



# TECNOLOGÍA ELÉCTRICA

## Máquina eléctrica rotativa de C.A. asíncrona

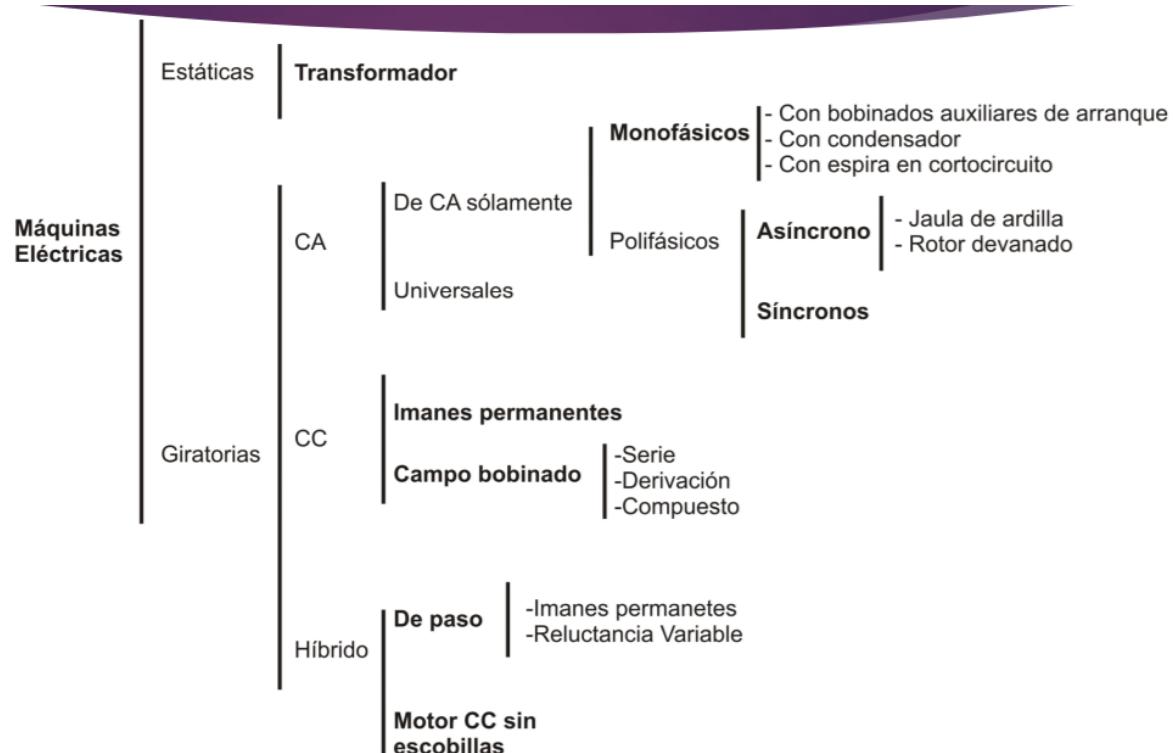
Grado de Robótica

Curso 2022-2023

# Objetivos

- Máquina rotativa.
- Fundamentos de las máquinas de C.A.
- Campo giratorio en el estator.
- Campo giratorio en el rotor.
- Funcionamiento como motor.
- Potencia y rendimiento.
- Métodos de arranque.

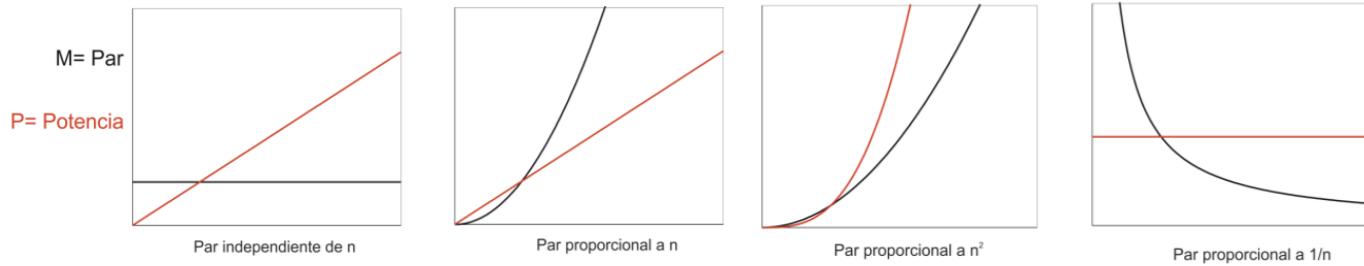
# Maquina rotativa



# Maquina rotativa

|                              | Par             | Potencia mecánica     | Ejemplo              |
|------------------------------|-----------------|-----------------------|----------------------|
| Constante                    | $M=K$           | $P_{mec}=K \cdot n$   | Grúa                 |
| Lineal con la velocidad      | $M=K \cdot n$   | $P_{mec}=K \cdot n^2$ | Vehículo de tracción |
| Parabólico con la velocidad  | $M=K \cdot n^2$ | $P_{mec}=K \cdot n^3$ | Ventiladores         |
| Hiperbólico con la velocidad | $M=K/n$         | $M=K$                 | Bobinadora axial     |

$M=$  Par;  $P=$  Potencia;  $n=$  velocidad



# Maquina rotativa: servicio y temperatura

- ▶ Dos motores de igual características ( $U$ ,  $I$ ,  $P$ ,  $n$ ) pero uno de los destinado a accionar un ascensor y otro un ventilador, no tienen porqué ser iguales.
  - ▶ En el primer caso el motor estará sometido frecuentemente a períodos de arranque, marcha y frenado.
  - ▶ En el segundo caso lo habitual es que puesto en funcionamiento permanezca durante largo tiempo en servicio en el mismo régimen.
- ▶ En consecuencia los calentamientos que se producen en ambos motores no son iguales y eso puede afectar a su tamaño, sistema de ventilación, tipos de materiales, etc.
- ▶ El incremento de temperatura sobre la del ambiente, que experimenta una máquina en servicio está provocado por la aportación de calor producida por las pérdidas: efecto joule, pérdidas en el hierro, etc.
- ▶ La temperatura final dependerá de la capacidad de evacuar calor, tal capacidad aumenta con la superficie exterior. Se puede aumentar la evacuación forzándola por medio de refrigeración adicionales como ventiladores o mediante el bombeo de fluidos refrigerantes (agua o hidrógeno)

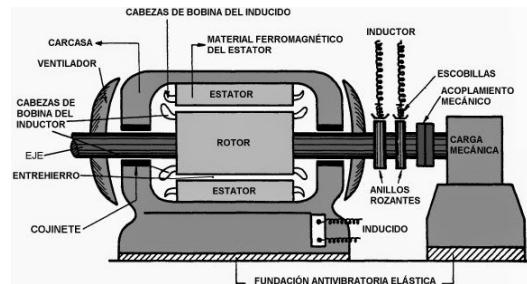
# Maquina rotativa: perdidas y rendimiento

- ▶ Pérdidas en los conductores por efecto Joule, pérdidas en el hierro, pérdidas mecánicas por rozamiento, calentamientos locales por pulsaciones de flujo, etc.

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} = \frac{P_{entrada} - P_{pérdidas}}{P_{entrada}}$$

# Descripción de una máquina eléctrica rotativa

- ▶ El espacio de aire que separa el estator y el rotor, necesario para que pueda girar la máquina es el entrehierro, siendo el campo magnético existente en el mismo el que constituye el medio de acoplamiento entre los sistemas eléctrico y mecánico
- ▶ El estator y el rotor se construyen con material ferromagnético, para evitar pérdidas en el Fe suelen realizarse con chapas magnéticas de acero al silicio, ranuradas para alojar en su interior los devanados.
- ▶ Uno de los devanados tiene por misión crear un flujo en el entrehierro y por ello se denomina inductor (excitación o campo). El otro devanado recibe el flujo del primero y se inducen en él corrientes y se denomina inducido.
- ▶ El material para la realización de las bobinas suele ser Cu cubierto de aislante en máquinas de gran potencia cuyo aislamiento se hace con cinta de algodón.



# F.m.m. y campo magnético en el entrehierro

- ▶ El campo magnético en el entrehierro de una máquina eléctrica es el resultado de las f.m.m.s. combinadas de los devanados inductor e inducido que actúan en esa región.
- ▶ En principio, es el devanado inductor el que produce el campo en el entrehierro, creando f.e.m.s. en el devanado del inducido, que dan lugar a corrientes cuando se cierra el circuito por un sistema exterior.
- ▶ Al circular una intensidad por el devanado del inducido, se crea una f.m.m. de reacción de inducido, que al combinarse con la f.m.m. del inductor origina el campo magnético resultante en el entrehierro de la máquina.
- ▶ En la práctica constructiva habitual de las máquinas eléctricas, con objeto de aprovechar toda la periferia tanto del estator como del rotor, las bobinas se distribuyen en ranuras.
- ▶ Esto permite no solamente una utilización más óptima de la máquina sino también una mejora en la calidad de la onda de f.m.m. e inducción, que se traducirá una f.e.m. inducida en las bobinas de carácter más sinusoidal.

# Devanado trifásico: campo giratorio



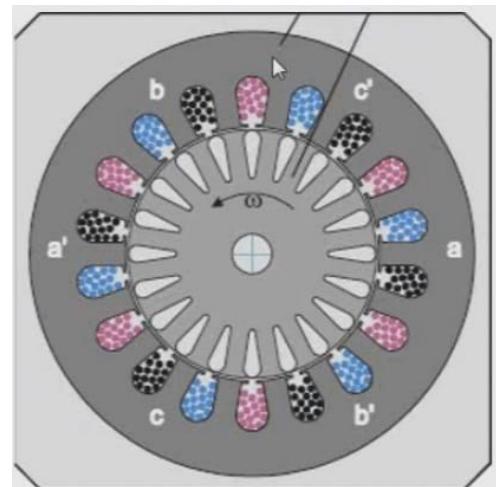
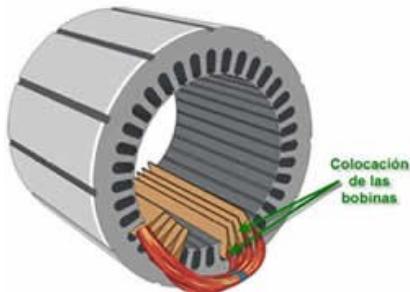
<https://www.youtube.com/watch?v=XorwWSc0NEo&t=2s>

# Máquina asíncrona: Aspectos constructivos

- ▶ Los motores asíncronos o de inducción son un tipo de motores eléctricos de corriente alterna.
  - ▶ El motor asíncrono trifásico está formado por un rotor, que puede ser de dos tipos: de jaula de ardilla o de bobinado; y un estator, en el que se encuentran las bobinas inductoras.
- 
- Ventajas
    - Máquina robusta y simple (el 80 % de las máquinas actuales son de este tipo).
    - Mediante accionamientos, pueden aplicarse sistemas de velocidad variable.
  - Inconvenientes
    - No permite la regulación de energía reactiva.
    - Sin elementos externos (accionamientos) su característica par-velocidad es fija.
    - La unión rígida a la frecuencia de red puede ser un inconveniente.

# Máquina asincrónica: Estator

- Parte fija del motor. Anillo cilíndrico de chapa magnética ajustada a la carcasa envolvente.
- La parte interior del estator tiene una serie de ranuras donde se coloca el bobinado del motor.



# Máquina asincrónica: Rotor de jaula de ardilla

- ▶ Consta de un rotor constituido por una serie de conductores metálicos (normalmente de aluminio) dispuestos paralelamente unos a otros, y cortocircuitados en sus extremos por unos anillos metálicos, esto es lo que forma la llamada jaula de ardilla.
- ▶ Esta 'jaula' se rellena de material, normalmente chapa apilada, teniéndose un sistema muy eficaz, simple, y muy robusto.

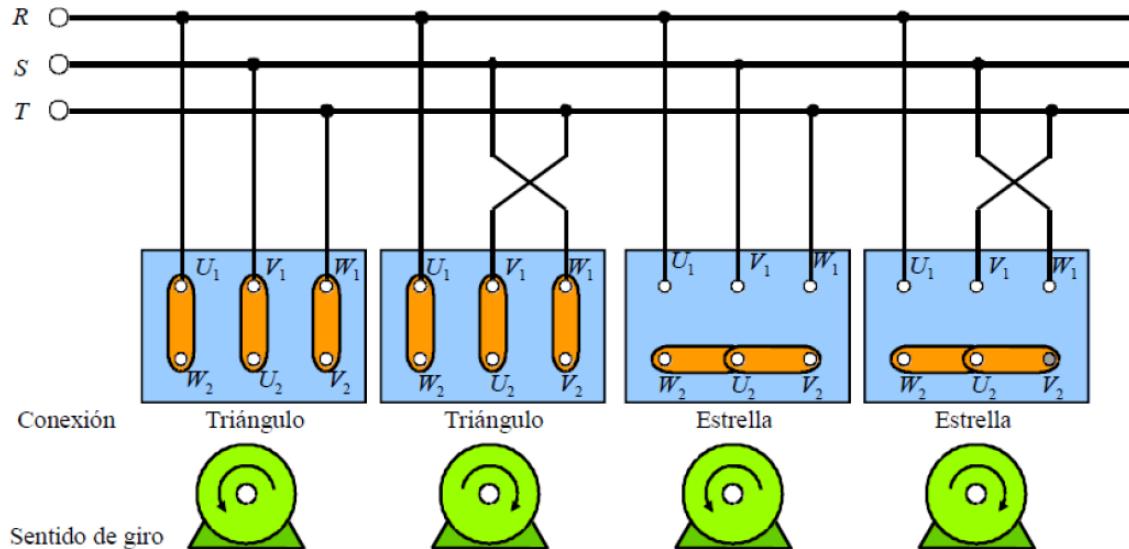


# Máquina asincrónica: Rotor bobinado

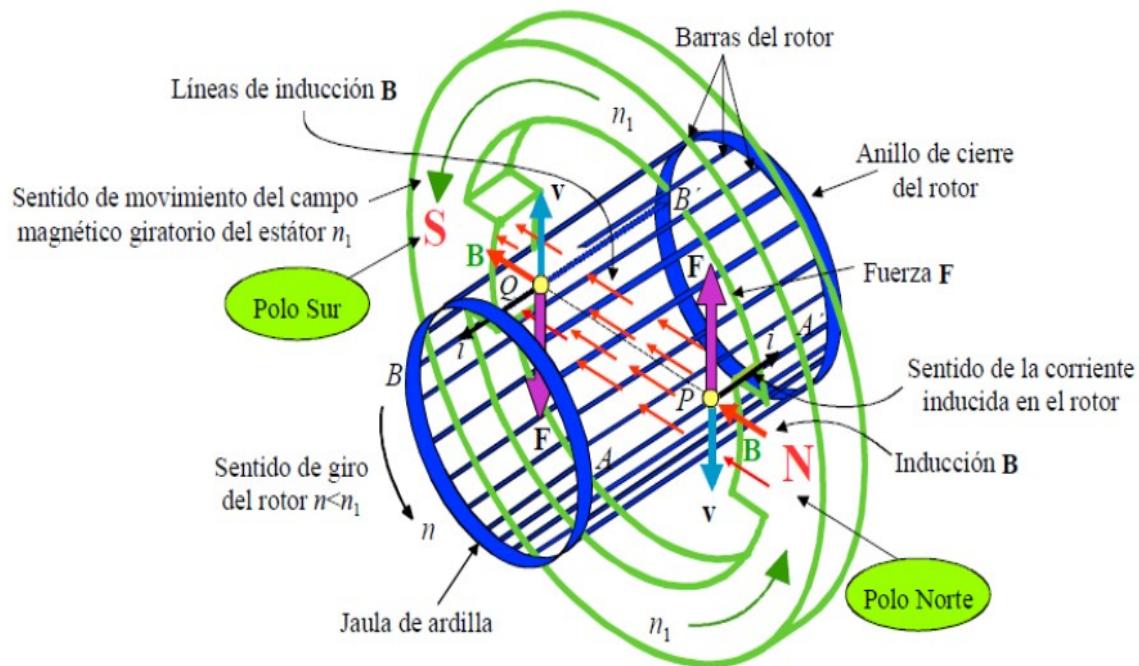
- ▶ Está constituido por una serie de conductores bobinados sobre él en unas ranuras situadas sobre su superficie.
- ▶ Este rotor es mucho más complicado de fabricar y mantener que el de jaula de ardilla, pero permite el acceso al mismo desde el exterior a través de unos anillos que son los que cortocircuitan los bobinados.
- ▶ Esto tiene ventajas, como la posibilidad de utilizar un reostato de arranque que permite modificar la velocidad y el par de arranque, así como el reducir la corriente de arranque.



# Conexiones del motor trifásico



# Motor trifásico: Principio de funcionamiento



# Motor trifásico: Principio de funcionamiento

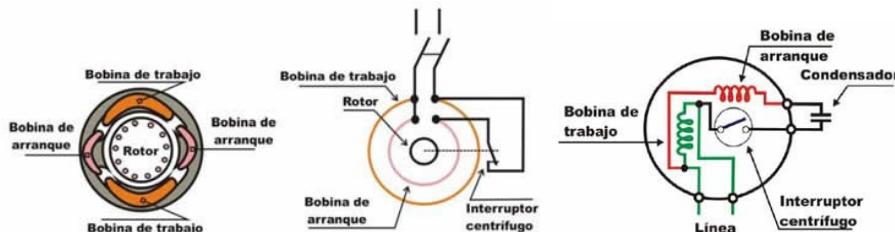
- Las bobinas están desfasadas entre sí  $120^\circ$ . Según el Teorema de Ferraris, cuando circula un sistema de corrientes se induce un campo magnético giratorio que envuelve al rotor. Este campo magnético variable va a inducir una tensión en el rotor según la Ley de inducción de Faraday.
- Con estas condiciones se produce el efecto Laplace que dice: “todo conductor por el que circula una corriente eléctrica, inmerso en un campo magnético experimenta una fuerza que lo tiende a poner en movimiento”.
- El campo magnético gira a una velocidad denominada de sincronismo. Sin embargo el rotor gira algo más despacio, para que el campo magnético no deje de ser variable con respecto al rotor, y por tanto aparezcan un par de fuerzas que lo impulsan a moverse.

# Motor trifásico: Principio de funcionamiento

- El devanado del estator está formado por 3 arrollamientos desfasados  $120^\circ$  en el espacio y de  $2 \times p$  polos, al introducir corriente trifásica a una frecuencia  $f_1$  [Hz] se produce un flujo giratorio cuya velocidad de sincronismo es

$$n_{sinc} = \frac{60 \times f_1}{p} \text{ [r.p.m.]}$$

- También existen motores asíncronos monofásicos, en los cuales el estator tiene un bobinado monofásico y el rotor es de jaula de ardilla. Son motores de pequeña potencia, y en ellos, el campo magnético es igual a la suma de dos campos giratorios iguales que rotan en sentidos opuestos (Teorema de Leblanc).



# Motor trifásico: Concepto de deslizamiento

- La velocidad de deslizamiento,  $n_{des}$ , se define como la diferencia entre la velocidad síncrona y la velocidad del rotor:

$$n_{des} = n_{sinc} - n_m$$

- El deslizamiento,  $s$ , describe la velocidad relativa del rotor respecto de la velocidad de sincronismo (típicamente de 3% al 8%):

$$s = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} (\times 100\%)$$

- Si el rotor gira a velocidad de sincronismo, entonces  $s = 0$ , mientras que si el motor está estacionario  $s = 1$ .
- La fuerza electromotriz inducida en el rotor generará corrientes de frecuencia  $f_2$ , que a su vez crearán un campo giratorio, cuya velocidad respecto a su propio movimiento será

$$n_m = \frac{60 \times f_2}{p} \text{ [r.p.m.]}$$

# Motor trifásico: Concepto de deslizamiento

Ejercicio:

**Datos**

Motor asíncrono, 50 Hz  
Plena carga:  $n=960$  rpm

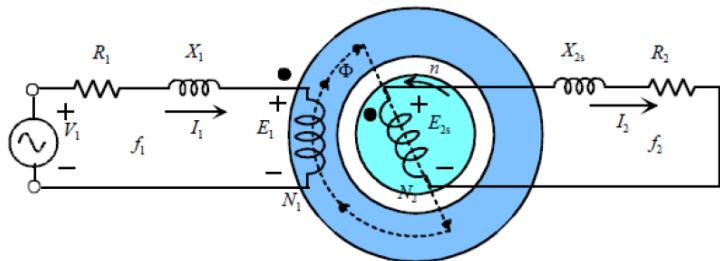


**Calcular**

- a) Velocidad de sincronismo en rpm y rad/s
- b) Frecuencia de las corrientes del rotor
- c) Velocidad relativa del rotor respecto del campo giratorio
- d) Velocidad de sincronismo que le correspondería para una frecuencia de 60 Hz

# Motor trifásico: Circuito equivalente por fase

- El circuito equivalente es similar a un transformador con el secundario en cortocircuito:



- Donde  $R_1$  y  $R_2$  ohmios/fase son las resistencias de los arrollamientos y los flujos de dispersión en los devanados del rotor y el estator dan lugar a las autoinductancias  $L_{d1}$  y  $L_{d2}$ . Entonces al igual que en el transformador:

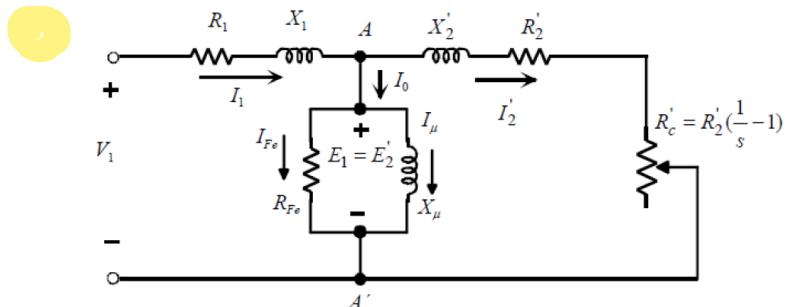
$$V_1 = E_1 + (R_1 + jX_1) \times I_1$$

$$E_{2s} = (R_2 + jX_{2s}) \times I_2$$

$$X_1 = L_{d1} \omega_1 = 2 \pi f_1$$

- Cuando el rotor está parado  $X_2 = L_{d2} \times \omega_1 = L_{d2} \times 2 \pi f_1$  y con el rotor girando  $X_{2s} = L_{d2} \times \omega_2 = L_{d2} \times 2 \pi f_2 = sX_2$

# Motor asíncrono: Circuito equivalente



$$R'_2 = m^2 R_2$$

$$X'_2 = m^2 X_2$$

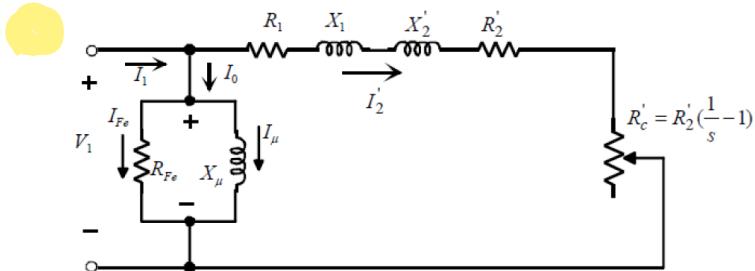
$$R'_c = m^2 R_c$$

$$I_1 = I_0 + I'_2 = I_0 + \frac{I_2}{m}$$

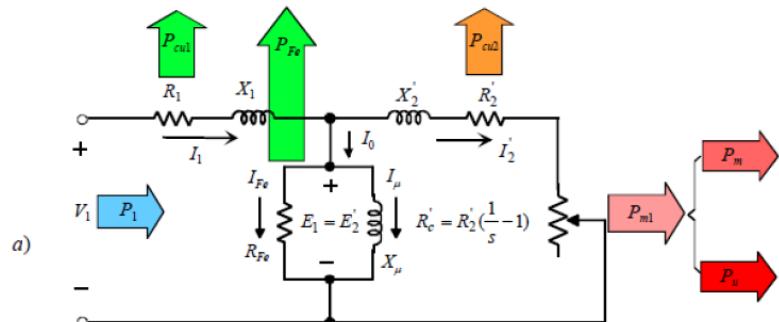
$$V_1 = E_1 + (R_1 + jX_1) \times I_1$$

$$E'_2 = (R'_2 + R'_c + jX'_2) \times I'_2$$

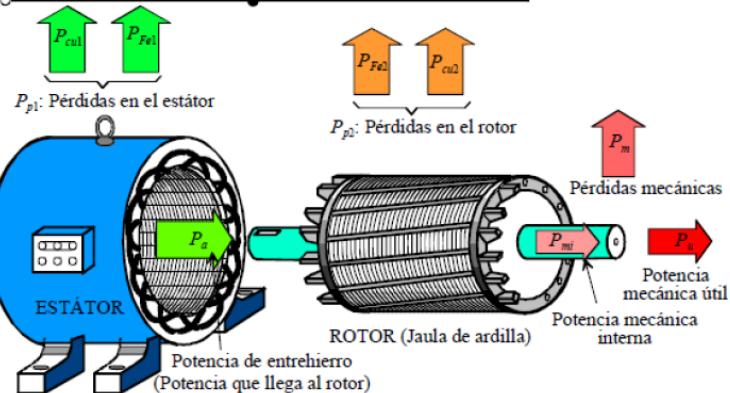
Circuito equivalente aproximado.



# Balance de potencias



a)



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

$$P_{mi} = m_1 R'_{\cdot c} I'^2_{\cdot 2} = m_1 R'_{\cdot 2} \left( \frac{1}{s} - 1 \right) I'^2_{\cdot 2}$$

$$\Rightarrow \frac{P_{Cu2}}{P_{mi}} = \frac{s}{1-s} \Rightarrow P_{Cu2} = sP_a$$

$$P_a = P_{mi} + P_{Cu2} = m_1 \frac{R_{\cdot 2}}{s} I_{\cdot 2}^2 = \frac{P_{Cu2}}{s} = \frac{P_{mi}}{1-s}$$

- La potencia útil en el eje será

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

- Siendo Pm las pérdidas mecánicas por rozamiento y ventilación

## - El rendimiento del motor

$$\eta = \frac{P_u}{P_1} = \frac{P_u}{P_u + P_m + P_{Cu2} + P_{Fe} + P_{cu1}}$$

# Balance de potencias

## Ejercicio

### Datos

Motor asíncrono rotor devanado, 4 polos, 50 Hz, 380 V en estrella (estator).

Rotor conectado en estrella.

Relación de transformación ( $m=2.5$ ).

$R_1=0.5 \Omega$ ,  $X_1=1.5 \Omega$ ,  $R_2=0.1 \Omega$ ,  $X_2=0.2 \Omega$ ,  
 $R_{fe}=360 \Omega$ ,  $X_\mu=40 \Omega$ .

Las pérdidas mecánicas son de 250 W.

El deslizamiento a plena carga  $s=0.05$ .

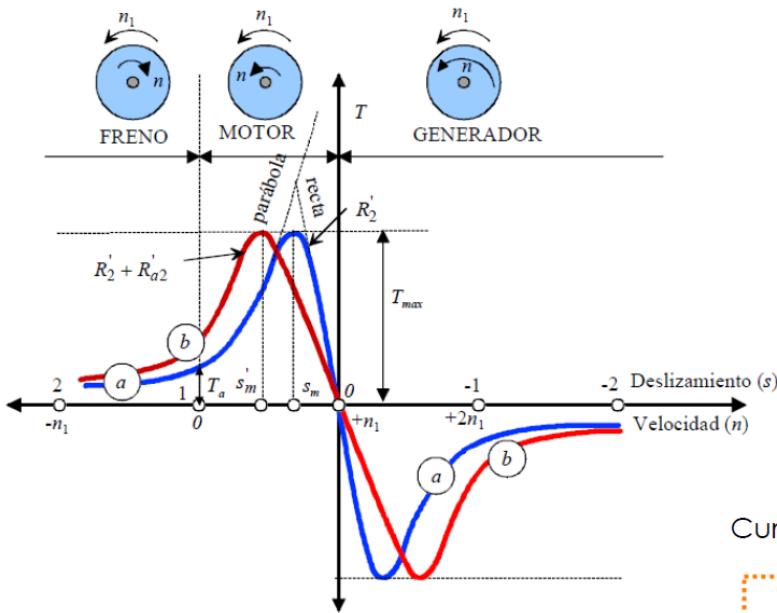
### Calcular

Utilizando el circuito equivalente exacto del motor:

- $I_1$  (corriente del estator)
- $I_2$  (corriente del rotor)
- $I_0$  (corriente de magnetización)
- $P_{fe}$  (pérdidas en el hierro)
- $P_1$  y  $Q_1$  (potencias consumidas de la red)
- $P_{mi}$  (potencia mecánica interna).
- $P_u$  (potencia mecánica útil)
- Rendimiento del motor
- Corriente de arranque y su fdp
- Repetir el problema utilizando el circuito aproximado del motor



# Par-velocidad de rotación



$$T = \frac{P_u}{\omega} = \frac{P_u}{\frac{2\pi n}{60}}$$

$\omega$  velocidad angular de giro,  $n$  en r.p.m.

$$T = \frac{m_1 \frac{R'_2}{s} V_1^2}{2\pi \frac{n_1}{60} \left[ \left( R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + X_{cc}^2 \right]}$$

$m_1$ : nº de fases del estator  
 $X_{cc} = X_1 + X_2'$

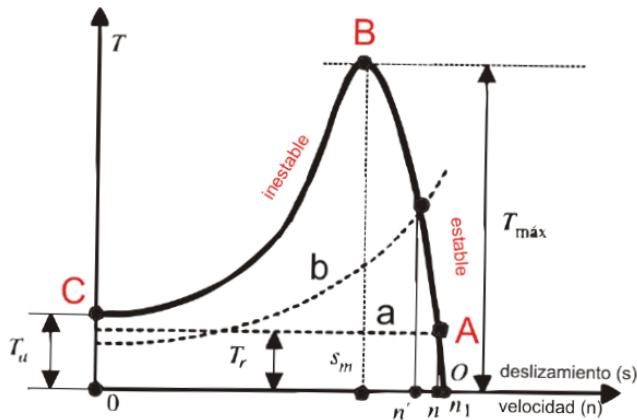
Curva Par-Velocidad de una máquina asincrónica

$T_{max} = \pm \frac{m_1 V_1^2}{2\pi \frac{n_1}{60} 2 \left[ \pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{cc}^2} \right]}$

$T_{max}$   $\rightarrow$

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

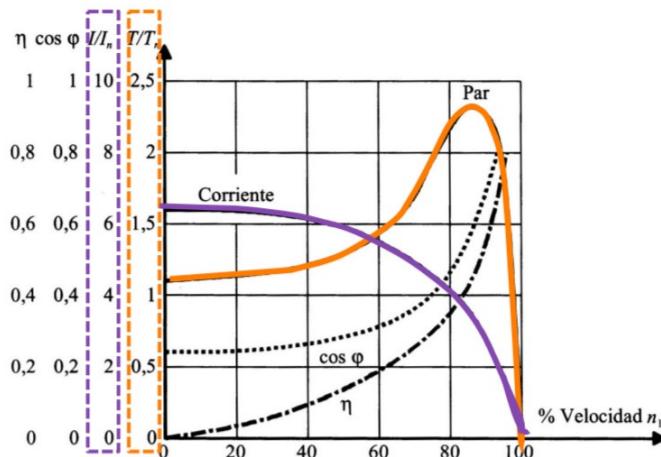
# Curva Par-Velocidad



- ▶ **Punto O.** Funcionamiento en sincronismo:  $s=0 \rightarrow T=0$  (imposible físicamente). La máquina a esta velocidad no podría ni tan siquiera vencer los pares resistentes de rozamiento.
- ▶ **Punto A.** Régimen asignado o nominal:  $s=s_n \rightarrow T=T_n$  se produce para  $s$  entre 3% y 8%
- ▶ **Punto B.** Funcionamiento con par máximo:  $s=s_m \rightarrow T=T_m$  se produce para  $s$  entre 15% y 30%
- ▶ **Punto C.** Régimen de arranque:  $s=1 \rightarrow T=T_a$  la velocidad es cero, y par es de arranque.

# Arranque del motor

- El par de arranque ha de ser superior al par resistente para que exista aceleración
- En el arranque se producen corrientes elevadas ya que la resistencia de carga  $R_C$  es nula ( $s=1$ )

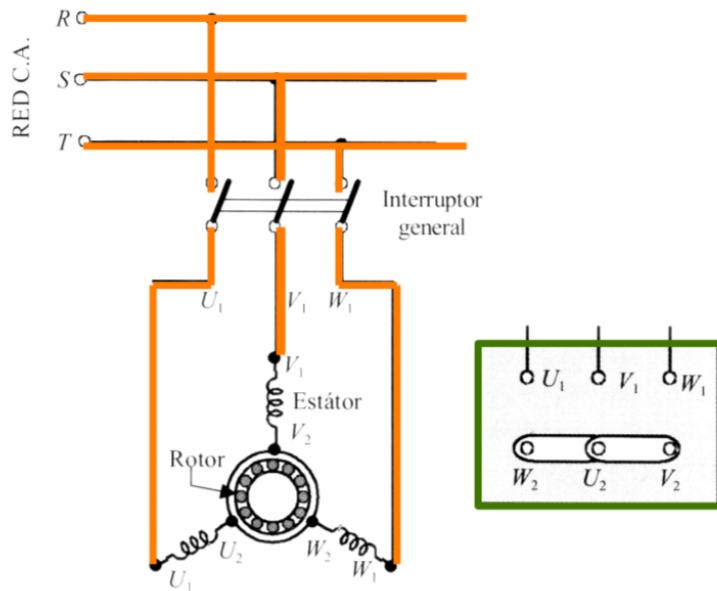


Para reducir las corrientes en el momento de la puesta en marcha se emplean métodos especiales de arranque

# Métodos de arranque

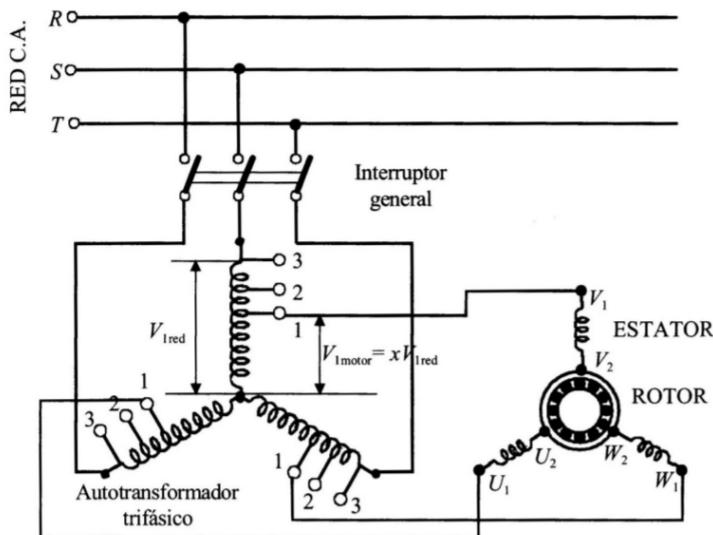
- Arranque directo.
- Arranque por autotransformador.
- Arranque pro comutación estrella triángulo.
- Arrancador estático.
- Arranque con rotor bobinado.

# Métodos de arranque: Directo



Se emplea únicamente en motores de pequeña potencia.  
En grandes fábricas recibiendo tensión en A.T. y con subestación transformadora se puede llegar a arranques directos de motores de hasta 75 kW.

# Métodos de arranque: Autotransformador



$$x = \text{p.u del autotrafo}$$

$$V_{\text{motor}} = x V_{\text{red}}$$

$$I_{\text{motor}} = x I_{\text{cc}}$$

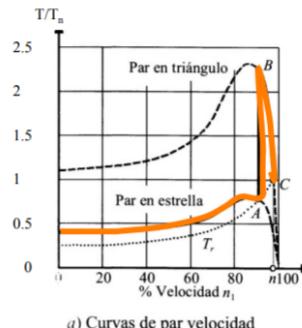
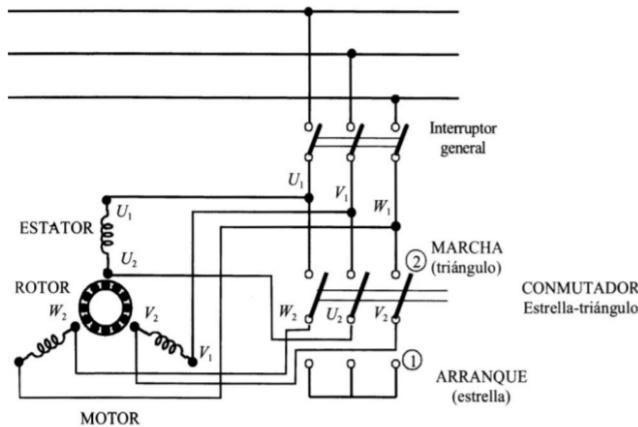
$$T_{\text{aut}} = x^2 T_{\text{direc}}$$

aut: con autotrafo

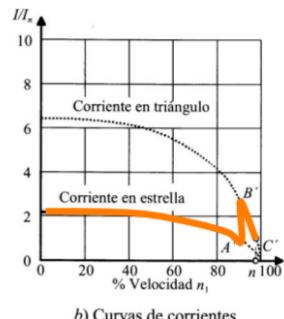
direc: con arranque directo

Sólo es posible cuando el par resistente de la carga no sea muy elevado,  
pues el par se reduce con el cuadrado de la tensión.

# Métodos de arranque: Estrella-triángulo



a) Curvas de par velocidad



b) Curvas de corrientes

$$T_{a\lambda} = I / 3 \ T_a$$

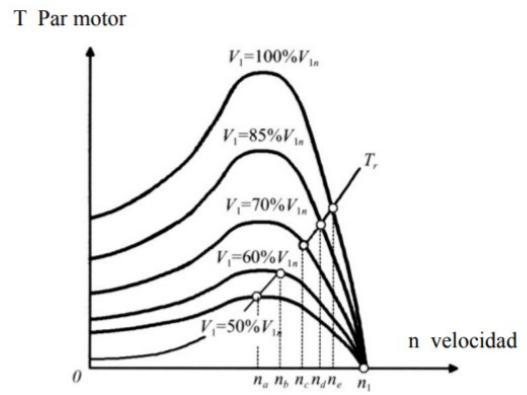
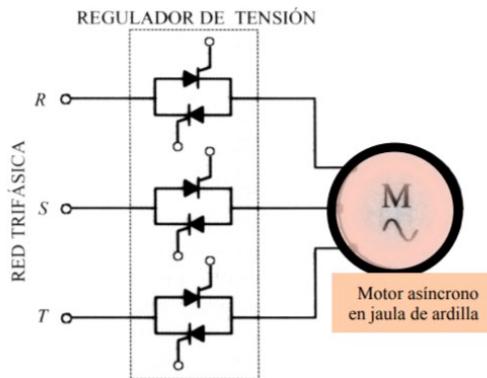
$$I_{a\lambda} = 1/3 \ I_{cc}$$

$\lambda$ : conexión en estrella  
 $a$ : conexión en triángulo

Este método sólo se puede utilizar en aquellos motores que estén preparados para funcionar en triángulo y tengan un par resistente pequeño.

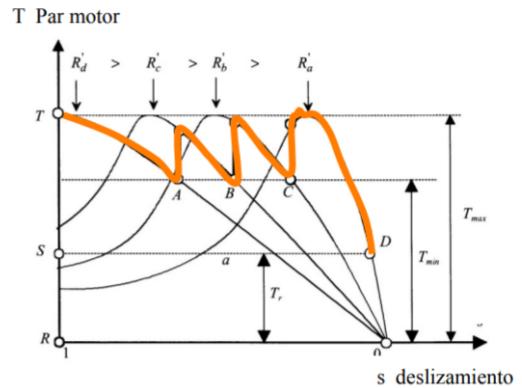
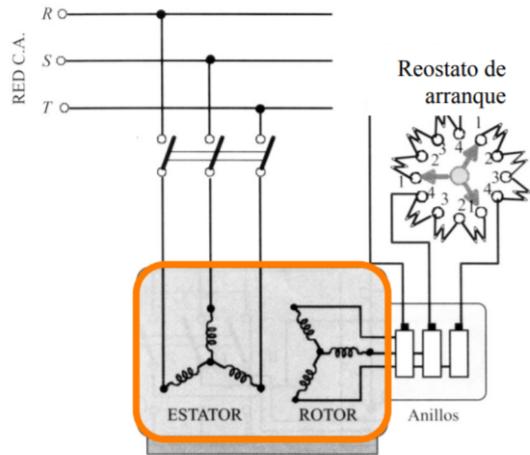
La máquina se arranca en estrella y se conmuta a triángulo una vez alcanzada una velocidad estable.

# Métodos de arranque: arrancador estático



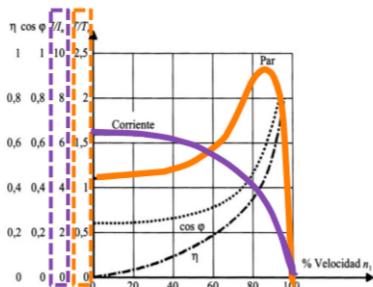
Este método trabaja bajo el principio de reducción de tensión estatórica de forma continua, modificando la característica par-velocidad y la de corriente-velocidad

# Métodos de arranque: resistencias rotóricas



Se arranca la máquina introduciendo toda la resistencia (1) aumentando la impedancia de la máquina y reduciendo la corriente inicial. Al final (4) queda cortocircuitado el rotor.

# Métodos de arranque



## Datos

Motor asincrónico trifásico 50 Hz  
 $R_1=R_2'=0.5 \Omega$ ,  $X_{cc}=5\Omega$   
 $T_{\max}/T_{\text{nominal}}=2.2$

## Calcular

La relación entre el par de arranque y el par nominal en los siguientes casos:

- Arranque directo
- Arranque por transformador
- Arranque estrella-tríangulo

# Frenado

Para parar el motor rápidamente se puede realizar por procedimientos mecánicos (rozamiento) o eléctricos. En el caso de frenado eléctrico el motor pasa a funcionar como generador.

## 1) Frenado regenerativo o por recuperación de energía

Este fenómeno se produce de forma espontánea cuando la velocidad supera la velocidad de sincronismo y la máquina se pone a generar. (se controla la sobrevelocidad pero no se para la máquina).

Para reducir la velocidad se conecta: a) un generador con dos velocidades (Dahlander) o b) un convertidor a frecuencia variable.

## 2) Frenado por contracorriente

Cuando al motor se le invierten 2 fases, éste pasa a estar alimentado por un sistema de secuencia inversa, cambiando la frecuencia de sincronismo de  $\omega_1$  a  $-\omega_1$ , y la máquina de motor a generador. Para pararlo habrá que enclavarlo en el paso por velocidad nula.

## 3) Frenado dinámico por inyección de corriente continua

Se produce un campo continuo en el entrehierro que visto desde el rotor el deslizamiento es 1-s, similar a un arranque directo, tendiendo el par electromagnético a igualar las velocidades de los campos estatórico y rotórico, y por lo tanto frenando el rotor.

# Regulación de velocidad

El motor de inducción tiene una característica par-velocidad, cuya zona de trabajo estable es muy "rígida" (casi nula variación de velocidad). Para competir con los motores de continua se han desarrollado sistemas que permitan su regulación de velocidad.

## 1) 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 rotor (se usan varios devanados). Es preciso que el rotor sea jaula de ardilla para que el rotor se adapte automáticamente al número de polos del estator. La conexión Dahlander emplea dos escalones de velocidad, relación 2:1, y con un solo devanado.

## 2) Regulación por variación del deslizamiento

- Se puede variar el deslizamiento controlando la tensión aplicada, pero no es aconsejable pues resulta afectado el par (este varía con el cuadrado de la tensión).
- También se puede variar el deslizamiento introduciendo resistencias en el rotor (rotor devanado), pero tiene grande pérdidas.
- El sistema más empleado es aplicar una tensión al rotor controlada con un convertidor de electrónica de potencia (generador asíncrono doblemente alimentado).

## 3) Regulación por variación en la frecuencia (conv. electrónico)

Este sistema se utiliza hoy en día con convertidores electrónicos, que controlan la frecuencia y el flujo (control escalar) de la máquina para conservar el par (relación  $V/f$  constante).