

Energía y Telecomunicaciones

Tema 3.2. Circuitos magnéticos y máquinas eléctricas. Material complementario



Alberto Arroyo Gutiérrez
Mario Mañana Canteli
Raquel Martínez Torre
Jesús Mirapeix Serrano
Cándido Capellán Villacián

Departamento de Ingeniería Eléctrica
y Energética

Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Introducción

¿Dónde puede encontrar motores un Teleco?

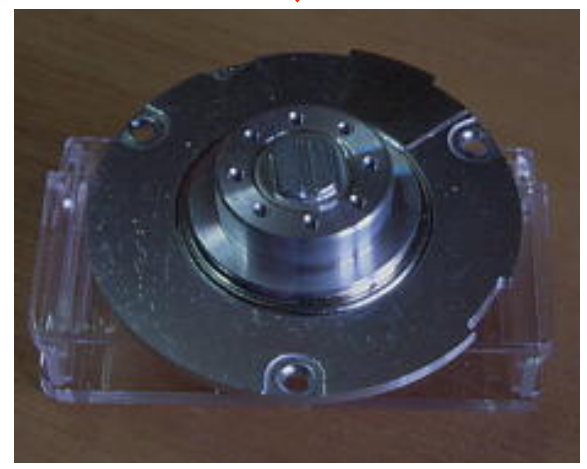
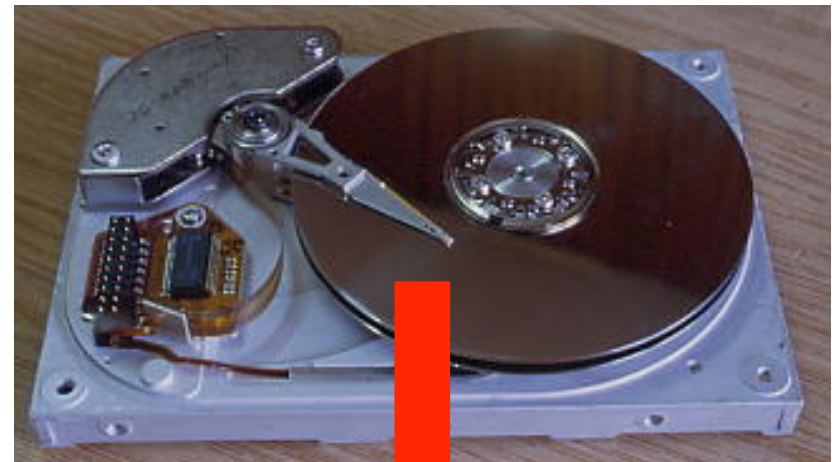


¿Dónde puede encontrar motores un Teleco?



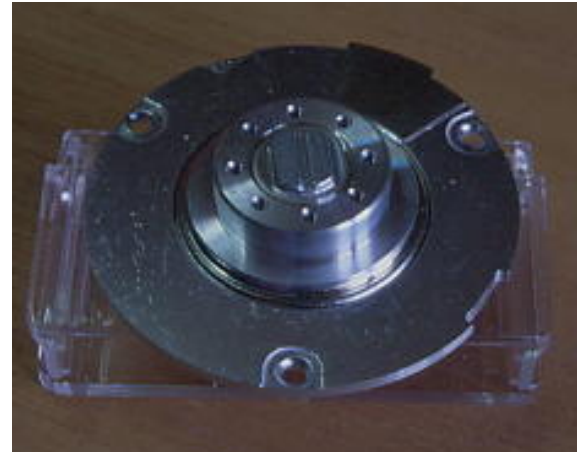
Introducción

¿Dónde puede encontrar motores un Teleco?

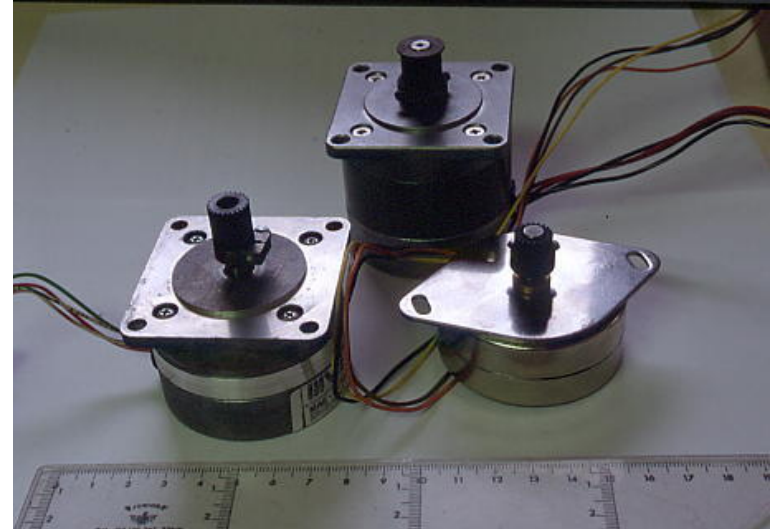


Introducción

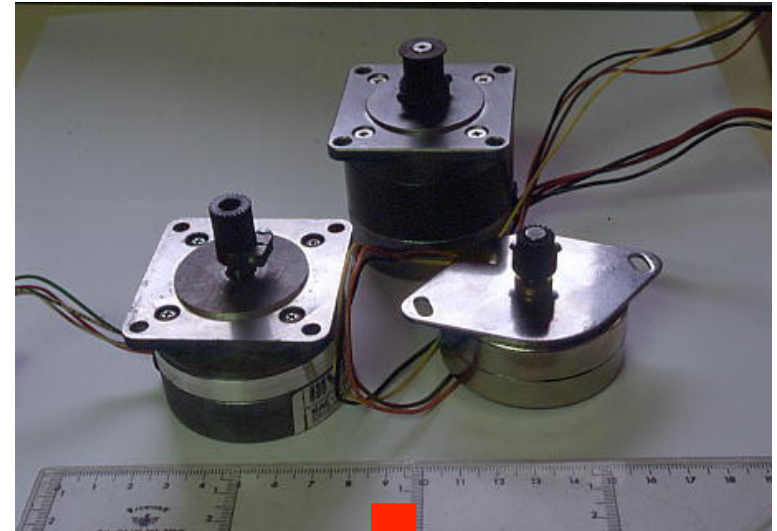
¿Dónde puede encontrar motores un Teleco?



¿Dónde puede encontrar motores un Teleco?

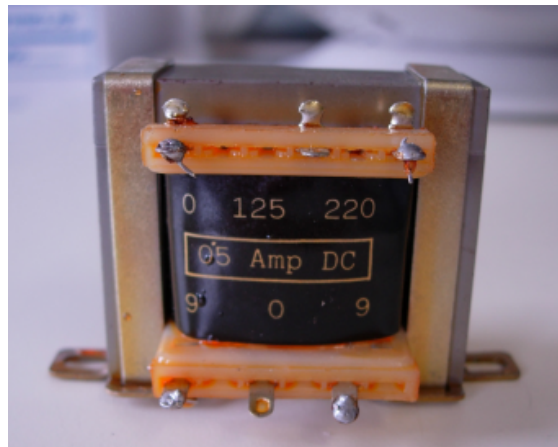


¿Dónde puede encontrar motores un Teleco?



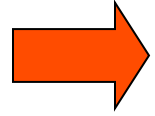
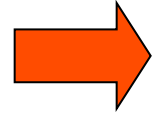
Introducción (III)

¿Dónde puede encontrar transformadores un Teleco?



Conceptos generales

Energía Eléctrica
Energía Mecánica



Energía Eléctrica
Energía Mecánica

Entrada

Salida

Máquina

Conceptos generales



Entrada



Energía Eléctrica

Salida

Energía Eléctrica

Máquina

Transformador

Conceptos generales



Entrada

Energía Eléctrica



Energía Eléctrica

Salida

Energía Eléctrica

Energía Mecánica

Máquina

Transformador

Motor

Conceptos generales



Entrada

- Energía Eléctrica
- Energía Eléctrica
- Energía Mecánica

Salida

- Energía Eléctrica
- Energía Mecánica
- Energía Eléctrica

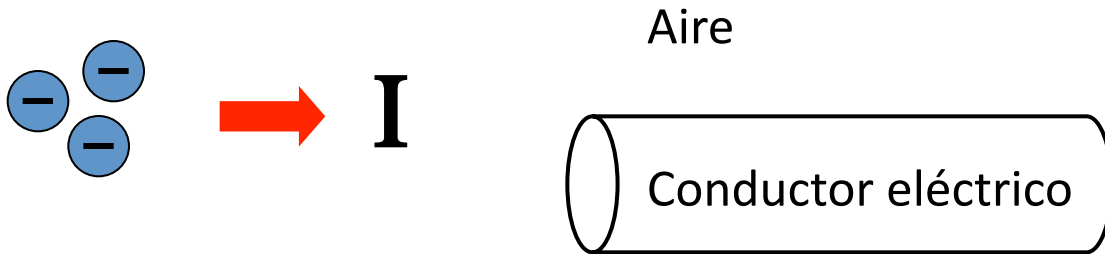
Máquina

- Transformador
- Motor
- Generador



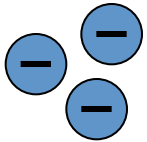
Circuitos magnéticos. Analogía con los circuitos eléctricos

Circuito eléctrico



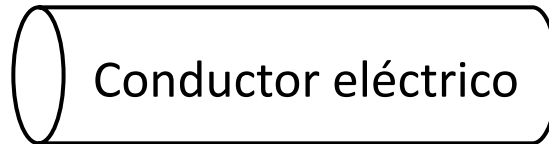
Circuitos magnéticos. Analogía con los circuitos eléctricos

Circuito eléctrico



I

Aire



$$R = \frac{\rho l}{S}$$

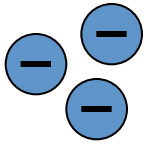
Resistencia

ρ_{aire} ↑ ↑ ↑

$\rho_{\text{cond}} (\text{Cu}) = 0,015$

Circuitos magnéticos. Analogía con los circuitos eléctricos

Circuito eléctrico



I

Aire

$$R = \frac{\rho l}{S}$$

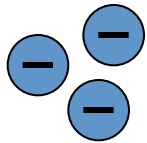


Resistencia

ρ_{aire} ↑ ↑ ↑

$\rho_{\text{cond}} (\text{Cu}) = 0,015$

Circuito eléctrico



I

Aire



Conductor eléctrico

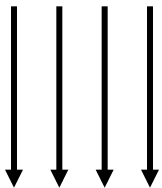
$$R = \frac{\rho l}{S}$$

Resistencia

ρ_{aire} ↑ ↑ ↑

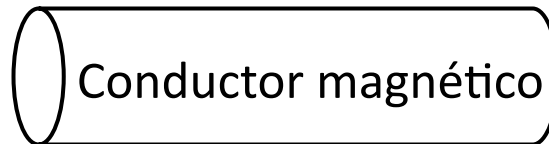
$\rho_{\text{cond}} (\text{Cu}) = 0,015$

Circuito magnético



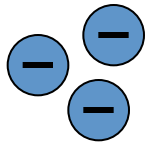
Φ

Aire



Conductor magnético

Circuito eléctrico



I

Aire



Conductor eléctrico

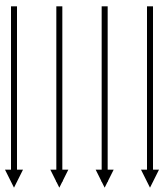
$$R = \frac{\rho l}{S}$$

Resistencia

ρ_{aire} ↑ ↑ ↑

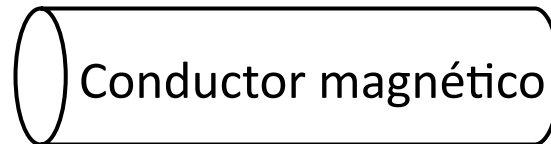
$\rho_{\text{cond}} (\text{Cu}) = 0,015$

Circuito magnético



Φ

Aire



Conductor magnético

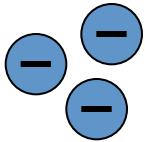
$$Re = \frac{l}{\mu_0 \mu_r S}$$

Reluctancia

$\mu_{\text{aire}} = 1$

$\mu_{r,\text{cond}} (\text{Fe}) = 5000$

Circuito eléctrico



I

Aire



Conductor eléctrico

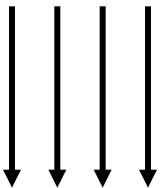
$$R = \frac{\rho l}{S}$$

Resistencia

ρ_{aire} ↑ ↑ ↑

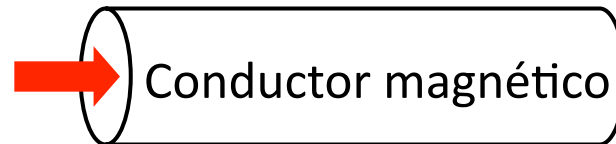
$\rho_{\text{cond}} (\text{Cu}) = 0,015$

Circuito magnético



Φ

Aire



Conductor magnético

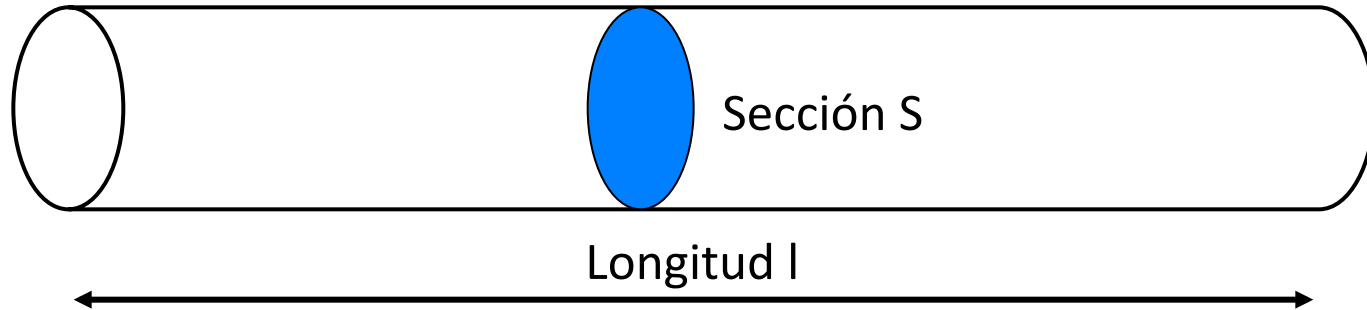
$$Re = \frac{l}{\mu_0 \mu_r S}$$

Reluctancia

$\mu_{\text{aire}} = 1$

$\mu_{r,\text{cond}} (\text{Fe}) = 5000$

Permeabilidad relativa μ_r



$$Re = \frac{l}{\mu_r \mu_0 S}$$

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H/m}$$

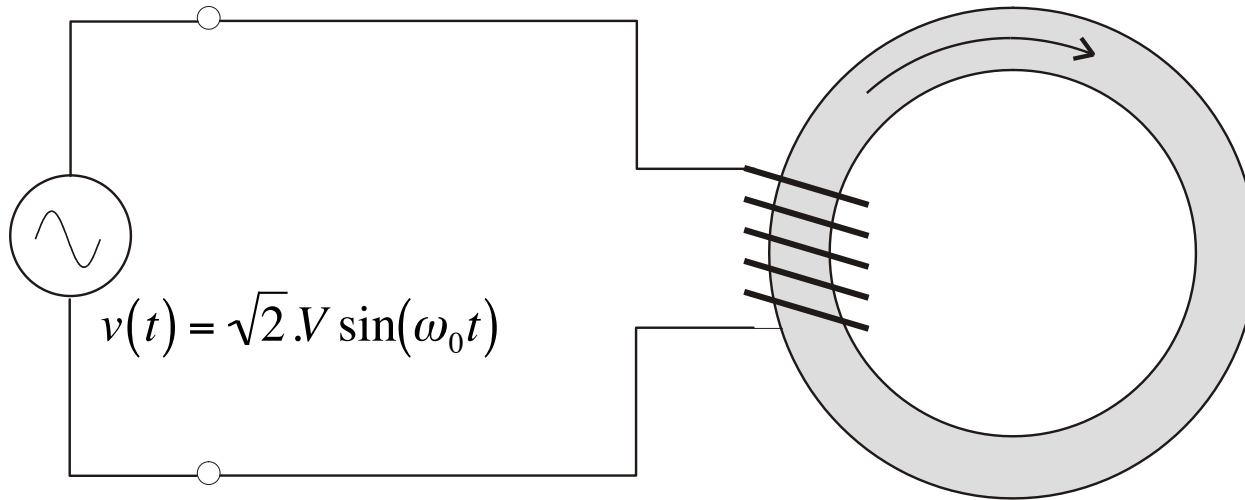
$$\mu_r (\text{Aire}) = 1$$

$$\mu_r (\text{Hierro}) = 5000$$

$$\mu_r (\text{Hierro al silicio}) = 10000$$

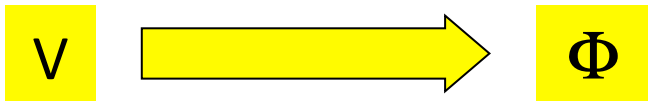
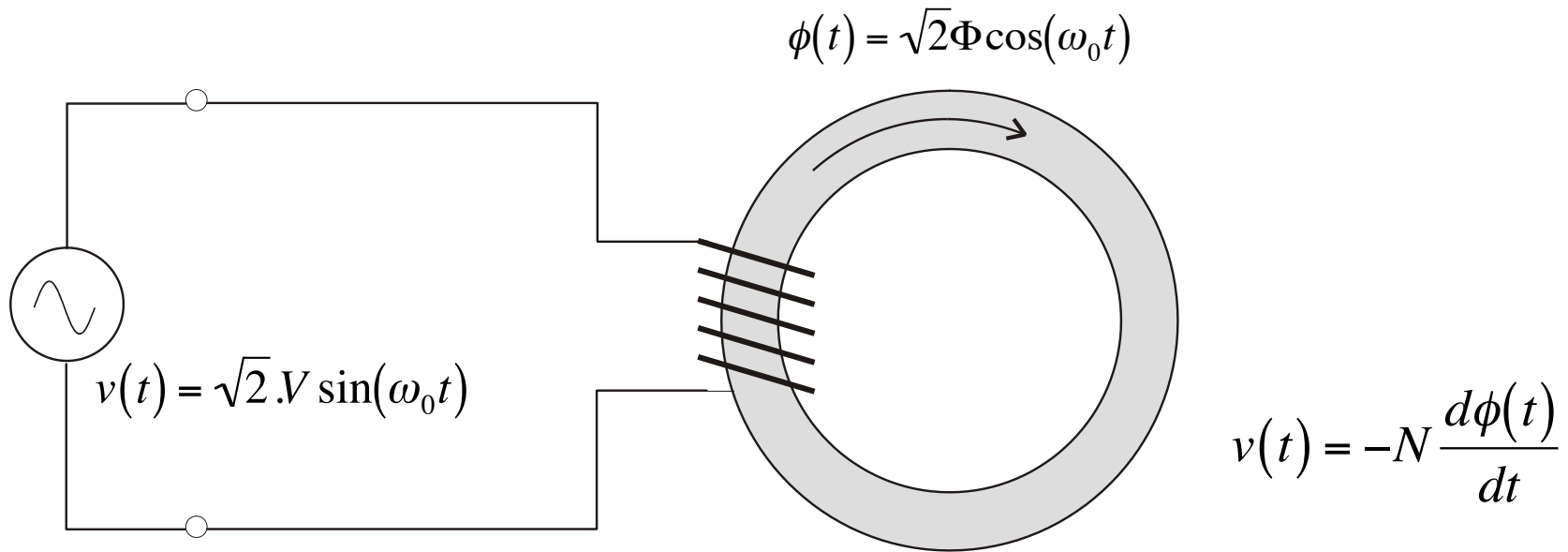
$$\mu_r (\text{Permalloy}) = 25000$$

$$\mu_r (\text{Mumetal}) = 110000$$

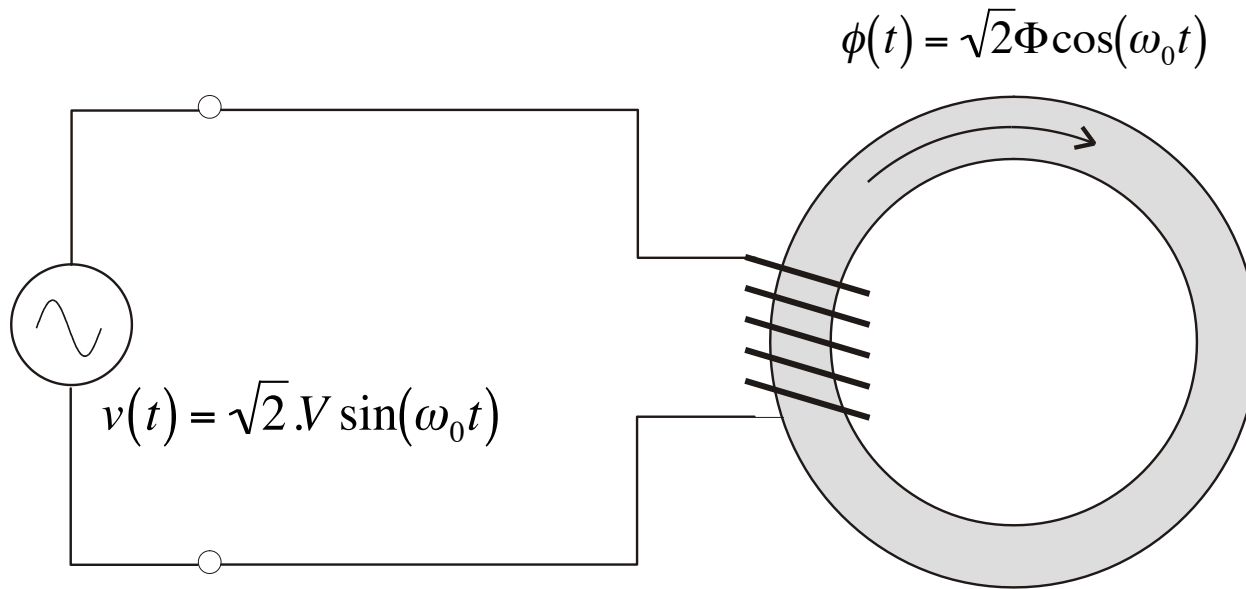


$$v(t) = -N \frac{d\phi(t)}{dt}$$

V

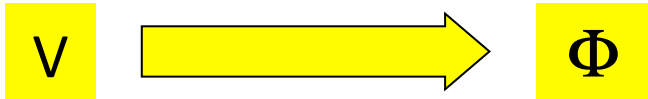


$$v(t) = -N \frac{d\phi(t)}{dt}$$

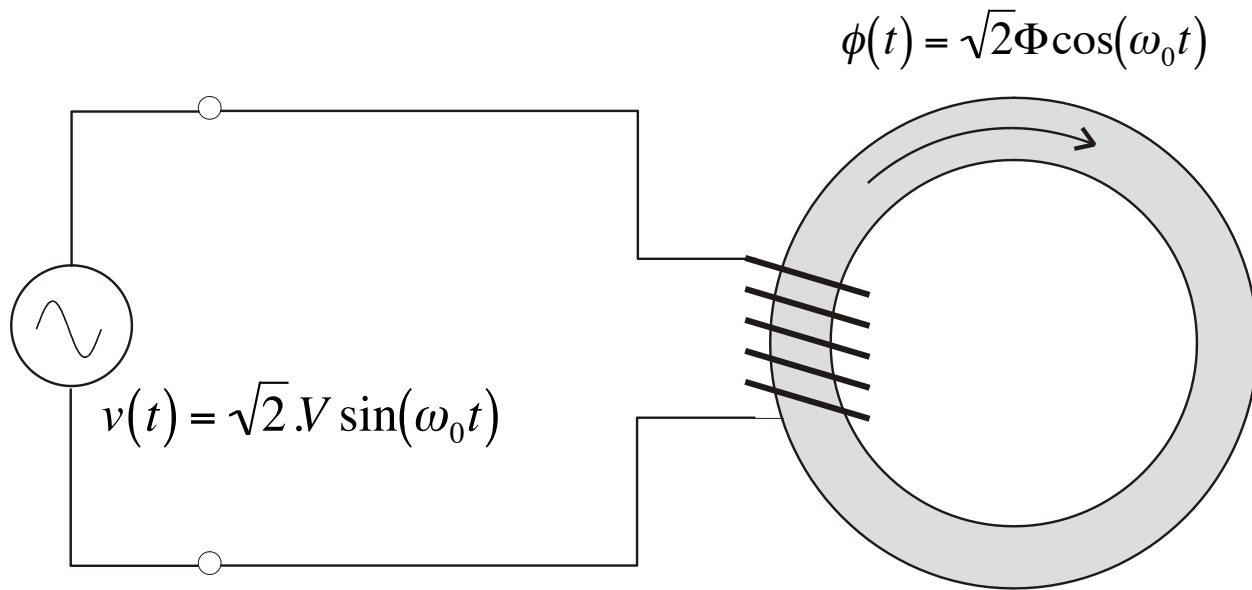


$$\Phi = \frac{V}{N\omega_0}$$

$$v(t) = -N \frac{d\phi(t)}{dt}$$

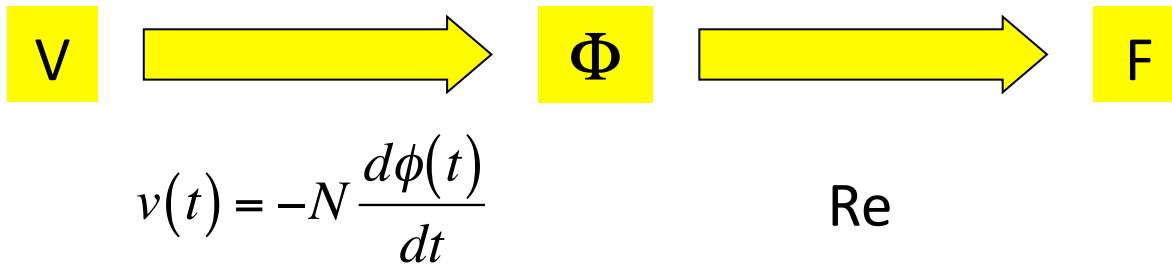


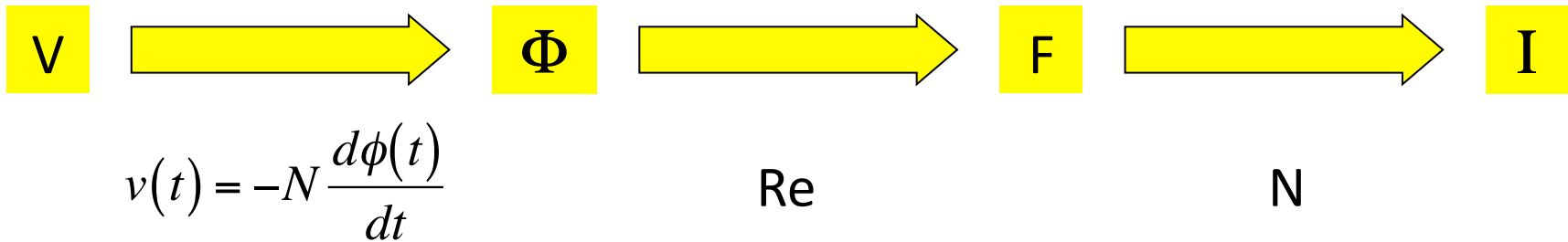
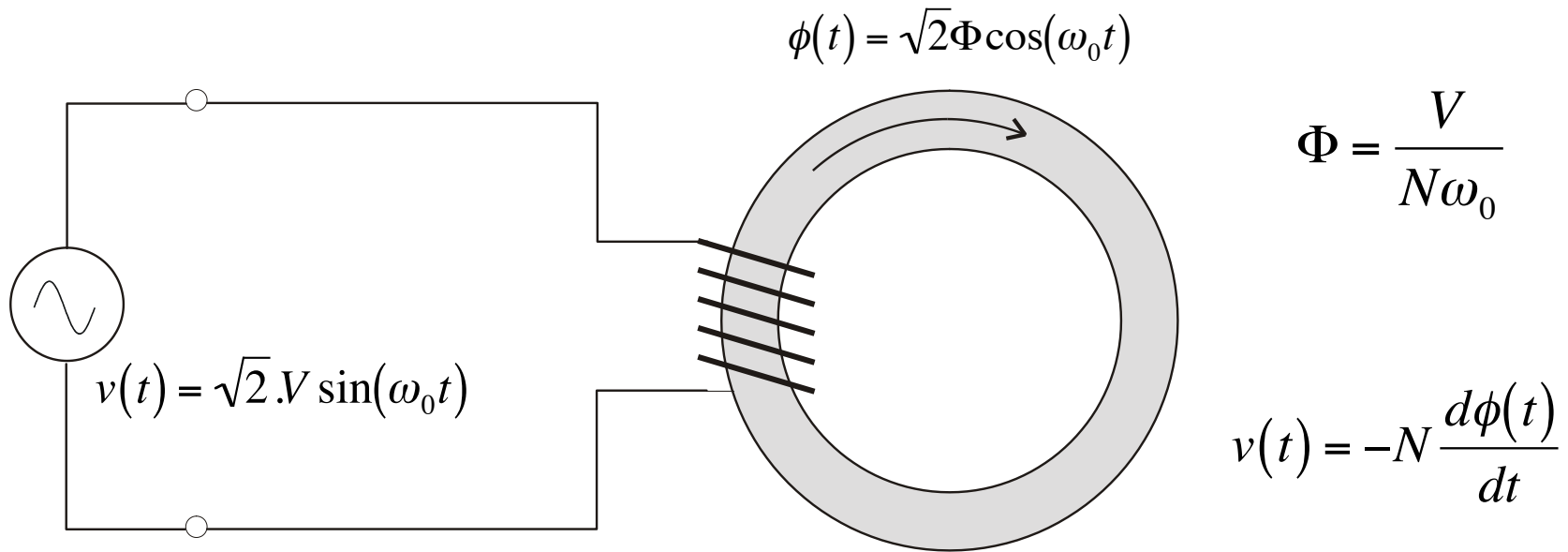
$$v(t) = -N \frac{d\phi(t)}{dt}$$



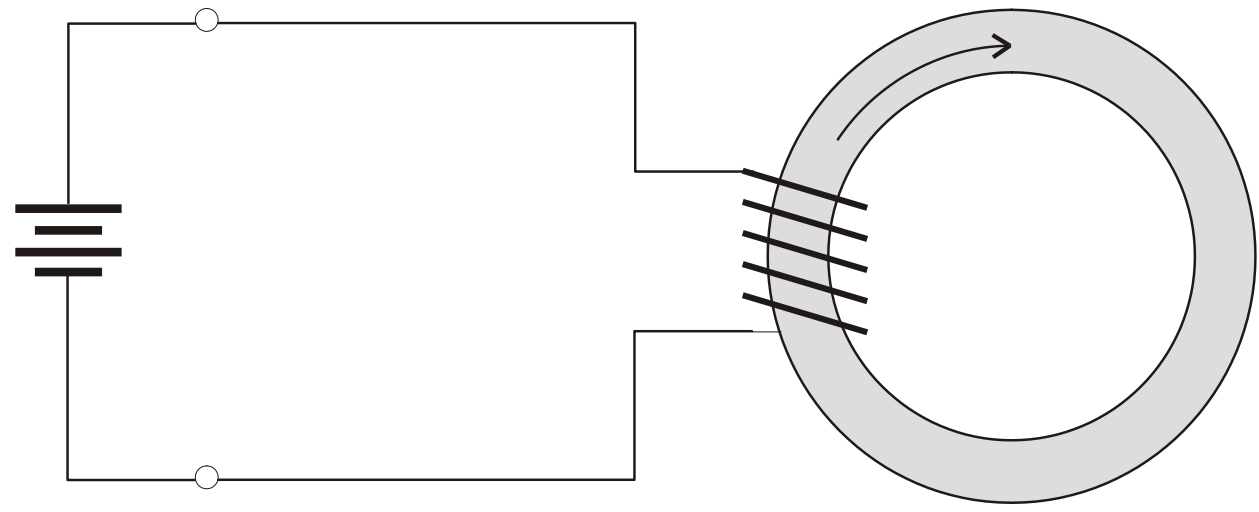
$$\Phi = \frac{V}{N\omega_0}$$

$$v(t) = -N \frac{d\phi(t)}{dt}$$



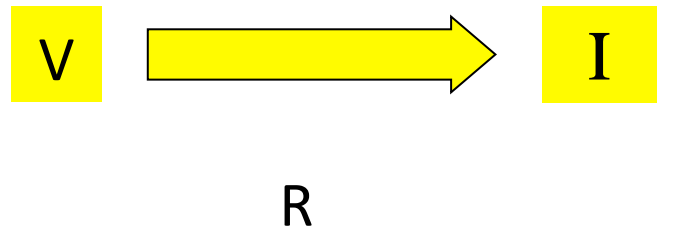
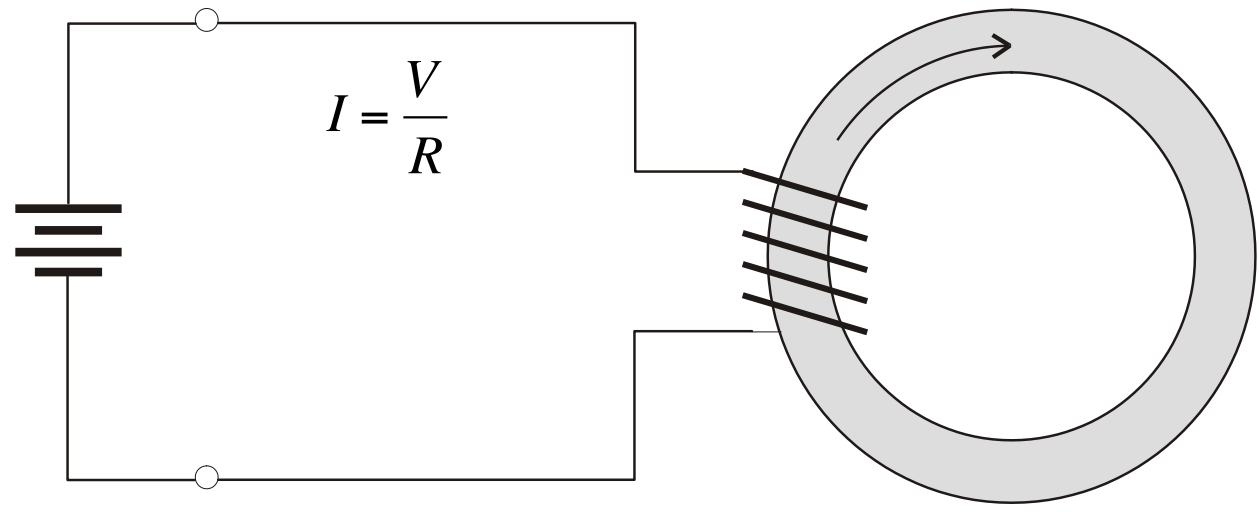


Circuitos magnéticos. Corriente continua

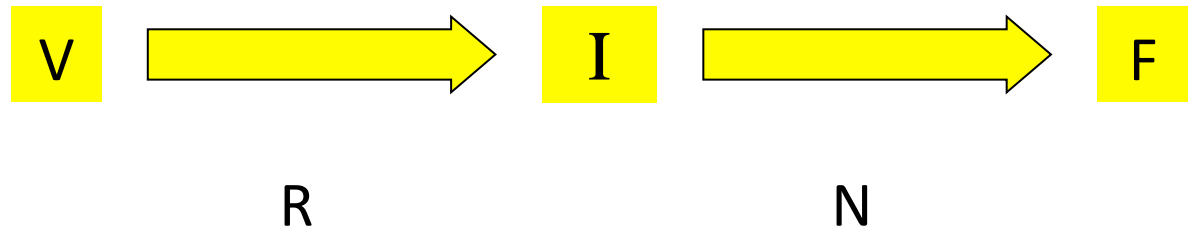
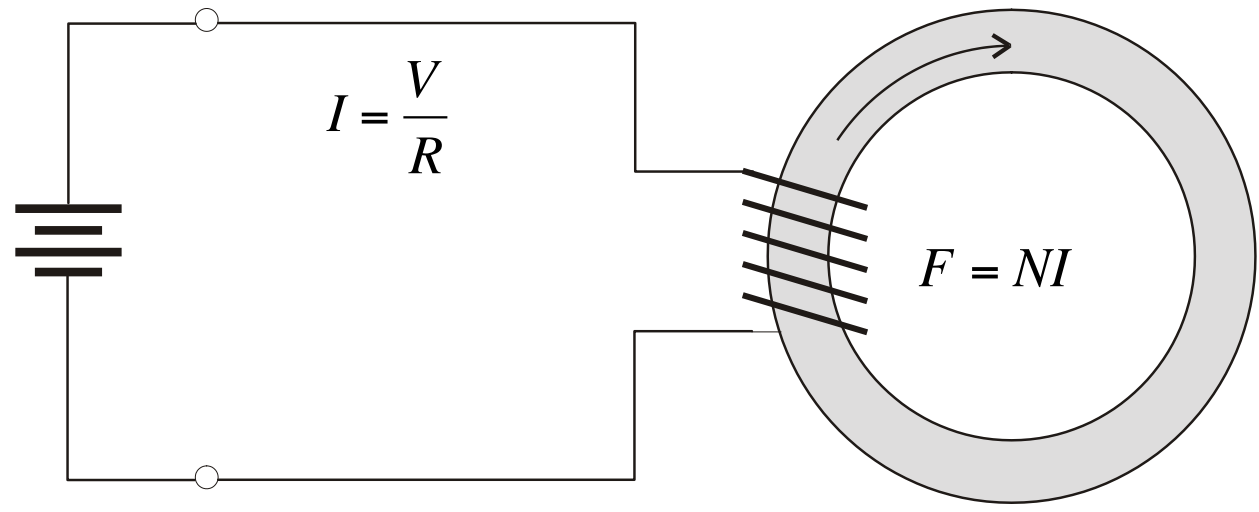


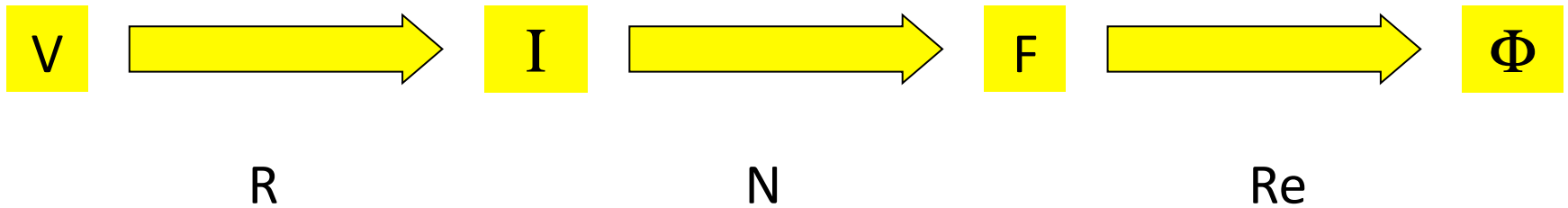
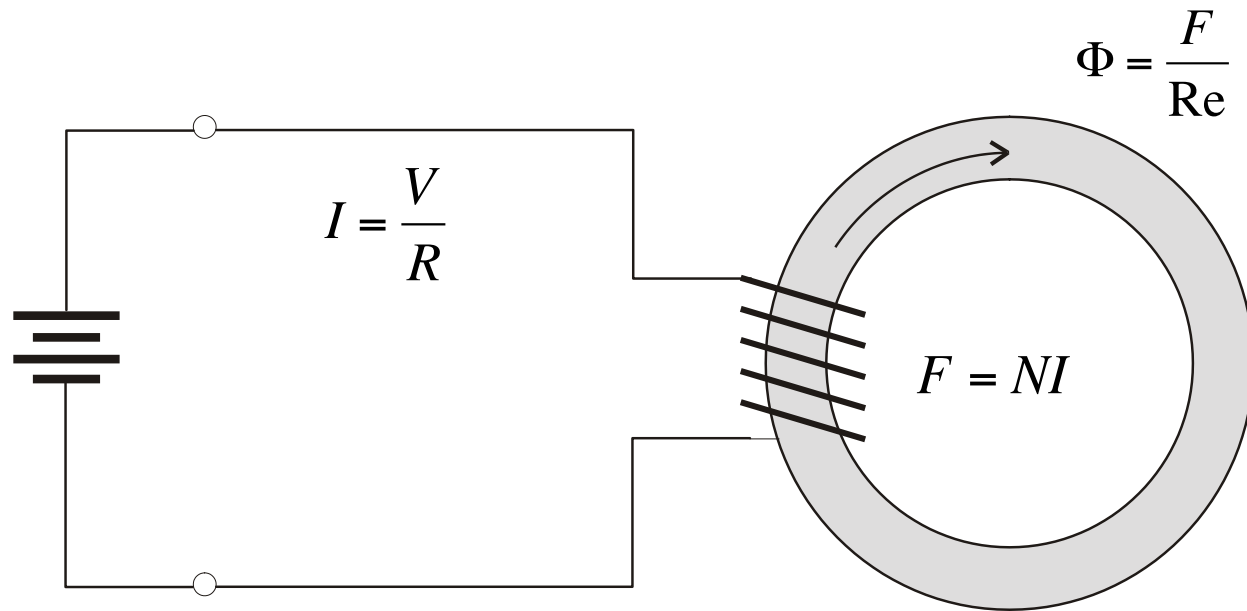
V

Circuitos magnéticos. Corriente continua



Circuitos magnéticos. Corriente continua





En un circuito magnético que trabaja en corriente continua la intensidad que circula por el circuito eléctrico depende del material utilizado en el circuito magnético.

Fuerza magnetomotriz [A.v]

$$\oint_c H \cdot dl = \int_s J \cdot ds = \sum i = Ni = F$$

$$B = \mu H$$

$$\phi = BS$$

Inducción [T]

Intensidad campo magnético
[A.v/m]

Flujo Magnético [Wb]

Reluctancia [H⁻¹]

$$F = N \cdot i = H \cdot l = \phi \cdot Re = B \cdot S$$

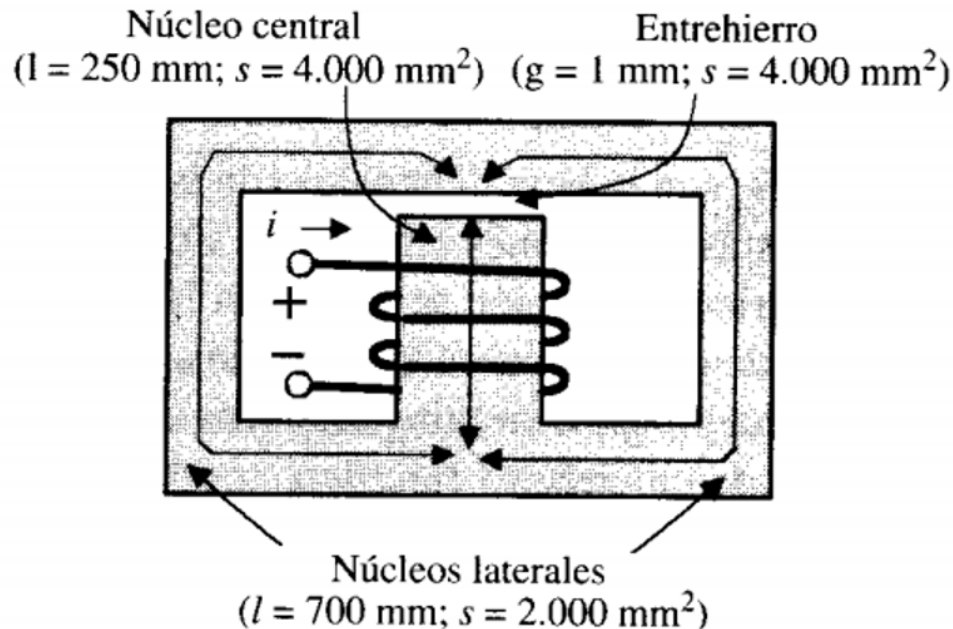
Circuito eléctrico	Circuito magnético
e: f.e.m [V]	F: f.m.m [A.v]
J: densidad de corriente [A/m ²]	B: inducción [T]
σ: conductividad [S/m]	μ: permeabilidad [H/m]
E: campo eléctrico [V/m]	H: campo magnético [A.v/m]
i: corriente eléctrica [A]	Φ: flujo magnético [Wb]
V: potencial eléctrico [V]	U: potencial magnético [A.v]

Circuito eléctrico	Circuito magnético
e: f.e.m [V]	F: f.m.m [A.v]
J: densidad de corriente [A/m ²]	B: inducción [T]
σ : conductividad [S/m]	μ : permeabilidad [H/m]
E: campo eléctrico [V/m]	H: campo magnético [A.v/m]
i: corriente eléctrica [A]	Φ : flujo magnético [Wb]
V: potencial eléctrico [V]	U: potencial magnético [A.v]

Circuito eléctrico	Circuito magnético
Primer lema de Kirchhoff: $\sum i = 0$	Primer lema de Kirchhoff: $\sum \Phi = 0$
Segundo lema de Kirchhoff: $\sum e = \sum Ri$	Segundo lema de Kirchhoff: $\sum F = \sum Re\Phi$
Resistencia: $R = \frac{l}{\sigma S} [\Omega]$	Reluctancia: $Re = \frac{l}{\mu S} [H^{-1}]$
Resistencias en serie: $R_T = \sum R_i$	Reluctancias en serie: $Re_T = \sum Re_i$
Resistencia en paralelo: $\frac{1}{R_T} = \sum \frac{1}{R_i}$	Reluctancias en paralelo: $\frac{1}{Re_T} = \sum \frac{1}{Re_i}$

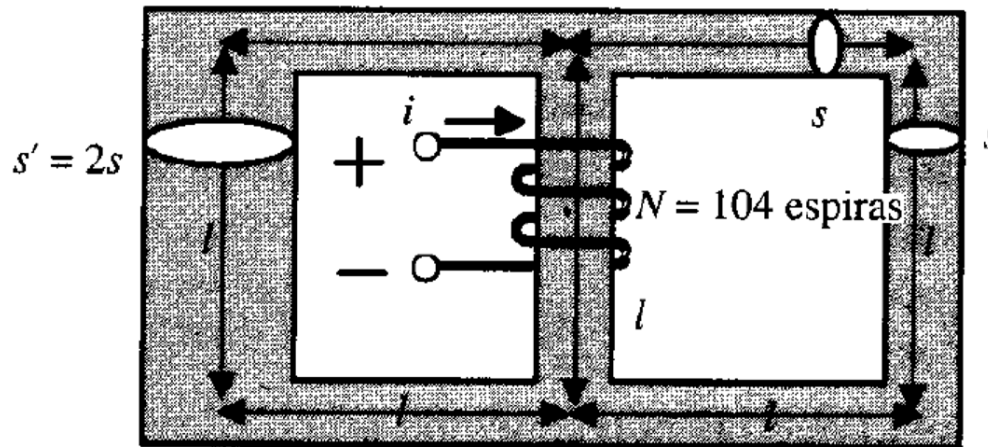
Máquinas eléctricas, Fraile, pg. 14

El núcleo central del circuito magnético de la Figura 1.7 está bobinado con 800 espiras. El material es acero fundido con un valor de la permeabilidad relativa $\mu_r = 1000$. Calcular la corriente i que debe aplicarse a la bobina para obtener en el entrehierro un flujo de 1 mWb.

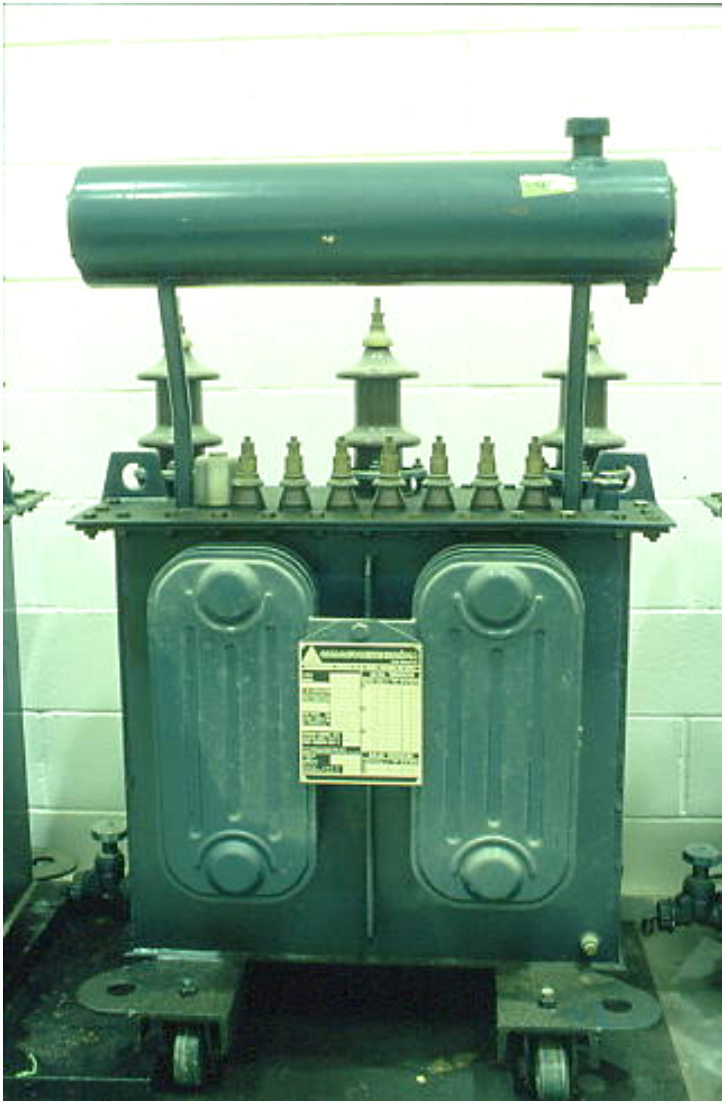


Máquinas eléctricas, Fraile, pg. 75

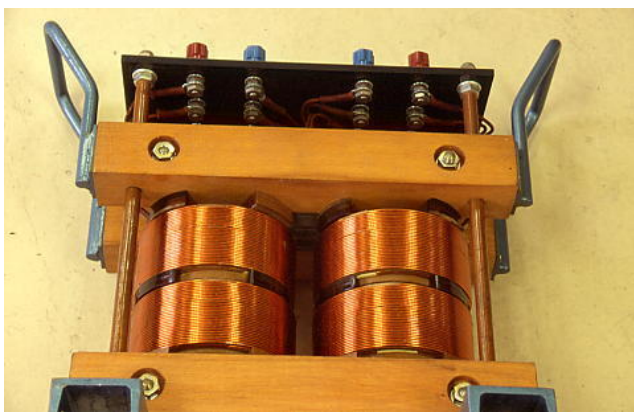
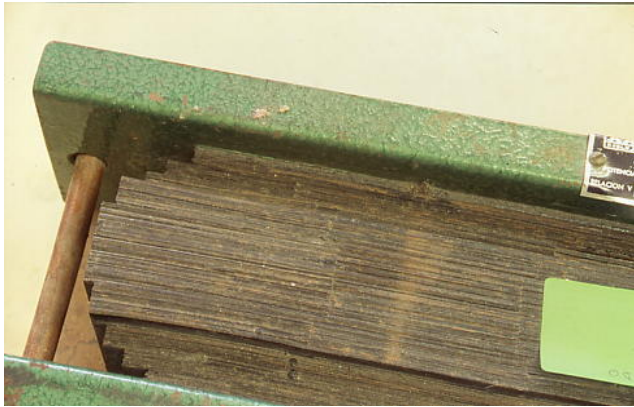
Calcular la intensidad que debe aplicarse a la bobina del circuito magnético de la figura para producir un flujo de 1 mWb en la columna de la derecha. La permeabilidad relativa se supone que es constante en todos los puntos y de valor $\mu_r = 400$. La sección de circuito magnético es $S = 10 \text{ cm}^2$ en toda la estructura, excepto en la columna izquierda, que vale $S = 20 \text{ cm}^2$. La longitud l es igual a 10 cm. Calcular, también, el flujo en el brazo horizontal.



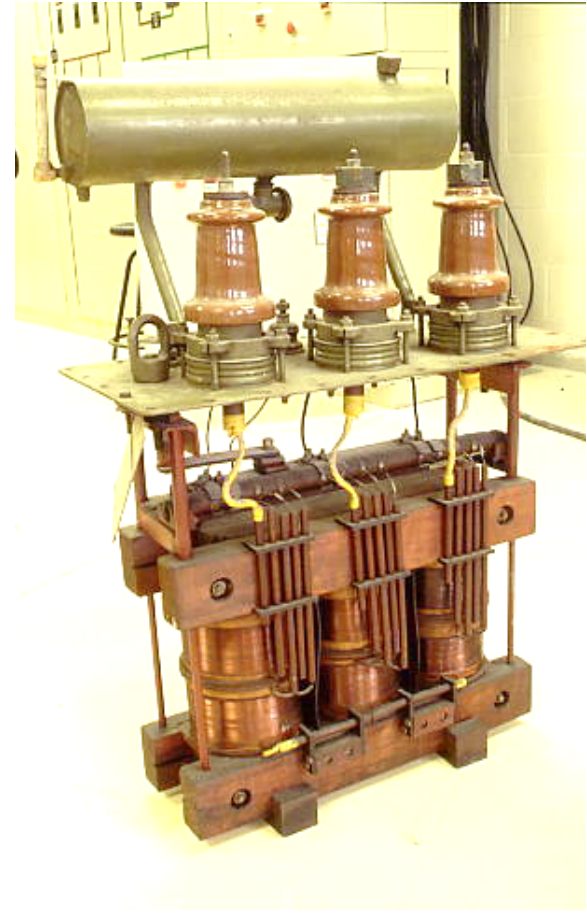
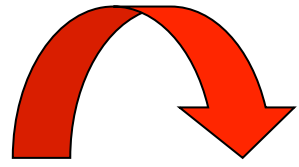
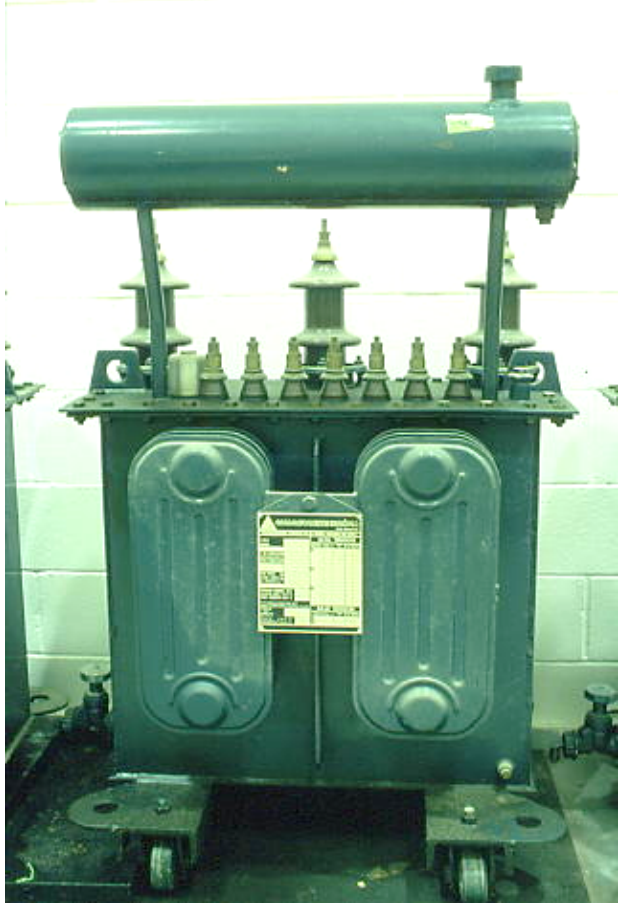
Transformador



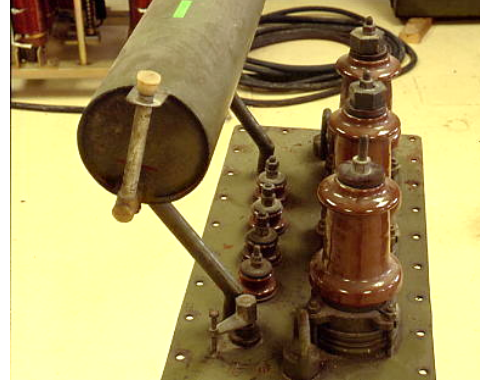
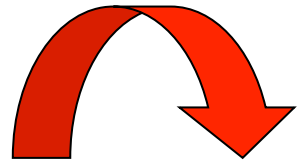
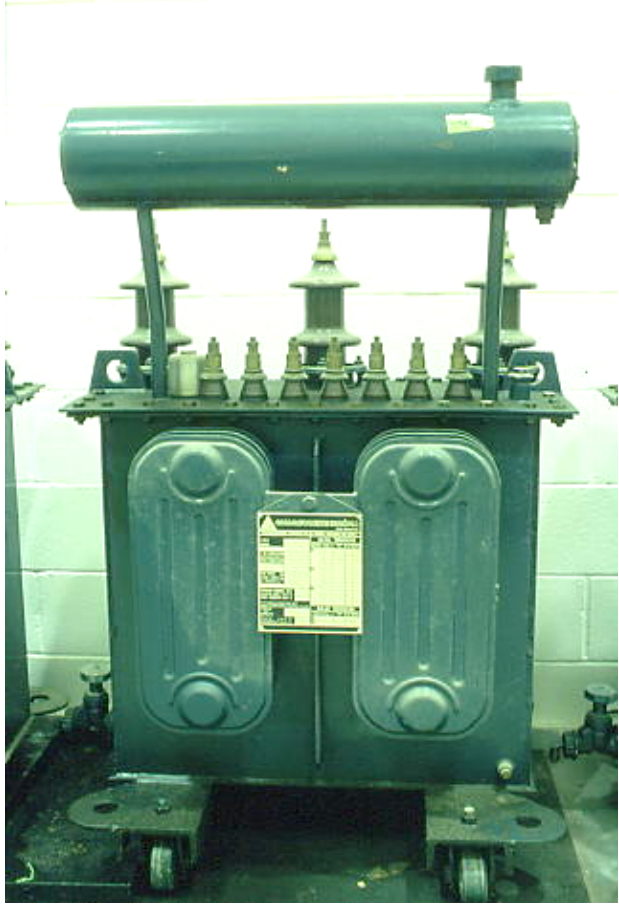
Transformador



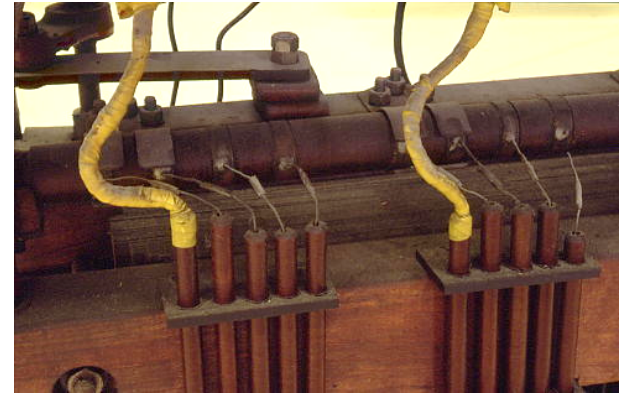
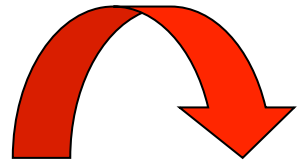
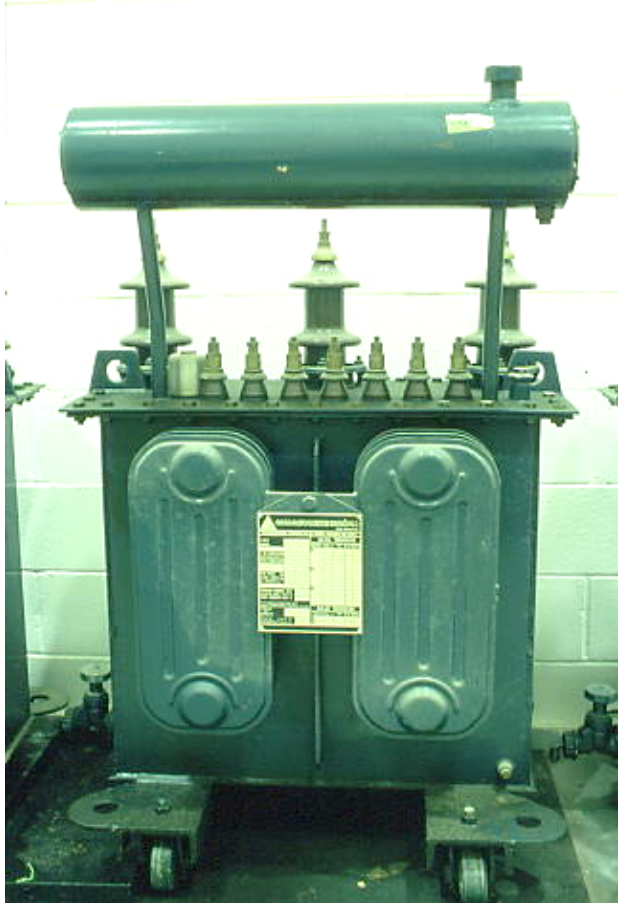
Transformador



Transformador



Transformador



Transformador



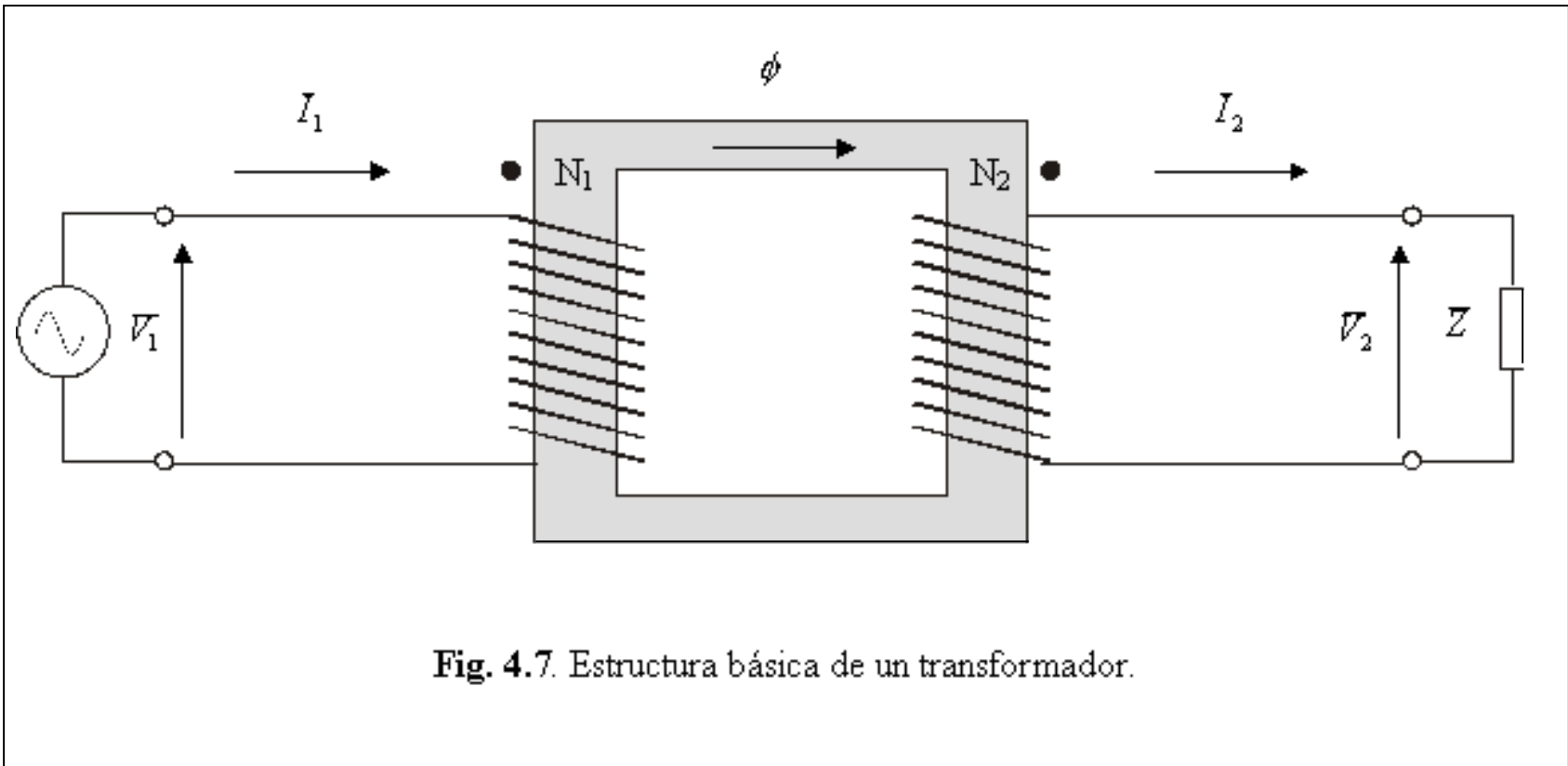


Fig. 4.7. Estructura básica de un transformador.

Transformador. Modelo ideal

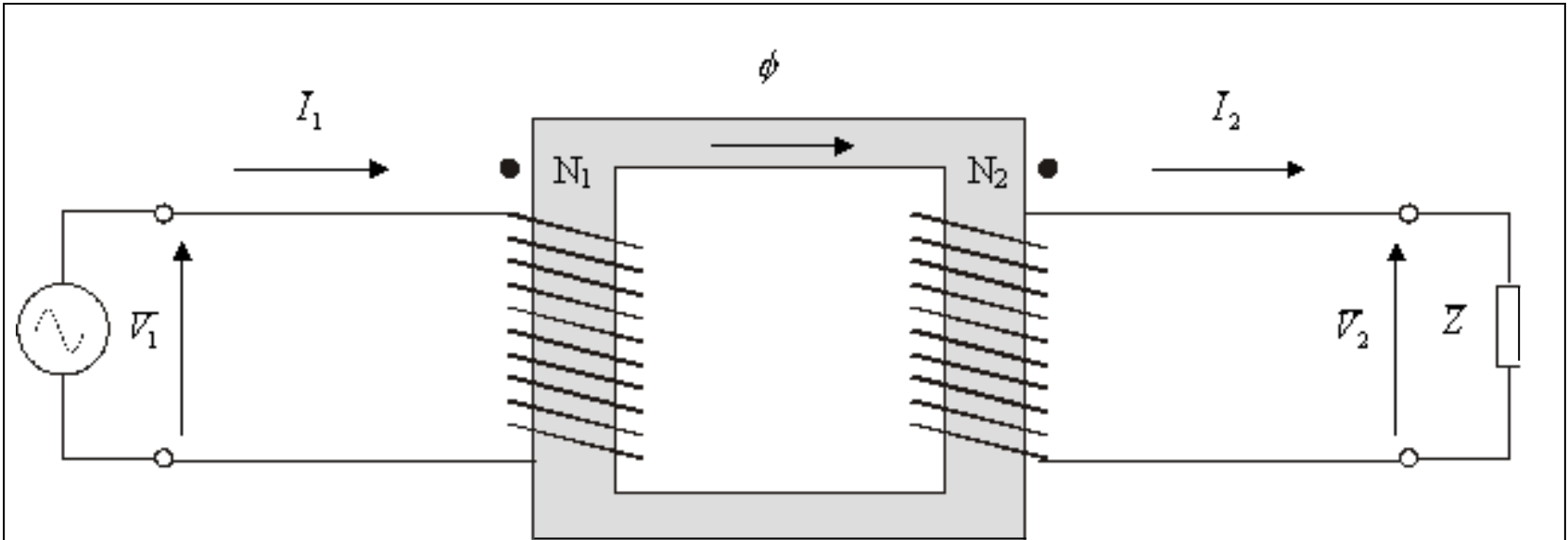
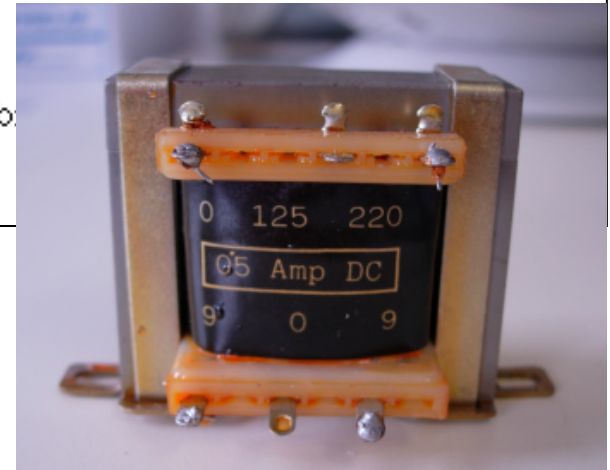


Fig. 4.7. Estructura básica de un transfo



Transformador. Modelo ideal

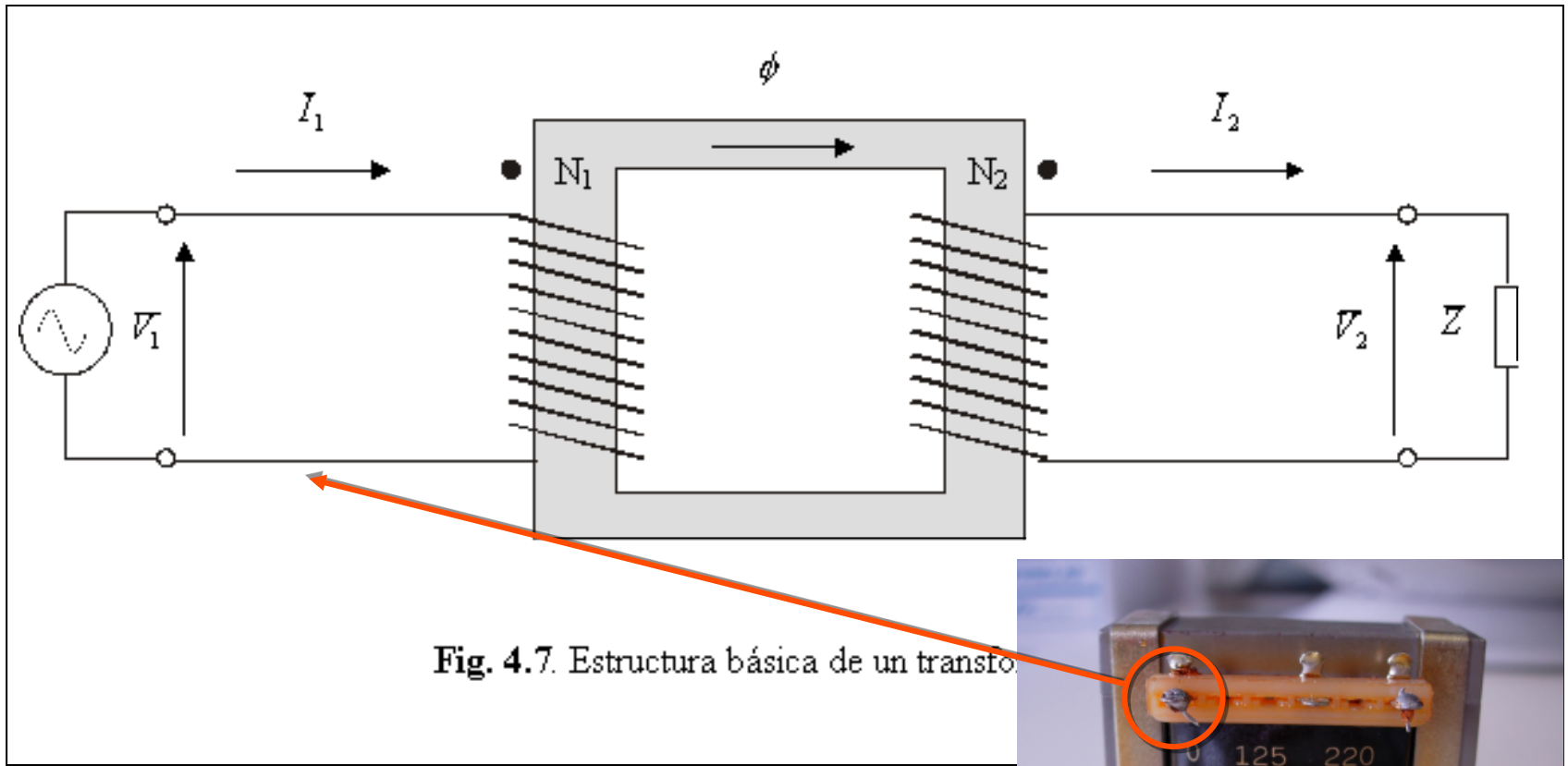
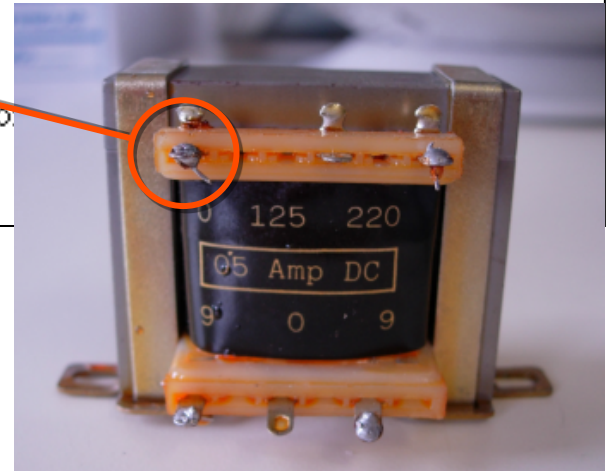


Fig. 4.7. Estructura básica de un transtio



Transformador. Modelo ideal

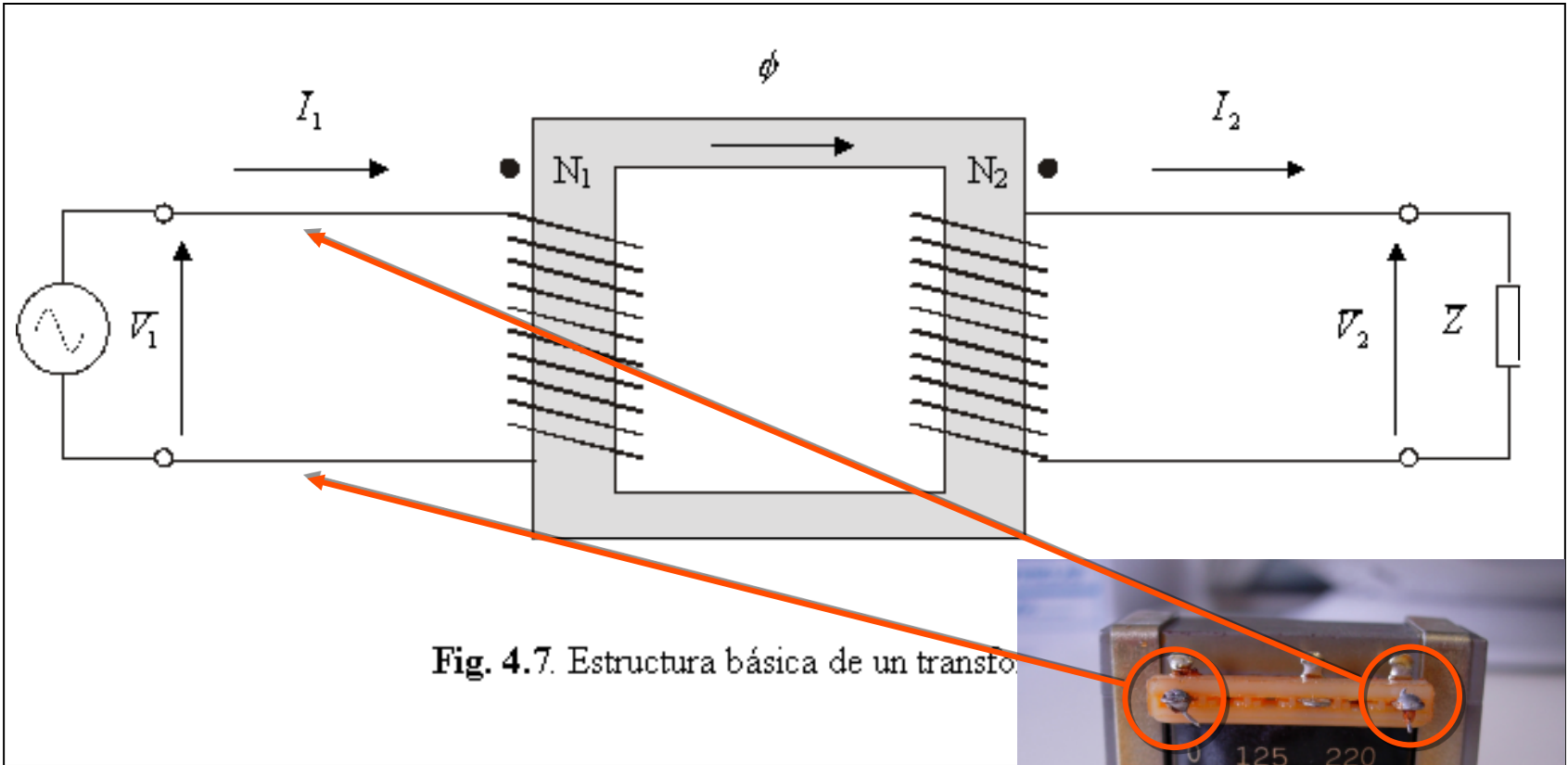
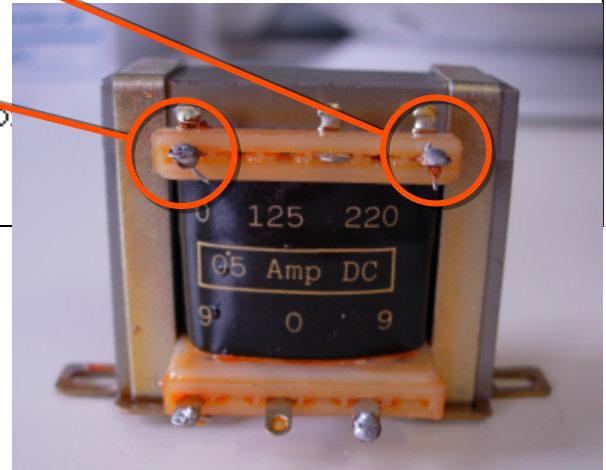


Fig. 4.7. Estructura básica de un transtio



Transformador. Modelo ideal

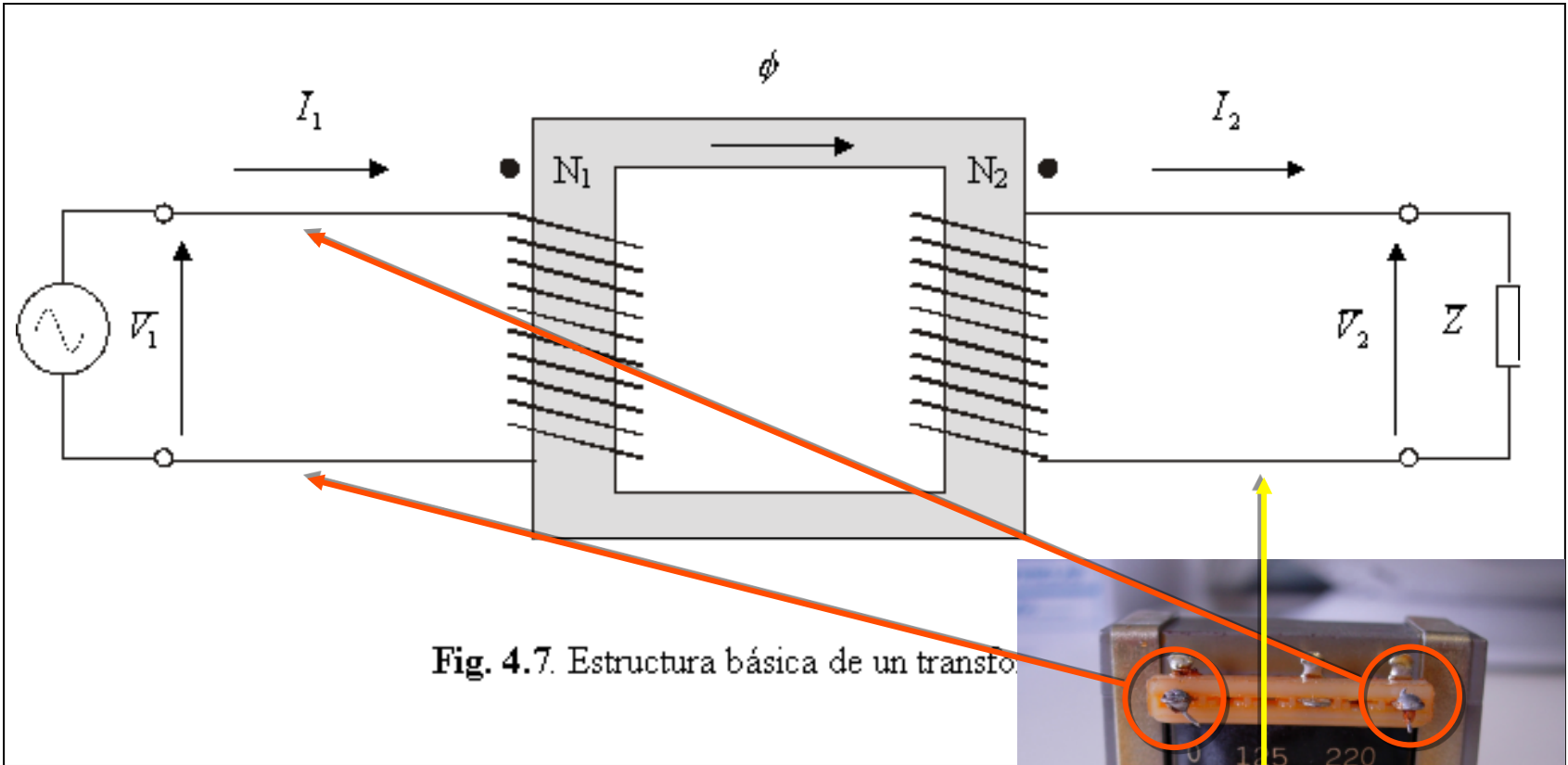
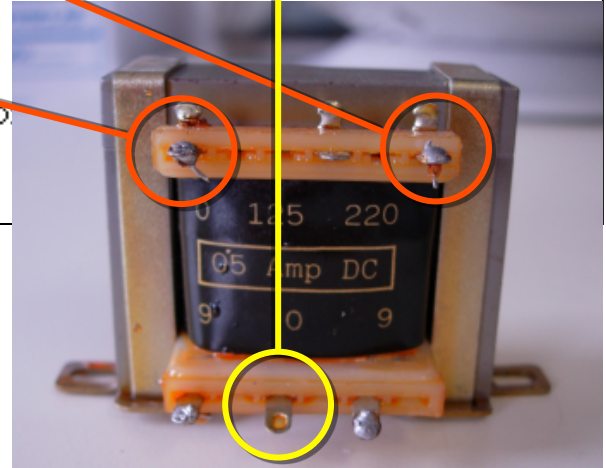


Fig. 4.7. Estructura básica de un transtio



Transformador. Modelo ideal

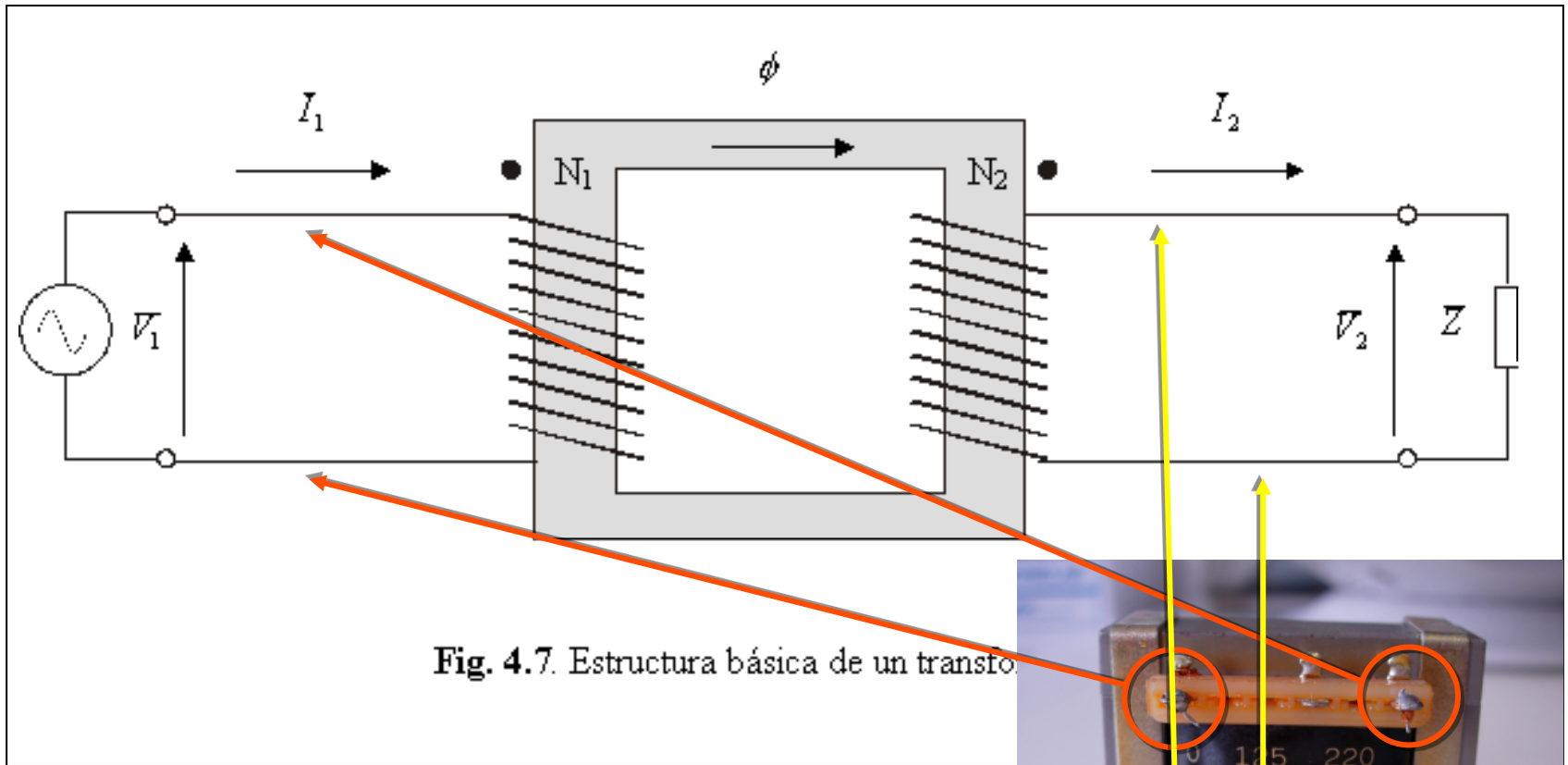
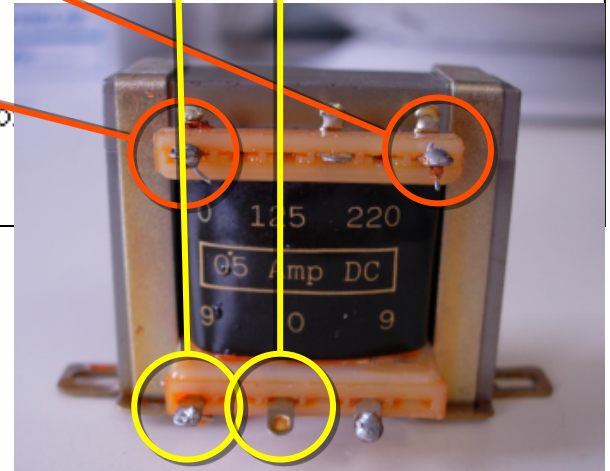


Fig. 4.7. Estructura básica de un transtio



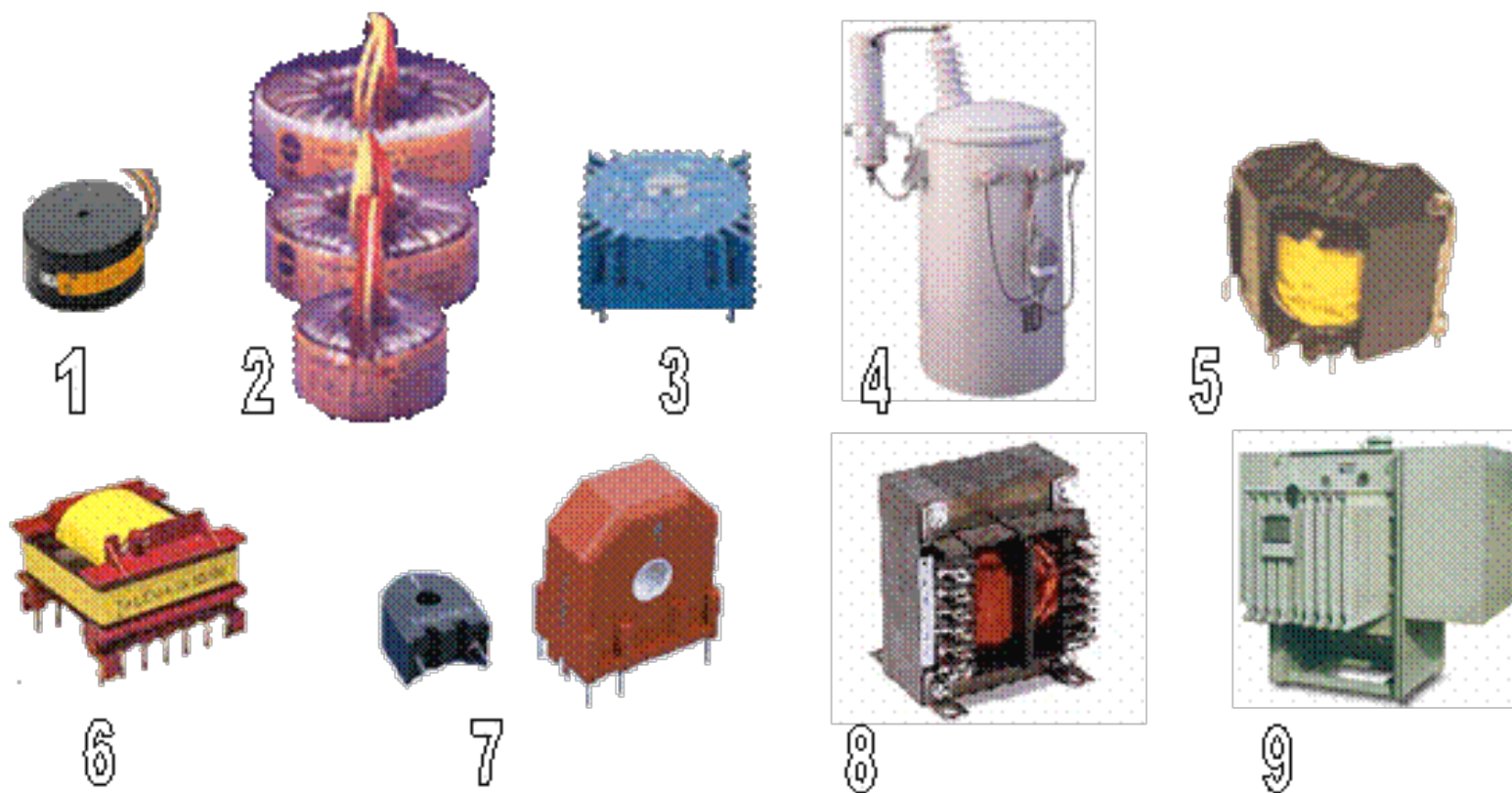


Figura 4.8. Aspecto físico de diferentes tipos de transformadores. (1) De potencia encapsulado en resina; (2) De potencia toroidal; (3) De potencia encapsulado para montaje en PCB; (4) De potencia para funcionamiento en exteriores; (5) y (6) De adaptación de impedancias; (7) De medida de intensidad con agujero pasante; (8) De potencia para montaje sobre bastidor; (9) De potencia para instalación en subestaciones.

Transformador



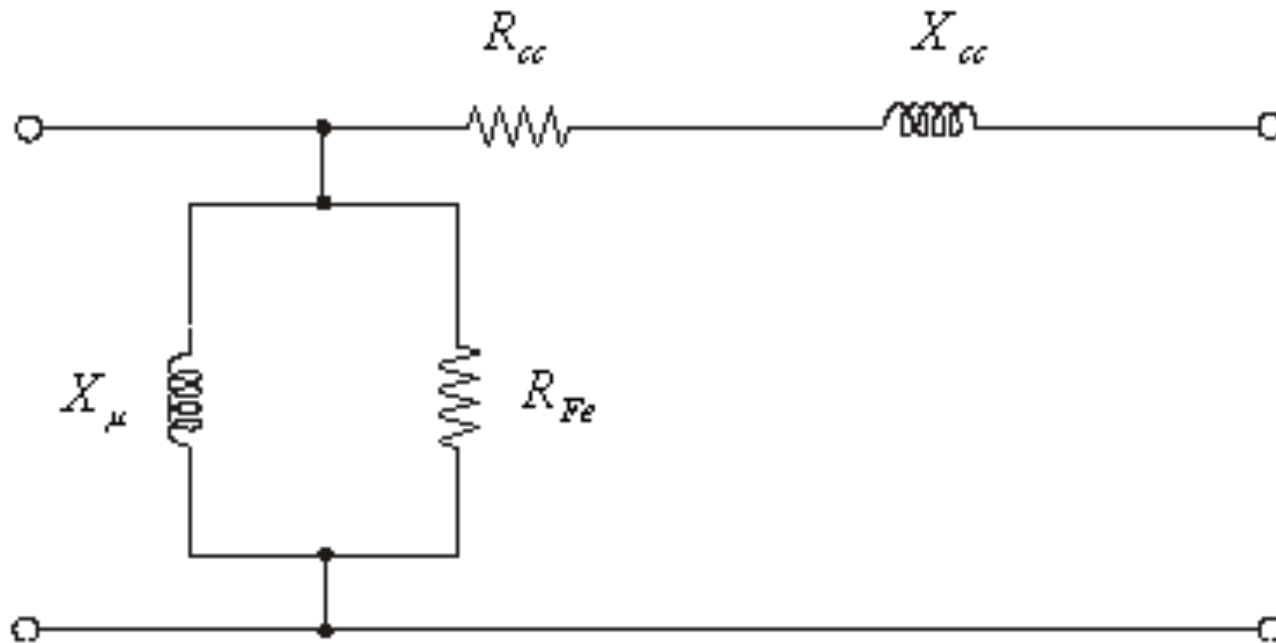


Fig. 4.9. Circuito eléctrico equivalente aproximado del transformador referido al primario.

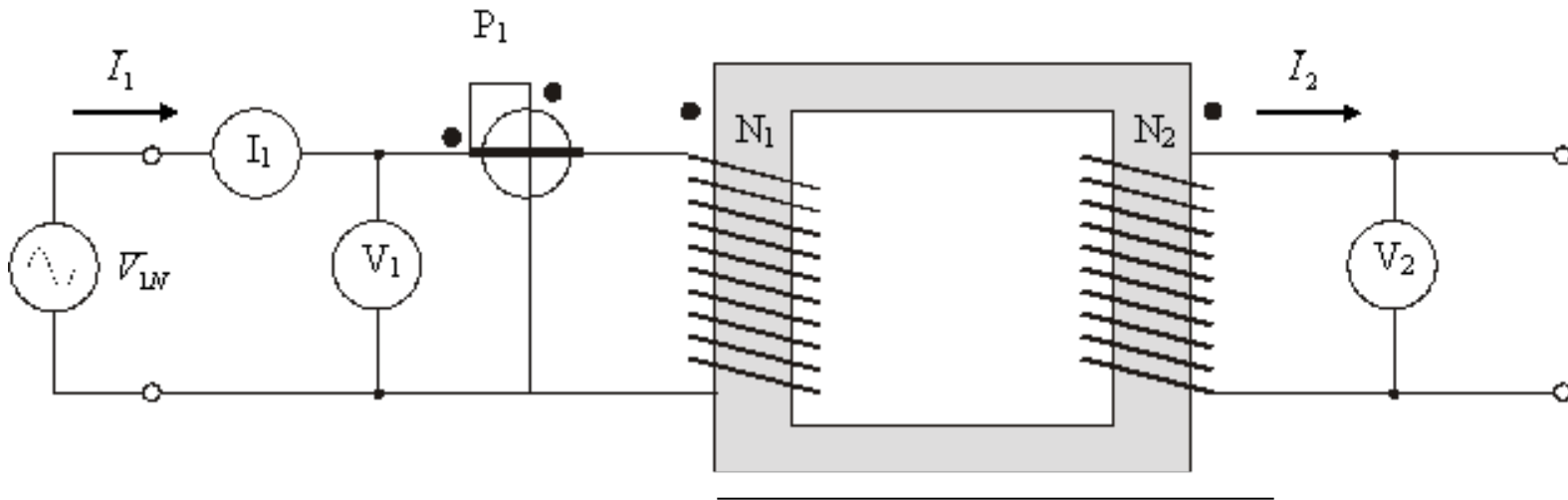


Fig. 4.10. Configuración para la realización del ensayo de vacío.

Objetivos:

- Obtener la relación de transformación y referencia de fase.
- Obtener la rama derivación \Rightarrow Pérdidas en vacío (hierro del transformador).

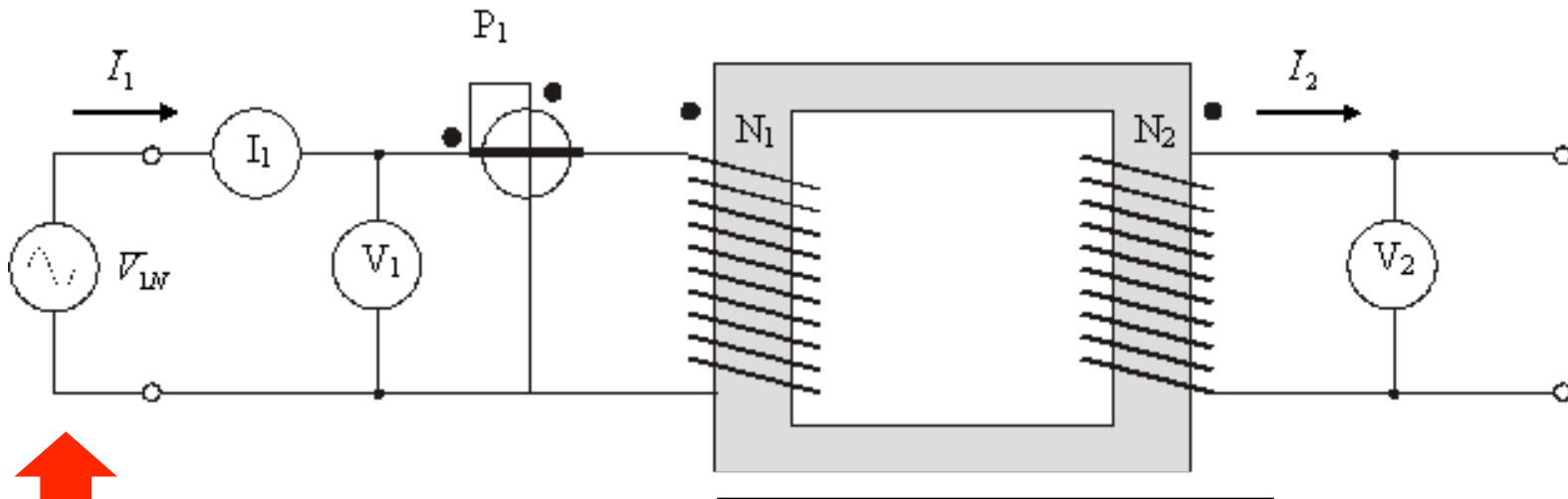


Fig. 4.10. Configuración para la realización del ensayo de vacío.

Objetivos:

- Obtener la relación de transformación y referencia de fase.
- Obtener la rama derivación \Rightarrow Pérdidas en vacío (hierro del transformador).

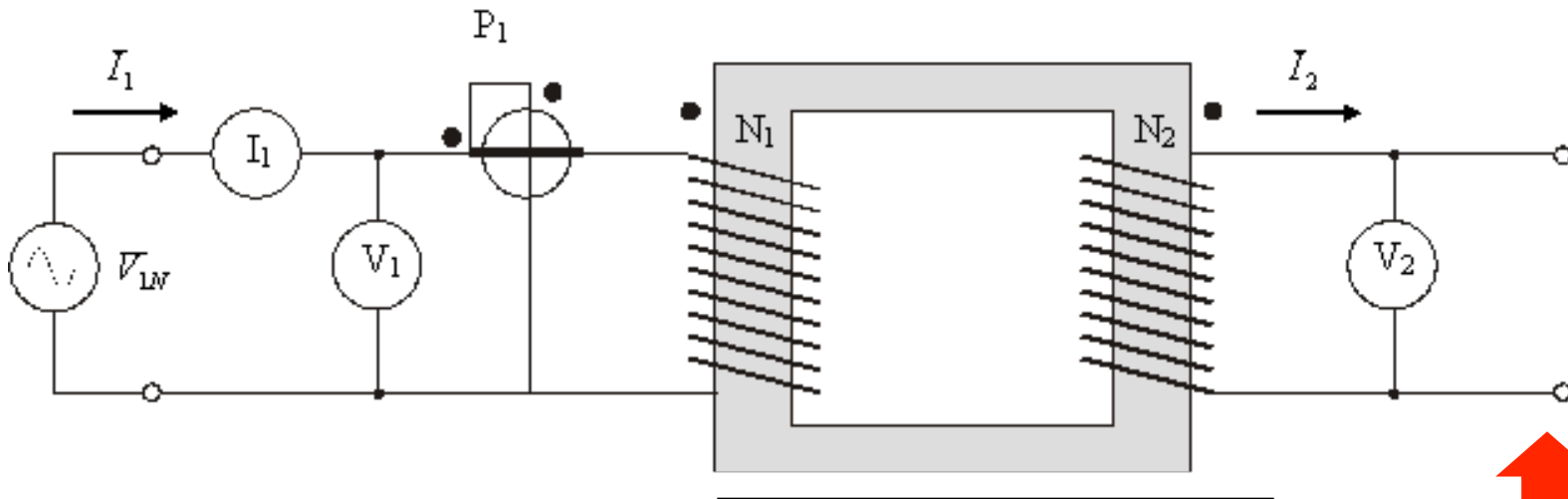


Fig. 4.10. Configuración para la realización del ensayo de vacío.

Objetivos:

- Obtener la relación de transformación y referencia de fase.
- Obtener la rama derivación \Rightarrow Pérdidas en vacío (hierro del transformador).

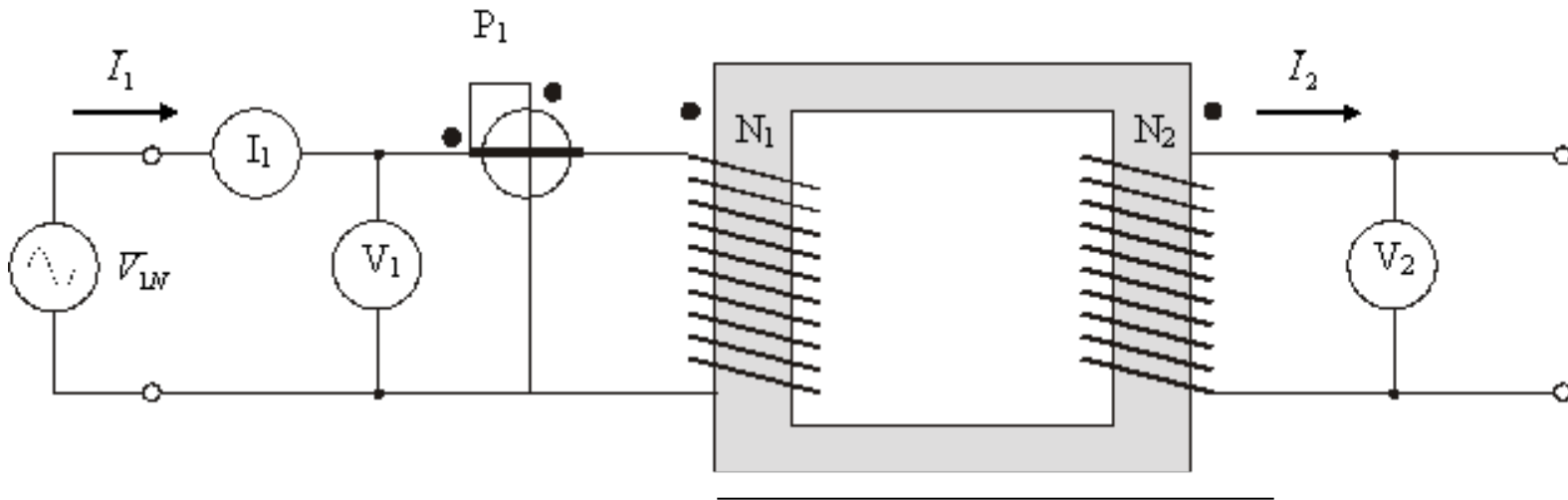


Fig. 4.10. Configuración para la realización del ensayo de vacío.

Objetivos:

- Obtener la relación de transformación y referencia de fase.
- Obtener la rama derivación \Rightarrow Pérdidas en vacío (hierro del transformador).

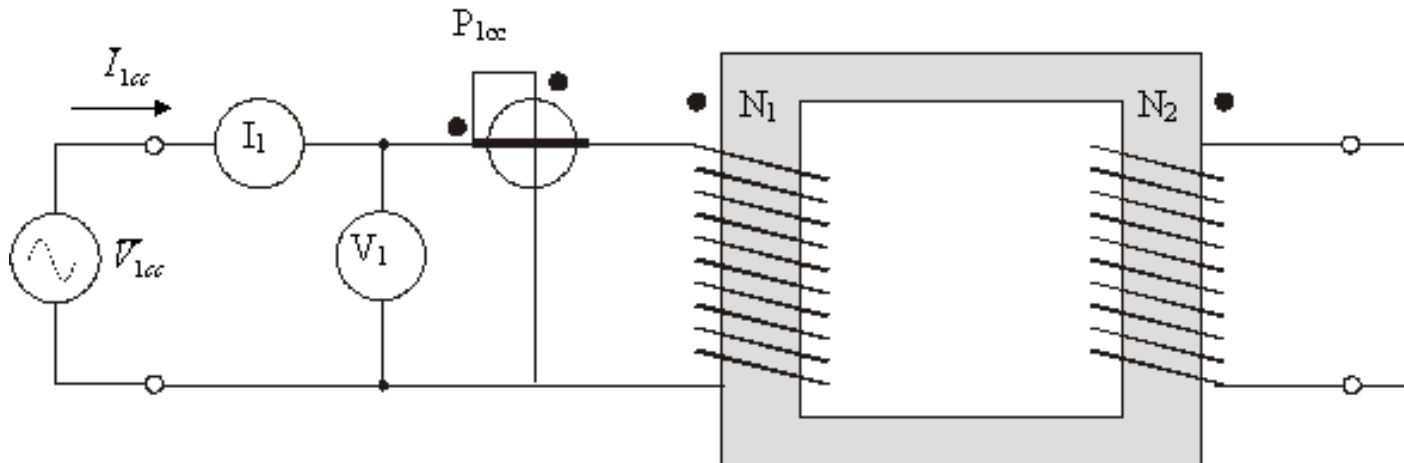


Fig. 4.13. Configuración para la realización del ensayo de cortocircuito.

Objetivos:

- Obtener la rama serie \Rightarrow Pérdidas en el cobre del transformador.

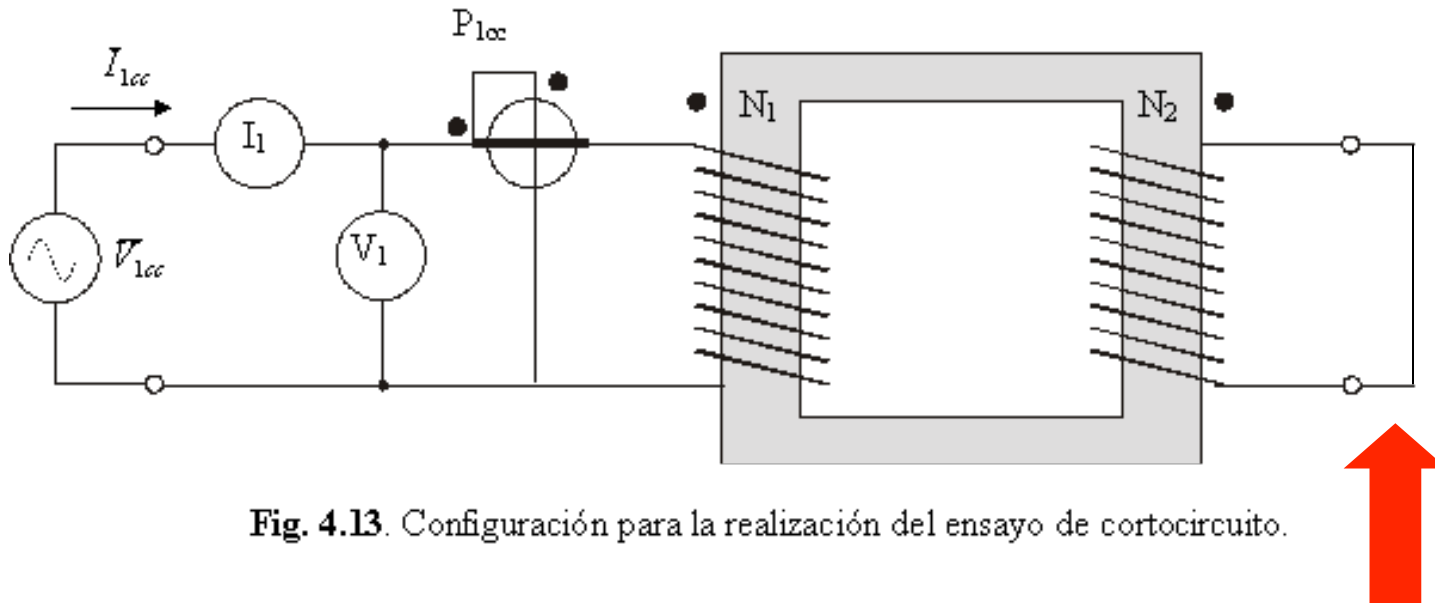


Fig. 4.13. Configuración para la realización del ensayo de cortocircuito.

Objetivos:

- Obtener la rama serie \Rightarrow Pérdidas en el cobre del transformador.

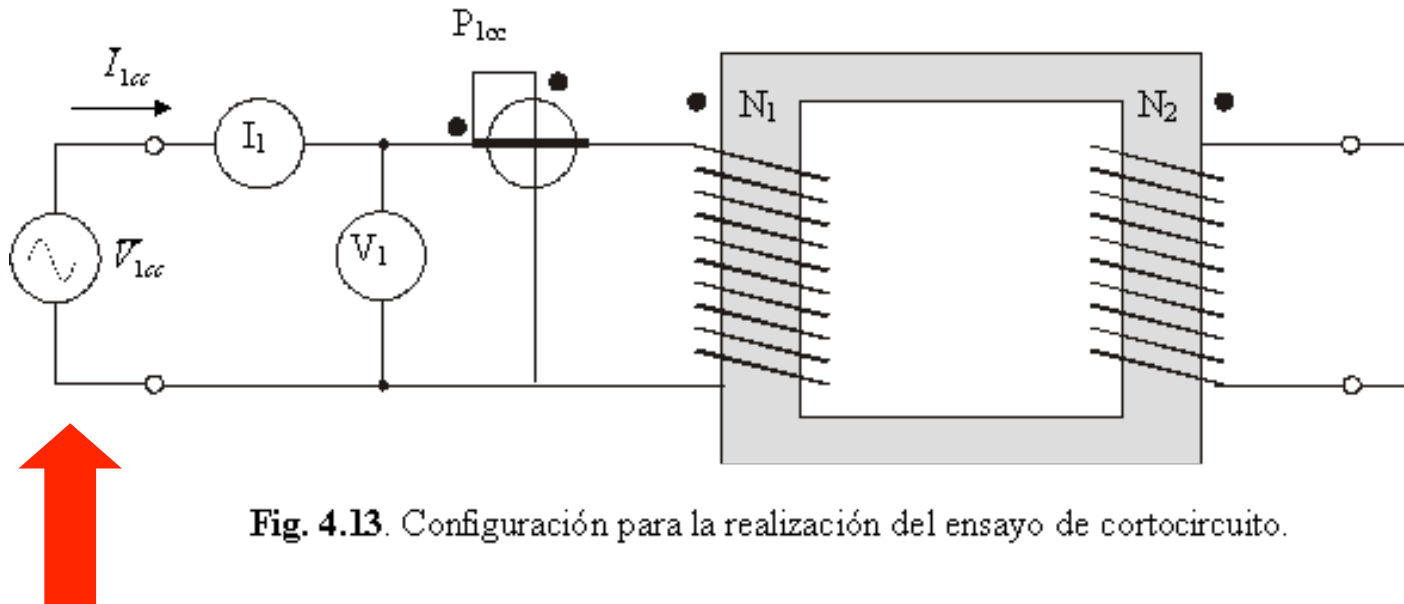


Fig. 4.13. Configuración para la realización del ensayo de cortocircuito.

Objetivos:

- Obtener la rama serie \Rightarrow Pérdidas en el cobre del transformador.

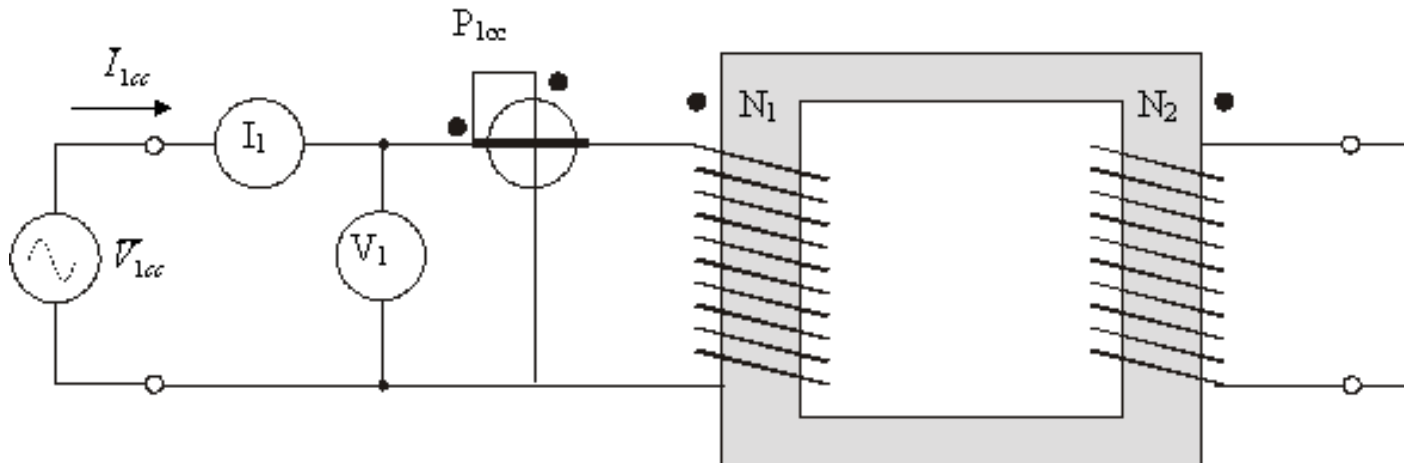


Fig. 4.13. Configuración para la realización del ensayo de cortocircuito.

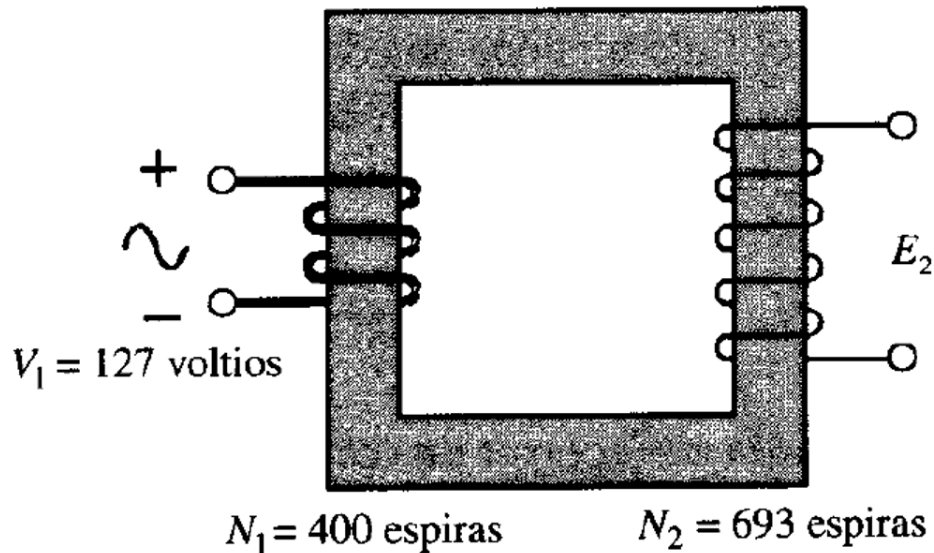
Objetivos:

- Obtener la rama serie \Rightarrow Pérdidas en el cobre del transformador.

Máquinas eléctricas, Fraile, pg. 129

Se tiene un transformador monofásico, constituido por dos devanados, primario y secundario, colocados en un núcleo magnético de sección uniforme $S = 10 \text{ cm}^2$ como indica la figura. Los devanados primario y secundario tienen 400 y 639 espiras, respectivamente. El primario se conecta a una red de 127 V, 50 Hz. En el supuesto de despreciar la caída de tensión primario. Calcular:

- 1) Densidad de flujo máxima existente en el núcleo.
- 2) F.e.m. inducida en el secundario.



Máquinas eléctricas, Fraile, pg. 193

Un transformador monofásico de 250 kVA, 15.000/250 V, 50 Hz, ha dado los siguientes resultados en unos ensayos: vacío: 250 V, 80 A, 4.000 W (datos medidos en el lado de B.T.); cortocircuito: 600 V, corriente asignada, 5.000 W (datos medidos en el lado de A.T.). Calcular:

- 1) Parámetros del circuito equivalente del transformador reducido al primario.
- 2) Corriente de cortocircuito de falta.

Conceptos básicos:

- Velocidad angular.
- Relación velocidad angular/linear.
- Par mecánico.
- Momento de inercia.
- Ecuación de equilibrio mecánico de las cargas.
- Energía cinética de rotación.
- Relación entre potencia mecánica y par.

$$\sum_i M_i = J \frac{d\omega}{dt} + \omega \frac{dJ}{dt}$$

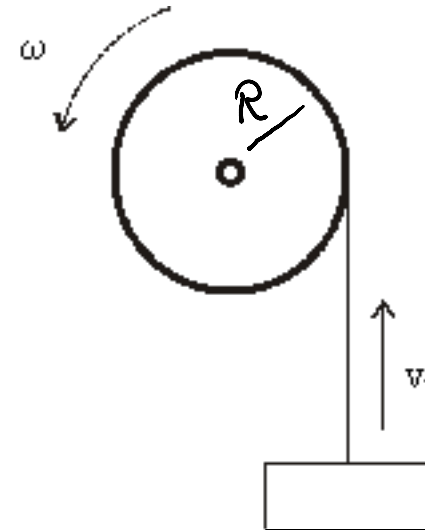


Fig. 4.18. Relación entre velocidad angular y tangencial.

Tipo A. Par resistente constante. Cargas de tipo ascensor, compresores y cintas transportadoras.

Tipo B. Par resistente proporcional a la velocidad angular. Pequeñas máquinas herramientas y cargas en las que predomina la fricción viscosa.

Tipo C. Par resistente proporcional al cuadrado de la velocidad. Bombas, compresores y ventiladores centrífugos.

Tipo D. Par resistente inversamente proporcional a la velocidad angular. Típico de bobinadoras y tornos.

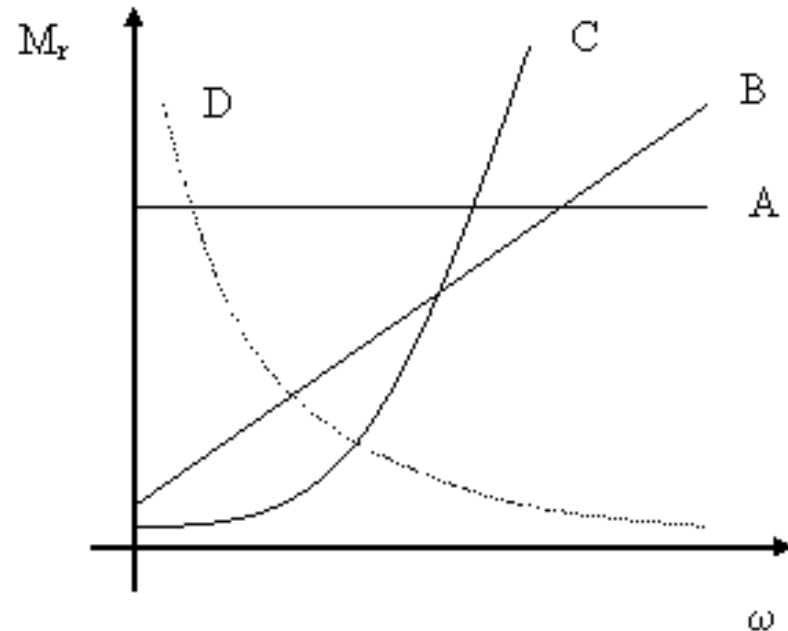
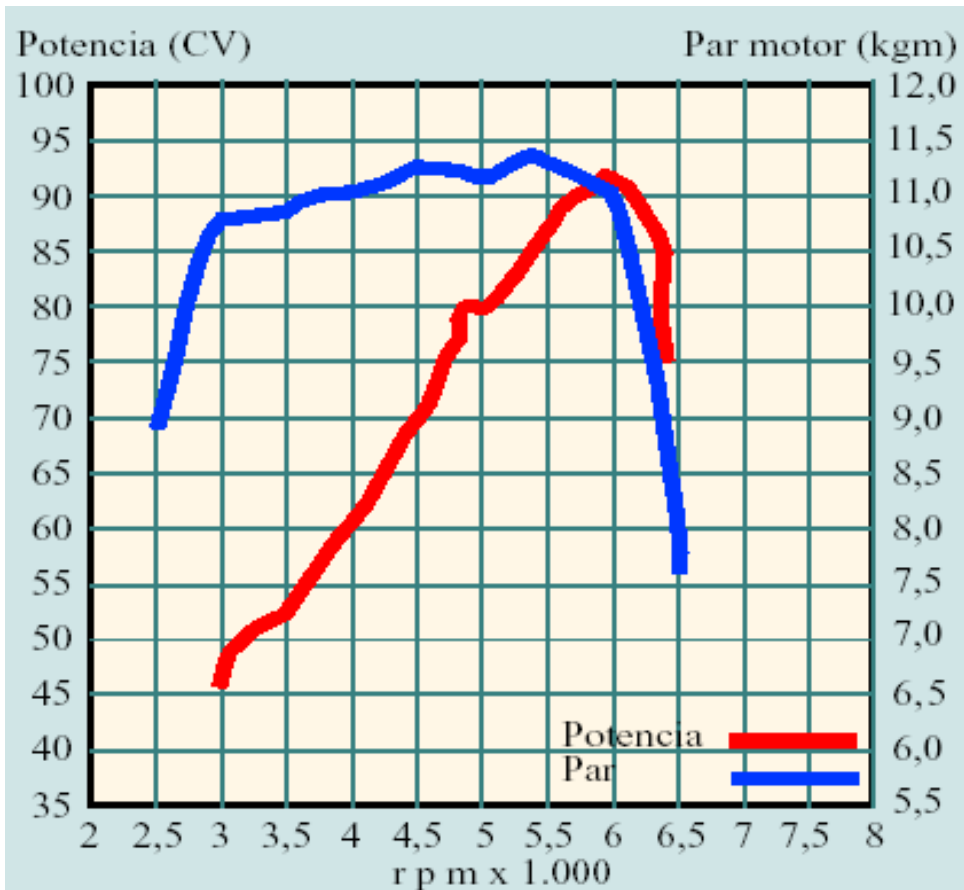


Fig. 4.19. diferentes tipos de par resistente en función de la velocidad.

Complementos de mecánica aplicados a las máquinas rotativas



$$P = M \cdot \omega$$

$$[W] = [Nm][rd/s]$$

Complementos de mecánica aplicados a las máquinas rotativas (II)

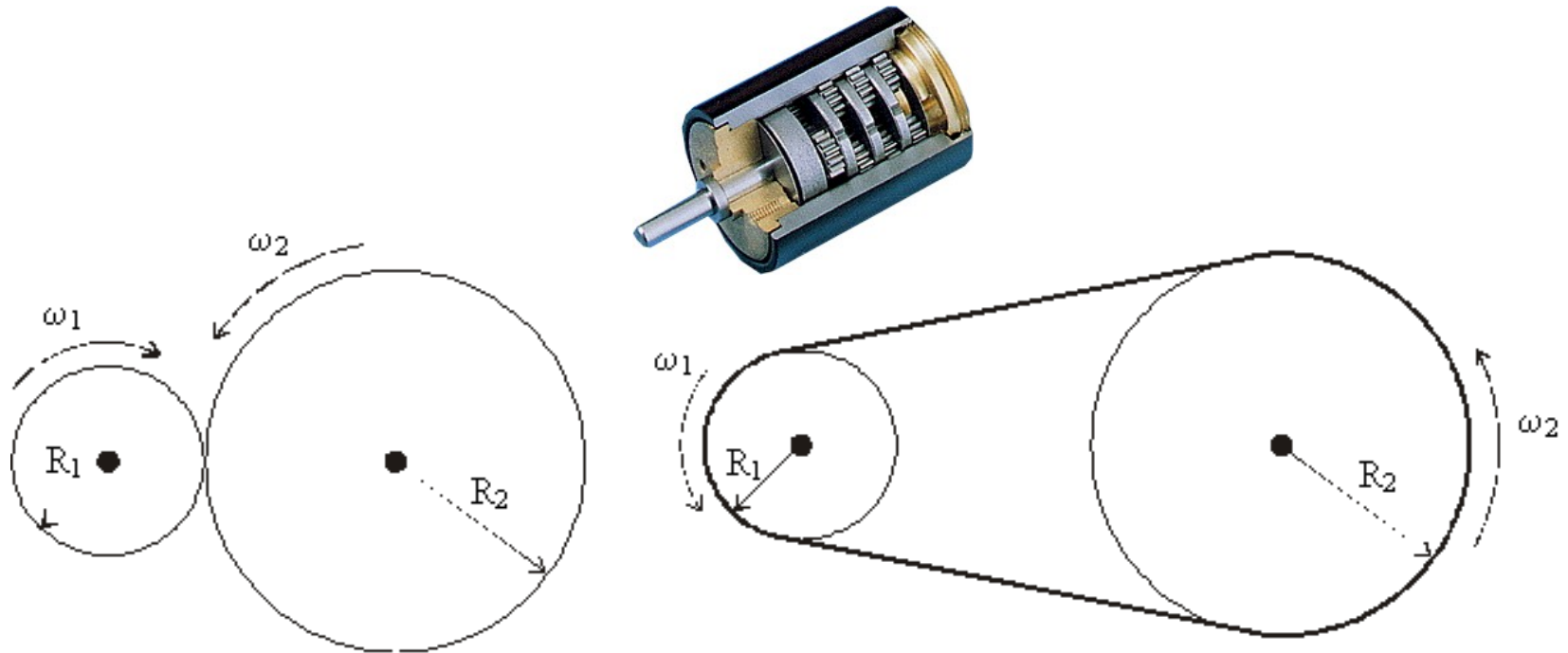
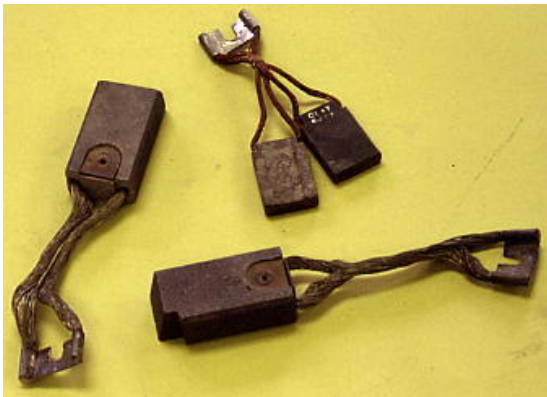


Fig. 4.21. (a) Transmisión por contacto entre discos; (b) Transmisión por correa de distribución.

Máquina de cc. Curva par-velocidad



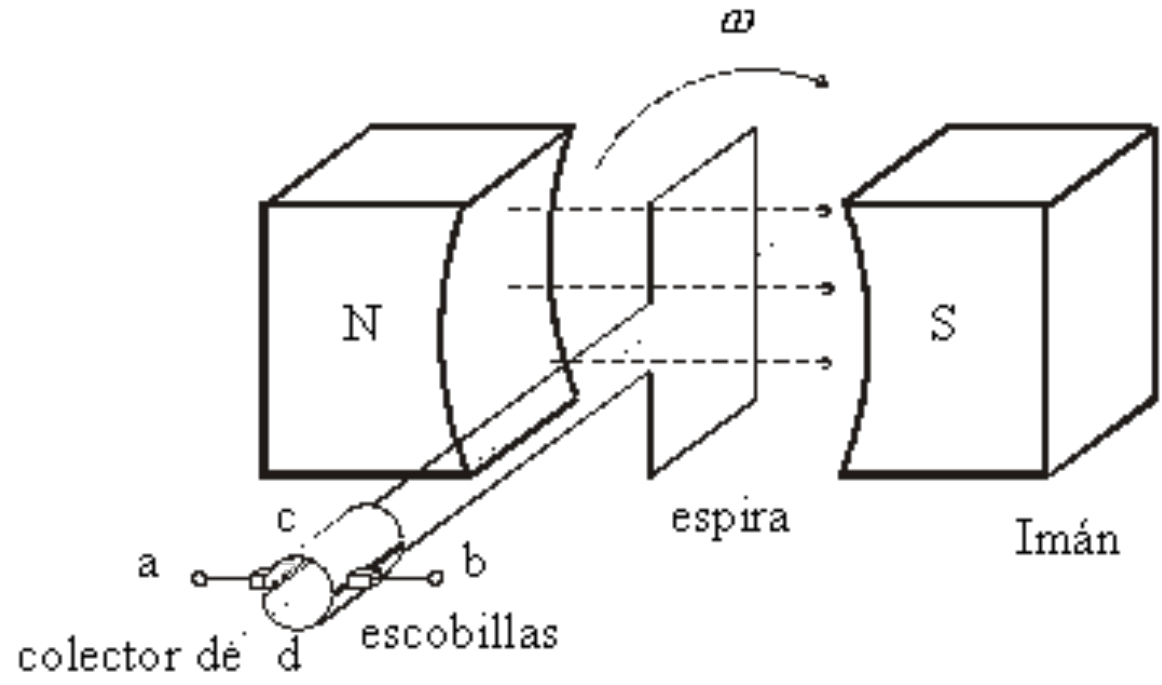


Fig. 4.24. Estructura básica de funcionamiento de la máquina de cc.

Máquina de cc. Funcionamiento básico

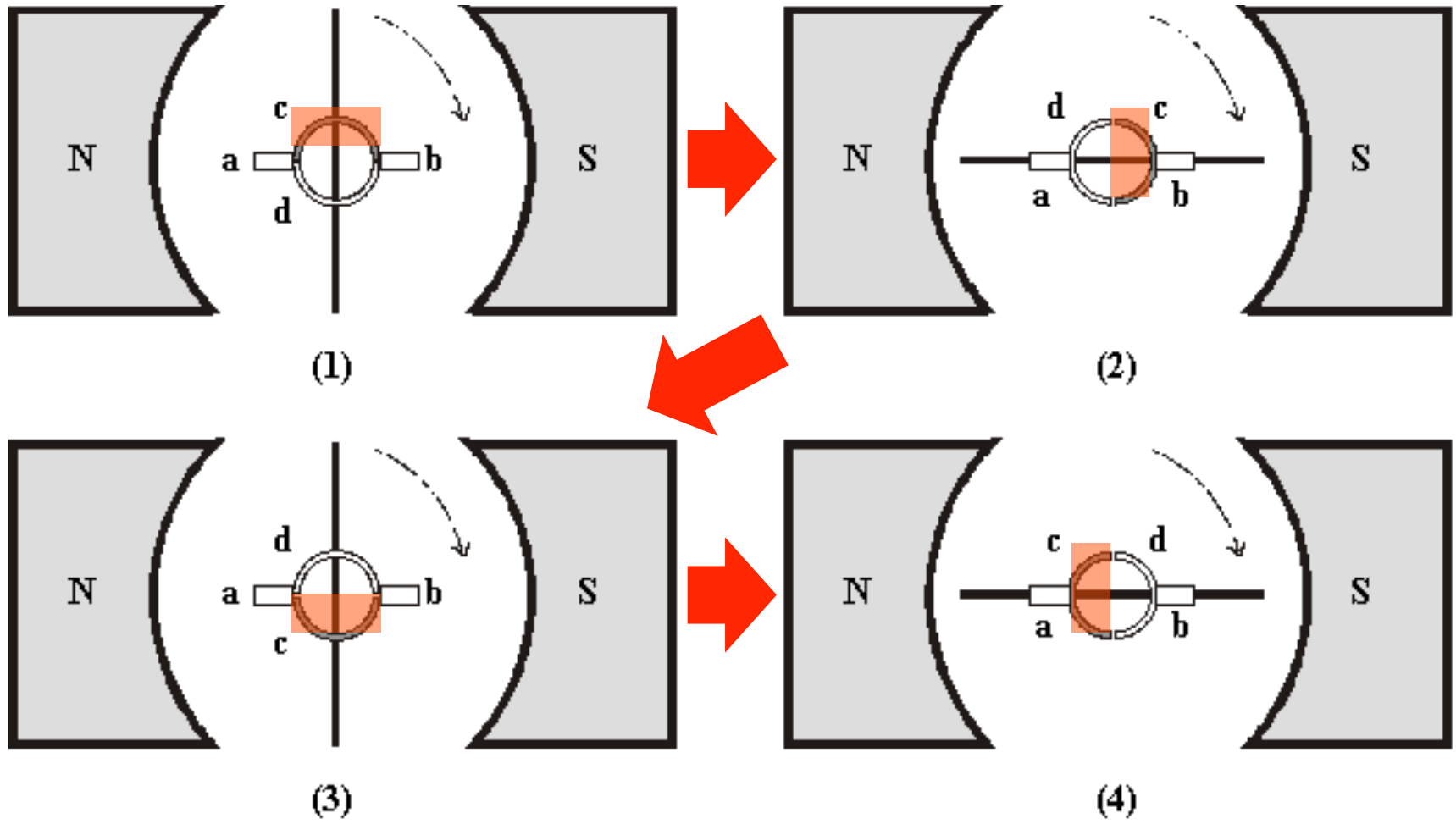


Fig. 4.25. Funcionamiento del colector de delgas en la máquina de cc.

Máquina de cc.

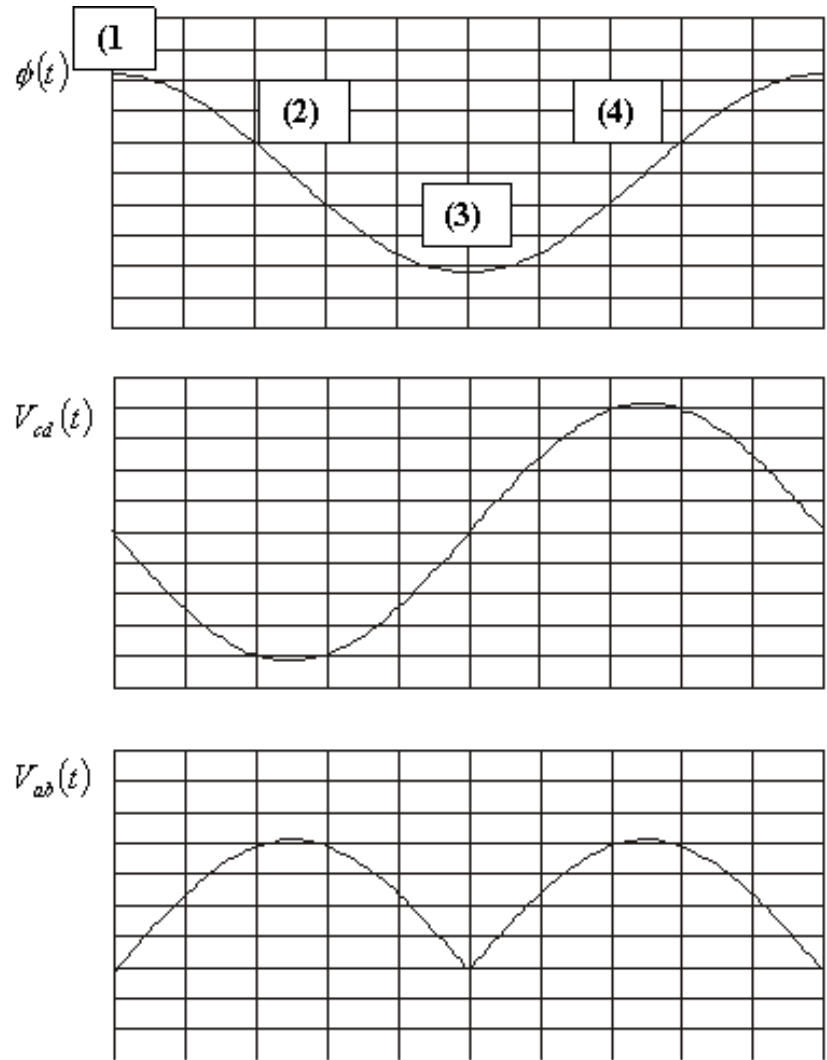


Fig. 4.26. Evolución instantánea del flujo de las tensiones ab y cd.

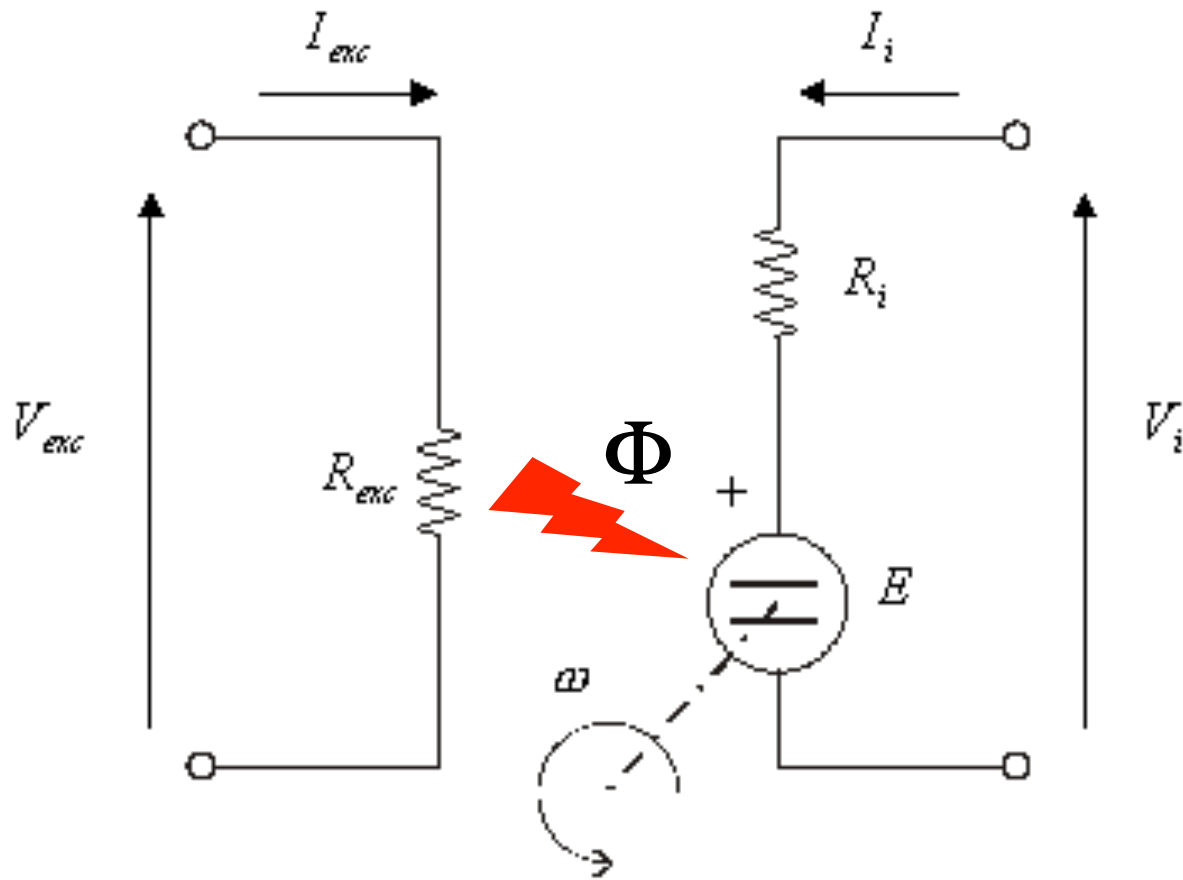
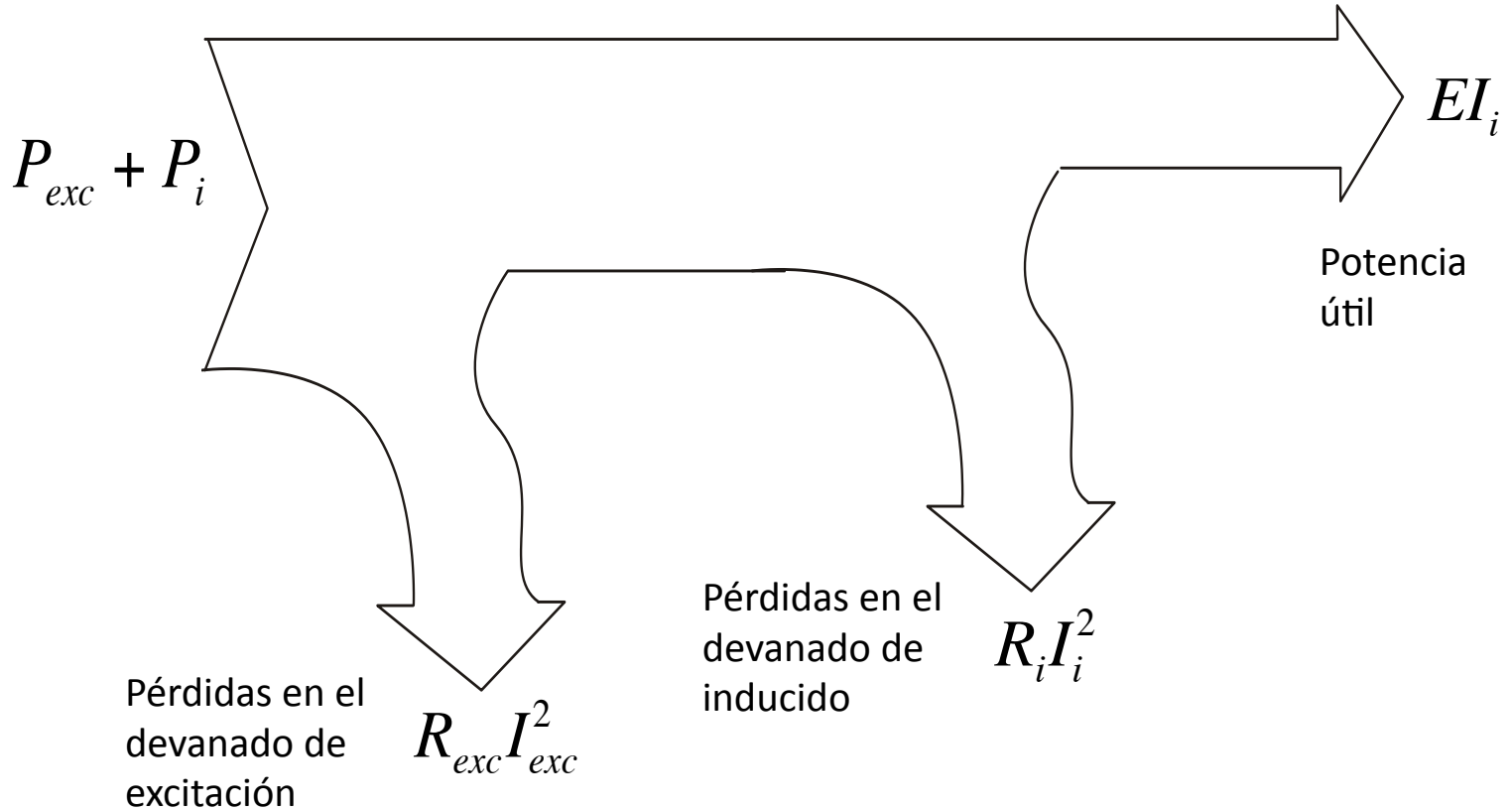


Fig. 4.27. Circuito eléctrico equivalente de un motor de cc.

Máquina de cc. Balance de potencias



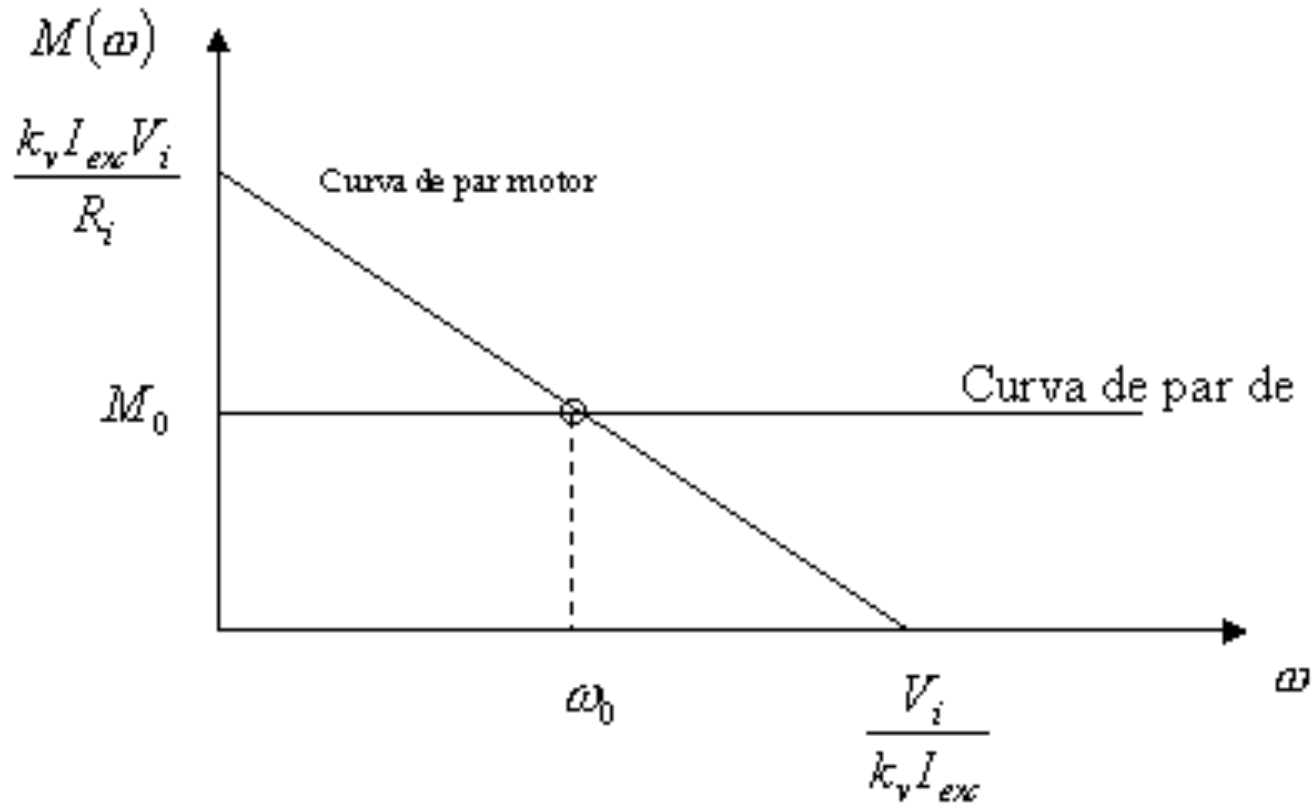
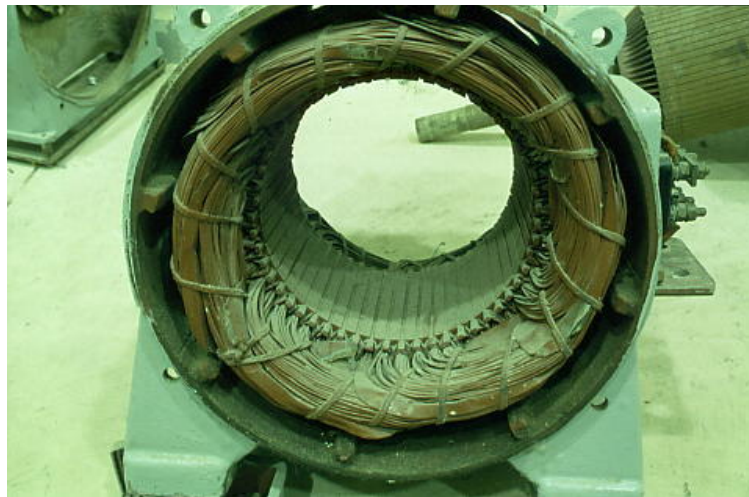
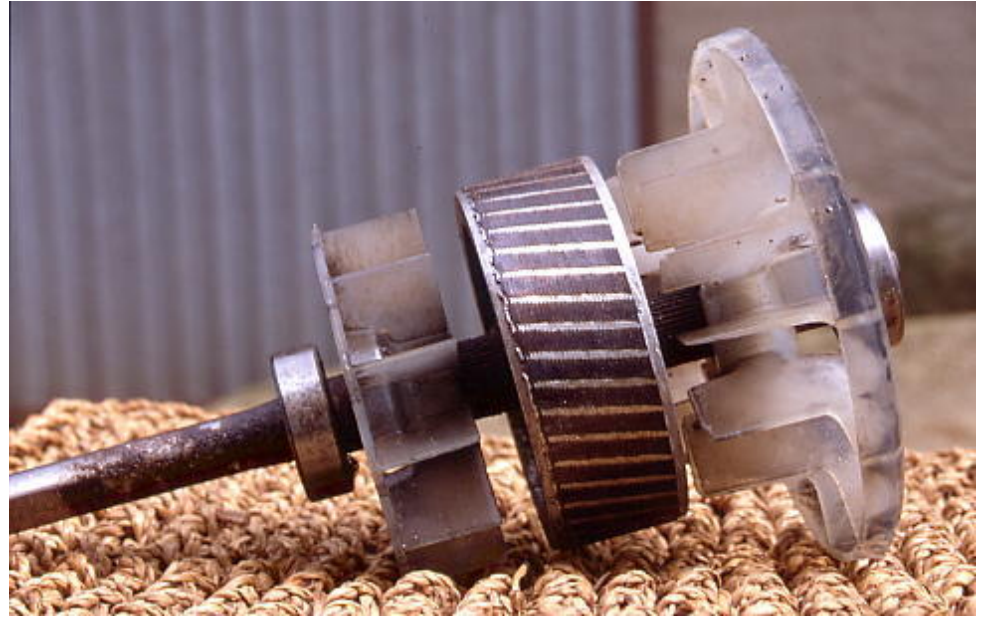
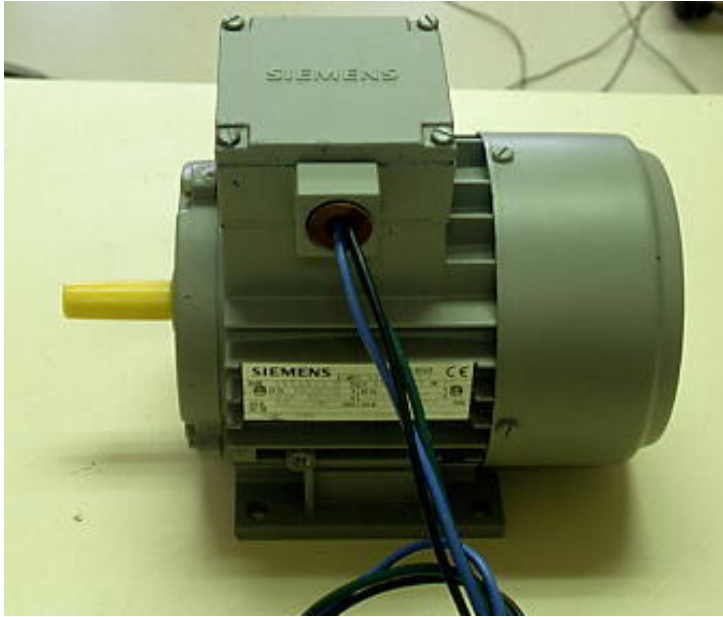
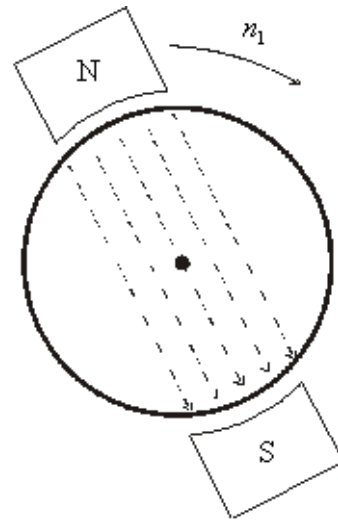


Fig. 4.29 Curva par-velocidad del motor y carga.

Motor asíncrono



Máquina asíncrona

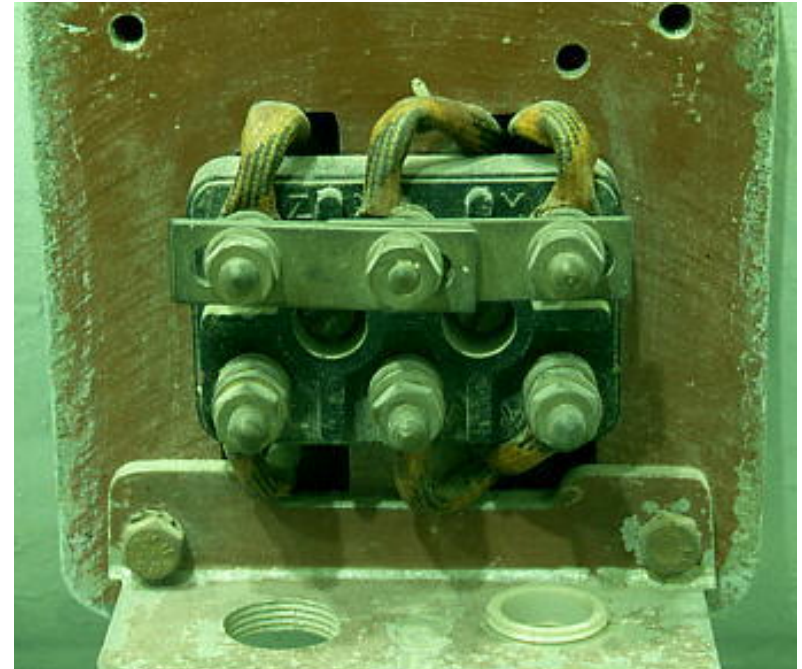


$$n_1 = \frac{60 f}{p}$$

Fig. 4.33. Representación del Teorema de Ferraris.

SITI® MONTEVEGLIO (BO) ITALY
 TEL. +39 051 6714811 www.sitiriduttori.it **CE**

Tipo FC90L1-4		314		Nr. 0602-51 862			
Prot. IP	55	Serv.	S1	Cos.φ	0.8	Is. Cl.	F
	V	Hz.	HP	kW	min-1	A	
Δ/Y	230/400	50	2	1.5	1400	5.97/3.45	
Δ	230	50	2	1.5	1400	5.97	
Y	400	50	2	1.5	1400	3.45	
MOTORI ELETTRICI				IEC EN 60034-1		EA	



Motor asíncrono. Conexionado

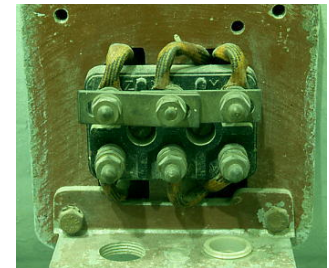
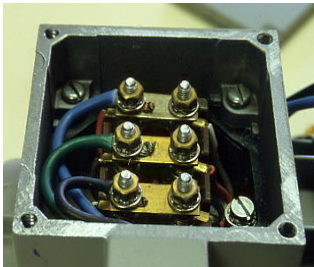
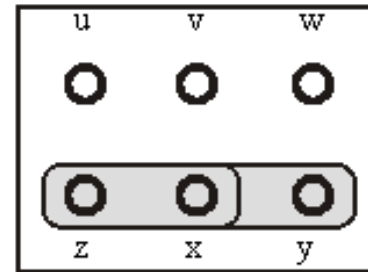
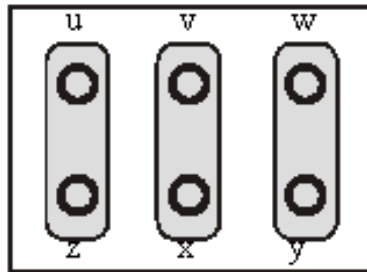
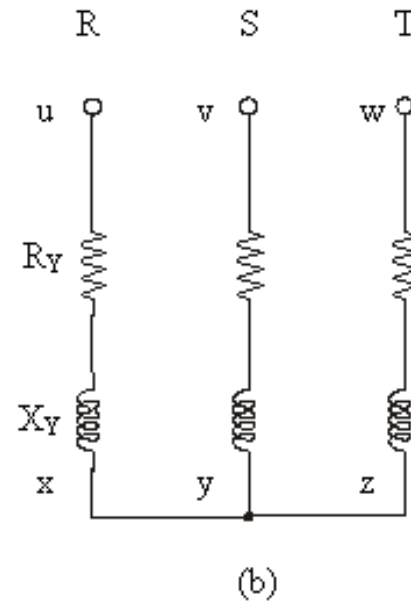
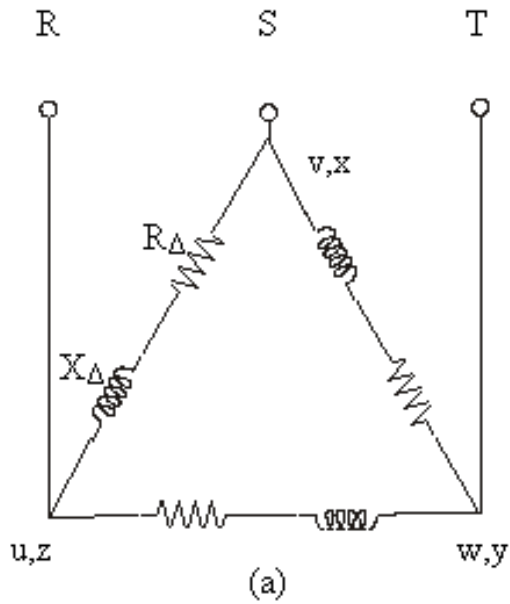


Fig. 4.34. (a) Conexión triángulo; (b) Conexión estrella.

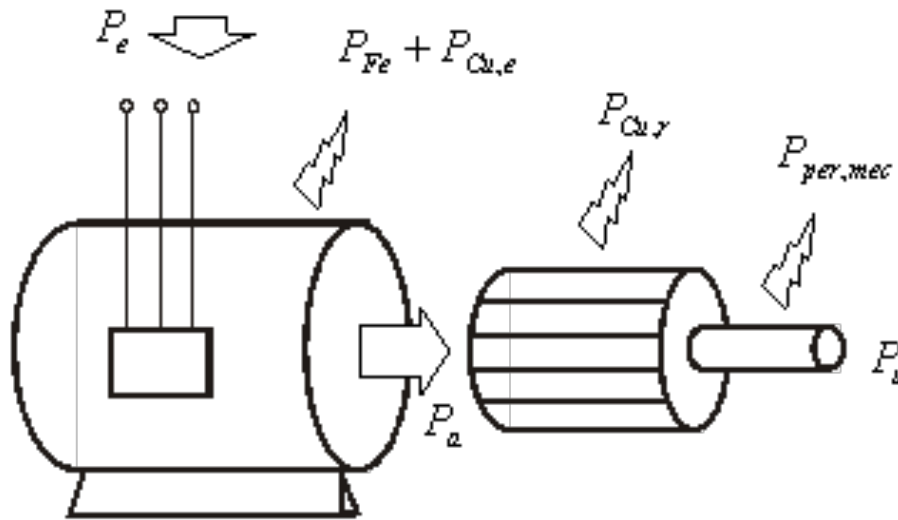
Motor asíncrono. Caja de bornes



- Potencia útil (P_u).
- Rendimiento (η).
- Factor potencia (FP).

$$P_{total} = \frac{P_{\acute{u}til}}{\eta}$$

$$S = \frac{P_{total}}{FP} = \sqrt{3}V_{1L}I_L$$



$$P_a = P_e - P_{Fe} - P_{Cu,e}$$

$$P_{Cu,r} = sP_a$$

Fig. 4.35. Balance de potencias en la máquina asíncrona.

$$M_{mec} = \frac{P_{mec}}{\omega} = \frac{P_{mec}}{\frac{2\pi}{60}n} = 9,55 \frac{P_{mec}}{n}$$

$$\eta \approx \frac{P_a(1-s)}{P_a} = 1-s$$

$$M_{mec} = \frac{P_{mec}}{\omega} = \frac{P_a(1-s)}{\omega_1(1-s)} = \frac{P_a}{\omega_1}$$

Clasificación de los accionamientos para motor asíncrono

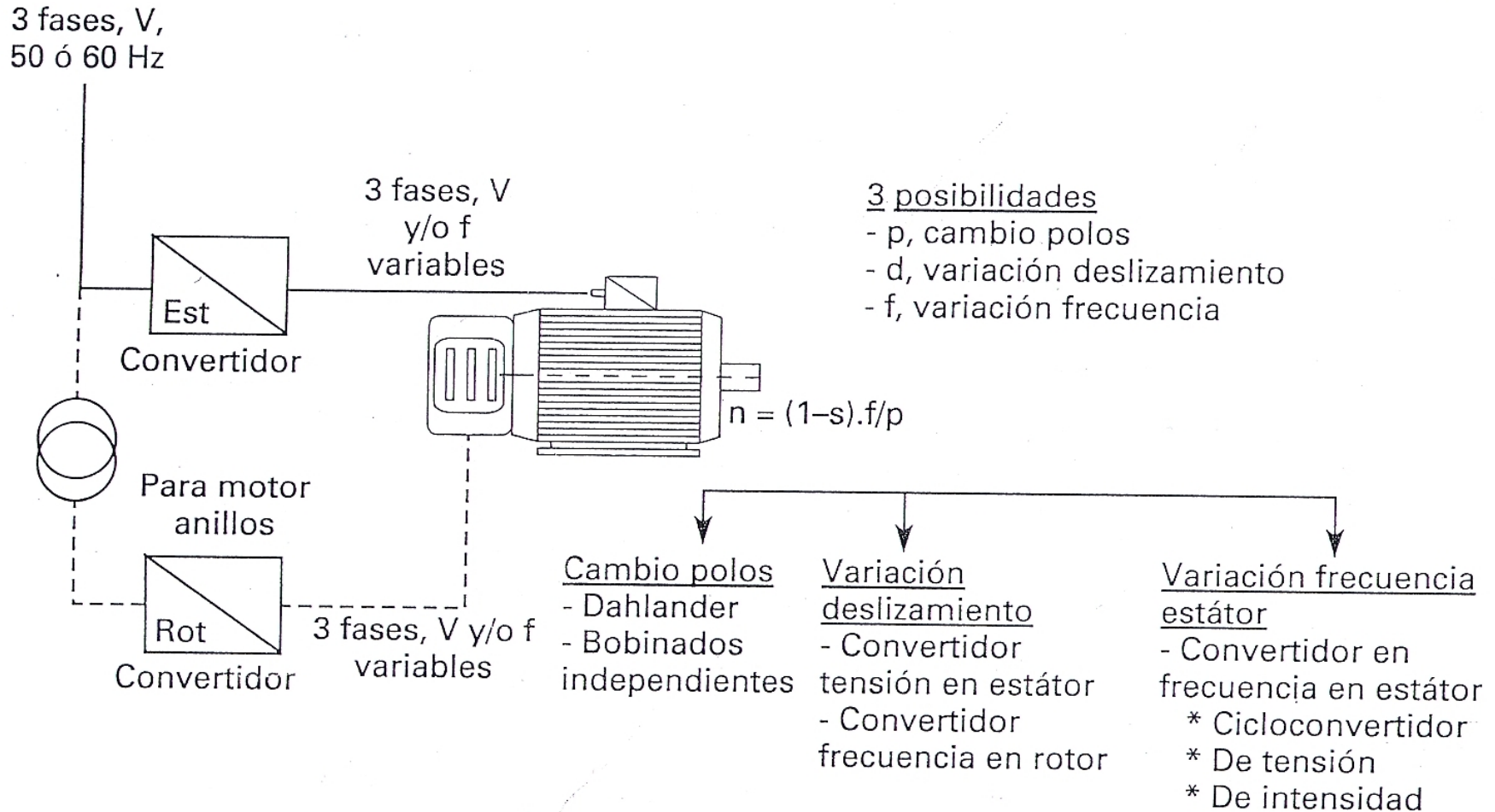
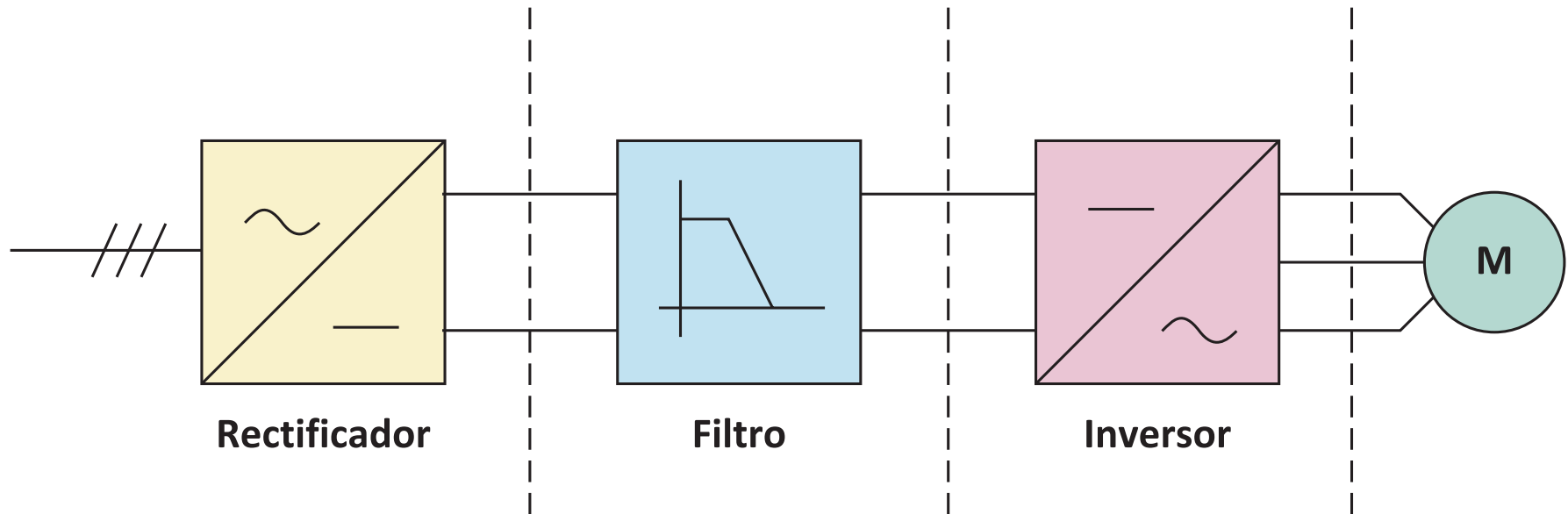
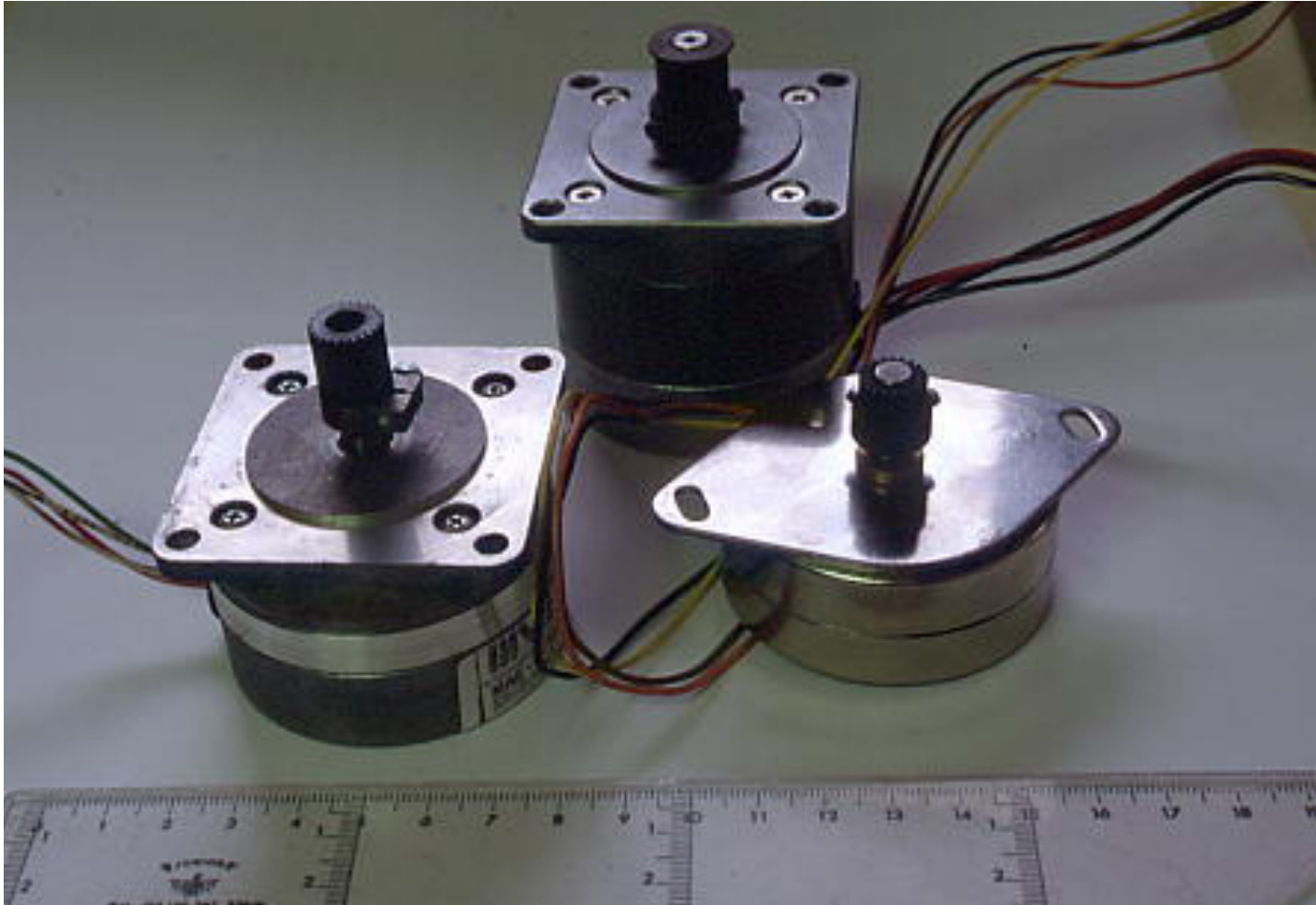


Diagrama de bloques de un convertidor para motores C.A.



Motor paso a paso





Motor paso a paso

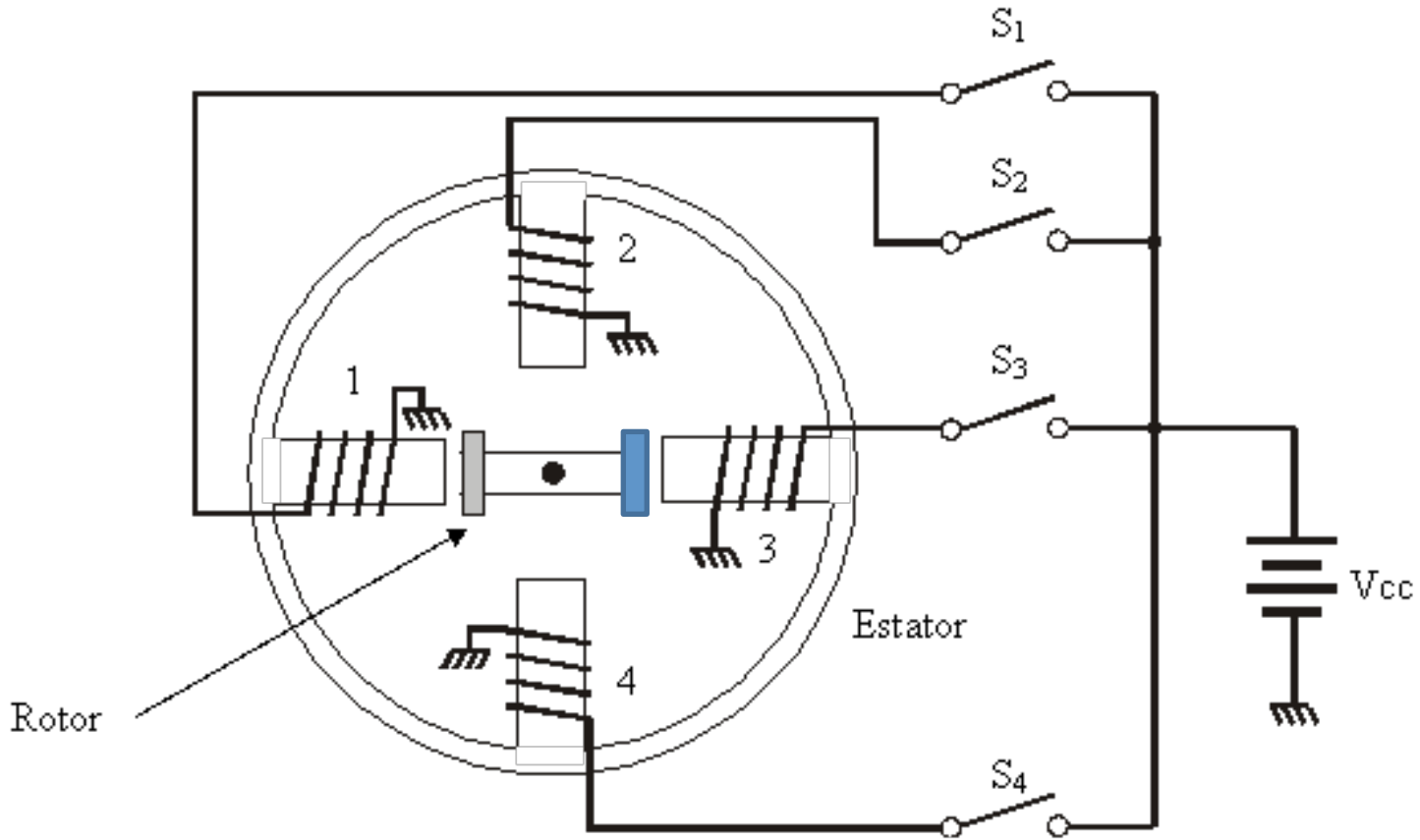


Fig. 4.39. Estructura básica de un motor paso a paso de cuatro polos en el estator, dos dientes en el rotor y funcionamiento unipolar.

Motor paso a paso

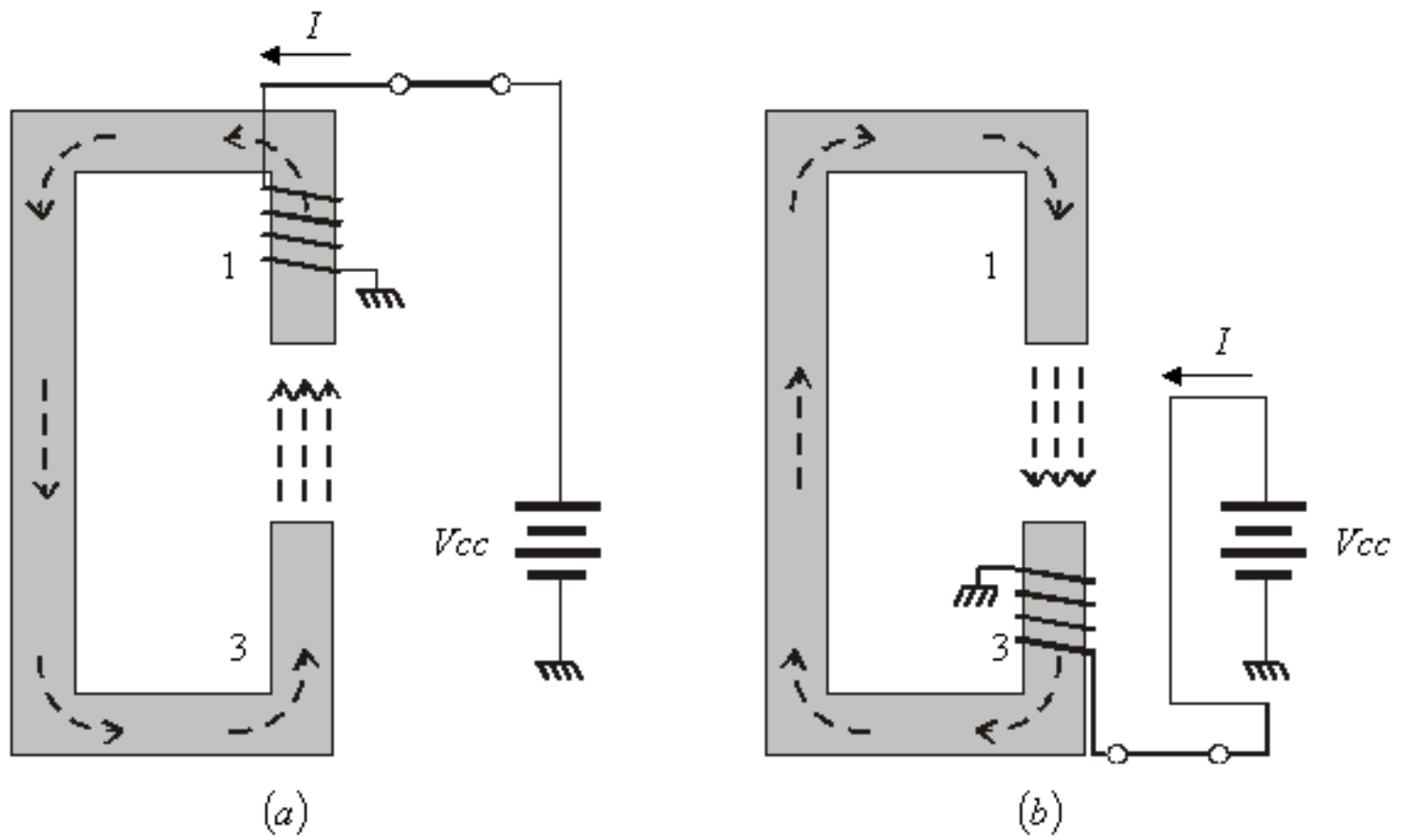


Fig. 4.40. Control de los polos en un motor unipolar.

Motor paso a paso

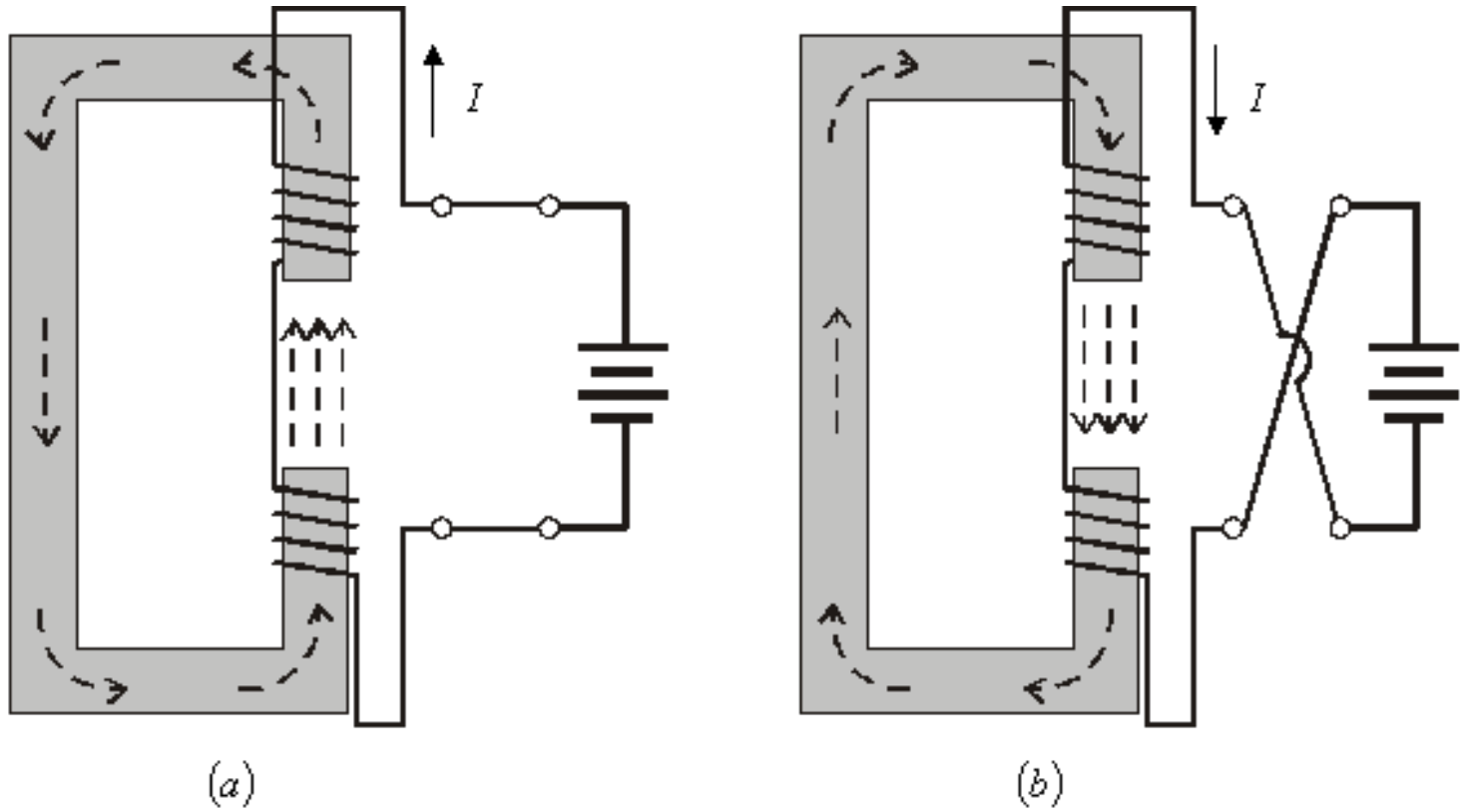
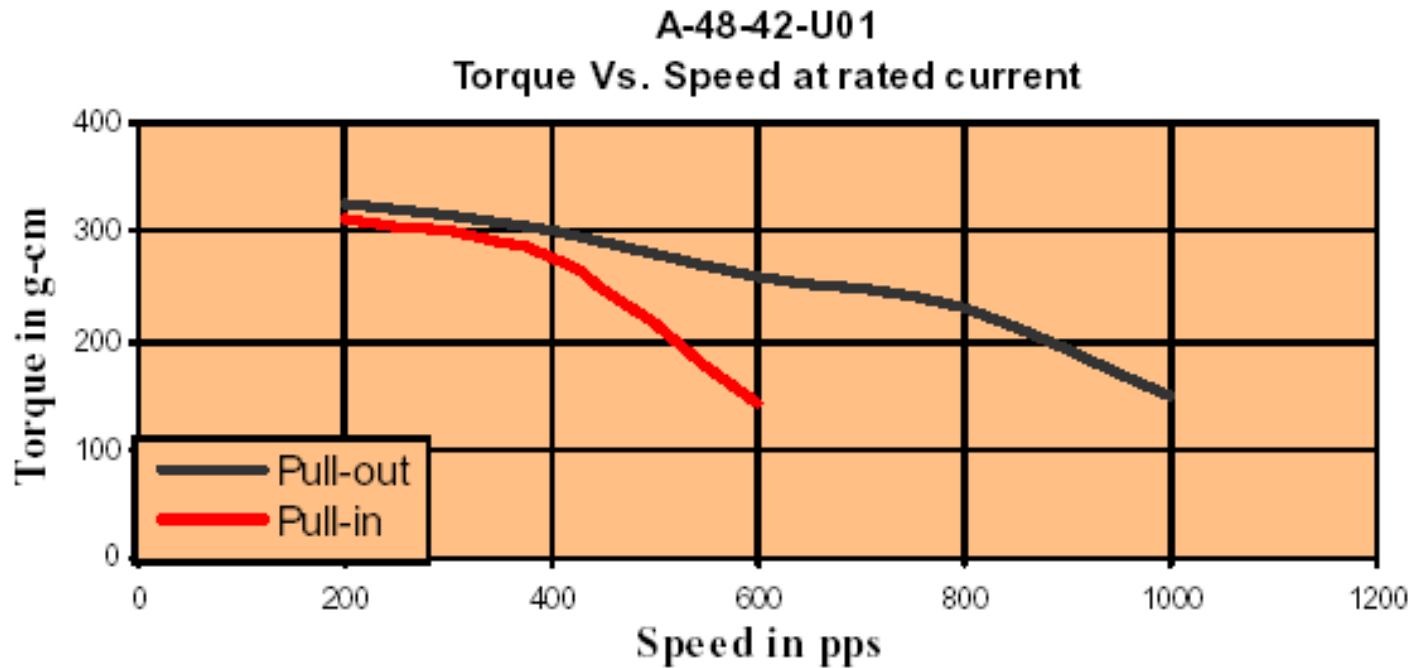


Fig. 4.41. Control del sentido de la inducción en los polos de un motor bipolar.

$$\alpha = \frac{360^\circ}{N_f N_d}$$



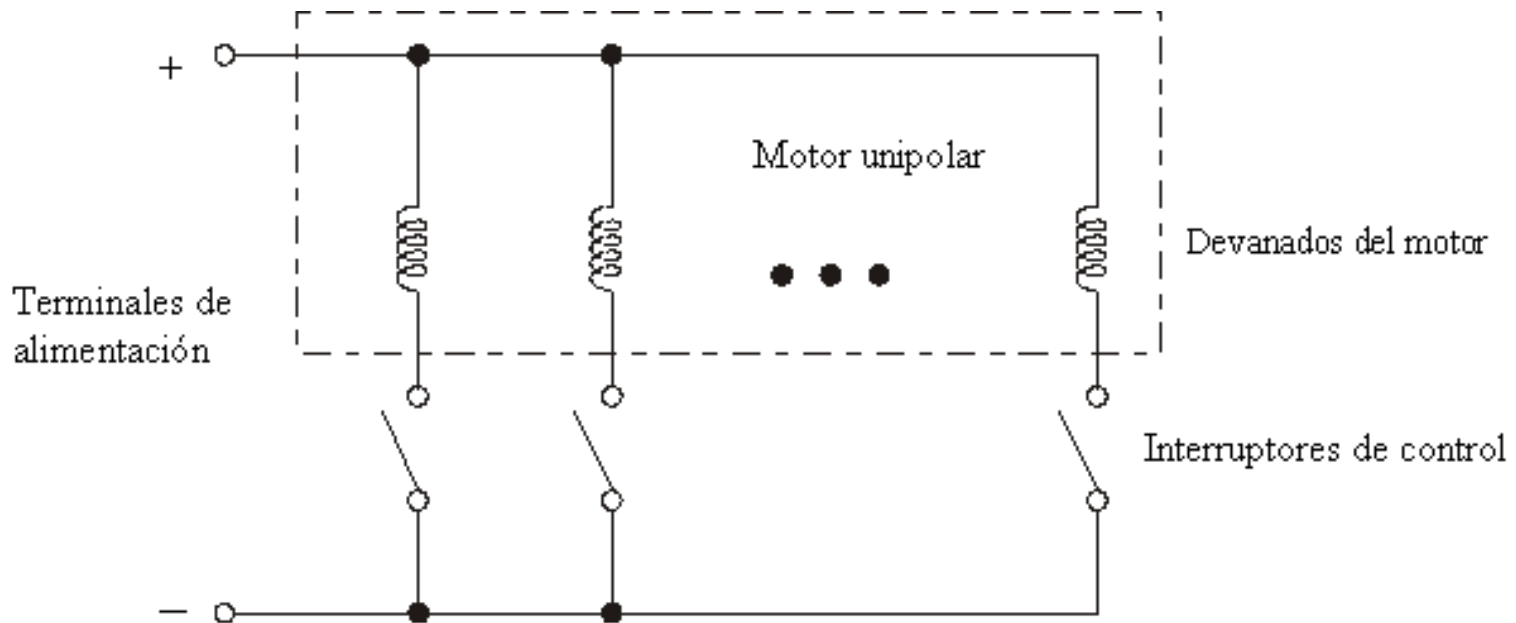
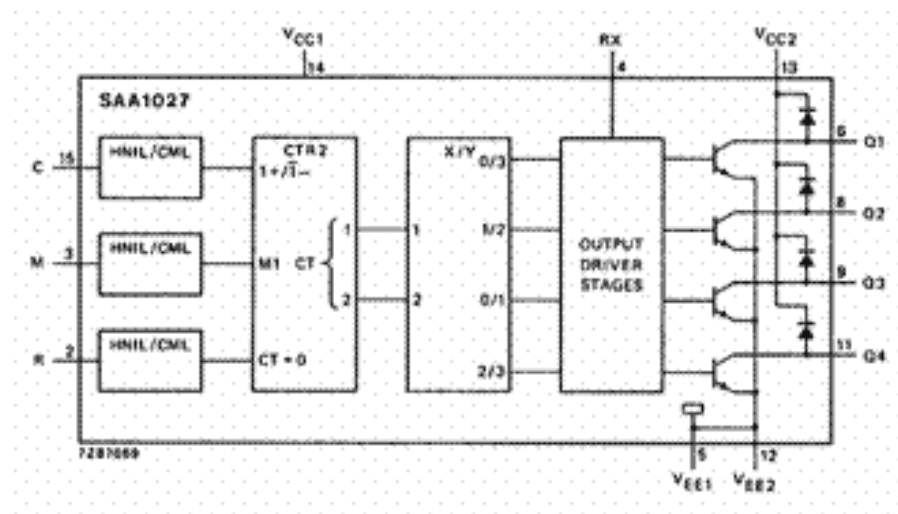


Fig. 4.43. Circuito básico de control de un motor paso a paso unipolar.

Motor paso a paso



Secuencia	M = L				M = H			
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
0	L	H	L	H	L	H	L	H
1	H	L	L	H	L	H	H	L
2	H	L	H	L	H	L	H	L
3	L	H	H	L	H	L	L	H
0	L	H	L	H	L	H	L	H

Fig. 4.44. Diagrama de bloques interno del circuito integrado SAA1027 y tabla de secuencia de activación de los interruptores de control.

Motor paso a paso

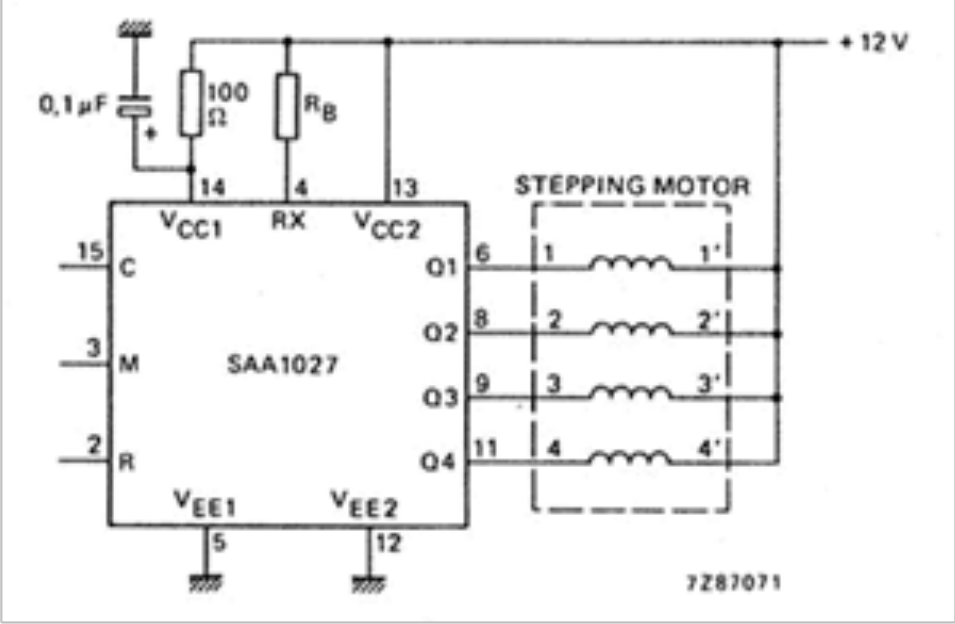


Fig. 4.45. Ejemplo de aplicación del CI SAA1027 de Philips para el control de motores paso a paso unipolares.

Motor paso a paso

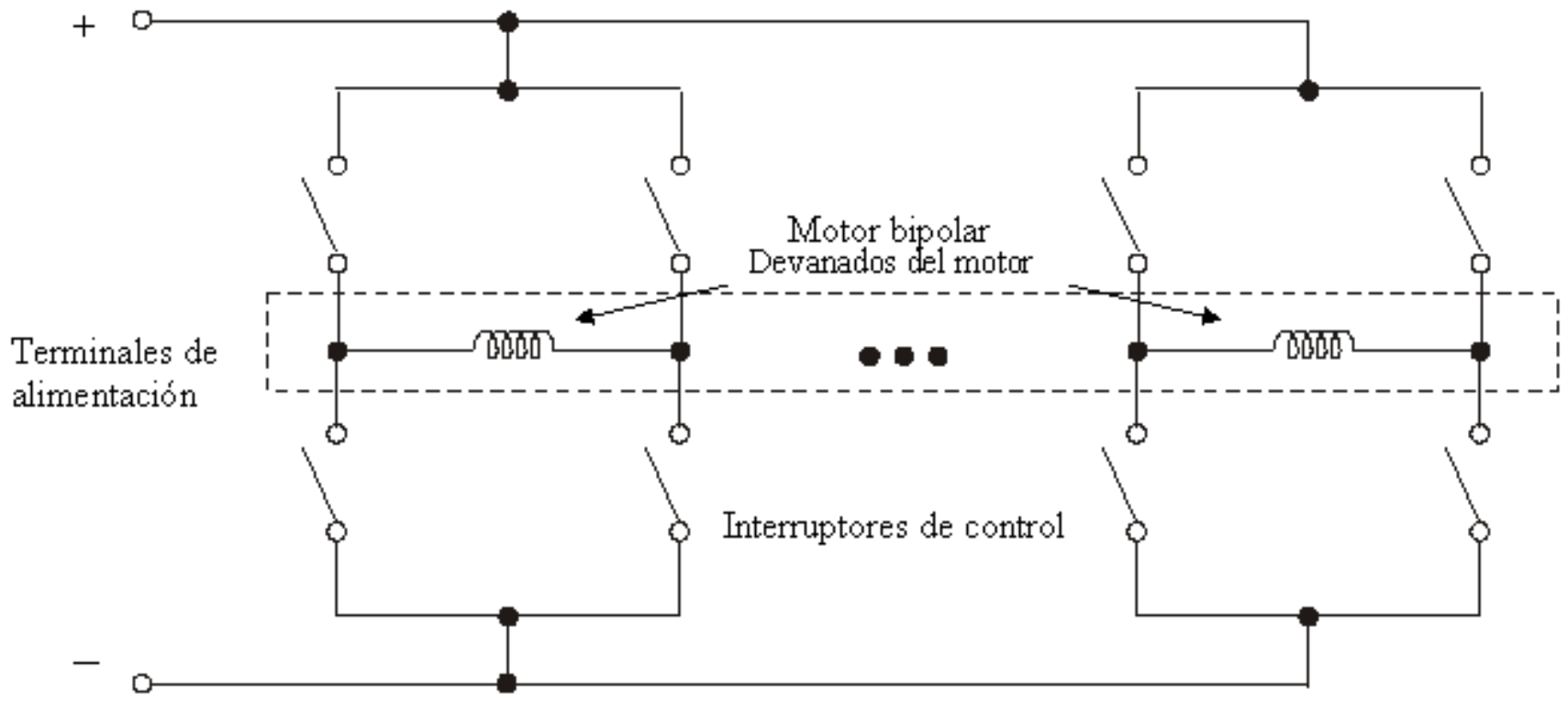


Fig. 4.46 Estructura básica de control de un motor bipolar.

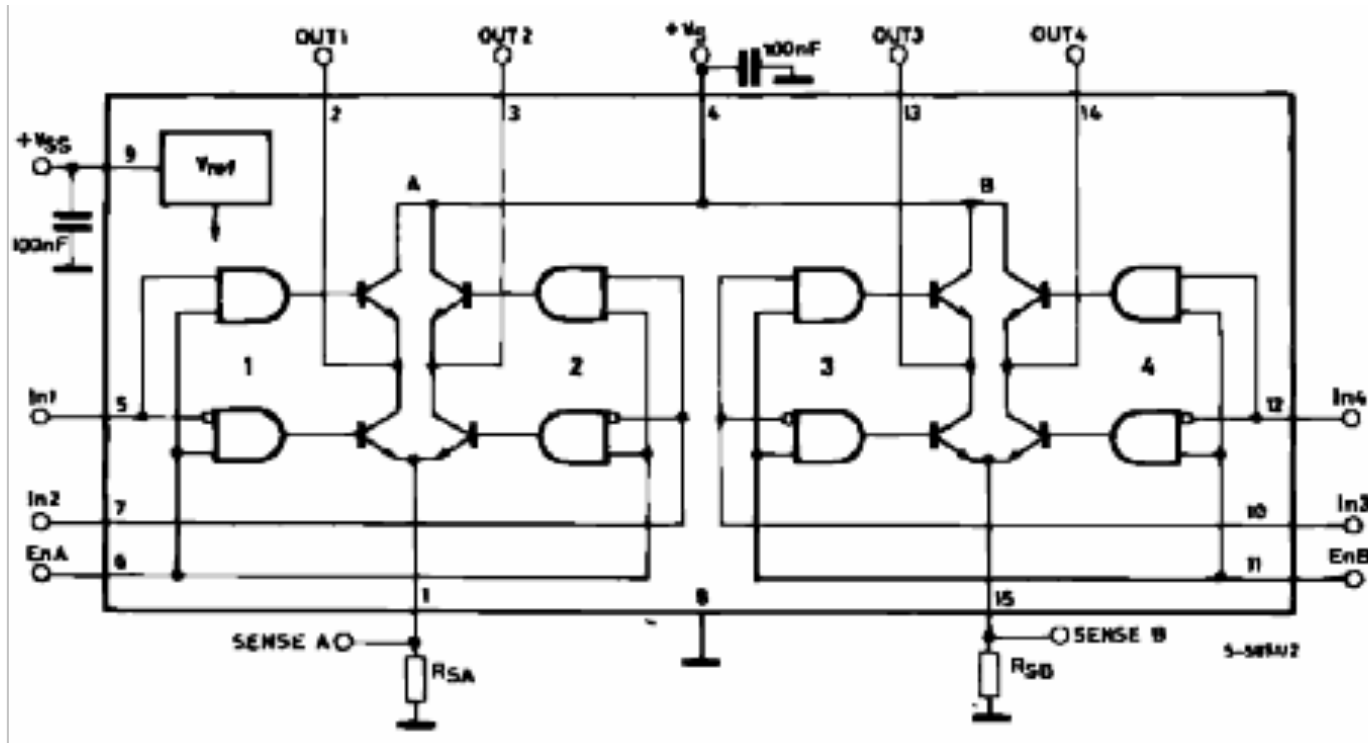


Fig. 4.47. Diagrama de bloques del circuito integrado L298 de SGS-Thomson.

Motor paso a paso

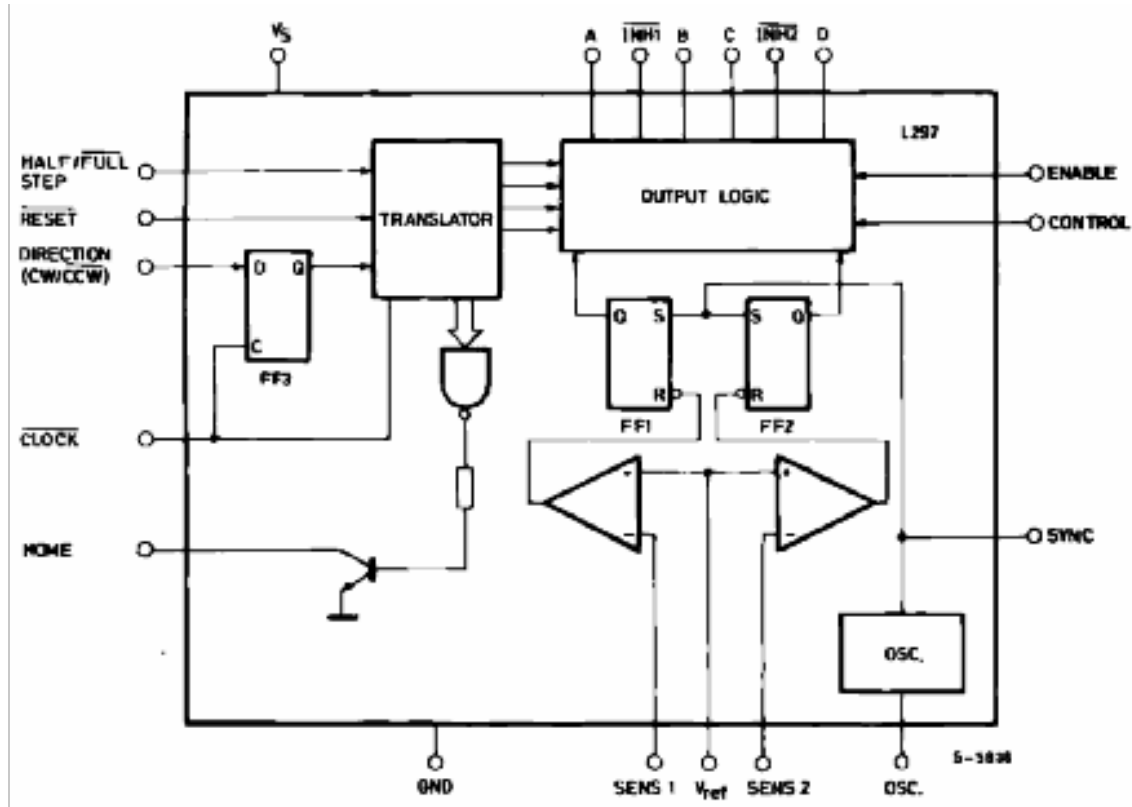


Fig. 4.48. Diagrama de bloques del circuito integrado L297 de SGS-Thomson.

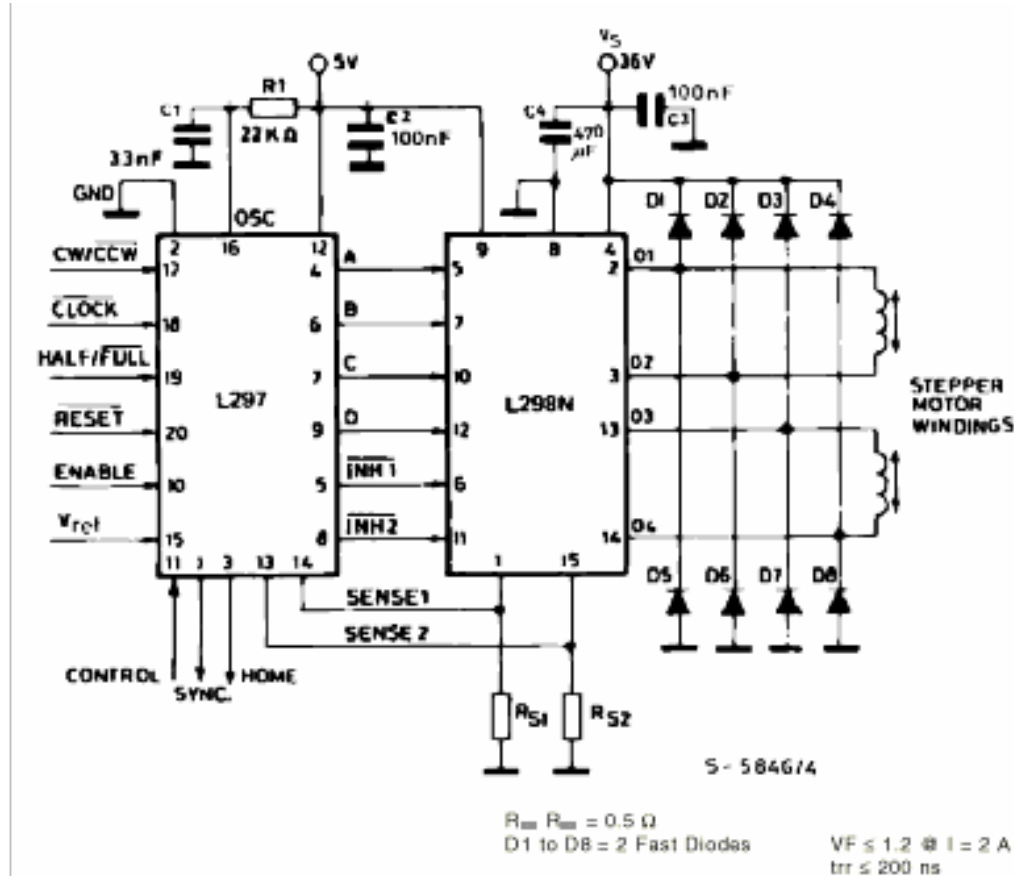
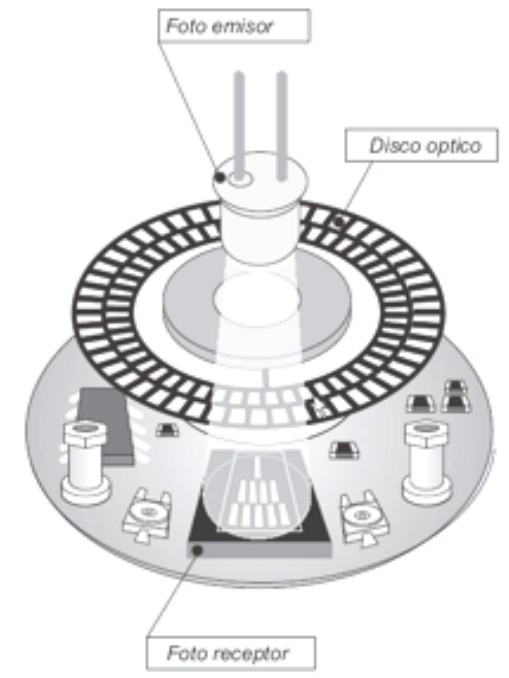
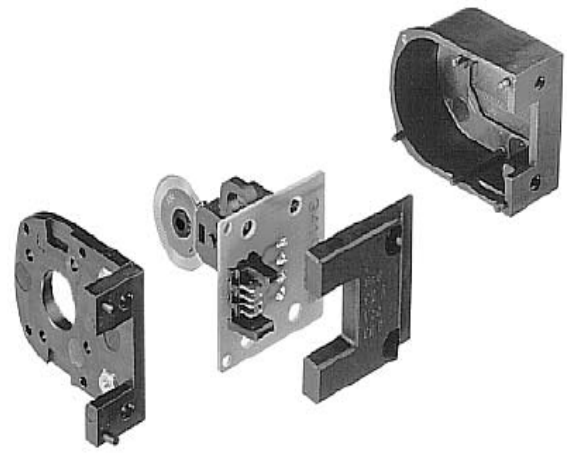
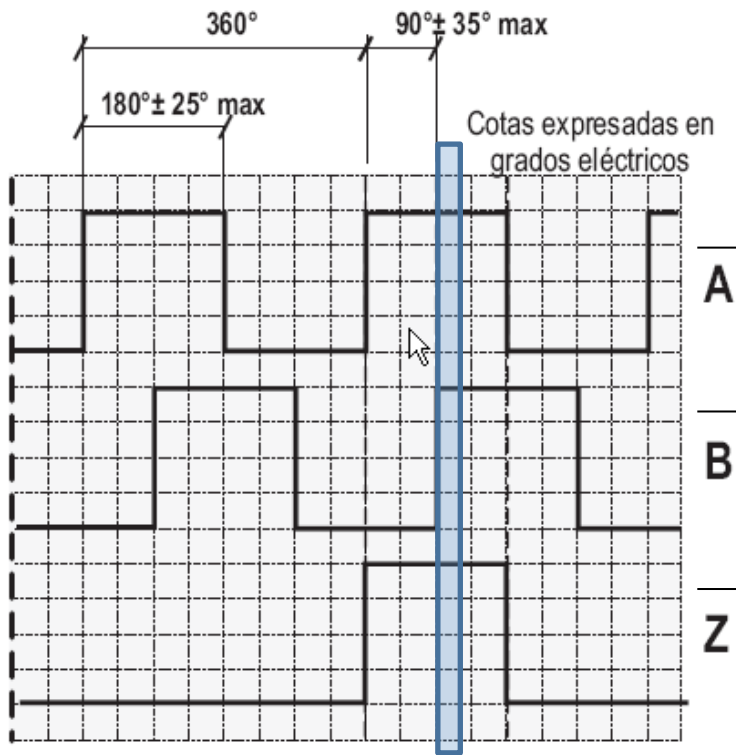


Fig. 4.49. Ejemplo de aplicación de los CI L297 y L298 de SGS-Thomson para el control de un motor paso a paso bipolar de dos fases.

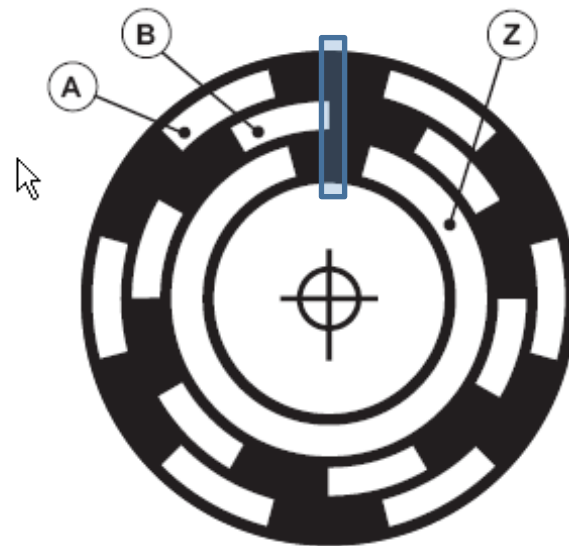
Encoder



Encoder incremental

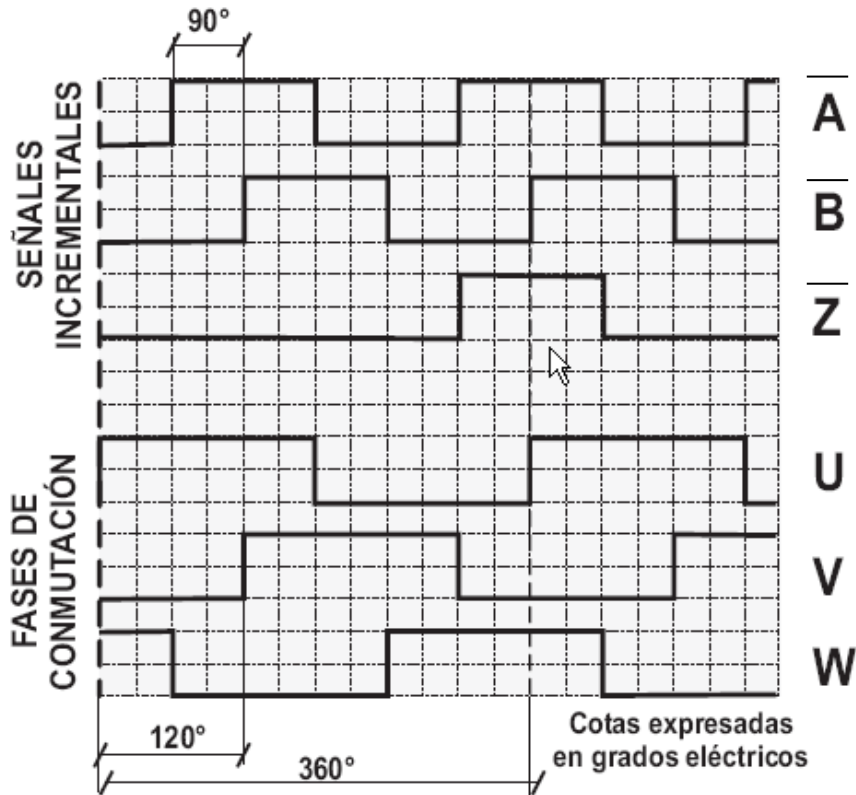


Representación gráfica de las señales incrementales A,B, y Z.

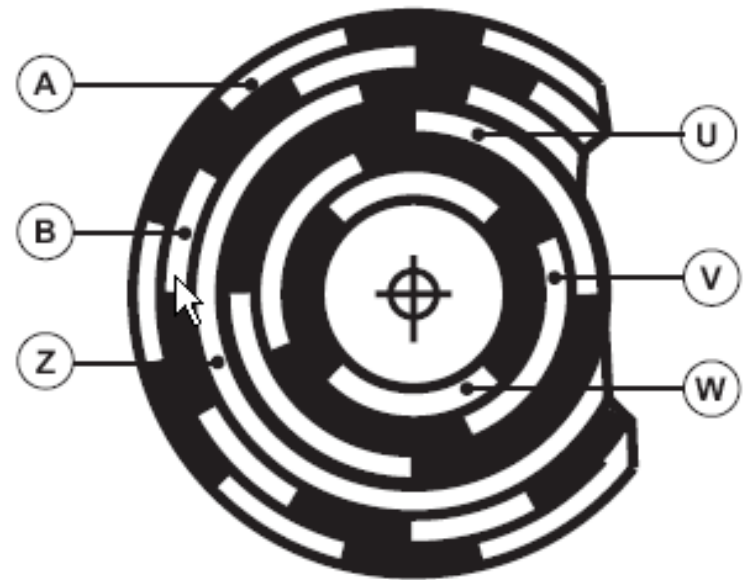


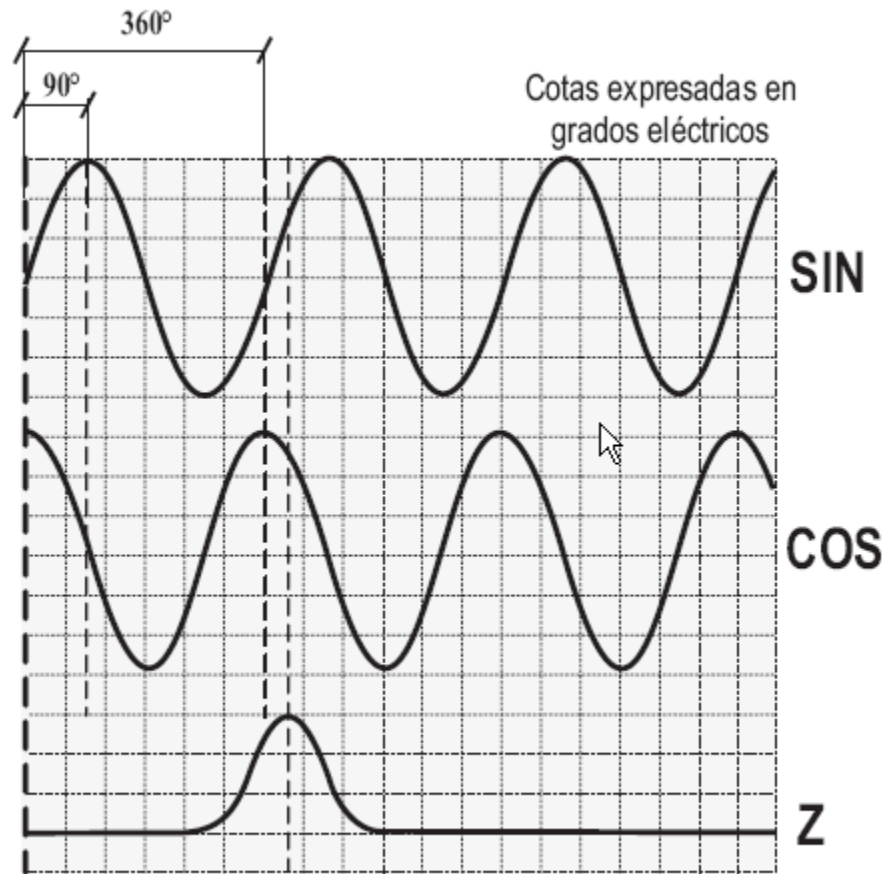
Representación de las señales incrementales A, B y Z en disco óptico.

Encoder incremental con señales de conmutación integradas



Representación gráfica de las señales incrementales A,B, y Z con fases de conmutación U,V y W.





Representación gráfica de las señales sinusoidales sin, cos y Z.