

MÁQUINAS ELÉCTRICAS GIRATORIAS

1 Principios generales

2 **Máquinas asíncronas**

3 Máquinas síncronas

4 Otras máquinas giratorias

1

2 MÁQUINAS ASÍNCRONAS

- **Construcción y funcionamiento**

- Circuito equivalente y ensayos

- Par, régimen y rendimiento

- Arranque y regulación de velocidad

2

CONSTRUCCIÓN Y FUNCIONAMIENTO

Partes más comunes

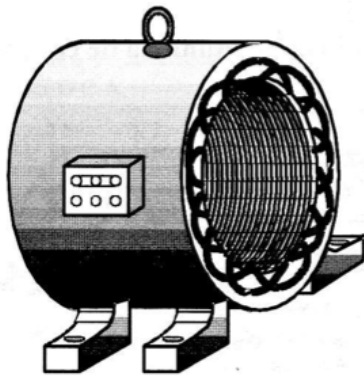


Figura 4.1. Estátor de un motor asíncrono.

Mismo número de pares de polos...

$$p_1 = p_2 = p$$

...pero no de fases

+ Resistencias de arranque y control de par y velocidad

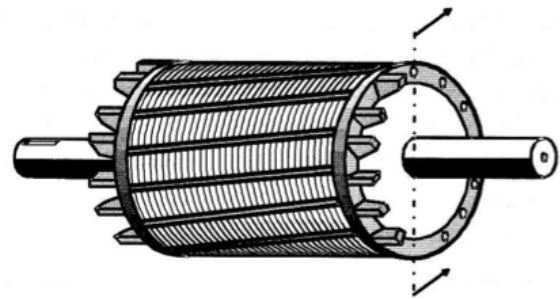


Figura 4.2. Rotor en jaula de ardilla.

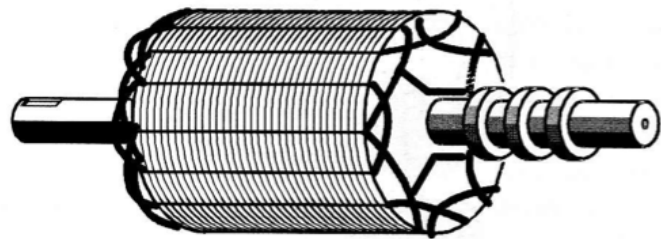
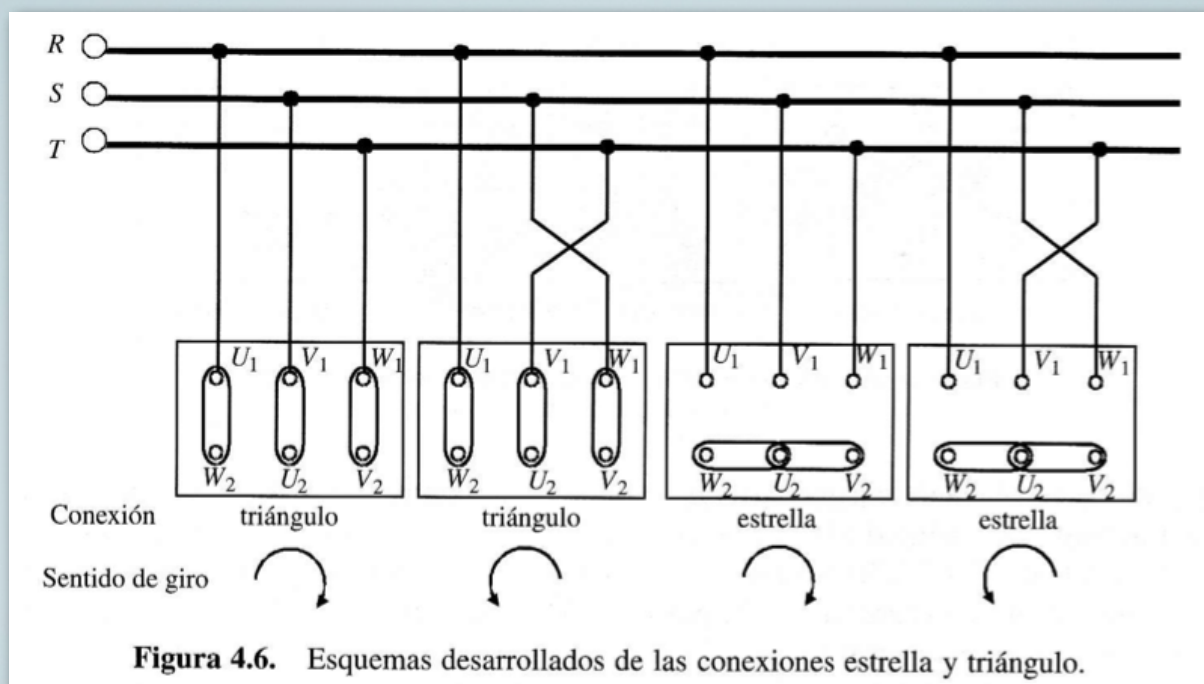


Figura 4.3. Rotor devanado o con anillos.

3

CONSTRUCCIÓN Y FUNCIONAMIENTO

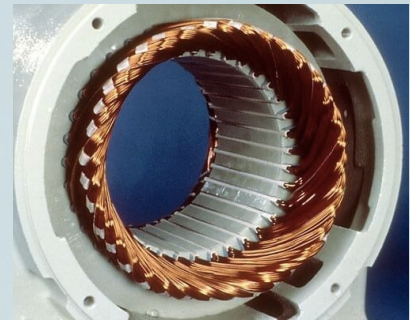
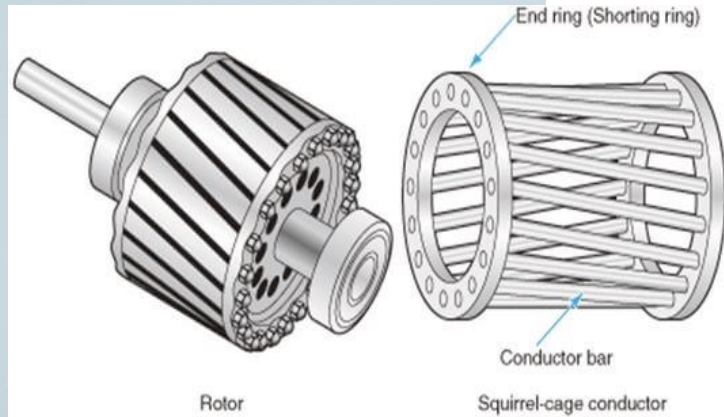
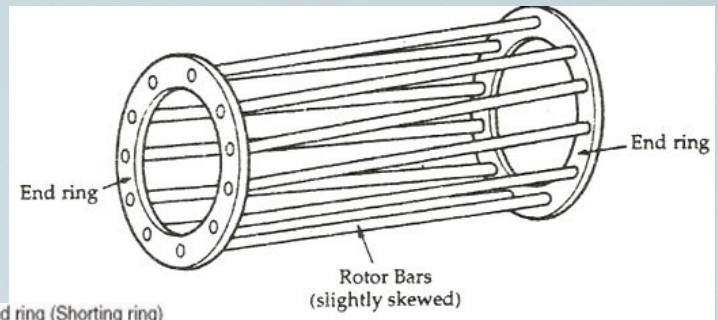
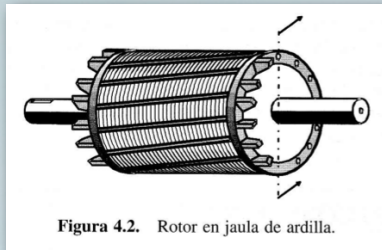
Conexiones estrella triángulo



4

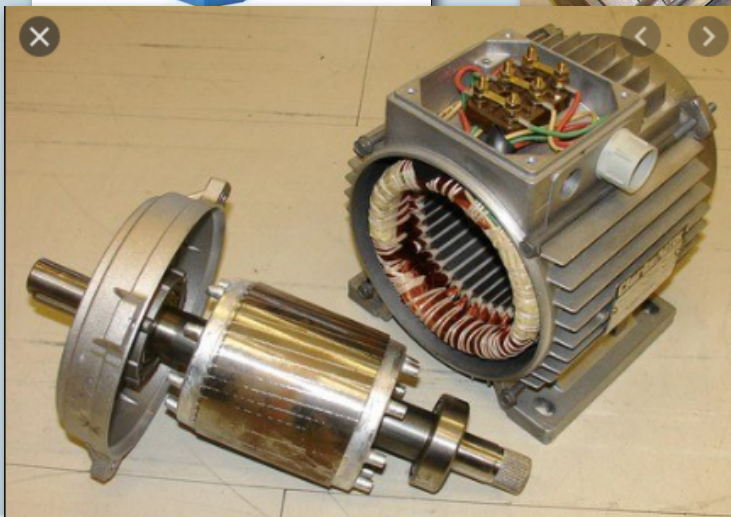
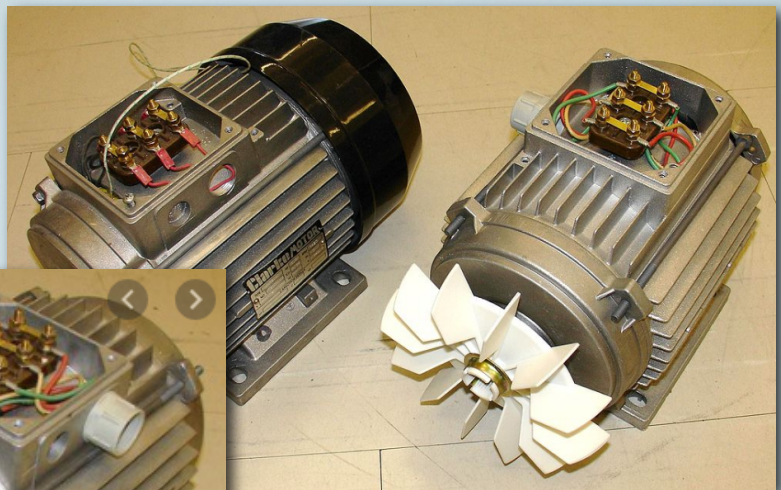
CONSTRUCCIÓN Y FUNCIONAMIENTO

Rotor en jaula de ardilla



5

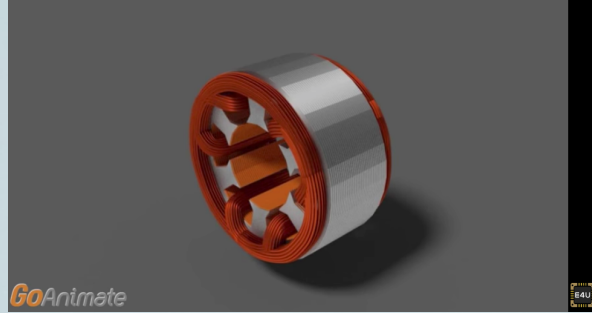
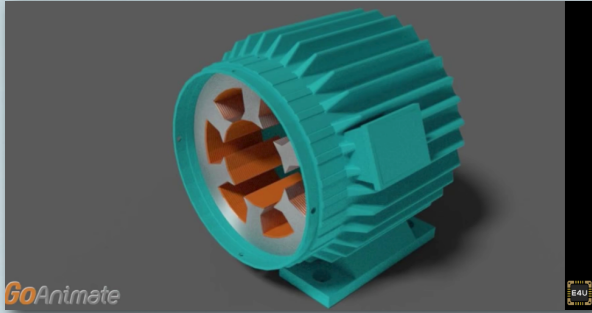
CONSTRUCCIÓN Y FUNCIONAMIENTO



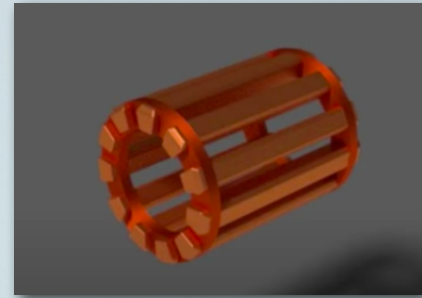
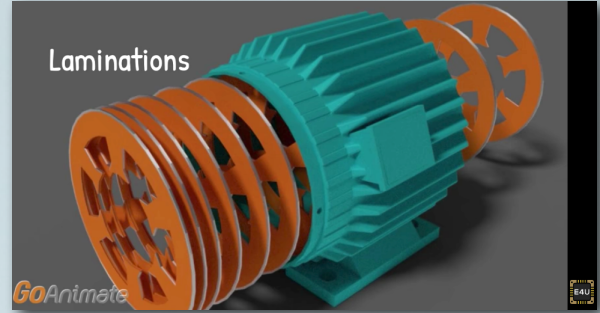
Wikipedia

6

CONSTRUCCIÓN Y FUNCIONAMIENTO



Estátor convencional

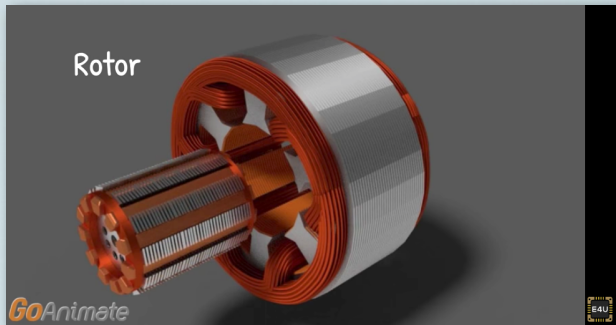
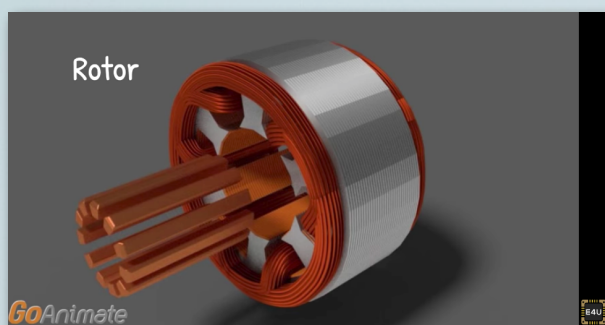
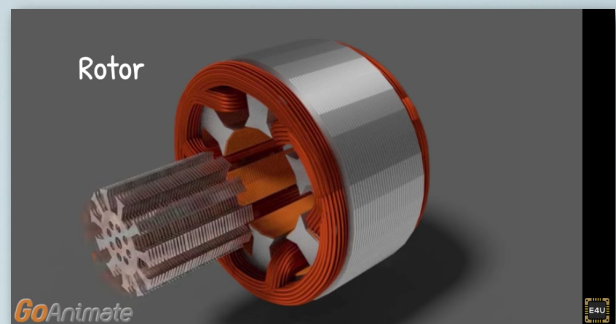
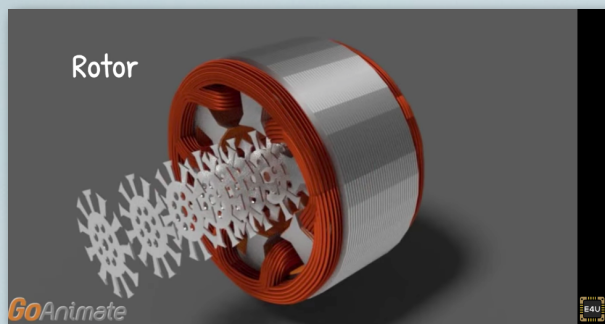


Barras del rotor

<https://www.electrical4u.com>

7

CONSTRUCCIÓN Y FUNCIONAMIENTO



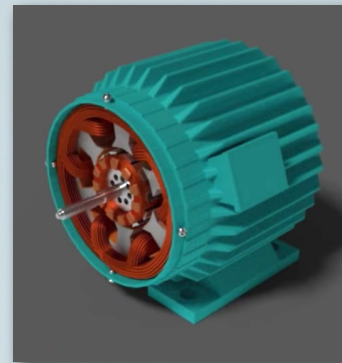
<https://www.electrical4u.com>

Rotor en jaula de ardilla

8

CONSTRUCCIÓN Y FUNCIONAMIENTO

Partes más comunes



+ Resistencias de arranque y control de par y velocidad

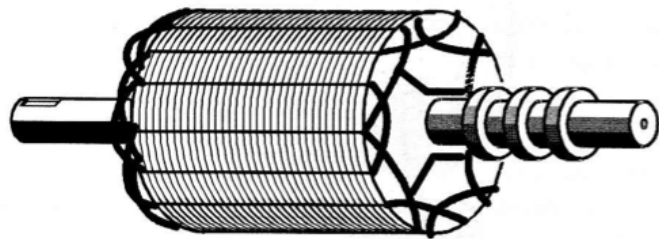


Figura 4.3. Rotor devanado o con anillos.

9

CONSTRUCCIÓN Y FUNCIONAMIENTO

Así funciona

Campo magnético generado en el estátor

Campo magnético inducido en el rotor

Pulsación de ambos campos

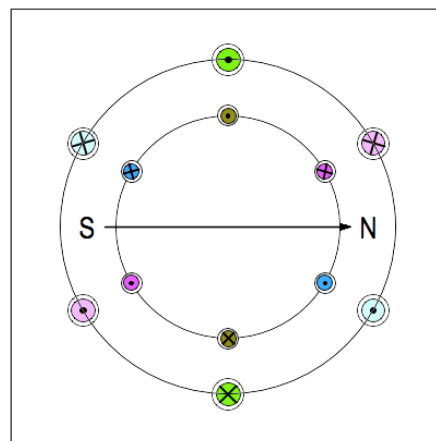
Deslizamiento s

Motor de inducción

Fundamentos

© NRM 2020 - Universidad de Salamanca -

Velocidad giro estátor (0):
Pulsación campo estátor (0): Sí No
Velocidad giro rotor (0): Sí No
Pulsación campo rotor (0): Sí ☒ No



10

CONSTRUCCIÓN Y FUNCIONAMIENTO

Funcionamiento

$$f_1 \neq 0 \ ; \ f_2 = f_1 \pm \frac{np}{60} \ ; \ f_L = f_2$$

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

$$3\% \leq s \leq 8\%$$

a) Como motor:

$$f_2 = f_1 - \frac{np}{60}$$

Deslizamiento:

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

$$s = \frac{\frac{60f_1}{p} - n}{\frac{60f_1}{p}} = \frac{f_2}{f_1}$$

b) Como generador

c) Como convertidor de frecuencia

11

2

MÁQUINAS ASÍNCRONAS

- Construcción y funcionamiento

- **Circuito equivalente y ensayos**

- Par, régimen y rendimiento

- Arranque y regulación de velocidad

CIRCUITO EQUIVALENTE Y ENSAYOS

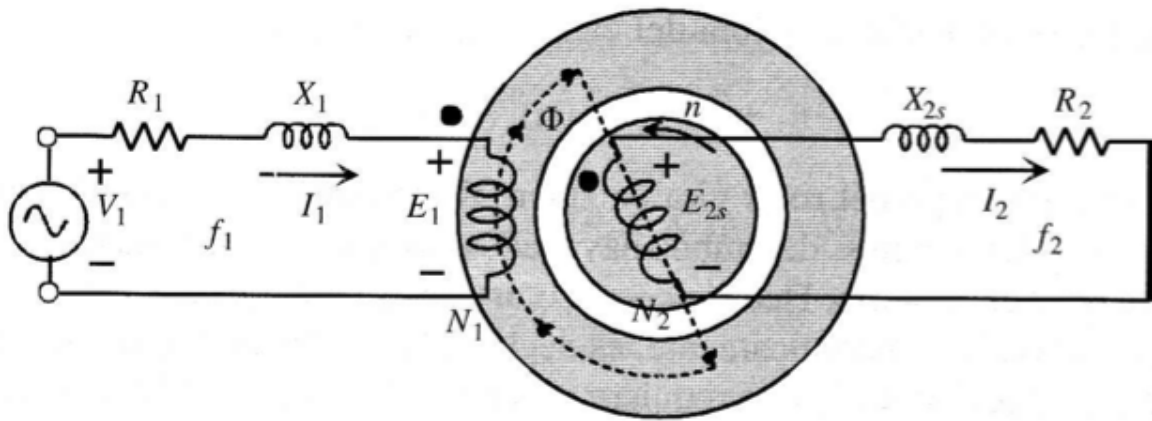


Figura 4.10. Circuito equivalente por fase del motor asíncrono trifásico.

Si el rotor gira: $f_2 \neq f_1 \Rightarrow \begin{cases} X_{2s} = s X_2 \\ E_{2s} = s E_2 \end{cases}$ $s = \frac{n_1 - n}{n_1}$

13

CIRCUITO EQUIVALENTE Y ENSAYOS

Circuito equivalente

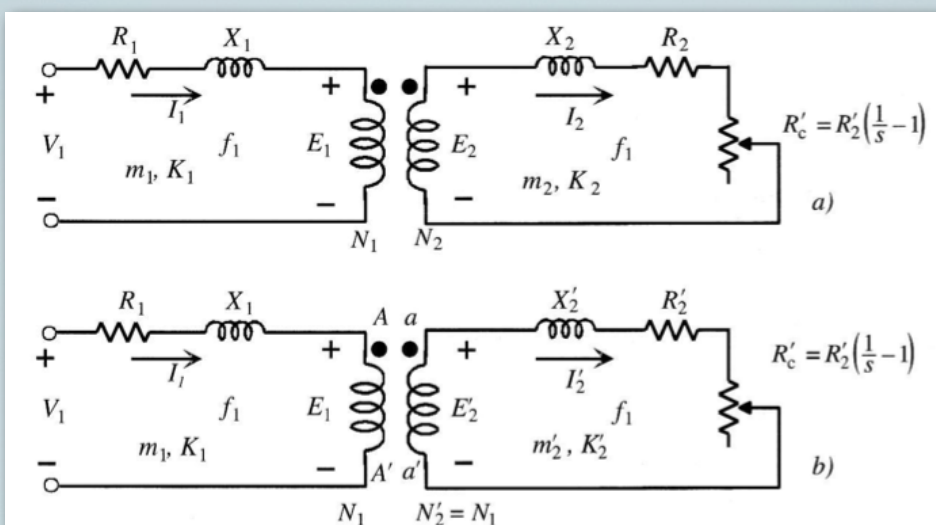


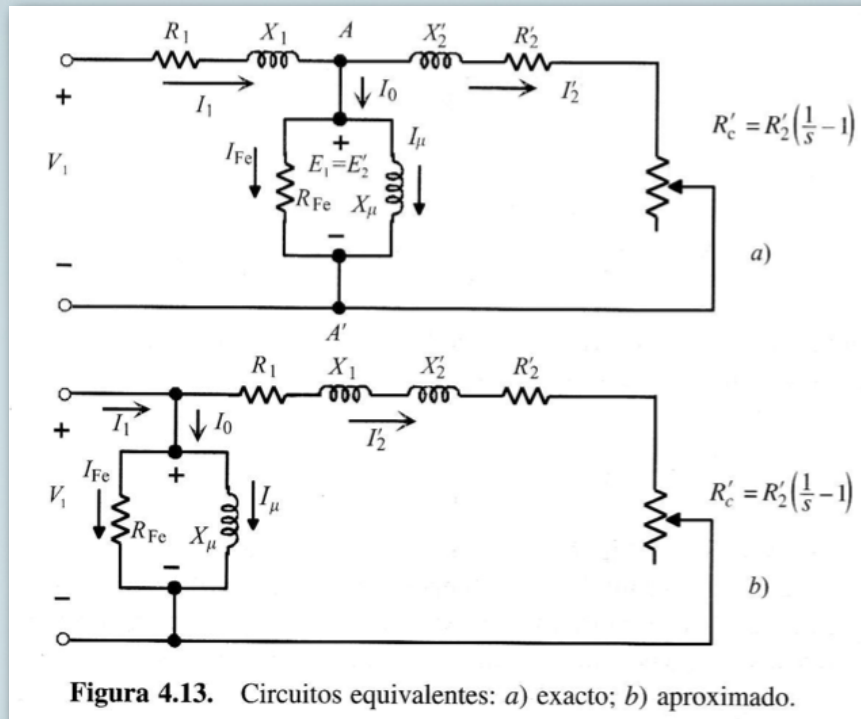
Figura 4.12. Circuito equivalente reducido al estator.

$$m'_2 = m_1 \quad ; \quad K'_2 = K_1 \quad ; \quad N'_2 = N_1$$

14

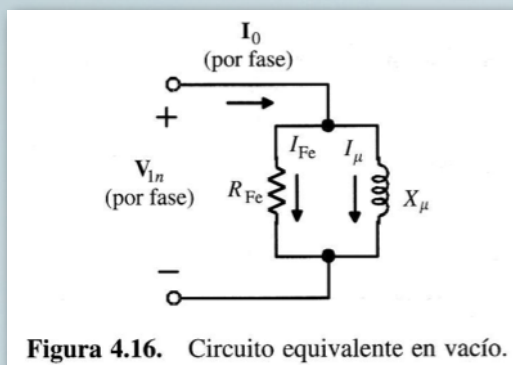
CIRCUITO EQUIVALENTE Y ENSAYOS

Circuito equivalente



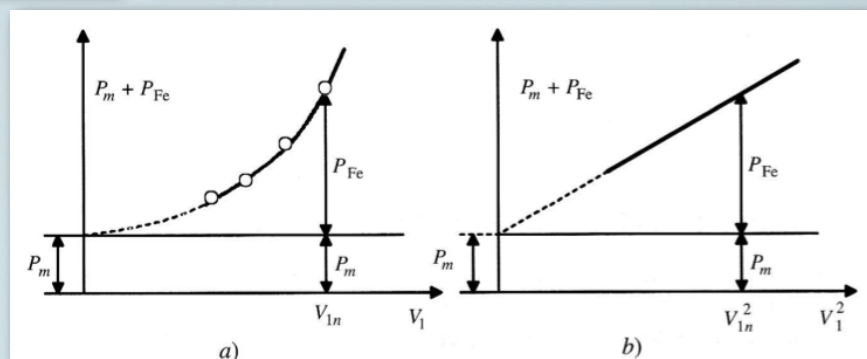
15

CIRCUITO EQUIVALENTE Y ENSAYOS



Ensayo de vacío
o de rotor libre

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_{Fe}}{m_1 V_{ln} I_0} ; I_{Fe} = I_0 \cos \varphi_0 ; I_{\mu} = I_0 \sin \varphi_0$$



16

CIRCUITO EQUIVALENTE Y ENSAYOS

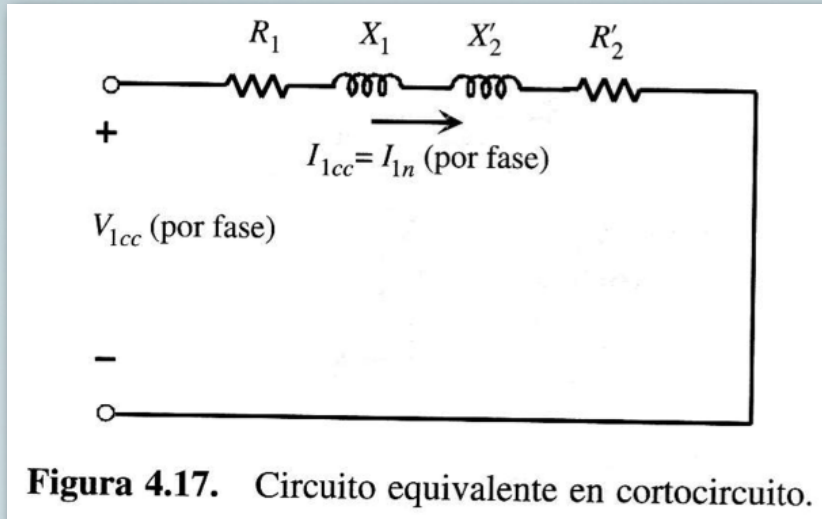


Figura 4.17. Circuito equivalente en cortocircuito.

Ensayo de
cortocircuito o
de rotor
bloqueado

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{m_1 V_{1cc} I_{1n}}$$

$$R_{cc} = R_1 + R_2' = \frac{V_{1cc}}{I_{1n}} \cos \varphi_{cc} ; \quad X_{cc} = X_1 + X_2' = \frac{V_{1cc}}{I_{1n}} \sin \varphi_{cc}$$

17

2

MÁQUINAS ASÍNCRONAS

- Construcción y funcionamiento
- Circuito equivalente y ensayos
- **Par, régimen y rendimiento**
- Arranque y regulación de velocidad

PAR, RÉGIMEN Y RENDIMIENTO

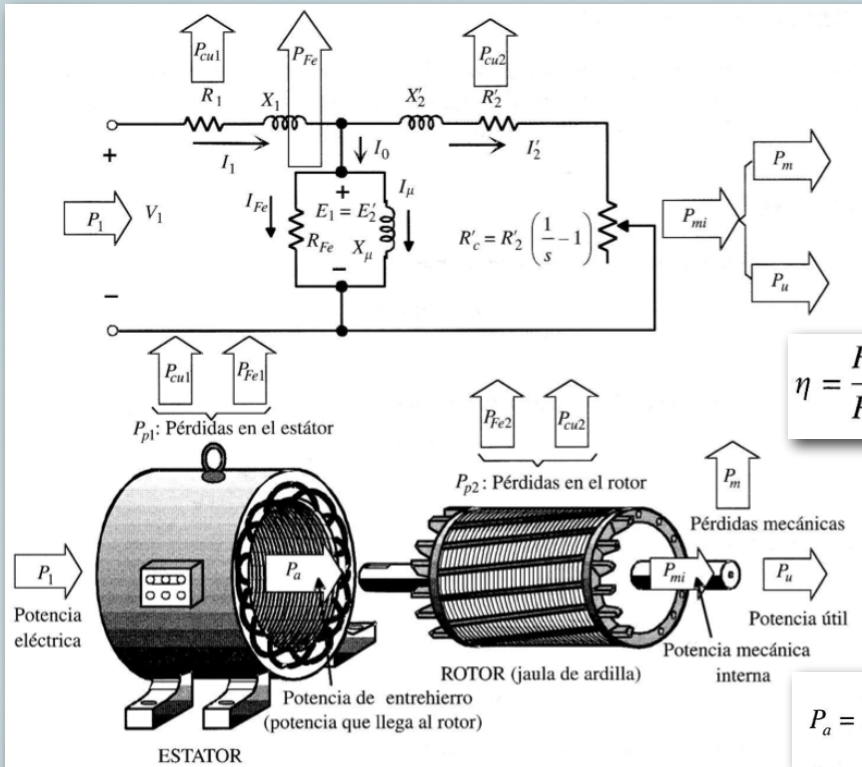


Figura 4.18. Circuito equivalente exacto y distribución de las potencias en el motor.

Balance de potencias

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

$$\frac{P_{cu2}}{P_{mi}} = \frac{s}{1-s}$$

$$P_a = P_{mi} + P_{cu2} = m_1 \frac{R'_2}{s} I_2'^2 = \frac{P_{cu2}}{s} = \frac{P_{mi}}{1-s}$$

19

PAR, RÉGIMEN Y RENDIMIENTO

Par de rotación

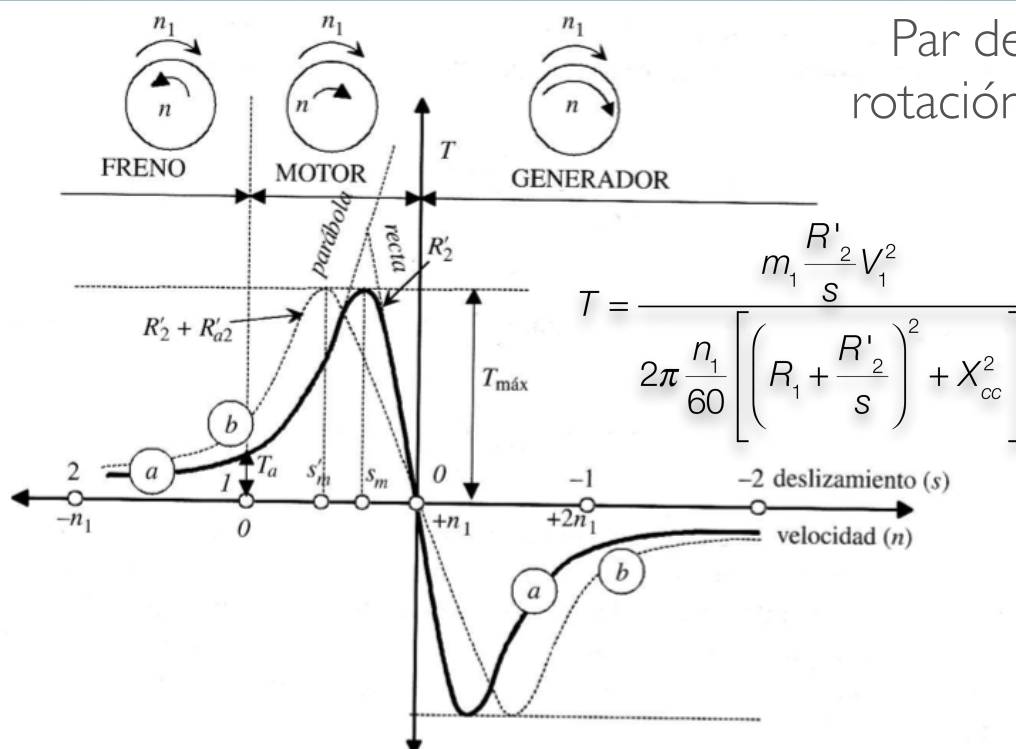


Figura 4.20. Curvas par-velocidad de una máquina asíncrona. Zonas de funcionamiento.

20

Par máximo

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

$$s_{\max} = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_{cc}^2}}$$

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

$$T_{\max} = \pm \frac{U_1^2}{4\pi \frac{n_1}{60} \left[\pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{cc}^2} \right]} \quad (\text{máquina trifásica})$$

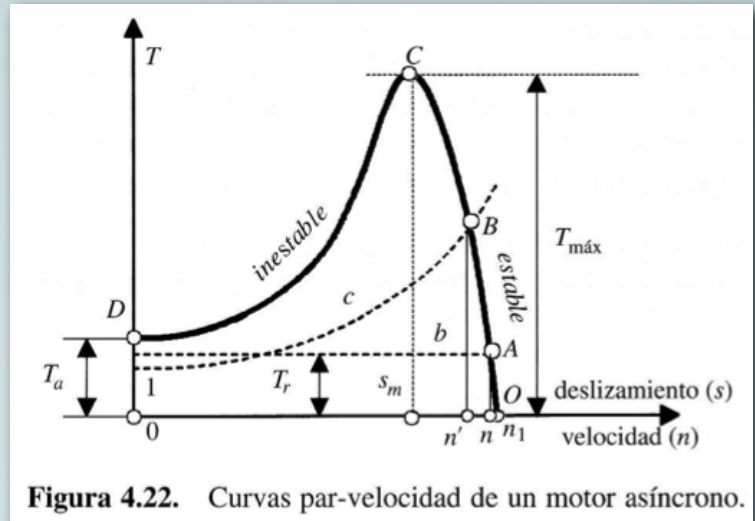


Figura 4.22. Curvas par-velocidad de un motor asíncrono.

21

PAR, RÉGIMEN Y RENDIMIENTO

Diferentes regímenes de funcionamiento

Potencia mecánica interna: $P_{mi} = m_1 R'_2 \left(\frac{1}{s} - 1 \right) I_2'^2$

Potencia de entrehierro: $P_a = \frac{P_{mi}}{1 - s}$

Par electromagnético: $T = \frac{P_a}{2\pi \frac{n_1}{60}}$

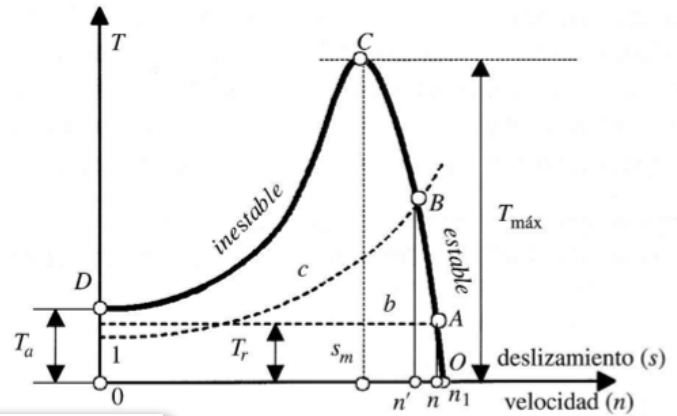
- Régimen motor
- Régimen generador
- Régimen de freno

22

PAR, RÉGIMEN Y RENDIMIENTO

Régimen motor

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



Curvas par-velocidad de un motor asíncrono.

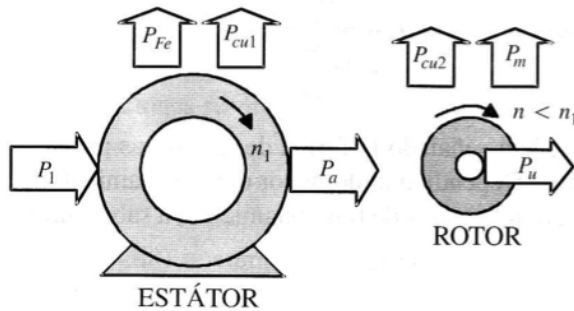


Figura 4.21. Reparto de potencias en el funcionamiento como motor.

23

PAR, RÉGIMEN Y RENDIMIENTO

Régimen generador

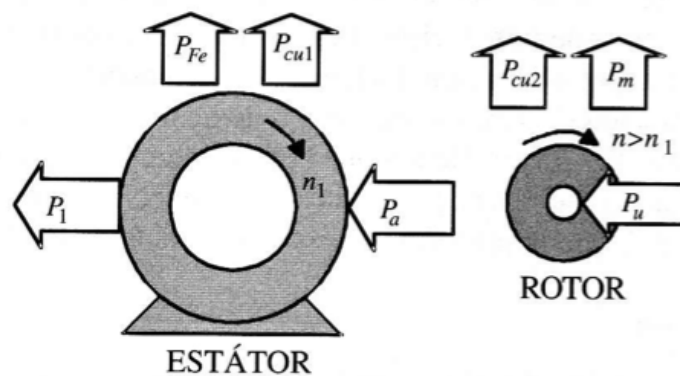


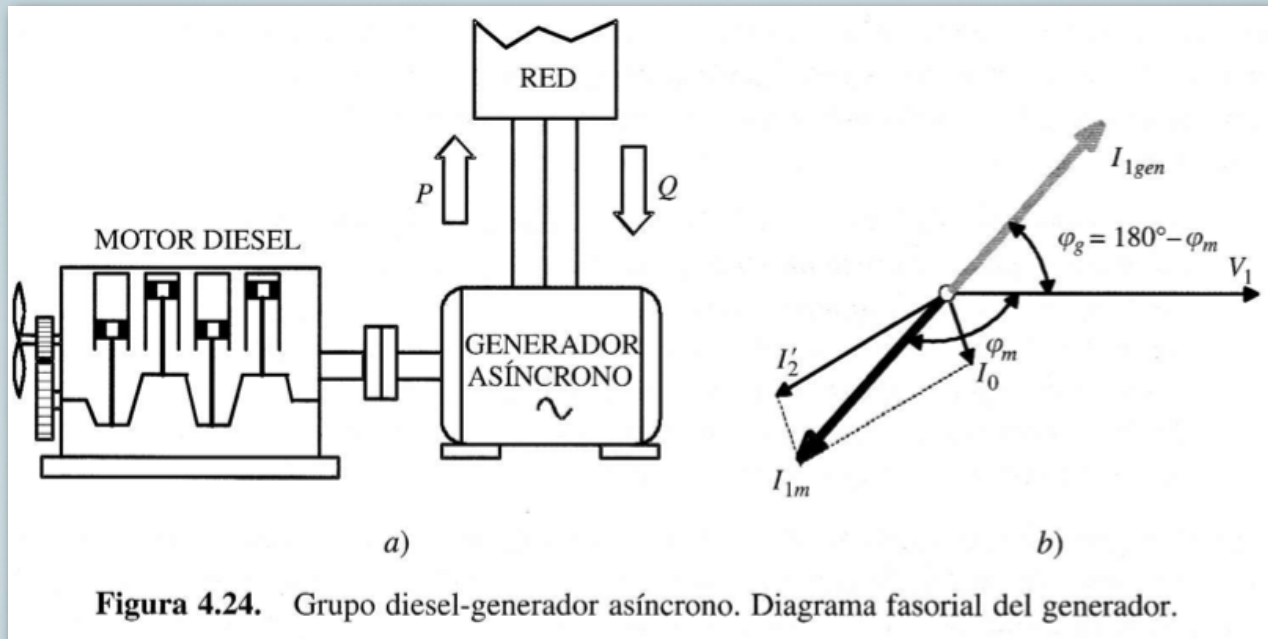
Figura 4.23. Reparto de potencias en el funcionamiento como generador.

$$P_1 = m_1 V_1 I_{1g} \cos \varphi_g \quad ; \quad |I_{1g}| = |I_{1m}|$$

24

PAR, RÉGIMEN Y RENDIMIENTO

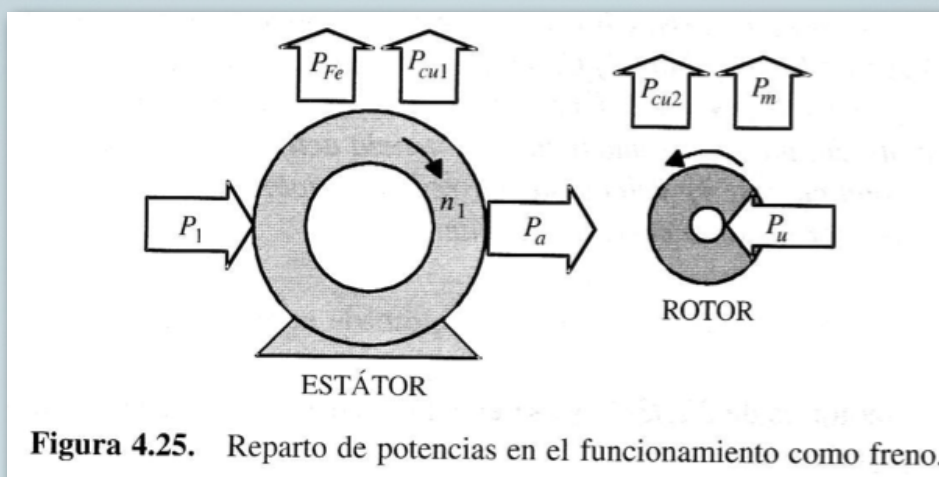
Régimen generador



25

PAR, RÉGIMEN Y RENDIMIENTO

Régimen de freno



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

$$s' = \frac{n_1 - (-n)}{n_1} = 1 + \frac{n}{n_1} = 2 - s$$

26

PAR, RÉGIMEN Y RENDIMIENTO

EJEMPLO DE APLICACIÓN 4.5

Un motor asíncrono trifásico con rotor en jaula de ardilla de 220/380 V, 50 Hz, 10 polos, tiene los siguientes parámetros del circuito equivalente: $R_1 = 0,5 \, \Omega$; $X_1 = 3 \, \Omega$; $R_2' = 0,8 \, \Omega$; $X_2' = 3,5 \, \Omega$. Se desprecia la rama paralelo del circuito equivalente y las pérdidas mecánicas. Si la máquina se conecta a una red trifásica de 380 V de línea, 50 Hz, veamos: 1) ¿Cómo se conectará el estátor de la máquina? 2) Calcular la corriente de arranque del motor. 3) Si el deslizamiento a plena carga es del 4 por 100, calcular la corriente absorbida, potencia mecánica desarrollada, par electromagnético, potencia activa absorbida de la red y rendimiento en estas condiciones. 4) Velocidad (en régimen motor) a la cual se obtiene el par máximo y valor del par máximo correspondiente.

27

2

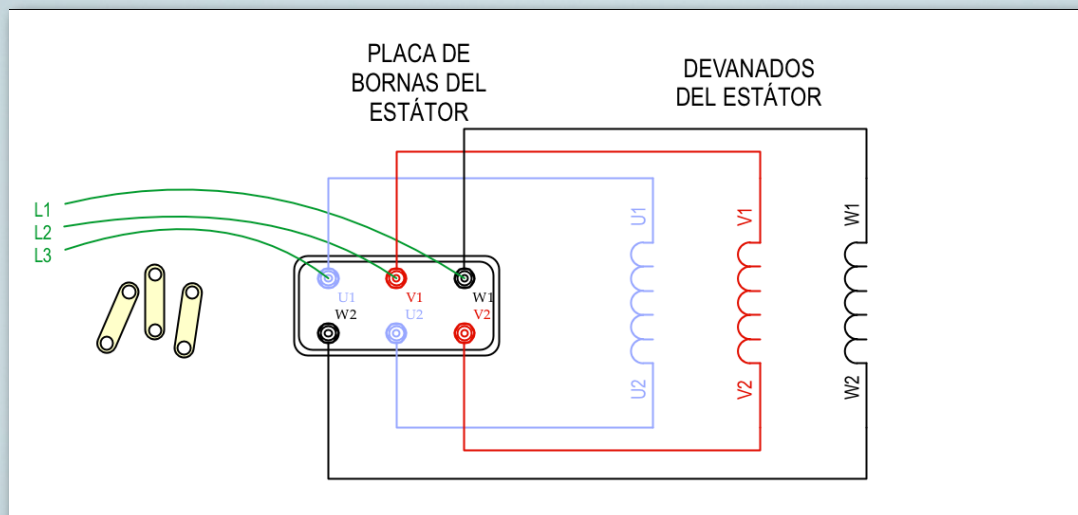
MÁQUINAS ASÍNCRONAS

- Construcción y funcionamiento
- Circuito equivalente y ensayos
- Par, régimen y rendimiento
- **Arranque y regulación de velocidad**

28

ARRANQUE Y REGULACIÓN DE VELOCIDAD

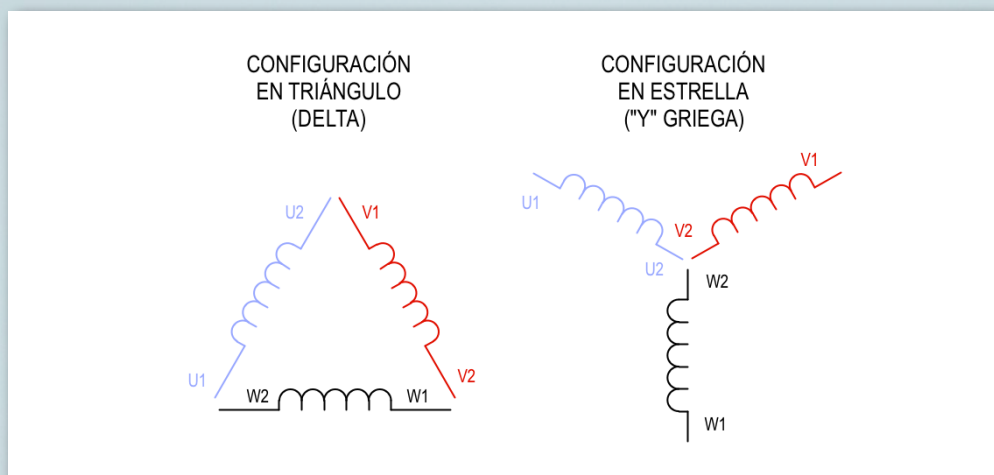
Configuración del
estátor



29

ARRANQUE Y REGULACIÓN DE VELOCIDAD

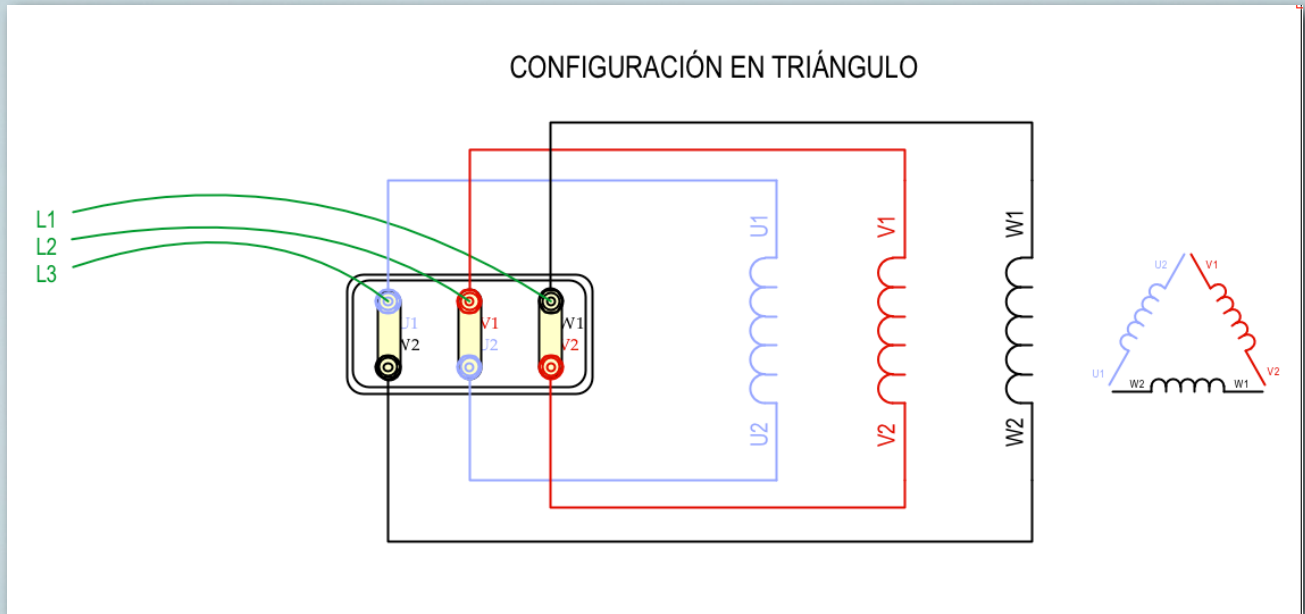
Configuración del
estátor



30

ARRANQUE Y REGULACIÓN DE VELOCIDAD

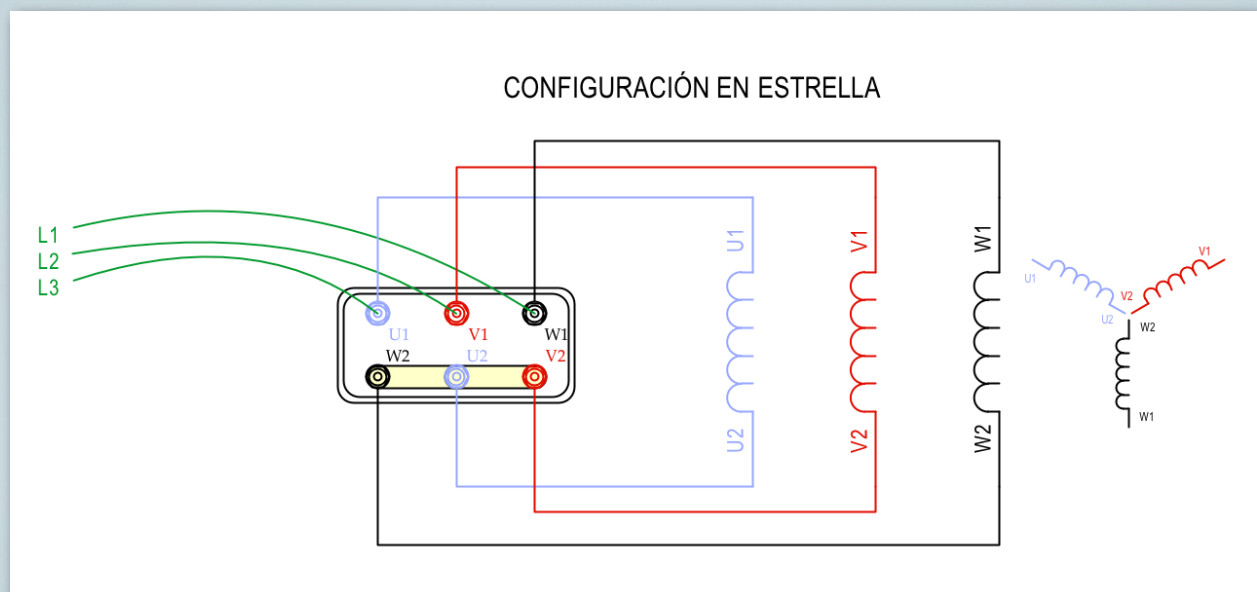
Configuración del estátor



31

ARRANQUE Y REGULACIÓN DE VELOCIDAD

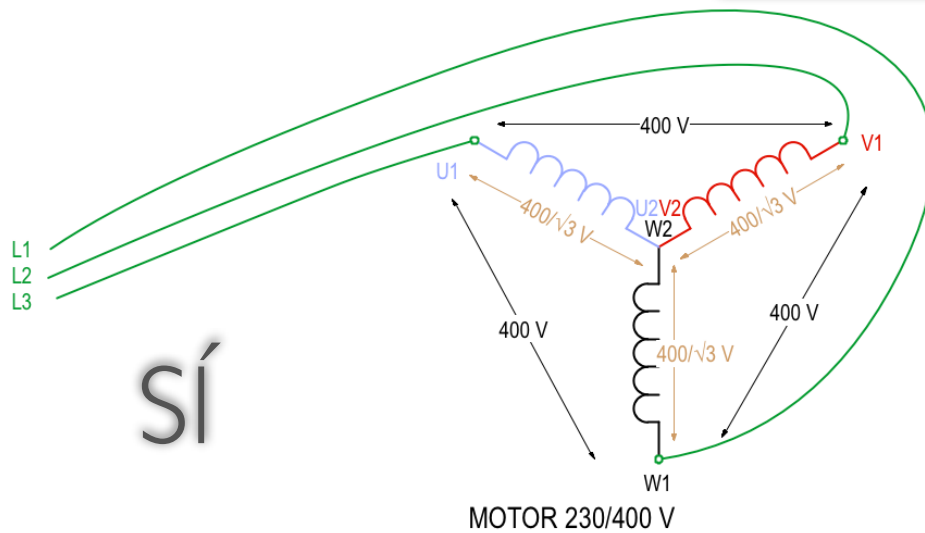
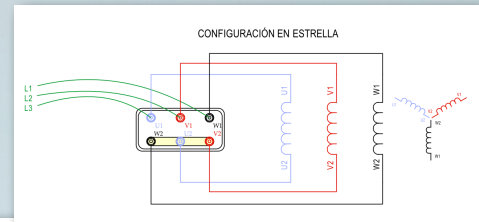
Configuración del estátor



32

ARRANQUE Y REGULACIÓN DE VELOCIDAD

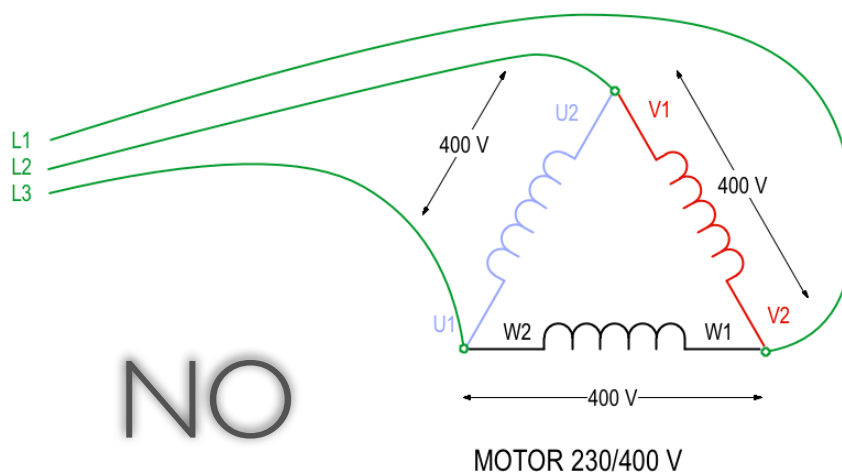
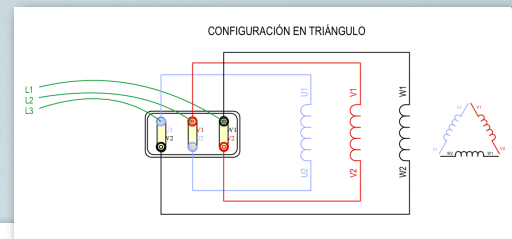
Configuración del
estátor



33

ARRANQUE Y REGULACIÓN DE VELOCIDAD

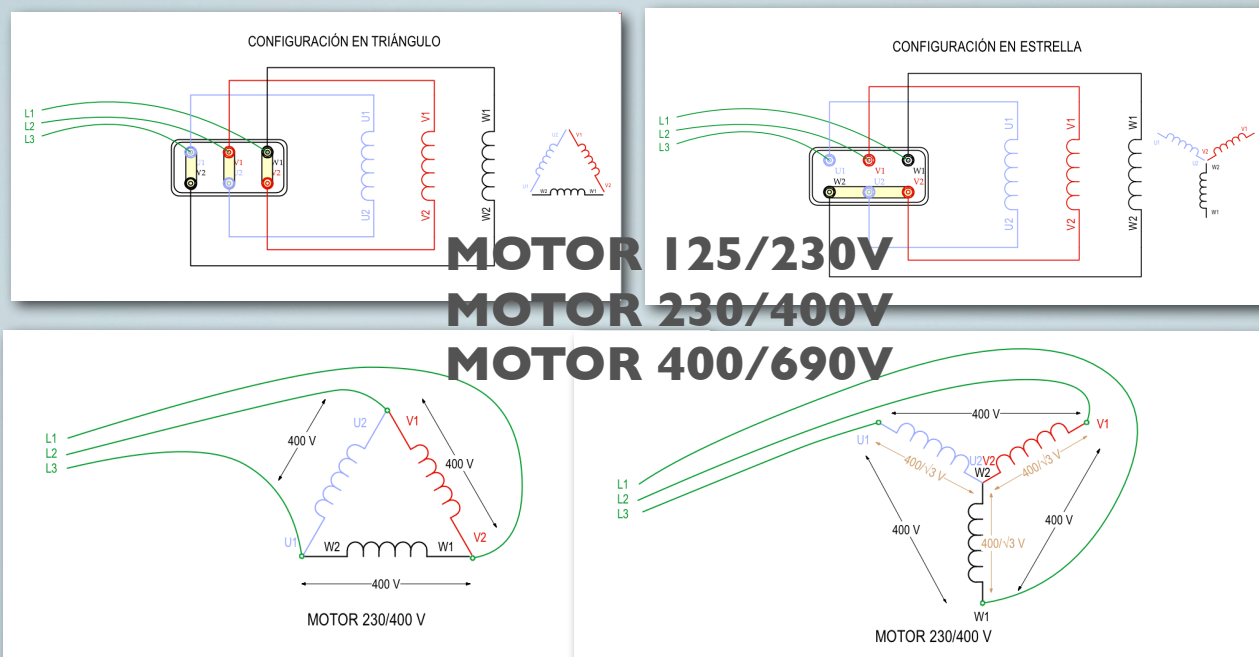
Configuración del
estátor



34

ARRANQUE Y REGULACIÓN DE VELOCIDAD

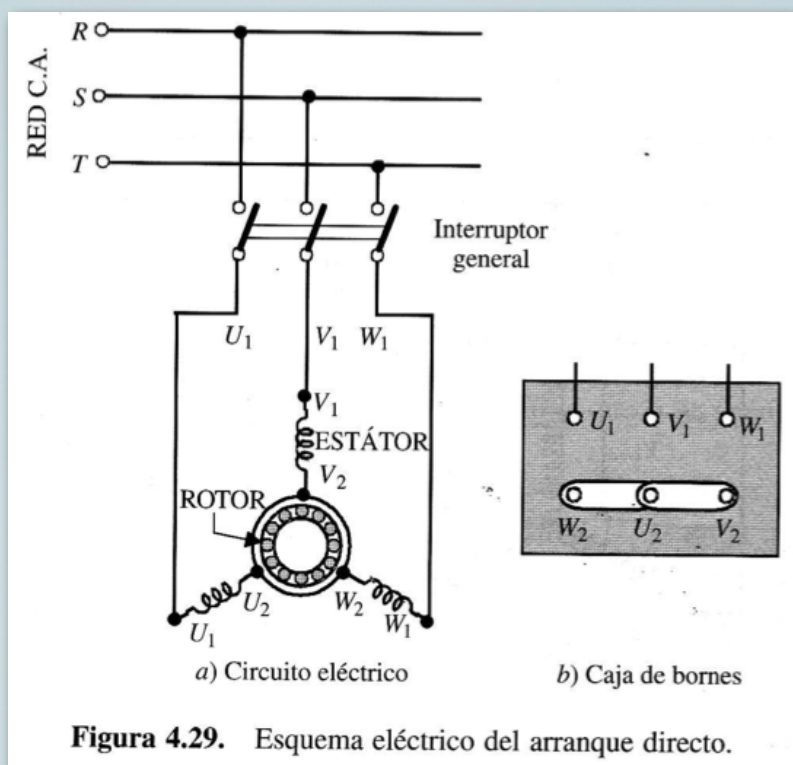
Configuración del estátor



35

ARRANQUE Y REGULACIÓN DE VELOCIDAD

Arranque directo

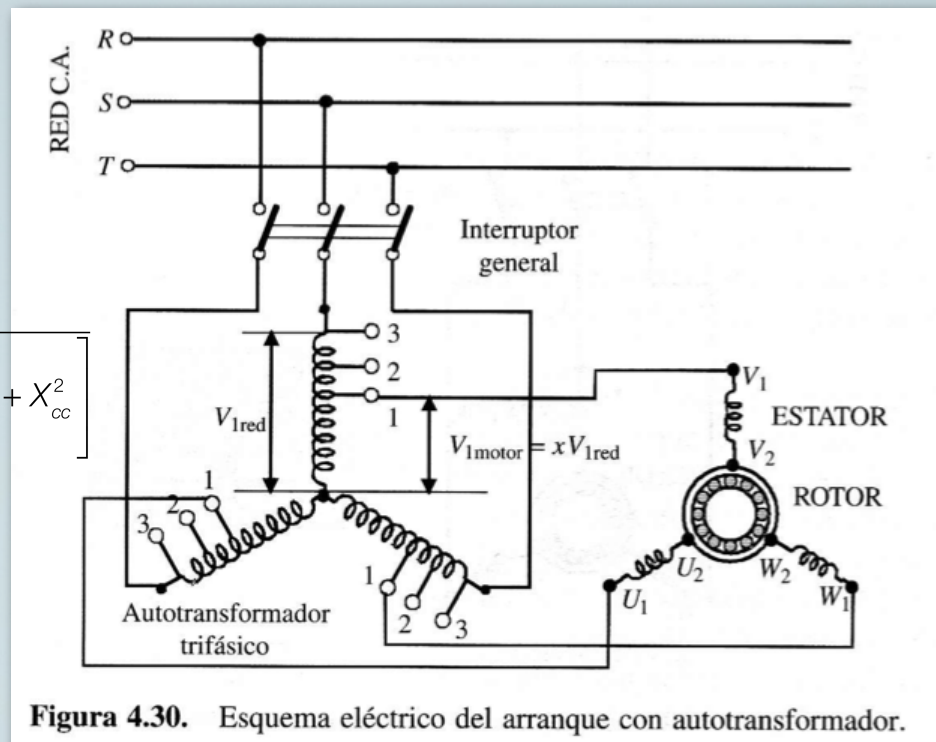


36

ARRANQUE Y REGULACIÓN DE VELOCIDAD

Arranque por auto-transformador

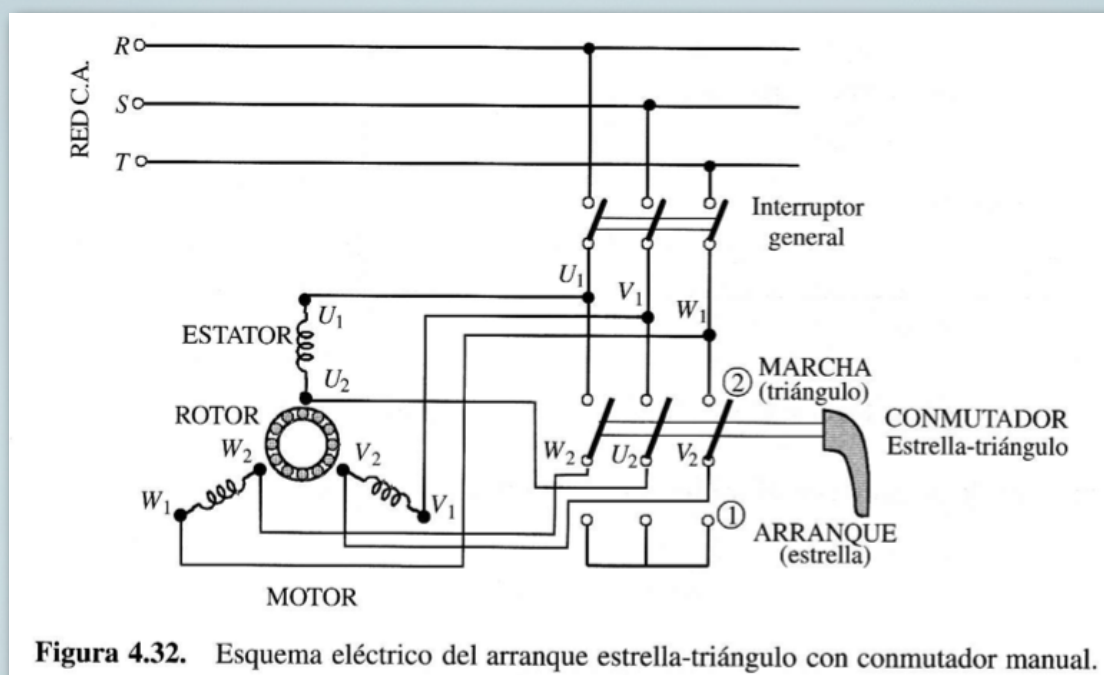
$$T = \frac{m_1 \frac{R'_2}{s} V_1^2}{2\pi \frac{n_1}{60} \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + X_{cc}^2 \right]}$$



37

ARRANQUE Y REGULACIÓN DE VELOCIDAD

Arranque estrella-triángulo



38

ARRANQUE Y REGULACIÓN DE VELOCIDAD

Arranque en rotor devanado y accesible

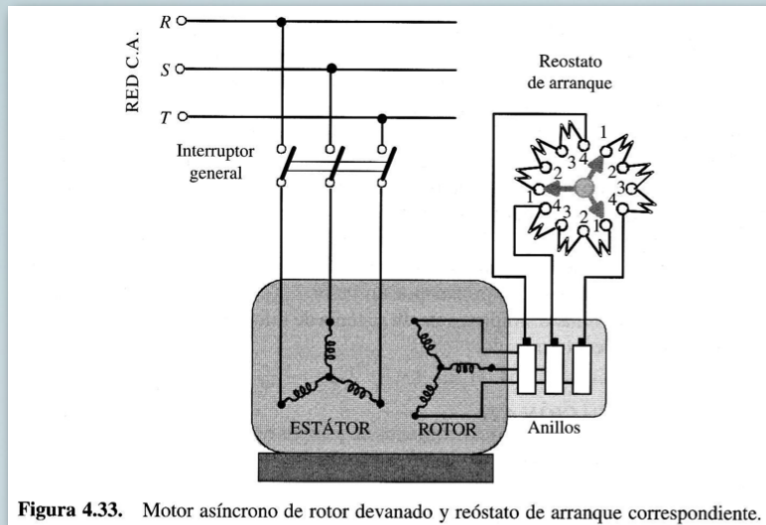


Figura 4.33. Motor asíncrono de rotor devanado y reóstato de arranque correspondiente.

$$s_m = 1 = \frac{R'_2 + R'_{adic}}{\sqrt{R_1^2 + X_{cc}^2}}$$

$$R'_{adic} = \sqrt{R_1^2 + X_{cc}^2} - R'_2$$

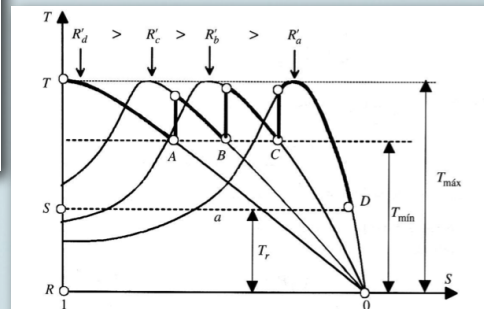
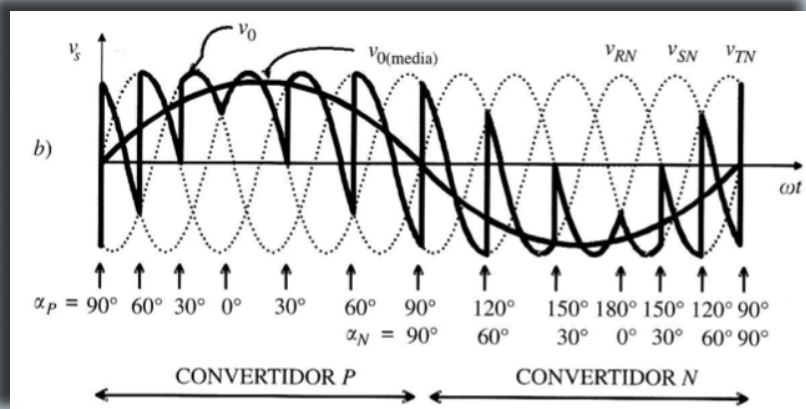
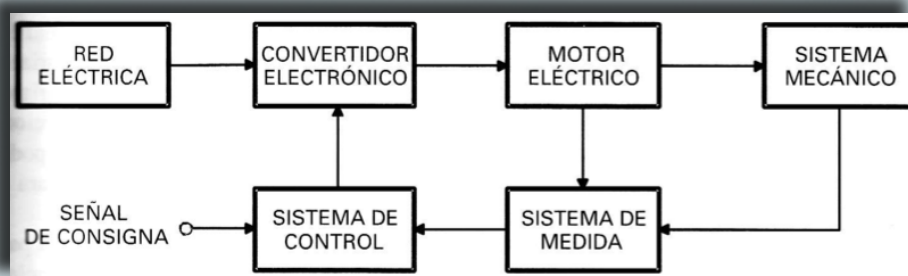


Figura 4.34. Curvas par-velocidad al variar las resistencias del rotor.

39

ARRANQUE Y REGULACIÓN DE VELOCIDAD

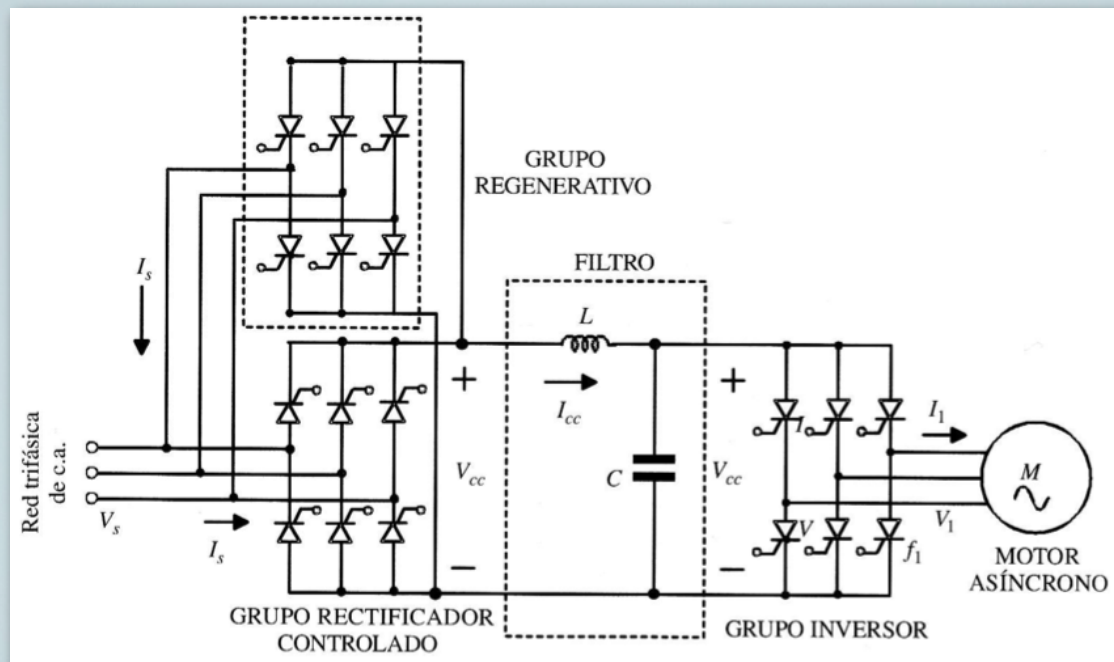
Accionamiento eléctrico



40

ARRANQUE Y REGULACIÓN DE VELOCIDAD

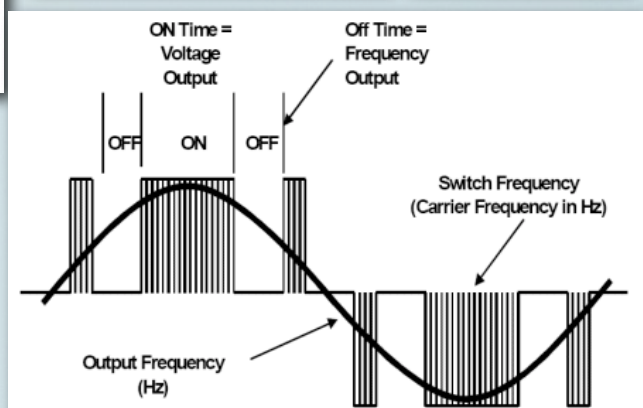
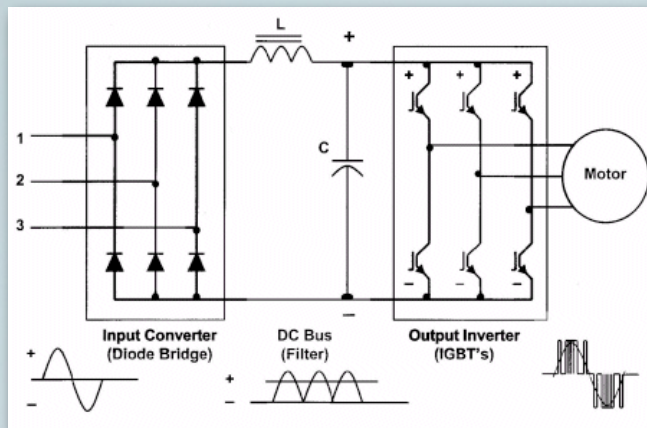
Variador de frecuencia
VDF (variable frequency drive)



41

ARRANQUE Y REGULACIÓN DE VELOCIDAD

Variador de frecuencia



42