

## *QUINTA PARTE*

### *MAQUINAS ELECTRICAS ROTATIVAS*

#### **Máquina eléctrica rotativa**

Es un aparato electromagnético que tiene una parte giratoria (armadura o rotor) capaz de transformar energía mecánica en energía eléctrica (**generador**) o energía eléctrica en energía mecánica (**motor eléctrico**).

#### **Máquinas eléctricas de corriente directa (CD)**

##### **Generador de corriente directa**

El rotor o armadura recibe energía mecánica rotativa y el embobinado de campo fijo (estator), una excitación de CD. En la armadura se induce un voltaje de corriente directa “rizado” por efecto del conmutador que conecta el rotor con la carga. La excitación del campo magnético fijo es con CD producida por el mismo generador, la cual se inicia gracias al magnetismo residual. Mientras más polos tenga el generador, más perfecto (menos rizado) será el voltaje generado.

Generador de 824 MW, 90 rpm, 60 Hz, central hidroeléctrica de Itaipú (Brasil-Paraguay)



##### **Motor de corriente directa**

Es similar al generador de CD, pero al alimentar el rotor con CD, este interactúa con el campo magnético fijo y produce el par rotativo. Un completo control de par, potencia y velocidad hace que se utilicen en procesos donde se deben sincronizar varias máquinas, como en las rotativas de

los periódicos.

##### **Conmutador**

El devanado del rotor de los generadores y motores de corriente directa se conecta al exterior por medio de un sistema de contactos (conmutador) formado por un colector dividido en segmentos llamados delgas las cuales, al ir haciendo contacto con los carbonos, van cambiando la polaridad del devanado del rotor en cada paso, de manera que siempre el campo magnético del rotor tenga la misma polaridad sin importar el ángulo en que se encuentre posicionado.



Aunque por facilidad de fabricación el núcleo de una máquina de CD se construye con acero laminado, no es necesario que las láminas sean muy delgadas, ya que en CD no hay muchas pérdidas por histéresis.

##### **Motor paso a paso**

Son motores que por tener un rotor de múltiples polos salientes y un circuito de campo que puede ser controlado por medios electrónicos, se usan para posicionamientos y carreras exactas. El par rotativo se logra por la **fuerza mecánica entre los polos** del material magnético del rotor y los polos del estator. Al igual que en un electromagneto, no hay embobinado secundario.

## Máquinas eléctricas de corriente alterna (CA)

### Generador de corriente alterna

El rotor recibe energía mecánica rotativa y una excitación de CD a través de anillos rozantes para producir un campo giratorio, induciendo un voltaje alterno en el estator. El voltaje inducido puede ser monofásico o polifásico. La CD para la excitación puede producirse con un rectificador que aproveche la CA generada inicialmente gracias al magnetismo residual del rotor.

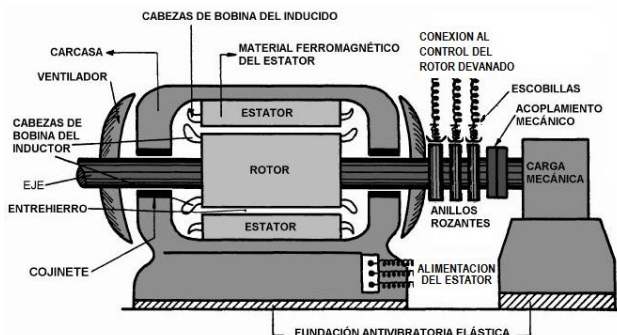
### Motor sincrónico

Es similar al generador de corriente alterna, pero al aplicar un voltaje polifásico al estator, este crea un campo rotativo que hace girar al rotor excitado con CD a velocidad sincrónica. Son muy eficientes a baja velocidad y pueden funcionar con factor de potencia adelantado.

### Motor lineal

Se utilizan en equipo de transporte como los monorrieles. Existen de inducción y sincrónicos, y se pueden visualizar como motores “desenrollados”.

Partes de un motor de inducción de rotor devanado



### Estator

Es la parte fija de una máquina eléctrica rotativa, compuesta por un núcleo de acero laminado de alto contenido de silicio, que hace que las pérdidas por histéresis sean reducidas, y por un devanado de cobre aislado con barniz aislante. Está montado dentro de una estructura metálica, la *carcasa*, que le da unidad a toda la máquina.

Estator de un motor de inducción



### Rotor

Es la parte móvil de una máquina eléctrica rotativa, está compuesto por un núcleo de acero laminado similar al del estator, y un devanado de cobre. Gira sobre un eje dentro del estator, eje que está montado en cojinetes (“rollers”) de bolas. En los motores más pequeños el eje está montado en bujes de bronce.

Rotor de un motor de inducción



### Carcasa

Es la envoltura exterior de metal de la máquina eléctrica, donde va montado el estator, y que le da unidad al conjunto, tiene también una base con huecos de anclaje para fijar la máquina. La carcasa también puede tener aletas de ventilación para disipar el calor interno de la máquina.

Carcasa de un motor de inducción

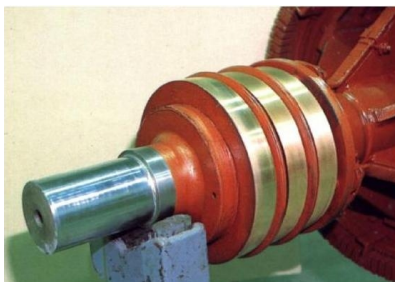


### Ventilador

Algunas máquinas tienen incorporado al eje del rotor un ventilador que ayuda a disipar el calor producido por las pérdidas de la máquina.

### Anillos rozantes

Los generadores de corriente alterna y motores de rotor devanado tienen el devanado del rotor conectado a unos anillos conductores que giran en el mismo eje, aislados del resto del motor. Los anillos se conectan por medio de escobillas de metal o carbones a los conductores exteriores.



### Caja de conexiones

Es una caja adosada a la carcasa donde se alojan las conexiones con los conductores externos. Puede tener terminales de tornillo o de presión. Algunos motores pequeños tienen solamente los extremos de los cables aislados que salen del interior del motor.

### Número de polos

Es la cantidad de polos magnéticos por fase que se logran en el estator y/o el rotor por efecto del diseño del núcleo y de los devanados. El caso más simple es el de una máquina de 2 polos.

## El motor de inducción

El motor más utilizado por ser robusto y de bajo precio es el motor de inducción, en especial el de jaula de ardilla, al cual dedicaremos el resto del capítulo, y que tiene las siguientes características:

- Construcción robusta
- Resistente a ambientes contaminados
- Fácil de fabricar
- Poco mantenimiento
- Tamaños estandarizados
- Disponibilidad en el mercado
- Se fabrican trifásicos y monofásicos
- Control de arranque simple a velocidad fija
- Control de velocidad con variadores de frecuencia si la aplicación lo requiere

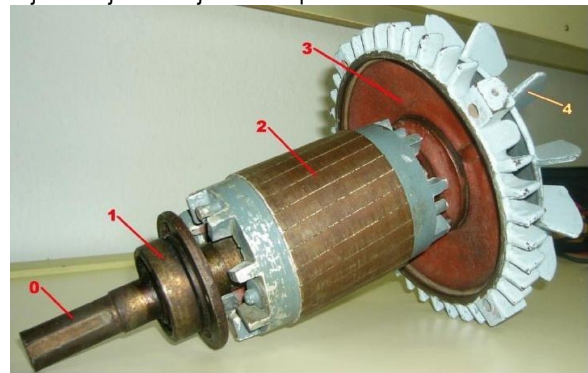
Su principal desventaja fue hasta hace pocos años que se tenía un control limitado sobre la velocidad, el par y el factor de potencia, pero estas desventajas se han superado en gran medida con los convertidores de frecuencia electrónicos gracias a los avances en la electrónica de potencia.

Anteriormente era necesario utilizar motores de corriente directa, mucho más costosos, para aplicaciones que requerían control continuo de la velocidad del motor.

### El motor de inducción de “jaula de ardilla”

Es de fabricación sencilla, ya que los arrollados del rotor están formados por barras en cortocircuito. No hay conexiones exteriores del rotor, y sólo se conecta el estator en la caja de conexiones. La construcción con barras inclinadas hace más suave y silencioso el funcionamiento.

Rotor de jaula con barras inclinadas  
0=eje 1=cojinete 2=jaula 3=tapa lateral carcasa 4=ventilador



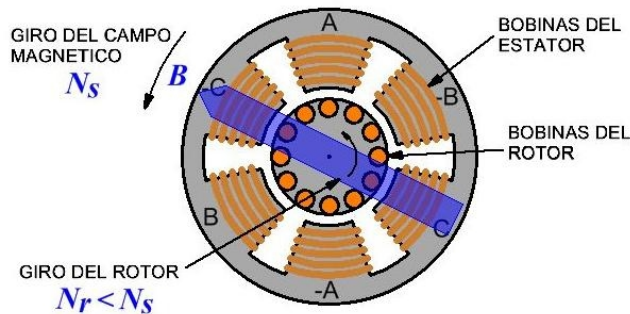


Motor moderno de inducción de jaula de ardilla



### Funcionamiento del motor de inducción

1. Las bobinas del “estator” producen un campo magnético giratorio de magnitud constante (teorema de Ferraris) que abarca todo el núcleo, y que “corta” las bobinas en cortocircuito.
2. En las bobinas del “rotor” en cortocircuito se induce un voltaje que, por la baja resistencia, produce una corriente elevada.



3. El campo magnético giratorio ejerce sobre los conductores del rotor una fuerza mecánica

$$F = I L B \sin \theta$$

cuya resultante es un par angular

$$T = D I L B \sin \theta$$

4. Este par rotativo se traslada al eje del rotor, el cual actúa sobre la carga mecánica
5. La velocidad de rotación del rotor es menor que la del campo magnético, la diferencia se llama “deslizamiento”.

### Velocidades rotativas y deslizamiento

El **campo magnético** gira a una velocidad que depende de la frecuencia de la corriente alterna y del número de polos de cada fase del estator. La velocidad de rotación  $N_s$  del campo magnético se llama **velocidad sincrónica** del motor y se mide en

**revoluciones por minuto** (RPM o 1/min).

$$N_s = 60 \frac{f}{P/2} \text{ RPM}$$

Así tenemos que a 60 Hz, para un motor de 2 polos, la velocidad sincrónica es de 3600 rpm, para un motor de 4 polos es de 1800 rpm, para uno de 6 polos es de 1200 rpm, y para uno de 8 polos es de 900 rpm.

La **velocidad de rotación**  $N_r$  a plena carga se llama velocidad “nominal” o “asíncrona” del motor y se mide también en RPM. Es la velocidad sincrónica menos el deslizamiento. El rotor de un motor asincrónico nunca alcanza la velocidad sincrónica debido a que es necesaria una diferencia de velocidad angular entre el campo magnético producido por el estator (velocidad sincrónica  $N_s$ ), y el giro del rotor (velocidad asíncrona  $N_r$ ) para que se produzca una corriente inducida en las bobinas del rotor y exista una fuerza. El deslizamiento  $s$  es la relación entre la diferencia de velocidades y la velocidad sincrónica.

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

$$N_r = N_s(1 - s) \text{ RPM}$$

La **variación del flujo magnético** que produce el voltaje inducido depende de cómo las bobinas del rotor “ven” la rotación del campo magnético.

$$v_2(t) = \frac{d\Phi_2}{dt} = s \frac{d\Phi_1}{dt} = s v_1(t)$$

Si no hubiera deslizamiento, el voltaje en el rotor sería nulo. La **frecuencia del voltaje inducido** es

$$f_r = s f \text{ Hz}$$

Velocidades sincrónicas (asíncronas) típicas

POLOS / FASE	RPM a 60 Hz	RPM a 50 Hz
2	3600 (3450)	3000
4	1800 (1725)	1500
6	1200	1000
8	900	750
12	600	500

## Motores de varias velocidades

En algunas aplicaciones que requieren una velocidad baja y una alta, se usan motores con dos devanados de estator o con el devanado reconectable, de manera que se puedan agrupar los polos logrando que en una conexión funcionen con el doble o triple de polos que en la otra. Los más comunes son para una velocidad baja y una alta que es el doble de la baja. Ejemplo: un motor trifásico reconectable de 600 / 1200 rpm, se logra con un motor trifásico de 60 Hz que se pueda conectar en 12 o en 6 polos, respectivamente. También se construyen motores asíncronos de 3 velocidades.

Así, hay motores de varias velocidades de dos tipos:

- Embobinados separados
- Embobinados reconectables

Gracias a la popularidad de los variadores de frecuencia, han entrado en desuso.

## Sentido de giro del motor de inducción trifásico

El sentido de giro en este motor depende de la rotación del campo magnético, y este de la conexión de las fases en el estator. Se logra invertir el sentido de giro con solo invertir el orden de dos de las fases en la alimentación del motor. Para cambiar el sentido de giro a voluntad porque la máquina así lo requiere, se utiliza un *arrancador reversible*.

Las fases R-S-T, S-T-R y T-R-S conectadas a los terminales U, V y W del motor producirán el mismo sentido de giro, ya que el orden se mantiene y también el sentido de giro del campo magnético.

Si se permutan dos fases se invertirá el sentido de giro, entonces R-T-S, S-R-T y T-S-R producirán el sentido contrario.

En el sistema norteamericano, las fases R, S y T se llaman L1, L2 y L3, y las terminales del motor son T1, T2 y T3.

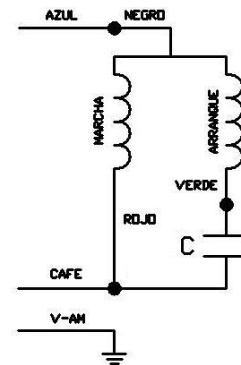
## Sentido de giro del motor de inducción monofásico

En un motor de inducción monofásico, normalmente no hay un sentido de giro predeterminado ya que el campo es pulsante. El sentido de giro dependerá del impulso inicial. Para conseguir este impulso inicial se utilizan las técnicas del embobinado auxiliar o del embobinado de arranque.

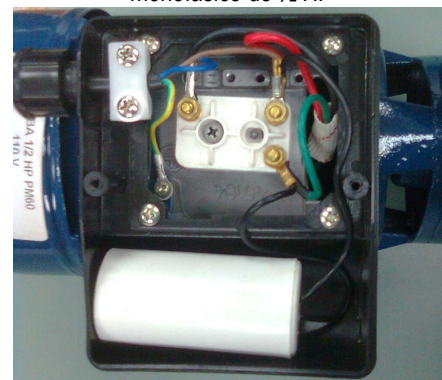
En ambos casos, el embobinado auxiliar o la bobina de arranque van en serie con un capacitor, creando un campo magnético desfasado aproximadamente  $90^\circ$  con el campo magnético principal, y produciendo un par de arranque que determina el sentido de giro.

La inversión del giro se logra invirtiendo los terminales de las bobinas de arranque o auxiliar, para que el campo auxiliar sea inverso.

CONEXIONES MOTOR MONOFASICO  
ARRANQUE POR CONDENSADOR



Caja de conexiones y condensador de arranque de un motor monofásico de 1/2 HP



## Circuito equivalente de un motor de inducción

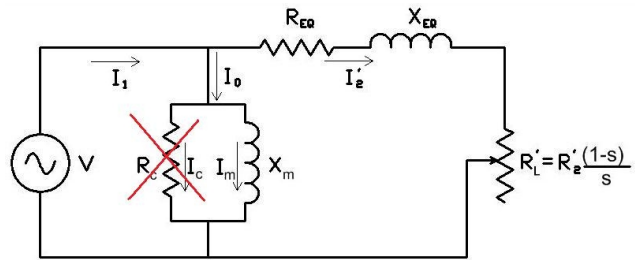
El circuito equivalente es análogo al de un transformador. En el caso de un motor trifásico, el circuito equivalente corresponde a solo una de las fases.

1.  $R_1$  y  $R_2$  representan la resistencia de los devanados del estator y del rotor, y se diseñan con una magnitud reducida para que las pérdidas en el cobre sean bajas.
2. Los flujos de dispersión representan dos reactancias en serie  $X_1$  y  $X_2$ , para el estator y el

rotor, respectivamente.

- La corriente  $I_m$  por la reactancia  $X_m$  representa la corriente de magnetización.  $X_m$  es media debido a que la densidad de flujo se mantiene por el entrehierro en la parte más lineal de la curva de magnetización, pero el entrehierro hace que la reactancia no llegue a ser muy elevada.
- La corriente  $I_c$  por la resistencia  $R_c$  representa las pérdidas en el hierro causadas por las corrientes parásitas y por el calentamiento del hierro debido a la histéresis.  $R_c$  normalmente es alta por la construcción del núcleo con láminas delgadas y también porque el entrehierro reduce el efecto de histéresis.
- El estator "vé" a la resistencia del rotor como una resistencia variable  $R_2/s$ , debido a que el voltaje en el rotor  $V_2 = s V_1$ .
- La resistencia  $R_L$  representa la carga mecánica, la cual es variable.

Circuito equivalente simplificado de un motor de inducción.  
Las pérdidas en el hierro (en  $R_c$ ) se pueden despreciar.



$$R_{EQ} = R_1 + R'_2 \quad X_{EQ} = X_1 + X'_2$$

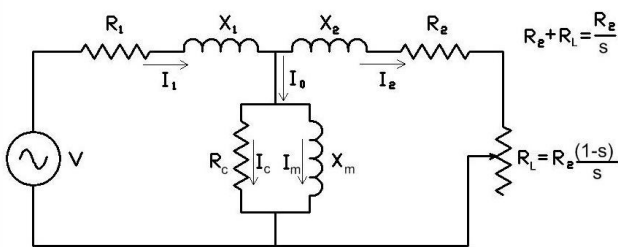
$$Z_{EQ} = R_{EQ} + j X_{EQ} = R_1 + R'_2 + j(X_1 + X'_2)$$

### Pruebas de un motor

Las pruebas son similares a las de un transformador en vacío y en cortocircuito, y son:

- Medición de la resistencia del estator  $R_1$**  con el método de voltaje y corriente de CD. Debido a que la resistencia en CA es mayor que en CD por el efecto de piel, se debe aumentar el valor obtenido con CD entre un 10% y un 25%. Si los embobinados están permanentemente conectados en "Y", entonces al medir entre dos terminales estaríamos midiendo  $2R_1$ , y si están permanentemente conectados en "Δ", estaríamos midiendo  $2/3$  de  $R_1$ .
- Prueba en vacío**, sin carga acoplada al eje, permite medir las pérdidas en el eje y la corriente de magnetización. En un motor existe un entrehierro debido a que el rotor debe girar por dentro del estator. Este entrehierro hace que la reluctancia del núcleo sea comparativamente mucho mayor que en un transformador, y que el acero opere en la parte lineal de la curva de magnetización, haciendo las pérdidas en el hierro menores pero manteniendo una corriente de magnetización alta en comparación con las pérdidas en el hierro, y entonces la potencia eléctrica  $P_E$  medida en esta prueba representa principalmente a las pérdidas en el eje por rozamiento y ventilación,  $P_{PE}$ , y a las pérdidas en el cobre del estator  $P_{CE}$ . Por esto algunos textos eliminan  $R_C$  del circuito equivalente. En vacío la resistencia de carga  $R_L$  es mucho mayor que  $Z_{EQ}$ , de manera que  $Z_{EQ}$  se puede despreciar, y así se

Circuito equivalente de un motor de inducción



La potencia por fase suministrada al rotor, vista desde el estator, es:  $P_R = I_2 V_1 = I_2 \frac{V_2}{s} = I_2^2 \frac{R_2}{s}$

$$P_R = I_2^2 \frac{R_2}{s}$$

La pérdida por fase en el cobre en el rotor:  $I_2^2 R_2$

Entonces la potencia mecánica por fase es:

$$P_M = I_2^2 \frac{R_2}{s} - I_2^2 R_2 = I_2^2 R_2 \frac{1-s}{s}$$

Así definimos una resistencia de carga  $R_L$ :

$$R_L = R_2 \frac{1-s}{s}$$

### Circuito equivalente simplificado

El circuito equivalente se puede simplificar un poco refiriendo todos los parámetros al lado del estator. De esta manera se simplifican las pruebas para medir los parámetros, y se consigue una referencia de impedancias vistas desde el lado donde se aplica el voltaje.

pueden deducir algunos valores:

$$P_{PE} = P_E - P_{CE} = P_E - 3I_1^2 R_1$$

Para 1 fase:  $R'_{Lvacio} = \frac{V_F^2}{P_{PE}/3}$   $R_2' = R'_{Lvacio} \frac{s}{1-s}$

$$\bar{I}_2 = \frac{V_F}{R_L + R_2} \angle 0^\circ \quad \bar{I}_m = \sqrt{I_1^2 - I_2^2} \angle -90^\circ$$

$$X_m = \frac{V_F}{I_m}$$

3. **Prueba de rotor bloqueado**, permite determinar la impedancia equivalente. Con el rotor frenado, o bien en el instante del arranque, no hay movimiento, y por tanto, no hay carga mecánica. Esta prueba se hace a un voltaje reducido, aumentándolo hasta alcanzar la corriente nominal del motor. Como el voltaje será una fracción del voltaje nominal, se podrán desprestigiar las corrientes de magnetización y de pérdidas en el hierro. Toda la potencia real trifásica corresponde a las pérdidas en el cobre,  $P_{CU} = P_{CE} + P_{CR}$ .

Para 1 fase:  $P = \frac{P_{CU}}{3}$   $I_2' = I_1$

$$Z_{EQ} = \frac{V_F}{I_2'} \quad R_{EQ} = \frac{P}{I_2'^2} \quad X_{EQ} = \sqrt{Z_{EQ}^2 - R_{EQ}^2}$$

La prueba de rotor bloqueado a voltaje nominal entregaría resultados erróneos, ya que la corriente resulta demasiado alta – entre 5 y 10 veces la nominal – y se produce una magnetización mucho mayor, por lo que ya las pérdidas en el hierro dejan de ser despreciables, perdiendo validez algunas de las aproximaciones supuestas en las pruebas. Además las corrientes elevadas producen un calentamiento excesivo de los devanados del estator.

Estas son las condiciones en el arranque de un motor asincrónico, por lo que en motores grandes de unos 30 HP o mayores resulta conveniente usar métodos de arranque a voltaje reducido, tales como el estrella-delta o con autotransformador de arranque. Actualmente los controles electrónicos de arranque suave con rampa ajustable proporcionan soluciones económicas y versátiles para el arranque de grandes motores de inducción, reduciendo las corrientes de arranque y el calentamiento del cobre y el hierro.

## Potencia y pérdidas en una máquina eléctrica

La potencia mecánica que puede entregar un motor en su eje y transmitirla a la carga mecánica acoplada, corresponde a la potencia eléctrica total requerida de la fuente menos la potencia utilizada en las pérdidas.

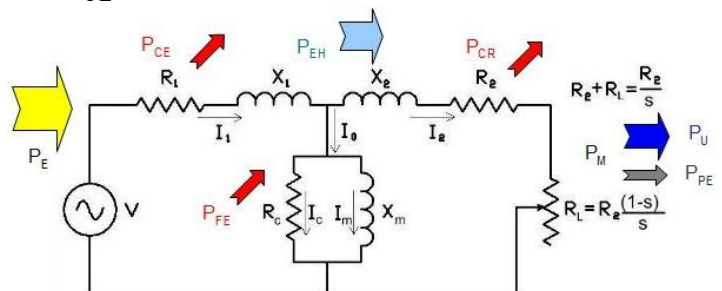
Las pérdidas electromagnéticas en una máquina eléctrica son análogas a las pérdidas en un transformador. Hay pérdidas en el cobre de los devanados, y pérdidas en el núcleo, tanto en el estator como en el rotor.

Además hay pérdidas mecánicas, por fricción mecánica en los cojinetes, y por la fricción del aire del ventilador.

Al analizar un circuito que incluye motores asincrónicos a plena carga, dentro de pequeñas variaciones de voltaje, se debe considerar la potencia como constante, ya que la potencia depende principalmente de la carga mecánica y no del voltaje. De manera que, a menor de tensión en la alimentación, mayor deslizamiento y mayor corriente, al contrario de lo que pasa con una carga resistiva, donde la potencia es proporcional al cuadrado del voltaje.

### La potencia en el circuito equivalente

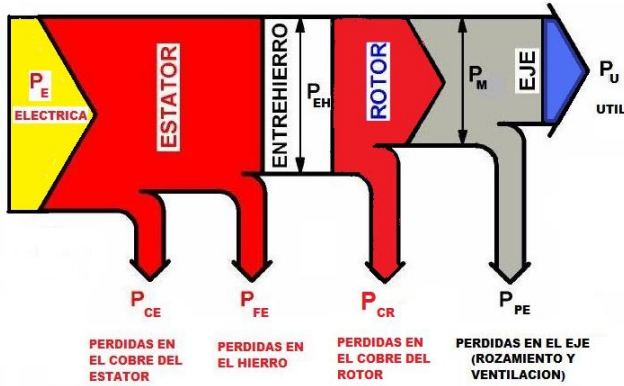
1. La potencia de entrada  $P_E$  es solamente eléctrica, y se mide con el voltaje y la corriente fasoriales.
2. La potencia de pérdidas en el cobre se divide entre el estator  $P_{CE}$  y el rotor  $P_{CR}$
3. Las pérdidas en el hierro  $P_{FE}$  equivalen a la disipación en  $R_C$
4. La potencia  $P_{EH}$  en el entrehierro es la potencia que cruza el entrehierro, después de las pérdidas en el estator y en el núcleo, y es igual a la entregada a la serie  $R_2 + R_L = R_2 / s$
5. La potencia motriz  $P_M$  disipada en la resistencia de carga equivale a la potencia mecánica en el eje, la cual se divide en potencia útil  $P_U$  y pérdidas mecánicas en el eje por rozamiento y ventilación  $P_{PE}$ .



$$P_{EH} = 3I_2^2(R_2 + R_L) = \frac{3I_2^2 R_2}{s}$$

$$P_{CR} = 3I_2^2 R_2 \quad P_{CR} = s P_{EH}$$

Balance de potencia y eficiencia en un motor de inducción



$$P_M = P_{EH} - P_{CR} = P_{EH} - s P_{EH} = (1-s) P_{EH}$$

$$P_M = \frac{3I_2^2(1-s)R_2}{s} = 3I_2^2 R_L$$

$$P_U = P_M - P_{PE}$$

Potencia eléctrica y potencia mecánica:

$$P_E = \sqrt{3} V_L I_L \cos \phi = P_U + P_{PE} + P_{FE} + P_{CE} + P_{CR}$$

$$\text{Eficiencia: } \eta = \frac{P_U}{P_E} = \frac{P_U}{\sqrt{3} V_L I_L \cos \phi}$$

La eficiencia de un motor asíncrono moderno puede llegar hasta el 95% (NEMA "Premium").

### Potencia vs velocidad – potencia máxima

Cada motor tiene una curva de potencia mecánica desarrollada bajo diferentes condiciones de funcionamiento, como *potencia a plena carga* y *potencia máxima*.

Según el teorema de la máxima transferencia de potencia conocido como "Ley de Jacobi", la máxima transferencia de potencia en un sistema eléctrico se da cuando la impedancia de la fuente iguala a la impedancia de la carga. No coincide necesariamente con la máxima eficiencia.

**Analogía óptica:** la máxima refracción (transmisión) y menor reflexión (pérdida) se da cuando los índices de refracción de los dos medios son iguales.

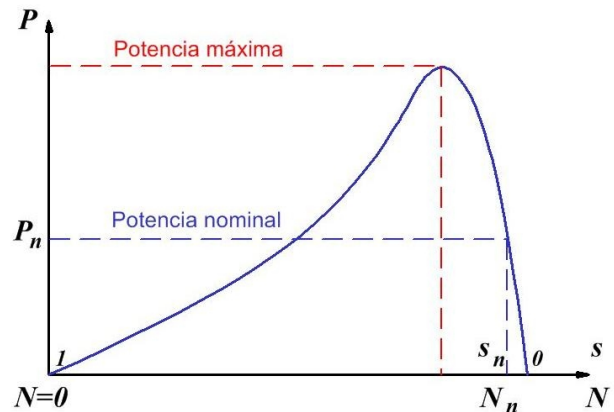
**Analogía en comunicaciones:** la máxima transferencia de señal se da cuando la impedancia del medio transmisor equivale a la del medio receptor.

La potencia máxima se da cuando  $\frac{dP}{ds} = 0$

y esto es cuando la impedancia equivalente del motor es igual a la impedancia de la carga

$$Z_{eq} = R_2 \frac{1-s_{pm}}{s_{pm}} \quad s_{pm} = \frac{R_2}{R_2 + Z_{eq}}$$

Curva de potencia vs. velocidad de rotación



La operación a máxima potencia puede destruir el motor por la elevación del deslizamiento y de la corriente y la reducción de la ventilación.

### Par de rotación o torque de un motor

Es la fuerza angular que puede ejercer el rotor bajo las diferentes condiciones de operación, así tenemos:

- Par de arranque o de rotor bloqueado
- Par a carga plena
- Par máximo

El par de rotación o torque se obtiene de la potencia de salida:

$$T = \frac{P_M}{\omega_r} \text{ N-m} \quad \omega_r = \frac{2\pi N_r}{60} \text{ rad/seg}$$

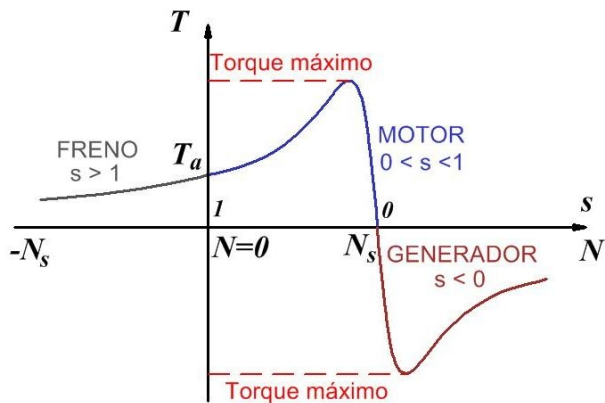
$$T = \frac{60 P_M}{2\pi N_s (1-s)} \text{ N-m}$$



Un motor de inducción que está girando se puede hacer funcionar como freno dinámico aplicándole un voltaje inverso controlado, de manera que  $N_R < 0$  y  $s > 1$ .

Bajo ciertas condiciones de carga, si esta impulsa al rotor haciéndolo girar más rápido que la velocidad sincrónica,  $N_R > N_S$  y  $s < 0$ , el motor devuelve energía a la red, funcionando como generador, frenándolo. Si se usa un convertidor de frecuencia, este puede regular la frecuencia del voltaje aplicado, reduciendo la velocidad sincrónica en forma suave.

Curva de par-velocidad para deslizamiento en la recta real



Ecuación del par rotor o torque:

$$T = \frac{60 P_M}{2\pi N_s (1-s)} \text{ N-m}$$

Par a velocidad nominal:

$$T_n = \frac{60 P_n}{2\pi (N_s - N_r)} \text{ N-m}$$

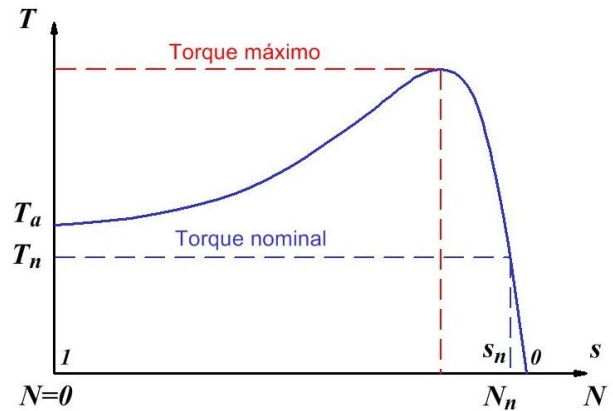
Par en función de los parámetros de prueba

$$P_M = \frac{3 I_2'^2 (1-s) R_2'}{s}$$

$$I_2' = \frac{V}{\sqrt{(R_{eq} + R_2')^2 + X_{eq}^2}} = \frac{V}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{eq}^2}}$$

$$T = \frac{3 \times 60}{2\pi s N_s} \frac{V^2 R_2'}{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{eq}^2}$$

El torque en puntos críticos: arranque – máximo – nominal



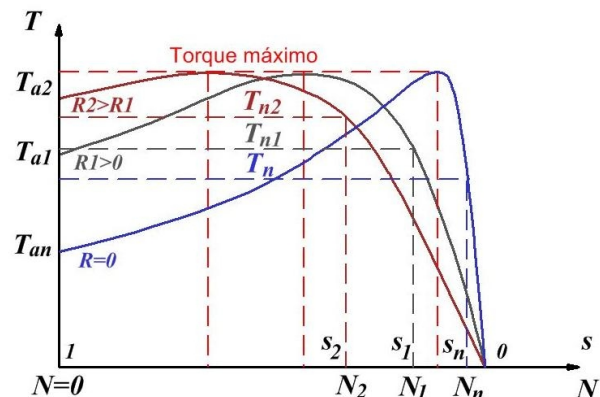
Par de arranque

El par de arranque se da cuando  $s=1$ :

$$T_a = \frac{3 \times 60}{2\pi N_s} \frac{V^2 R_2'}{(R_1 + R_2')^2 + X_{eq}^2} = \frac{3 \times 60}{2\pi N_s} \frac{V^2 R_2'}{Z_{eq}^2}$$

Como el par de arranque depende sólo de  $R_2$ , en un motor con rotor devanado se puede modificar el par de arranque y la velocidad a la que se consigue el par máximo insertando resistencias al devanado del rotor.

Características de par – velocidad para diferentes resistencias conectadas al rotor – Par de arranque y par máximo



Par máximo,  $T_m$  se produce cuando:

$$\frac{dT}{ds} = 0$$

$$s_{1m} = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_{eq}^2}}$$

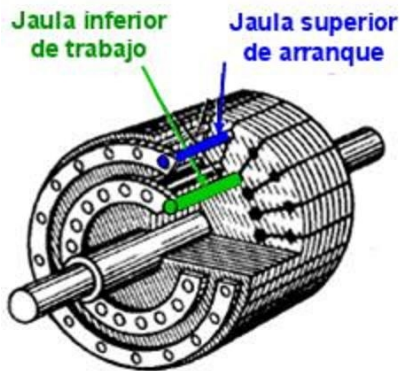
$$T_m = \frac{3 \times 60}{2\pi N_s} \frac{V^2}{2(R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{eq}^2})}$$

El par máximo no varía porque no depende de  $R_2$ . La operación a par máximo puede destruir el motor por la elevación de la potencia, del deslizamiento y de la corriente, y la reducción de la ventilación.

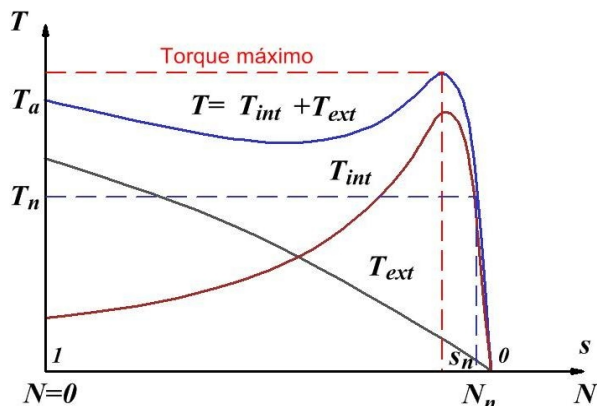
### Motor de doble jaula

Para aumentar el par de arranque conservando características adecuadas a plena carga, el rotor se puede fabricar con dos jaulas:

- Una jaula exterior de alta resistencia y baja reactancia para obtener un alto par de arranque.
- Una jaula interna con baja resistencia y alta reactancia para obtener condiciones normales a velocidad nominal.



Características de par-velocidad de cada jaula del rotor y el par combinado



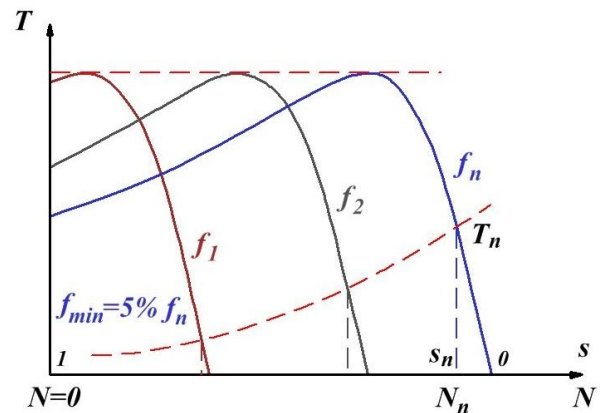
### Variación de la velocidad por variación de frecuencia

Con un equipo de control electrónico conocido como **convertidor de frecuencia**, que consta de un rectificador, un inversor y/o un generador de impulsos de frecuencia variable, de manera que el voltaje y la frecuencia de salida puedan regularse, se logra controlar la velocidad sincrónica y el par de un motor de inducción de jaula de ardilla, evitándose las complicaciones y el costo de usar otro tipo de motores y/ o controles electromecánicos que ya están cayendo en la obsolescencia.

Convertidor de frecuencia Siemens



Características de par a diferentes frecuencias



### Clasificación NEMA de los motores asincrónicos

NEMA	Potencia HP	Par de arranque (% plena carga)	Par máximo (% plena carga)	Corriente de arranque (% plena carga)	Deslizamiento (%)	F.P. (%)	Eficiencia (%)
A	0,5-200	105-150	200-250	>550	3-5	87-89	87-89
B	0,5-200	>105-150	<200-250	500-550	3-5	<87-89	87-89
C	1-200	200-250	200-250	500-550	3-7	<87-89	82-84
D	0,5-150	250-350	250-350	300-800	7-16	Bajo	Baja
E	40-200	>50	>150	500-1000	1-3,5	<87-89	87-89
F	40-200	>50	>150	350-500	1-3,5	<87-89	87-89
Rotor devanado	0,5-500	<=300	200-250	>150	3-50	Alto	Variable

### Aplicaciones típicas según clasificación NEMA

**Clase A:** cargas a velocidad constante cuando se acepta una corriente de arranque elevada, tales como bombas de agua, ventiladores, extractores, máquinas herramientas.

**Clase B:** similares a la clase A, pero con una corriente de arranque menor, tales como aires acondicionados, equipos de refrigeración.

**Clase C:** cargas a velocidad constante con inercia mediana, ya que tienen un par de arranque mayor, tales como aserraderos, cintas transportadoras, compresores de pistón, trituradores, amasadoras, bombas para aceites pesados.

**Clase D:** cargas con alta inercia, ya que tienen el mayor par de arranque, tales como elevadores, grúas, montacargas, inyectoras de plástico, troqueladoras y otras cargas intermitentes.

**Clases E y F:** por su bajo par de arranque, cargas de baja inercia, como bombas centrífugas para agua y ventiladores.

**Motores de rotor devanado:** cargas que necesitan cierto control de velocidad o un arranque suave, tales como grúas y manejo de materiales. Conectando diferentes juegos de resistencias al rotor se consigue variar el par, la velocidad y la corriente de arranque. También permiten conseguir un efecto de frenado conectando corriente directa a uno de los embobinados del rotor de manera que no se sobrepase la velocidad sincrónica durante el descenso de la carga.

### Placas y conexiones típicas de motores asincrónicos trifásicos

#### Placa típica NEMA

HP	15
RPM	1750
Volts	230 / 460
Hz	60
Amp	39 / 19,5
F.P.	0,87
S.F.	1,15
Nema Clase	B
Tipo	C

#### Diagramas de conexión típicos de placa para motor NEMA



Placa típica IEC	
KW	11
l / min	1750
V	220 Δ - 380 Y
Hz	60
A	39 / 22,4
Cos $\phi$	0,87
Tipo	B
IP	55

Diagramas de conexión típicos de placa para motor IEC



Motor de 6 puntas 220/380V

### Control de motores

Se llama así al equipo electromecánico o electrónico que tiene la función de conectar, arrancar, parar, regular la velocidad de rotación y el par, o invertir el sentido de giro de un motor eléctrico. Si solo se desea tener las opciones de arrancar o parar el motor, se utiliza como equipo de control un **arrancador directo**, que consiste en un **contactor** (interruptor electromagnético) combinado con un protector térmico contra sobrecargas.

También se cuenta actualmente con arrancadores directos electrónicos que pueden proporcionar un arranque suave y protección por medición de la corriente y de la temperatura.

### Métodos de arranque electromecánico

En el arranque tradicional con contactores electromagnéticos, se persiguen varios objetivos:

- Contar con una protección para el personal, impidiendo el arranque inadvertido de maquinaria peligrosa, especialmente máquinas-herramienta o maquinaria de trasiego de material, al regresar la energía después de un corte. Esto se logra usando pulsadores y un contacto “memoria” del contactor.
- Poder controlar manualmente motores a la distancia con cables delgados, gracias a la baja energía de las bobinas.
- Poder arrancar y parar motores en forma automática con la señal de actuadores tales como

interruptores de presión, de nivel, controles de temperatura, interruptores de fin de carrera, centrífugos, relés de tiempo y otros.

- Poder arrancar motores automáticamente en secuencia o condicionados a las diferentes operaciones y necesidades de un proceso.
- Proteger los motores intercalando contactos normalmente cerrados de sensores térmicos de sobrecarga, o sensores de voltaje o de corriente en el circuito de control.

Para ello se utilizan contactores electromagnéticos, los cuales, con una corriente pequeña aplicada en su bobina, pueden operar contactos de potencia capaces de conectar y desconectar las corrientes de los motores, mucho mayores que las de las bobinas.

En el control manual con pulsadores se usa un contacto del contactor como “memoria” o “C”. Para el arranque se debe oprimir el botón de Arranque; al cerrarse el contactor, el contacto “C” mantiene energizada la bobina. Al accionar el botón de Parada o al interrumpirse la energía el contactor se desconecta y se abre el contacto “C”; al regresar la energía se debe volver a oprimir el botón de Arranque.

Este tipo de control permite usar varias botoneras ubicadas en diferentes lugares, en este caso se deben conectar los botones de parada en serie, y los botones de arranque en paralelo.

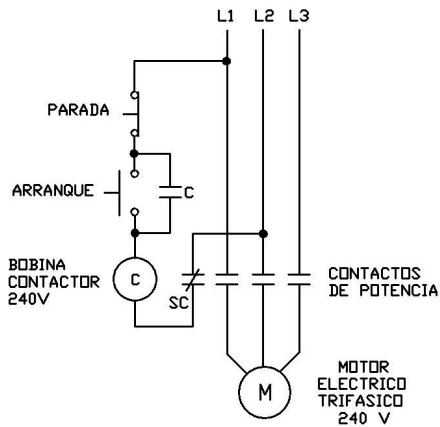
A continuación se presentan varios diagramas de control de motores (simbología ANSI-NEMA)

Los dos primeros corresponden a controles por pulsadores manuales.

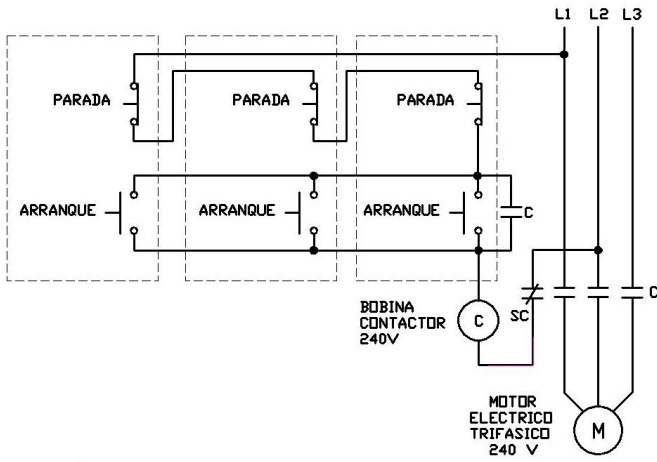
El tercero corresponde a un control con interruptor manual, o control automático a través de un interruptor flotador, el cual puede ser usado para llenar un tanque de agua.



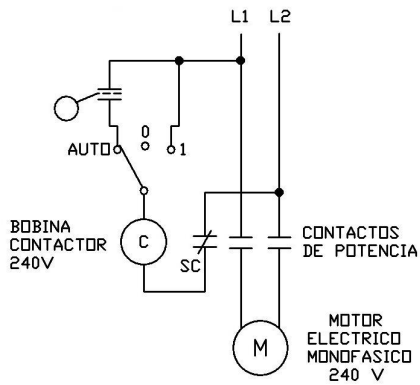
Control con pulsadores



Control con botoneras múltiples



Control automático o manual con selector de 3 posiciones



## EJERCICIOS RESUELTOS

1. Un motor de inducción trifásico de 6 polos a 60 Hz, 480 V, 1164 RPM, conectado en estrella y con potencia nominal de 75 HP, tiene los siguientes parámetros por fase:

$$\begin{aligned} R_1 &= 0,128 \text{ ohm} & R_2' &= 0,0935 \text{ ohm} \\ X_1 + X_2 &= 0,496 \text{ ohm} & R_C &= 183 \text{ ohm} \\ X_m &= 8 \text{ ohm} & P_{PE} &= 1200 \text{ W} \end{aligned}$$

Calcule:

- a) Deslizamiento

$$\begin{aligned} N_s &= 60 \times f / (P/2) = 60 \times 60 / 3 = 1200 \text{ RPM} \\ s &= (N_s - N_R) / N_s = (1200 - 1164) / 1200 = \underline{0,03} \end{aligned}$$

- b) Resistencia equivalente y resistencia de la carga mecánica

$$\begin{aligned} R_{EQ} &= R_1 + R_2' = 0,128 + 0,0935 = \underline{0,2215 \text{ ohm}} \\ R_L' &= R_2' (1-s) / s = 0,0935 (1-0,03) / 0,03 \\ &= \underline{3,023 \text{ ohm}} \end{aligned}$$

- c) Corriente total y factor de potencia

$$\begin{aligned} V_F &= V_L / 1,73 = 480 / 1,73 = 277 \text{ V} \\ Z_F &= Z_{EQ} + R_L' = R_{EQ} + R_L' + j X_{EQ} \\ &= 0,2215 + 3,023 + j 0,496 = 3,282 \angle 8,69^\circ \\ I_2' &= V_F / Z_F = 277 / 3,282 = 84,43 \angle -8,69^\circ \\ &= 83,46 - j 12,76 \\ I_C &= V_F / R_C = 277 / 183 = 1,51 \text{ A} \\ I_m &= V_F / X_m = 277 / 8 = -j 34,63 \text{ A} \\ I_T &= I_2' + I_C + I_m = 84,97 - j 47,39 = \underline{97,29 \angle -29,15^\circ} \\ FP &= \cos(-29,15^\circ) = \underline{0,873} \end{aligned}$$

- d) Potencia de salida

$$\begin{aligned} P_U &= P_M - P_{PE} = 3 I_2'^2 (1-s) R_2' / s - P_{PE} \\ &= 3 \times 84,43^2 \times (1-0,03) \times 0,0935 / 0,03 - 1200 \\ &= 63.451 \text{ W} \\ P_{HP} &= P_W / 746 = 63451 / 746 = \underline{85 \text{ HP}} \end{aligned}$$

- e) Potencia eléctrica:  $P_E = 3 V_F I_T FP$

$$= 3 \times 277 \times 97,29 \times 0,873 = \underline{70,6 \text{ KW}}$$

- f) Par:  $T = f P_M / 2\pi N_R$

$$= 60 \times 64.651 / 2 / 3,1416 / 1164 = \underline{530 \text{ N-m}}$$

- g) Eficiencia:  $\eta = P_U / P_E = 63,5 / 70,6 = \underline{0,899}$

- h) Factor de servicio:

$$\text{F.S.} = \text{Potencia máxima de diseño} / \text{Potencia nominal} = 85 / 75 = \underline{1,13}$$

2. Tenemos un motor de inducción trifásico de 4 polos, voltaje nominal de 220 V, conexión en triángulo, 50 Hz, FP= 0,86, potencia nominal de 2,2 KW, 9,6 A nominales, 1450 RPM.

La corriente en vacío es de 3,1 A con un FP de 0,6 y la corriente de rotor bloqueado a voltaje pleno (arranque) es de 75 A con un FP de 0,5.

Calcule la eficiencia del motor y aproxime cada una de las pérdidas a plena carga.

*Intencionalmente, este ejercicio no tiene los datos de prueba suficientes para obtener resultados exactos, pero con los criterios de aproximación expuestos a continuación, y utilizando el circuito equivalente simplificado, será posible obtener aproximaciones bastante buenas.*

Se considera que la corriente de vacío es la corriente de magnetización más las pérdidas en el hierro más la corriente de pérdidas en el eje. Despreciando inicialmente las pérdidas en el hierro, la parte reactiva corresponderá a la corriente de magnetización y la parte resistiva corresponderá a las pérdidas en el cobre y en el eje a velocidad de rotación en vacío, la cual es casi igual a la velocidad nominal.

Se considera que la corriente de rotor bloqueado es la corriente por la impedancia equivalente con la resistencia de carga  $R_L$  en cortocircuito más la corriente de magnetización  $I_m$ . Despreciaremos las pérdidas en el hierro bajo rotor bloqueado.

- a) La potencia de salida  $P_U$  es de 2200W, y la potencia de entrada  $P_E$  es

$$\begin{aligned} P_E &= 1,73 V_L I_L \cos\phi = 1,73 \times 220 \times 9,6 \times 0,86 \\ &= 3.142 \text{ W} \\ \eta &= P_U / P_E = 2200 / 3142 = 0,7 \end{aligned}$$

- b) Con la corriente de rotor bloqueado menos la parte reactiva de la corriente de vacío, podemos aproximar la corriente  $I_2'_{RB}$  y la impedancia equivalente  $Z_{EQ}$ .

$$\begin{aligned} I_{RB} &= 75 / 1,732 \angle -\arcsin(0,5) = 43,3 \angle -60^\circ \\ &= 21,65 - j 37,5 \text{ A} \end{aligned}$$

$$I_{VACIO} = I_2'_{VACIO} + I_m = 3,1 / 1,732 \angle -\arcsin(0,6)$$

$$= 1,79 \angle -53,13^\circ = 1,074 - j 1,43 \text{ A}$$

$$I_2'_{RB} = I_{RB} - I_m = 21,65 - j (37,5 - 1,43) =$$

$$21,65 - j 36,07 = 42,07 \angle -59,03^\circ \text{ A}$$

$$Z_{EQ} = R_{EQ} + j X_{EQ} = V_L / I_2'_{RB} = 220 / 42,07$$

$$= 5,23 \angle 59,03^\circ = 2,69 + j 4,48 \text{ ohm}$$

- c) Con la corriente nominal menos la corriente de magnetización  $I_m$  podemos determinar la corriente  $I_2'$  y las pérdidas en el cobre  $P_{CU}$  a plena carga.

$$I_1 = 9,6 / 1,732 \angle -\text{acos}(0,86) = 5,54 \angle -30,68^\circ$$

$$= 4,76 - j2,83 \text{ A (en cada fase de la delta)}$$

$$I_2' = I_1 - I_m = 4,76 - j(2,83 - 1,43) = 4,76 - j1,4$$

$$= 4,96 \angle -16,39^\circ \text{ A}$$

$$P_{CU} = 3 I_2'^2 R_{EQ} = 3 \times 4,96^2 \times 2,69 = 199 \text{ W}$$

- d) Calculando el deslizamiento y conociendo la potencia mecánica nominal podemos aproximar la resistencia de carga  $R_L$ , la resistencia del rotor  $R_2$  y las pérdidas del cobre en el rotor y en el estator a plena carga.

De la tabla de velocidades sincrónicas obtenemos  $N_s = 1500 \text{ RPM}$

$$s = (N_s - N_R) / N_s = 50 / 1500 = 0,033$$

$$R_L' = P_M / 3 / I_2'^2 = 2200 / 3 / 4,96^2 = 29,8 \text{ ohm}$$

$$R_2' = R_L' s / (1-s) = 29,8 \times 0,033 / (1-0,033) = 1,017 \text{ ohm}$$

$$P_{CR} = 3 I_2'^2 R_2' = 3 \times 4,96^2 \times 1,017 = 75 \text{ W}$$

$$P_{CE} = P_{CU} - P_{CR} = 199 - 75 = 124 \text{ W}$$

- e) Podemos también aproximar las pérdidas en el eje en vacío:

$$P_{EH} = 3 V_L I_2' \text{ VACIO} = 3 \times 220 \times 1,074 = 709 \text{ W}$$

$$P_{CU-VACIO} = 3 I_2' \text{ VACIO}^2 R_{EQ} = 3 \times 1,074^2 \times 2,69 = 9 \text{ W}$$

$$P_{PE} = P_{EH} - P_{CU-VACIO} = 709 - 9 = 700 \text{ W}$$

- f) Y por diferencia, podemos obtener una aproximación de las pérdidas en el hierro:

$$P_{FE} = P_E - P_U - P_{PE} - P_{CU} = 3142 - 2200 - 700 - 199 = 43 \text{ W}$$

3. Calcule los parámetros de un motor trifásico de inducción de laboratorio cuyos datos son:

Voltaje nominal: 208V, conexión estrella  
 Potencia de salida: 175W a 1740 RPM  
 Corriente nominal: 1,2 A  
 Factor de potencia: 0,71

Desprecie las pérdidas en el hierro.

Las pruebas de vacío dan los siguientes datos:

$$P_E = 40 \text{ W} \quad I = 0,7 \text{ A} \quad N_R = 1786 \text{ RPM}$$

La prueba de CD da los siguientes datos:

$$V_{CD} = 6 \text{ V} \quad I_{CD} = 0,5 \text{ A}$$

$$R_1 = V_{CD} / I_{CD} = 6 / 0,5 = 12 \text{ ohm} + 15\% = 14 \text{ ohm}$$

$$V_F = V_L / \sqrt{3} = 120 \text{ V}$$

En vacío:

$$S = 3 V_F I_1 = 3 \times 120 \times 0,7 = 252 \text{ VA}$$

$$Q = (S^2 - P^2)^{1/2} = (252^2 - 40^2)^{1/2} = 248,8 \text{ VAR}$$

$$I_M = (Q/3) / V_F = 248,8 / 3 / 120 = 0,69 \angle -90^\circ \text{ A}$$

$$P_{CE} = 3 I_1^2 R_1 = 3 \times 0,7^2 \times 14 = 20,6 \text{ W}$$

$$P_{PE} = P_E - P_{CE} = 40 - 20,6 = 19,4 \text{ W}$$

A plena carga:

$$I_N = 1,2 \text{ A}$$

$$\phi = \text{acos } 0,71 = 44,8^\circ$$

$$I_1 = I_N \cos \phi + j I_N \sin \phi = 0,852 + j 0,846 \text{ A}$$

$$I_2' = I_1 - I_M = 0,852 - j(0,846 - 0,69) = 0,852 - j0,155$$

$$I_2' = 0,866 \angle -10,3^\circ \text{ A}$$

$$Z_{EQ}' + R_L' = V_F / I_2' = 120 / 0,866 = 138 \angle 10,3^\circ \Omega$$

$$Z_{EQ}' + R_L' = 136 + j25 \Omega$$

$$R_L' = P_M / 3 / I_2'^2 = (175 + 19,4) / 3 / 0,866^2 = 86,4 \Omega$$

$$R_{EQ}' = 136 - 86,4 = 49,6 \Omega$$

$$X_{EQ}' = 25 \Omega$$

$$Z_{EQ}' = (49,6^2 + 25^2)^{1/2} = 55 \angle 26,75^\circ \Omega$$

$$R_2' = R_{EQ}' - R_1 = 49,6 - 14 = 35,6 \Omega$$

$$P_{CU} = 3 I_2'^2 R_{EQ} = 3 \times 0,866^2 \times 49,6 = 112 \text{ W}$$

$$\eta = 100 P_U / (P_U + P_{PE} + P_{CU}) = 175 / (175 + 19,4 + 112)$$

$$\eta = 57\%$$

o bien:

$$\eta = P_U / P_E = P_U / 3 V_F I_F \cos \phi$$

$$\eta = 175 / (3 \times 120 \times 1,2 \times 0,71) = 0,57$$