



Electrotecnia: **Análisis de circuitos** **Circuitos magnéticos**

Departamento de Informática y Automática
UNIVERSIDAD DE SALAMANCA





Propiedades magnéticas de materiales

- ✎ Campos magnéticos creados por cargas móviles o corrientes que circulan por conductores en vacío
- ✎ Equipos (transformador, motor, generador,...) contienen hierro
 - ✓ Para aumentar el flujo magnético y limitarlo a una región
- ✎ Todos los materiales presentan propiedades magnéticas en mayor o menor escala
- ✎ Clasificación de un material según se comporte en un campo magnético
 - ✓ Paramagnético
 - ✓ será atraído a la región donde el campo es más intenso
 - ✓ Diamagnético
 - ✓ será atraído a la región donde el campo es más débil
 - ✓ Ferromagnético
 - ✓ será atraído a la región donde el campo es más intenso (influencia mayor)



Circuitos magnéticos

Circuitos magnéticos.

B inducción

H intensidad del campo magnético.

Analogías entre circuitos eléctricos y magnéticos.

Leyes.

1.- $\text{div } \mathbf{B} = 0$ Las líneas del c. m. son cerradas. Confinamiento del campo.

2.- $\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J}$ Segunda ley de Ampere. En forma integral es:

$$\oint_c \mathbf{H} d\mathbf{l} = \int_S \mathbf{J} d\mathbf{s} = \sum i = Ni = F = f.m.m.$$

La circulación de H a lo largo de un camino cerrado es igual a la suma de las corrientes que lo atraviesan.

3.- $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ μ es la permeabilidad del material.

4.- Pérdidas de potencia en los núcleos magnéticos. Pérdidas por histéresis y pérdidas por corrientes de Foucault.



Permeabilidad magnética

✎ En un arrollamiento toroidal de espiras próximas

- ✓ El campo magnético está limitado al espacio encerrado por el arrollamiento
- ✓ Devanado de hilo = "arrollamiento magnetizante"
- ✓ Corriente por devanado de hilo = "corriente magnetizante"

$$B = \mu_0 \frac{NI}{l}$$

- ✓ I intensidad, l longitud del conductor, N número de espiras, μ_0 permeabilidad magnética del vacío

✎ Si el núcleo del toroide es una sustancia ferromagnética (hierro)



Circuitos magnéticos

👉 Toroide con sustancia ferromagnética

- ✓ Intensidad de campo magnético (excitación magnética)

$$H = \frac{NI}{l}$$

○ no aparece
en su definición

- ✓ Relación entre B y H

$$B = \mu H$$

- ✓ Flujo magnético

$$\Phi = BS = \frac{\mu NIS}{l} \Rightarrow \Phi = \frac{NI}{\frac{l}{\mu S}}$$

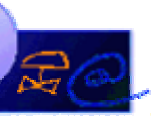
- ✓ Fuerza magnetomotriz

$$F_m = \frac{NI}{l}$$

- ✓ Reluctancia magnética

$$R_m = \frac{l}{\mu S}$$

$$\Phi = \frac{F_m}{R_m}$$



Circuitos magnéticos

👉 Circuito magnético

- ✓ Camino cerrado de material ferromagnético sobre el que actúa la fuerza magnetomotriz

👉 Flujo magnético

- ✓ Número total de líneas de inducción que existen en el circuito magnético

👉 Fuerza magnetomotriz (Amperios)

- ✓ Causa imanadora que produce el flujo a través del circuito magnético

👉 Reluctancia magnética (1/Henrios) (H^{-1})

- ✓ Mayor o menor oposición que ofrece el circuito magnético al establecimiento del flujo

$$\left. \begin{array}{l} F_m = NI \\ R_m = \frac{l}{\mu S} \end{array} \right\} \Phi = \frac{F_m}{R_m}$$



Circuitos magnéticos

Analogía entre magnitudes eléctricas y magnéticas

Electricidad	Magnetismo
Fuerza electromotriz (E)	Fuerza magnetomotriz (Fm)
Intensidad (I)	Flujo magnético (Φ)
Resistencia eléctrica (R)	Reluctancia magnética (Rm)
Ley de Ohm $E = I \cdot R$	Ley de Hopkinson $Fm = \Phi \cdot Rm$
Primera ley de Kirchhoff (circuito paralelo) $I = \Sigma I$ $E = E_1 = E_2 = \dots = E_n$	Primera ley de Kirchhoff (circuito paralelo) $\Phi = \Sigma \Phi$ $Fm = Fm_1 = Fm_2 = \dots = Fm_n$
Segunda ley de Kirchhoff (circuito serie) $\Sigma E = \Sigma RI$ $I = I_1 = I_2 = \dots = I_n$	Segunda ley de Kirchhoff (circuito serie) $\Sigma Fm = \Sigma Hl$ $\Phi = \Phi_1 = \Phi_2 = \dots = \Phi_n$



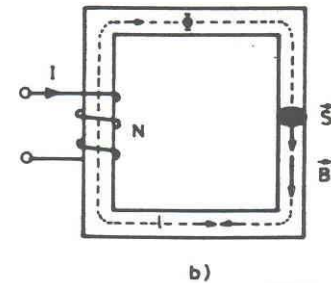
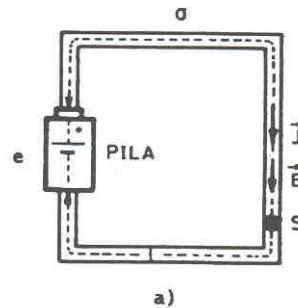
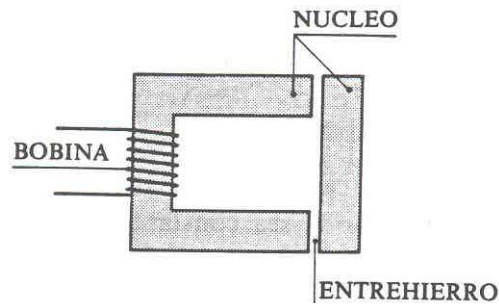
Circuitos magnéticos

CIRCUITO ELECTRICO	CIRCUITO MAGNETICO
e: f.e.m.	\mathcal{F} : f.m.m.
J: densidad de corriente	B : inducción
σ : conductividad	μ : permeabilidad
E : campo eléctrico	H : campo magnético
i: corriente eléctrica	Φ : flujo magnético
V: potencial eléctrico	V_m : potencial magnético

CIRCUITO ELECTRICO	CIRCUITO MAGNETICO
Primer lema de Kirchhoff	
$\Sigma i = 0$	$\Sigma \Phi = 0$
Segundo lema de Kirchhoff	
$\Sigma e = \Sigma R i$	$\Sigma \mathcal{F} = \Sigma \mathcal{R} \Phi$
Resistencia: $R = \frac{1}{\sigma} \frac{\ell}{s}$	Reluctancia $\mathcal{R} = \frac{1}{\mu} \frac{\ell}{s}$
Resistencias en serie:	Reluctancias en serie:
$R_T = \Sigma R_i$	$\mathcal{R}_T = \Sigma \mathcal{R}_i$
Resistencias en paralelo:	Reluctancias en paralelo:
$\frac{1}{R_T} = \Sigma \frac{1}{R_i}$	$\frac{1}{\mathcal{R}_T} = \Sigma \frac{1}{\mathcal{R}_i}$



Circuitos magnéticos



<i>Magnitud</i>		<i>Unidad</i>	
B	Inducción magnética	T	(Tesla)
H	Excitación magnética	A/m	(amperio/metro)
J	Densidad de corriente	A/m ²	(amperio/metro ²)
I	Corriente eficaz	A	(amperio)
i	Corriente instantánea	A	(amperio)
Φ	Flujo magnético	Wb	(Weber)
\mathcal{F}	Fuerza magnetomotriz	A-v	(amperivuelta)
M	Magnetización	A/m	(amperio/metro)
W_{mg}	Energía magnética	J	(julio)
μ_r	Permeabilidad relativa	sin dimensiones	



Circuitos magnéticos

a) Fuerza electromotriz : $\mathcal{E} = \oint_{\gamma} \mathbf{E}_g \cdot d\mathbf{l}$

b) Principio de continuidad: $\text{div } \mathbf{J} = 0$

c) Ley de Ohm diferencial: $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$ (1.20)

d) Corriente eléctrica: $i = \int_s \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s}$

e) D.d.p. entre dos puntos: $V_{12} = V_1 - V_2 = \int_1^2 \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$

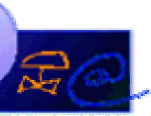
a) Fuerza magnetomotriz (ley de Ampère) : $\mathcal{F} = \oint_{\gamma} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l}$

b) Carácter solenoidal de B: $\text{div } \mathbf{B} = 0$

c) Relación del medio: $\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H}$ (1.21)

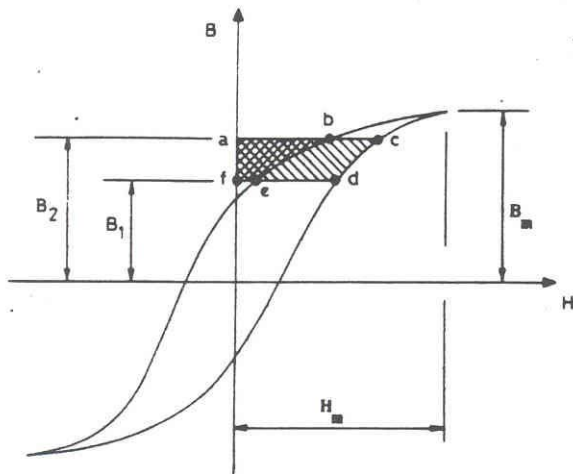
d) Flujo magnético: $\Phi = \int_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}$

e) D.d.p magnético: $V_{m1} - V_{m2} = \int_1^2 \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l}$



Circuitos magnéticos

PERDIDAS POR HISTERESIS

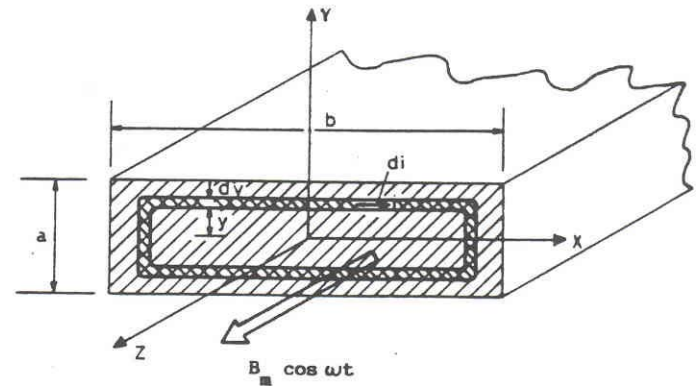


$$W_H = V \cdot \oint H \cdot dB$$

$$P_H = f \cdot W_H = f \cdot V \cdot (\text{área del ciclo})$$

$$P_H = k_H \cdot f \cdot V \cdot B_m^\alpha$$

PERDIDAS POR CORRIENTES DE FOUCAULT



$$P_F/V = \pi^2 f^2 B_m^2 a^2 \sigma / 6 = K_F f^2 B_m^2 a^2 \sigma$$

$$P_{Fe} = (K_H \cdot f \cdot B_m^\alpha + K_F f^2 B_m^2 a^2 \sigma) V$$