

Tema:  
“Circuitos Magnéticos”.

Facultad de Ingeniería.  
Escuela de Eléctrica.  
Asignatura: Teoría E.

## I. OBJETIVOS.

- Verificar las magnitudes electromagnéticas básicas, sus unidades, y la validez de sus relaciones mediante su determinación por cálculo y medición.
- Estudiar experimentalmente los distintos procesos electromagnéticos, mediante el uso de instrumental de laboratorio.
- Analizar, diferenciar y resolver circuitos magnéticos en corriente directa, por aplicación de sus leyes fundamentales.
- Encontrar de manera analítica los valores de f.e.m, intensidad de flujo y densidad de flujo magnético en base a un circuito magnético implementado.

## II. INTRODUCCIÓN.

### 1.- LEYES FUNDAMENTALES DE CIRCUITOS MAGNÉTICOS

a) Ley de Ampere: Es la ley básica que rige la producción de campo magnético por medio de una corriente y su ecuación es

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_{\text{neta}}$$

Donde H: Intensidad de campo producida por  $I_{\text{neta}}$ .

Para entender mejor el significado de la ecuación anterior es útil aplicarla al ejemplo en que un núcleo de hierro u otro material ferromagnético, tiene un bobinado de alambre de N vueltas en torno a una columna del núcleo como se muestra en la figura 1.

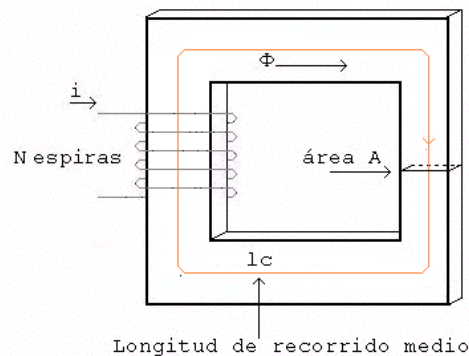


Figura 1. Núcleo magnético sencillo.

Por lo tanto todo el campo magnético producido por la corriente permanecerá esencialmente dentro del núcleo, de tal modo que el recorrido de integración de la ley de Ampere será  $l_c$ . La corriente que pasa dentro del recorrido de integración  $I_{neta}$  es entonces,  $N * i$ , puesto que la bobina abraza el recorrido de integración  $N$  veces, mientras conduce la corriente  $i$ . La ley de amper se vuelve entonces

$$H * l_c = N * i$$

Por consiguiente la magnitud de intensidad de campo magnético en el núcleo, debido a la corriente aplicada es

$$H = (N * i) / l_c$$

b) Densidad de campo magnético (B):

La densidad de flujo magnético producido en un material está dada, por el producto de dos terminos. Su relación es la siguiente:

$$B = \mu * H$$

Donde: H: Intensidad de campo magnético: que representa el esfuerzo que ejerce la corriente para establecer un campo magnético. Su unidad es (Amper\* vuelta) / metro ( $A * V/m$ )

$\mu$  : Permeabilidad magnética del material: que representa el esfuerzo que realiza la corriente para establecer un campo magnético en un material dado. Su unidad es Henrio/metro (H/m)

B: Densidad de flujo magnético. Su unidad es Weber/metro<sup>2</sup>, Tesla (T)

c) Permeabilidad relativa ( $\mu_r$ ): Es la permeabilidad de cualquier otro material comparada con la permeabilidad del espacio libre.

$$\mu_r = \mu / \mu_0$$

Donde:  $\mu_0$ : Permeabilidad del espacio libre:  $\mu_0 = 4 \Pi * 10^{-7}$

Para el núcleo de la figura la magnitud de la densidad de flujo es  $B = \mu * H = (\mu * N * i) / l_c$

d) Flujo total ( $\phi$ ): El flujo total de un área dada se determina por :  $\phi = \int B * dA$ , donde:  $dA$ : unidad de diferencia de área.

Por lo tanto si el vector de densidad de flujo es perpendicular a un plano de área A, y si la densidad de flujo es constante en toda el área, entonces, la ecuación se reduce a:  $\phi = B * A$

Para el núcleo de la figura el flujo total debido a la corriente  $i$  en el bobinado es

$$\phi = B * A = (\mu * N * i * A) / l_m$$

Donde A: Area de corte transversal del núcleo.

e) Enlace de flujo ( $\lambda$ ): Es una forma de medir el magnetismo en una bobina, y su ecuación es  $\lambda = N * \phi$

## 2.- CIRCUITOS MAGNETICOS

Se entenderá por circuito magnético a una estructura ferromagnética acompañada de fuerzas magnetomotrices con la finalidad de canalizar líneas de fuerza magnéticas. Esta estructura puede contener espacios de aires atravesados por líneas de fuerza, estos espacios se conocen como entrehierros. Es posible determinar un circuito magnético debido a que su comportamiento esta regido por ecuaciones análogas a aquellas de un circuito eléctrico. En un sencillo circuito eléctrico, como el ilustrado en la figura 2.a, la fuente de voltaje  $V$ , en causa una corriente  $I$  alrededor del circuito, a través de una resistencia  $R$ . La relación entre cantidades se obtiene mediante la ley de Ohm.

Analogías entre circuito eléctrico y circuito magnético:

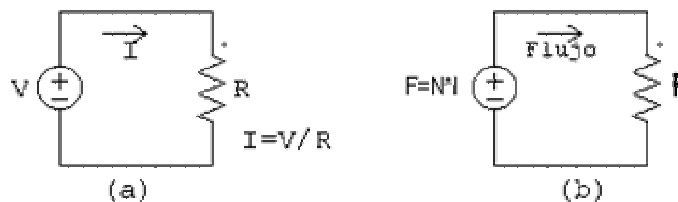


Figura 2. a) Un circuito electrico simple. b) El circuito magnético analogo a un núcleo de transformador.

- En un circuito eléctrico, el voltaje o fuerza electromotriz es la que impulsa el flujo, en un circuito magnético se llama fuerza magnetomotriz (f.m.m), y se expresa por la siguiente ecuación

$$F = N * i$$

Donde:

F: Fuerza magnetomotriz, y su unidad es amper por vuelta ( $A \cdot V$ ).

N: Numero de vueltas del bobinado.

I: Corriente aplicada, su unidad es el Ampere.

- En un circuito eléctrico, el voltaje aplicado causa el flujo de una corriente  $I$ . De modo semejante, en un circuito magnético la fuerza magnetomotriz aplicada causa la producción de un flujo magnético  $\Phi$ . La relación entre voltaje y corriente en un circuito eléctrico es la ley de ohm ( $V = I \cdot R$ ); de manera semejante, la relación entre fuerza magnetomotriz y flujo es:

$$F = \Phi * \mathfrak{R}$$

Donde

$\Phi$  : Flujo magnético en weber.

$\mathfrak{R}$  : Reluctancia del circuito.

La reluctancia en un circuito magnético es la contraparte de la resistencia eléctrica y su unidad es amper-vuelta por weber ( $A \cdot \text{vuelta} / \text{weber}$ )

- Las reluctancias en un circuito magnético obedecen las mismas reglas a que obedecen en un circuito eléctrico.

La reluctancia equivalente en un circuito serie es :  $R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$

La reluctancia en un circuito paralelo es:  $1/R_{eq} = 1/[(1/R_1) + (1/R_2) + (1/R_3) + \dots]$

### III. EQUIPO Y RECURSOS.

No.	Cantidad	Descripción	Código
1	1	Amplificador de aislamiento	LM6113
2	1	Medidor de corriente	S0- 5127- 1L
3	1	Fuente de Vac variable	ST-7007-4M
4	2	Medidor del valor efectivo RMS	S0- 5127- 1L
5	1	Fuente de voltaje Vdc variable (250V/2A)	ST-7006-2F
6	1	Osciloscopio de doble traza	HM205-3
7	1	Vatímetro electrónico	S0-5127-1R6
8	1	Resistencia variable de 0 a 16Ω	-----
9	2	Bobinas de 2.2 mH (N=250, I <sub>max</sub> =5A)	-----
10	1	Regla milimetrada / Cinta métrica	-----
11	1	Interruptor tetrapolar	SO3212-W
12	10	Cables de conexión	-----

#### IV. PROCEDIMIENTO.

##### Parte 1. Análisis de un circuito magnético sin entrehierro.

1. Haciendo uso de una regla graduada tome las medidas de las dimensiones del material ferromagnético proporcionado (lámina para transformador) según se muestra en la Figura 1a y 1b

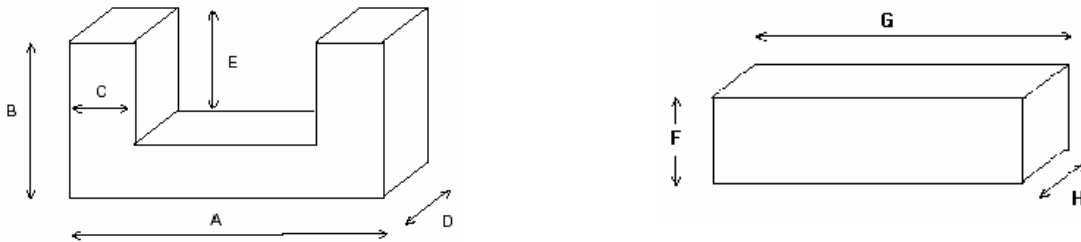


Figura 1a y 1b. Estructuras de material ferromagnético

A = \_\_\_\_\_ cm

B = \_\_\_\_\_ cm

C = \_\_\_\_\_ cm

D = \_\_\_\_\_ cm

E = \_\_\_\_\_ cm

F = \_\_\_\_\_ cm

G = \_\_\_\_\_ cm

H = \_\_\_\_\_ cm

2. Arme la estructura magnética mostrada en la figura 2, haciendo uso de la bobina de N=250 vueltas.

3. Asegure bien las partes del núcleo de laminas para transformador con la prensa proporcionada.

4. Encuentre la longitud media de la trayectoria para el circuito de la figura 2.

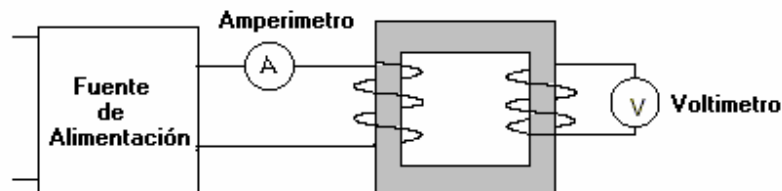


Figura 2

longitud media de trayectoria =  $l_m$  = \_\_\_\_\_ cm

5. Conecte el circuito a la fuente de alimentación variable ST-7006-2F. Para lo cual utilice las terminales A y E de la bobina.

6- Se alimentará una bobina del circuito con CA, estableciendo un valor de corriente de 1.5A en la bobina de la izquierda..

7- Mida la diferencia de potencial en la bobina de la derecha.

$V_x$  = \_\_\_\_\_ Volt.

8- Luego se cambiará la alimentación a CC y se regulará el valor de tensión necesario a fin de obtener la misma indicación de corriente en el amperímetro.

$V_y =$  \_\_\_\_\_ Volt.

**PARTE II : Análisis de circuitos magnéticos con entrehierros.**

1- Implemente el circuito de la figura 3 con el interruptor unipolar cortocircuitando la resistencia variable.

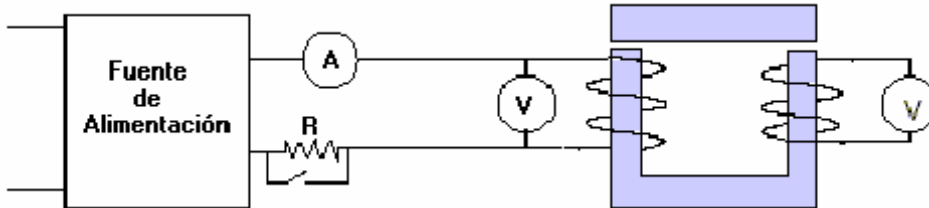


Figura 3

2- Alimente el circuito con un valor de tensión de CA de 30Vac a la bobina situada a la izquierda del núcleo y solamente se intentará retirar la parte desmontable del núcleo. Se observará y analizará el comportamiento del circuito frente a tal acción.

Explique el porqué de este fenómeno.

---



---



---

3. Realice al paso anterior pero utilizando CC e intente retirar la parte desmontable del núcleo. Que fenómeno observa? Compare con el paso 2 y explique las diferencias o similitudes de ambos resultados.

---



---



---

4- Se elevará la tensión hasta 50Vac y se medirán las diferencias de potencial en cada bobina, la corriente y potencia correspondientes.

$V_1 =$  \_\_\_\_\_ Volt  
 $I_1 =$  \_\_\_\_\_ Amp

$V_2 =$  \_\_\_\_\_ Volt  
 $I_2 =$  \_\_\_\_\_ Amp

5- Reduzca la tensión a cero y apague la fuente.

6- Se intercalarán como entre-hierro las lámina aislantes provistas (negra, roja y amarilla), y se elevará nuevamente la tensión al valor de 50Vac. Se registrarán los valores de tensión, de corriente y potencia correspondientes en ambas bobinas. Se analizarán las diferencias y similitudes con el caso del numeral 3 de esta parte. Complemente la tabla 1.

**NOTA:** Antes de cambiar el entre-hierro asegúrese de llevar el voltaje de alimentación a cero y luego apagar la fuente.

Entre-hierro	$I_1$	$V_1$	$V_2$
Aire			
Cartón			
Aislante Industrial			

Tabla 1

### Parte 3. Visualización de las formas de onda de la corriente de excitación para el flujo senoidal en núcleos ferromagnéticos

- 1- Abra el interruptor que cortocircuita la resistencia variable.
- 2- Conecte el canal I del osciloscopio con el amplificador de separación para observar las señales en los puntos indicados como se muestra en la figura 4.

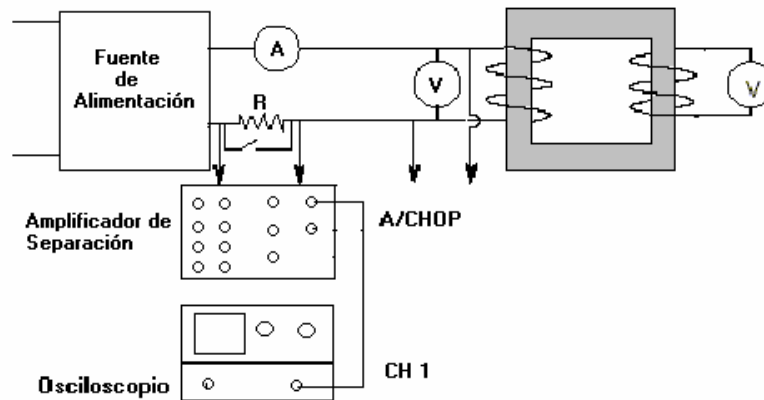


Figura 4

- 3- Ajuste el amplificador de separación LM6113 con los siguientes parámetros:  
 OUT-MODE: CHOP  
 TRIGGER: D  
 CHOP-FREQUENCY: HIGH  
 MODE CH: D
- 4- Alimente la bobina de la izquierda con un valor de tensión nominal de CA, que establezca la circulación de una corriente de  $I_0 = 1.5A$ .
- 5- Energice el osciloscopio y se proceda a verificar las formas de onda de: la tensión aplicada, la diferencia de potencial en la otra bobina y la corriente circulante  $I_0$ . Observe y dibuje el comportamiento de las ondas visualizadas para los valores de  $I_0$  según tabla, mientras se va reduciendo la tensión aplicada hasta cero. Complete la tabla 2.

$I_1 = I_0$ (A)	$V_1$ (Volt)	$V_2$ (Volt)
2		
1.9		
1.8		
1.7		
1.6		
1.5		

1.2		
1.0		
0.8		

Tabla 2

## V. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

### Parte 1.

1. Para el caso de CC, existe o no, diferencia de potencial en la otra bobina?. Explique el porqué sus resultados.

## VI. DISCUSIÓN COMPLEMENTARIA.

### Parte 1.

1. Dibuje el circuito magnético de la figura 2.
2. Para la estructura magnética de la figura 2 determine la f.e.m necesaria, para establecer un flujo de 0.0025 webers. Desprecie los flujos de dispersión. Considere un factor de apilamiento de 0.9 en el núcleo utilizado.
3. Que nivel de corriente DC se necesita en este circuito para establecer el flujo requerido en el numeral anterior?

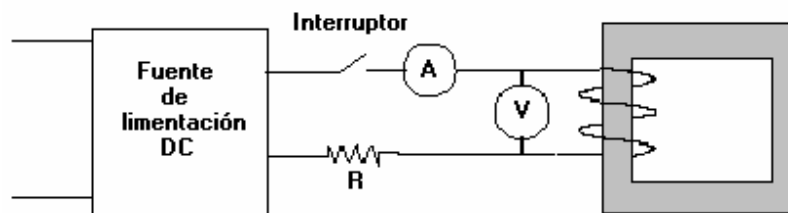


Figura X. Estructura magnética sin entrehierro.

### Parte 2

1. Dibuje el circuito magnético de la figura 3.
2. Para la estructura magnética de la figura 3 determine la f.e.m necesaria, para establecer un flujo de 0.002 webers. La longitud del entrehierro es de 5mm. Desprecie los flujos de dispersión y considere un factor de apilamiento de 0.9 en el núcleo utilizado.
3. Encuentre la reluctancia total de este circuito.

### Parte 3.

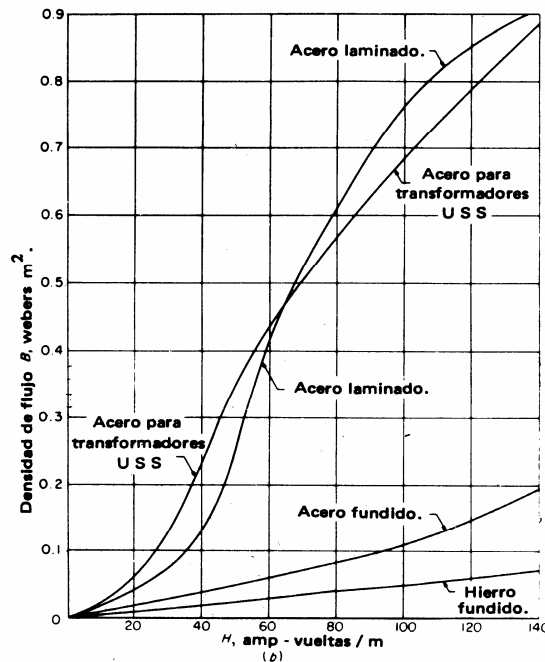
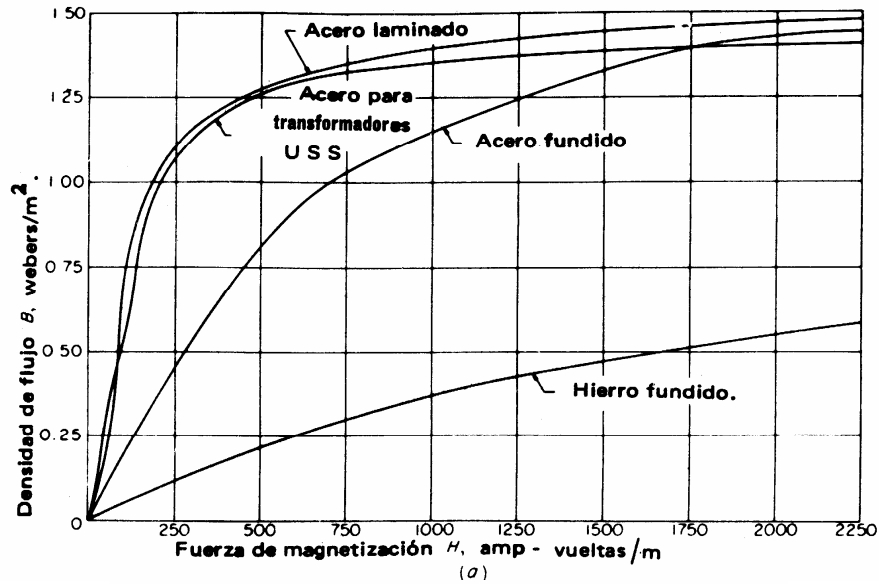
1. Dibuje las formas de onda de la corriente para 3 de valores de  $I_0$  y explique el porque de la deformación de la corriente en este tipo de circuitos.
2. Que nivel de tensión en la bobina de la derecha se debe de esperar si se utilizara una alimentación de corriente continua en este circuito?
3. Que aplicación practica tienen este tipo de circuitos? Mencione 3 ejemplos.

## VII. BIBLIOGRAFÍA – FUENTES DE CONSULTA.

- Edminister, Joseph A "Electromagnetismo" Schaum- Mcgrawhill.
- Hayt, William: Teoría Electromagnética. Mc-GrawHill, México 1997.
- William H. Hayt & Jack E. Kemmerly Análisis de Circuitos en Ingeniería
- Gourishankar "Conversión de Energía Electromecánica"



VIII. ANEXOS.



(a) Curvas de magnetización para materiales ferromagnéticos, sistema de unidades MKS racionalizado. (b) Parte de (a) trazado a una escala más ampliada, sistema de unidades MKS.