

# DE LORENZO GROUP

**CAMPO MAGNETICO  
DL 3155M05**  
GUIDA TEORICA

Laboratorio Time

*50 years  
in the field of  
technical  
education*

**esq**

UNI EN ISO 9001  
UNI EN ISO 9002



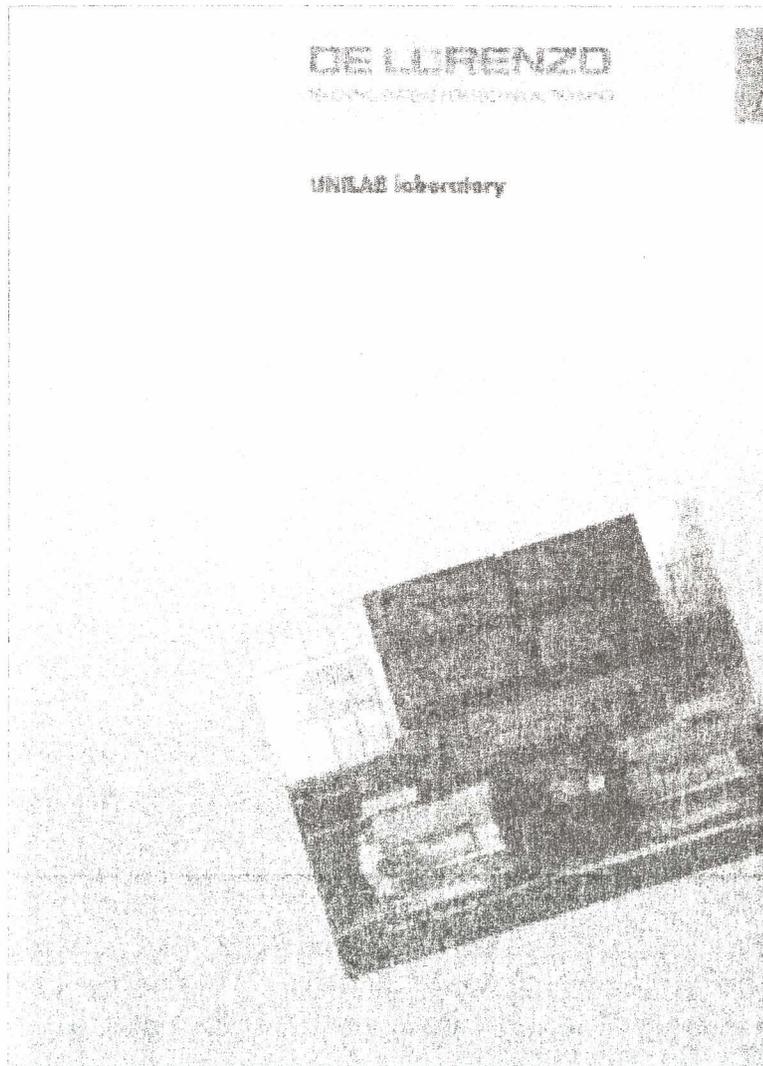


# DE LORENZO

*Always leading the pack*

**CAMPO MAGNETICO  
DL 3155M05**  
GUIDA TEORICA

## Laboratorio Time





# CONTENIDO

## LECCIÓN 1

Origen y características del campo magnético

Introducción

Página 3

Características de los campos magnéticos

Página 5

## LECCIÓN 2

Comportamiento magnético de los materiales

Materiales diamagnéticos, paramagnéticos y ferromagnéticos

Página 9

Ciclo de la histéresis

Página 11

## LECCIÓN 3

Magnitudes magnéticas y unidades de medición relativas

Magnitudes magnéticas y unidades de medición relativas

Página 17

Efecto de Hall y diferencia de potencial de Hall

Página 21

Ley de Hopkinson

Página 23

**LECCIÓN 4**

Energía de un campo magnético

La energía de un campo magnético

Página 27

**APÉNDICE**

Preguntas de verificación

Página 31

Unidad 1

Página 31

Unidad 2

Página 32

Unidad 3

Página 33

Unidad 4

Página 34

Unidad 5

Página 35

Unidad 6

Página 36

Unidad 7

Página 37

Respuestas correctas a las preguntas de verificación

Página 38

Respuestas de la simulación de fallas

Página 39

Respuestas correctas de la simulación de fallas

Página 40

**ESPECIFICACIONES**

**PREFACIO**

*TIME (Entrenador para Electrónica Interactiva Multipropósito) ha sido diseñada con el objetivo de suministrar al estudiante una excelente herramienta educativa, no sólo por el aprendizaje gradual de los principios teóricos básicos, explicados en cada módulo, sino también por evaluar el conocimiento práctico del estudiante, apuntando a un correcto entendimiento de toda la materia.*

*TIME se caracteriza por su versatilidad y adaptación a la continua evolución de la tecnología, estimulando las habilidades y la capacidad lógica del estudiante, a través de aplicaciones grupales e individuales y suministrando al profesor una herramienta eficiente respaldada por una innovadora metodología de enseñanza. El estudiante puede, de hecho, evaluar, explorar, experimentar directamente y asimilar fácilmente lo que está estudiando.*

*Una peculiaridad de esta metodología de enseñanza es la subdivisión en módulos que reproducen circuitos reales correspondientes al tema a ser evaluado.*

*Cada módulo se completa con un Manual del Profesor y un Manual del Estudiante, estrictamente interconectados, para permitir al alumno un aprendizaje simple y gradual y al profesor una eficiente guía para planear los cursos.*

*El Manual del Profesor se subdivide en Lecciones organizadas de la siguiente manera:*

- *identificación de los objetivos*
- *verificación de los requisitos previos requeridos*
- *contenidos*

*Los objetivos del curso son definidos por el profesor, quien debe verificar el nivel de aprendizaje de los estudiantes y su conocimiento con el fin de establecer el camino educativo a seguir.*

*El Manual del Profesor ha sido integrado con un apéndice donde las preguntas evaluativas, planteadas a los alumnos para controlar su habilidad de aprendizaje, han sido incluidas junto con las respuestas a los errores simulados en los circuitos y los datos técnicos correspondientes a los componentes, fáciles de encontrar, usados en los experimentos.*

*El Manual del Estudiante se subdivide en unidades organizadas de la siguiente manera:*

- *identificación de los objetivos*
- *verificación de los requisitos previos requeridos*
- *equipamiento necesario*
- *selección del camino educativo a seguir*
- *presentación de los procedimientos para la preparación y realización de los experimentos*
- *evaluaciones, durante los experimentos, para verificar si los estudiantes están aprendiendo*
- *análisis de los resultados*

*Dentro de un cierto tiempo, el estudiante debe estudiar un circuito, entender la teoría pertinente, analizar las condiciones de operación y verificar, por medio de un equipo de instrumentos adecuados, la situación en diversos puntos de prueba del circuito.*

*El Autor  
G. Filella*



## LECCIÓN 1

### **Origen y características del campo magnético**

#### □ **OBJETIVOS**

Conocer:

- La teoría del campo magnético
- Como se originan los campos magnéticos

Ser capaz de:

- Medir el valor del campo magnético en casos sencillos

#### □ **REQUISITOS**

- Concepto de corriente eléctrica

#### □ **TEMAS**

- Introducción
- Características de los campos magnéticos



## INTRODUCCIÓN

Se sabe que una brújula no es más que un pequeño imán montado en un pivote, de manera tal que pueda girar libremente en un plano horizontal. La aguja indicadora de la brújula se coloca aproximadamente en la dirección Sur-Norte y, si se remueve de la posición de equilibrio, tiende a regresar ahí oscilando. Los extremos de la aguja de la brújula se llaman polos: el extremo que apunta al polo norte geográfico se llama polo norte, el extremo que apunta hacia el sur geográfico se llama polo sur. La brújula muestra la dirección del campo magnético terrestre, es decir, del campo magnético generado, de una manera no aclarada aún, por nuestro planeta Tierra. Sin embargo, la brújula también puede ser usada para “sentir” los campos magnéticos generados por ejemplo por imanes; acercando la brújula a un imán se puede observar que la aguja ya no muestra la dirección sur-norte, sino la dirección del campo magnético resultante del campo generado por el planeta Tierra y del generado por los imanes. Los campos magnéticos son campos vectoriales: en particular los campos magnéticos están compuestos de acuerdo a la regla del paralelogramo válida para vectores.

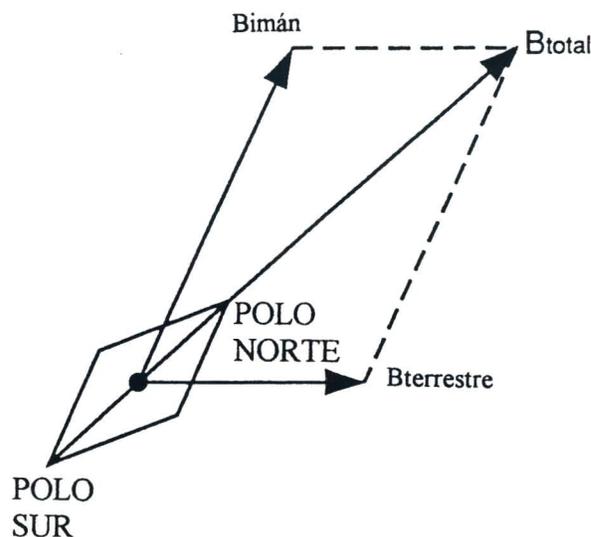


Fig. 5.1.1

La aguja de la brújula muestra, por lo tanto, la verdadera dirección del vector del campo magnético: por convención, la dirección del campo magnético es la que va del polo sur al polo norte de la aguja orientada. El campo magnético se indica generalmente con la letra  $B$ ; por razones históricas, de las que no hablaremos ahora, a  $B$  también se lo llama vector de inducción magnética. Luego veremos como se determina la intensidad de  $B$  y cuales son las unidades de medida.

Se puede observar fácilmente que si se acercan los polos nortes o los polos sur de dos imanes, habrá entre ellos fuerzas repulsivas, mientras que habrá atracción si se acerca un polo norte a un polo sur. Este efecto nos hace recordar el comportamiento de atracción y repulsión entre cargas eléctricas, pero con dos diferencias importantes:

- los cuerpos electrizados tienden a perder fácilmente la carga eléctrica, mientras que la “carga magnética” permanece en los imanes sin dispersarse.
- las cargas eléctricas positivas pueden ser separadas de las cargas eléctricas negativas, mientras que en un imán el polo norte y el polo sur están siempre juntos.

Si acercamos una brújula a un conductor por el que circule una corriente eléctrica, observamos que la aguja indicadora se desvía exactamente de la misma manera que cuando era acercada a un imán: la corriente eléctrica también puede generar campos magnéticos.

Por medio de una brújula se puede evaluar, al menos cualitativamente, la intensidad del campo magnético: de hecho cuanto más intensas sean las fuerzas que actúan sobre los polos, mayor será la frecuencia de oscilación cuando la aguja es movida de su posición de equilibrio (de la misma manera un péndulo oscila a una frecuencia mayor cuando las fuerzas gravitatorias son mayores).

Por lo tanto podemos usar una aguja magnética como una prueba aproximada para evaluar la intensidad de los campos magnéticos.

La valoración precisa del valor de  $B$  se realiza comúnmente por medio de un instrumento llamado Sonda de Hall, cuyo principio de funcionamiento será descrito en la Lección 3.

La medición de  $B$  a través de este dispositivo se efectúa colocando una conexión particular que es atravesada por una corriente perpendicularmente al campo magnético a medir.

Si ya se conoce la dirección de  $B$ , el procedimiento no reviste ninguna dificultad en particular, en caso contrario la posición correcta se buscará, girando la conexión hasta leer el máximo valor del campo: de hecho el instrumento mide la componente  $B$  perpendicular a la conexión.

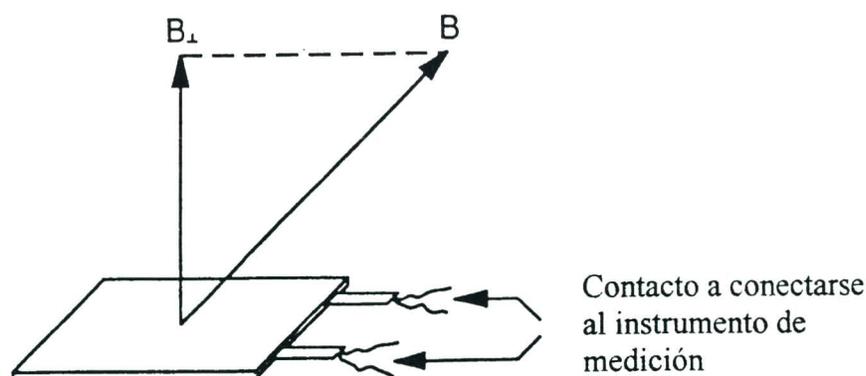


Fig. 5.1.2

**CARACTERÍSTICAS DE LOS CAMPOS MAGNÉTICOS**

Por medio de una aguja magnética o con la Sonda de Hall se pueden explorar las regiones del espacio alrededor de imanes o de conductores por los que circule una corriente para trazar mapas de los campos magnéticos.

La siguiente configuración geométrica es de interés particular:

- conductores rectilíneos por los que circula una corriente (Fig. 5.1.3);
- vueltas circulares por los que circula una corriente (Fig. 5.1.4);
- bobinas por las que circula una corriente (Fig. 5.1.5);

- a) En un punto P del espacio en torno al conductor el campo magnético tiene la dirección de la tangente a la circunferencia que tiene centro en el conductor y que pasa por el punto P (Fig. 5.1.3).

Podemos averiguar la dirección del campo magnético con la regla de la mano derecha: si el dedo pulgar de la mano derecha señala la dirección de la corriente eléctrica que fluye por el conductor, los otros dedos indican la dirección del campo magnético.

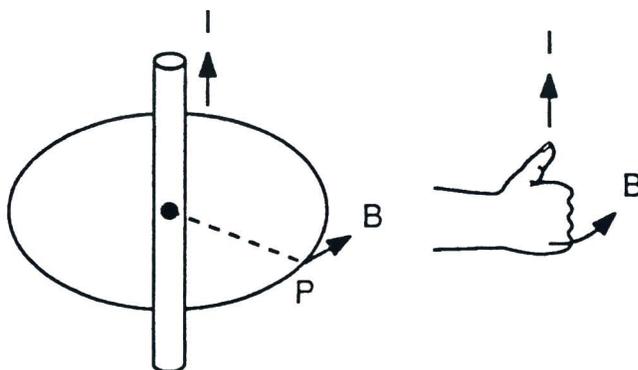


Fig. 5.1.3

La intensidad del campo magnético es directamente proporcional a la intensidad de la corriente e inversamente proporcional a la distancia desde el centro del conductor.

- b) El campo magnético tiene una estructura compleja; si consideramos el eje de rotación observamos que el campo magnético tiene la dirección de este eje, la intensidad es proporcional a la corriente y disminuye al ir alejándose del centro de la espira.

La dirección del campo magnético también puede determinarse en este caso con la regla de la mano derecha: si los dedos de la mano indican la dirección de la corriente, el dedo pulgar señala la dirección de  $B$ .

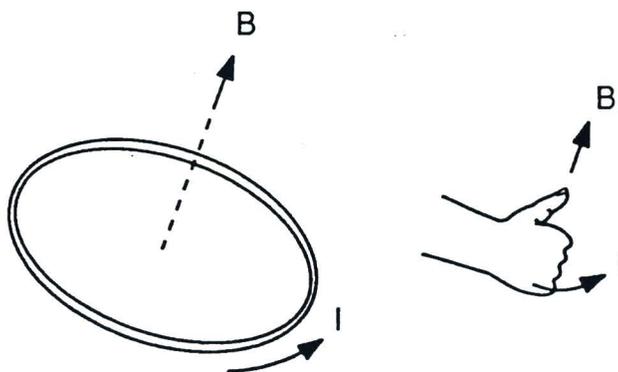


Fig. 5.1.4

- c) El campo magnético dentro de la bobina es uniforme y tiene la dirección del eje de la bobina; la intensidad del campo es proporcional a la intensidad de la corriente. La dirección puede determinarse de acuerdo a la regla de la mano derecha, de la misma manera que para las espiras.

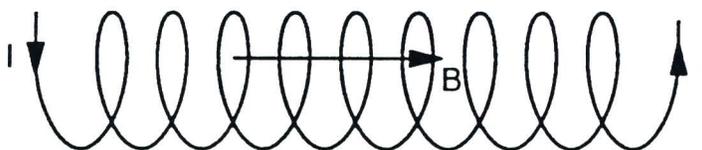


Fig. 5.1.5

## LECCIÓN 2

### **Comportamiento magnético de los materiales**

#### □ **OBJETIVOS**

Conocer:

- La diferencia entre sustancias diamagnéticas, paramagnéticas y ferromagnéticas.
- El comportamiento de las sustancias ferromagnéticas y la diferencia entre cuerpos ferromagnéticos rígidos y suaves

Ser capaz de:

- Elegir adecuadamente entre los diferentes tipos de materiales ferromagnéticos de acuerdo a las exigencias constructivas del dispositivo bajo estudio.

#### □ **REQUISITOS**

- Polarización eléctrica

#### □ **TEMAS**

- Materiales diamagnéticos, paramagnéticos y ferromagnéticos
- Ciclo de la histéresis.



## MATERIALES DIAMAGNÉTICOS, PARAMAGNÉTICOS Y FERROMAGNÉTICOS

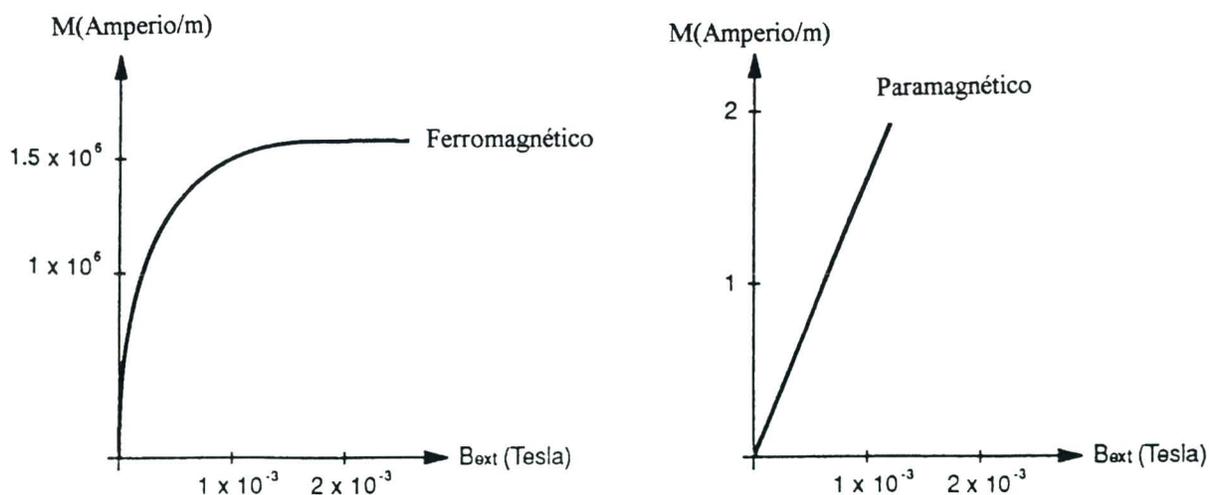
Las sustancias existentes en la naturaleza presentan comportamientos muy diferentes desde el punto de vista magnético: existen sustancias que son fuertemente atraídas por los imanes o por los conductores por los que fluye una corriente, sustancias que son débilmente atraídas y sustancias que son fuertemente rechazadas por los imanes: los primeros se denominan materiales ferromagnéticos, los segundos paramagnéticos y los últimos diamagnéticos. De entre los elementos metálicos, por ejemplo, el hierro y el níquel son ferromagnéticos, el aluminio y el platino son paramagnéticos, la plata y el cobre son diamagnéticos.

El fenómeno del paramagnetismo es la analogía magnética del fenómeno de la polarización eléctrica: los átomos en las sustancias paramagnéticas tienen un momento magnético, es decir, se asimilan a pequeños imanes que tienden a orientarse de acuerdo a la dirección del campo magnético externo.

La magnetización, o lo que es igual, la polarización magnética, es proporcional al campo magnético externo e inversamente proporcional a la temperatura.

Las sustancias ferromagnéticas se comportan de manera similar a las sustancias paramagnéticas, pero la intensidad del fenómeno es mucho pertinente: para el mismo campo magnético, la magnetización es varias veces mayor en las sustancias ferromagnéticas que en las paramagnéticas. La explicación física del fenómeno del ferromagnetismo es bastante compleja: los momentos magnéticos de los átomos que componen un material ferromagnético están sujetos, además de a un campo magnético externo, a un campo magnético interno varias veces mayor que el campo externo.

En la Fig. 5.2.1 se muestra la magnetización de una sustancia paramagnética y de una sustancia ferromagnética en función del campo magnético externo aplicado.



**Fig. 5.2.1**

Note que para una sustancia ferromagnética la magnetización aumenta hasta cierto valor, llamado magnetización de saturación: en esta situación todos los momentos magnéticos de los átomos del material están alineados en la dirección del campo magnético externo.

Para obtener la saturación en una sustancia paramagnética sería necesario un campo magnético externo tan intenso que no podría realizarse técnicamente.

El comportamiento de las sustancias diamagnéticas no puede ser descrito fácilmente en términos elementales; en estas sustancias el campo magnético externo produce una débil polarización magnética, es decir, una magnetización, con una dirección opuesta al campo magnético externo aplicado: se produce entonces un debilitamiento del campo externo. En la Fig. 5.2.2 se representan los comportamientos de los tres tipos de materiales.

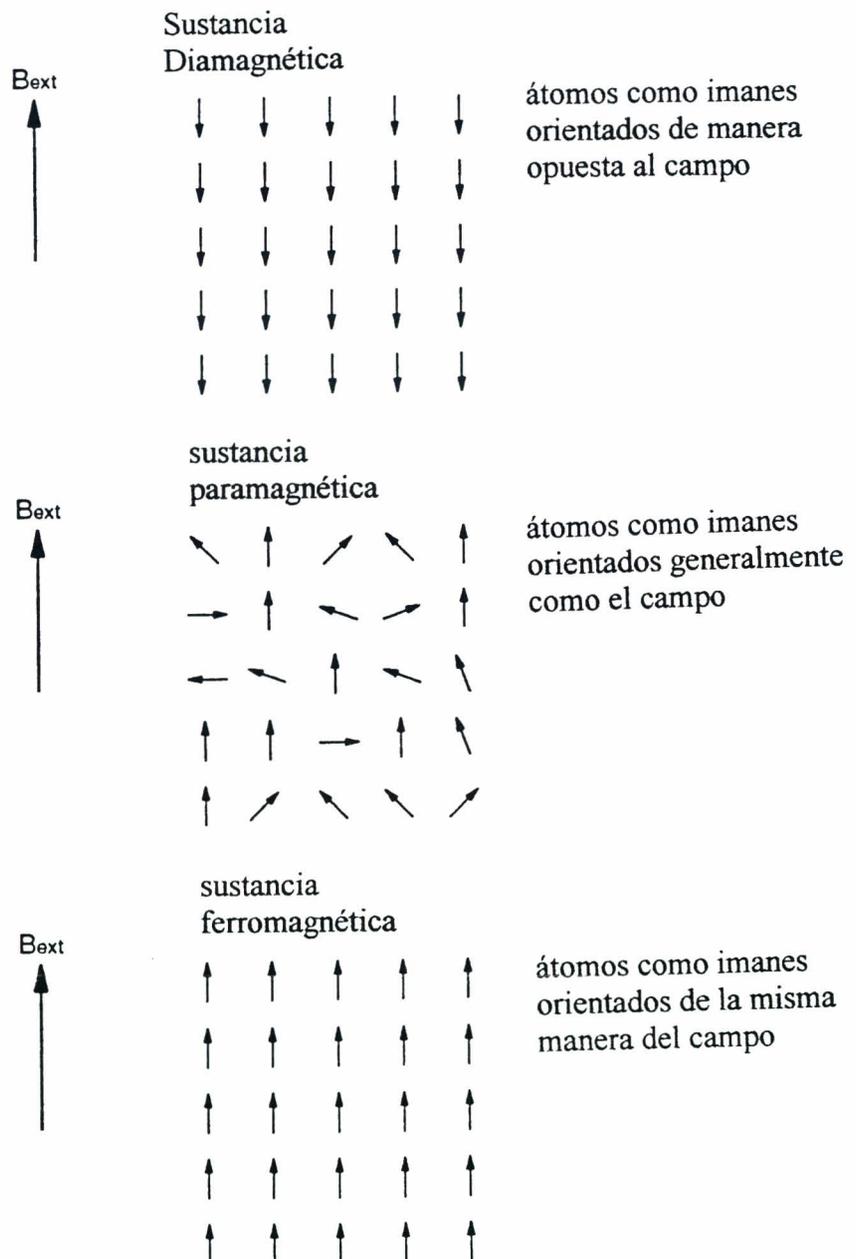
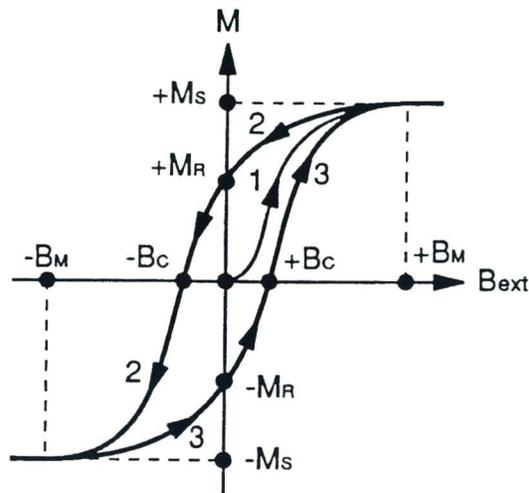


Fig. 5.2.2

<b>CICLO DE LA HISTÉRESIS</b>
-------------------------------

Algunos materiales ferromagnéticos tienen un comportamiento bastante complejo cuando varía el campo magnético externo.



**Fig.5.2.3**

Comenzando con una muestra inicialmente desmagnetizada, cuando el campo magnético externo aumenta, la magnetización aumenta proporcionalmente y finalmente alcanza el valor de saturación  $M_s$  para el valor  $B_M$  de  $B_{ext}$ . Si una vez alcanzada la magnetización de saturación se hace disminuir a  $B_{ext}$ , para algunos materiales los valores de magnetización no vuelven a coincidir con los valores de la primera magnetización. Estos nuevos valores pertenecen a la curva 2. Para  $B_{ext} = 0$ ,  $M$  no es nulo sino que equivale a  $M_R$ , llamada magnetización residual. Si después se invierte la dirección de  $B_{ext}$  haciendo que tome valores cada vez más grandes (negativos en el diagrama)  $M$  disminuye, luego se anula para el valor  $B_C$ , llamado fuerza coercitiva, y cambia su signo para los valores de  $B_{ext}$  de módulo mayor que  $B_C$ ; si se hace aumentar más a  $B_{ext}$ ,  $M$  tiende al valor  $-M_s$ . Si se hace aumentar a  $B_{ext}$  nuevamente,  $M$  varía a lo largo de la curva 3, y el ciclo (denominado de histéresis) se cierra.

Si seguimos variando  $B_{ext}$  de  $+B_M$  a  $-B_M$  y viceversa, el ciclo de la histéresis transita por las curvas 2 y 3, siempre en la dirección que indican las flechas.

Las aleaciones ferromagnéticas, estudiadas para poder obtener ciclos de histéresis que se adecuen a diferentes aplicaciones, son muy numerosas. Con frecuencia se clasifican a los materiales ferromagnéticos en dos grandes categorías: a la primera pertenecen los materiales “blandos”, que se caracterizan por bajos valores de fuerza coercitiva; para estos materiales, que encuentran un amplio uso en los electroimanes, motores, generadores y construcción del transformador, la magnetización de saturación se alcanza para valores de campo magnético externo relativamente bajos. A la segunda categoría pertenecen los materiales llamados “rígidos”, que se caracterizan por altos valores de fuerza coercitiva; encuentran un amplio uso en la construcción del imán permanente.

En la figura 5.2.4 se indican los valores de la magnetización de saturación, de la magnetización residual y de la fuerza coercitiva para algunos materiales y aleaciones de uso común.

Valores de la magnetización residual, de la magnetización de saturación y de la fuerza coercitiva (Ver Lección 3 para la definición de las unidades de medida)

### Materiales “blandos”

Material	Composición %	Ms (Amperios/m)	MR (Amperios/m)	Bc (Tesla)
Hierro	99.91 Fe	$1.71 \times 10^6$	$1.03 \times 10^6$	$10^{-4}$
Hierro purificado	99.95 Fe	$1.71 \times 10^6$	---	$5 \times 10^{-6}$
Acero al silicio	96.0 Fe, 4.0 Si	$1.66 \times 10^6$	---	$10^{-54}$
Metal mu	18 Fe, 75 Ni, 2 Cr, 5 Cu	$0.52 \times 10^6$	$0.19 \times 10^6$	$5 \times 10^{-6}$
Supermalloy	15.7 Fe, 79 Ni, 5 Mo, 0.3 Mn	$0.64 \times 10^6$	$0.33 \times 10^6$	$2 \times 10^{-7}$

### Material “rígido”

Material	Composición %	Ms (Amperios/m)	MR (Amperios/m)	Bc (Tesla)
Acero al carbón	98.1 Fe, 1 Mn, 0.9 C	---	$0.79 \times 10^6$	$5.0 \times 10^{-3}$
Acero al tungsteno	94 Fe, 5 W, 0.3 Mn, 0.7 C	---	$0.82 \times 10^6$	$7.0 \times 10^{-3}$
Alnico V	53 Fe, 8 Al, 14 Ni, 24 Co, 3Cu	---	$0.99 \times 10^6$	$5.5 \times 10^{-2}$
Platino – Cobalto	77 Pt, 23 Co	---	$0.36 \times 10^6$	$2.6 \times 10^{-1}$

Fig. 5.2.4

El ciclo de histéresis de un material puede observarse en un osciloscopio a través del circuito de la Fig.5.2.5

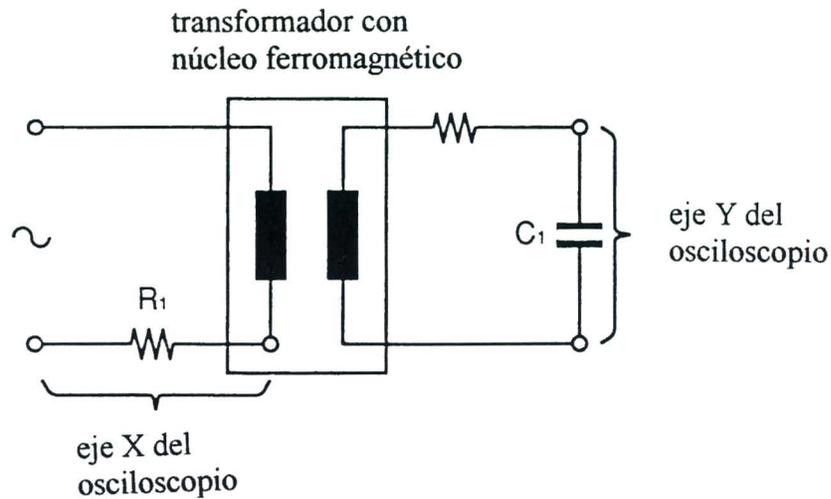


Fig. 5.2.5

La diferencia de potencial medido en los extremos de la resistencia  $R_1$  es mandada al eje x del osciloscopio. Esta tensión es proporcional a la corriente que fluye en el primario del transformador y por lo tanto al campo magnético  $B_{ext}$  creado en el primario mismo. De acuerdo a la regla de inducción, la tensión en los extremos del secundario es por el contrario proporcional a la magnetización derivada. En serie al secundario, se conecta un circuito R – C: la tensión en los extremos del capacitor es el integral de tensión en los extremos del secundario y por lo tanto es proporcional a la magnetización. Enviando, entonces, la diferencia de potencial presente en los extremos del capacitor en el eje “y” de un osciloscopio, el ciclo de histéresis es construido con el material por el cual está compuesto el núcleo del transformador. Por supuesto en el eje “x” podemos leer sólo valores proporcionales al campo B y en el eje “y” los valores proporcionales a M: pero es posible evaluar por ejemplo las relaciones  $M_s/M_R$  y  $B_M/B_c$  (ver Fig.5.2.3)



## LECCIÓN 3

### **Magnitudes magnéticas y unidades de medida relativas**

#### □ **OBJETIVOS**

Conocer:

- Las principales magnitudes magnéticas.
- Las unidades de medida de estas magnitudes

Ser capaz de:

- Evaluar teóricamente el campo magnético creado por algún circuito particularmente importante en las aplicaciones prácticas

#### □ **REQUISITOS**

- Concepto de polarización eléctrica

#### □ **TEMAS**

- Magnitudes magnéticas y unidades de medida relativas
- Efecto Hall y diferencia de potencial de Hall
- Ley de Hopkinson.



## MAGNITUDES MAGNETICAS Y UNIDADES DE MEDIDAS RELATIVAS

Hemos visto que un campo magnético es caracterizado por un vector  $B$ , análogo magnético del vector de campo eléctrico. El vector  $B$  se denomina también vector de inducción magnética; esta denominación está afectada por el efecto de la evolución histórica del electromagnetismo: en realidad, de acuerdo a conceptos antiguos, el estudio de las propiedades del campo magnético fue fijado sobre la base de aquel determinado por los polos de imán natural y el nombre de inducción magnética fue reservado para el vector  $B$ , como así también el nombre de inducción eléctrica ha sido reservado al vector  $D = \epsilon E$ . El vector del campo magnético es por el contrario expresado con la letra  $H$  y tiene como unidad de medida el Amperio -vuelta/metro [Asp/m]. Sin embargo, diferente a lo que sucedió en electrostática, la evolución en el estudio del magnetismo ha llevado a grandes cambios de concepto. Para este momento en algunas pruebas  $B$  se denomina vector de campo magnético. Se ha demostrado que  $B$  y  $H$  están ligados por la relación de proporcionalidad simple  $B = \mu H$  donde  $\mu$  (se lee *mi* pero ahora se suele llamar *mu*) es una constante denominada permeabilidad magnética.

La unidad de medida de  $B$ , en el sistema internacional, es el Tesla (todavía llamado en algunos casos Weber/m<sup>2</sup>); note que el Tesla es una unidad de medida bastante grande; por ejemplo para los campos magnéticos creados por un electroimán,  $B$  es de la clase de 1-2 Tesla. Sólo a través de imanes superconductores, es decir aprovechando bobinas superconductoras, es posible obtener campo magnético de la clase de alrededor de diez Tesla. Un sub-múltiplo de Tesla, llamado Gauss, es muy utilizado:  $10^4$  Gauss = 1 Tesla; el campo magnético terrestre es del tipo de la fracción de Gauss. El valor de  $B$  en los casos considerados en la lección 1 se expresa en la siguiente fórmula:

**Conductor rectilíneo:**

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi d}$$

donde  $I$  es la intensidad de la corriente que fluye en el conductor (en Amperio),  $d$  la distancia del punto considerado por en conductor (en metros)  $\mu_0$  una constante llamada permeabilidad magnética de vacío cuyo valor es:  $\mu_0 = \pi \cdot 10^{-7}$  Tesla • m/Amperio.

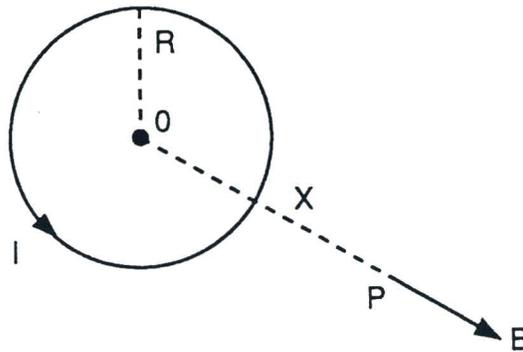
La fórmula  $B = \mu_0 I / 2 \pi d$ , conocido como la ley de Biot-Savart, muestra una propiedad que es común a todos los campos magnéticos producidos por las corrientes, es decir, que su intensidad siempre es proporcional a aquella que la corriente genera.

**Vuelta dirigida por corriente:**

El valor de B en un punto fijado a lo largo del eje de la vuelta es dado por:

$$B = \frac{1}{2} \cdot \frac{R^2 \mu_0 I}{(R^2 + X^2)^{3/2}}$$

donde R es el radio de viraje, x la distancia desde el centro



**Fig. 5.3.1**

**Bobina:**

Si la bobina es indefinida, es decir de gran longitud en lo que respecta al diámetro de la vuelta, el valor de B en un punto interno a la bobina, lejos de los bordes es dado por:

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I$$

donde N es el número de vuelta y l es la longitud de la bobina.

En la hipótesis que hemos realizado B es constante en valor y dirigido a lo largo del eje de la bobina.

Las formulas que hemos visto previamente son válidas en caso que el conductor rectilíneo, la vuelta o la bobina estén en vacío. En el caso que estén sumergidos en un material medio, las formulas previas deben modificarse reemplazando la constante  $\mu_0$  •  $\mu_R$  por la constante  $\mu_0$ , donde  $\mu_R$  es llamada permeabilidad magnética de la considerada media. Es decir tenemos una situación que es similar a aquella que ocurre en electrostática donde, en presencia de una dieléctrica, es necesario reemplazar la constante  $\epsilon_0$  con el producto  $\epsilon_0$  •  $\epsilon_R$ , donde  $\epsilon_R$  es la constante dieléctrica relativa. Note que mientras la constante  $\epsilon_R$  es siempre mayor que 1, la constante  $\mu_R$  puede ser menor que 1 (sustancias diamagnéticas), mayor que 1 (sustancias paramagnéticas), mucho mayor que 1 (sustancias ferromagnéticas)

En la práctica en presencia de un material medio, el campo magnético que está presente resulta la suma del campo magnético externo  $B_{\text{ext}}$  y del campo magnético  $B_{\text{int}}$  debido a la magnetización del material:

$$B_{\text{tot}} = B_{\text{ext}} + B_{\text{int}} \quad (\text{eq.5.3.1})$$

el campo magnético  $B_{\text{int}}$  resulta proporcional a la magnetización.

$$B_{\text{int}} = \mu_0 \cdot M \quad (\text{eq.5.3.2})$$

ya que  $\mu_0$  se mide en Tesla  $\cdot$  m/Amperio, la unidad de medida de  $M$  en el sistema internacional resulta Amperio/m.

Para las sustancias diamagnéticas y paramagnéticas  $M$  resulta proporcional a  $B_{\text{ext}}$ :

$$M = (\chi/\mu_0) \cdot B_{\text{ext}} \quad (\text{eq.5.3.3})$$

donde la constante  $\chi$  (la leemos chi) se denomina susceptibilidad magnética del material.

Es fácil verificar que  $\chi$  es una magnitud dimensional, positiva para las sustancias paramagnéticas, negativa para las sustancias diamagnéticas porque, como hemos visto, la magnetización resulta, respectivamente, con la misma dirección del campo externo o en dirección opuesta. Para las sustancias ferromagnéticas una definición rigurosa de  $\chi$  no es posible porque, como hemos visto, la magnetización no es proporcional a  $B_{\text{ext}}$  y depende de la “historia magnética” del material. A veces se provee para estas sustancias una “susceptibilidad magnética”  $\chi_M$  igual al valor máximo de  $\mu_0 M/B_{\text{ext}}$  cuando  $B_{\text{ext}}$  varía.

De las ecuaciones 5.3.1, 5.3.2, 5.3.3 obtenemos fácilmente:

$$B = B_{\text{ext}} + \chi B_{\text{ext}}$$

Por ejemplo

$$B = (1 + \chi) B_{\text{ext}}$$

Puesto que el campo magnético “total” es igual al producto del campo magnético externo (es decir medido sin materiales), para la permeabilidad magnética por ejemplo

$$B = B_{\text{ext}} \cdot \mu_R$$

Obtenemos:

$$\mu_R = 1 + \chi$$

Los valores de  $\chi$  para los materiales diamagnéticos y paramagnéticos, como también los valores de  $\chi_M$  para algunos materiales ferromagnéticos se observan en la Fig.5.3.2

VALOR  $\chi$  A 20° C

**Sustancia diamagnética**

Plata	$-2.60 \times 10^{-5}$
Bismuto	$-1.66 \times 10^{-5}$
Germanio	$-0.80 \times 10^{-5}$
Oro	$-3.60 \times 10^{-5}$
Cobre	$-0.95 \times 10^{-5}$
Agua	$-0.90 \times 10^{-5}$

**Sustancia paramagnética**

Aluminio	$+0.20 \times 10^{-3}$
Platino	$+0.36 \times 10^{-3}$
Fe S O <sub>4</sub>	$+2.80 \times 10^{-3}$
Ni S O <sub>4</sub>	$+1.20 \times 10^{-3}$
Fe Ce <sub>2</sub>	$+3.70 \times 10^{-3}$
Aire	$+0.40 \times 10^{-6}$

**Sustancia ferromagnética**

Hierro	$5 \times 10^3$
Hierro purificado	$18 \times 10^4$
Acero al silicio	$8 \times 10^3$
“Metal Mu”	$10^5$
“Supermalloy”	$8 \times 10^5$

Fig.5.3.2

## EFECTO DE HALL Y DIFERENCIA DE POTENCIAL DE HALL

Es posible verificar experimentalmente que un campo magnético ejerce una fuerza en las cargas eléctricas móviles: esta fuerza es perpendicular al campo magnético y a la velocidad de carga. En caso de un conductor en el que fluye una corriente, el resultado del portador electrificado de carga se aparta de su recorrido acumulando en el borde del conductor: aparece entonces una diferencia de potencial entre los dos bordes de los conductores (denominado d.p. de Hall)

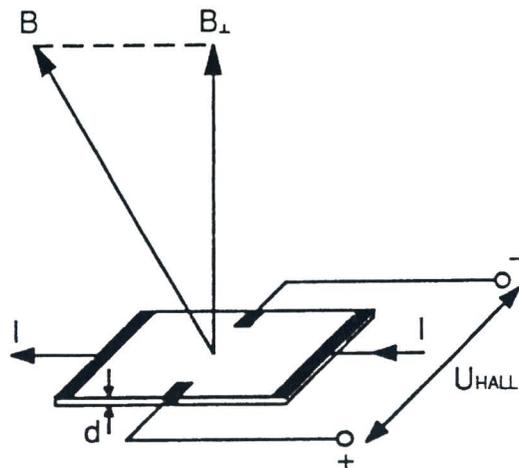


Fig.5.3.3

Esta d.p. no debe confundirse con las d.p. que comenzaron las cargas, manifestándose entre los bordes del conductor (ver Fig.5.3.3) y no a lo largo del recorrido de la corriente. Esta diferencia de potencial resulta proporcional al componente del ortogonal  $B$  al conductor y exactamente:

$$U_{\text{Hall}} = \frac{R \cdot I \cdot B_{\perp}}{d}$$

donde  $I$  es la intensidad de la corriente,  $d$  el espesor del conductor y  $R$  una constante:  $R = 1/ne$ , donde  $n$  es el número del portador electrificado para unidad de volumen y carga electrónica. La diferencia de potencial de Hall tiene generalmente valores muy bajos en el caso de materiales conductores debido al alto valor de  $n$ ; por el contrario en los semiconductores donde el número de los portadores electrificados es de varios ordenes de magnitud más bajos, la d.p. de Hall puede tomar valores que pueden ser fácilmente medidos y que pueden ser utilizados para medir el valor de  $B$ .



## LEY DE HOPKINSON

Definimos circuito magnético a una región del espacio donde el campo magnético se encuentra a sí mismo en parte máxima (siempre idealmente) dentro del material ferromagnético.

Por ejemplo un aro de hierro donde se enrolla un solenoide, que es dirigido por corriente, representa un típico circuito magnético (Fig.5.3.4)

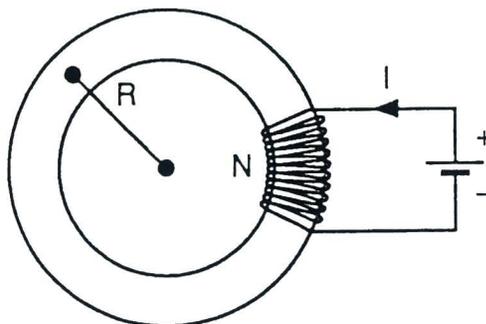


Fig.5.3.4

La forma del circuito magnético no tiene gran importancia para las consideraciones que desarrollaremos y tiene sólo una validez aproximada; para simplificar nos referimos en cualquier situación al caso de un anillo circular (toro) de un radio muy grande en lo que respecta al del sector derecho.

Supongamos que alrededor del anillo se enrolla un solenoide compuesto por  $N$  vueltas atravesado por corriente de intensidad, mostramos con  $\mu_r$  la permeabilidad magnética del material formando el toro y con  $\iota = 2\pi R$  la circunferencia del toro.

El campo magnético  $B$  dentro del toro es igual a:

$$B = \mu_0 \mu_r \frac{I \cdot N}{\iota}$$

El flujo  $\Phi$  (lo leemos fi) de la inducción magnética  $B$  a través de una superficie ortogonal en  $B$  de una superficie  $S$  se define como:

$$\Phi = B \cdot S$$

y se mide en Weber [Wb]

Obtenemos por lo tanto:

$$\frac{\Phi}{S} = \mu_0 \mu_r \frac{I \cdot N}{\iota}$$

Es decir

$$I \cdot N = \frac{l}{S} \cdot \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \cdot \Phi = \mathcal{R} \cdot \Phi \quad (\text{Ley de Hopkinson})$$

Donde fijamos:

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu_0 \mu_r} \cdot \frac{1}{S}$$

Esta expresión de la magnitud R se denomina reluctancia del circuito magnético y se mide en Henrios<sup>-1</sup>; es análogo a la expresión de la resistencia R de un conductor metálico (Segunda ley de Ohm) cuando hacemos corresponder la permeabilidad magnética  $\mu_0 \mu_r$  a la conductividad.

Por el otro lado  $\Phi = B \cdot S$ , que es constante a través de todas las secciones del circuito magnético (también si varía la sección, y por lo tanto B también), tiene la misma propiedad de la intensidad de la corriente I que fluye en un conductor.

La ley de Hopkins aparece entonces formalmente similar a la primera ley de Ohm y la magnitud  $I \cdot N$  (que es similar a la f.e.m. aplicada) se denomina fuerza magnetomotriz (f.m.m.)

Después de todo, la ley de Hopkinson enuncia que la f.m.m. aplicada a un circuito magnético es dado por el producto de su flujo por su reluctancia.

La ley de Hopkinson puede extenderse al caso de un circuito magnético compuesto por más figuras truncadas de longitud  $l_1, l_2, \dots$ , con secciones  $S_1, S_2, \dots$  y permeabilidad magnética  $\mu_{r1}, \mu_{r2}, \dots$

Es posible demostrar fácilmente, con un razonamiento similar al anterior, que la siguiente relación es aún válida

$$I \cdot N = \mathcal{R} \cdot \Phi$$

Donde la reluctancia total  $\mathcal{R}$  del circuito es simplemente la suma de las reluctancias de la figura truncada formando series conectadas, es decir:

$$\mathcal{R} = \mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_2 + \dots = \frac{l_1}{\mu_0 \cdot \mu_{r1} \cdot S_1} + \frac{l_2}{\mu_0 \cdot \mu_{r2} \cdot S_2} + \dots$$

Las unidades de medidas de las magnitudes involucradas en la ley de Hopkinson son respectivamente:

Tesla  $\cdot$  m<sup>2</sup> (denominada Weber) para la magnitud  $\Phi = B \cdot S$ ;

Amperio  $\cdot$  número de vuelta (denominado Amperio-vuelta) para la fuerza magnetomotriz  $I \cdot N$ ;

Amperio-vuelta / Weber = Henrio<sup>-1</sup>, para la reluctancia  $\mathcal{R}$ .

## LECCIÓN 4

### Energía del campo magnético

#### □ OBJETIVOS

Conocer:

- La energía asociada a un campo magnético, algunos de sus efectos y aplicaciones

Ser capaz de:

- Calcular la energía magnética asociada a una corriente

#### □ REQUISITOS

- Concepto de energía y potencia
- Ley de Ohm
- Ley de Joule

#### □ TEMAS

- La energía del campo magnético



LA ENERGÍA DEL CAMPO MAGNÉTICO

Es posible demostrar fácilmente que, cuando un circuito eléctrico está cerrado, la corriente no alcanza enseguida el valor nominal, pero en un tiempo unido a la resistencia del circuito y a un parámetro llamado coeficiente de autoinducción (o inductancia) del circuito, usualmente expresado con la letra L. Por ejemplo para una bobina tenemos aproximadamente:

$$L = \frac{\mu_0 \cdot N^2}{l^2 \cdot V}$$

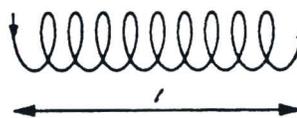
donde N es el número de vuelta de la bobina, l su longitud, V el volumen.

Los coeficientes de autoinducción L para algunos circuitos particulares están puestos en tablas en la Fig.5.4.1

COEFICIENTE DE AUTOINDUCCION L

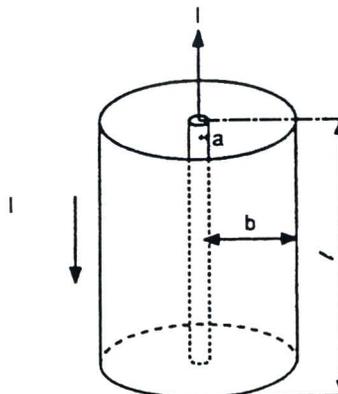
Bobina

$$L = \mu_0 \mu_r \frac{V^2}{l^2} V$$



Cable coaxil

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} l \ln \frac{b}{a}$$



Línea bifilar de transmisión

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r}{\pi} l \ln \frac{d}{r}$$

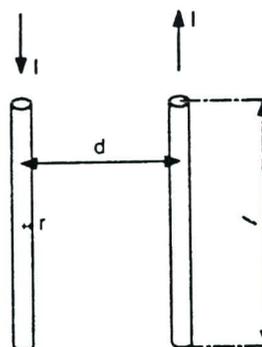


Fig.5.4.1

Si, por ejemplo, una fuente de alimentación de una f.e.m.  $U_0$  está cerrada en una bobina de resistencia  $R$  y en un coeficiente de autoinducción  $L$ , la corriente alcanza el valor nominal  $I = U_0/R$  sólo después de un tiempo

$$T \approx \frac{L}{R}$$

En este momento, por lo tanto, no se difunde calor por el efecto Joule; lo “faltante” resulta:

$$Q \sim I^2 \cdot R \cdot t = I^2 \cdot L$$

Esta energía no difundida ha sido almacenada dentro de la bobina bajo la forma del campo magnético.

La energía almacenada es igual al calor no producido por el efecto Joule, es decir:

$$W \sim I^2 \cdot L = \frac{\mu_0 \cdot N^2}{l^2 \cdot V \cdot I^2} \left\{ \frac{B^2}{\mu_0} \right\} \cdot V$$

donde  $B$  es el campo magnético dentro de la bobina y  $V$  es su volumen.

Un trato más exacto demostraría que realmente:

$$W = \frac{1}{2} \left\{ \frac{B^2}{\mu_0} \right\} \cdot V \quad (\text{eq.5.4.1})$$

La energía almacenada en un campo magnético puede tomar también valores muy considerables: por ejemplo un campo magnético de 50 Tesla, que puede obtenerse a través de un imán superconductor, de una extensión de  $1\text{m}^3$  contiene una energía que puede evaluarse sobre la base de la ecuación 5.4.1:

$$W \cong 300 \text{ KWh}$$

Es sabido que muchos países entre ellos Italia produce en las horas de la noche una cantidad de energía eléctrica mucho más alta que el usuario demanda. Esto es porque las centrales de energía utilizadas en el país son frecuentemente térmicas, es decir, utilizan la combustión de los subproductos del petróleo y no pueden “apagar” y “encender” otra vez en pocas horas.

Por lo tanto está bajo estudio la posibilidad de almacenar durante las horas de la noche la energía eléctrica en grandes bobinas superconductoras de manera de utilizar esta energía durante las horas de máxima demanda de parte del usuario.

La energía “magnética” asociada a una corriente es devuelta a un circuito en el momento de apagado del mismo bajo la forma de una corriente suplemental (extracorrente apagada), que puede tomar valores extremadamente altos; por esta razón el apagado de una línea donde corren altas corrientes es una operación muy delicada y debe ser manejada con interruptores adecuados y con precauciones especiales.

## APENDICE

Preguntas de verificación

Respuestas correctas a las preguntas de verificación

Respuestas a la simulación de falla eléctrica

Respuestas correctas a la simulación de falla eléctrica



**PREGUNTAS DE VERIFICACION****UNIDAD 1**

- A) Un conductor rectilíneo atravesado por corriente genera un campo magnético; las líneas de fuerza del campo se ubican;
- 1) En una dirección simétrica en cuanto al conductor
  - 2) En dirección de la tangente en cuanto al conductor
  - 3) En una dirección asimétrica en cuanto al conductor
- B) El área del espacio, que siente los efectos debido a la presencia de un material conductor atravesado por corriente eléctrica, se define como:
- 1) Campo eléctrico
  - 2) Campo magnético
  - 3) Campo magnetoeléctrico

**UNIDAD 2**

- A) En un conductor, doblado en forma de vuelta circular, las líneas de fuerzas se sitúan en el espacio circundante
- 1) En una dirección simétrica en cuanto al conductor
  - 2) En dirección de la tangente en cuanto al conductor
  - 3) En una dirección asimétrica en cuanto al conductor
- B)Cuál es el nombre de la regla que determina la dirección de las líneas de fuerza de un campo magnético?
- 1) Maxwell
  - 2) Corkscrew

**UNIDAD 3**

A) En un solenoide el campo magnético generado es uniforme:

- 1) Afuera
- 2) Adentro

B) El Polo Norte de un solenoide gira hacia la cara delante de la cual el observador ve la corriente girando:

- 1) En sentido de las agujas del reloj
- 2) En sentido contrario de las agujas del reloj

**UNIDAD 4**

A) La unidad de medida del campo magnético es:

- 1) Newton (N) o Amperio-vuelta (ASP)
- 2) Weber (Wb) o Henrio (H)
- 3) Tesla (T) o Gauss (G)

B) Un Tesla es igual a:

- 1) 10.000 Gauss
- 2) 1.000 Gauss
- 3) 100 Gauss

**UNIDAD 5**

A) Es posible utilizar un interruptor magnético en un circuito de corriente alterna?

1) Si

2) No

B) Aproximando un imán a un interruptor magnético conectado a un circuito que no está atravesado por corriente, cierran los contactos a pesar de todo?

1) Si

2) No

**UNIDAD 6**

A) Si un electroimán es desactivado:

- 1) Ejerce una fuerza de atracción
- 2) No ejerce ninguna fuerza
- 3) Ejerce una fuerza repulsiva

B) Si se invierte la corriente que fluye en la bobina de un electroimán, su fuerza magnética será:

- 1) De tipo atractiva
- 2) De tipo repulsiva

**UNIDAD 7**

A) Un campo magnético, sometido al fenómeno de histéresis magnética, es atravesado por un flujo magnético:

- 1) Menor que el del comienzo
- 2) Mayor que el del comienzo

B) Aumentando la intensidad de un campo magnético la imanación del cuerpo ferromagnético contenido en él:

- 1) Aumenta indefinidamente
- 2) Aumenta hasta alcanzar un límite que no es atravesado

## RESPUESTAS CORRECTAS A LAS PREGUNTAS DE VERIFICACION

UNIDAD	PREGUNTA	RESPUESTA
1	A	1
1	B	2
2	A	3
2	B	2
3	A	2
3	B	1
4	A	3
4	B	1
5	A	1
5	B	1
6	A	2
6	B	1
7	A	2
7	B	2

**RESPUESTAS A LA SIMULACION DE FALLA****UNIDAD 1**

No se encuentran fallas

**UNIDAD 2**

No se encuentran fallas

**UNIDAD 3**

No se encuentran fallas

**UNIDAD 4**

No se encuentran fallas

**UNIDAD 5**

- 1) E con corto circuito
- 2) S1 interrumpido
- 3) E interrumpido
- 4) Circuito sin alimentación

**UNIDAD 6**

No se encuentran fallas

**UNIDAD 7**

- 1) C1 con corto circuito
- 2) R1 interrumpido
- 3) R2 interrumpido
- 4) Circuito sin alimentación

**RESPUESTAS CORRECTAS A LA SIMULACION DE FALLA**

<b>UNIDAD</b>	<b>RESPUESTA</b>
1	SIN FALLA
2	SIN FALLA
3	SIN FALLA
4	SIN FALLA
5	3
6	SIN FALLA
7	3

HOJA DE DATOS



**BIBLIOGRAFIA**

- AA.VV.: **Data book**  
Studio Tesi, Pordenone, 1985
- D.HALLIDAY/R.RESNICK: **Fisica, terza edizione**  
CEA, Milano, 1978
- S.PAPUCCI/A.FORNARO: **Corso di fisica applicata, seconda edizione**  
Hoepli, Milano, 1993
- F.SEARS: **Elettricit  e magnetismo**  
CEA, Milano, 1981

© DE LORENZO  
TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS

DE LORENZO S.R.L.  
V. le Romagna, 20 - 20089 Rozzano (MI)  
Italia  
Tel. ++39-2-8254551/2/3 – Telefax 8255181  
E-mail: DE.LORENZO@GALACTICA.IT



**DE LORENZO**

---

Viale Romagna, 20 - 20089 Rozzano (MI) Italy • Tel. +39 02 8254551 - Fax +39 02 8255181  
E-mail: [delorenzo@delorenzo.it](mailto:delorenzo@delorenzo.it)

[www.delorenzogroup.com](http://www.delorenzogroup.com)