tensión de alimentación, obviamente por debajo de la tensión nominal.

Este método de regulación de velocidad no es muy adecuado para cargas de par constante, ya que al variar la tensión de alimentación, el par de arranque, que depende del cuadrado de la tensión se reduce enormemente, pudiendo impedir el funcionamiento del motor. En la siguiente figura se pueden ver las diferentes velocidades que adquiere el motor para una carga con par tipo ventilador:

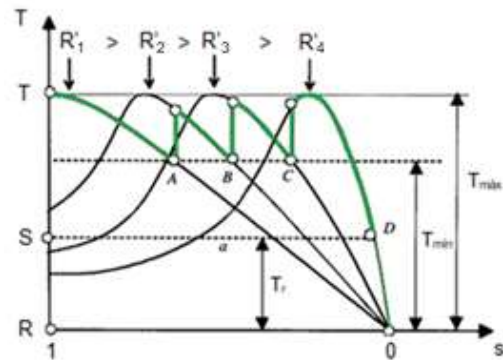


### Regulación por variación de resistencia del rotor

Obviamente, este proceso solo puede emplearse en motores que poseen rotor bobinado o con anillos. El esquema de conexión es el mismo que se utilizó para reducir las corrientes de arranque.

Puede observarse en la gráfica como, para cada valor de resistencia rotórica, corresponde una velocidad del motor diferente.

Este procedimiento tiene un bajo rendimiento debido a las grandes pérdidas provocadas por efecto Joule en el reóstato de regulación.

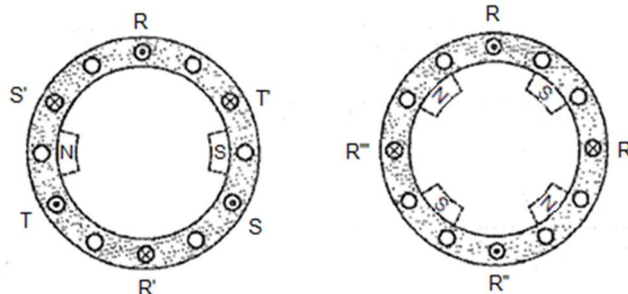


### 5.8.2 REGULACIÓN POR VARIACIÓN DEL NÚMERO DE POLOS

Variando el número de polos del estator de la máquina, cambia la velocidad del campo giratorio y en consecuencia, varía la velocidad de rotación del motor. Generalmente, por limitación de espacio en las ranuras, suelen emplearse dos combinaciones diferentes, dando lugar a dos velocidades asincrónicas cercanas a 3000, 1500, 1000, 750 rpm, etc. (a 50Hz).

Este procedimiento solo es posible para motores con rotor de jaula de ardilla, ya que el número de polos en el rotor (por inducción) debe ser igual al existente en el estator, lo que se logra automáticamente en este tipo de máquinas.

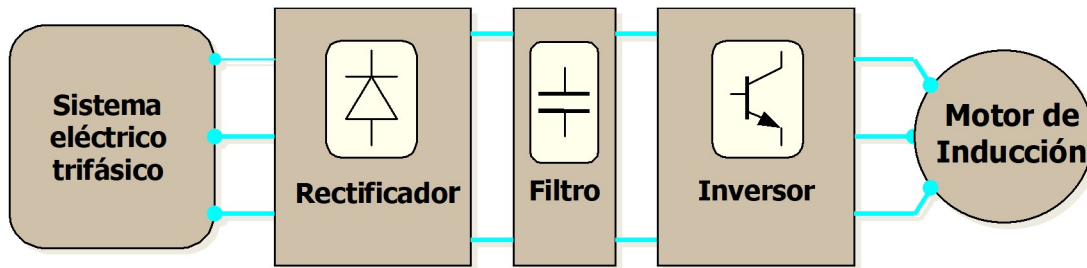
Se obtienen entonces, cambios por escalones de velocidad, comúnmente 2:1.



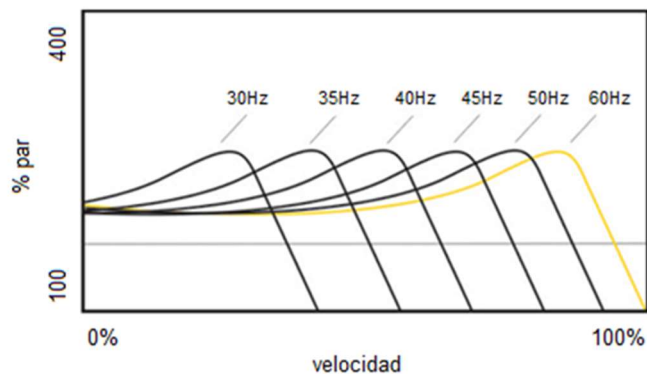
### 5.8.3 REGULACIÓN POR VARIACIÓN DE LA FRECUENCIA

Este es el sistema más efectivo para regular la velocidad de los motores de inducción, ya que varía la velocidad de sincronismo.

Los equipos que se utilizan para modificar las frecuencias se conocen con el nombre de **variadores de frecuencia** o **variadores de velocidad**, y consisten en un grupo *rectificador*, que transforma la corriente alterna de la red trifásica en corriente continua; y luego un *inversor* u *ondulador*, que transforma la c.c. anterior en c.a. trifásica, de amplitud  $U_1$  y frecuencia  $f_1$  variable, que se aplica al estator del motor.

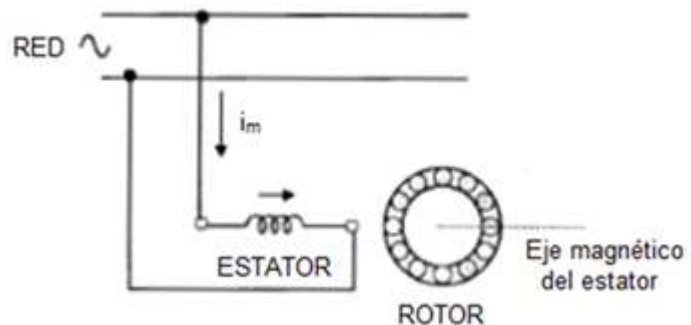


Para mantener el flujo magnético del motor constante y para que se conserve el par de la máquina, debe mantenerse constante la relación  $U_1/f_1$  (tensión aplicada al estator / frecuencia del estator). Esto da lugar a unas curvas de par  $T = f(s)$  bastante rígidas en la zona de trabajo:



### 5.9 MOTOR DE INDUCCIÓN MONOFÁSICO

Básicamente, un motor de inducción monofásico está formado por un rotor en jaula de ardilla análogo al de los motores trifásicos y un estator en el que se dispone un arrollamiento alimentado en c.a. monofásica.

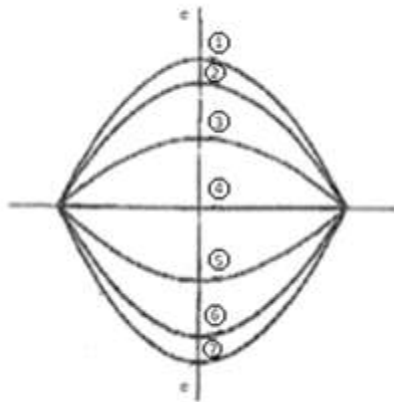


Al alimentar al arrollamiento del estator con una corriente alterna monofásica, se produce un campo alterno estacionario en el espacio distribuido de forma sinusoidal y de carácter pulsatorio.

Este campo magnético, estando el rotor parado, producirá en él corrientes alternas de la misma frecuencia (como si fuese el circuito secundario de un transformador en cortocircuito), que generarán un campo magnético cuyo eje coincidirá en el espacio con el del campo del estator; por lo que no se tendrá par resultante alguno en estas condiciones. La ausencia de par inicial de arranque representa la particularidad característica del motor monofásico y por ello, esta máquina no puede arrancar por sí misma.



El análisis del motor puede basarse en lo estudiado para el polifásico si se tiene en cuenta que: un campo alterno en el tiempo y fijo en el espacio (pulsatorio) y de distribución sinusoidal, como la producida por el arrollamiento del estator, puede representarse por dos campos de valor constante en el tiempo, de distribución armónica en el espacio que giran sincrónicamente en sentidos contrarios a velocidades mecánicas:  $(n = \pm \frac{60}{p})$ .



Distribución senoidal del campo en el entrehierro en diferentes instantes

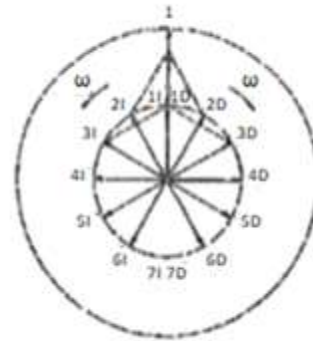
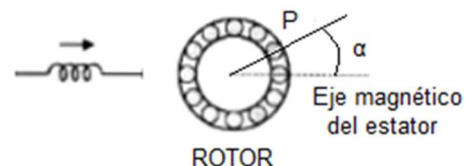


Diagrama de vectores giratorios asignados a cada campo cuya suma es siempre vertical

Si consideramos un punto P del entrehierro que forme un ángulo  $\alpha$  con el eje interpolar, el valor de la fuerza magnetomotriz (fmm) será:

$$F_m(\alpha, t) = F_{m\acute{a}x} \cos \omega_1 t \cos \alpha$$



pero  $\cos \omega_1 t \cos \alpha = \frac{1}{2} [\cos(\omega_1 t - \alpha) + \cos(\omega_1 t + \alpha)]$

entonces  $F_m(\alpha, t) = \frac{F_{m\acute{a}x}}{2} \cos(\omega_1 t + \alpha) + \frac{F_{m\acute{a}x}}{2} \cos(\omega_1 t - \alpha)$

Cada uno de estos campos giratorios (directo e indirecto) dará lugar a una característica par-deslizamiento, análoga a la obtenida para los motores trifásicos. Resulta válido entonces, analizar al motor monofásico de inducción reemplazando al campo alterno por dos campos giratorios de distinta secuencia, aplicando luego el principio de superposición.

Si el motor gira en sentido del campo positivo directo (elegido arbitrariamente) a velocidad  $n$ , el deslizamiento de este campo  $s_d$  tendrá un valor:

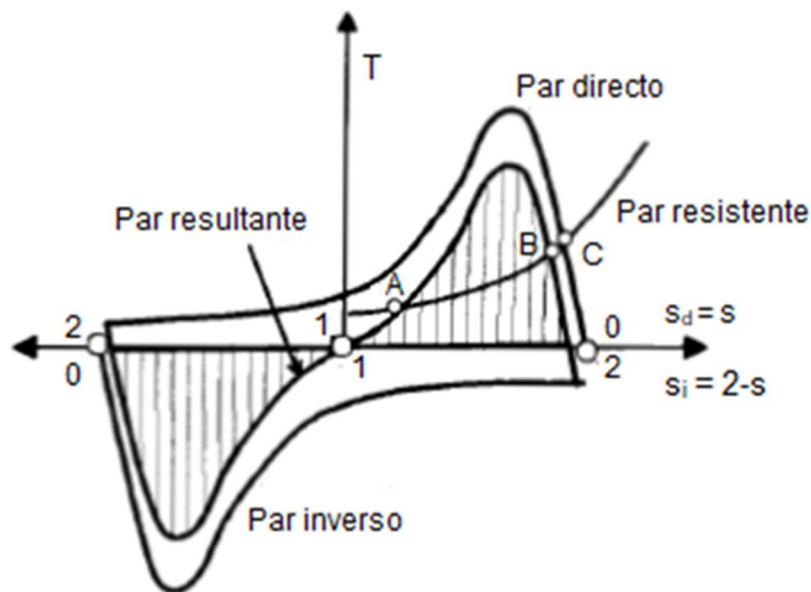
$$s_d = s = \frac{n_1 - n}{n_1} = 1 - \frac{n}{n_1}$$

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

$$s_i = \frac{n_1 - (-n)}{n_1} = 2 - s$$

expresión que relaciona los deslizamientos de ambos campos.

Las características  $T = f(s)$  para cada uno de los sistemas giratorios y su resultante se muestran en la siguiente figura:

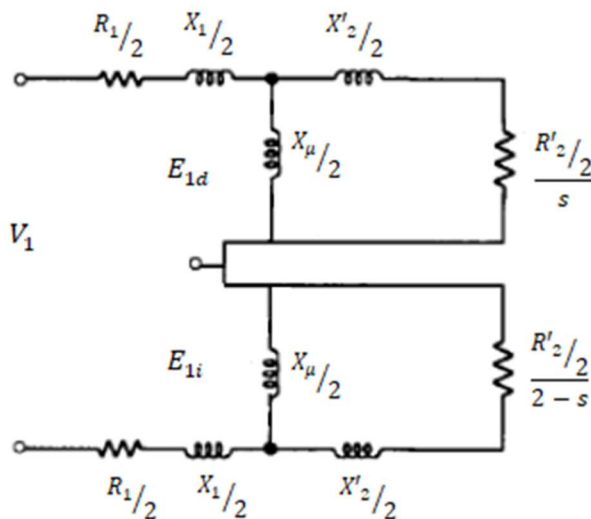


Debe observarse que el campo directo produce un par positivo, mientras que el campo inverso crea un par negativo. En el arranque,  $s_d = s_i = 1$ , se tiene un par nulo y en consecuencia, como ya se ha indicado, el motor no puede arrancar. Sin embargo, si por cualquier procedimiento se ayudara a girar el rotor en un sentido, aparecerá inmediatamente un par de arranque que, si es superior al par resistente, pondrá en funcionamiento la máquina.

### 5.9.1 CIRCUITO EQUIVALENTE

Teniendo en cuenta la teoría del doble campo giratorio, podemos considerar que el motor monofásico es equivalente a dos motores trifásicos iguales, cuyos rotores están rígidamente unidos por sus ejes, y cuyos estatores están alimentados con distinta secuencia, de modo que los campos magnéticos creados por ellos giran en el espacio en sentidos contrarios.

El circuito equivalente de la máquina, cuyo análisis no se desarrollará aquí por escapar a los objetivos de la cátedra (si se desea, éste se encuentra en el libro de seguimiento de la cátedra: “*Máquinas Eléctricas*, Jesús Fraile Mora”), tendrá la siguiente configuración:



Se ve que las resistencias rotóricas se modifican de un modo diferente para cada campo.

Se puede hacer un análisis cuantitativo de esta máquina de un modo similar al que se utilizó en el análisis del motor trifásico. Acá se disponen de dos resistencias de carga de campo directo e inverso, cuyos valores son:

$$R'_{cd} = \frac{R'_2}{2} \left( \frac{1}{s} - 1 \right) = \frac{R'_2}{2} \frac{1-s}{s} \quad ; \quad R'_{ci} = \frac{R'_2}{2} \left( \frac{1}{2-s} - 1 \right) = \frac{R'_2}{2} \frac{1-s}{2-s}$$

que dan lugar a las potencias mecánicas internas:

$$(P_{mi})_d = R'_{cd} I_{2d}^2 \quad ; \quad (P_{mi})_i = R'_{ci} I_{2i}^2$$

lo que corresponde a una potencia mecánica interna total:

$$P_{mi} = (P_{mi})_d + (P_{mi})_i = \frac{R'_2}{2} (1 - s) \left[ \frac{I_{2d}'^2}{s} - \frac{I_{2i}'^2}{2 - s} \right]$$

Si se denomina  $\Omega_1 = 2\pi n_1/60$  a la velocidad angular de sincronismo (radianes mecánicos por segundo), el par neto en el eje es igual a:

$$T = \frac{P_{mi}}{\Omega_1(1 - s)} = \frac{1}{\Omega_1} \frac{R'_2}{2} \left[ \frac{I_{2d}'^2}{s} - \frac{I_{2i}'^2}{2 - s} \right]$$

## 5.9.2 TIPOS DE MOTORES MONOFÁSICOS – SISTEMAS DE ARRANQUE

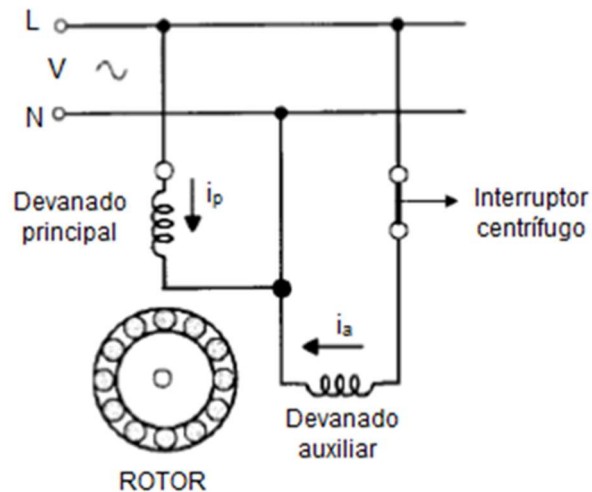
Los distintos tipos de motores se clasifican según el sistema de arranque que posean. Se han ideado diversos métodos para crear un par de arranque, los que presentan características particulares. El método a utilizar dependerá de las exigencias de arranque, economía de construcción, seguridad de servicio, corriente de arranque admisible, etc., todos factores difíciles de conjugar.

Como se vio, el motor monofásico no tiene par de arranque, pero una vez accionado el mismo, desarrolla un par interno que acelera el rotor hasta conseguir la velocidad de régimen. Existen tres métodos para conseguir accionar el motor, los cuales se describen brevemente a continuación:

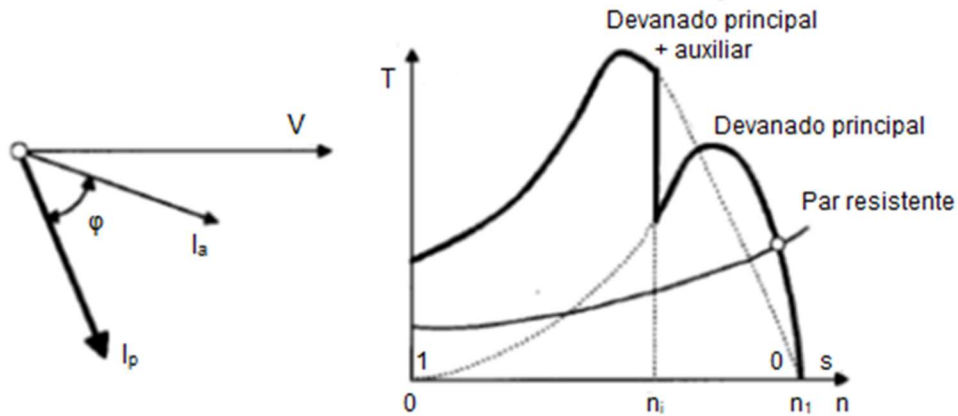
### a) Motor de fase partida o con arrollamiento auxiliar

En este motor se sitúan en el estator dos devanados desfasados  $90^\circ$  eléctricos en el espacio como se observa en la figura:

El devanado *principal*, cubre  $2/3$  de las ranuras y tiene muchas espiras de hilo grueso, por lo que ofrece una gran reactancia y baja resistencia y se conecta directamente a la red, mientras que el *auxiliar* o *de arranque*, cubre el resto del estator, tienen pocas espiras de hilo delgado y ofrece, por ello, alta resistencia y baja reactancia. Se conecta en serie con un interruptor centrífugo situado en el eje del motor.



A continuación se representa el diagrama fasorial, donde se observa un ángulo de desfase  $\phi$  entre las corrientes primaria  $i_p$  y auxiliar  $i_a$ , el cual resulta de la diferencia constructiva de los arrollamientos, principalmente debido a que  $X_p > X_a$ .

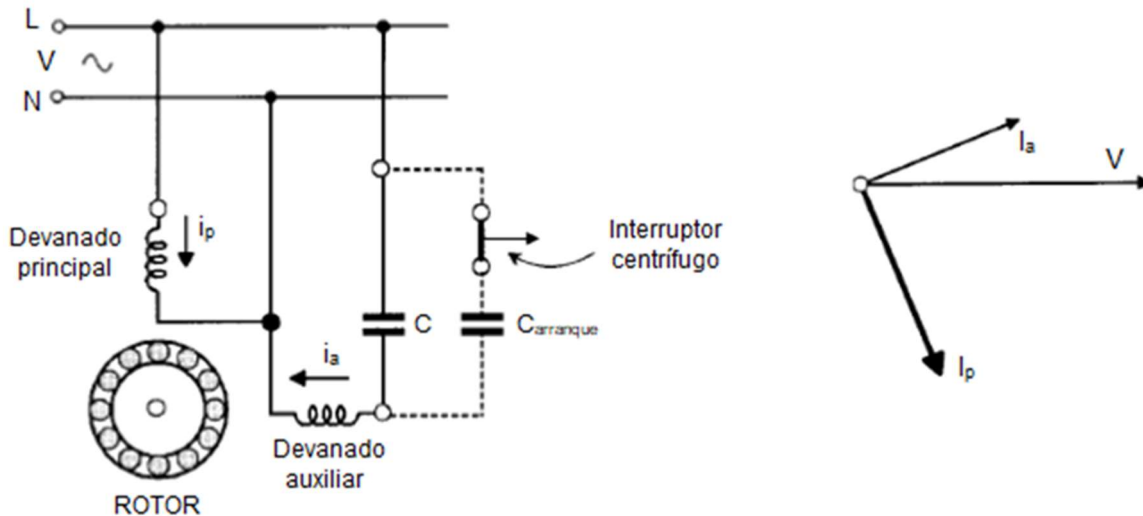


Al estar los arrollamientos  $90^\circ$  en el espacio, resulta un campo giratorio de naturaleza elíptica debido a que los módulos de  $I_a$  e  $I_p$  no son iguales y no forman entre sí  $90^\circ$ ; sin embargo, este campo giratorio produce el despegue del motor. Cuando la velocidad del rotor alcanza un valor del orden de 70% del nominal, el interruptor centrífugo desconecta el arrollamiento auxiliar que, al estar realizado con un hilo delgado, no es capaz de soportar un funcionamiento continuo.

Este tipo de motores se utilizan en ventiladores, bombas centrífugas, lavadoras, etc., para potencias desde 50 a 500W.

**b) Motor con arranque por capacitor**

En este caso, se conecta un capacitor en serie con el arrollamiento auxiliar, con el fin de que el desfase entre  $I_p$  e  $I_a$  sea lo más próximo posible a  $90^\circ$ .



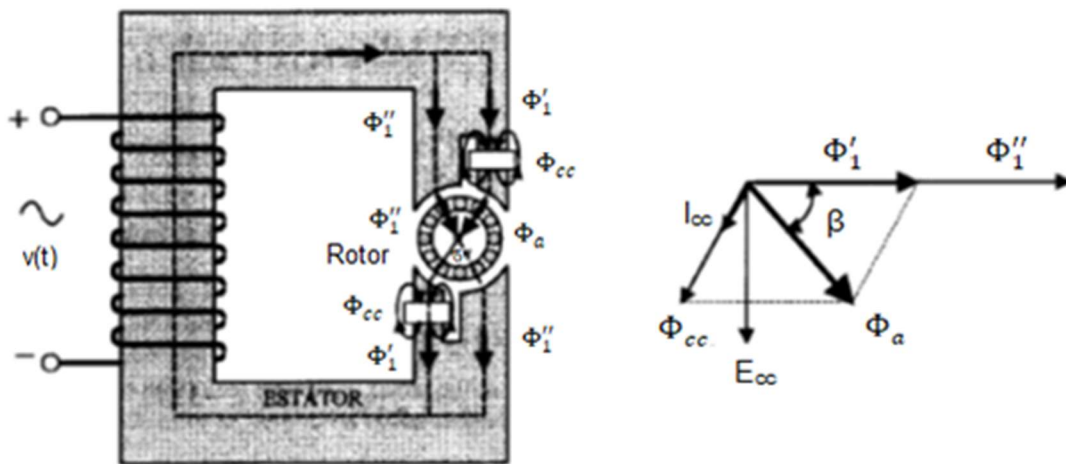
Los capacitores utilizados son del tipo electrolítico y permanecen conectados únicamente durante el período de arranque. Una vez desconectado el capacitor, el motor queda funcionando como monofásico, empleando el arrollamiento principal.

A veces, como se observa en la figura, con objeto de mejorar las características del par y el f.d.p. de la máquina durante su funcionamiento, se emplean, conjuntamente con el capacitor de arranque, capacitores de papel impregnados con aceite que trabajan de forma continua.

Este tipo de motores se emplean en compresores, bombas, algunos tipos de máquinas herramientas, equipos de refrigeración y aire acondicionado, etc. Se construyen para potencias que llegan a 6kW.

### c) Motor con polos de sombra

Este es el tipo de motor monofásico más pequeño. El estator es de polos salientes, los cuales poseen una ranura que aloja el lado activo de un arrollamiento auxiliar denominado *espira de sombra*. El rotor es en forma de jaula de ardilla.



Parte del flujo principal del estator  $\Phi'_1$  atraviesa esta espira, induciendo una fem  $E_{cc}$  que a su vez produce una corriente  $I_{cc}$  en retraso que da lugar a un flujo  $\Phi_{cc}$ , que sumado vectorialmente con  $\Phi'_1$ , da como resultado un flujo auxiliar  $\Phi_a$  desfasado  $\beta$  grados en el tiempo respecto de  $\Phi''_1$  que atraviesa la otra parte del polo. Ambos flujos  $\Phi_a$  y  $\Phi''_1$  se encuentran desplazados también en el espacio un ángulo  $\delta$ , en consecuencia se produce un campo giratorio que se dirige hacia la espira de sombra, dando origen a un par en el eje.

El sentido de giro de estos motores es único y es el que resulta de ir desde el eje de un polo hacia el eje de la espira de sombra colocada en él.

La aplicación de estos motores es muy limitada: ventiladores de uso doméstico, equipos de aire acondicionado, tocadiscos, máquinas fotocopadoras, bombas de desagüe de lavadoras, etc. Se fabrican con potencias que llegan hasta 1/20kW.