



FACULTAD DE INGENIERIA
en acción continua...

CIRCUITOS MAGNÉTICOS

Electrotecnia y Máquinas Eléctricas

20/02/2020

Elementos Fundamentales

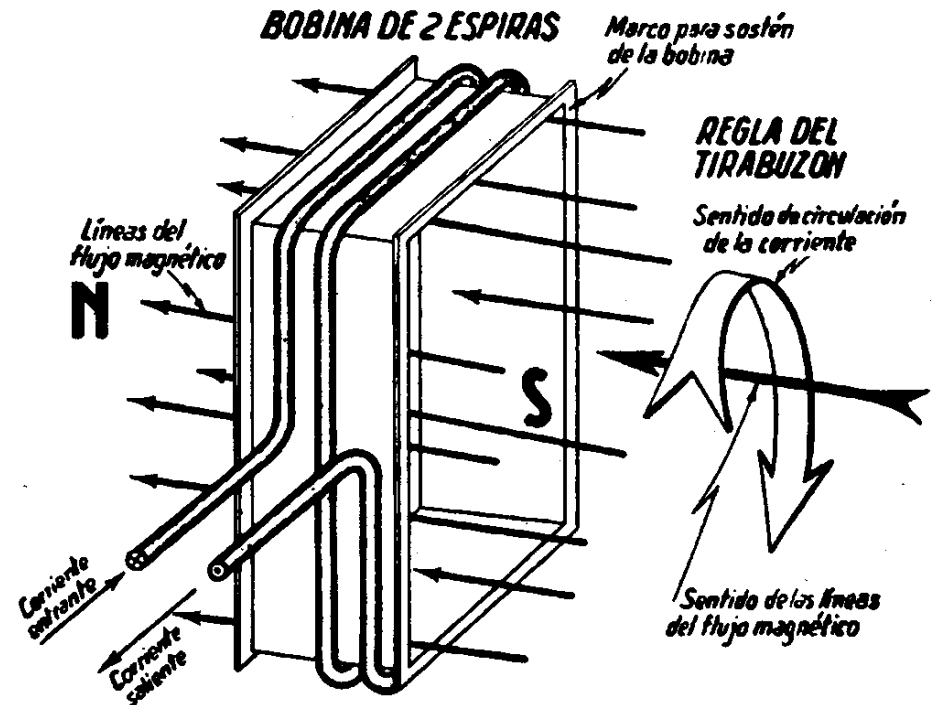
Flujo magnético

$$\Phi = B \cdot S$$

Φ = flujo magnético [Wb] ;

B = Inducción en [Wb/m²]

S = sección recta por donde pasa el flujo en [m²]



Arrollamientos en vacío

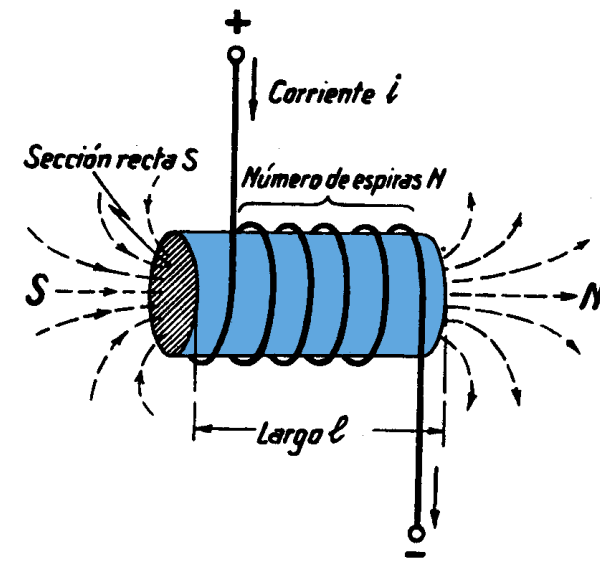
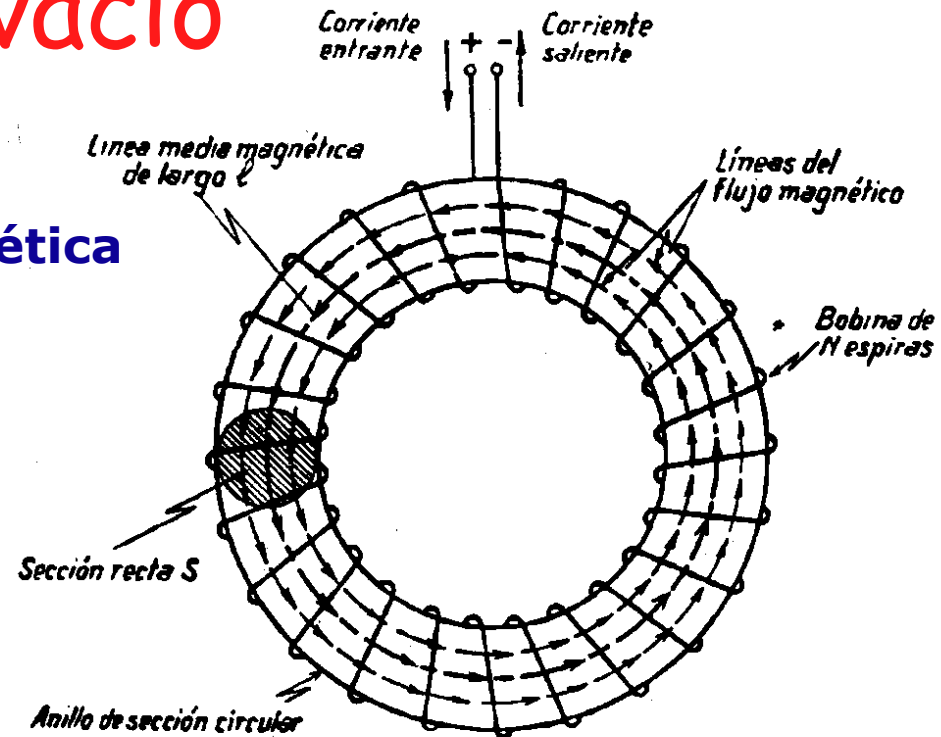
$$B = \mu_0 \cdot \frac{N \cdot I}{l} \quad \text{Inducción magnética}$$

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} = 1,2566 \times 10^{-6} \text{ [H/m]}$$

permeabilidad del vacío

$$H = \frac{N \cdot I}{l} \quad \text{Intensidad de campo o excitación magnética}$$

$$[\text{A.v/m}] = [\text{ampere vuelta por metro}]$$

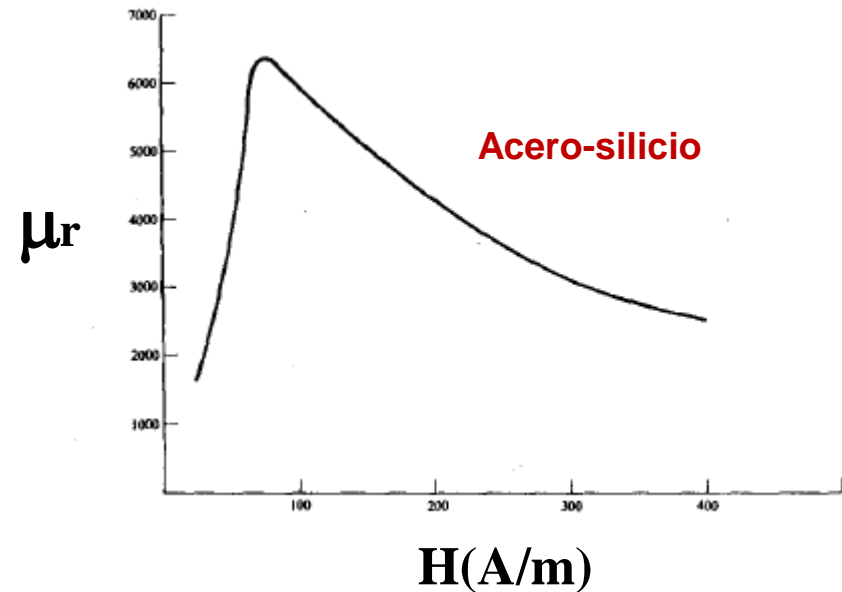
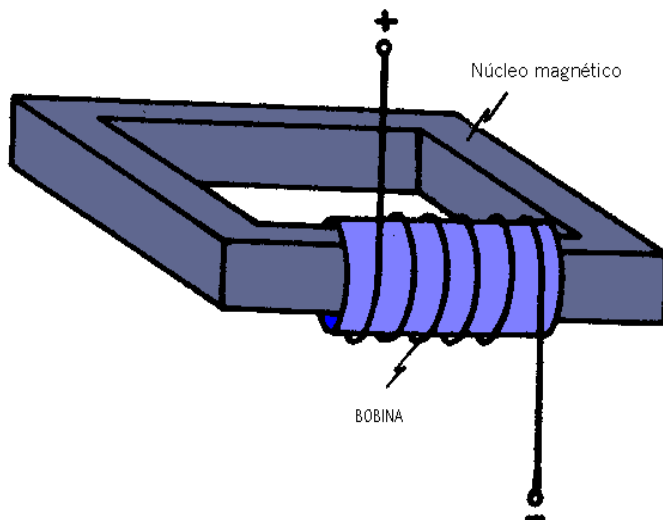


Arrollamientos con núcleo magnético

$$B = \mu_0 \frac{\mu_r Ni}{l}$$

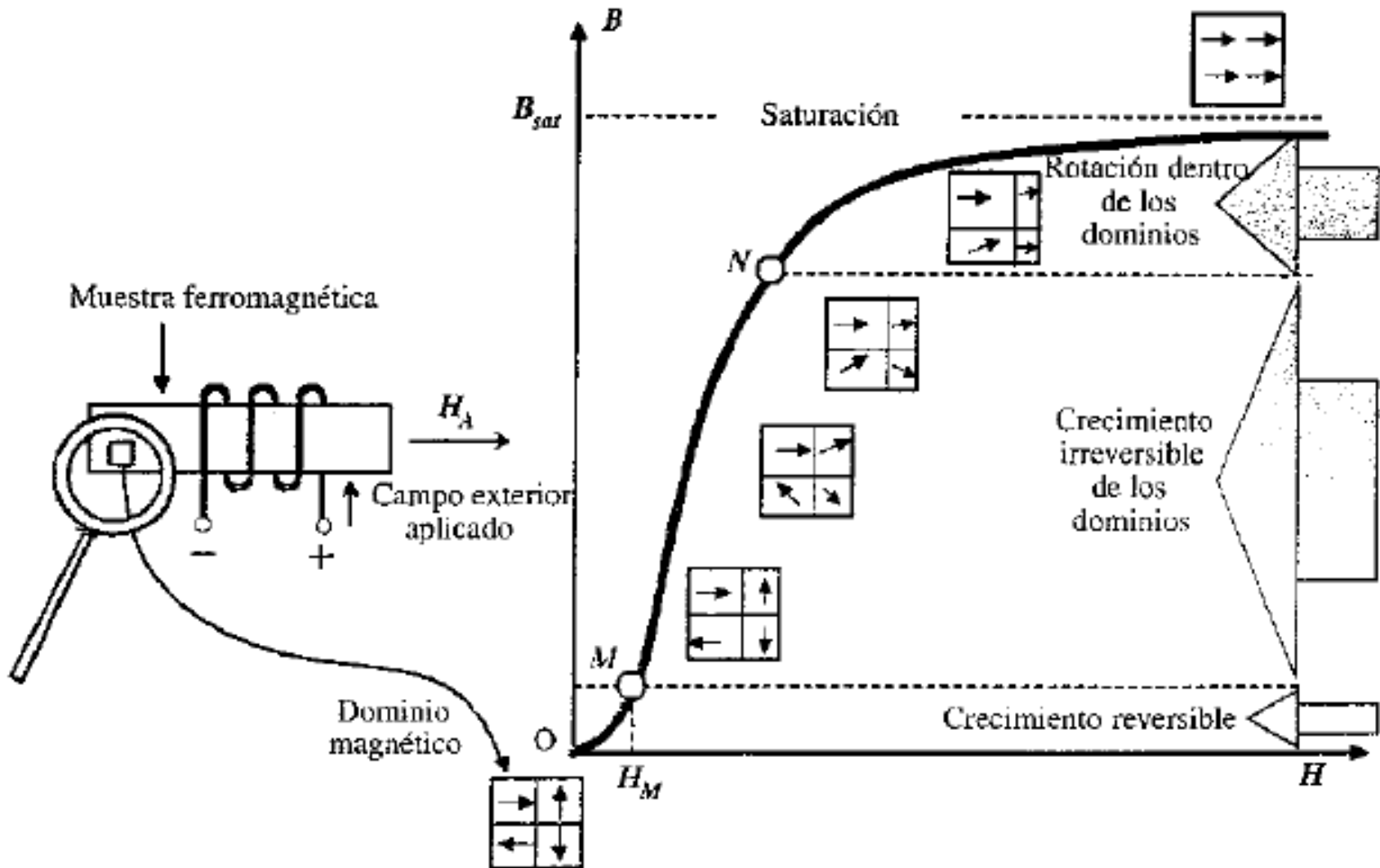
μ_r (permeabilidad relativa)

$$B = \mu_0 \mu_r H$$



$$\mu = \mu_0 \mu_r \text{ (permeabilidad absoluta)} = B/H$$

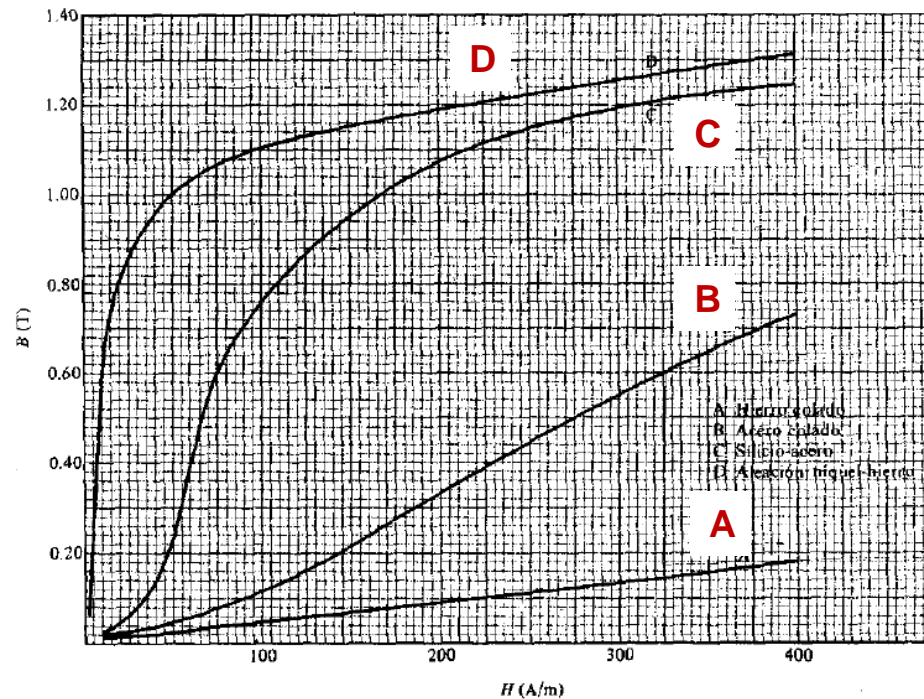
Propiedades de los ferromagnéticos



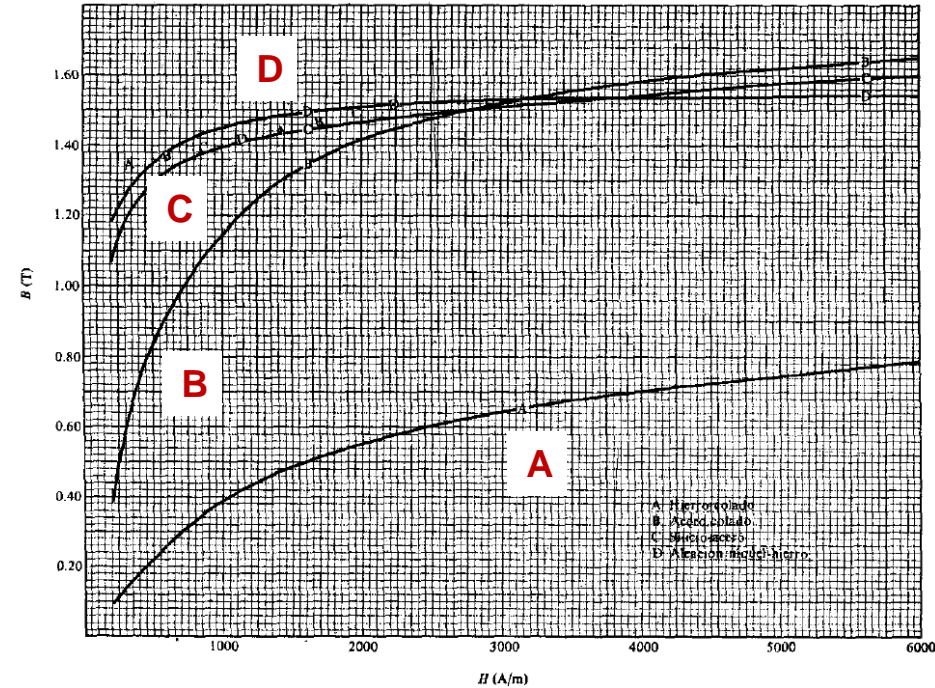
Curvas de imantación $B = f(H)$

pendiente $\rightarrow \mu = \frac{B}{H}$

A-Hierro colado
B-Acero colado
C- Silicio-Acero
D- Aleación níquel-hierro



$H < 400$ A/m



$H > 400$ A/m

Ley de Hopkinson

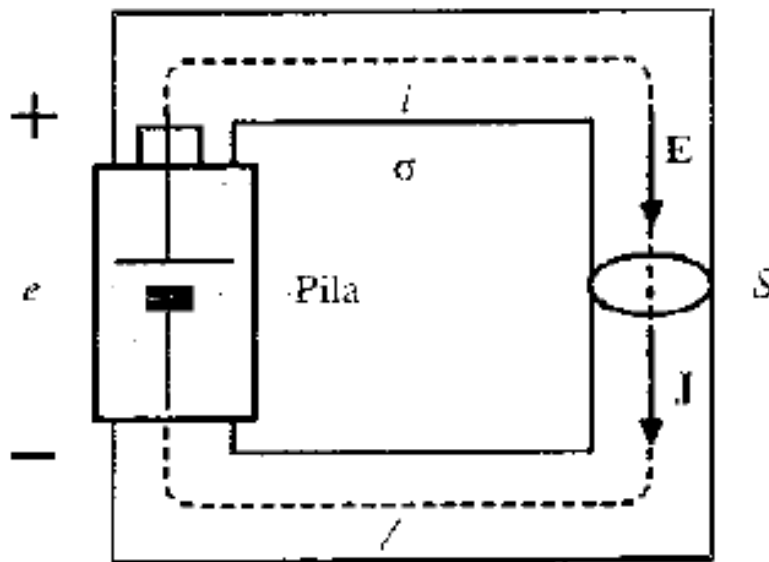
$$\phi = B \cdot S = \frac{N \cdot I}{\frac{l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S}} \quad \rightarrow \quad \phi = \frac{F}{\mathcal{R}}$$

ϕ [Wb] (flujo magnético)

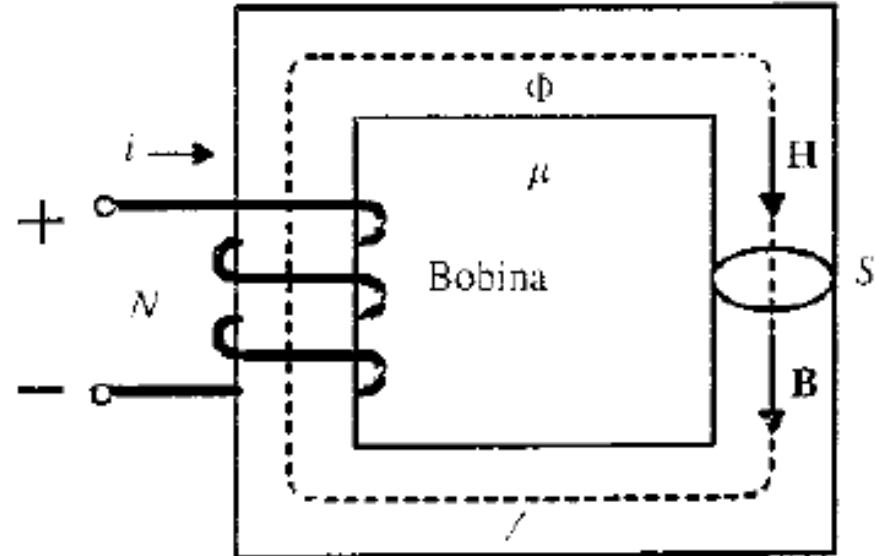
$F = N \cdot I$ [A] (Fuerza magnetomotriz)

$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S}$ [H^{-1}] (Reluctancia)

Analogía circuito eléctrico-circuito magnético



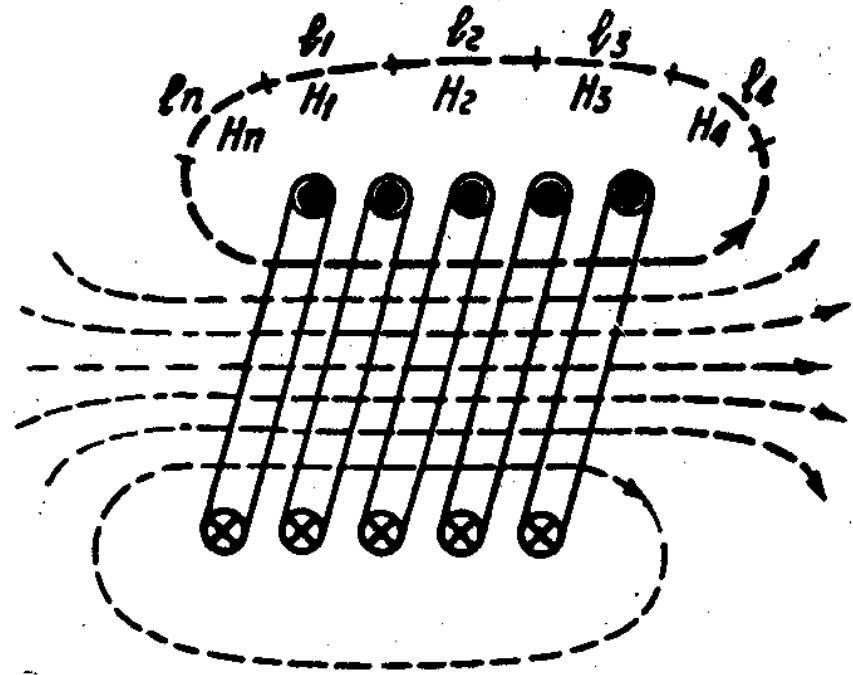
a) Circuito eléctrico



b) Circuito magnético

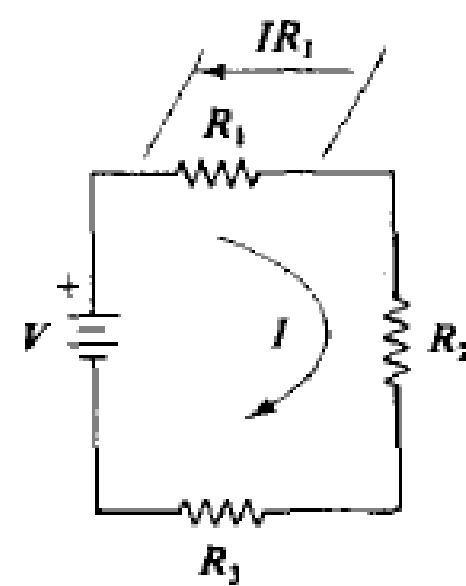
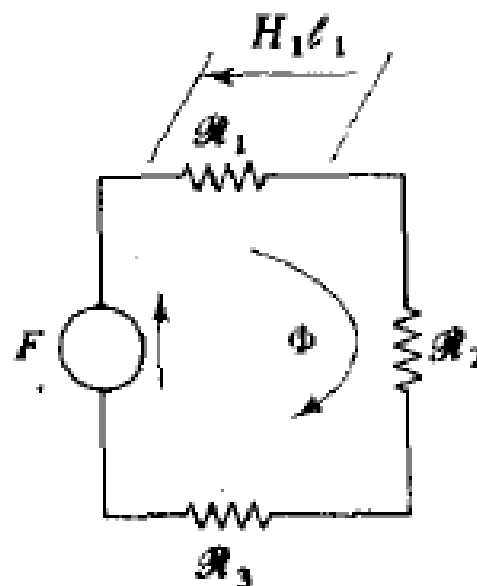
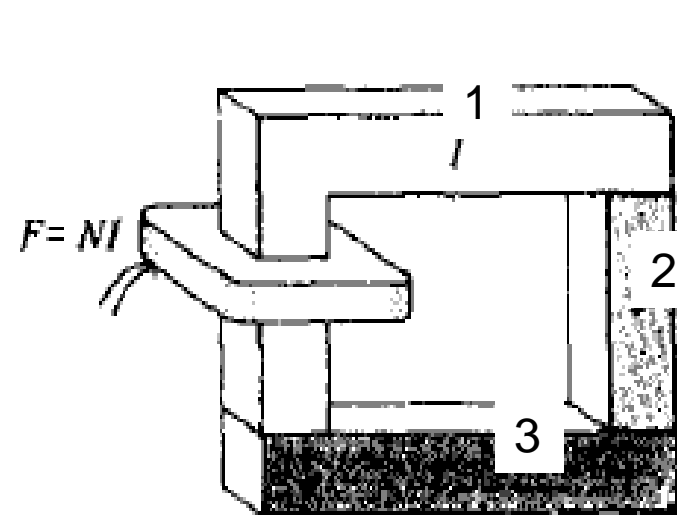
Ley de Ampere o de la circuitación

$$F = N.I = \oint H. dl$$



$$F = \int_1 H. dl + \int_2 H. dl + \int_3 H. dl$$

Ley de Ampere o de la circuitación



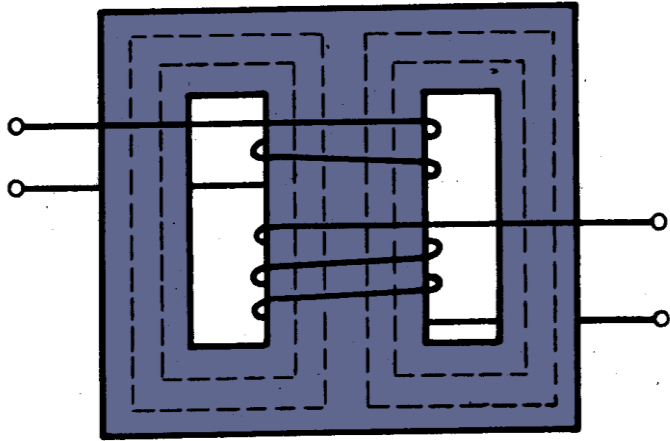
$$F = \sum H_i \cdot l_i \Rightarrow F = H_1 \cdot l_1 + H_2 \cdot l_2 + H_3 \cdot l_3$$

Circuitos magnéticos

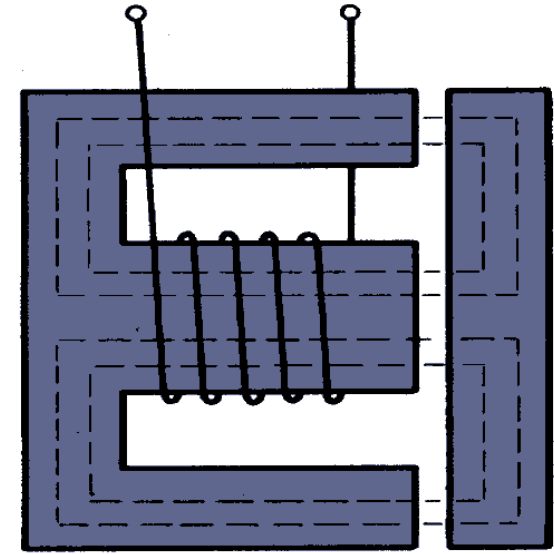
Descripción

- Es una sucesión de piezas metálicas ensambladas o vinculadas, de manera de contener y encauzar las líneas de flujo hacia un lugar deseado.
- Función: asegurar un flujo útil Φ en un determinado lugar de una máquina o aparato eléctrico, transformadores, aparatos de medida, etc.
- Características:
 - Núcleo (hierro dulce, hierro aleado, laminado)
 - Bobinas excitadoras ("de excitación", o "excitatrices").
 - Corriente de excitación.
 - Entrehierros
 - Dispersión.

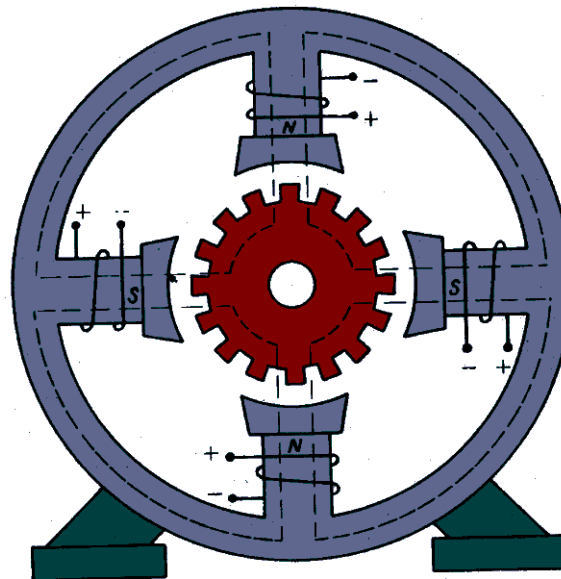
Aplicaciones



Transformador monofásico acorazado



Relevador (relé o relay)



Máquina de corriente continua de 4 polos

Dispersión

$$\phi_t = \phi + \phi_d$$

 Φ

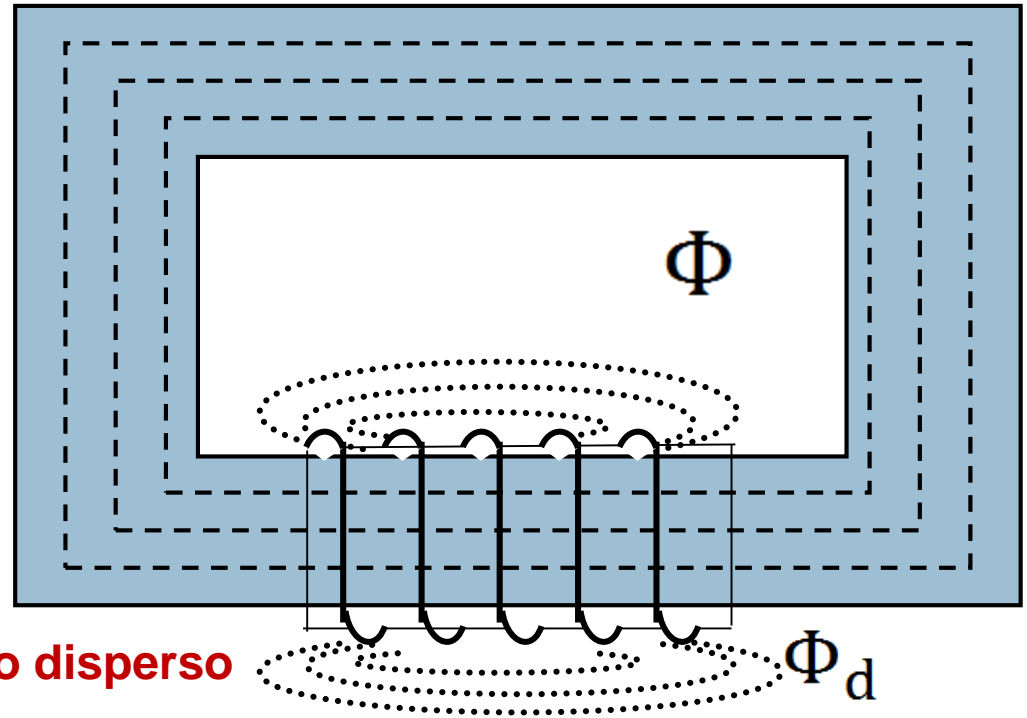
Flujo útil

 Φ_d

Dispersión o flujo disperso

 Φ_t

Flujo total que debe generar la bobina.



$$\sigma = \frac{\Phi_d}{\Phi_t}$$

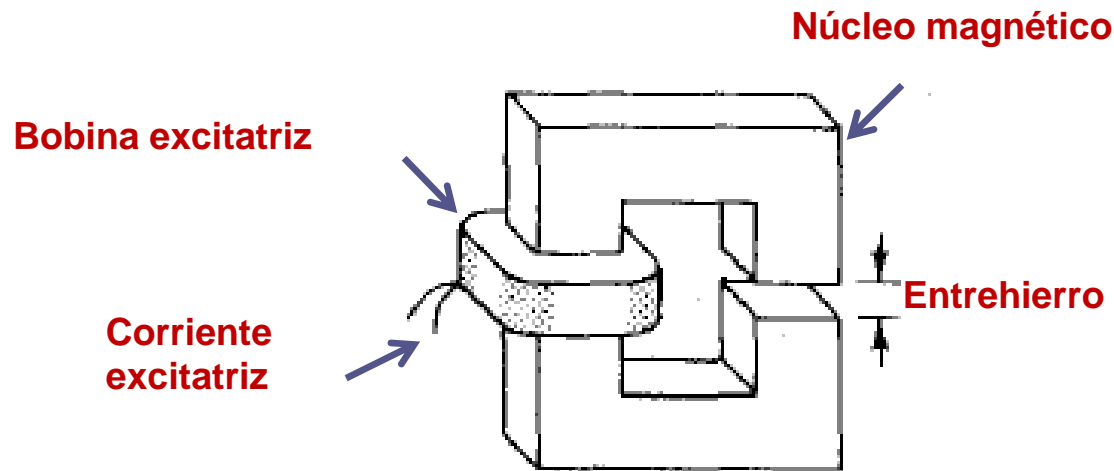
(Coeficiente de dispersión)



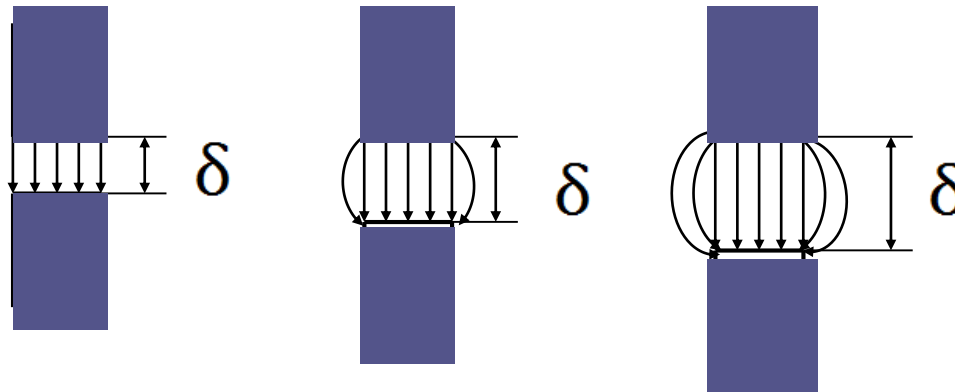
≈ 1- 5 %

Entrehierros

- Son tramos en los cuales el flujo magnético se establece por el aire.



- Las líneas de inducción "se expanden" para valores distintos del entrehierro δ .

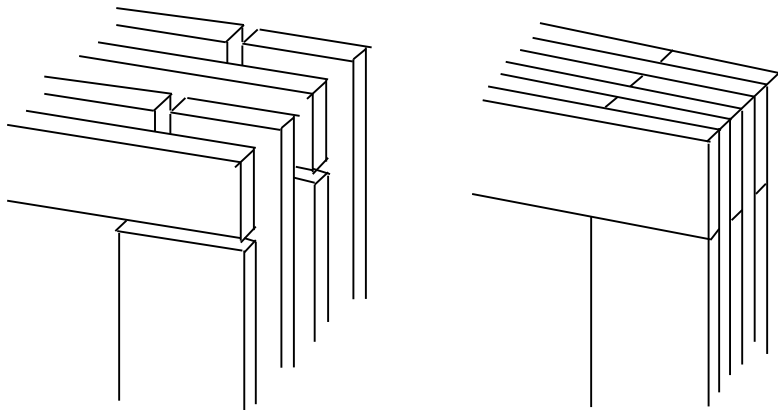
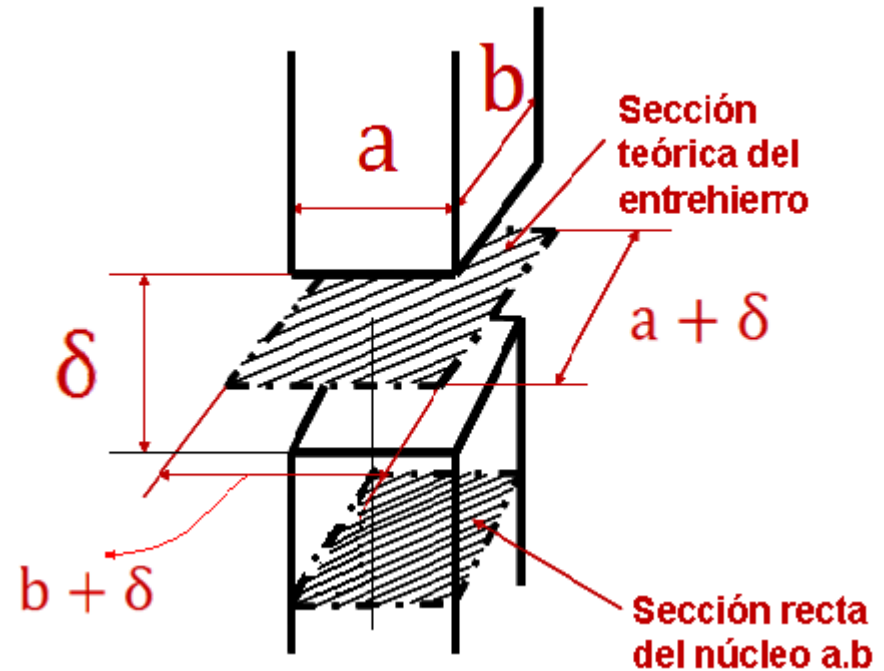


Entrehierros

$$S_{\delta} = (a + \delta) \cdot (b + \delta)$$

$$(\delta < 10\% \text{ mín } \{a, b\})$$

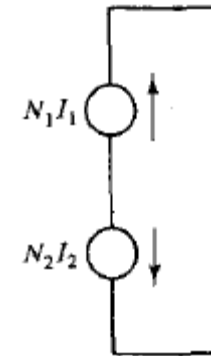
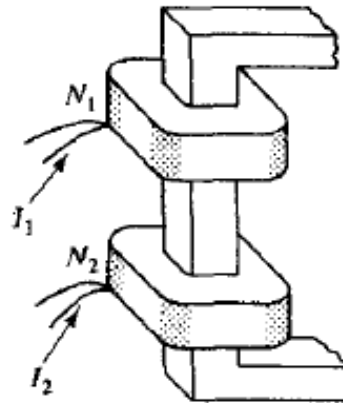
$$\delta = 0,035 - 0,05 \text{mm}$$



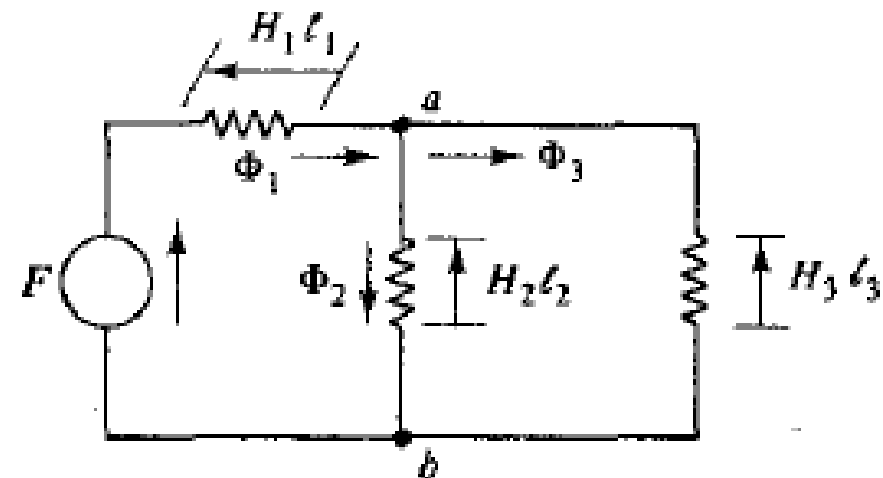
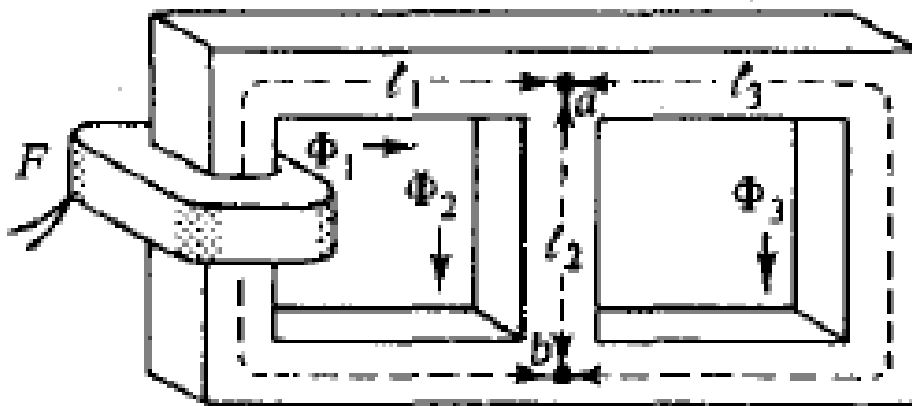
La caída de tensión magnética $H.l$ en el espacio de aire es mucho mayor que en el núcleo.

Configuraciones comunes

- Bobinas múltiples



- Circuitos magnéticos en paralelo



Factor de LAMINADO

$$B_{Fe} = \frac{\phi}{S_{Fe}} = \frac{\phi}{K_L \cdot (a \cdot b)}$$

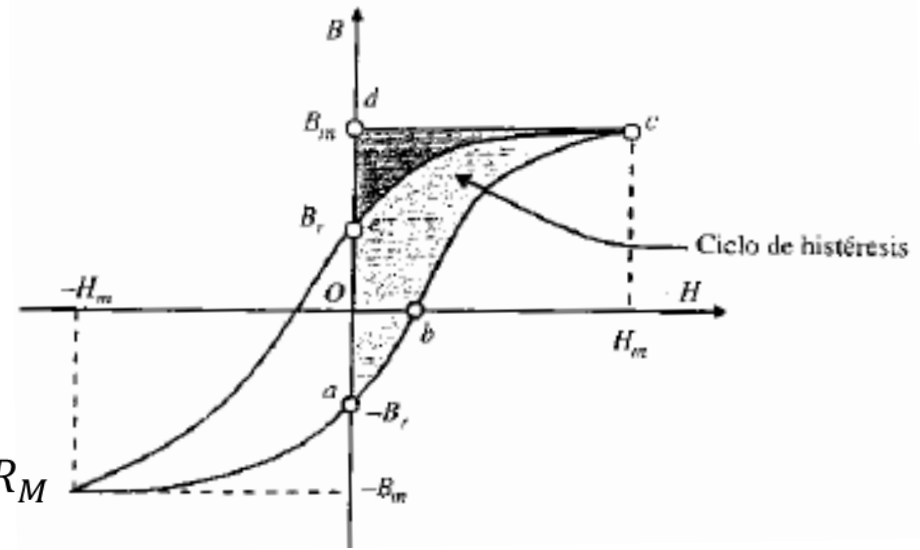
K_L = factor de laminado 0,85 a 0,95

Pérdidas magnéticas

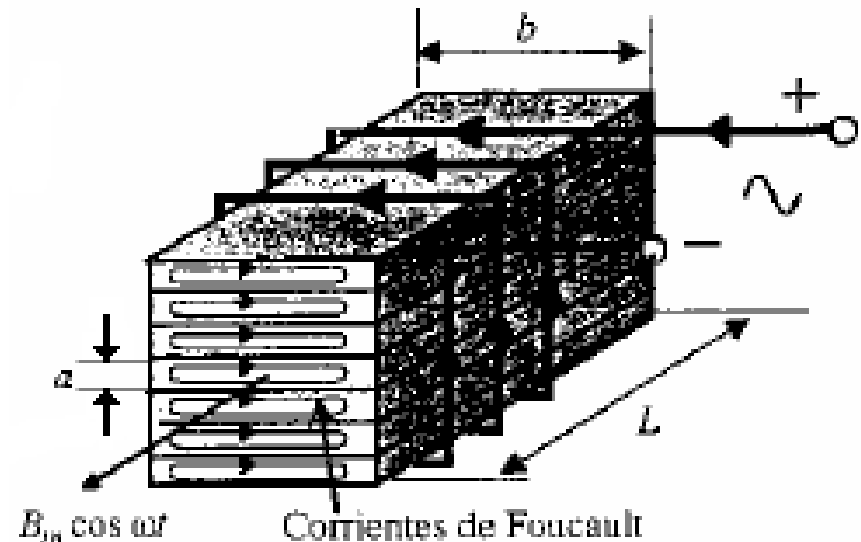
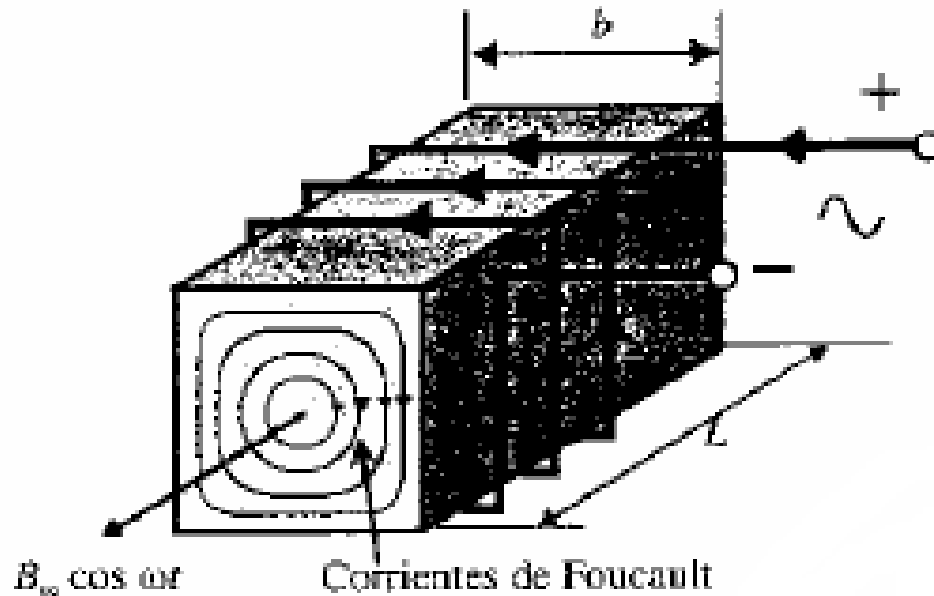
- **Por histéresis**

$$\mathcal{R}_M = \frac{L}{\mu \cdot S} = \frac{L}{\mu \cdot a \cdot b}$$

$$R_{Lamina} = \frac{L}{\mu \cdot S} = \frac{L}{\mu \cdot \frac{a}{100} \cdot b} = \frac{100 \cdot L}{\mu \cdot a \cdot b} = 100 \cdot \mathcal{R}_M$$

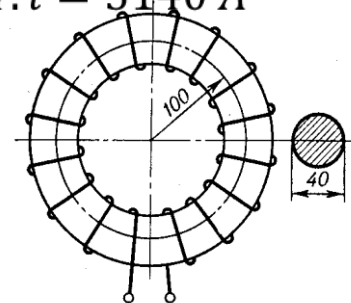


- **Por corrientes parásitas o de Foucault**



ANEXO I

- **Ejemplo 1.-** En un núcleo de forma anular de acero al silicio hay que obtener el flujo magnético $\phi = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$. Determinar:
 - a) la corriente en el devanado, que tiene $N = 100$ espiras
 - b) la permeabilidad magnética del acero dado el flujo en el núcleo
- La sección del núcleo es; $S = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 12,56 \text{ cm}^2$
- Considerando constante la inducción magnética por la sección del núcleo, hallamos su valor: $B = \frac{\phi}{S} = 1,6 \text{ T}$
- Por la curva de imanación determinamos H ; $H = 50 \text{ A/cm} = 5000 \text{ A/m}$
- La fuerza magnetomotriz necesaria para crear el flujo dado: $F = H \cdot l = 3140 \text{ A}$
- La corriente en el devanado es $I = \frac{F}{N} = 31,4 \text{ A}$
- La permeabilidad del material es $\mu = B/H = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ H/m}$



Problema recíproco:

Dada la fmm (F) hay que hallar el flujo magnético magnético en el circuito (ϕ)

1. Se determina la intensidad de campo en el núcleo: $H = \frac{N.I}{l}$
2. Con la curva de imanación del material dado, se halla la inducción magnética B.-
3. Se determina el flujo: $\phi = B.S$

Ejemplo 2:

Determinar el flujo magnético y la reluctancia del núcleo de la figura (dimensiones en mm).

N=200 espiras; I= 6A

Material: acero al silicio (el 10% de su sección lo ocupa el aislamiento entre chapas, o lo que es lo mismo su factor de laminado es de $K_l=0,90$)

$$F = N.I = 1200A; H = \frac{F}{l} = \frac{1200Av}{80cm} = \frac{15Av}{cm} = \frac{1500Av}{m}$$

$$S' = 25cm^2; S = S'.K_l = 25cm^2 \cdot 0,90 = 22,5 cm^2; \phi = B.S = 1,42T \cdot 25cm^2 = 32 \cdot 10^{-4}Wb; \mu = \frac{B}{H} = 0,95 \cdot \frac{10^{-3}H}{m}$$

Entonces la reluctancia es: $\mathcal{R} = \frac{l}{\mu.S} = 3,74 \cdot 10^5 \cdot H^{-1}$

CIRCUITO MAGNÉTICO HETEROGÉNEO NO RAMIFICADO:

Es un circuito magnético que se compone de varias partes, que en general se distinguen en longitud, sección y material.

Frecuentemente, además de las partes de material ferromagnético tienen entrehierro.

Problema Directo:

Se conocen las dimensiones y los materiales de las distintas partes del circuito, el flujo es dado. Hay que determinar la F.m.m.

La resolución es análoga a la del circuito homogéneo, pero B y H se determinan para cada parte.

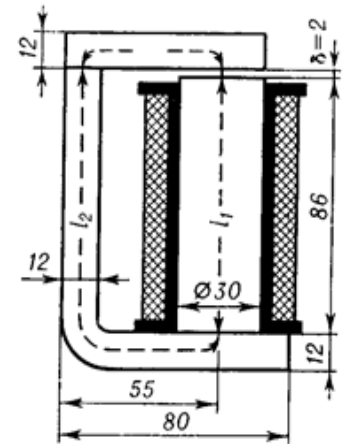
Para la k-ésima parte : $B_k = \frac{F}{S_k}$ Con todos los B_k se determinan las

H_k : para materiales ferromagnéticos, con las curvas de imantación.

Para entrehierros y otras partes no ferromagnéticas por la fórmula:

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0}$$

$$\text{Luego: } F = N \cdot I = \sum H_k \cdot l_k = H_1 \cdot l_1 + H_2 \cdot l_2 + \dots + H_0 \cdot \delta$$



Problema recíproco:

Determinación del flujo a partir de la F.M.M.

El problema se puede resolver por iteración. Cuando en el circuito hay un entrehierro el primer valor del flujo magnético se puede tomar considerando la reluctancia del entrehierro igual a la reluctancia de todo el circuito magnético. Esto se basa en que la reluctancia magnética del entrehierro es bastante mayor que toda la parte restante del circuito, producida de materiales ferromagnéticos.

Como primera aproximación: $F^{(0)} = \frac{N.I}{\frac{\delta}{\mu_0.S}}$

Con este valor, calculamos la inducción magnética del resto de las partes ferromagnéticas, con ésta, la permeabilidad y por último la reluctancia de cada una. Una segunda aproximación sería:

$$F^{(1)} = \frac{N.I}{\sum_{i=1}^n \mathcal{R}_i} = \frac{N.I}{\left(\frac{\delta}{\mu_0.S_0}\right) + \left(\frac{l_1}{\mu_1.S_1}\right) + \left(\frac{l_2}{\mu_2.S_2}\right) + \dots + \left(\frac{l_n}{\mu_n.S_n}\right)}$$

Se repite el procedimiento anterior hasta que el error $\frac{F^{(n)} - F^{(n-1)}}{F^{(n)}} \cdot 100$ sea menor al requerido.-

CIRCUITO MAGNÉTICO RAMIFICADO:

En esta clase de circuitos los flujos magnéticos son distintos en las diferentes ramas.

Para resolverlos podemos valerlos de ecuaciones de nudo y contorno, similares a las leyes de Kirchhoff utilizadas para resolver circuitos eléctricos.

$$\sum_{i=1}^n \phi_i = 0$$

Teniendo en cuenta los sentidos de los flujos. Positivo para aquellos que entran al nudo y negativo para los que salen.

El equivalente magnético a la ley de las mallas es: $\sum_{j=1}^n (H \cdot l)_j = 0$ para una malla o camino cerrado.

En base a lo expuesto puede resolverse el circuito magnético con las mismas técnicas empleadas para la resolución de un circuito eléctrico.