

## Freno Electromagnético: Prototipo para Experimentación

Julián A. IDARRAGA, Sebastián ARANGO, Luz A. SABOGAL

Facultad IEE; Universidad Pontificia Bolivariana, Cir. 1 #70-01, Medellín, Colombia.

*julianandresidarrag@hotmail.com*

Resumen: Se presenta un prototipo de freno electromagnético para experimentación, cuyo principio de funcionamiento son las fuerzas que un campo magnético uniforme ejerce sobre las corrientes parásitas inducidas por el movimiento del péndulo metálico dentro de dicho campo magnético, según la Ley de Inducción electromagnética de Faraday - Henry. Este prototipo fue diseñado y construido por estudiantes de pregrado de la Universidad Pontificia Bolivariana, con la finalidad de proporcionar un equipo con el cual se pueda de manera práctica, analizar la influencia que sobre el tiempo de frenado del péndulo ejercen variables como: La intensidad del campo magnético, la forma y la conductividad de la pieza metálica que hace las veces de péndulo, y el ángulo de salida. El prototipo desarrollado es versátil, didáctico y se diferencia de los equipos didácticos que sobre este tema se encuentran en el mercado, porque éste permite el control, la visualización y la medición de las variables involucradas en el fenómeno en estudio, lo que permite mejores procesos de comprensión sobre el fenómeno de las corrientes parásitas inducidas, el cual tiene múltiples aplicaciones en la ingeniería. *Copyright © 2013 UPB*

Palabras clave: Flujo magnético, Corrientes parásitas, freno.

Abstract: Presents a prototype of electromagnetic brake for experimentation, with principle of operation are the forces that a uniform magnetic field exerts on the eddy currents induced by the metal pendulum motion within that magnetic field, according to the Law of Electromagnetic induction of Faraday - Henry . This prototype was designed and built by undergraduate students from the Universidad Pontificia Bolivariana, in order to provide an equipment which can be a practical way to analyze the influence on the braking time of the pendulum exercise variables such as intensity magnetic field, the shape and conductivity of the metal piece serves as a pendulum, and the exit angle. The prototype developed is versatile, educational and teaching equipment differenced on

Manuscrito recibido en Agosto 02, 2013. Este proyecto fue realizado por los estudiantes Sebastián Arango Salazar y Julián Andrés Idarraga Vargas, con el apoyo del docente y coordinador del área de laboratorio de Física de la Universidad Pontificia Bolivariana Luz Aída Sabogal.  
D.V. Sebastián y Julian. Son estudiantes de la Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia (e-mail: usu78@hotmail.com/julianandresidarrag@gmail.com)

this issue with the ones that are in the market, because it allows the control, visualization and measurement of the variables involved in the phenomenon under study, allowing better processes of understanding of the phenomenon of induced Eddy currents, which has many applications in engineering

Keywords: Magnetic flux, Eddy currents, brake.

### 1. INTRODUCCIÓN

Los frenos electromagnéticos tienen una importancia práctica en la ingeniería ya que dentro de sus aplicaciones más importantes está el frenado de grandes sistemas como los trenes de alta velocidad (Maglev), evitando el desgaste entre piezas dado que no hay contacto físico entre las partes que conforman el sistema de frenado y porque se pueden usar en sistemas de alta precisión como las balanzas de inducción. Con la finalidad de que el estudiante pueda experimentar y apropiarse del fenómeno de los frenos electromagnéticos, generar comprensiones y nuevos usos se presenta un prototipo para experimentación diseñado y construido por estudiantes de ingeniería electrónica de la Universidad Pontificia Bolivariana.

Uno de los valores agregados de este prototipo y que lo diferencia de los prototipos de frenos electromagnéticos que se encuentran en el mercado es que permite el control, la visualización y la medición de las variables involucradas en el fenómeno en estudio. Para efectos de hacer una aproximación teórica del experimento se integran dos bases teóricas. Por un lado la ley de inducción electromagnética de Faraday-Henry y por otro lado el modelo físico para analizar la dinámica de la pieza básica del freno que es un péndulo físico amortiguado. A continuación se describe de manera sucinta el proceso de diseño, pruebas y construcción del prototipo final. Posteriormente se describe el prototipo final que consta de tres grandes bloques donde se destacan la parte eléctrica, la parte mecánica y la parte electrónica de control, visualización y medición. Las pruebas, ensayos y posterior análisis de resultados de este prototipo final permiten presentar para su uso, un equipo de experimentación

modular que permite la variación de los siguientes parámetros: Forma geométrica, tipo de material, intensidad del campo magnético, ángulo de salida del péndulo y concluir sobre su influencia en el tiempo de frenado. En la sección 2 se hablará del freno por inducción electromagnética, en la 3 sobre el diseño y construcción del prototipo de freno electromagnético y finalmente en la 4 del prototipo final del freno electromagnético.

## 2. FRENO POR INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

El descubrimiento, debido a Hans Christian Oersted, de que una corriente eléctrica produce un campo magnético estimuló la imaginación de los físicos de la época y multiplicó el número de experimentos en busca de relaciones nuevas entre la electricidad y el magnetismo. En ese ambiente científico pronto surgiría la idea inversa de producir corrientes eléctricas mediante campos magnéticos. Algunos físicos famosos y otros menos conocidos estuvieron cerca de demostrar experimentalmente que también la naturaleza apostaba por tan atractiva idea. Pero fue Faraday el primero en precisar en qué condiciones podía ser observado semejante fenómeno. A las corrientes eléctricas producidas mediante campos magnéticos Michael Faraday las llamó corrientes inducidas. Desde entonces al fenómeno consistente en generar campos eléctricos a partir de campos magnéticos variables se denomina inducción electromagnética (Física Net, 2012).

### 2.1 Inducción electromagnética o Ley de Faraday - Henry

Independientemente de Michael Faraday, Joseph Henry, había observado que un campo magnético variable produce en un circuito próximo una corriente eléctrica.

Los resultados concordantes con las experiencias de ambos físicos pueden resumirse en un enunciado que se conoce como ley de Faraday-Henry:

La fuerza electromotriz inducida en un circuito es proporcional a la rapidez con la que varía el flujo magnético que lo atraviesa, como se ve en la ecuación 1:

$$\varepsilon_i = - \partial\Phi/\partial t \quad (1)$$

Siendo  $\varepsilon$  la fuerza electromotriz inducida y  $\partial\Phi$  la variación de flujo magnético que se produce en el intervalo de tiempo  $\partial t$ . De acuerdo con esta ecuación, la magnitud de fuerza electromotriz inducida coincide con lo que varía el flujo magnético por unidad de tiempo. Por su parte, el signo negativo recoge el hecho, observado experimentalmente por Faraday y Henry, de que aumentos ( $\partial\Phi > 0$ ) y disminuciones ( $\partial\Phi < 0$ ) de flujo magnético producen corrientes inducidas de sentidos opuestos y se conoce como la ley de Lenz.

Si no hay variación en el tiempo del flujo magnético que atraviesa un circuito, el fenómeno de la inducción electromagnética no se presenta. Cuando la ley de Faraday-

Henry se aplica a una bobina formada por N espiras iguales toma la forma:

$$\varepsilon_i = - N \cdot \partial\Phi/\partial t$$

### 2.2 Definición de las corrientes parásitas o de Foucault

Las corrientes parásitas se producen cuando un material conductor atraviesa un campo magnético variable, o viceversa, provocando esto una fuerza electromotriz inducida en el conductor, la cual a su vez genera que los electrones libres también se muevan produciendo dichas corrientes (Serway, 2012)

De acuerdo a la ley de Lenz, la dirección de las corrientes parásitas debe oponerse al cambio que las causa. Esto da origen a una fuerza repulsiva que se opone al movimiento del conductor dentro del campo magnético variable (Figura 1). En un conductor no uniforme las corrientes parásitas y la fuerza retardadora se reducen notablemente debido a que al verse interrumpido el flujo uniforme de la corriente no se generan grandes espiras de corriente.

Cuanto más fuerte sea el campo magnético aplicado, o mayor la conductividad del conductor, o mayor la velocidad relativa de movimiento, mayores serán las corrientes parásitas y los campos opositores que ellas generan.

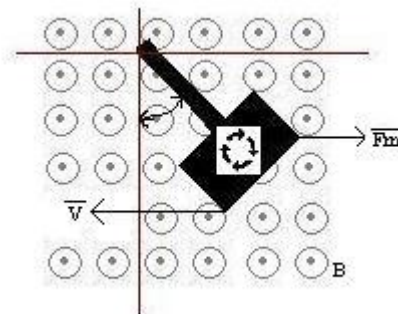


Fig1. Peineta sumergida en el campo magnético uniforme y creación de corrientes parásitas en su interior. Fuente: Personal

Las corrientes parásitas tienen muchas aplicaciones dentro de las que se destacan el aprovechamiento de la fuerza que ejerce el campo magnético sobre las corrientes parásitas (frenado magnético), y las que aprovechan o evitan el calentamiento que estas corrientes producen por efecto Joule en el metal, como los hornos de inducción, en los cuales se potencia este efecto Joule o en los transformadores en los cuales los núcleos no pueden ser sólidos sino en laminas de hierro para minimizar el efecto Joule.

El efecto de frenado en el péndulo se da cuando aparece una fuerza que se opone a su movimiento. Este efecto es de gran aplicación en frenos magnéticos tanto para trenes de alta velocidad, motores, como balanzas de precisión, entre otros (Wikipedia, 2012a).

Si se hace oscilar un péndulo metálico entre los polos de un electroimán, se observa que se va frenando hasta pararse por

completo. Este efecto se logra más rápido cuanto mayor sea la intensidad del campo (Sears, 2002)

### 2.3 Modelo simplificado para calcular la fuerza de frenado

Sea una pieza metálica larga y ancha y de pequeño espesor que se mueve con velocidad constante  $v$ . Un campo magnético  $B$  uniforme perpendicular al plano de la hoja metálica se aplica a una pequeña porción rectangular de dimensiones  $a$  y  $b$  (Figura2).

Se supondrá que el campo magnético producido por las corrientes inducidas es suficientemente pequeño, para considerar que la fuerza de frenado proviene únicamente de la acción del campo magnético externo sobre las corrientes inducidas. Esto se produce si la velocidad  $v$  de la pieza metálica es inferior a una velocidad característica  $v_c$ , que depende de la conductividad del metal y del espesor de la pieza.

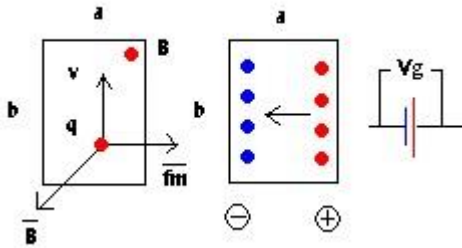


Fig2. del campo magnético externo sobre las corrientes inducidas. Fuente: Personal

Supongamos que el campo magnético  $B$  es perpendicular al plano de la hoja metálica, al moverse la pieza metálica con velocidad  $v$ , los portadores de carga  $q$  existentes en la pequeña región rectangular de dimensiones  $a$  y  $b$  experimentan una fuerza  $f_m=q(v \times B)$ , tal como se muestra en la Figura4. Los portadores de carga son impulsados por la fuerza magnética hacia la derecha.

La separación de cargas produce un campo eléctrico  $E=-v \times B$ , dirigido hacia la izquierda. Tenemos el equivalente a una batería cuya fuerza electromotriz inducida es igual a la diferencia de potencial  $V_e = vBa$  medida en circuito abierto.

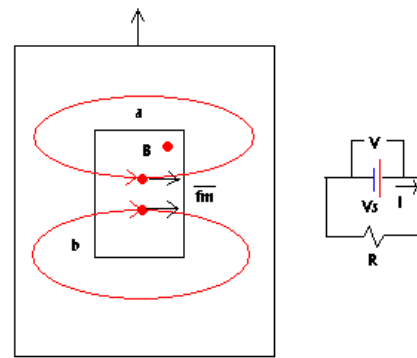


Fig3. Sentido de las corrientes inducidas y fuerza electromotriz inducida. Fuente: Personal

La pequeña región rectangular no está aislada del resto de la hoja metálica, que proporciona la conexión entre los dos terminales de la imaginaria batería por el que circula una corriente de intensidad  $i$ . El resto de la pieza metálica opone una resistencia  $R$  al paso de la corriente eléctrica.

Mientras que la pequeña región rectangular presenta una resistencia interna  $r$  que podemos calcular aplicando la ley de Ohm descrita por la Ecuación 2.

$$r = \frac{a}{\sigma \delta b} \quad (2)$$

Siendo  $\delta$  el espesor de la pieza metálica y  $\sigma$  la conductividad del metal. La ecuación del circuito se escribe:

$$i = \frac{vBa}{R+r} = \frac{\sigma \delta b B}{(1+R/r)} v$$

El cálculo de la resistencia  $R$  de la pieza metálica excepto la región rectangular es muy complicado. La fuerza que ejerce el campo magnético  $B$  sobre esta porción de corriente rectilínea es:

$$F_m = i(u_t \times B)a$$

La fuerza  $F_m$  se opone a la velocidad  $v$  de la pieza metálica y es proporcional a su velocidad, y al cuadrado del campo magnético  $B$  como se muestra en la Ecuación 3. El producto  $\delta ab$  es el volumen de la porción de la pieza metálica que está bajo la influencia del campo magnético uniforme  $B$ .

$$F_m = \frac{\sigma \delta ab}{1+R/r} B^2 v \quad (3)$$

La energía disipada en la unidad de tiempo, es el producto de la fuerza por la velocidad,  $F_m \cdot v$ , es proporcional al cuadrado del producto de la intensidad del campo magnético por la velocidad.

Para el propósito del prototipo que se presenta en este artículo la pieza básica del freno a moverse en el campo magnético se modela como un péndulo físico.

2.4 Modelo para analizar la dinámica del péndulo físico

El péndulo físico es un sistema con un sólo grado de libertad; el correspondiente a la rotación alrededor del eje fijo ZZ' (Figura 4). La posición del péndulo físico queda determinada, en cualquier instante, por el ángulo  $\theta$  que forma el plano determinado por el eje de rotación (ZZ') y el centro de gravedad (G) del péndulo con el plano vertical que pasa por el eje de rotación (Física con ordenador, 2012)

Llamaremos h a la distancia del centro de gravedad (G) del péndulo al eje de rotación ZZ'. Cuando el péndulo está desviado de su posición de equilibrio (estable) un ángulo  $\theta$ , actúan sobre él dos fuerzas (mg y N) cuyo momento resultante con respecto al eje ZZ' es un vector dirigido a lo largo del eje de rotación ZZ', en el sentido negativo del mismo.

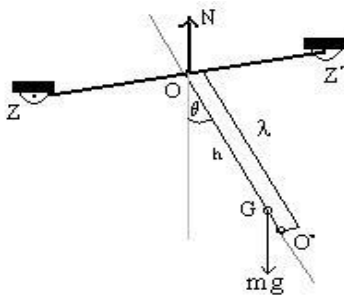


Fig4. Diagrama del péndulo físico. Fuente: Personal

Llamaremos h a la distancia del centro de gravedad (G) del péndulo al eje de rotación ZZ'. Cuando el péndulo está desviado de su posición de equilibrio (estable) un ángulo  $\theta$ , actúan sobre él dos fuerzas (mg y N) cuyo momento resultante con respecto al eje ZZ' es un vector dirigido a lo largo del eje de rotación ZZ', en el sentido negativo del mismo.

$$M_e = -mgh \sin \theta$$

Si es  $I_O$  el momento de inercia del péndulo respecto al eje de suspensión ZZ' y llamamos  $\ddot{\theta}$  a la aceleración angular del mismo, el teorema del momento angular nos permite escribir la ecuación diferencial del movimiento de rotación del péndulo:

$$-mgh \sin \theta = I_O \ddot{\theta}$$

Que podemos escribir en la forma como lo enuncia la Ecuación 4:

$$\ddot{\theta} + \frac{mgh}{I_O} \sin \theta = 0 \tag{4}$$

Que es una ecuación diferencial de segundo orden, del mismo tipo que la que encontramos para el péndulo simple. En el caso de que la amplitud angular de las oscilaciones sea pequeña, podemos poner  $\sin \theta \approx \theta$  y la Ecuación (4) adopta la forma:

$$\ddot{\theta} + \frac{mgh}{I_O} \theta = 0$$

Que corresponde a un movimiento armónico simple. El periodo de las oscilaciones es:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I_O}{mgh}}$$

2.5 Acercamiento al modelo matemático del prototipo de freno electromagnético

Partiendo del modelamiento matemático de los fenómenos físicos de la fuerza ejercida por un campo magnético sobre una placa de metal sumergida en su interior y del péndulo físico, se realiza el siguiente acercamiento al modelo matemático del prototipo de freno electromagnético para experimentación.

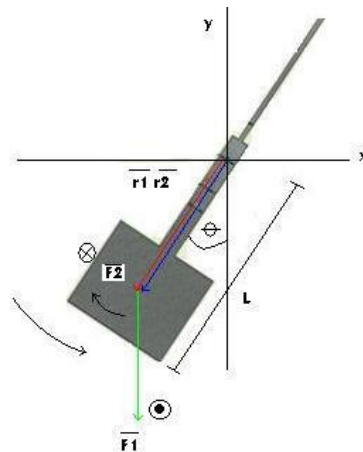


Fig5. Diagrama de fuerzas de la peñeta sumergida en el campo magnético uniforme. Fuente: Personal

Partiendo de la segunda ley de Newton se tiene para un movimiento angular que:

$$\Sigma \tau = I \alpha \quad \text{sumatoria de Torques}$$

Dónde:

$$\alpha = \frac{d^2\theta}{dt^2} ; I = \Sigma \text{ de momentos de inercia}$$

r1 y r2 son los vectores de posición de las fuerzas ejercidas por la gravedad y la fuerza magnética, respectivamente. Se tiene entonces que:

$$\begin{aligned} \tau^1 &= r^1 F^1 \text{ Sen}\Theta \quad \text{en la dirección } k \\ \tau^2 &= r^2 F^2 \text{ Sen}\Theta \quad \text{en la dirección } -k \end{aligned}$$

Se puede hacer la siguiente aproximación:

$$\text{Sen}\Theta \approx \Theta$$

$$\Sigma\tau = I \alpha$$

$$r^1 F^1 \theta - r^2 F^2 \theta = I \ddot{\theta}; \quad \text{donde } \theta = \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

Y F<sup>2</sup> es la fuerza magnética que le ejerce el campo magnético a las corrientes parásitas y es contraria al movimiento, se describe como:

$$F^m = (\sigma \delta a b / 1 + \frac{R}{r}) B^2 V$$

$$F^m = \eta V, \quad \text{donde } \eta = (\sigma \delta a b / 1 + \frac{R}{r}) B^2$$

$$r^1 F^1 \theta - r^2 F^m \theta = I \ddot{\theta}$$

$$r^1 F^1 \theta - r^2 \eta V \theta = I \ddot{\theta}$$

$$r^1 F^1 \theta - r^2 \eta_L \theta \dot{\theta} = I \ddot{\theta}$$

$$I \ddot{\theta} + r^2 \eta_L \theta \dot{\theta} - r^1 F^1 \theta = 0$$

Se llega finalmente a la ecuación diferencial homogénea de segundo orden, no lineal

$$\mathbf{a} \ddot{\theta} + \mathbf{b} \theta \dot{\theta} - \mathbf{c} \theta = \mathbf{0} \quad (5)$$

La solución a la Ecuación 5 no puede hallarse mediante los métodos tradicionales, se requiere de procedimientos que involucran métodos numéricos. Lo cual no hace parte del alcance de este proyecto.

Por las características que tengan el campo magnético, el ángulo inicial de tiro del péndulo y por el hecho de ser un péndulo amortiguado se obtiene dos tipos de situaciones físicas para el movimiento de este péndulo: Un movimiento periódico de amplitud variable o subamortiguado y un

movimiento no periódico o críticamente amortiguado.

### 3 DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL PROTOTIPO DE FRENO ELECTROMAGNÉTICO

El fenómeno de las corrientes parásitas siendo un tema importante y de muchas aplicaciones no cuenta con equipos, ni espacios para la experimentación en los planes de estudio de las ingenierías. Adicionalmente los equipos didácticos que fabrican y comercializan los proveedores solo permiten hacer una ilustración del fenómeno muy simple y no ofrecen forma de cambiar y cuantificar variables. Por lo tanto se decide diseñar y construir en la Universidad Pontificia Bolivariana un prototipo donde el estudiante de pregrado pueda interactuar de manera práctica con las variables físicas que este fenómeno involucra, como: Campo magnético, corrientes parásitas, tiempos de frenado, formas y tipo de material ángulos de tiro, entre otras. Uno de los requisitos del diseño implica el uso y la utilización de los equipos específicos de medición como el Teslámetro y el sistema de adquisición de datos Cobra3.

#### 3.1 Diseño del montaje básico para medición manual

El primer montaje básico para medición manual incluye un par de bobinas de Helmholtz y su respectiva fuente de alimentación para generar un campo magnético uniforme, piezas metálicas de diferentes formas geométricas y materiales para realizar el movimiento pendular y las cuales están soportadas en una base universal. Complementa este montaje el medidor de corriente y el teslámetro para medir el campo magnético uniforme generado. Después de realizar muchas pruebas y ensayos y debido a las limitantes técnicas de las bobinas se encontró que con una corriente aplicada en el umbral máximo de operación de 6A, el campo era máximo de 2 mT, lo cual no era suficiente para el frenado de los elementos metálicos de prueba.

Posteriormente se ensayo con un par de bobinas con núcleo de ferrita, como se muestra en la figura 6, conectadas en serie nos arrojan resultados satisfactorios ya que con una corriente máxima de 2A logramos generar campos magnéticos de alrededor de 25 mT suficientes para frenar las nuevas peinetas diseñadas en distintos tipos de materiales y con un calibre un poco mayor que les da estabilidad durante el movimiento.



Fig6. Bobinas con núcleo de hierro. Fuente: Personal

Al obtener resultados positivos con las bobinas de núcleo de ferrita se procede al diseño propio de un par de bobinas con características que garantizan las condiciones necesarias para frenar el material metálico en el experimento. Las características de dichas bobinas se describen a continuación.

- $N = 1200$  (Número total de espiras por Bobina).
- $R_{int} = 1.8$  ohmios (Resistencia interna de cada bobina).
- $I_{m\acute{a}x} = 6$  A (Corriente máxima de circulación en la bobina).
- Inductancia con núcleos de hierro = 160mH
- Inductancia sin núcleos de hierro = 15mH

Para mejorar los procesos de medición se implementa el uso de un sistema de adquisición de datos al sistema básico del montaje.

### 3.2 Sistema de adquisición de datos

El sistema de adquisición de datos utilizado para este diseño es el sistema Cobra3, el cual tiene cuatro unidades que pueden ser utilizadas para muchas áreas de las ciencias. Dentro del proceso de experimentación solo se utiliza la Unidad Básica Cobra3 y especialmente su modulo *Timer/Counter*.

Esta función de Cobra3 sirve para medir tiempos o para contar eventos (señales TTL), por lo que es una herramienta muy útil en la elaboración de pruebas o experimentos. El contador tiene una capacidad de 32 a 40 bits y una resolución de 1 ms a 250 ns. Las dos entradas *Timer/Counter* 1 y 2 se pueden utilizar como *timer* pero solo tiene una entrada *Timer/Counter* 1 que se puede utilizar como contador de eventos.

La Unidad Básica Cobra3 puede ser operada por medio de un computador y tiene la facilidad de actualizar el sistema operativo por medio de la interfaz RS232.



Fig7. Unidad básica Cobra3. Fuente: Personal

*Software Measure.* Measure es un programa de medida que está disponible para una amplia gama de los instrumentos de medida de PHYWE, incluyendo PHYWE Cobra3 con sus módulos y sensores. El software de Measure ofrece una

interfaz uniforme para procesar y visualizar los datos y así permite trabajar de manera simple, rápida y confiable.

*Measure* se compone de varias aplicaciones según las variables a medir, es decir, cada módulo de medida tiene su propia interfaz desde donde se pueden modificar las variables del experimento a realizar. Cuenta además con una interfaz gráfica del Cobra3 permite visualizar el comportamiento en el tiempo de las variables medidas. Por ejemplo para este prototipo los tiempos de frenado obtenidos y la medición del campo magnético utilizado para frenar el péndulo (Gomez et al, 2007)

## 4 PROTOTIPO FINAL DEL FRENO PARA EXPERIMENTACIÓN

Luego de haber explicado someramente los elementos involucrados en el experimento, se procede a explicar como estos se integran de manera óptima para poder visualizar y medir el fenómeno de las corrientes parásitas.

### 4.1 Descripción del prototipo

El equipo se diseñó con la finalidad de que sea un equipo didáctico y de fácil uso que permita cuantificar y visualizar las variables.

El equipo consta de tres partes esenciales de funcionamiento como lo son la parte del circuito eléctrico, la parte del sistema mecánico y la parte de control, visualización y medición.

La primera parte es el circuito eléctrico conformado fundamentalmente por el par de bobinas diseñadas específicamente para este experimento, sus bases y los bornes únicos de conexión serie debidamente marcados, y los de conexión a la fuente de alimentación DC.

La segunda parte es el sistema mecánico, conformado por el eje de oscilación y el eje de soporte del sensor y los ángulos, ambos adheridos a un soporte principal de forma piramidal, centrado con el eje de la bobina mediante una mordaza mecánica especial de fijación para asegurar ambos ejes en la parte superior del soporte, el paralelismo entre los ellos, el alineamiento con el centro del embolo del sensor y la perpendicularidad con la base de las bobinas. La base de este sistema incluye un soporte roscado para graduar la altura adecuada para la sonda axial del Teslámetro. Con la finalidad de controlar el ángulo de tiro del péndulo, se construyó un medidor de ángulos utilizando una maquina de control numérico que garantiza la precisión en la medición de dichos ángulos y con la cual se diseñaron y fabricaron las peinetas de experimentación.

La tercera parte, la de control, visualización y medición, esta conformada principalmente por el circuito de diseño propio donde se destaca la utilización del microcontrolador PIC. Después de tener listo el procedimiento de toma de señales de paso de la peinetas mediante el sensor inductivo, se hace necesario procesar estas señales mediante el PIC de forma

que se obtengan señales únicas de inicio y frenado de la peineta, despreciando todas las demás muestras tomadas, que serán módulo *Timer/Counter* del sistema de adquisición de datos para que posteriormente se puedan visualizar los tiempos de frenado. El programa que se diseña para el PIC toma la señal primera de paso de la peineta frente al sensor, enciende el led de paso por cero y pone un *delay* que solo envía la señal de frenado al puerto de salida después de 500ms suprimiendo así las demás muestras enviadas por el sensor de proximidad. También dentro de esta parte electrónica se puede visualizar mediante la utilización del led de “paro” cuando se detiene completamente el movimiento del péndulo.

A continuación se listan los equipos y elementos más relevantes que conforman el prototipo:

- Par de bobinas
- Sensor de proximidad inductivo
- PIC
- Eje de oscilación de peinetas
- Base en madera MDF de ½” con dimensión 30\*50 cms
- Bases metálicas para bobinas, dimensión 14\*18
- Base metálica para base indicadora de ángulos y eje de oscilación
- Base para la sonda axial del Teslametro

#### 4.3 Conexión y descripción del funcionamiento

Para comenzar a usar el prototipo se debe conectar la unidad básica Cobra3 al computador a través del puerto serial RS232, luego realizar la conexión de los cables de *Start*, *Stop* y Tierra entre la caja de control y señalización del prototipo y el módulo *Timer/counter2* de la unidad básica Cobra3. También debe realizarse la conexión en serie de las bobinas (Las cuales tienen marcadas la polaridad en cada uno de sus bornes) y de las mismas hacia la fuente de voltaje. La unidad básica Cobra3 no debe estar conectada a la fuente de potencia en el momento de conectar o desconectar el módulo. Luego se deben asegurar correctamente las peinetas que van a ser utilizadas, en el eje de oscilación mediante la tapa roscada. Posteriormente se debe ubicar correctamente la sonda axial del Teslametro, lo que implica que la sonda debe pasar por el interior de la bobina hasta llegar a la zona de movimiento del péndulo, evitando el contacto con el mismo.

Esto se logra adhiriendo la base diseñada para la fijación de la sonda axial y ubicarla en la región del campo magnético uniforme a una distancia tal que la punta de la sonda axial no tenga contacto físico con la peineta. Después de haber realizado este procedimiento se procede a energizar el sistema mediante el adaptador de 6V para la parte electrónica del sistema y una fuente de voltaje de 0-30VDC para las bobinas.

Para medir el campo magnético asociado al tiempo de frenado se utiliza el Teslametro *Leybold Didactic*, el cual arroja los datos de flujo magnético medido en militesla (mT).

Los datos obtenidos son confrontados por el estudiante en un programa de procesamiento de datos para realizar gráficas, sacar conclusiones y responder con argumentos los objetivos planteados en la guía de laboratorio.

#### 4.4 Pruebas y ensayos

Durante todo el proceso de diseño e implementación se realizaron numerosas pruebas y ensayos sobre todos los componentes del prototipo y las partes esenciales del mismo, cuyos resultados permitieron tomar importantes decisiones acerca del diseño y la experimentación. El análisis de estos resultados permitió llegar al prototipo final de experimentación, como se muestra en la figura 8. Este proceso de pruebas y ensayos permitió mejorar el entorno de experimentación, y diseñar una guía de trabajo denominada práctica de laboratorio para que el estudiante pueda experimentar con la aplicación de las corrientes parasitas mediante el freno magnético, teniendo la certeza de que el prototipo cumple a cabalidad con las especificaciones técnicas y conceptuales. Para que el estudiante pueda tener un amplio panorama de experimentación en la guía se incluyen 4 procedimientos, por ejemplo: Variación de la intensidad del campo, variación de forma geométrica y material del péndulo, variación de ángulo de salida del péndulo y concluir sobre sus influencias en el tiempo de frenado



Fig8. Prototipo Final para Experimentación. Fuente personal

Con la realización de este proyecto, se logró implementar de manera exitosa un prototipo de freno electromagnético para la experimentación, que permite observar y cuantificar algunas de las variables involucradas en el fenómeno de las corrientes de parasitas.

Se realizó de manera óptima la integración del módulo *Timer/Counter* del sistema de adquisición de datos Cobra3 y el circuito diseñado para la toma de señales, permitiendo así cuantificar y manipular los tiempos de frenado obtenidos de las peinetas con diferentes formas geométricas y poder concluir al respecto.

A través de diferentes ensayos se logró llegar a la versión más adecuada de un prototipo para experimentación con las corrientes de Foucault y su respectiva guía de experimentación, además que este prototipo es único ya que no existe ningún otro prototipo de esta clase donde se puedan integrar las variables y al mismo tiempo medirlas de manera didáctica y automática.

La principal aplicación de este prototipo es la práctica de laboratorio diseñada para realizar el procedimiento de experimentación de las corrientes parásitas. Este prototipo elaborado, será utilizado en los laboratorios de física de la universidad como parte de la formación de los estudiantes de ingeniería. Por su diseño, podría también ser utilizado en la explicación de otros fenómenos como el péndulo físico.

## REFERENCIAS

Física con ordenador. (2012). *Corrientes de Foucault*. Recuperado de <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/induccio/foucault/foucault.htm>

Física Net. (2012). *Inducción electromagnética*. Recuperado de [http://www.fisicanet.com.ar/fisica/electrodinamica/ap03\\_induccion.php#.UPwqj\\_Jkidc](http://www.fisicanet.com.ar/fisica/electrodinamica/ap03_induccion.php#.UPwqj_Jkidc)

Gomez Ardila, F, Moncada Guerra, C, Restrepo Parra, C. (2007). *Manual equipos de laboratorio Cobra3 y software measure*. Tesis de pregrado publicada, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia.

Sears, FW, Zemansky, MW.(2002). *Física Universitaria con física moderna Volumen 2*. Mexico: Editorial Pearson

Serway, RA. (2002). *Física para ciencias e ingeniería Tomo 2*. Mexico: Editorial McGraw-Hill

Wikipedia. (2012a). *Corrientes parásitas*. Recuperado de [http://es.wikipedia.org/wiki/Corriente\\_de\\_Foucault](http://es.wikipedia.org/wiki/Corriente_de_Foucault)

Wikipedia. (2012b). *Péndulo Físico*. Recuperado de [http://es.wikipedia.org/wiki/P%C3%A9ndulo\\_f%C3%ADsico](http://es.wikipedia.org/wiki/P%C3%A9ndulo_f%C3%ADsico)

**Luz Aída Sabogal**, Nacida en Quindío, Colombia el 26 de Febrero de 1963. Licenciada en Física, Universidad del Quindío (1985); Magíster en Física, Universidad de Antioquia (1992). Actualmente se desempeña como Coordinadora Área de Física Centro de Ciencia Básica de la Universidad Pontificia Bolivariana.

**Sebastián Arango Salazar**, Nacido en Cali, Colombia el 03 de Noviembre de 1983. Inició sus estudios de pregrado en el año 2002. Actualmente se encuentra realizando el proyecto de grado basado en el presente artículo para optar al título de Ingeniero Electrónico de la Universidad Pontificia Bolivariana.

**Julián Andrés Idarraga Vargas**, Nacido en Medellín, Colombia el 08 de Agosto de 1985. Inició sus estudios de pregrado en el año 2002. Actualmente se encuentra realizando el proyecto de grado basado en el presente artículo para optar al título de Ingeniero Electrónico de la Universidad Pontificia Bolivariana.