

Tema 1. Principios de Máquinas Eléctricas

Índice

01 Circuito eléctrico y magnético

02 Ferromagnetismo y ciclo de histéresis

03 Pérdidas, índice de carga y rendimiento

Principios de máquinas eléctricas

- El funcionamiento de las máquinas eléctricas se basa en campos magnéticos.
- Para estudiar las máquinas eléctricas es necesario estudiar los circuitos magnéticos, es decir, saber por dónde circulan los campos magnéticos y cuantificarlos.
- Se pueden establecer analogías entre los circuitos eléctricos y magnéticos.
- Para facilitar el estudio se obtendrán equivalente eléctrico de las máquinas, reduciendo el problema a estudiar un circuito eléctrico.

Circuito eléctrico y magnético

- Se pueden establecer analogías entre los circuitos eléctricos y magnéticos.
- Parámetros equivalentes.

Circuito eléctrico		Circuito magnético	
Símbolo	Nombre	Símbolo	Nombre
e	Fuerza electromotriz [V]	\mathcal{F}	Fuerza magnetomotriz [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]

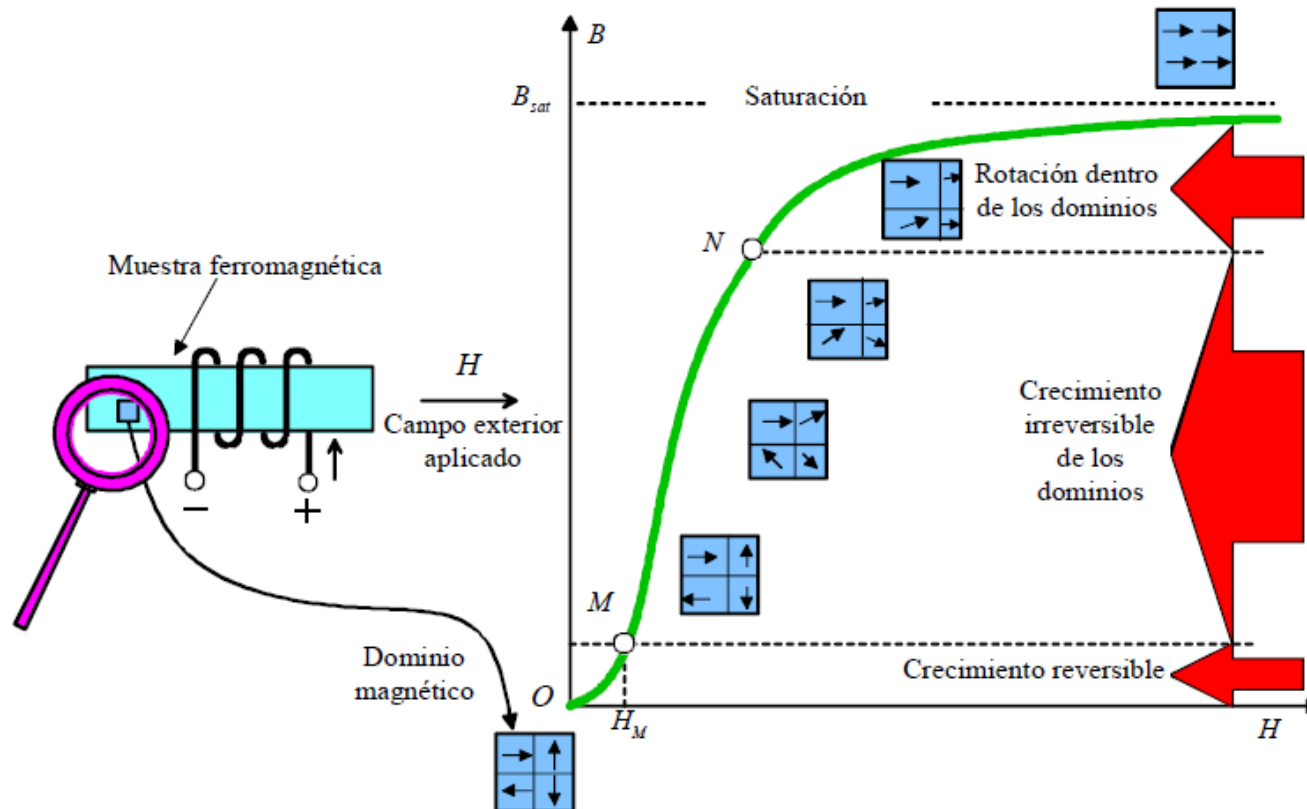
Circuito eléctrico y magnético

- Se pueden establecer equivalencias entre la leyes de los circuitos eléctricos y magnéticos

Circuito eléctrico		Circuito magnético	
Símbolo	Nombre	Símbolo	Nombre
$\sum i = 0$	Primera ley de Kirchoff	$\sum \Phi = 0$	Primera ley de Kirchoff
$\sum e = \sum R \cdot i$	Segunda ley de Kirchoff	$\sum \mathcal{F} = \sum \mathcal{R} \cdot \Phi$	Segunda ley de Kirchoff
$R = l / \sigma \cdot S \text{ } [\Omega]$	Resistencia	$\mathcal{R} = l / \mu \cdot S \text{ } [\text{H}^{-1}]$	Reluctancia
$R_T = \sum R_i$	Resistencias en serie	$\mathcal{R}_T = \sum \mathcal{R}_i$	Reluctancia en serie
$1/R_T = \sum 1/R_i$	Resistencias en paralelo	$1/\mathcal{R}_T = \sum 1/\mathcal{R}_i$	Reluctancia en paralelo

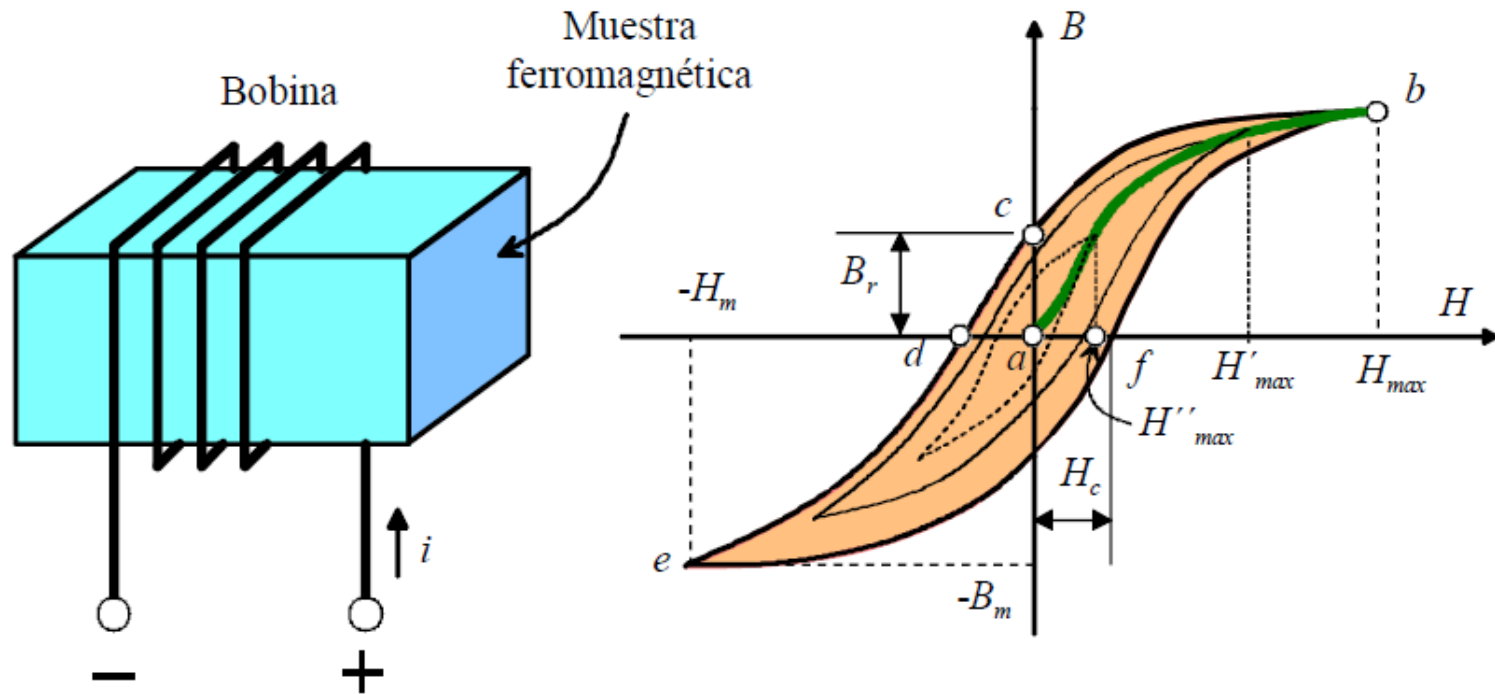
Ferromagnetismo

- **Ferromagnetismo.** Materiales con imanaciones grandes aún en presencia de campos magnéticos débiles

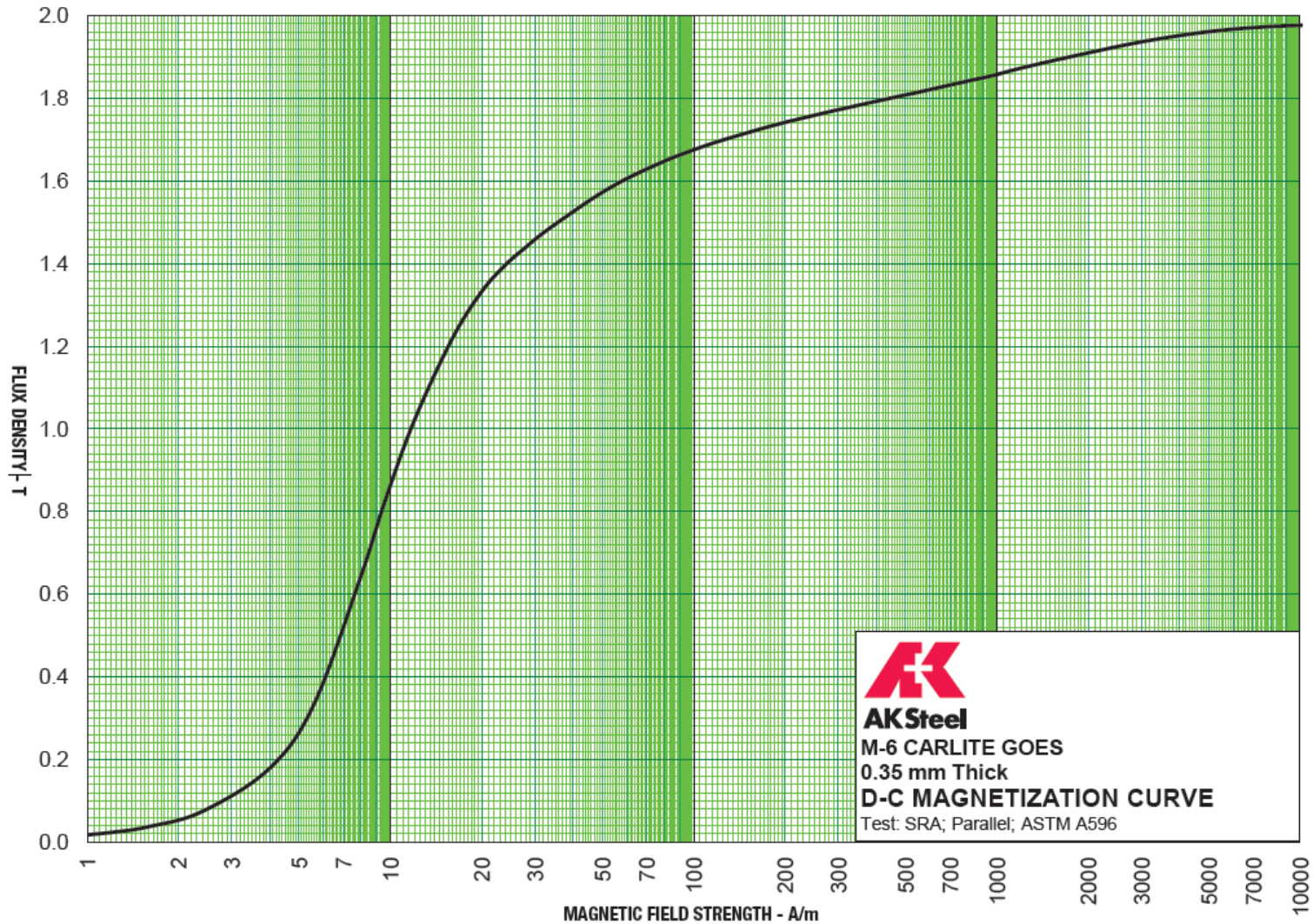


Ciclo de histéresis

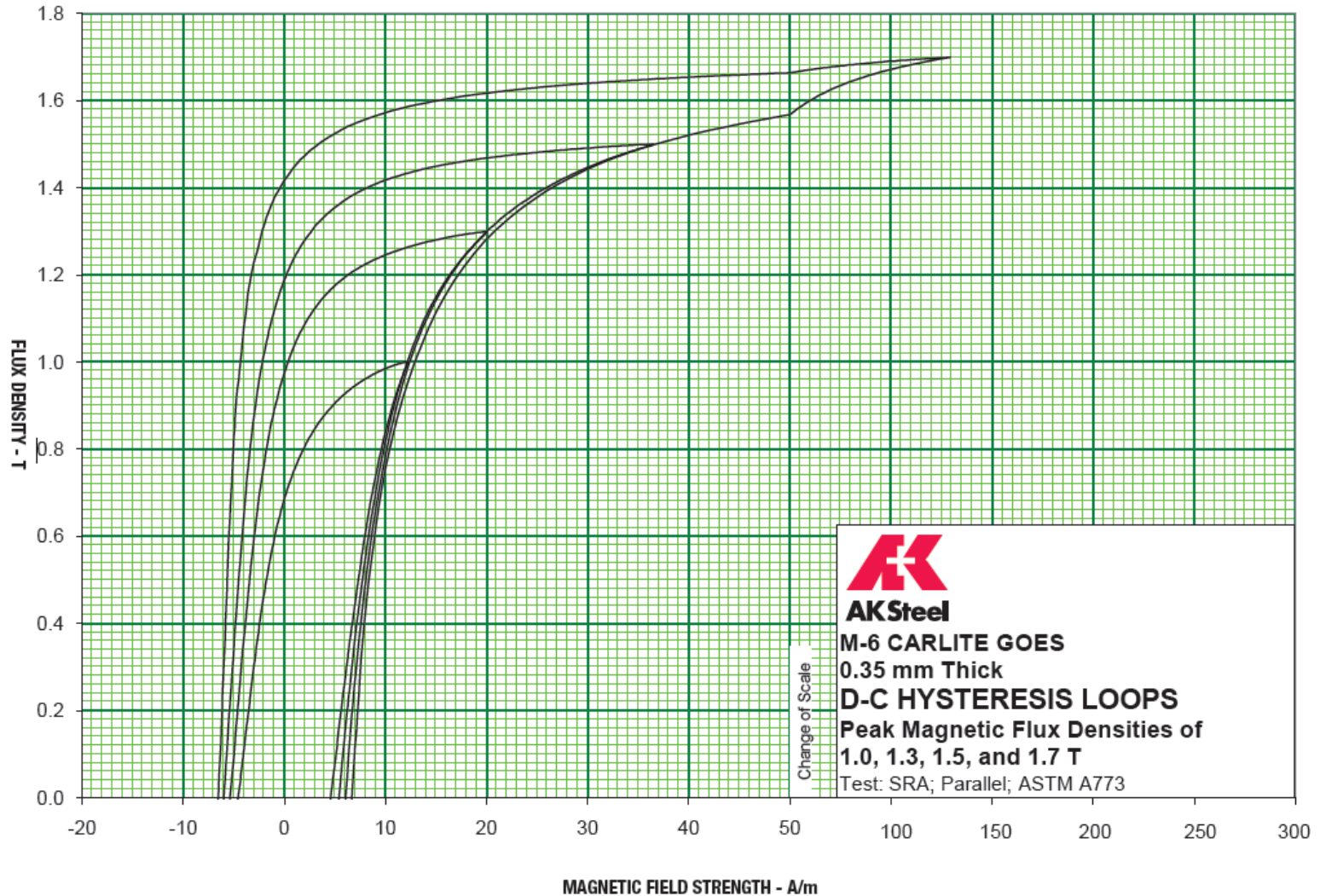
- Magnetismo o inducción remanente B_r . Campo coercitivo H_c
- Imanes permanentes, materiales alta B_r y alto H_c



Ciclo de histéresis



Ciclo de histéresis

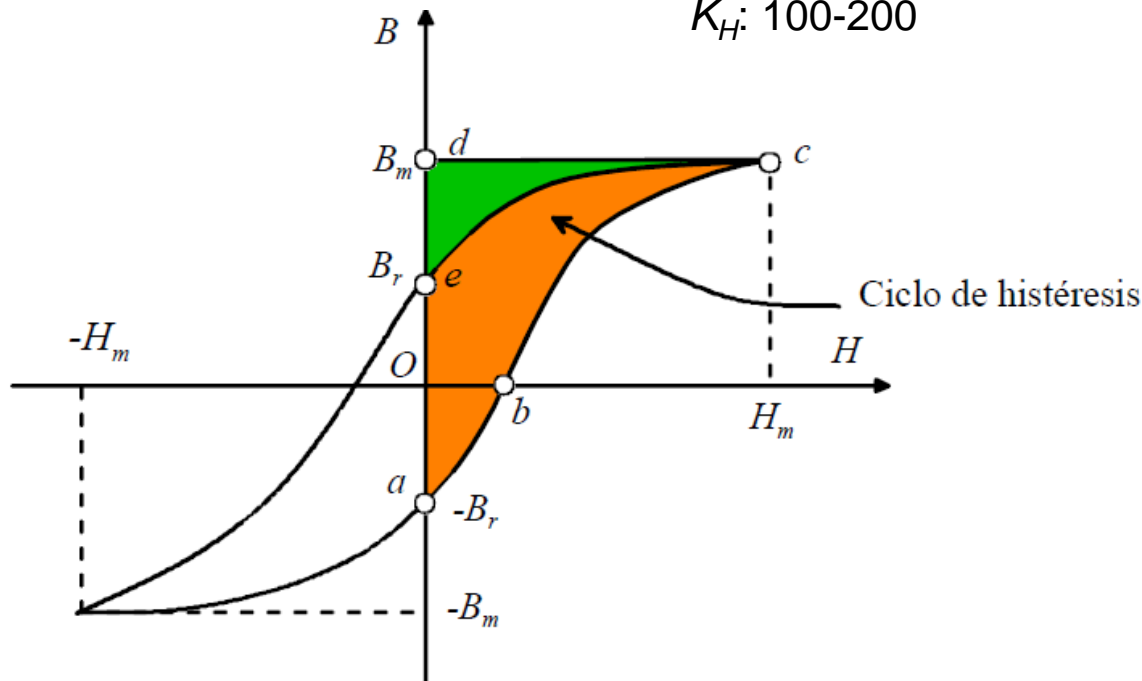


Pérdidas en materiales ferromagnéticos

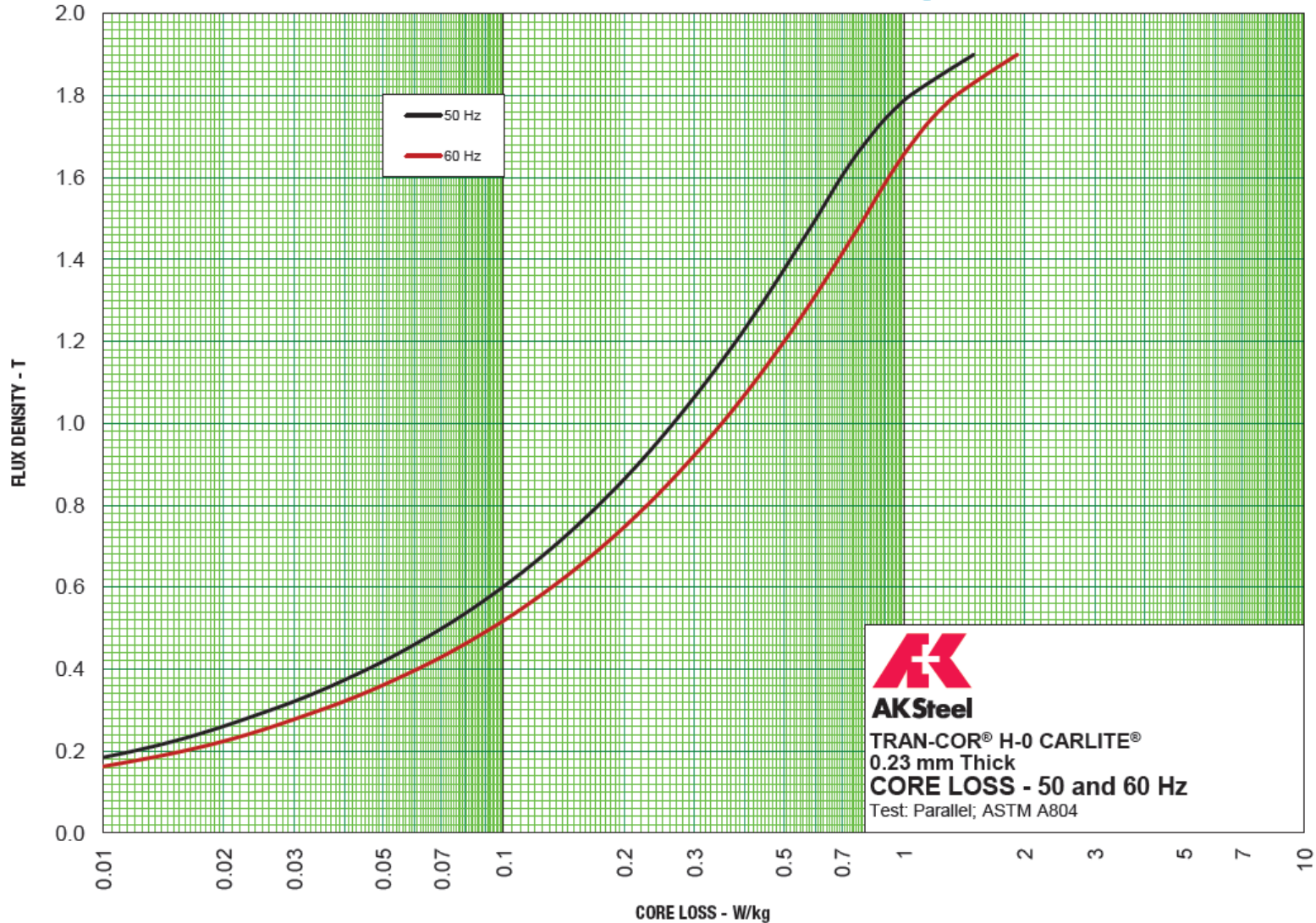
- Pérdidas por histéresis. Energía absorbida por el núcleo disipada en forma de calor.

$$P_H = k_H f(\text{vol}) B_m^\alpha$$

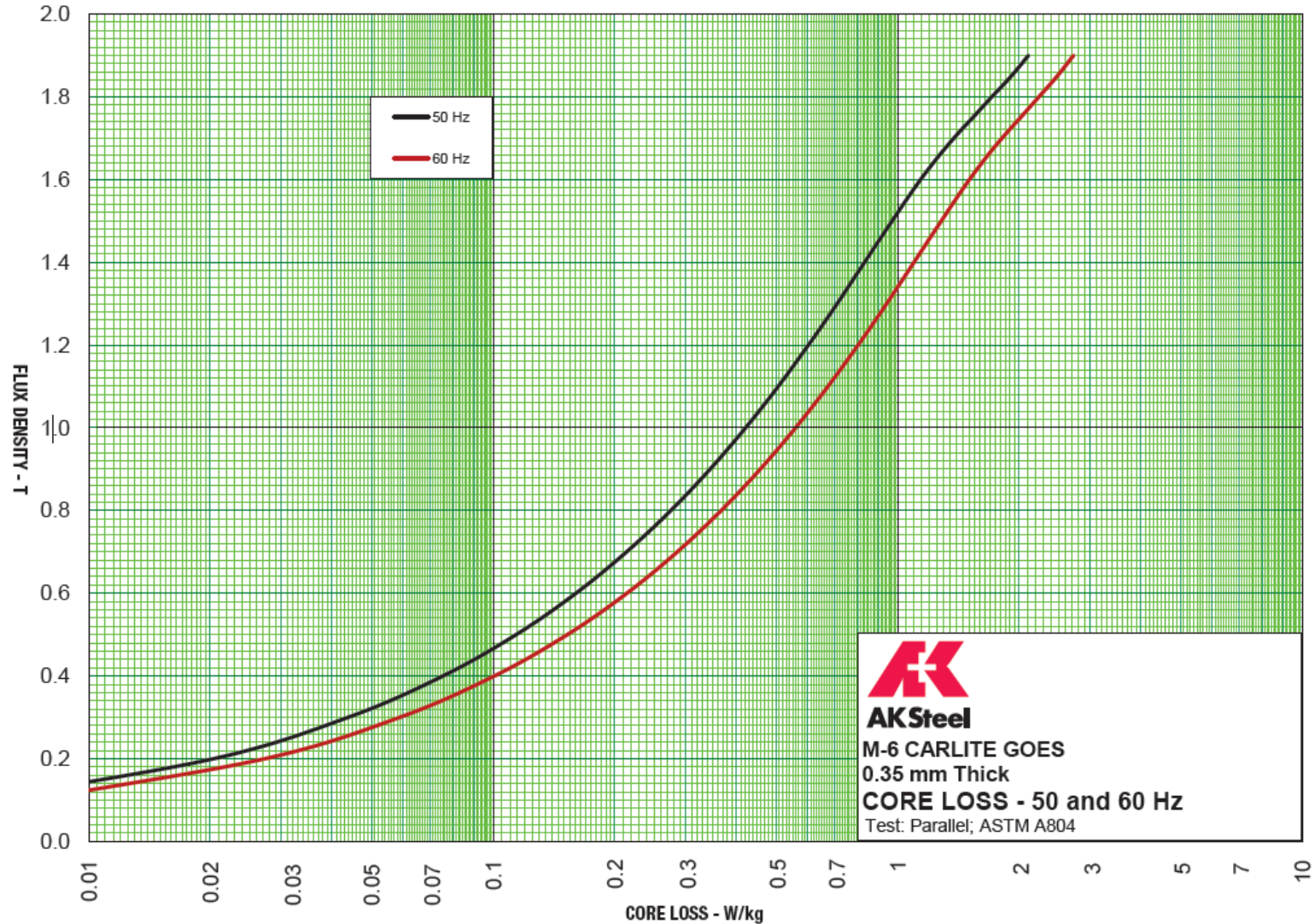
Coeficientes de Steinmetz
 α_H : 1,5-2,5 típicamente 1,6
 K_H : 100-200



Pérdidas en materiales ferromagnéticos

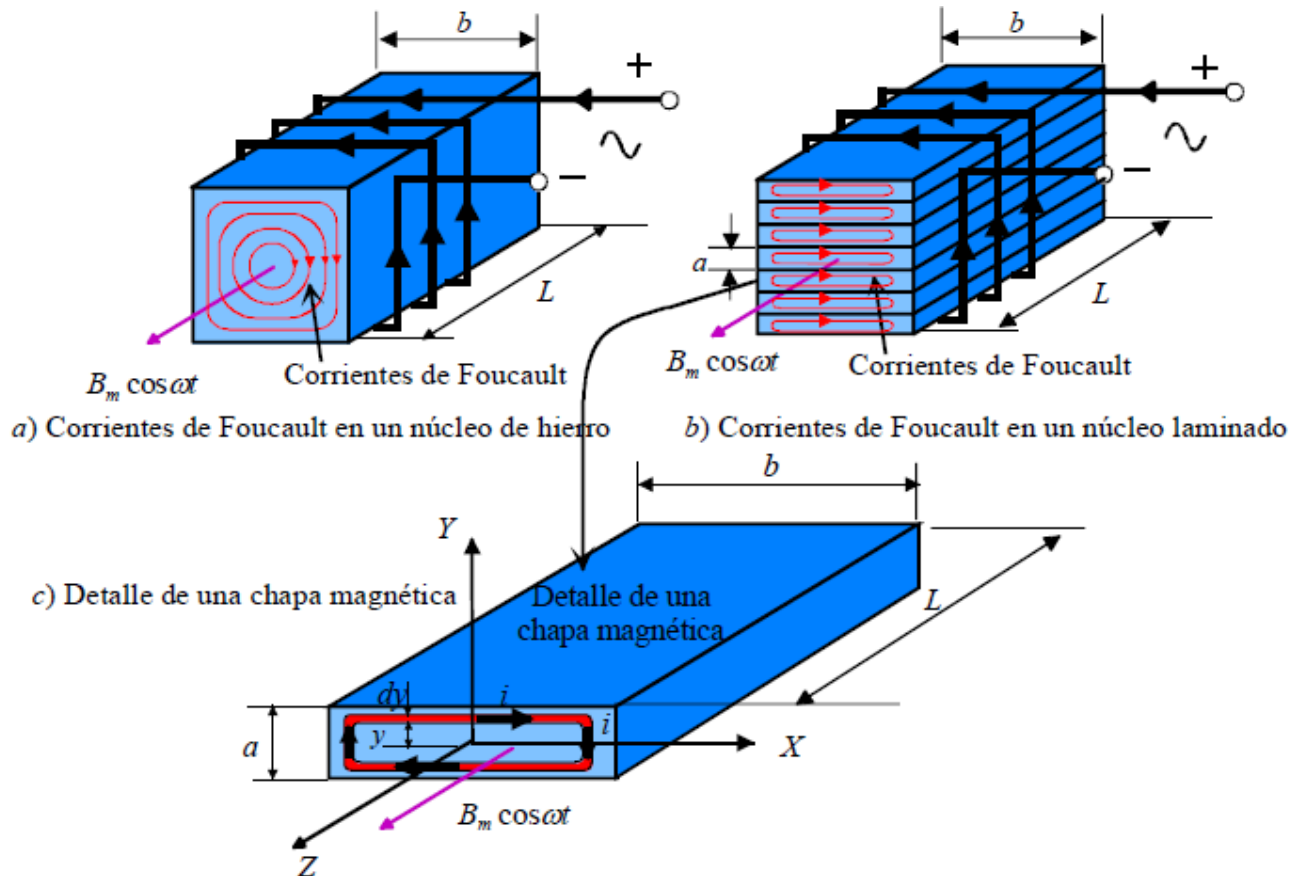


Pérdidas en materiales ferromagnéticos



Pérdidas en materiales ferromagnéticos

- Pérdidas por corrientes de Foucault (*Eddy currents*)



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



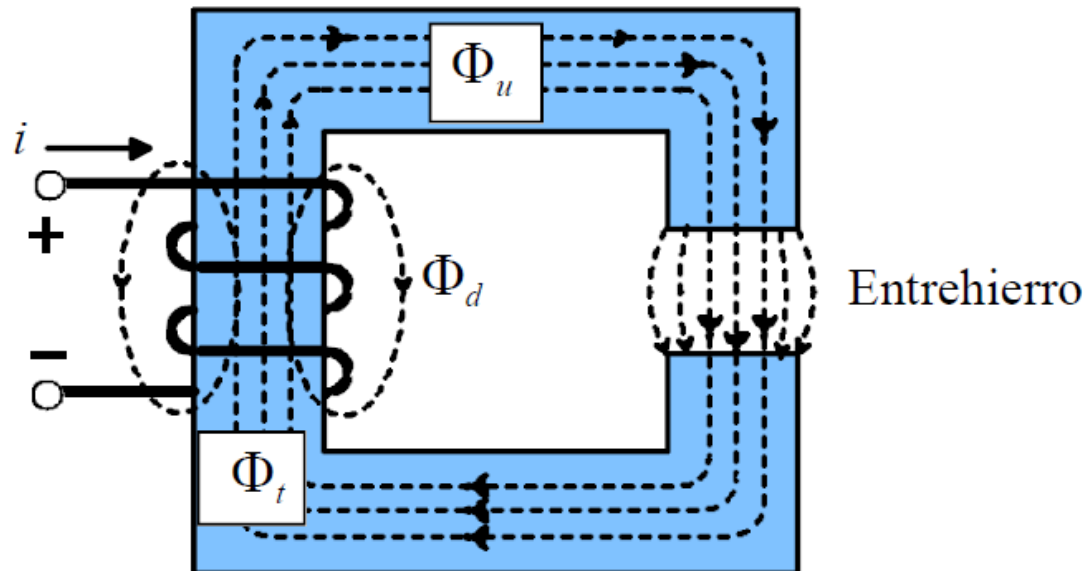
$$k_F: \pi^2/6$$

Pérdidas en materiales ferromagnéticos

- En máquinas eléctricas se deben emplear materiales magnéticos con ciclos de histéresis estrechos (bajas pérdidas por histéresis)
- El material debe ser de baja conductividad y fabricarse en chapas de pequeño espesor (bajas pérdidas por corrientes de Foucault)
- Pérdidas totales en W/kg para una $B [T]$ y $f [Hz]$ dadas.
- Las chapas magnéticas deben estar aisladas entre sí. Carlite o similar.

Dispersión magnética

- El flujo magnético no se confina en el circuito magnético. Flujo de dispersión Φ_d o de Hopkinson.
- El flujo total Φ_t es la suma del flujo útil Φ_u y el de dispersión Φ_d , que puede ser de hasta el 30% del útil.



Potencias nominales

- Potencia asignada (nominal)
 - ✓ Generadores de CC: Vatios (W) en bornes de salida
 - ✓ Generadores de CA: Voltamperios (VA) y f.d.p (0,8) en bornes de salida.
 - ✓ Motores: potencia mecánica disponible en el eje, en Vatios (W)
 - ✓ Transformadores: potencia aparente en bornes del primario o del secundario en Voltamperios (VA)
- Tipo de servicio. Placa de características

3 Φ Mot. 1LA7096-4AA11				
UD 0609/70322582-68				
IP 55	90L	IM B5	IEC/EN 60034	Th.CI.F
50Hz	230/400 V ΔY		60 Hz	460 V Y
1.5 Kw	5.9/3.4 A		1.75 Kw	3.3 A
$\text{Cos } \phi$ 0.81	1420/ min		$\text{Cos } \phi$ 0.82	1720/ min
	220-240/380-420V ΔY		440-480 V Y	
	6.1-6.1/3.5-3.5 A		3.4-3.4 A	
32144	6401			SF 1.1

Pérdidas en máquinas eléctricas

- Pérdidas eléctricas en los devanados. Pérdidas en el Cu P_{Cu} por efecto Joule. Dependen del material

$$P_{Cu} = \sum R_j i_j^2 = \sum \rho_j J_j^2 \cdot (vol)$$

- Pérdidas eléctricas en el hierro P_{Fe} . Histéresis y Foucault. Dependen del material

$$P_{Fe} = P_H + P_F = (k_H f B_m^\alpha + k_F f^2 B_m^2 a^2 \sigma) \cdot vol$$

- Pérdidas mecánicas P_{mec} en máquina rotativas
 - ✓ Rozamiento de **rodamientos y cojinetes**. Dependen del material
 - ✓ Fricción de escobillas. Dependen del material.
 - ✓ Rozamiento del aire. Ventilación

$$P_m = P_{rozamiento} + P_{ventilación} = A \cdot n + B \cdot n^3$$

Pérdidas en máquinas eléctricas

- Pérdidas **fijas**. Independientes de la potencia manejada por la máquina.

$$P_f = P_{Fe} + P_m$$

- Pérdidas **variables**. Dependen de la potencia

$$P_v = P_{Cu}$$

Consecuencias:

- Calor generado en la máquina.
- Temperatura de régimen.
- Deterioro de aislantes. Montsinger, $\Delta 10^\circ\text{C} \rightarrow \frac{1}{2}$ vida

Rendimiento

- Rendimiento ¡¡¡Sólo de la potencia activa!!!!

$$\eta = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{Total}}} = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{útil}} + P_{\text{pérdidas}}}$$

- Para máquinas eléctricas

$$\checkmark P_{\text{útil}} = V \cdot I \cos \varphi = S \cos \varphi$$

$$\checkmark P_{\text{pérdidas}} = P_f + P_v \quad \left\{ \begin{array}{l} P_f = P_{Fe} + P_{mec} \end{array} \right.$$

$$P_{\text{pérdidas}} = P_{Fe} + P_{Cu} + P_{mec} \quad \left\{ \begin{array}{l} P_v = P_{Cu} = R \cdot I^2 = R \cdot \left(\frac{S}{V} \right)^2 \rightarrow P_v = bS^2 \end{array} \right.$$

$$P_{\text{pérdidas}} = P_f + bS^2$$

$$\eta = \frac{S \cos \varphi}{S \cos \varphi + P_f + bS^2}$$

Rendimiento

- Rendimiento decrece si el f.d. p. decrece.
- Rendimiento máximo, para un f.d. p. determinado:

$$\left. \frac{\partial \eta}{\partial S} \right]_{\cos \varphi = cte} = 0 \quad \longrightarrow \quad \frac{P_f - bS^2}{(S \cos \varphi + P_f + bS^2)^2} = 0$$

Pérdidas fijas igual a pérdidas variables

$$P_f = bS^2 \quad S_{\eta \text{máx.}} = \sqrt{\frac{P_f}{b}}$$

- Factor de utilización o índice de carga **C**

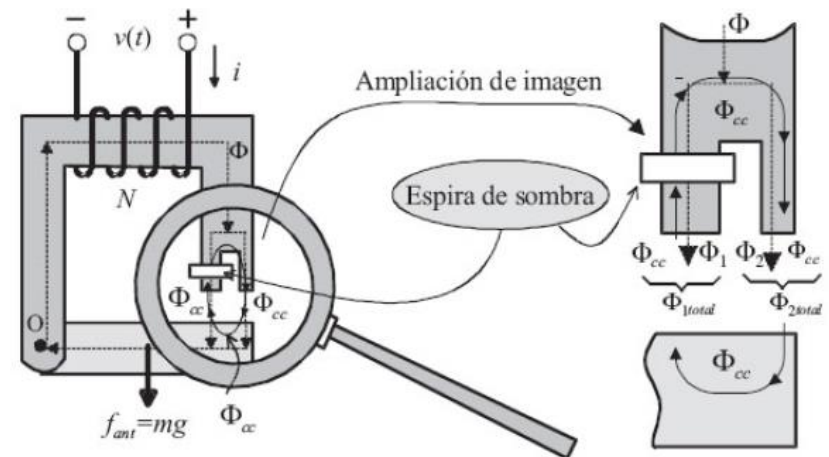
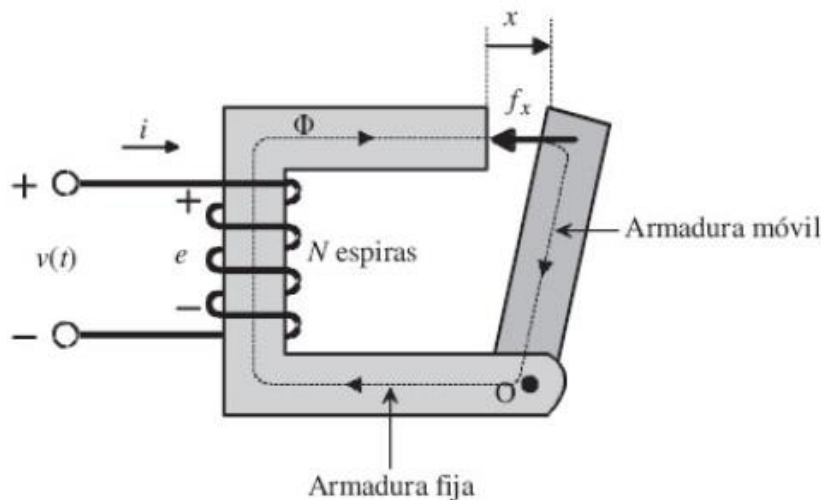
$$C = \frac{S}{S_{\text{nominal}}} \quad \longrightarrow \quad C_{\text{opt}} = \frac{S_{\eta \text{máx.}}}{S_{\text{nominal}}} \quad \longrightarrow \quad C_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{P_f}{bS_{\text{nominal}}^2}} = \sqrt{\frac{P_f}{P_{\text{vnom.}}}}$$

Conversión de energía en sistemas magnéticos

- Un campo magnético almacena energía o capacidad de realizar un trabajo, es decir, de aplicar una fuerza mecánica en las estructuras asociadas con él. **“Un imán atrae a un trozo de hierro”**.
- En máquinas eléctricas se deben emplear materiales magnéticos con especiales características. Ciclos de histéresis estrechos (bajas pérdidas por histéresis), baja conductividad y fabricarse en chapas de pequeño espesor (bajas pérdidas por corrientes de Foucault). Las chapas magnéticas deben estar aisladas entre sí. Carlite

Conversión de energía en sistemas magnéticos

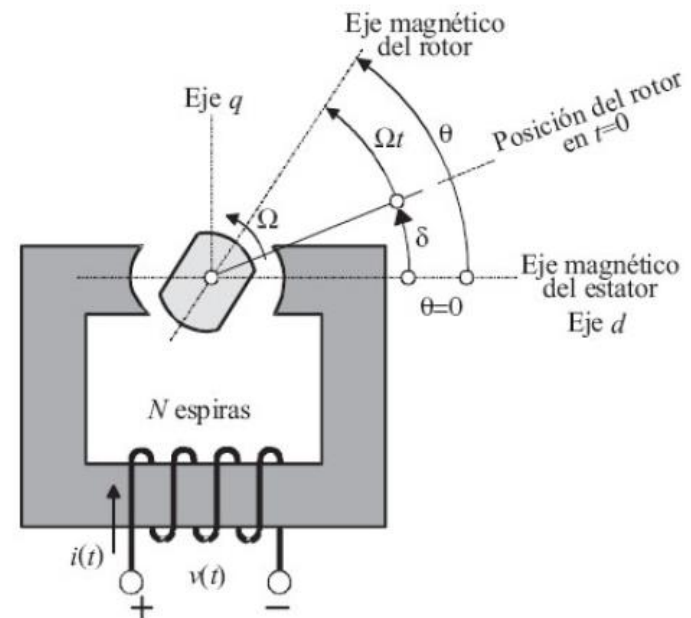
- Movimiento de **traslación**
- El sentido de la fuerza tiende a reducir la reluctancia \mathcal{R} y por tanto a reducir el entrehierro (el imán atrae al hierro)
- Electroimanes. Grúas, relés y contactores (relé trifásico)
 - ✓ En CC el flujo es constante y la fuerza también
 - ✓ En CA el flujo es senoidal y la fuerza también. Vibraciones.



Conversión de energía en sistemas magnéticos

- Movimiento de **rotación**. La energía se transforma en par de giro
- El sentido del par tiende a reducir la reluctancia \mathcal{R} y por tanto a alinear los ejes magnéticos de rotor y estátor. Motor de reluctancia.

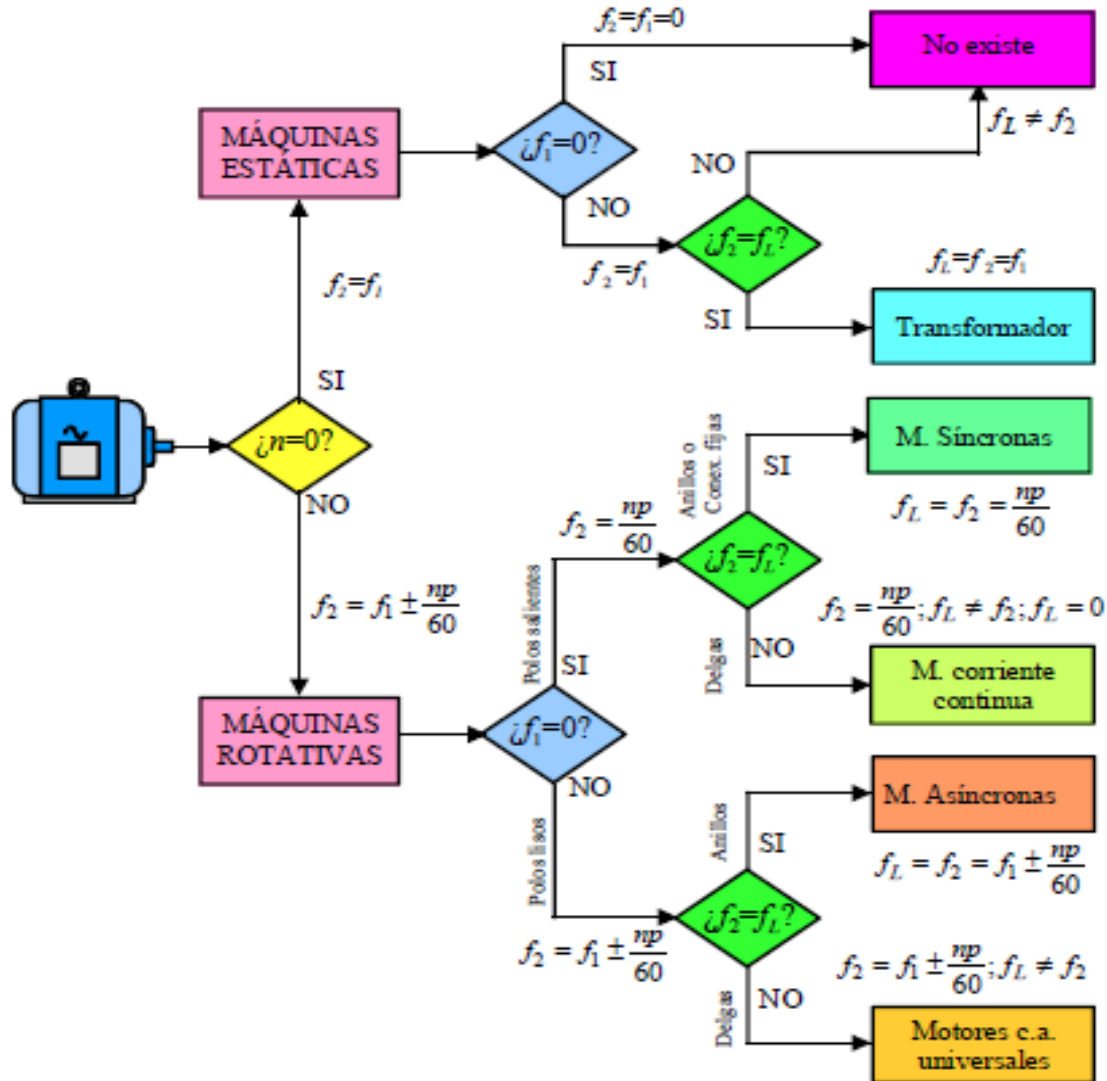
- ✓ En CC el rotor tiende a la posición de mínima reluctancia (horizontal)
- ✓ Si se mueve el rotor con un motor externo, y el estator se alimenta en CA, aparece un par. Motor o generador.



Tipos de máquinas eléctricas

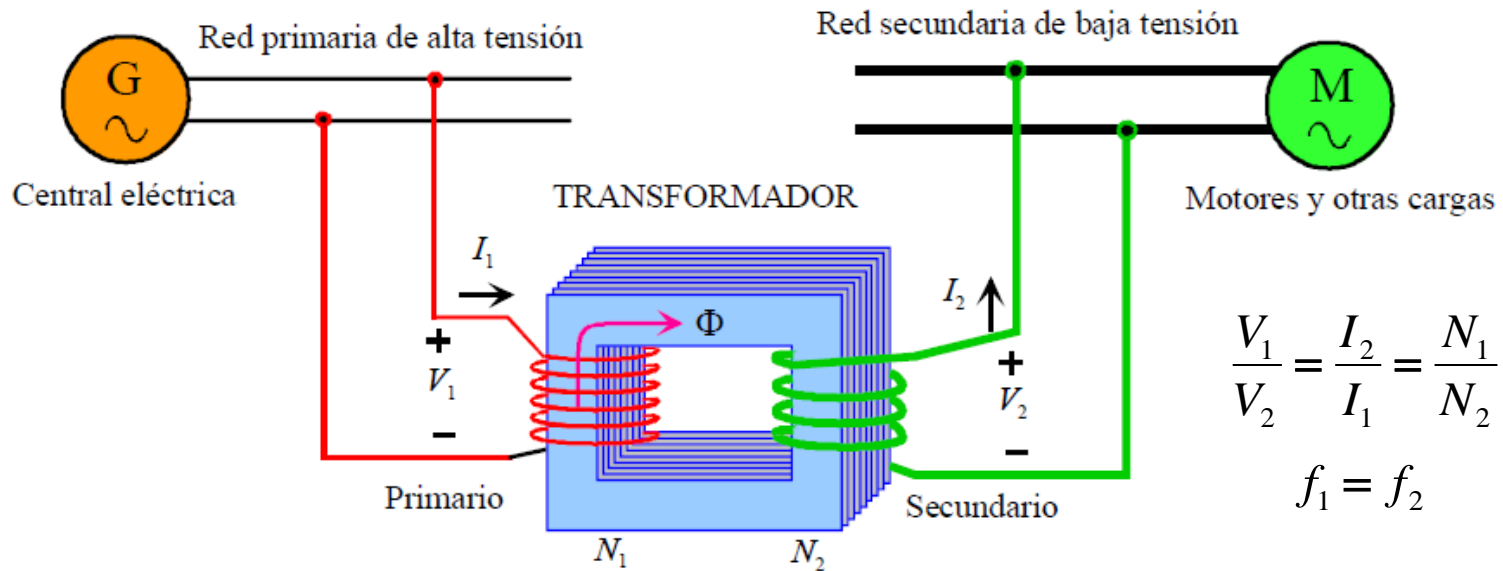
- **Estáticas. Transformadores.** Transforman las magnitudes de la **energía eléctrica** de entrada dándolas modificadas a la salida.
- **Rotativas**
 - ✓ **Generadores.** Una **energía mecánica** mueve una bobina dentro de un campo magnético que induce una f.e.m (\mathcal{V}) que aplicada a un circuito produce una corriente (**energía eléctrica**). El campo que produce esa corriente se opone al movimiento, equilibrando la energía mecánica aportada.
 - ✓ **Motores.** Se aplica una corriente (**energía eléctrica**) en una bobina dentro de un campo y se genera un par sobre la misma (**energía mecánica**). Aparece una f.e.m que se opone, equilibrando la energía eléctrica aportada.

Clasificación general de máquinas eléctricas

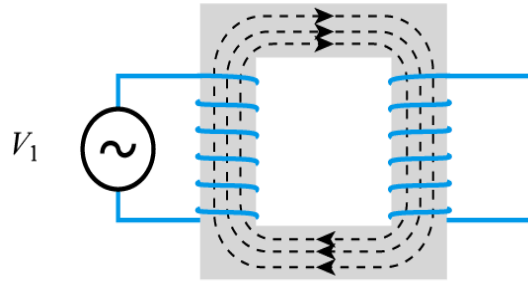


Máquinas eléctricas estáticas

- Un **transformador** es una máquina estática en la que se conecta una fuente de **CA** de frecuencia f_1 a un devanado inductor (primario) y entrega energía eléctrica de CA de frecuencia f_2 a un circuito conectado al inducido (secundario)

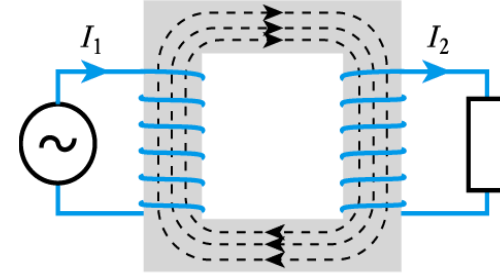


Máquinas eléctricas estáticas



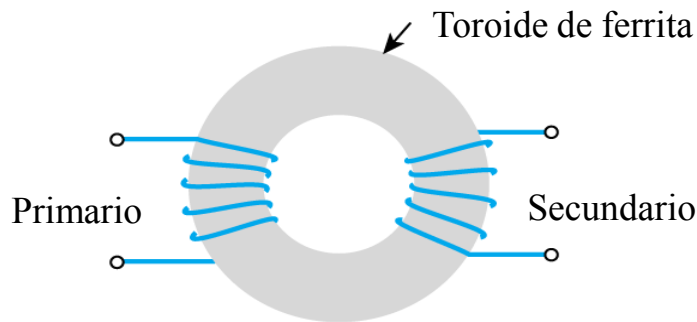
Transformador en vacío
(sin carga)

$$V_2 \Rightarrow \frac{v_2}{v_1} = \frac{N_2}{N_1} v_1$$

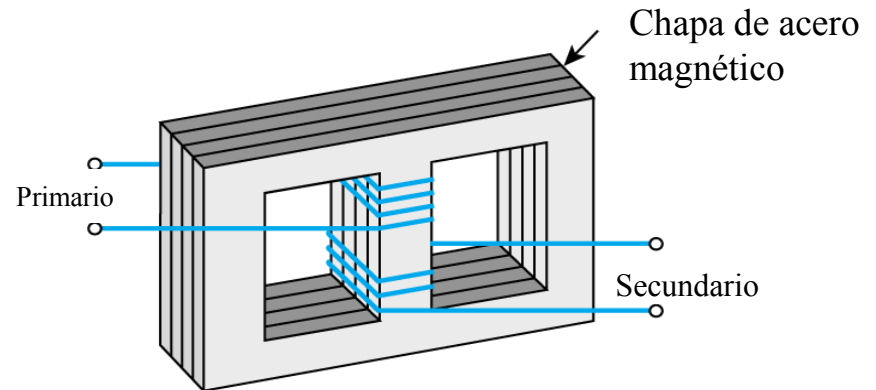


Transformador con
carga

$$V_2 \Rightarrow v_1 i_1 = v_2 i_2$$



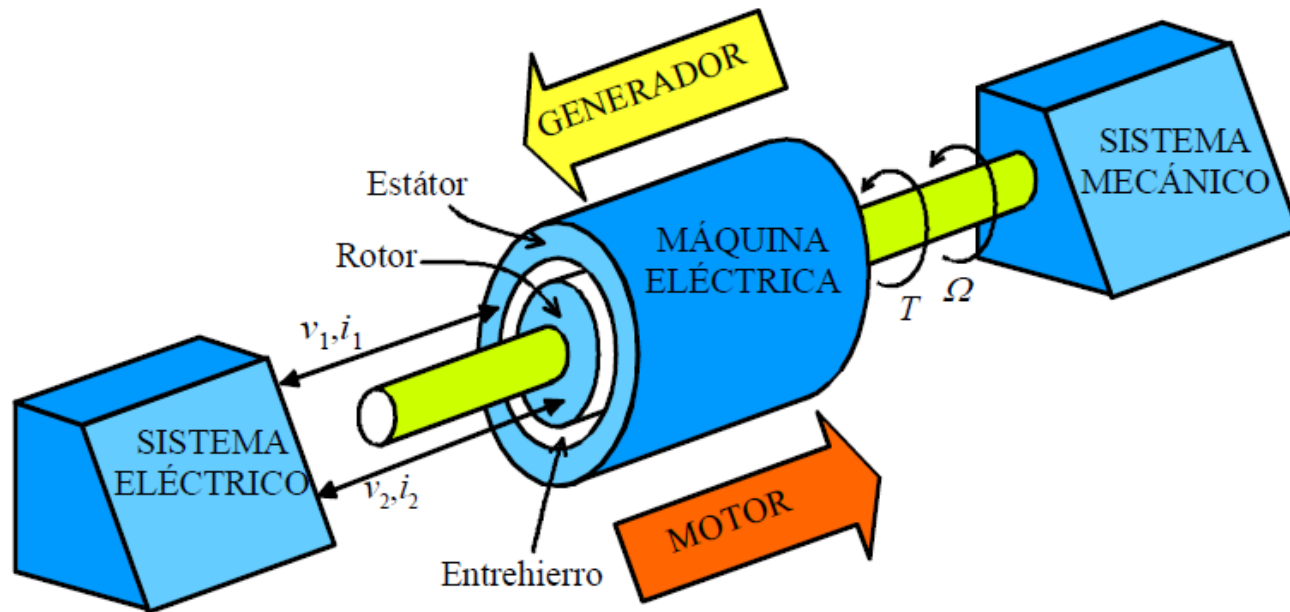
Bobinas devanadas en un
toroide de ferrita



Bobinas devanadas en chapa de
acero magnético

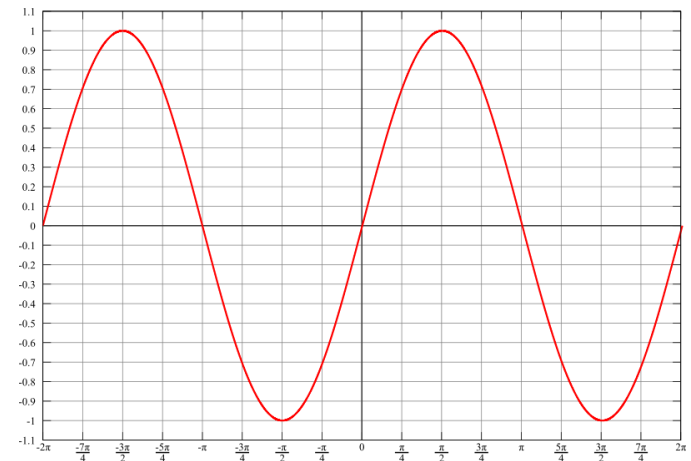
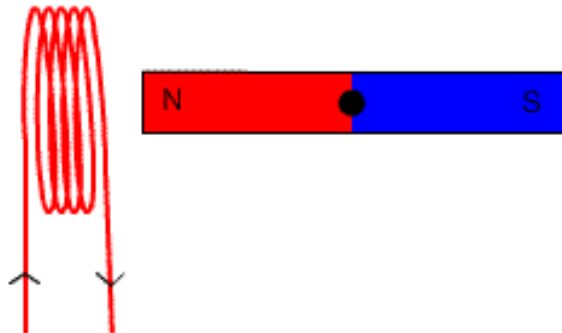
Máquinas eléctricas rotativas

- El campo magnético existente en el **entrehierro** es el medio de acoplamiento entre el sistema eléctrico y el mecánico
- Devanado inductor e inducido



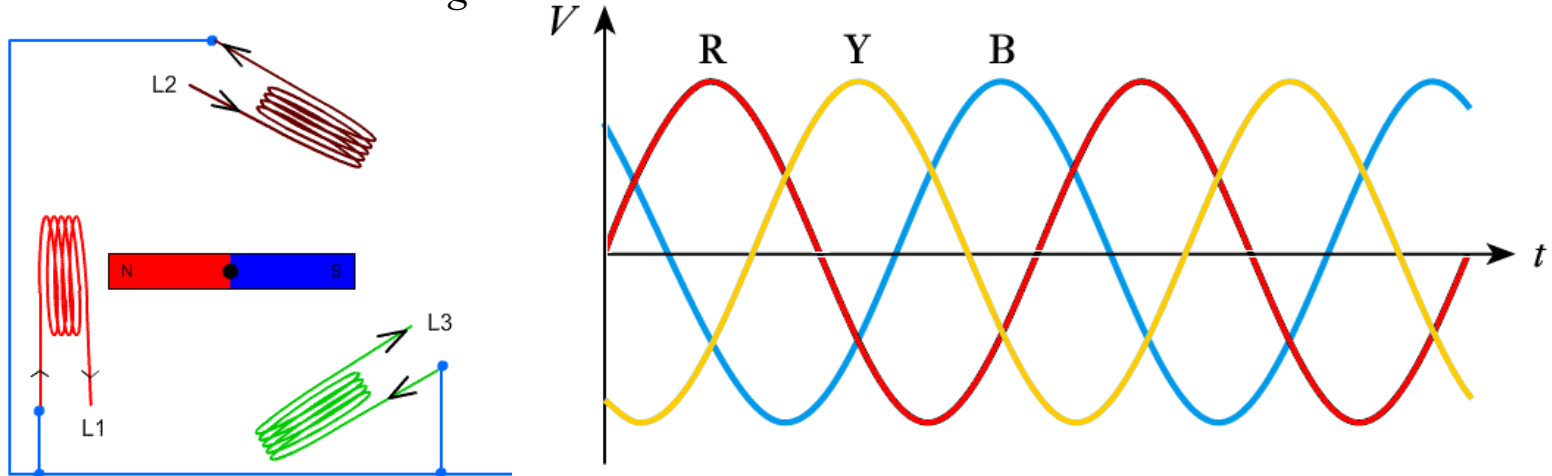
Máquinas eléctricas rotativas

- Un par de polos magnéticos (imán) que gira (rotor) con velocidad angular constante ω_g genera un campo magnético sinusoidal de frecuencia ω visto desde un punto fijo en su entorno (estátor)
- En una espira fija respecto de los polos que giran se induce una tensión sinusoidal, debido al campo magnético variable



Máquinas eléctricas rotativas

- Si existen p pares de polos (p imanes) girando con velocidad angular constante ω_g , se induce una tensión sinusoidal (fase) de frecuencia $\omega = p \cdot \omega_g$
- Si existen n espiras (o bobinas) colocadas con un ángulo determinado φ_g entre ellas, se genera un sistema de tensiones polifásico de igual frecuencia, y desfase eléctrico entre ellas de $\varphi = p \cdot \varphi_g$

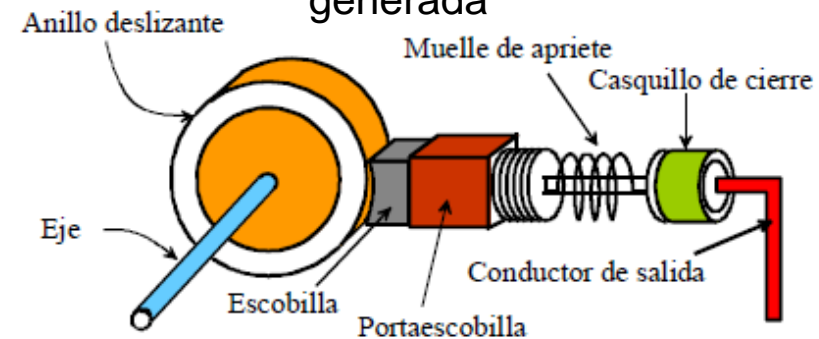
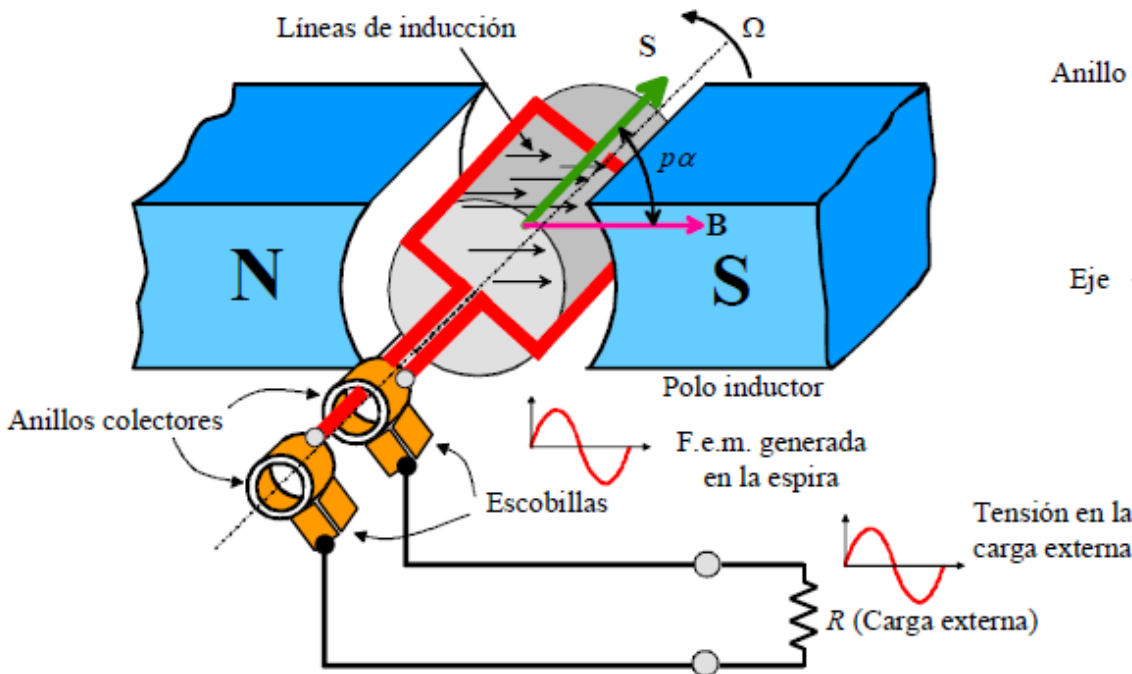


Máquinas eléctricas rotativas

- Para recoger o aportar energía eléctrica al rotor se emplean **colectores**.
- Colector de anillos para máquinas de **CA**.

$$e = -\frac{\partial \phi}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} [B S \cos(p\phi_g)] \Rightarrow f = \frac{n \cdot p}{60} \Rightarrow$$

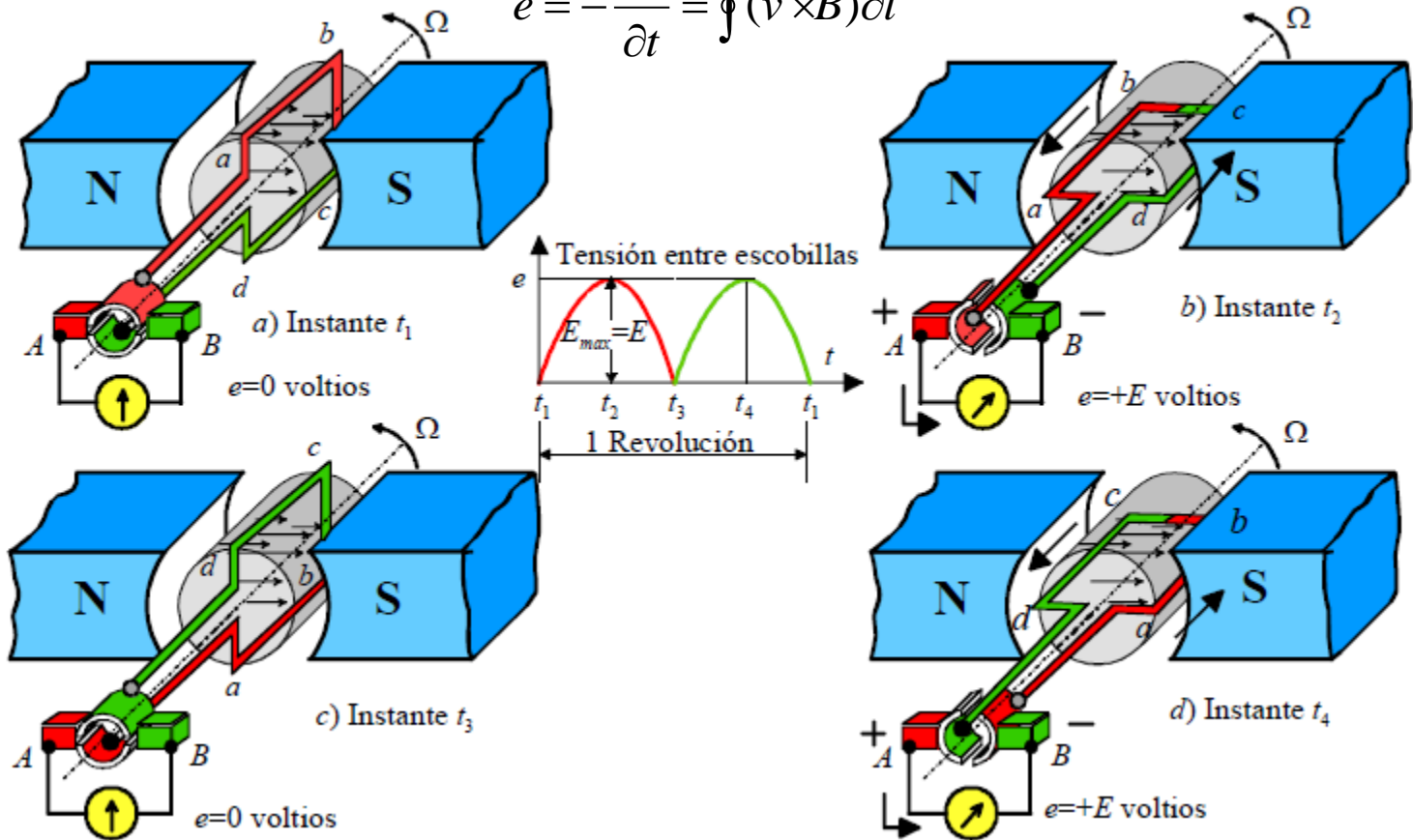
p : pares de polos
 n : r.p.m. de giro
 ϕ_g : ángulo geométrico
 f : frecuencia de la f.e.m generada



Máquinas eléctricas rotativas

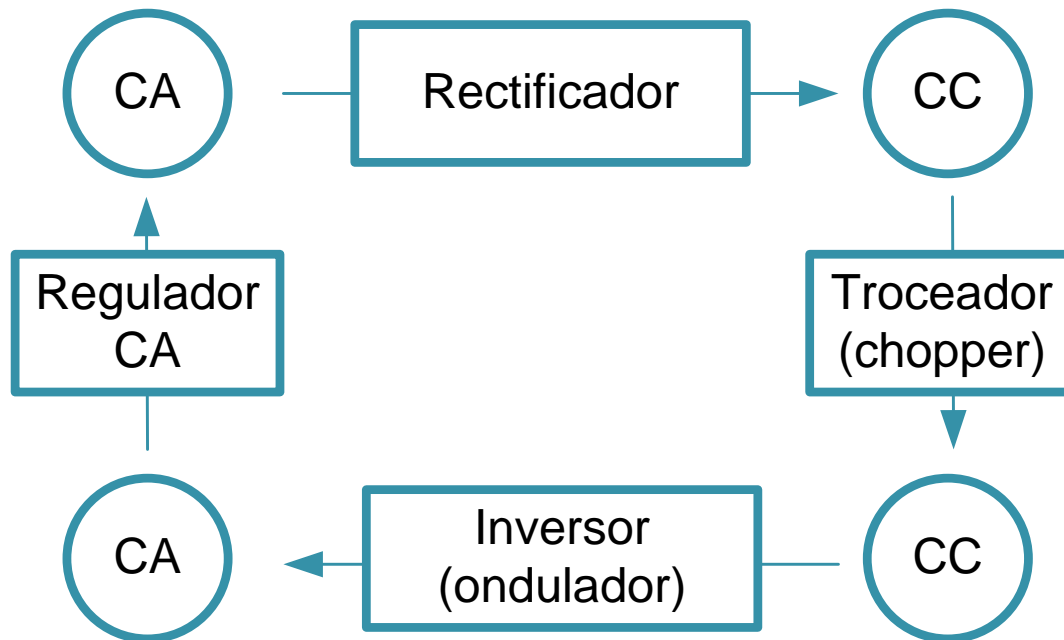
- Colector de delgas para máquinas de **CC**. Rectificación

$$e = -\frac{\partial \phi}{\partial t} = \oint (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}$$



Accionamientos

- Las dos formas útiles de la energía eléctrica es la CC y la CA
- Podemos convertir un tipo de energía en otra.



- [621.313 FRA MAQ] Máquinas Eléctricas. Jesús Fraile Mora. McGraw-Hill. 6ª edición
- [621.3.049 MAR PRO] Prontuario para el diseño eléctrico y electrónico. Salvador Martínez García. Marcombo - Boixareu editores
- [621.3.049 TEO DEC VOL. 1 y 2] Teoría de Circuitos. V. Parra, J. Ortega, A. Pastor, A. Pérez. UNED

B

BIBLIOGRAFÍA