

# MAQUINAS ELÉCTRICAS GIRATORIAS

## 1 Principios generales

2 Máquinas asíncronas

3 Máquinas síncronas

4 Otras máquinas giratorias

1

1

## PRINCIPIOS GENERALES DE LAS MÁQUINAS GIRATORIAS

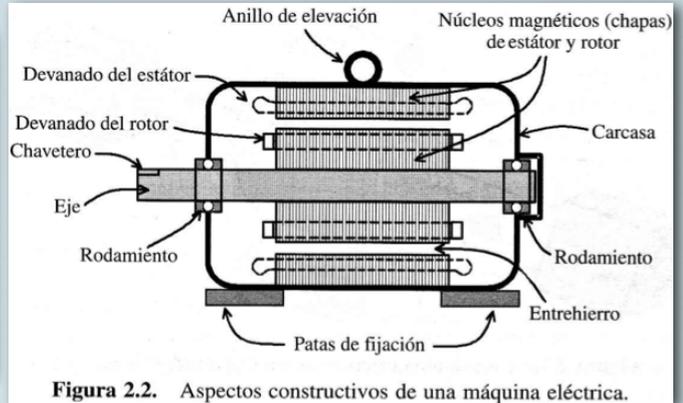
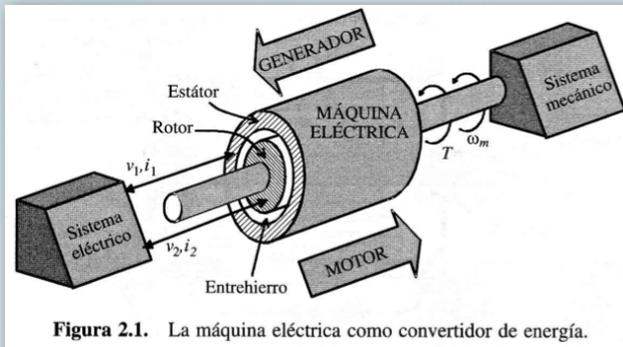
### • Elementos básicos

- Potencia, pérdidas y rendimiento
- Fuerzas magneto y electro motrices
- Clasificación de las máquinas

2

# ELEMENTOS BÁSICOS

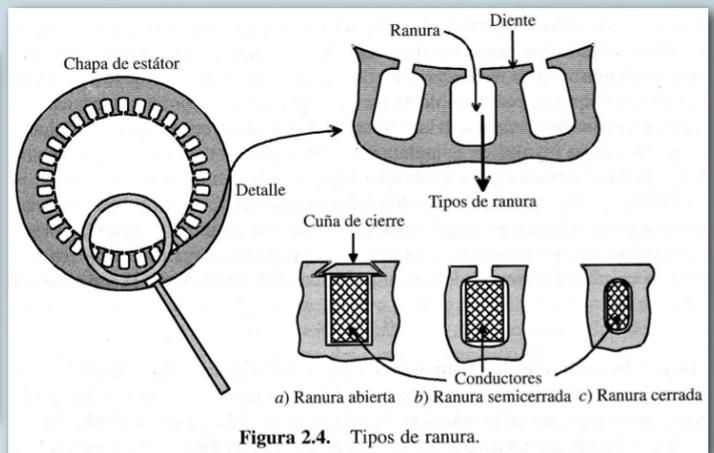
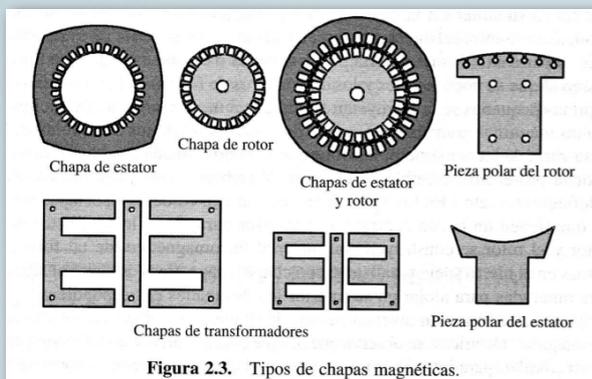
## Partes más comunes



3

# ELEMENTOS BÁSICOS

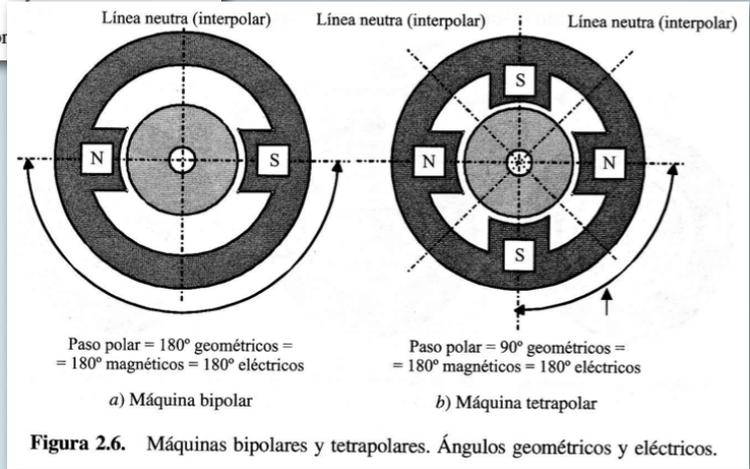
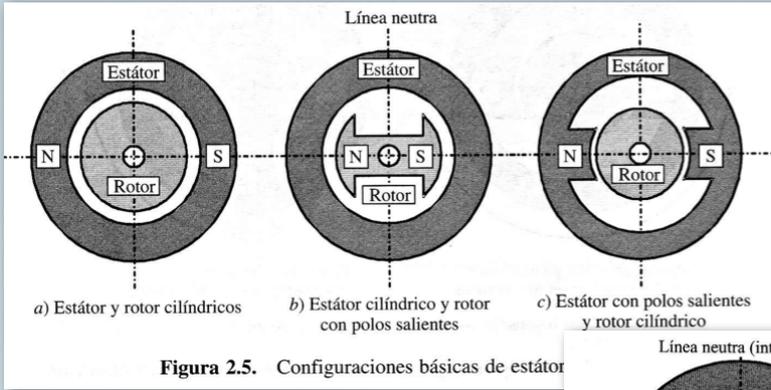
## Chapas magnéticas y ranurado para bobinados



4

# ELEMENTOS BÁSICOS

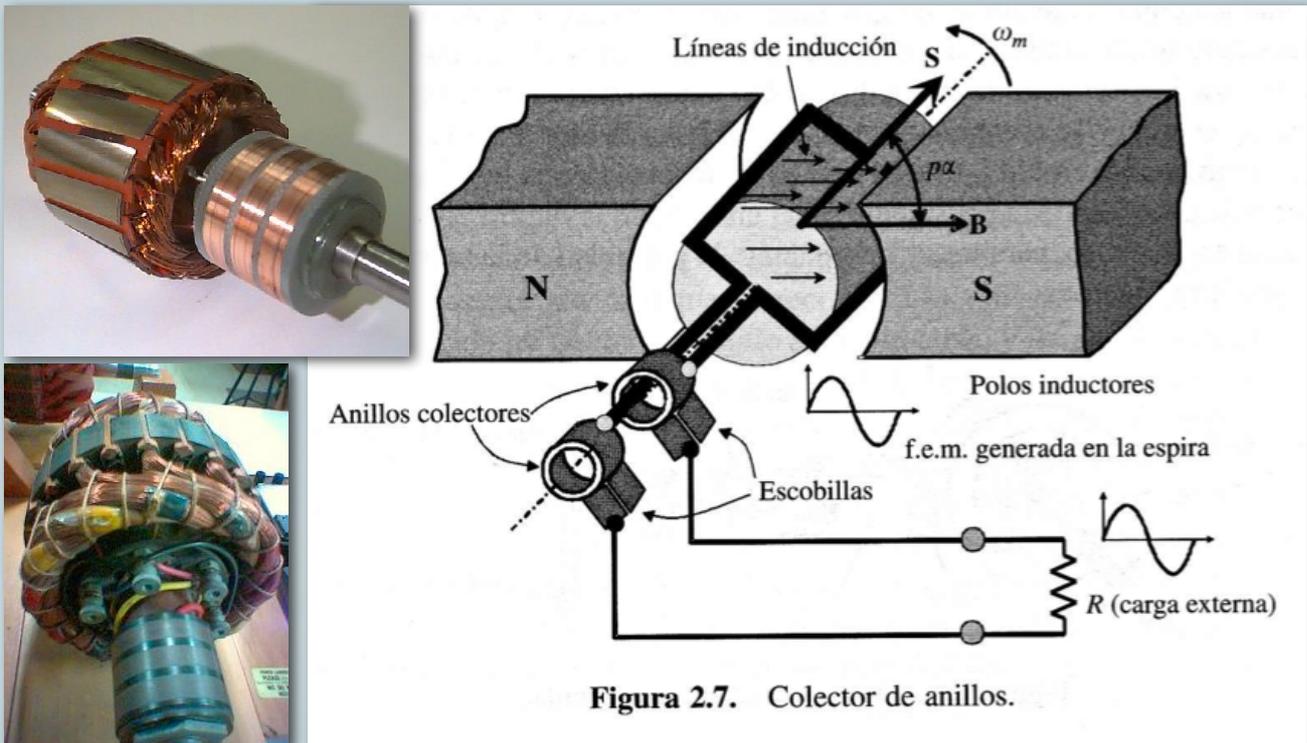
Configuraciones básicas de estátor y rotor



5

# ELEMENTOS BÁSICOS

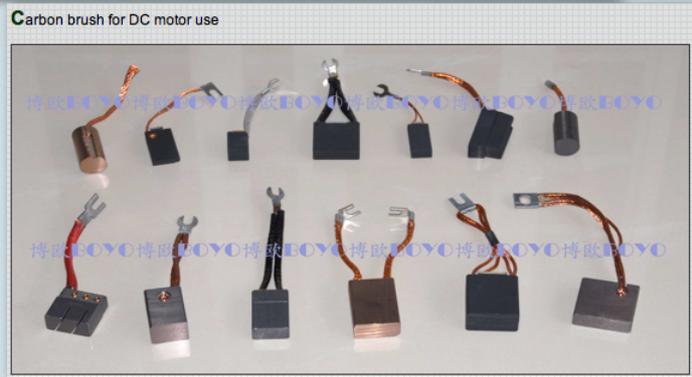
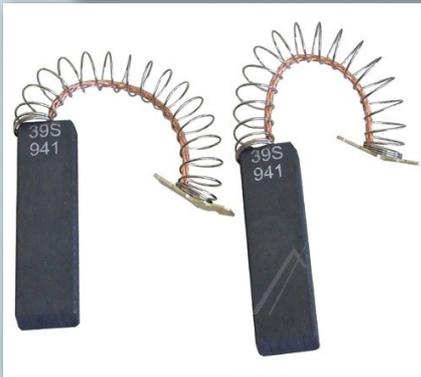
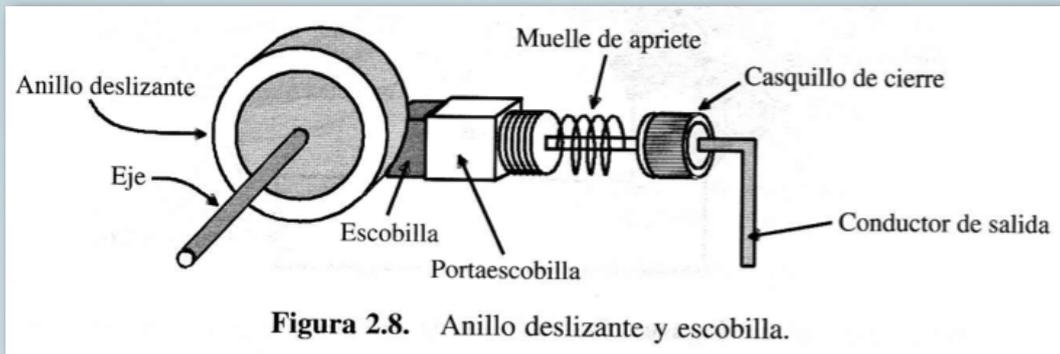
Colectores de anillos



6

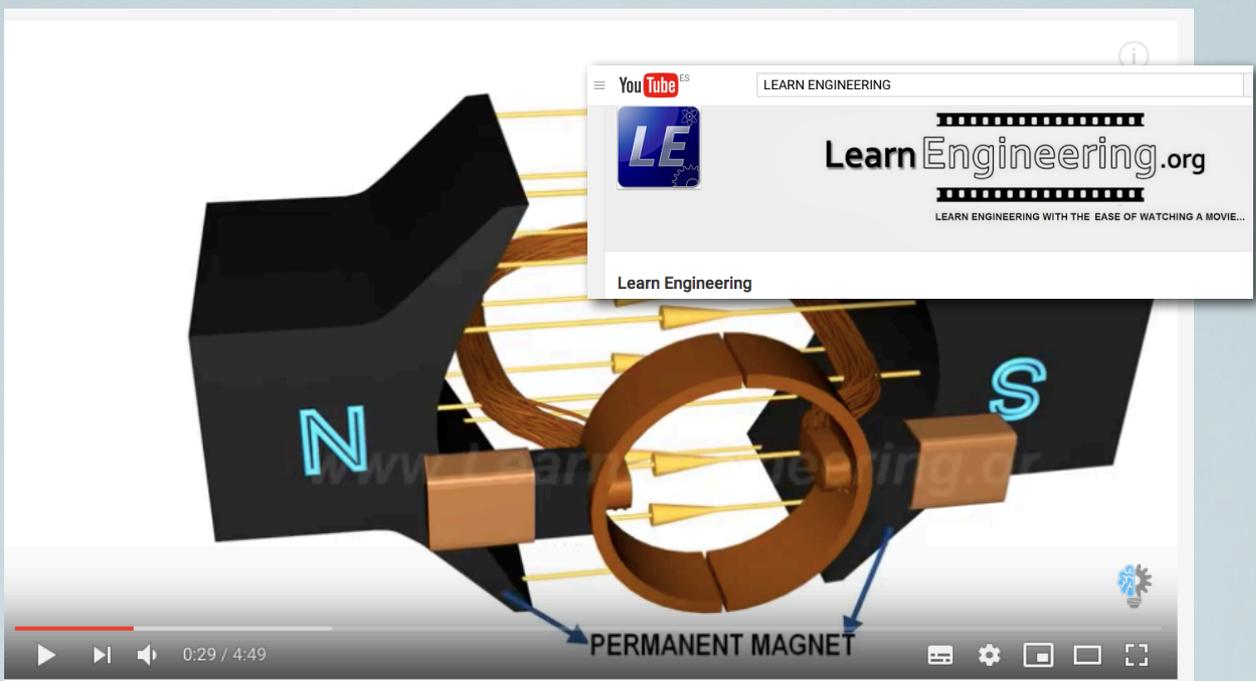
# ELEMENTOS BÁSICOS

## Escobillas



7

# ELEMENTOS BÁSICOS



<https://www.youtube.com/watch?v=LAtPHANefQo>

8

# ELEMENTOS BÁSICOS

## Colectores de delgas

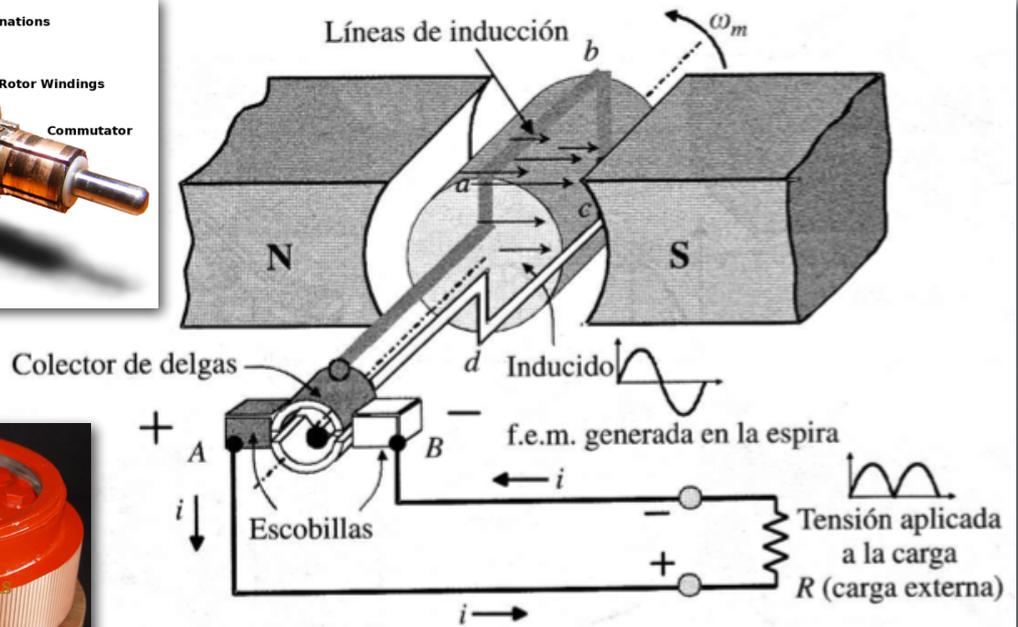


Figura 2.9. Colector de dos delgas.

9

# ELEMENTOS BÁSICOS

## Colectores de delgas

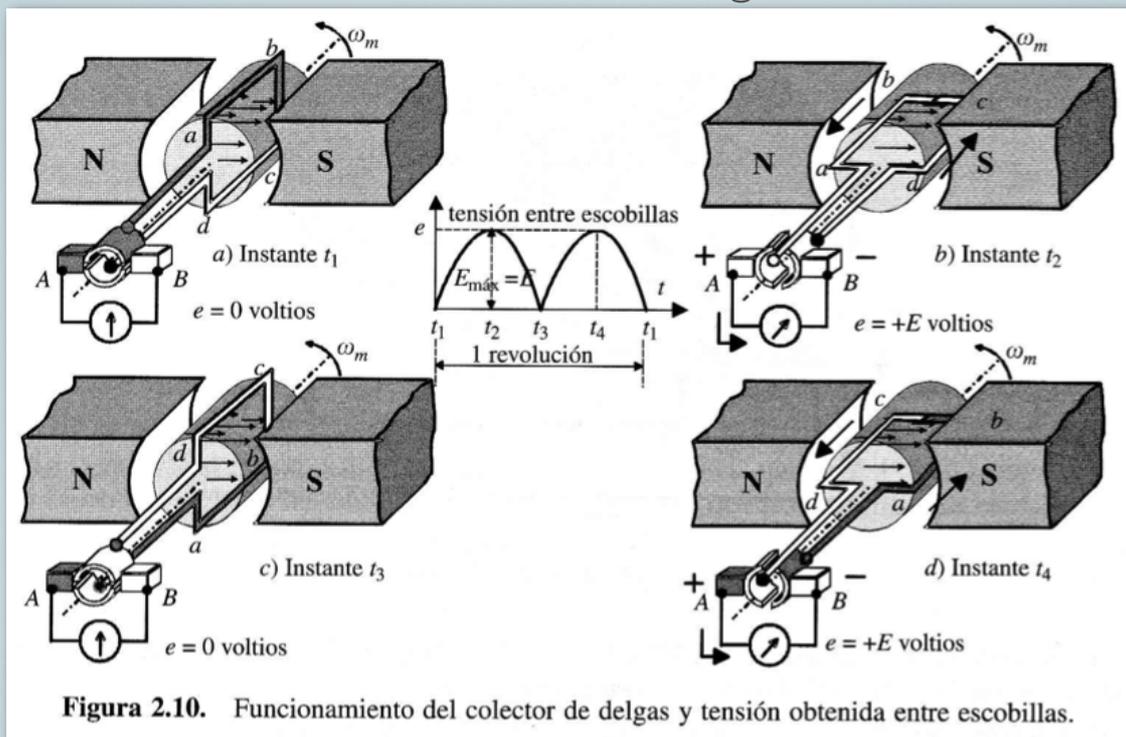
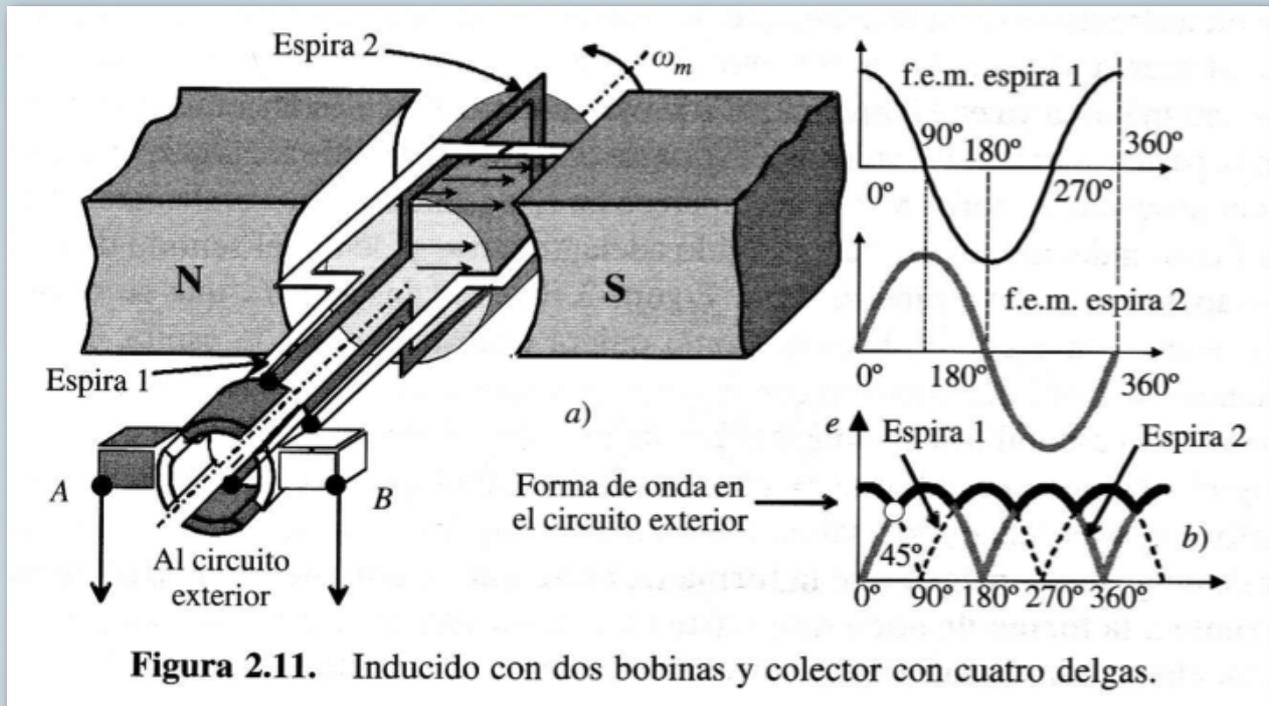


Figura 2.10. Funcionamiento del colector de delgas y tensión obtenida entre escobillas.

10

# ELEMENTOS BÁSICOS

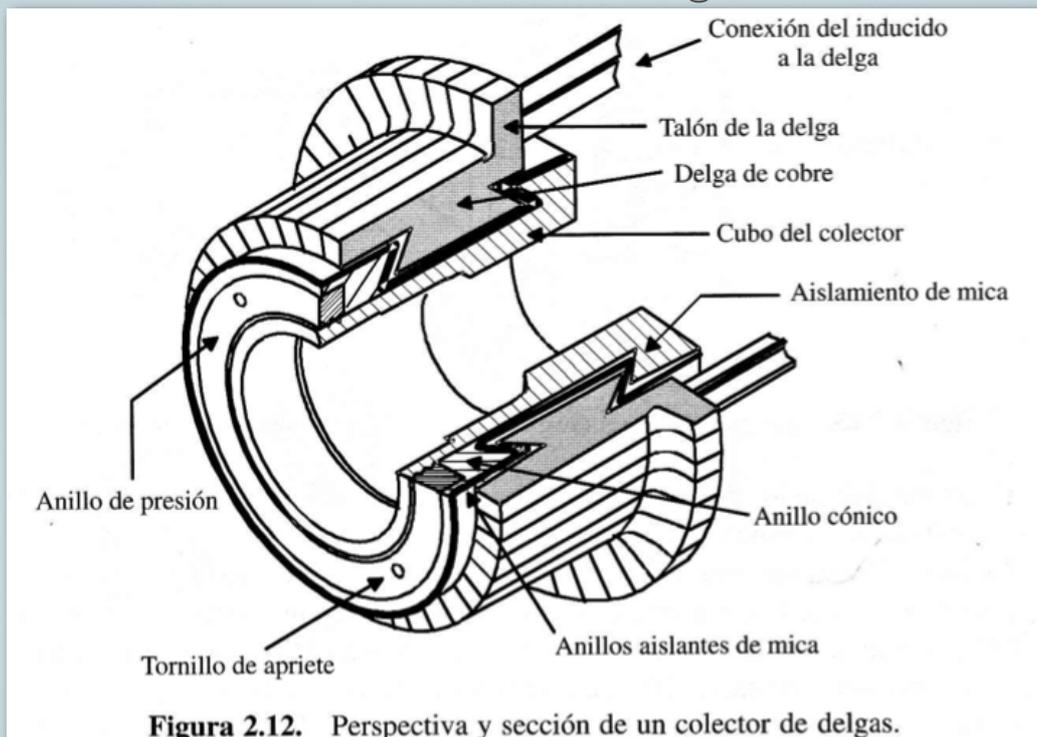
## Colectores de delgas



11

# ELEMENTOS BÁSICOS

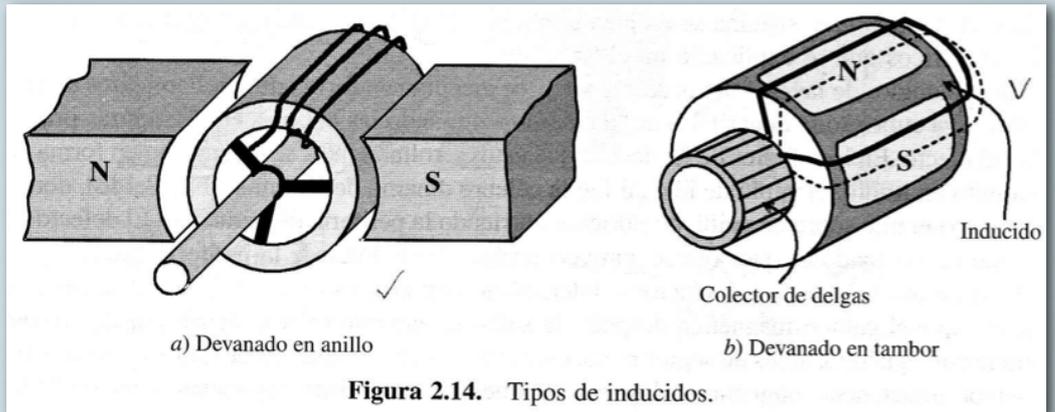
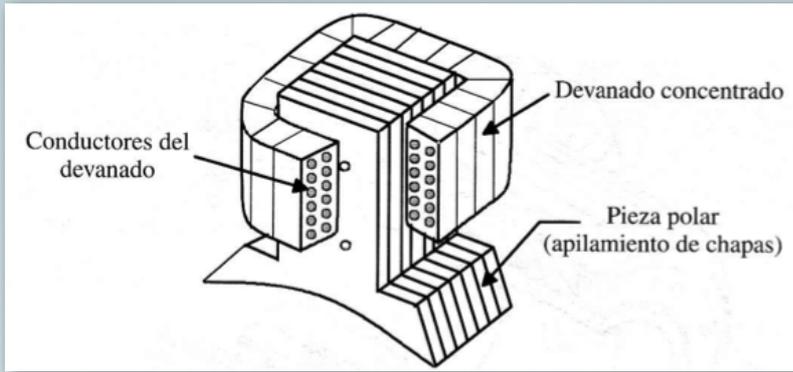
## Colectores de delgas



12

# ELEMENTOS BÁSICOS

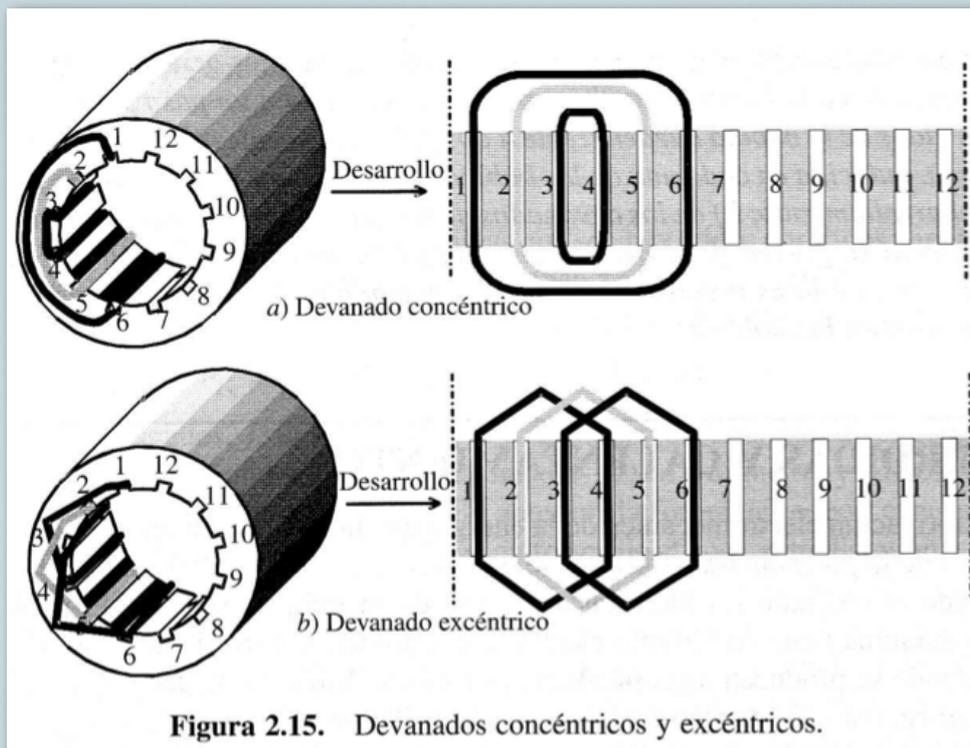
## Arrollamientos o devanados



13

# ELEMENTOS BÁSICOS

## Arrollamientos o devanados



14

# ELEMENTOS BÁSICOS

## Arrollamientos o devanados

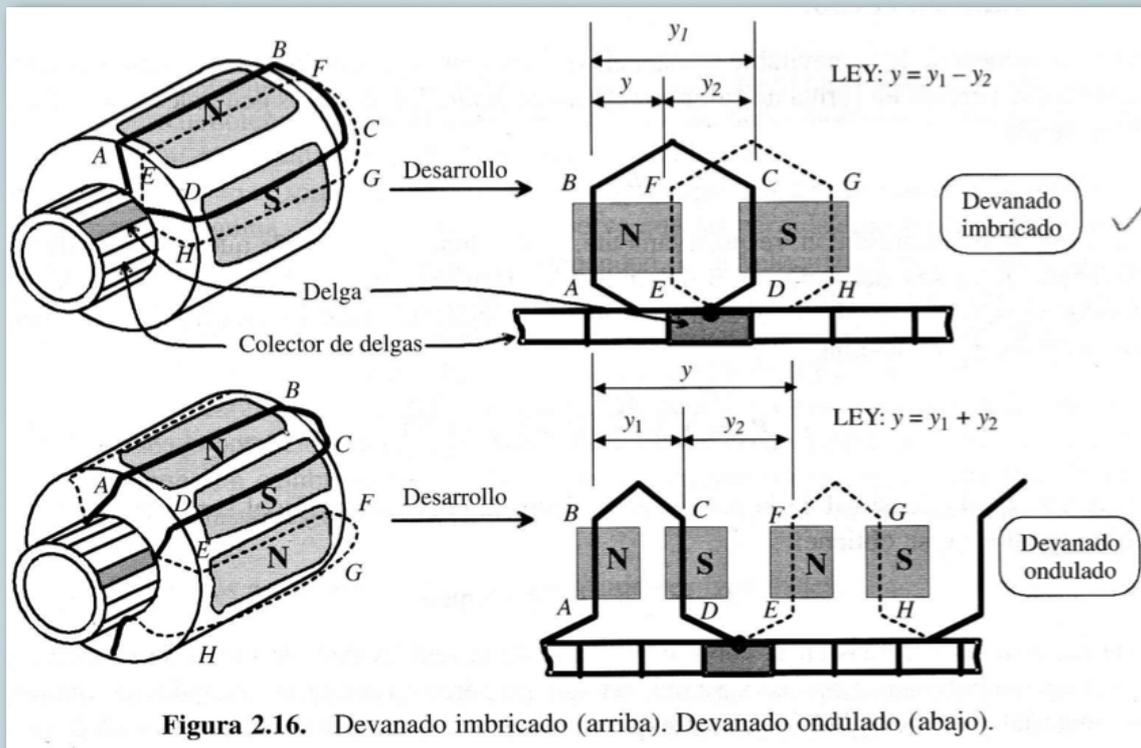


Figura 2.16. Devanado imbricado (arriba). Devanado ondulado (abajo).

15

# 1

## PRINCIPIOS GENERALES DE LAS MÁQUINAS GIRATORIAS

- Elementos básicos
- **Potencia, pérdidas y rendimiento**
- Fuerzas magneto y electro motrices
- Clasificación de las máquinas

16

# PÉRDIDAS, POTENCIA Y RENDIMIENTO

## Pérdidas y calentamiento

- En el cobre (variables)

$$P_{cu} = \sum R_j i_j^2$$

$$P_{cu} = \sum \rho_j \frac{\ell_j}{S_j} i_j^2 = \sum \rho_j \ell_j S_j J_j^2 = \sum \rho_j J_j^2 \text{ vol}$$

- En el hierro (fijas)

$$P_{Fe} = P_H + P_F = f M + f^2 N$$

$$P_H \approx k_H f \text{ vol } B_m^\alpha$$

$$P_F = f^2 k_F \text{ vol } B_m^2 a^2 \sigma$$

- Mecánicas (fijas)

$$P_m = P_\mu + P_{\text{vent}} \approx A n + B n^3$$

17

# PÉRDIDAS, POTENCIA Y RENDIMIENTO

## Pérdidas y calentamiento

Temperatura y clases de aislamiento

Clase	Temperatura	Calentamiento
A	105°C	65°C
E	120°C	80°C
B	130°C	90°C
F	155°C	115°C
H	180°C	140°C
200	200°C	160°C
220	220°C	180°C
250	250°C	210°C

18

# PÉRDIDAS, POTENCIA Y RENDIMIENTO

## Pérdidas y calentamiento

Tipos de funcionamiento UNE EN 60034-1

S1	Continuo
S2	Temporal
S3	Intermitente periódico
S4	Intermitente periódico con arranque
S5	Intermitente periódico con frenado eléctrico
S6	Interrumpido periódico con carga intermitente
S7	Interrumpido periódico con frenado eléctrico
S8	Interrumpido periódico con cambios relacionados de carga y velocidad
S9	Con variaciones no periódicas de carga y velocidad
S10	Con cargas constantes diferentes

19

# PÉRDIDAS, POTENCIA Y RENDIMIENTO

## Pérdidas y calentamiento

Placa de características  
UNE EN  
60034-1

Fabricante	Funcionamiento continuo o tipo (S1 a S10)
Nº serie	Potencia nominal (W)
Año fabricación	Tensión nominal (V)
Código o modelo	Frecuencia nominal (Hz)
nº fases	Intensidad nominal (A)
Normas de fabricación	Velocidad nominal (rpm)
Protección IP	Diagrama de conexiones
Clase térmica	Sentido de giro único

20

# PÉRDIDAS, POTENCIA Y RENDIMIENTO

## Rendimiento

$$\eta(\%) = \frac{\text{Potencia útil}}{\text{Potencia total}} \times 100 = \frac{P_u}{P_T} \times 100$$

$$P_u = P_T - P_p; \quad \eta(\%) = \frac{P_T - P_p}{P_T} \times 100 = \left(1 - \frac{P_p}{P_T}\right) \times 100$$

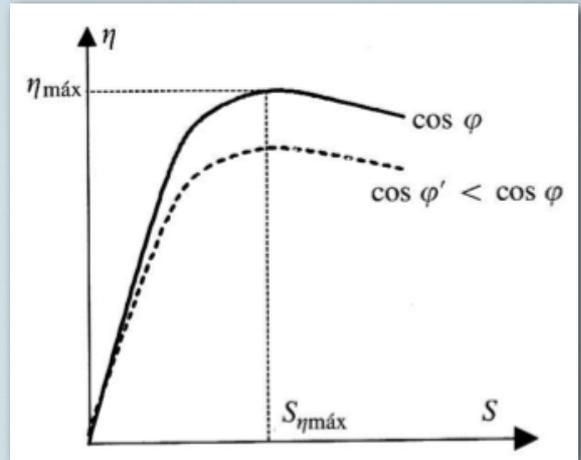
Índice de carga:

$$C = \frac{S}{S_N}; \quad C_{\text{ópt}} = \frac{S_{\mu\text{máx}}}{S_N}$$

$$C_{\text{ópt}} = \sqrt{\frac{\text{Pérdidas fijas}}{\text{Pérdidas variables a potencia nominal}}}$$

$$P_{\text{fijas}} = P_{Fe} + P_m; \quad P_{\text{variables}} = P_{cu}$$

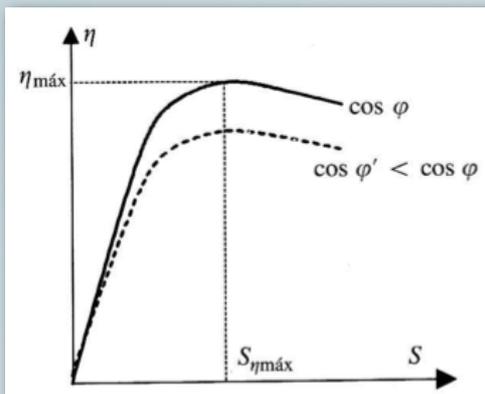
$$C_{\text{ópt}} \leftrightarrow P_{\text{fijas}} = P_{\text{variables}}$$



21

# PÉRDIDAS, POTENCIA Y RENDIMIENTO

## Rendimiento



### EJEMPLO DE APLICACIÓN 2.1

Una máquina eléctrica de 40 kVA tiene unas pérdidas en el hierro de 750 W, las pérdidas en el cobre a plena carga o asignada son de 2.000 W y las pérdidas mecánicas son de 1.000 W. Calcular: a) Potencia aparente de máximo rendimiento. b) Pérdidas en el cobre en el caso anterior. c) Rendimiento máximo para un f.d.p. unidad. d) Rendimiento a plena carga con f.d.p. 0,8. e) Rendimiento a media carga con f.d.p. 0,6.

22

# PÉRDIDAS, POTENCIA Y RENDIMIENTO

## Rendimiento

### EJEMPLO DE APLICACIÓN 2.1

Una máquina eléctrica de 40 kVA tiene unas pérdidas en el hierro de 750 W, las pérdidas en el cobre a plena carga o asignada son de 2.000 W y las pérdidas mecánicas son de 1.000 W. Calcular: a) Potencia aparente de máximo rendimiento. b) Pérdidas en el cobre en el caso anterior. c) Rendimiento máximo para un f.d.p. unidad. d) Rendimiento a plena carga con f.d.p. 0,8. e) Rendimiento a media carga con f.d.p. 0,6.

$$\text{Pérdidas fijas: } \begin{cases} P_{fe} = 750 \text{ W} \\ P_{vent} = 1000 \text{ W} \end{cases}$$

$$\text{Pérdidas variables: } P_{cu} = 2000 \text{ W}$$

$$C_{\text{ópt}} = \sqrt{\frac{P_{\text{fijas}}}{P_{\text{variables a Pnom}}}} = \sqrt{\frac{750+1000}{2000}} = 0,9354$$

$$\text{cuando } P_{\text{fijas}} = P_{\text{variables}}, \text{ luego } P_{\text{variables}} = P_{cu} = 750 + 1000 = 1750 \text{ W}$$

$$\text{Si } C = 0,9354 \Rightarrow \frac{S}{S_N} = 0,9354; \quad S = 0,9354 \times S_N = 0,9354 \times 40 \text{ kVA} = 37,41 \text{ kVA}$$

23

# PÉRDIDAS, POTENCIA Y RENDIMIENTO

## Rendimiento

### EJEMPLO DE APLICACIÓN 2.1

Una máquina eléctrica de 40 kVA tiene unas pérdidas en el hierro de 750 W, las pérdidas en el cobre a plena carga o asignada son de 2.000 W y las pérdidas mecánicas son de 1.000 W. Calcular: a) Potencia aparente de máximo rendimiento. b) Pérdidas en el cobre en el caso anterior. c) Rendimiento máximo para un f.d.p. unidad. d) Rendimiento a plena carga con f.d.p. 0,8. e) Rendimiento a media carga con f.d.p. 0,6.

$$\text{En general } fdp = \frac{P}{S}; \quad P = S \times fdp$$

$$\text{Rendimiento } \eta\% = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{absorbida}}} \times 100;$$

$$\begin{aligned} \eta_{\text{máx}} &= \frac{P_{\text{útil } \eta_{\text{máx}}}}{P_{\text{absorbida } \eta_{\text{máx}}}} = \frac{P_{\text{útil } \eta_{\text{máx}}}}{P_{\text{útil } \eta_{\text{máx}}} + P_{fe} + P_{vent} + P_{cu \eta_{\text{máx}}}} = \frac{S_{\text{útil } \eta_{\text{máx}}} fdp}{S_{\text{útil } \eta_{\text{máx}}} fdp + P_{fe} + P_{vent} + P_{cu \eta_{\text{máx}}}} = \\ &= \frac{37410 \times 1}{37410 \times 1 + 750 + 1000 + 1750} = 0,9144; \quad \eta\%_{\text{máx}} = \eta_{\text{máx}} \times 100 = 91,44\% \end{aligned}$$

24

# PÉRDIDAS, POTENCIA Y RENDIMIENTO

## Rendimiento

### EJEMPLO DE APLICACIÓN 2.1

Una máquina eléctrica de 40 kVA tiene unas pérdidas en el hierro de 750 W, las pérdidas en el cobre a plena carga o asignada son de 2.000 W y las pérdidas mecánicas son de 1.000 W. Calcular: a) Potencia aparente de máximo rendimiento. b) Pérdidas en el cobre en el caso anterior. c) Rendimiento máximo para un f.d.p. unidad. d) Rendimiento a plena carga con f.d.p. 0,8. e) Rendimiento a media carga con f.d.p. 0,6.

Plena carga = potencia nominal ( $P_n, S_n$ )

$$\eta_{P_n} = \frac{P_n}{P_{\text{absorbida } P_n}} = \frac{P_n}{P_n + P_{fe} + P_{\text{vent}} + P_{cu P_n}} = \frac{S_n \text{ fdp}}{S_n \text{ fdp} + P_{fe} + P_{\text{vent}} + P_{cu P_n}} =$$
$$= \frac{40000 \times 0,80}{40000 \times 0,80 + 750 + 1000 + 2000} = 0,8951; \quad \eta\%_{P_n} = \eta_{P_n} \times 100 = 89,51\%$$

Media carga  $\left(\frac{P_n}{2}, \frac{S_n}{2}\right)$        $S = \sqrt{3} U I$ ; si  $\begin{cases} U \text{ es constante} \\ S \text{ es la mitad} \end{cases} \Rightarrow I \text{ es la mitad} \left(\frac{S}{2} = \sqrt{3} U \frac{I}{2}\right)$

Como  $P_{cu} = R_{cu} I^2$  entonces  $R_{cu} \left(\frac{I}{2}\right)^2 = R_{cu} \frac{I^2}{2^2} = \frac{1}{4} R_{cu} I^2 = \frac{P_{cu}}{4}$ ;  $P_{cu} = \frac{2000}{4} = 500 \text{ W}$  etc...

25

# 1

## PRINCIPIOS GENERALES DE LAS MÁQUINAS GIRATORIAS

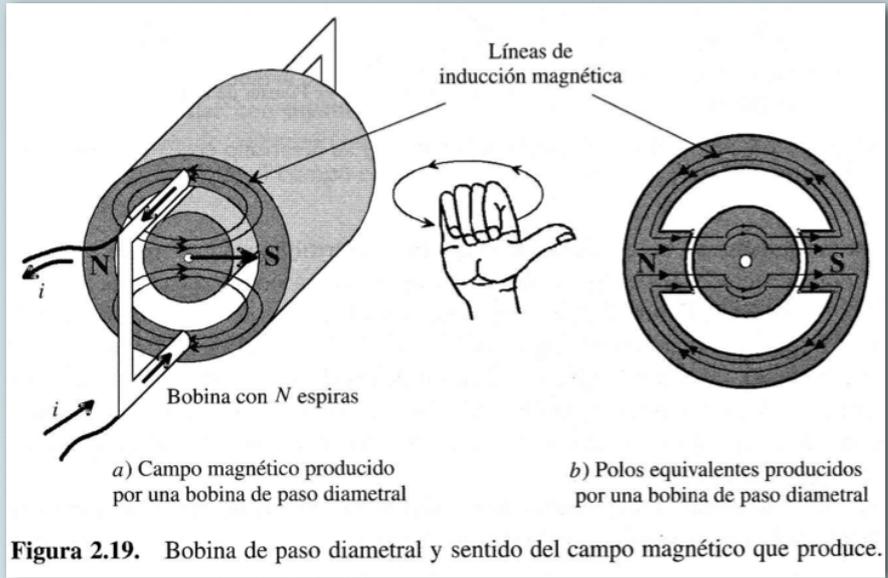
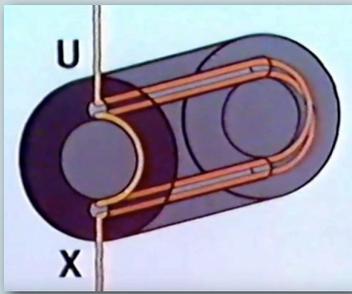
- Elementos básicos
- Potencia, pérdidas y rendimiento
- **Fuerzas magneto y electro motrices**
- Clasificación de las máquinas

26

# Fuerzas magneto y electromotrices

## Campo y f.m.m. devanado concentrado

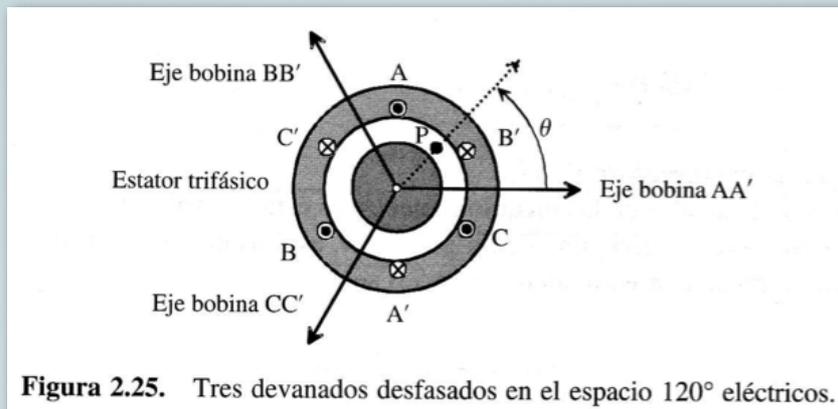
- Máquina rotativa cilíndrica
- Entrehierro de espesor uniforme
- Reluctancia del hierro despreciable
- Máquina bipolar



27

# Fuerzas magneto y electromotrices

## Devanados trifásicos. Teorema de Ferraris



$$i_a = I_m \cos \omega t; \quad i_b = I_m \cos(\omega t - 120^\circ); \quad i_c = I_m \cos(\omega t - 240^\circ)$$

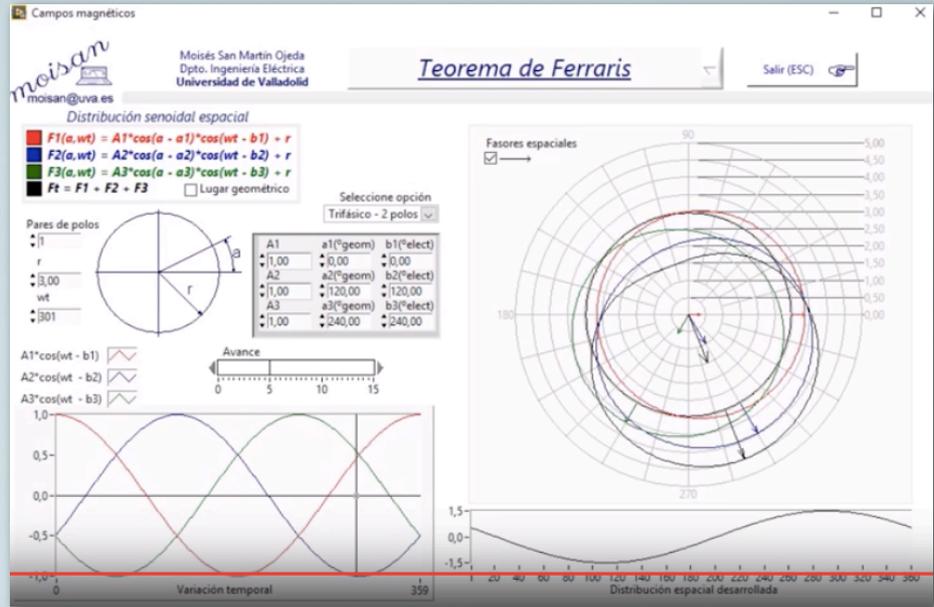
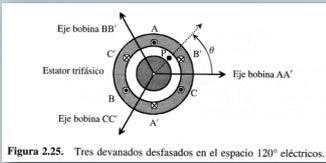
$$\mathcal{F}(\theta, t) = \mathcal{F}_a + \mathcal{F}_b + \mathcal{F}_c \quad \omega_m = \frac{\omega}{p} \quad \left( \alpha = \frac{\theta}{p} \right)$$

$$\mathcal{F}(\theta, t) \approx \frac{3}{2} F_m \cos(\omega t - \theta) = \frac{3}{2} F_m \cos(\omega t - p\alpha)$$

28

# Fuerzas magneto y electromotrices

## Devanados trifásicos, Teorema de Ferraris

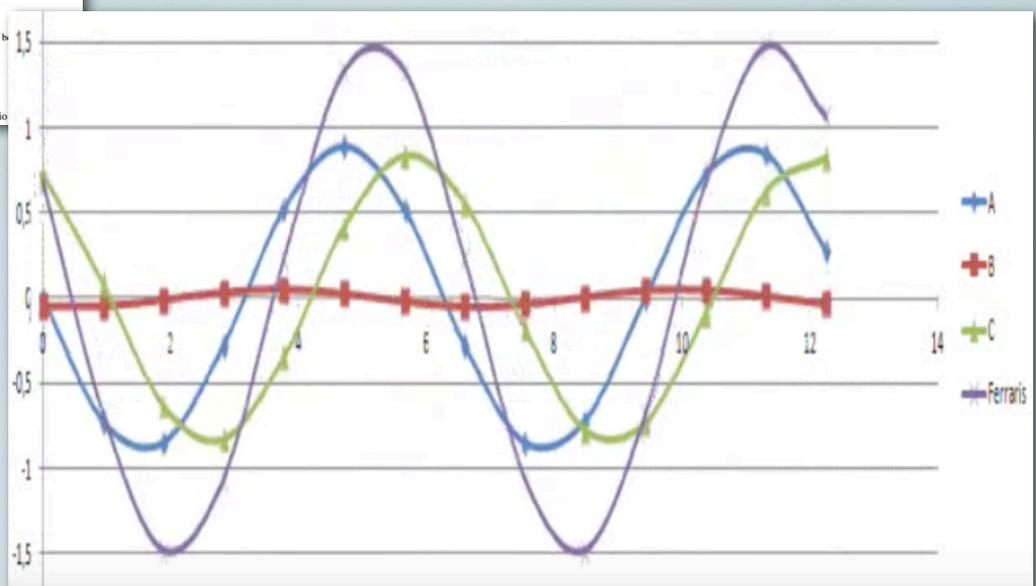
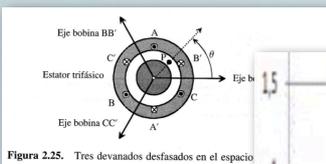


<https://www.youtube.com/watch?v=Tuc5Kh6ZolU>

29

# Fuerzas magneto y electromotrices

## Devanados trifásicos, Teorema de Ferraris



[https://www.youtube.com/watch?v=g\\_e6oejmH6A](https://www.youtube.com/watch?v=g_e6oejmH6A)

30

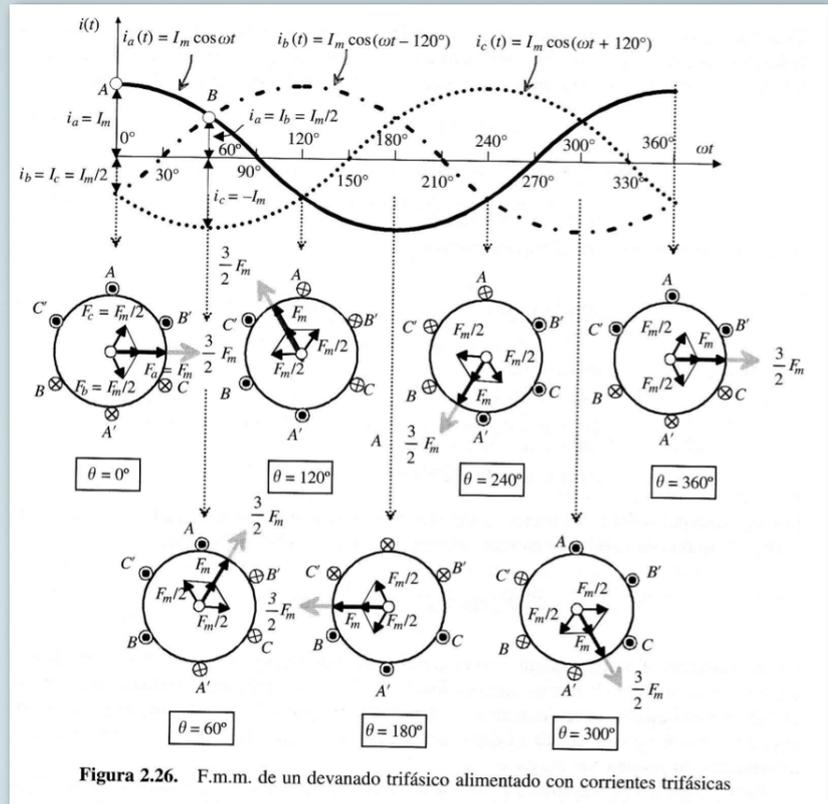
# Fuerzas magneto y electromotrices

Devanados trifásicos

Campo magnético:

$$\mathcal{F}(\theta, t) \approx \frac{3}{2} F_m \cos(\omega t - p\alpha)$$

- Giratorio
- De amplitud constante
- A velocidad constante



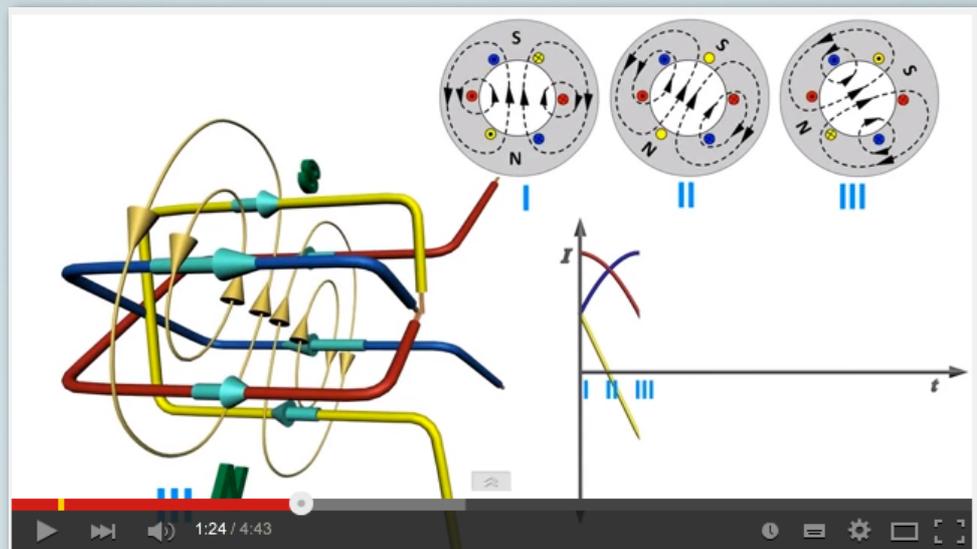
31

# Fuerzas magneto y electromotrices

Devanados trifásicos

$$\mathcal{F}(\theta, t) \approx \frac{3}{2} F_m \cos(\omega t - p\alpha)$$

Campo magnético:



<https://www.youtube.com/watch?v=LtJojBUSe28>

32

# Fuerzas magneto y electromotrices

## Devanados trifásicos

Velocidad de sincronismo:  $\omega_m = \frac{\omega}{p}$ ; como  $\omega_m$  (Hz) =  $\frac{2\pi}{60} n$  (rpm) y  $\omega = 2\pi f$

$$\frac{2\pi}{60} n = \frac{2\pi f}{p}; \quad n(\text{rpm}) = \frac{60 f(\text{Hz})}{p}$$

## Intercambio de fases:

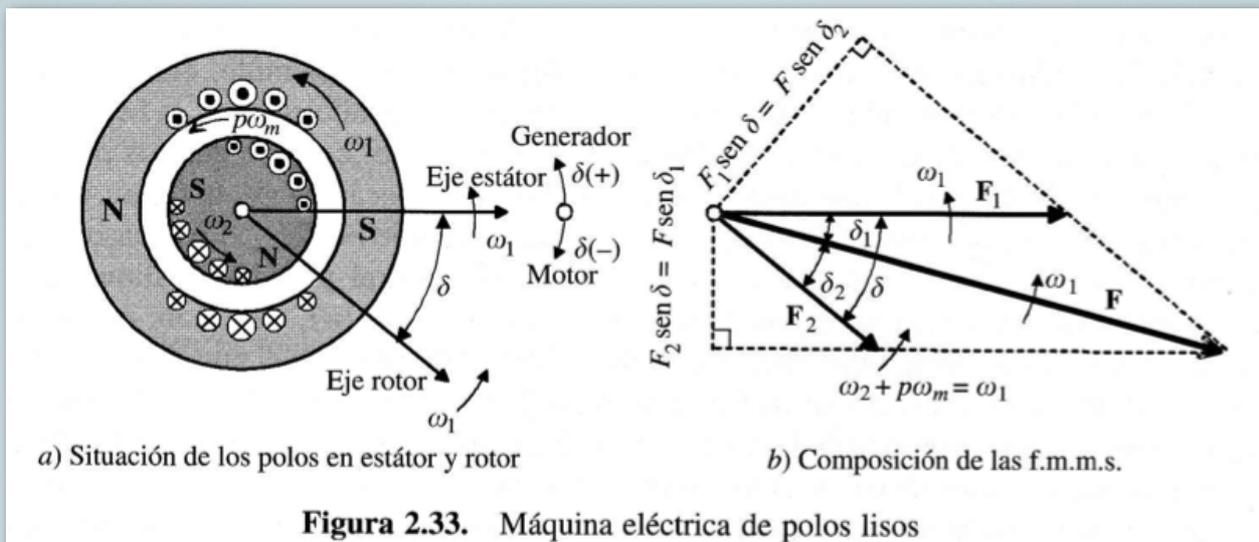
Secuencia a-b-c:  $\mathcal{F}(\theta, t) \approx \frac{3}{2} F_m \cos(\omega t - p\alpha)$ ;  $n = \frac{60 f}{p}$

Secuencia b-a-c:  $\mathcal{F}(\theta, t) \approx \frac{3}{2} F_m \cos(\omega t + p\alpha)$ ;  $n = -\frac{60 f}{p}$

33

# Fuerzas magneto y electromotrices

## Par electromagnético en función del flujo



**Figura 2.33.** Máquina eléctrica de polos lisos

$$T(\text{Nm}) = \frac{P(\text{W})}{n(\text{rpm}) \frac{2\pi}{60}}; \quad T = -\frac{\pi}{2} p^2 \Phi F_1 \text{ sen } \delta_1 = \frac{\pi}{2} p^2 \Phi F_2 \text{ sen } \delta_2$$

34

# 1

## PRINCIPIOS GENERALES DE LAS MÁQUINAS GIRATORIAS

- Elementos básicos
- Potencia, pérdidas y rendimiento
- Fuerzas magneto y electro motrices
- **Clasificación de las máquinas**

35

## Clasificación de las máquinas

### Criterios

Criterios {  
Movimiento del inductor o del inducido:  $n$  (rpm)  
Características del flujo inductor  $f_1$   
Conexión con el circuito exterior y  $f_L$

$$\omega_2 = \omega_1 \pm p\omega_m \quad f_2 = f_1 \pm \frac{np}{60}$$

Si  $n = 0$ : máquinas estáticas

Si  $\omega_m = 0$ : inducido fijo, flujo variable  $\rightarrow$  transformador  $f_2 = f_1$

Si  $n \neq 0$ : motores o generadores

Si  $\omega_1 = 0$ : inducido móvil, flujo constante  $\rightarrow$  m. síncrona  $f_2 = \frac{np}{60}$

Etc

36

# Clasificación general de las máquinas eléctricas

- Criterios {
- Movimiento del inductor o del inducido:  $n$  (rpm)
  - Características del flujo inductor  $f_1$
  - Conexión con el circuito exterior y  $f_L$

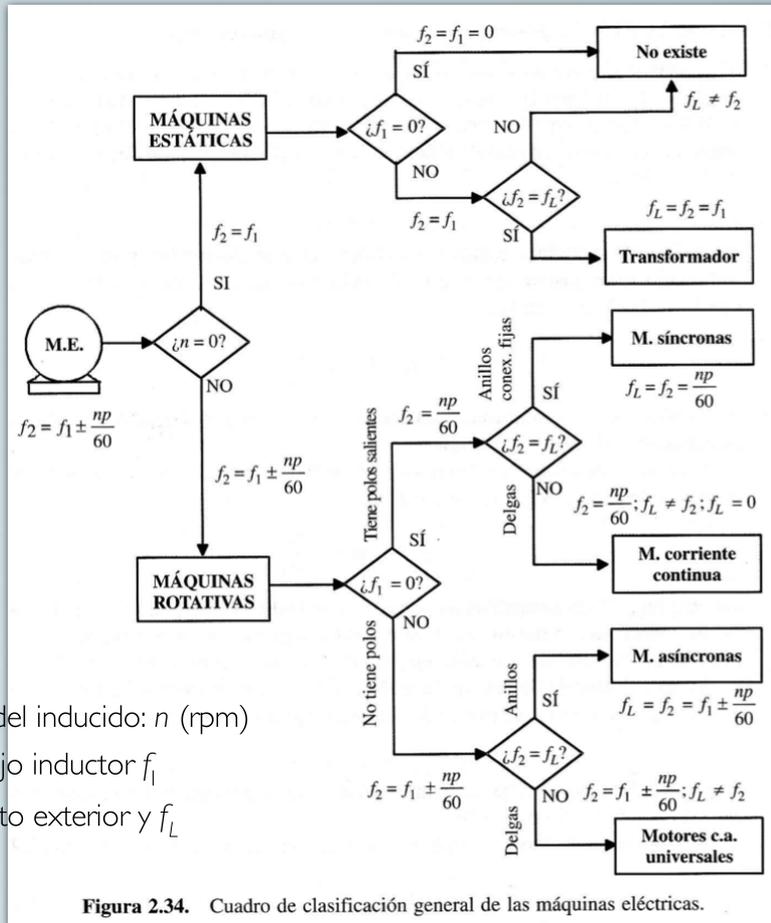


Figura 2.34. Cuadro de clasificación general de las máquinas eléctricas.