

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

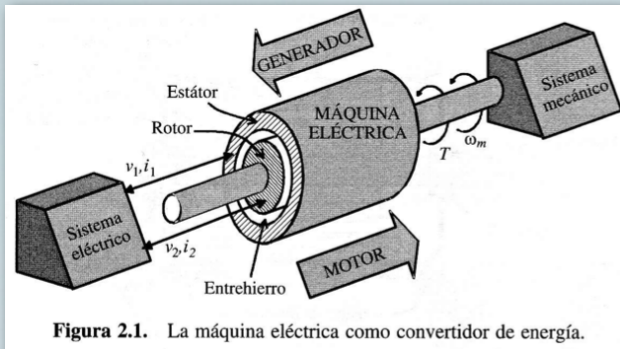


Figura 2.1. La máquina eléctrica como convertidor de energía.

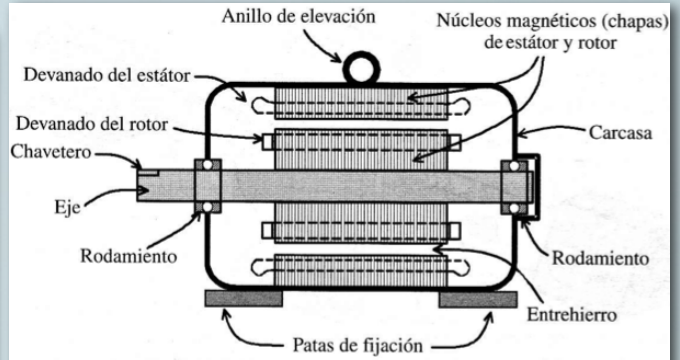


Figura 2.2. Aspectos constructivos de una máquina eléctrica.

3

ELEMENTOS BÁSICOS

Chapas magnéticas y ranurado para bobinados

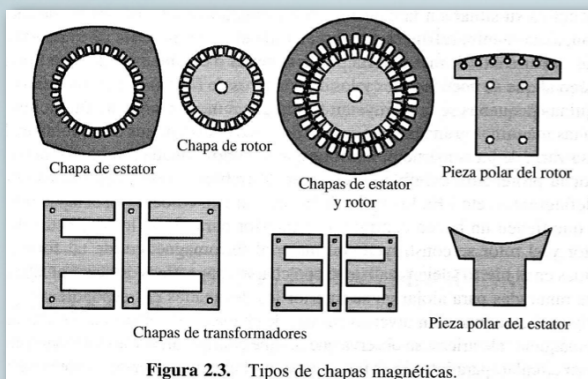


Figura 2.3. Tipos de chapas magnéticas.

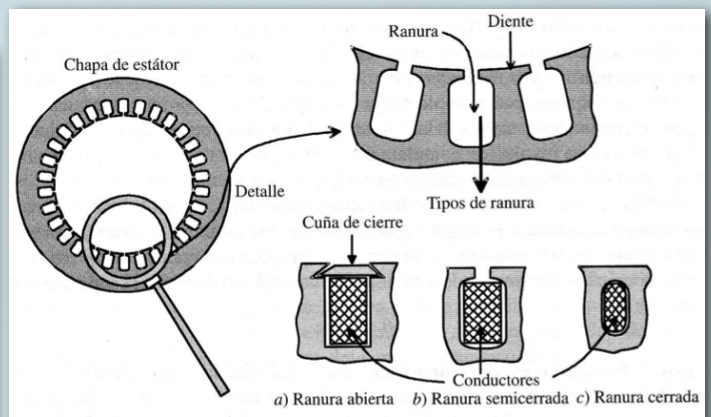


Figura 2.4. Tipos de ranura.

4

ELEMENTOS BÁSICOS

Configuraciones básicas de estátor y rotor

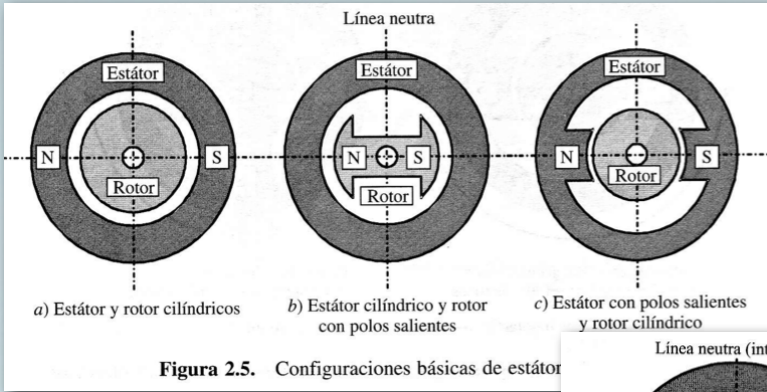


Figura 2.5. Configuraciones básicas de estátor

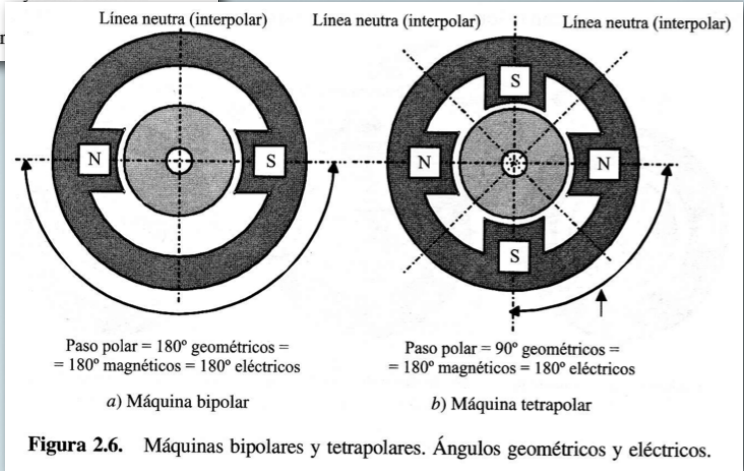


Figura 2.6. Máquinas bipolares y tetrapolares. Ángulos geométricos y eléctricos.

5

ELEMENTOS BÁSICOS

Colectores de anillos

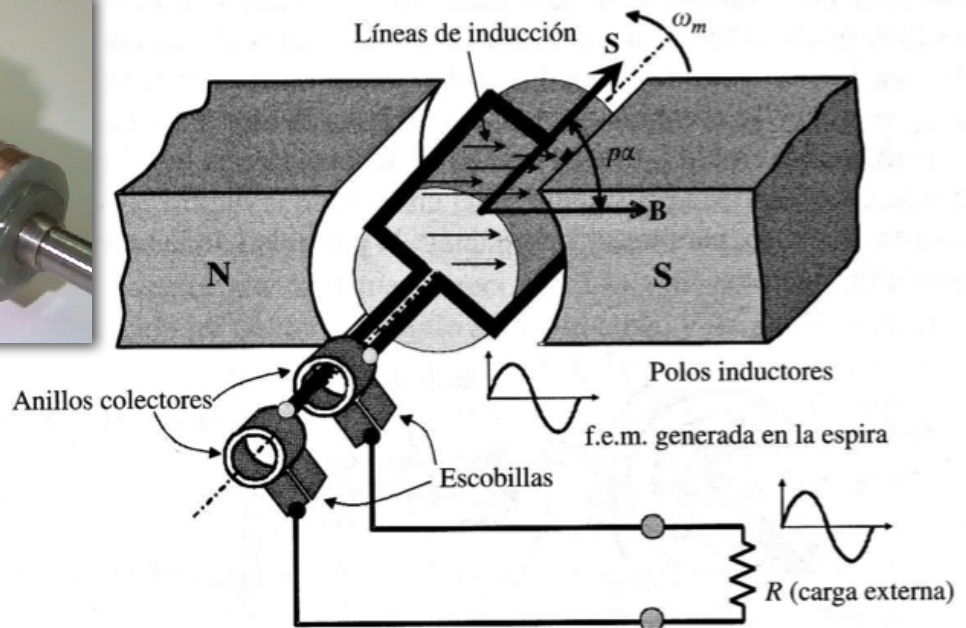
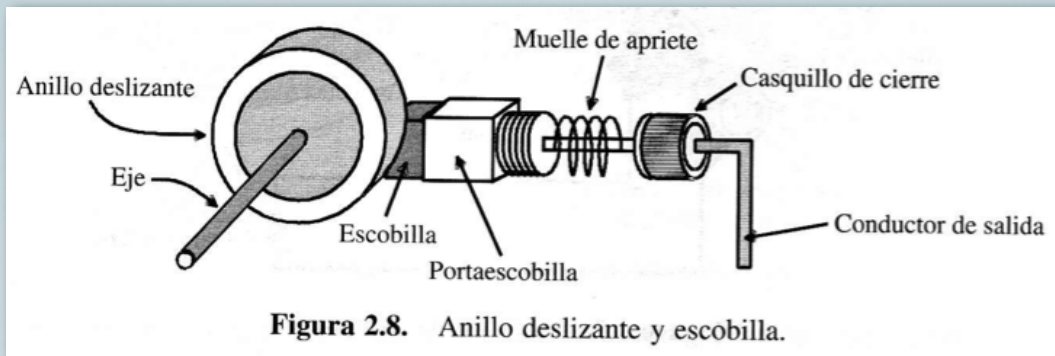


Figura 2.7. Colector de anillos.

6

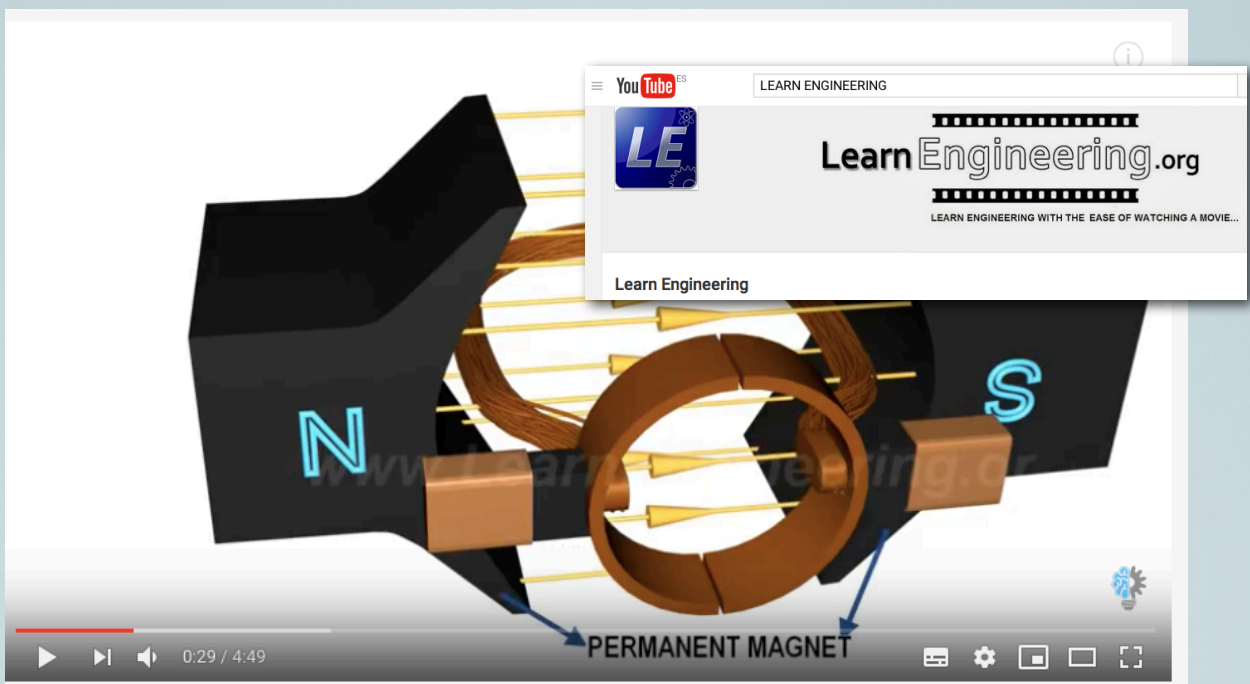
ELEMENTOS BÁSICOS

Escobillas



7

ELEMENTOS BÁSICOS



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

8

ELEMENTOS BÁSICOS

Colectores de delgas

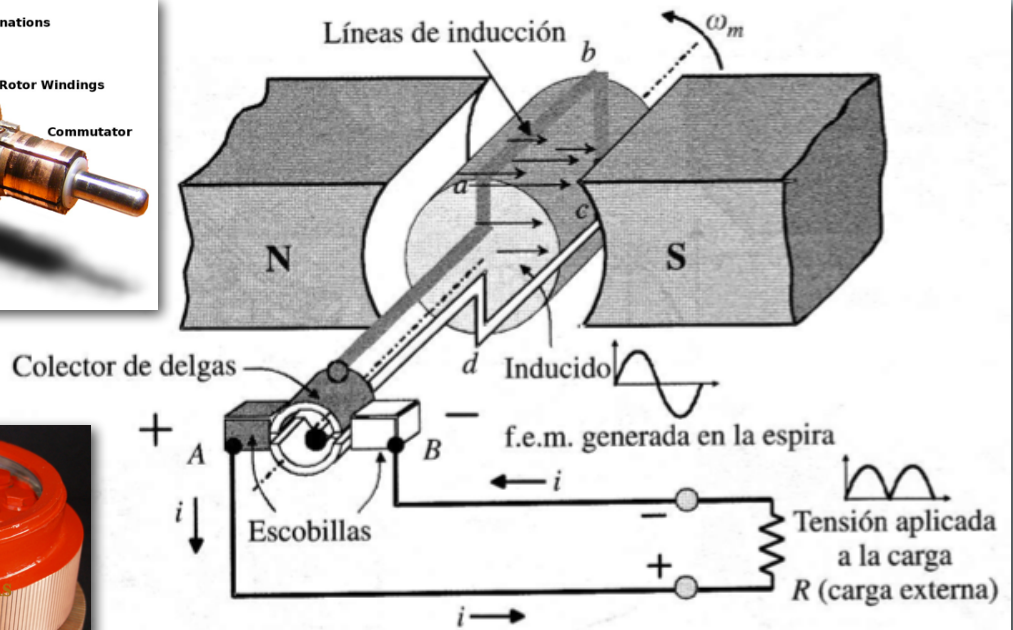
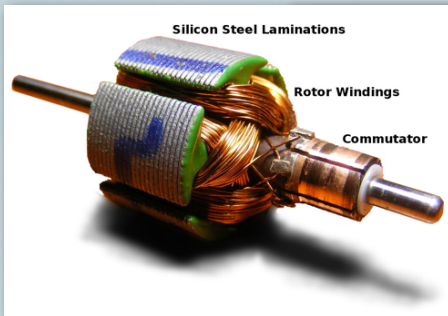


Figura 2.9. Colector de dos delgas.

9

ELEMENTOS BÁSICOS

Colectores de delgas

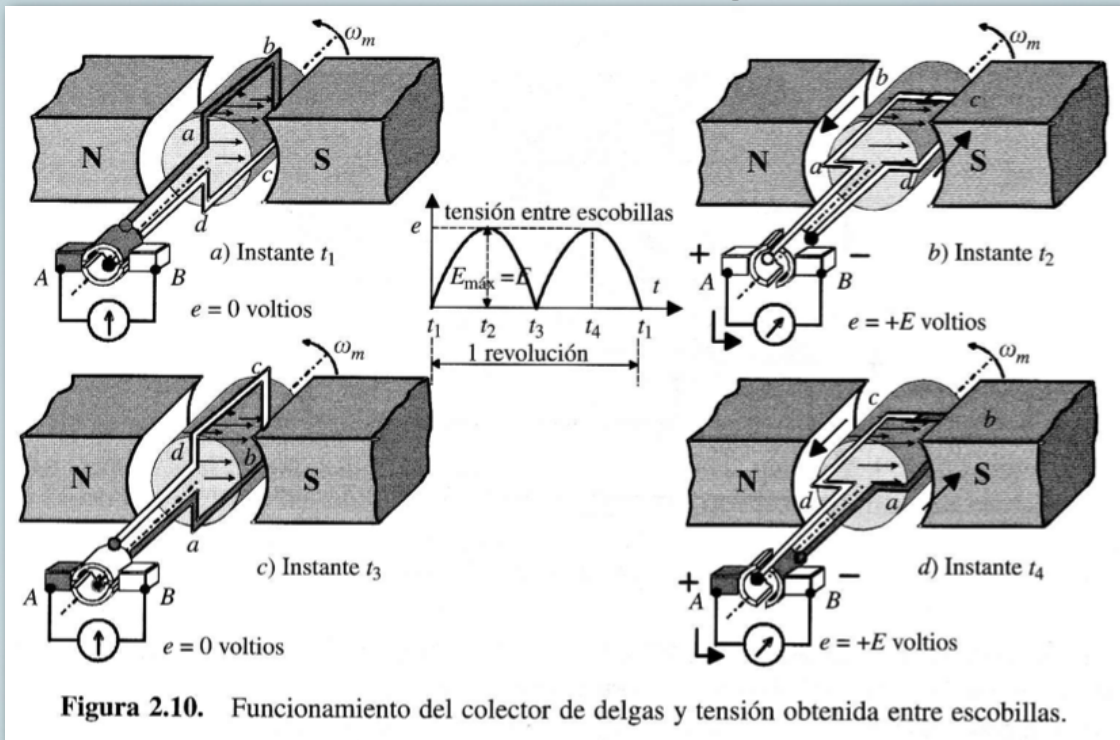
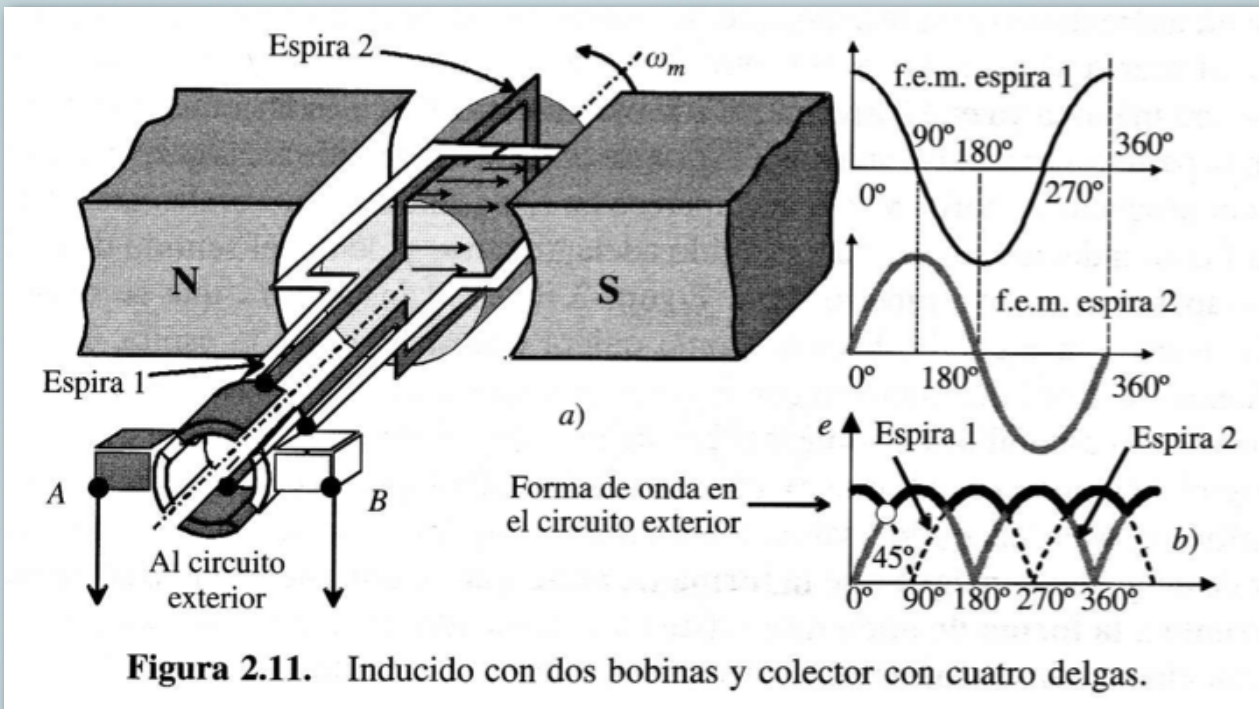


Figura 2.10. Funcionamiento del colector de delgas y tensión obtenida entre escobillas.

10

ELEMENTOS BÁSICOS

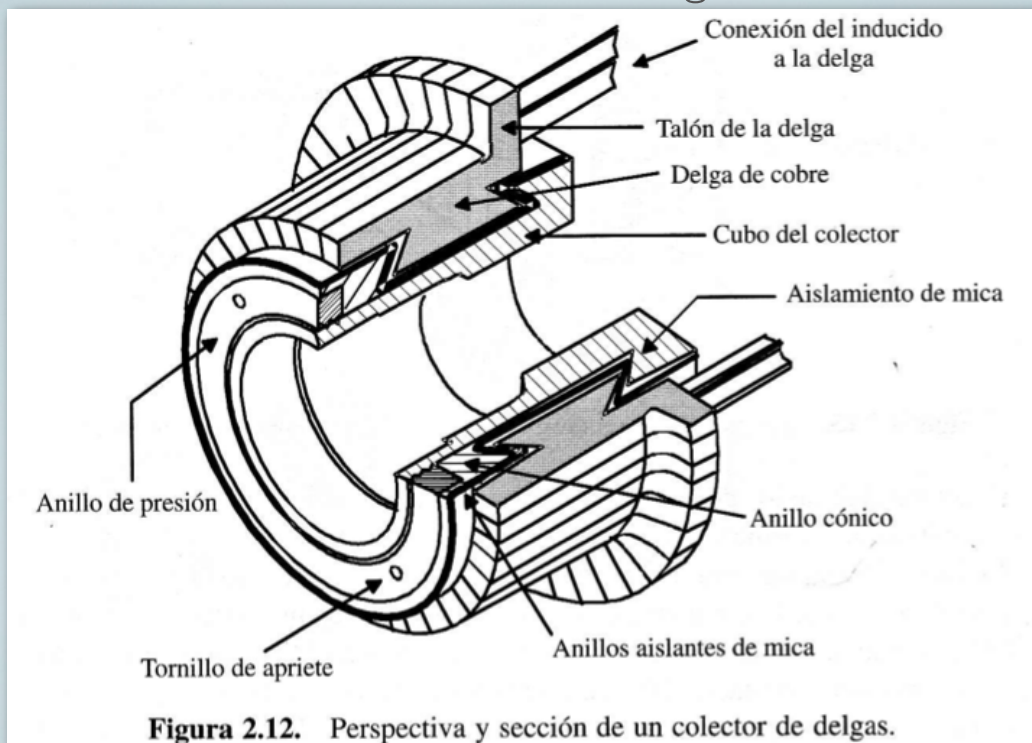
Colectores de delgas



11

ELEMENTOS BÁSICOS

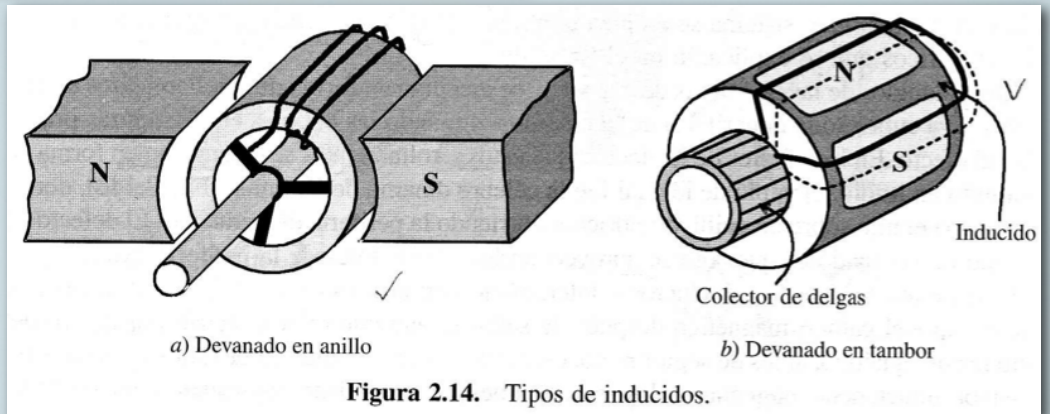
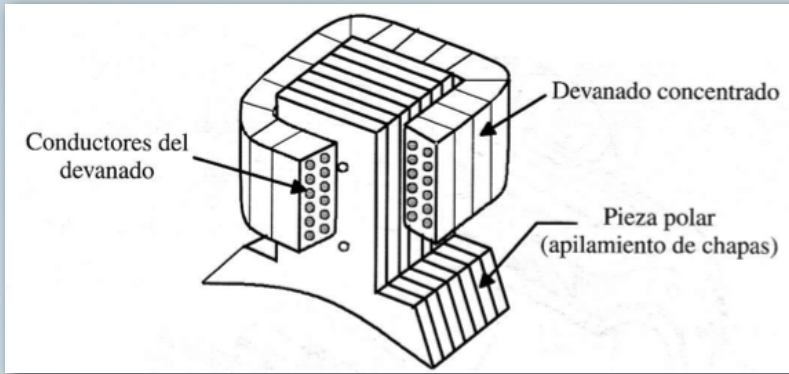
Colectores de delgas



12

ELEMENTOS BÁSICOS

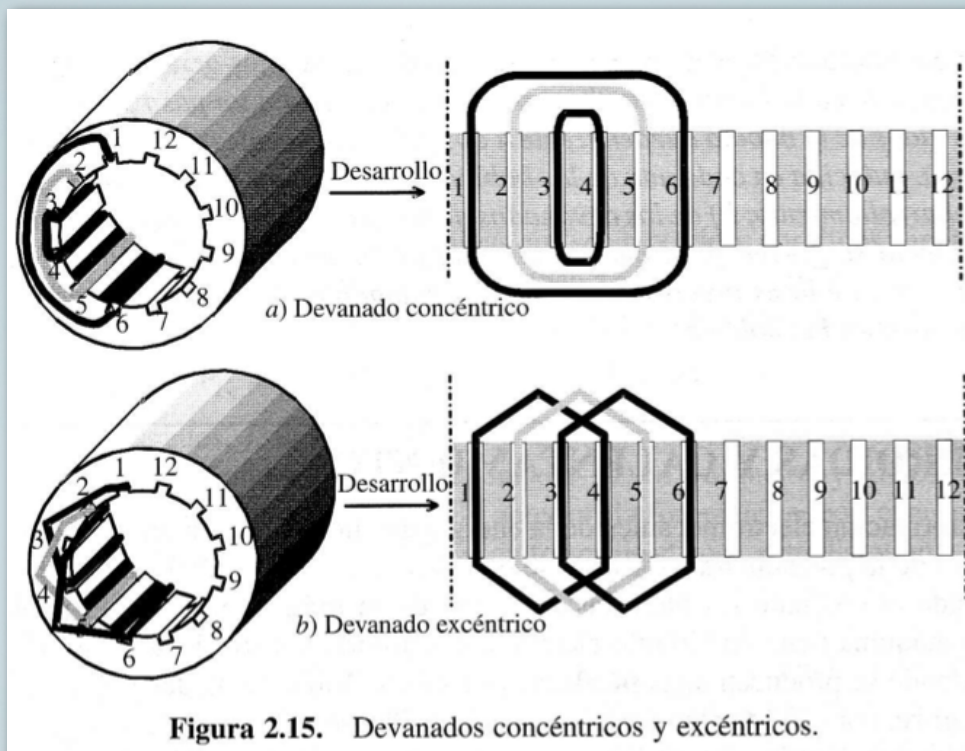
Arrollamientos o devanados



13

ELEMENTOS BÁSICOS

Arrollamientos o devanados



14

ELEMENTOS BÁSICOS

Arrollamientos o devanados

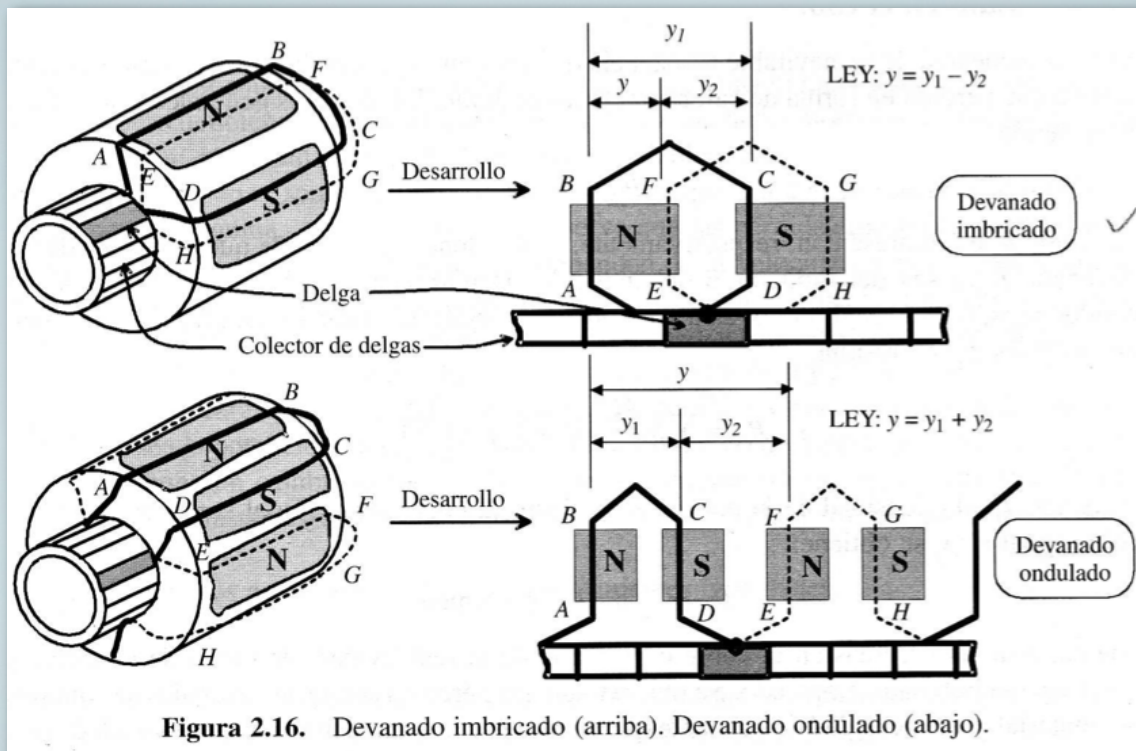


Figura 2.16. Devanado imbricado (arriba). Devanado ondulado (abajo).

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

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

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

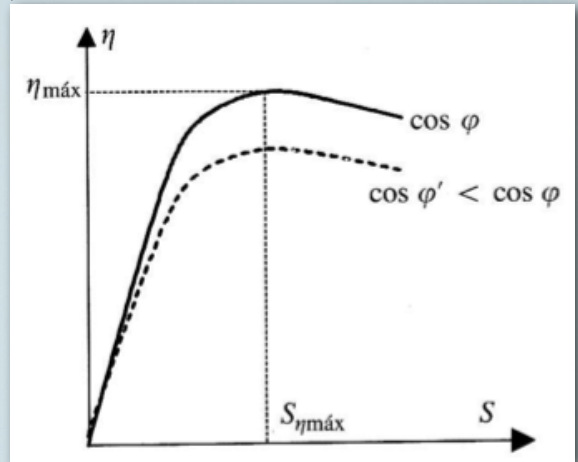
Índice de carga:

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

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

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

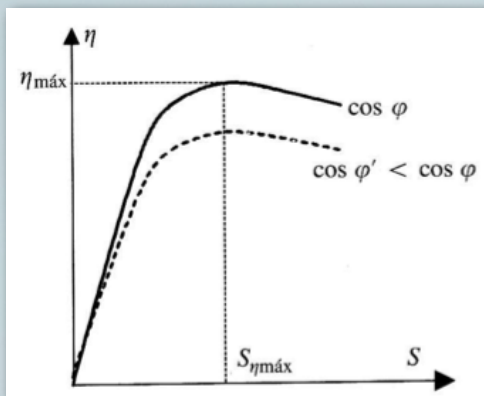
$$C_{\text{ópt}} \leftrightarrow P_{\text{fijas}} = P_{\text{variables}}$$



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

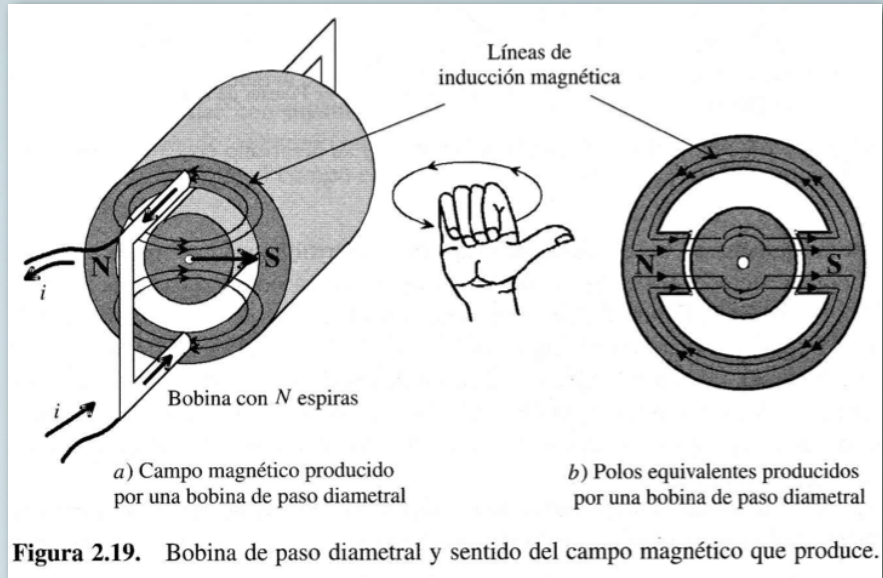
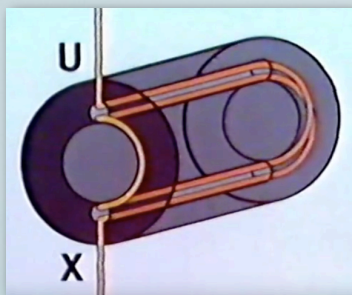
- Elementos básicos
- Potencia, pérdidas y rendimiento
- **Fuerzas magneto y electro motrices**
- Clasificación de las máquinas

26

Fuerzas magneto y electromotrices

Campo y f.m.m. devanado concentrado

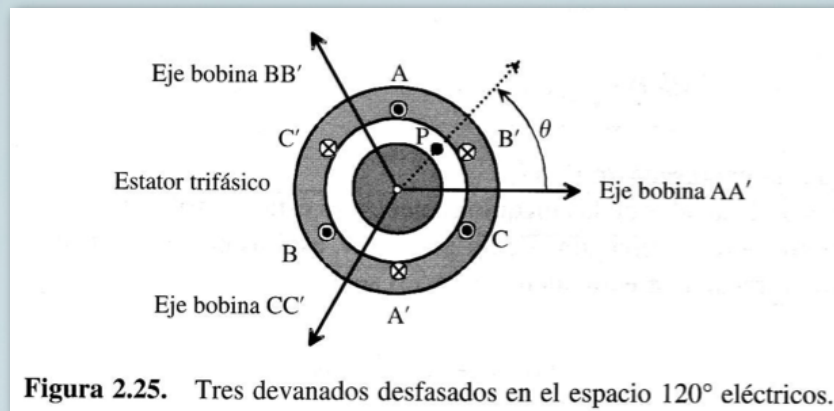
- Máquina rotativa cilíndrica
- Entrehierro de espesor uniforme
- Reluctancia del hierro despreciable
- Máquina bipolar



27

Fuerzas magneto y electromotrices

Devanados trifásicos. Teorema de Ferraris



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

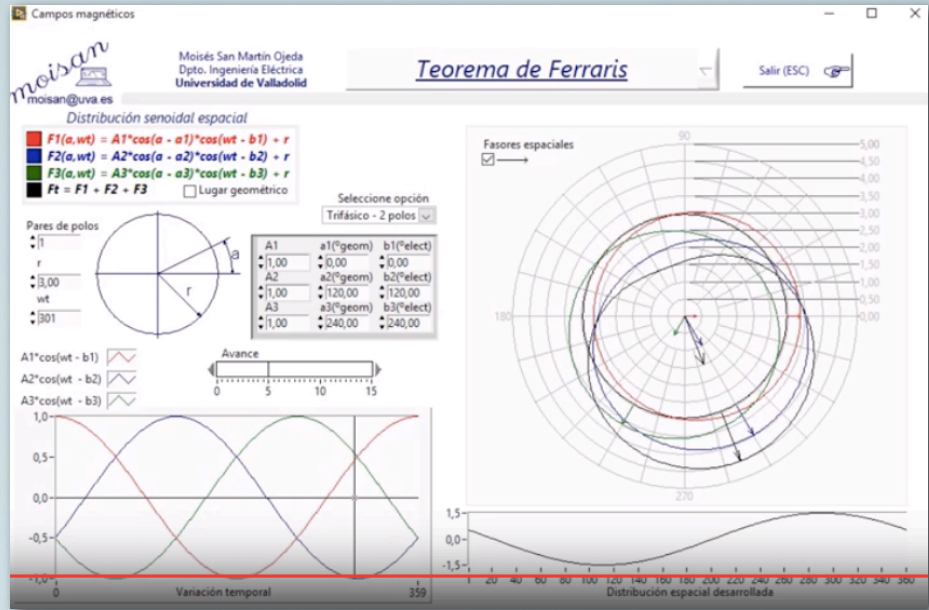
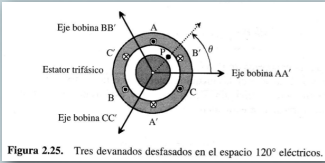
$$\mathcal{F}(\theta, t) = \mathcal{F}_a + \mathcal{F}_b + \mathcal{F}_c \quad \omega_m = \frac{\omega}{p} \quad \left(\alpha = \frac{\theta}{p} \right)$$

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

28

Fuerzas magneto y electromotrices

Devanados trifásicos, Teorema de Ferraris

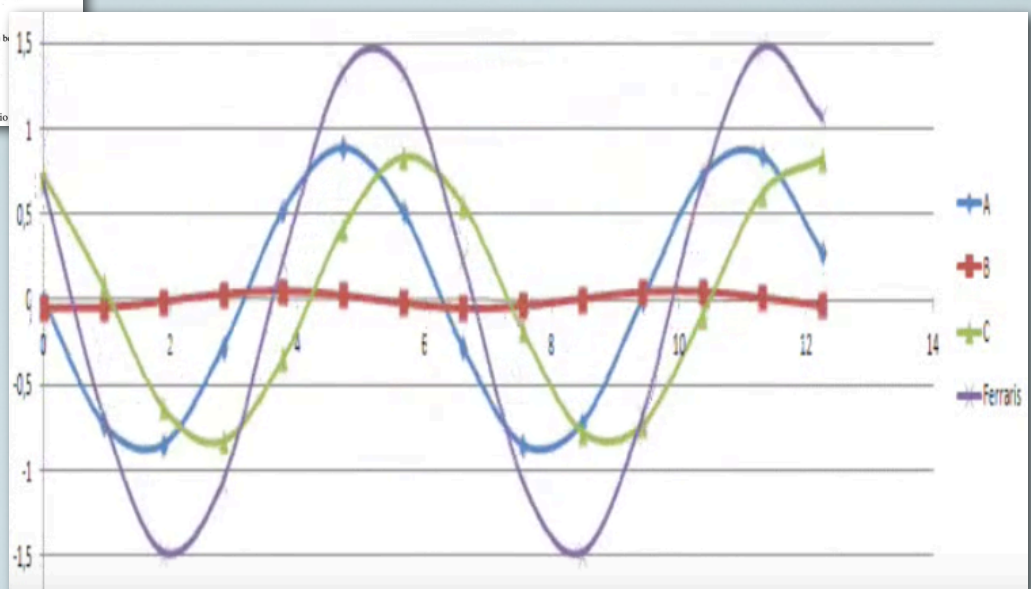
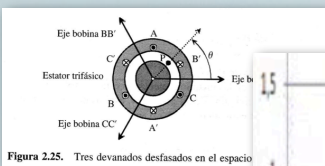


<https://www.youtube.com/watch?v=Tuc5Kh6ZolU>

29

Fuerzas magneto y electromotrices

Devanados trifásicos, Teorema de Ferraris



https://www.youtube.com/watch?v=g_e6oejmH6A

30

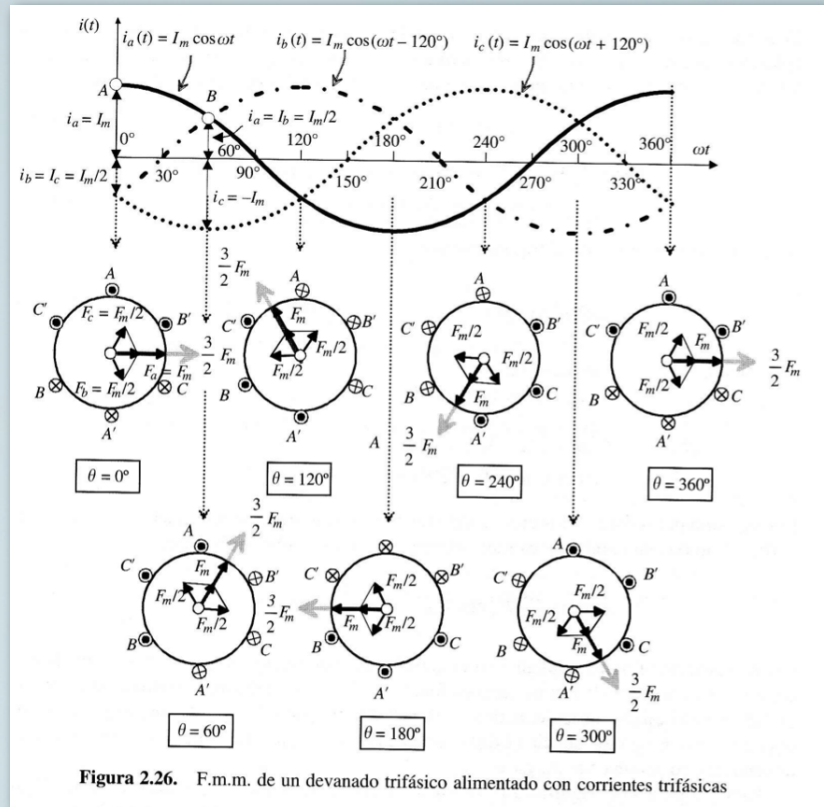
Fuerzas magneto y electromotrices

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



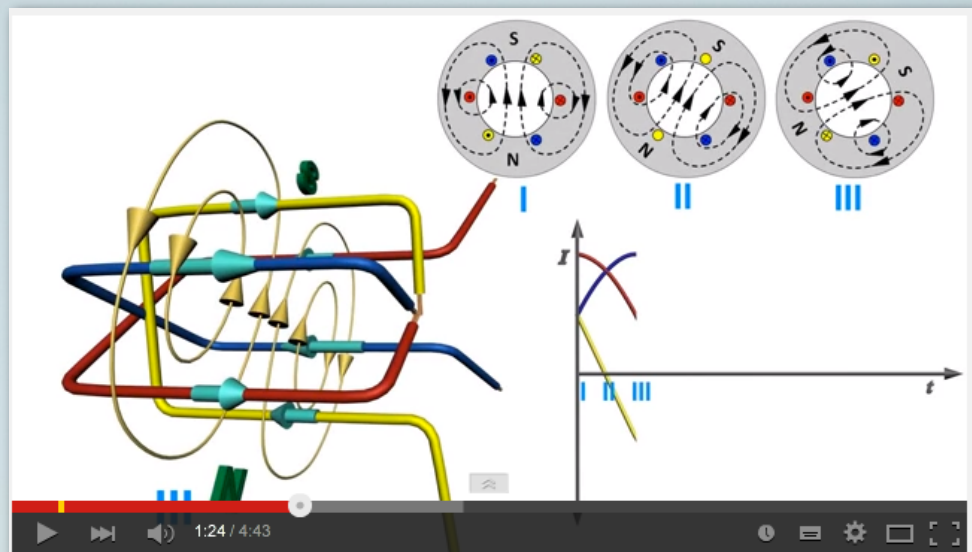
31

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 ω_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:

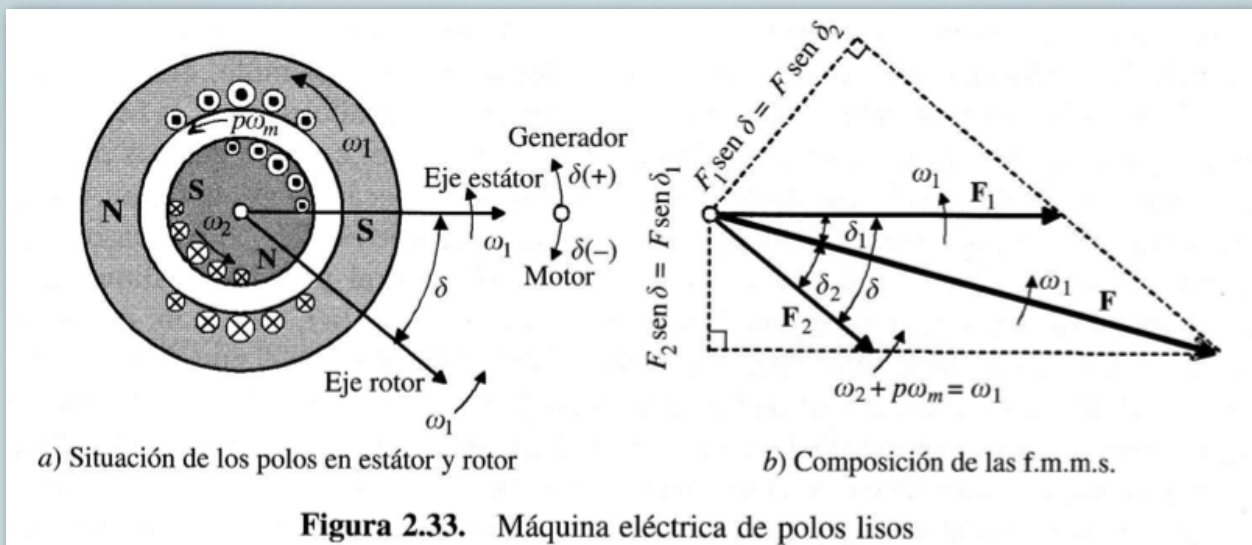
Secuencia a-b-c: $\mathcal{F}(\theta, t) \approx \frac{3}{2} F_m \cos(\omega t - p\alpha)$; $n = \frac{60 f}{p}$

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



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

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

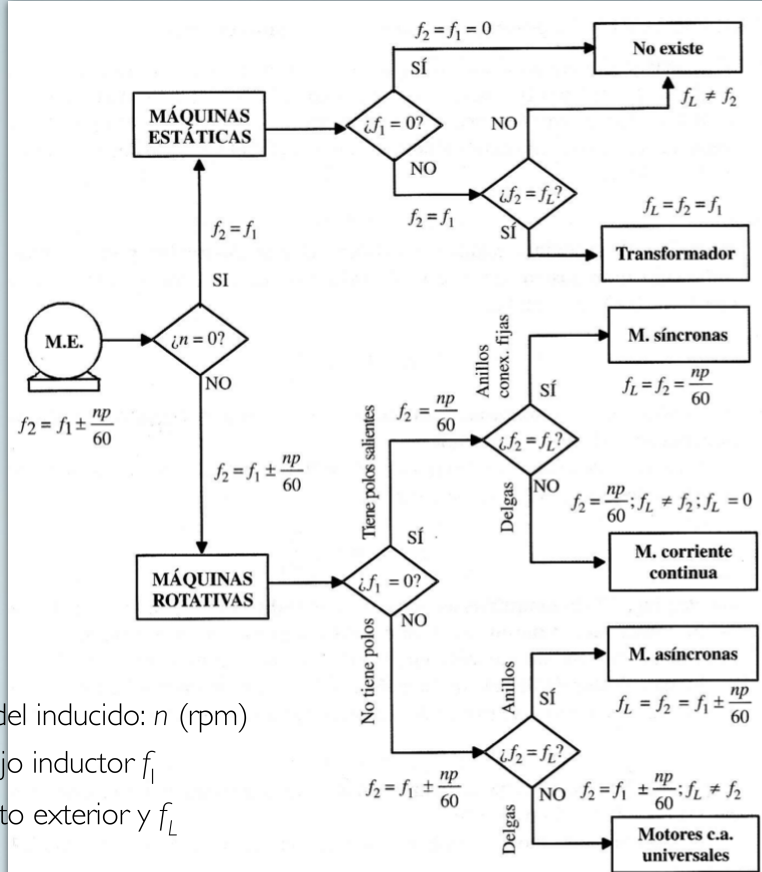


Figura 2.34. Cuadro de clasificación general de las máquinas eléctricas.