

## Diseño y Construcción de un Electroimán Tipo Solenoide

Reporte de proyecto

M. en C. Raúl Vargas Alba, Pedro Juárez Molina

Departamento de Ciencias Básicas, Instituto Tecnológico de Querétaro,  
Av. Tecnológico s/n esq. Mariano Escobedo, Colonia centro, Querétaro Qro. C.P. 76000  
Tel: 01(442)2274400 Fax:01(442)2169931, rvargas@mail.itq.edu.mx

### Resumen

Se presenta el desarrollo de un prototipo experimental aplicando los principios básicos de electromagnetismo mediante la conceptualización de un electroimán simple con su correspondiente diseño, con éste se pretende propiciar que el estudiante de ingeniería en sistemas computacionales del Instituto Tecnológico de Querétaro que cursa el 2º semestre visualice los diversos orígenes de física clásica y una de sus aplicaciones.

**Palabras clave:** Electromagnetismo, bobina, alambre.

### Abstract

In this paper they present the development of an experimental prototype applying the basic principles of electromagnetism through the conceptualization of a simple electro magnet with its corresponding design with this they to cause that the engineering student in computer system at the QueretaroInstitute of Technology pretend in second semester to visualize the different origins of classical physics and one of its applications.

**Key words:** Electromagnetism, coil, wire.

### Introducción

Se reporta la construcción de un electroimán, siguiendo un procedimiento sistematizado en el que se relaciona: ley física, teoría matemática y desarrollo tecnológico. Mostrando el cómo se estructura un modelo físico (2), la solución de éste (3). En el ámbito de la física se materializa la magnetización temporal de un cuerpo, y la conceptualización del electroimán se realiza con aproximaciones sucesivas, mediante la variación del parámetro: número de espiras (N) de una bobina. En la actividad semestral de un grupo, se conforman varios equipos de trabajo (tres o cuatro estudiantes) cada uno de ellos desarrolla un electroimán; porque con la interacción de sus diferentes estilos de aprendizaje, se produce una sinergia; generalmente, ésta redundando tanto en la obtención de mejores resultados como en la reducción del intervalo de tiempo empleado.

El antecedente de este trabajo es el producto de una reflexión sobre la asignatura de Física general que contiene siete unidades: dos de Mecánica clásica (Estática de la partícula, Dinámica de la partícula incluyendo Trabajo mecánico); una de Óptica y otra de Termodinámica; tres unidades de Electricidad y Magnetismo (Electrostática, Magnetismo y Electrodinámica) con un nivel cognoscitivo de conocer. Para facilitar el aprendizaje de estas últimas se recomienda apoyarse en: los conocimientos básicos del álgebra de vectores (vector geométrico, vector fuerza, suma de vectores con el método del paralelogramo...) este conocimiento previo permite explicar la ley de Coulomb, campo eléctrico creado por cargas puntuales... fuerza de atracción magnética; y el desarrollo de algunas prácticas elementales tanto de electricidad (cuerpo cargado por frotación “peine frotado con el cabello”, ... ), como de magnetismo (acercar polos iguales / desiguales de dos imanes) y electrodinámica (circuitos de corriente directa con una pila seca, un interruptor, una resistencia y un Light Emitting Diode “LED”)[1] y [2]. El hombre, en la búsqueda de explicar los fenómenos naturales a través de la historia, fue encontrando elementos fundamentales de la electrostática; por ejemplo, el griego Tales de Mileto (ca. 630 - 545 a. C), electrificaba temporalmente el ámbar con frotamiento; Coulomb en 1785 publicó con un vocabulario técnico científico un ensayo de electricidad y magnetismo[3]; Michael Faraday (1791- 1867) inglés estableció una representación gráfica con líneas que muestran la dirección y sentido del campo eléctrico que produce una carga eléctrica puntual en reposo. El magnetismo se remonta tanto a la cultura china, como a la griega con minerales naturales de magnetita, que atrae cuerpos férricos y el uso de la brújula. ¿Por qué electromagnetismo? En general, hasta la segunda década del siglo XIX se consideraba que no existía relación entre la electricidad y el magnetismo. En 1820 el danés Hans Christian Oersted observó que, la aguja de una brújula perturbaba su orientación cuando se aproximaba a un alambre conductor por cuyo

interior circulaba corriente eléctrica. Posteriormente, el inglés Michael Faraday en 1831 mostró que, al mover rítmicamente una barra de imán permanente en el interior del cilindro hueco que forman las N vueltas de alambre enrollado y conectado en sus extremos a un instrumento de medición (de la corriente eléctrica), en éste se detectó la presencia de una corriente eléctrica. El francés Jean – Bepstiste Biot (1774 - 1862) y Félix Savart (1791 - 1841), experimentalmente identificaron y cuantificaron el campo magnético B, en el espacio libre que circunda a un conductor por el que circula una corriente eléctrica, muy semejante éste al del campomagnético que rodea a un imán permanente.

**Fundamentos teóricos**

El medio (aire, vacío, material...) que rodea a un conductor por el que se mueven cargas eléctricas, así como en algunos de los materiales que están en contacto directo con el conductor, adquieren características magnéticas temporales cuya magnitud depende de su permeabilidad magnética ( $\mu$ ). Generalmente, el medio circundante de alrededor de un conductor eléctrico es el espacio libre o vacío, en este medio el valor de la constante de permeabilidad magnética es  $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7}$ tesla metro/amper (T.m/A). Cuando el (material) hierro dulce está en la proximidad del medio circundante de un conductor, aquel se magnetiza temporalmente y su permeabilidad relativa ( $\mu_r$ ) es del orden de 4000 [2], entonces, la permeabilidad magnética del material altamente enriquecido con hierro es:  $\mu = \mu_r \mu_0 = 4000 * 4\pi * 10^{-7} = 5.0265 * 10^{-3}$  T.m/A  $\cong 5.03 * 10^{-3}$  T.m/A. Con la ley de Biot – Savartse caracteriza la densidad del campo magnético vectorial (B) que se propicia en el medio (con su correspondiente constante de permeabilidad magnética) que circunda a un conductor por el que se mueve una carga eléctrica (I). La caracterización de B para cualquier punto del medio que se identifica con la letra p, se inicia considerando que un elemento diferencial de carga se mueve en la dirección “ds” del conductor, y aquel se relaciona con el punto p, mediante un vector de posición ( $r_{dsp}$ ) que va del elemento “ds” hasta el punto p, si el medio es el vacío, a éste le corresponde la constante de permeabilidad magnética  $\mu_0$  y la ley de Biot – Savart matemáticamente se expresa con la diferencial de la densidad del campo magnético vectorial “dB” con el siguiente producto cruz vectorial.

$$dB = \{ \mu_0 I / (4\pi (r_{dsp})^3) \} ds \times r_{dsp} \tag{1}$$

Para identificar tanto los elementos físicos como geométricos, y aplicar la ley de Biot – Savart: Primeramente, con la intención de conceptualizar la ley de Biot – Savart, se analizará un conductor delgado de longitud casi “infinita” que está en el espacio libre representado con  $\mu_0$ , por el que circula una corriente I. Por ejemplo, si el conductor pende, desde una altura infinita hasta llegar al suelo, “tensado en sus dos extremos” figura1, además se supondrá que existe un flujo de carga eléctrica que inicia en el suelo y va hacia arriba, con estos elementos será posible prefigurar la ubicación del vector dB a través de interpretar la definición del producto cruz vectorial, en ésta se afirma que: el vector dB deberá estar perpendicular al plano en el que se encuentran los vectores ds y  $r_{dsp}$ ; y efectivamente la perpendicularidad se puede observar trazando un sistema de referencia cartesiano (X, Y, Z): ds está sobre el eje Z vertical y  $r_{dsp}$  forma un ángulo q con este eje Z, entonces ambos están en el plano vertical de la hoja y por lo tanto dB está perpendicular a ésta es decir paralelo al eje X. Entonces, en la figura 3 se visualiza que, el vector de campo densidad magnética dB es tangente a un punto p del círculo de radio r y cuando ds pasa por el origen del sistema de referencia satisface:  $r = r_{dsp}$ .

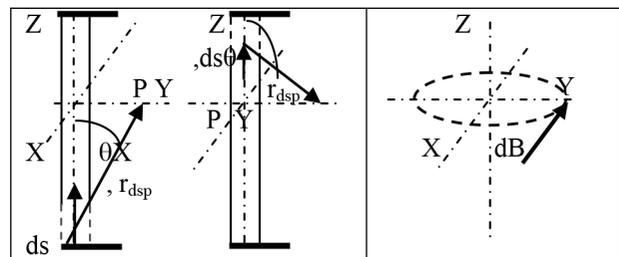


Figura 1. Figura 2. Figura 3. Vector dB

Después, para concretizar la ecuación (1), se considerará que, en la fig. 1 una carga I está en movimiento en la dirección del elemento en línea recta ds. Entonces, para determinar la magnitud, dirección y sentido de la densidad de campo magnético vectorial B de un punto P del espacio libre que está alrededor del conductor, se elige en éste un elemento vectorial diferencial ds; además se deberá identificar la distancia que existe entre el elemento diferencial “ds” del conductor y el punto P; para ello se obtendrá un vector en la dirección de  $r_{dsp}$ ; el significado de los dos subíndices es el siguiente: el inicio del vector es el elemento diferencial “ds” y su destino es el punto P, tal como se muestra en las figuras1 y 2.El rango de valores

del ángulo  $\theta$  en  $(0^\circ, 180^\circ)$ , el valor de éste en el suelo es casi nulo y al estar próximo al extremo del que pende el cable,  $\theta$  es casi  $180^\circ$ .

Como en este fenómeno físico,  $ds$  es una línea recta vertical (sobre el eje  $Z$ ) entonces las componentes cartesianas de los vectores  $ds$  y  $r_{dsp}$  son:  $[0, 0, dz]$ ,  $[0, r_{dsp}\text{sen } \theta, r_{dsp}\text{cos } \theta]$  respectivamente.

Finalmente, se ejecuta el producto cruz de la ecuación (1) utilizando el arreglo de un determinante.

$$ds \times r_{dsp} = \begin{vmatrix} i & j & k \\ 0 & 0 & dz \\ 0 & r_{dsp}\text{sen}\theta & r_{dsp}\text{cos}\theta \end{vmatrix} = -r_{dsp}\text{sen}\theta dz$$

Sustituir este resultado en la ecuación (1) y se obtiene:

$$dB = \{ \mu_0 I / (4\pi(r_{dsp})^3) \} (-r_{dsp}\text{sen}\theta dz). \quad (2)$$

Para obtener el valor de  $B$  en el punto  $p$  que está en el medio circundante del cable, se integra la ecuación (2) y se obtiene que, a una distancia perpendicular  $r_{\perp}$  del cable la magnitud del campo magnético es:  $B = \{ \mu_0 I / (2\pi r_{\perp}) \}$ . Como un ejemplo adicional, se caracterizaría la densidad de campo magnético  $B$  para el punto  $p$  que se encuentra en el centro del núcleo de aire de una espira circular cuyo centro es el origen del sistema cartesiano  $(X, Y, Z)$  y la espira está ubicada sobre el plano horizontal  $X - Y$ , en la que se mueve una carga eléctrica  $I$ , que está a una distancia perpendicular  $r_{dsp}$  igual al radio de la espira y con un elemento diferencial "curvo"  $ds$  en dirección del ángulo  $q$ , cuya longitud de arco es  $rdq$ , con (1) se obtendrá que, la magnitud de  $B$ , es:  $B = [\mu_0 I / (2r_{\perp})]$ .

Es importante el conocimiento del electromagnetismo, porque éste explica el funcionamiento de los generadores por inducción, la levitación de cuerpos en el transporte ferroviario como el del tren de Shanghái. Un electroimán se puede estructurar con una "barra" (disco) cilíndrica hueca o sólida, recta o curva, de sección transversal circular, cuadrada, rectangular, herradura... en la que se embobina (enrolla) un alambre conductor; al interior del cilindro hueco o sólido que forman las  $N$  espiras se le asigna el nombre de núcleo, éste en algunos casos es aire o sólido de material apto para magnetizar. En síntesis, se afirma que cuando circula una corriente eléctrica en la bobina, en sus alrededores se crea un campo magnético temporal, ello implica que, la bobina y el núcleo conforma un electroimán.

### Materiales y métodos

Se pretende construir un electroimán tipo solenoide con núcleo de acero dulce (tal como un tornillo) que se magnetizará "temporalmente", casi mientras está circulando la corriente en la bobina; por ejemplo, un tornillo se puede utilizar como núcleo y en éste se enrollan  $N$  espiras de alambre magneto.

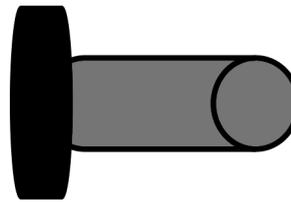


Figura 4. Tornillo



Figura 5. Alambre magneto con el que se conformarán las  $N$  espiras

### Variables que caracterizan el diseño

Una de las variables relevantes del electroimán es el número de espiras  $N$  de la bobina, éste se inferirá a través de varios intentos factibles; por ejemplo a partir de  $N$  igual a 50 espiras o,  $N = 75$  espiras; para ello se considerará que, una bobina tipo solenoide es un alambre de cobre calibre 25 (diámetro = 0.45466 mm) barnizado clase magneto, de longitud considerable, generalmente de varios metros ("t"), enrollado temporal / definitivamente en una barra cilíndrica con diámetro "D" de papel o sólida de material magnetizable con una constante de permeabilidad magnética  $\mu$ , de manera continua con  $N$  vueltas circulares (éstas que, también pueden ser cuadradas, rectangulares...); cada una de ellas recibe el nombre de espira, y se supone que por las  $N$  espiras circulará una corriente eléctrica continua de magnitud  $I$  ampers (A), la longitud total del cilindro formado por las "N" espiras se identifica con la letra "L"; la resistencia  $R$  de la bobina será  $R = (1/56.2)L / (A \text{ en mm}^2) \Omega$ .

"D", m	"N"	"t" m	"L" m	"R" $\Omega$
0.00794	50	1.2472	0.027	<b>0.13698</b>
0.009525	75	2.244	0.04	<b>0.24647</b>
0.01111	100	3.491	0.057	<b>0.383</b>

Tabla 1 Datos posibles de la bobina.

### Proceso de verificación experimental

Para evaluar el funcionamiento del electroimán construido, se instalará éste en un circuito, con una fuente de voltaje de corriente directa. Se interconectará el electroimán, con cables a una fuente, y con un multímetro, para que al cerrar el circuito la corriente circule por la bobina y se produzca el electroimán.

Los valores de la fuente de voltaje (FEM) variarán en el rango: 0.25 volt (V) hasta 2 V, la longitud del solenoide se mantendrá constante en 0.057 metros (m) con núcleo de acero dulce (con su correspondiente  $\mu$ ), y N es igual a 100 espiras. Se colocará un clip de acero dulce que pendiendo de una altura h y paralelo a un extremo del núcleo del electroimán, se ubique a una distancia horizontal y perpendicular de x metros; con la pretensión de que, el clip experimente una fuerza de atracción hacia el centro del extremo del núcleo.

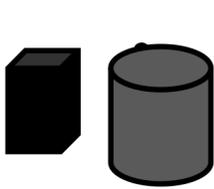


Figura 6. Fuente de voltaje de corriente directa

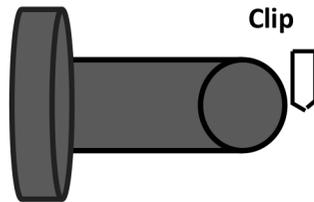


Figura 7. Tornillo

Se considerará que el valor de la temperatura en el embobinado durante el experimento permanece constante. El valor de campo magnético B, en el centro de uno de los extremos del núcleo del solenoide, se podrá calcular con la siguiente ecuación que se ha obtenido con la ley de Biot –Savart.

$$B_{\text{centro de un solenoide de longitud L con N espiras}} = N\mu I/L \text{ T (3)}$$

### Resultados y discusión

Una vez que se ha ensamblado el circuito, se cierra y circula la corriente I cuantificada en A por el alambre que conforma la bobina; entonces en el espacio libre y en el núcleo (tornillo “negro” adquirido en una ferretera) se formará un campo magnético B temporal. Se observó que, en la medida que el voltaje cambia (variable explicativa) de 0.5 V hasta 2 V, la capacidad magnética del solenoide aumenta (variable respuesta); pues se fue incrementando la distancia de separación x entre el extremo del núcleo y el clip, ello implicó que, la presencia de éste se detectó a mayor lejanía.

FEM V	“I” A	R <sub>equivalente</sub>	“X” m	“B” T
0.25	0.31	0.8065		2.6474
0.5	0.67	0.7463	0.005	5.9125
1	1.123	0.8905	0.01	9.0998
2	2.65	0.7547	0.025	23.385

Tabla 2. Valores de entrada y salida del experimento

### Conclusiones

- 1.- Se logró verificar que el tornillo se magnetizó temporalmente, al atraer el clip.
- 2.- En los cuatro experimentos el valor de la resistencia equivalente  $R_{\text{equivalente}} (V/I \Omega)$  es superior a la cantidad teórica de 0.383  $\Omega$  calculada previamente.
- 3.- La diferencia en los valores de la resistencia teórica con sus correspondientes en las lecturas del multímetro, se explica porque se involucra la resistencia del instrumento de medición.
- 4.- Se evidenció relación creciente entre variable explicativa y variable respuesta, porque un incremento en la primera produce una ampliación en la segunda.

### Referencias

- [1] Tippens P.E., (2009) *Física conceptos y aplicaciones*, Mc Graw Hill, séptima edición
- [2] Cheng D. K., (1997) *Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería*, Addison Wesley I.
- [3] Coulomb C. A., (1890) *ELEKTRICITT UND MAGNETISMUS (1785-1786)*, reprint: Leipzig Alemania Verlang von Wilhelm Engelmann.

Recibido: 20 de marzo de 2012

Aceptado: 15 de septiembre de 2013