

FRENO ELECTROMAGNÉTICO: PROTOTIPO PARA EXPERIMENTACIÓN

SEBASTIÁN ARANGO SALAZAR
JULIÁN ANDRÉS IDÁRRAGA VARGAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

MEDELLÍN

2013

FRENO ELECTROMAGNÉTICO: PROTOTIPO PARA EXPERIMENTACIÓN

SEBASTIÁN ARANGO SALAZAR
JULIÁN ANDRÉS IDÁRRAGA VARGAS

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico

Director

Luz Aída Sabogal Tamayo

Magister en física y coordinadora del área de física centro de ciencia básica
Universidad Pontificia Bolivariana

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
MEDELLÍN

2013

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma
Nombre
Presidente del Jurado

Firma
Nombre
Presidente del Jurado

Firma
Nombre
Presidente del Jurado

DEDICATORIA

Queremos dedicar este trabajo especialmente a nuestras familias por el apoyo incondicional brindado durante todo este tiempo.

A mi madre Sonia Vargas compañera incondicional de desvelos y madrugadas, a mis hermanos, pilares de mi formación personal y académica y a mi Padre que aunque no pudo estar conmigo en este proceso siempre fue mi mayor aliciente para continuar en los momentos difíciles. Muchas gracias mi VIEJO!

AGRADECIMIENTOS

A nuestro director, la Magister y coordinadora del área de física del centro de ciencia básica de la Universidad Pontificia Bolivariana, Luz Aída Sabogal Tamayo, por brindarnos la oportunidad de elaborar este proyecto y ayudarnos en la realización de éste en todo momento.

Al coordinador del laboratorio de materiales y ciencia básica de la Universidad Pontificia Bolivariana, Ingeniero Luís Alfonso Bernal Bernal y a todo su grupo de trabajo, por la incondicional disposición y colaboración constante en la consecución de espacios para la experimentación y el préstamo de los equipos de laboratorio.

CONTENIDO

DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
CONTENIDO	V
TABLA DE FIGURAS	VII
RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	2
1. INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA: LEY DE FARADAY- HENRY	3
1.1. CORRIENTES PARÁSITAS O CORRIENTES DE EDDY	7
1.1.1. Definición de las corrientes parásitas o corrientes de Eddy	8
1.1.2. Pérdidas de energía por las corrientes parásitas	12
1.2. CORRIENTES DE EDDY POR MOVIMIENTO DE CUERPOS CONDUCTORES EN CAMPOS MAGNÉTICOS UNIFORMES.....	15
1.2.1. Modelo simplificado para calcular la fuerza de frenado.....	18
1.2.2. Modelo simplificado para analizar la dinámica del péndulo físico.....	21
1.2.3. Acercamiento al modelo matemático del freno electromagnético.....	22
2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE FRENO ELECTROMAGNÉTICO	25
2.1. Diseño del montaje básico para medición manual.....	25
2.2. Diseño de montaje con el sistema de adquisición de datos.....	27
2.2.1. Unidad básica Cobra3	27
2.2.2. Software <i>Measure</i>	30
3. PROTOTIPO FINAL DEL FRENO Y RESULTADOS.....	35

3.1. Descripción del prototipo	35
3.2. Conexión y descripción de su funcionamiento	39
3.3. Pruebas y ensayos	43
4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	44
5. PRÁCTICA DE LABORATORIO: FRENO DE EDDY	46
6. CONCLUSIONES.....	47
7. BIBLIOGRAFÍA	48
8. ANEXOS	49
ANEXO 1. Teslámetro Leybold Didactic.....	49
ANEXO 2. PIC Microchip 18f2550.....	53
ANEXO 3. Sensor de proximidad inductivo LM30-3015NA	54
ANEXO 4. Especificaciones técnicas de la Unidad Básica Cobra3	55
ANEXO 5. GUÍA PARA EXPERIMENTACIÓN CON EL PROTOTIPO DE FRENO DE EDDY.....	57
ANEXO 6. MANUAL DE MANTENIMIENTO DEL PROTOTIPO.....	70
ANEXO 7. ANTEPROYECTO	82
ANEXO 8. TABLAS DE RESULTADOS DE PRUEBAS	100

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Corrientes inducidas por un campo magnético en una lámina metálica.	10
Figura 3. Corrientes de Foucault en hornos y cocinas de inducción.....	11
Figura 2. Efecto de frenado producido por una corriente eléctrica en el interior de un campo magnético.....	12
Figura 4. Disco metálico dentro de un campo magnético.....	15
Figura 6. Movimiento de una pieza conductora hacia y desde un campo magnético uniforme.....	17
Figura 7. Acción del campo magnético externo sobre las corrientes inducidas.	18
Figura 8. Sentido de las corrientes inducidas y fem.	19
Figura 9. Fuerza magnética aplicada sobre una sección rectangular.	20
Figura 10. Diagrama de fuerzas del péndulo físico.....	21
Figura 11. Diagrama de fuerzas del péndulo físico.....	22
Figura 12. Bobinas de Helmholtz.	25
Figura 13. Bobinas con núcleo de ferrita.....	26
Figura 14. Bobinas diseñadas con núcleo de ferrita.....	26
Figura 15. Unidad básica Cobra 3.....	28
Figura 19. Cuadro de exportar datos.....	34
Figura 20. Sensor inductivo LM30-3015NA.....	37
Figura 21. Diagrama de un sistema microcontrolado.	38
Figura 22. Prototipo freno electromagnético.....	39
Figura 23. Menú Gauge.	40
Figura 24. Configuración del timer	40
Figura 25. Peineta sin perforaciones.....	41
Figura 26. Visualización del tiempo de frenado obtenido	42
Figura 28. Prototipo de freno electromagnético para experimentación.....	44

RESUMEN

Se realiza por parte de los estudiantes el desarrollo de un prototipo de experimento de laboratorio llamado "Freno electromagnético" con fines académicos para la enseñanza universitaria.

Se busca lograr un ambiente de interacción para que el aprendiz se familiarice fácilmente con los fenómenos físicos involucrados, mediante equipos de medida y adquisición de datos con interfaces hombre maquina amigables que le ayudaran a adentrarse en el mundo de la experimentación y la investigación.

Se realiza también la respectiva guía de laboratorio que permita una adecuada experimentación que permita observar e interpretar los resultados obtenidos en la experimentación, tratando así de abarcar todos los temas que al proyecto definen.

PALABRAS CLAVE: FRENO ELECTROMAGNÉTICO; FRENO DE EDDY; CORRIENTES DE EDDY O DE FOUCAULT; CORRIENTES PARÁSITAS; ADQUISICIÓN DE DATOS COBRA3; TESLÁMETRO.

INTRODUCCIÓN

El proyecto consiste en el diseño y la elaboración de un prototipo de freno electromagnético y la guía de laboratorio para el mismo, que permita experimentar el fenómeno de las corrientes parásitas o corrientes de Foucault en el laboratorio de física de la Universidad Pontificia Bolivariana.

El objetivo principal de este proyecto es el desarrollo del prototipo de freno electromagnético a partir del uso de los equipos de medida y de adquisición de datos como el Cobra3 del fabricante PHYWE y el instrumento de medida de campo magnético, Teslámetro. Herramientas adquiridas por la universidad y subutilizadas en las prácticas de laboratorio de física.

- Se logra una integración óptima entre el módulo *Timer/Counter* del sistema de adquisición de datos cobra3 y el circuito de control y señalización diseñado para tomar el tiempo de frenado de las peinetas de material metálico. Se logra a partir de la integración anterior disponer de las tablas de los tiempos de frenado de cada aparte descrito en la guía de laboratorio que permitirá posteriormente relacionarlos con el correspondiente campo medido en cada instancia de frenado, y finalmente graficar el campo magnético aplicado vs el tiempo de frenado.
- Se diseña y construye un prototipo de experimento de “freno electromagnético” para el laboratorio del área de física de la Universidad Pontificia Bolivariana. De todo lo anterior se entrega una guía de laboratorio para que el estudiante realice un adecuado el procedimiento de experimentación con el prototipo del freno electromagnético de una manera enriquecedora en su formación como ingeniero.

1. INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA: LEY DE FARADAY- HENRY

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*.

La inducción electromagnética es la producción de corrientes eléctricas por campos magnéticos variables en el tiempo. El descubrimiento por parte de Faraday y Henry de este fenómeno introdujo una cierta simetría en el mundo del electromagnetismo.

La inducción electromagnética constituye una pieza destacada en ese sistema de relaciones mutuas entre electricidad y magnetismo que se conoce con el nombre de electromagnetismo. Pero, además, se han desarrollado un sin número de aplicaciones prácticas de este fenómeno físico. El transformador que se emplea para conectar una calculadora a la red, la dinamo de una bicicleta o el alternador de una gran central hidroeléctrica son sólo algunos ejemplos que muestran la deuda que la sociedad actual tiene contraída con ese modesto encuadernador convertido, más tarde, en físico experimental que fue Faraday.

Las experiencias que llevaron a Faraday al descubrimiento de la inducción electromagnética pueden ser agrupadas en dos categorías: Experiencias con corrientes y experiencias con imanes. En primer lugar preparó dos solenoides, uno arrollado sobre el otro, pero aislados eléctricamente entre sí. Uno de ellos lo conectó a una pila y el otro a un galvanómetro y observó cómo cuando accionaba el interruptor del primer circuito la aguja del galvanómetro del segundo circuito se desplazaba, volviendo a cero tras unos

instantes. Sólo al abrir y al cerrar el interruptor el galvanómetro detectaba el paso de una corriente que desaparecía con el tiempo. Además, la aguja se desplazaba en sentidos opuestos en uno y otro caso.

En el segundo grupo de experiencias Faraday utilizó un imán recto y una bobina conectada a un galvanómetro. Al introducir bruscamente el imán en la bobina observó una desviación en la aguja, desviación que desaparecía si el imán permanecía inmóvil en el interior de la bobina. Cuando el imán era retirado la aguja del galvanómetro se desplazaba de nuevo, pero esta vez en sentido contrario. Cuando repetía todo el proceso completo la aguja oscilaba de uno a otro lado y su desplazamiento era tanto mayor cuanto más rápido era el movimiento del imán entrando y saliendo en el interior de la bobina. Lo mismo sucedía cuando mantenía quieto el imán y movía la bobina sobre él.

La representación del campo magnético en forma de líneas de fuerza permitió a Faraday encontrar una explicación intuitiva para este tipo de fenómenos. Para que se produjera una corriente inducida en la bobina era necesario que las líneas de fuerza producidas por el imán fueran cortadas por el hilo conductor de la bobina como consecuencia del movimiento de uno u otro cuerpo. En el primer grupo de experiencias, las líneas de fuerza, al aparecer y desaparecer junto con la corriente debida a la pila, producían el mismo tipo de efectos. Las experiencias anteriores a las de Faraday, al no tener en cuenta los aspectos dinámicos, o de cambio con el tiempo, de esta clase de fenómenos, no pudieron detectar este tipo de corrientes que aparecen en un circuito eléctrico sin que exista dentro del propio circuito ninguna pila que las genere.

La representación de la influencia magnética de un imán o de una corriente eléctrica en el espacio que les rodea mediante líneas de fuerza fue ideada por Faraday y aplicada en la interpretación de la mayor parte de sus experimentos sobre electromagnetismo. Mediante este tipo de imágenes Faraday compensaba su escasa preparación matemática, apoyándose así su enorme habilidad gráfica y su no inferior intuición científica. La noción de flujo magnético recoge esa tradición iniciada por Faraday de representar los campos mediante líneas de fuerza, pero añade, además, un significado matemático.

Cuando se observa, con la ayuda de limaduras de hierro, el campo magnético creado por un imán recto, se aprecia que, en los polos, las líneas de fuerza están más próximas y que se separan al alejarse de ellos. Dado que la intensidad del campo magnético B

disminuye con la distancia a los polos, parece razonable relacionar ambos hechos y establecer por convenio una proporcionalidad directa entre la intensidad del campo B y la cantidad de líneas de fuerza que atraviesan una superficie de referencia unidad. Cuanto más apretadas están las líneas en una región, tanto más intenso es el campo en dicha región.

El número de líneas de fuerza del campo magnético (B) que atraviesa una superficie depende de cómo esté orientada tal superficie con respecto a la dirección de aquéllas. Así, para un conjunto de líneas de fuerza dado, el número de puntos de intersección o de corte con la superficie será máximo para una orientación perpendicular y nulo para una orientación paralela. El número de líneas de fuerza del campo B que atraviesa perpendicularmente una superficie constituye entonces una forma de expresar el valor de la intensidad de dicho campo.

Se define el flujo del campo magnético B a través de una superficie, y se representa por la letra griega Φ , como el número total de líneas de fuerza que atraviesan tal superficie. En términos matemáticos, para un campo magnético constante y una superficie plana de área S, el flujo magnético se expresa en la forma:

$$\Phi = B.S.\cos \varphi \quad (1)$$

Siendo φ el ángulo que forman las líneas de fuerza (vector B) con la perpendicular a la superficie. Dicha ecuación recoge, mediante el $\cos \varphi$, el hecho de que el flujo varíe con la orientación de la superficie respecto del campo B y también que su valor dependa del área S de la superficie atravesada. Para $\varphi = 0^\circ$ (intersección perpendicular) el flujo es máximo e igual a B.S; para $\varphi = 90^\circ$ (intersección paralela) el flujo es nulo.

La idea de flujo se corresponde entonces con la de cantidad de campo magnético que atraviesa una superficie determinada. En el sistema internacional se expresa en Weber (Wb).

Independientemente de Faraday, Joseph Henry, había observado que un campo magnético variable produce en un circuito próximo una corriente eléctrica. Los resultados concordantes de 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 2:

$$\epsilon_i = - \partial\Phi/\partial t \quad (2)$$

Siendo ϵ_i la fuerza electromotriz inducida y $\partial\Phi$ la variación de flujo magnético que se produce en el intervalo de tiempo ∂t . De acuerdo con esta ecuación, la magnitud de f.e.m. 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.

Si no hay variación con 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:

$$\epsilon_i = - N. \partial\Phi/\partial t \quad (3)$$

Aunque la ley de Faraday-Henry, a través de su signo negativo, establece una diferencia entre las corrientes inducidas por un aumento del flujo magnético y las que resultan de una disminución de dicha magnitud, no explica este fenómeno. Lenz (1904-1965), un físico alemán que investigó el electromagnetismo en Rusia al mismo tiempo que Faraday y Henry, propuso la siguiente explicación del sentido de circulación de las corrientes inducidas que se conoce como ley de Lenz:

“Las corrientes que se inducen en un circuito se producen en un sentido tal que con sus efectos magnéticos tienden a oponerse a la causa que las originó “.

Así, cuando el polo norte de un imán se aproxima a una espira, la corriente inducida circulará en un sentido tal que la cara enfrentada al polo norte del imán sea también Norte, con lo que ejercerá una acción magnética repulsiva sobre el imán, la cual es preciso vencer para que se siga manteniendo el fenómeno de la inducción. Inversamente, si el polo norte del imán se aleja de la espira, la corriente inducida ha de ser tal que genere un polo sur que se oponga a la separación de ambos. Sólo manteniendo el movimiento relativo entre espira e imán persistirán las corrientes inducidas, de modo que

si se detiene el proceso de acercamiento o de separación cesarían aquéllas y, por tanto, la fuerza magnética entre el imán y la espira desaparecería.

La ley de Lenz, que explica el sentido de las corrientes inducidas, puede ser a su vez explicada por un principio más general, el principio de la conservación de la energía. La producción de una corriente eléctrica requiere un consumo de energía y la acción de una fuerza desplazando su punto de aplicación supone la realización de un trabajo. En los fenómenos de inducción electromagnética es el trabajo realizado en contra de las fuerzas magnéticas que aparecen entre espira e imán el que suministra la energía necesaria para mantener la corriente inducida. Si no hay desplazamiento, el trabajo es nulo, no se transfiere energía al sistema y las corrientes inducidas no pueden aparecer. Análogamente, si éstas no se opusieran a la acción magnética del imán, no habría trabajo exterior, ni por tanto cesión de energía al sistema.

1.1. CORRIENTES PARÁSITAS O CORRIENTES DE EDDY¹

La corriente alterna se caracteriza porque su sentido cambia alternativamente con el tiempo. Ello es debido a que el generador que la produce invierte periódicamente sus dos polos eléctricos, convirtiendo el positivo en negativo y viceversa, muchas veces por segundo. La ley de Faraday-Henry establece que se induce una fuerza electromotriz (f.e.m.) ε en un circuito eléctrico siempre que varíe el flujo magnético Φ que lo atraviesa. Pero de acuerdo con la definición de flujo magnético Ec.1, éste puede variar porque varíe el área S limitada por el conductor, porque varíe la intensidad del campo magnético B o porque varíe la orientación entre ambos dada por el ángulo φ .

En las primeras experiencias de Faraday las corrientes inducidas se conseguían variando el campo magnético B ; con movimiento trasnacional, no obstante, es posible provocar el fenómeno de la inducción sin desplazar el imán ni modificar la corriente que pasa por la bobina, haciendo girar ésta en torno a un eje dentro del campo magnético debido a un imán. En tal caso el flujo magnético varía porque varía el ángulo φ . Utilizando el tipo de razonamiento de Faraday, podría decirse que la bobina al rotar corta las líneas de fuerza

¹ Las corrientes de EDDY comúnmente se encuentran mencionadas como corrientes de Foucault o corrientes parásitas. En este texto se escoge denominarlas como corrientes de EDDY.

del campo magnético del imán y ello da lugar a la corriente inducida. En una bobina de una sola espira la fuerza electromotriz que se induce durante un cuarto de vuelta al girar la bobina desde la posición paralela ($\varphi = 90^\circ$) a la posición perpendicular ($\varphi = 0^\circ$) puede calcularse a partir de la ley de Faraday-Henry, en la forma:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} (\vec{B} \bullet \vec{S}) \quad (4)$$

Como el flujo Φ inicial es cero ($\cos 90^\circ = 0$) y el final es $B \cdot S$ ($\cos 0^\circ = 1$), la variación $\partial \Phi$ o diferencia entre ambos es igual al producto $B \cdot S$. Considerando el instante inicial igual a cero, resulta $\Delta t = t - 0 = t$, siendo t el tiempo correspondiente al instante final después de un cuarto de vuelta. De este modo se obtiene el resultado anterior.

Si se hace rotar la espira uniformemente, ese movimiento de rotación periódico da lugar a una variación también periódica del flujo magnético o, en otros términos, la cantidad de líneas de fuerza que es cortada por la espira en cada segundo toma valores iguales a intervalos iguales de tiempo. La f.e.m. inducida en la espira varía entonces periódicamente con la orientación y con el tiempo, pasando de ser positiva a ser negativa, y viceversa, de una forma alternativa. Se ha generado una f.e.m. alterna cuya representación gráfica, en función del tiempo, tiene la forma de una línea sinusoidal.²

1.1.1. Definición de las corrientes parásitas o corrientes de Eddy

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

² INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA (Disponible en: http://www.fisicanet.com.ar/fisica/electrodinamica/ap03_induccion.php#.UPwqj_Jkidc. Consultado el: 21 de Noviembre de 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.

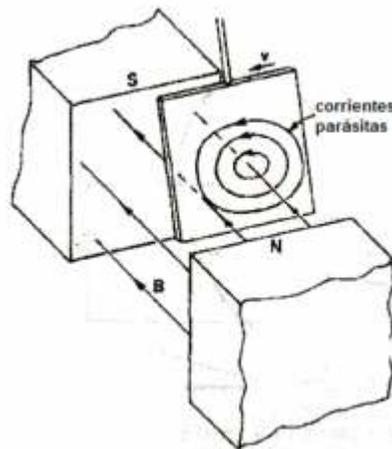
En un conductor no uniforme las corrientes parásitas y la fuerza retardadora se reducen notablemente debido a que al verse interrumpido el flujo uniforme de la corriente no se generan grandes espiras de corriente. Cuanto más fuerte sea el campo magnético aplicado, o mayor la conductividad del conductor, o mayor la velocidad relativa de movimiento, mayores serán las corrientes parásitas y los campos opositores generados. En los núcleos de bobinas y transformadores se generan tensiones inducidas debido a las variaciones de flujo magnético a que se someten aquellos núcleos.

Estas tensiones inducidas son causa de que se produzcan corrientes parásitas en el núcleo (llamadas corrientes de Foucault), que no son óptimas para la buena eficiencia eléctrica de éste.

Las corrientes parásitas producen dos efectos, por un lado se producen fuerzas que pueden ser utilizadas para el frenado magnético de piezas metálicas y por otro calentamiento por efecto Joule, el cual puede ser usado en aplicaciones caseras e industriales, pero en algunas aplicaciones este calentamiento es indeseable. Éste efecto Joule se puede reducir evitando los posibles caminos en el interior de las piezas metálicas. Así por ejemplo, en los transformadores se laminan los núcleos de hierro para minimizar estas pérdidas. Para reducir este efecto los conductores que se van a ser sometidos a un campo magnético variable, no deben ser sólidos, sino como conjunto de laminas separadas mediante algún material no conductor (Laca u oxido metálico) lo cual aumenta la resistencia de las trayectorias de corrientes parásitas confinándolas efectivamente en capas individuales y contrarrestando así su efecto de repulsión. También disminuyen la eficiencia de muchos dispositivos que usan campos magnéticos variables, como los transformadores de núcleo de hierro y los motores eléctricos. Estas pérdidas son minimizadas utilizando núcleos con materiales magnéticos que tengan baja conductividad eléctrica (como por ejemplo ferrita) o utilizando delgadas hojas de material magnético, conocidas como laminados. Los electrones no pueden atravesar la capa aisladora entre los laminados y, por lo tanto, no pueden circular en arcos abiertos. Se acumulan cargas en los extremos del laminado, en un proceso análogo al efecto Hall,

produciendo campos eléctricos que se oponen a una mayor acumulación de cargas y a su vez eliminando las corrientes parásitas. Mientras más corta sea la distancia entre laminados adyacentes (por ejemplo, mientras mayor sea el número de laminados por unidad de área, perpendicular al campo aplicado), mayor será la eliminación de las corrientes de Foucault y, por lo tanto, menor el calentamiento del núcleo.³

Figura 1. Corrientes inducidas por un campo magnético en una lámina metálica.



Fuente: Anónimo. Corriente inducida por un campo magnético sobre una lámina metálica. Imagen tomada del sitio <http://syllabuscos.wordpress.com/just-physics/the-feynmann-lectures-on-physics/capitulo-16-corrientes-inducidas/>

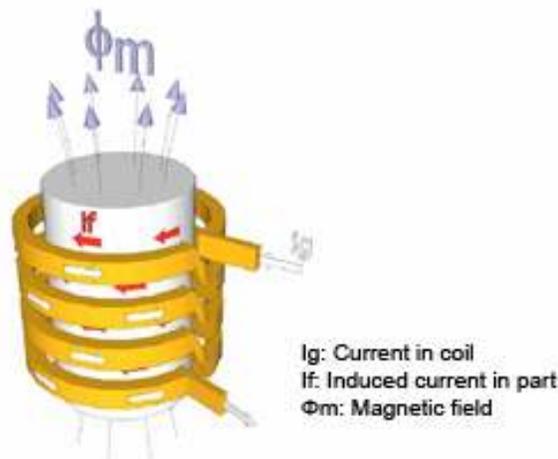
Una variación del flujo magnético induce una corriente en piezas metálicas, estas corrientes son las que denominamos parásitas en el ejemplo de la figura1 se dispone de un imán y un disco metálico girando alrededor de un eje de forma que una parte del disco pasa por el interior del campo magnético creado por el imán. A través de cualquier camino o línea cerrada que consideremos de la pieza metálica existirá una variación del flujo

³ - CORRIENTES PARÁSITAS: SERWAY, RA. 2002. Capítulo 4: Electricidad y Magnetismo. En su: Física para ciencias e ingeniería. Tomo2. Editorial McGraw-Hill (2002). Pp. 997-999.
- CORRIENTES PARÁSITAS: SEARS, FW; ZEMANSKY, MW. 1997. Capítulo 29: Inducción Electromagnética. En su: Física Universitaria Vol2. Editorial Pearson. Pp. 1126-1127.
- CORRIENTES PARÁSITAS (Disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/Corriente_de_Foucault. Consultado el: 23 de Noviembre de 2012).

magnético que inducirá una corriente que se opondrá a dicha variación según la ley de Lenz.

Las corrientes parásitas tienen algunas aplicaciones prácticas, como los hornos de inducción. En este caso se trata de calentar una pieza metálica mediante corrientes inducidas como consecuencia de un campo magnético variable. Se trata de un campo magnético alternativo de muy alta frecuencia. Al variar el campo, y por lo tanto el flujo, también de forma sinusoidal, se inducen corrientes en una pieza metálica, que por la resistencia eléctrica del material, originan un desprendimiento de calor. Las corrientes inducidas son directamente proporcionales a la rapidez de variación de flujo, y por tanto a la frecuencia de variación del campo magnético. Se utilizan en la fundición de metales y en cocinas de inducción.

Figura 3. Corrientes de Foucault en hornos y cocinas de inducción.

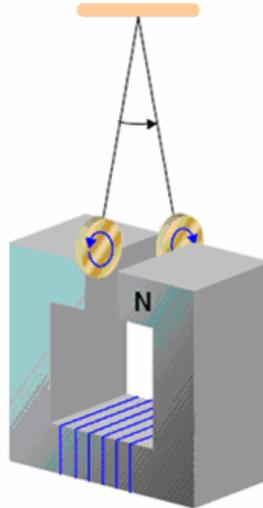


Fuente: Anónimo. Calentamiento por inducción de corriente. Imagen tomada de <http://www.ghinduction.com/sobre-calentamiento-por-induccion/?lang=es>

También estas corrientes se utilizan para amortiguar oscilaciones indeseadas. Las balanzas mecánicas al pesar una masa pequeña, oscilan muchas veces antes de alcanzar el equilibrio. Para evitar esto, se diseñan de modo que un pequeño trozo de metal se mueve entre los polos de un imán mientras la balanza oscila. Se producen

corrientes de Foucault que amortiguan las oscilaciones, alcanzándose el equilibrio rápidamente.⁴

Figura 2. Efecto de frenado producido por una corriente eléctrica en el interior de un campo magnético.



Fuente: Anónimo. Formación de corrientes parásitas en una placa conductora que se mueve a través de un campo electromagnético. Imagen tomada de SERWAY, RA. 2002. Capítulo 4: Electricidad y Magnetismo. En su: Física para ciencias e ingeniería. Tomo2. Editorial McGraw-Hill (2002). Pp. 997.

El efecto de frenado se produce al tener una corriente eléctrica en el interior de un campo magnético. En la figura 2, sobre el disco aparece una fuerza que se opone al movimiento del disco. Este efecto se utiliza en frenos magnéticos de trenes de alta velocidad, motores, balanzas de precisión, etc.⁵

1.1.2. Pérdidas de energía por las corrientes parásitas

Las corrientes parásitas, como ya se ha comentado, tienen por efecto transformar parte de la energía en calor. Dicho calor producido en la masa metálica sólo se utiliza en los hornos eléctricos de alta frecuencia, por lo que, en general, supone una pérdida de

⁴ CORRIENTE DE FOUCAULT. (Disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/Corriente_de_Foucault. Consultado el 23 de Noviembre de 2012)

⁵ L. E. Folivi y A. Godman, Física, Voluntad–Logman, segunda edición, 1977.

energía. Para el estudio de estas pérdidas, consideraremos un material de longitud b , altura x y grosor a , sometida un campo variable de valor:

$$B = B_m \sin \omega t$$

Donde ω es la pulsación y B_m la inducción máxima. En esta circunstancia el flujo a través de la superficie de dicha espira es:

$$\Phi = BS$$

Donde S es la superficie que atraviesa el flujo, cuyo valor es

$$S = 2bx$$

Por lo tanto,

$$\Phi = (B_m \sin \omega t) 2bx$$

Por otra parte, sabemos que la f.e.m. inducida en la espira es:

$$e = \frac{d\phi}{dt}$$

Derivando se tiene:

$$e = (B_m \omega \cos \omega t) 2bx$$

Si tomamos en la chapa una espira diferencial, su resistencia será

$$R = \rho \frac{2b + 2x}{a \cdot dx}$$

Y despreciando $2x$ frente a $2b$, escribiremos:

$$R \approx \rho \frac{2b}{a \cdot dx}$$

La potencia en la espira será,

$$dP = \frac{E_{cf}^2}{R}$$

Siendo E_{ef} la tensión eficaz, cuyo valor en función del máximo, E_m , es

$$E_{ef} = \frac{E_m}{\sqrt{2}}$$

Por lo tanto la potencia perdida será:

$$dP = \frac{B_m^2 \cdot \omega^2 4b^2 x^2}{2R} =$$

$$\frac{a \cdot dx}{\rho \cdot 4 \cdot b} B_m^2 \cdot \omega^2 \cdot 4 \cdot b^2 \cdot x^2$$

Y la potencia total perdida a consecuencia de las corrientes de Foucault:

$$P = \int_0^{\frac{e}{2}} dP = \frac{1}{\rho} B_m^2 \cdot \omega^2 b \cdot a \left[\frac{x^3}{3} \right]^{\frac{e}{2}}$$

Si reemplazamos ahora ω por $2\pi f$, se obtiene

$$P = \frac{1}{\rho} B_m^2 \cdot 4\pi^2 f^2 b \cdot a \frac{e^3}{24}$$

O, lo que es lo mismo

$$P = \frac{1}{\rho} B_m^2 \cdot 4\pi^2 f^2 b \cdot a \cdot e \frac{e^2}{24}$$

En donde $b \cdot a \cdot e$, es el volumen de la carga.

De todo lo expuesto se deduce que las pérdidas en vatios por m^3 debidas a las corrientes de Eddy serán:

$$P = \frac{\pi^2}{6\rho} e^2 B_m^2 f^2 \quad (5)$$

La pérdida de potencia puede disminuirse aumentando la resistencia de los posibles caminos que seguirían estas corrientes, y por tanto "rompiendo" los grandes circuitos por donde pueden circular. Esto puede conseguirse dividiendo el metal en láminas delgadas,

bien en tiras pequeñas pegadas juntas (el pegamento aislante que separa las tiras hace que estas corrientes queden confinadas en ellas) o bien recortando el metal.

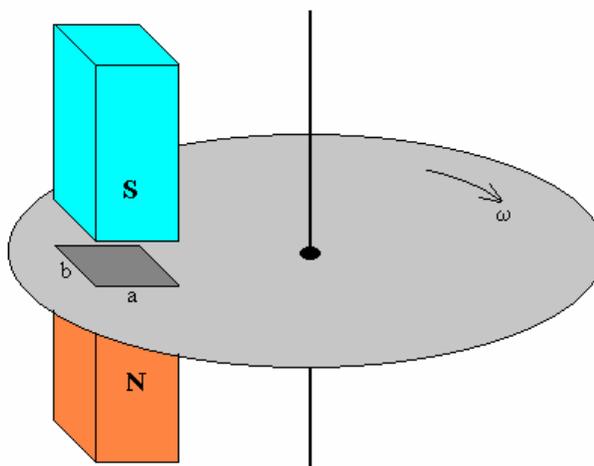
1.2. CORRIENTES DE EDDY POR MOVIMIENTO DE CUERPOS CONDUCTORES EN CAMPOS MAGNÉTICOS UNIFORMES

Cuando se coloca una pieza de metal en un campo magnético variable con el tiempo $B(t)$, se genera un campo eléctrico que produce un movimiento de las cargas libres en el conductor metálico, generando corrientes.

$$\oint E \cdot dl = -\frac{\partial}{\partial t} \int \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (6)$$

Cuando una pieza de metal se mueve en una región en la que existe un campo magnético constante en el tiempo $B(r)$ también se generan corrientes y se disipa energía por efecto Joule en el conductor metálico. El movimiento de la pieza puede ser rotacional (Figura 4), trasnacional (Figura 5) y pendular. Este fenómeno se puede explicar por medio de la fuerza de Lorentz. A causa de la disipación de la energía se produce una fuerza de frenado que disminuye la velocidad de la pieza metálica.

Figura 4. Disco metálico dentro de un campo magnético.

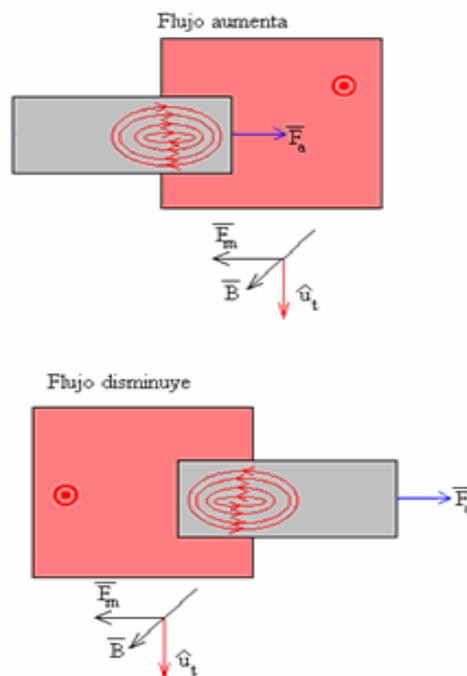


Fuente: Anónimo. Acción del campo magnético externo sobre las corrientes inducidas. Imagen tomada de www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/inducccion/foucault

Una descripción cualitativa de las corrientes de Eddy, teniendo presente el comportamiento de una pieza metálica rectangular que atraviesa una región en la que existe un campo magnético uniforme con velocidad constante. A continuación, mediante un modelo simplificado se muestra que la fuerza de frenado es proporcional a la velocidad de la pieza metálica.

Cuando se introduce la pieza rectangular en la región donde existe un campo magnético uniforme, el flujo aumenta y las corrientes en torbellino se oponen al incremento de flujo. La fuerza que ejerce el campo magnético sobre cada una de las corrientes inducidas da una resultante que se opone a la fuerza aplicada (Figura5).

Figura 5. Movimiento de una pieza conductora hacia y desde un campo magnético uniforme.



Fuente: Anónimo. Acción del campo magnético externo sobre las corrientes inducidas. Imagen tomada de www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/induccin/foucault

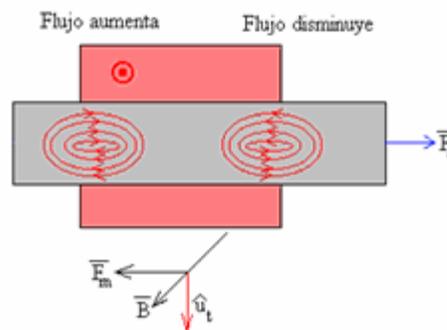
El campo magnético es perpendicular al plano del dibujo y está dirigido hacia el lector. El sentido de la corriente inducida en la región donde existe campo magnético está indicada por el vector unitario \hat{u}_t .

Cuando se saca la pieza rectangular del campo magnético uniforme, el flujo disminuye y las corrientes de Eddy (en torbellino) se oponen a dicha disminución. La fuerza que ejerce el campo magnético sobre cada una de las corrientes inducidas da una resultante que se opone a la fuerza aplicada.

Del mismo modo que hemos visto en la espira que se introduce en el campo magnético, la corriente se genera en el lado de la espira que está en el interior del campo magnético y retorna por la parte de la espira que está fuera de dicha región.

Consideremos ahora que la pieza metálica es más grande que la región que contiene el campo magnético. Se forman dos corrientes en forma de torbellino de sentidos contrarios, una a la izquierda y otra a la derecha en los límites de la región rectangular donde existe el campo magnético. La fuerza que ejerce el campo magnético sobre las corrientes inducidas es de sentido contrario a la fuerza aplicada que mueve la pieza hacia la derecha.

Figura 6. Movimiento de una pieza conductora hacia y desde un campo magnético uniforme



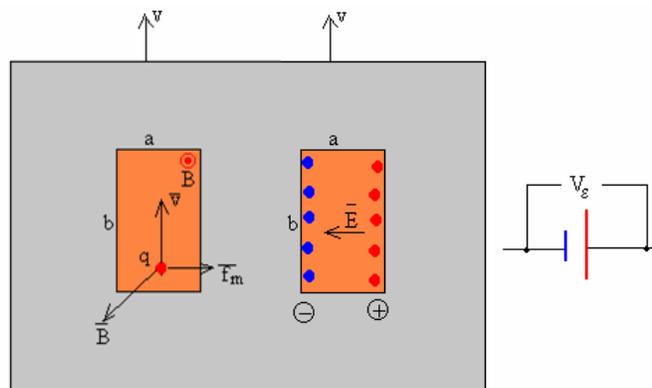
Fuente: Anónimo. Acción del campo magnético externo sobre las corrientes inducidas. Imagen tomada de www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/induccin/foucault

1.2.1. 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 (Figura7).

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.

Figura 7. Acción del campo magnético externo sobre las corrientes inducidas.



Fuente: Anónimo. Acción del campo magnético externo sobre las corrientes inducidas. Imagen tomada de www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/induccin/foucault

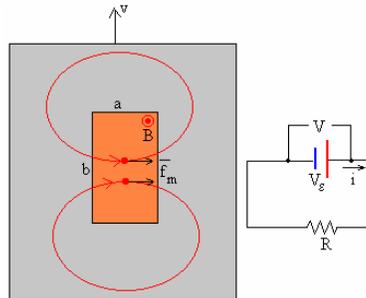
Supongamos que el campo magnético B es perpendicular al plano de la hoja metálica, al moverse la pieza metálica con velocidad v (Figura 5), los portadores de carga q existentes en la pequeña región rectangular de dimensiones a y b experimentan una fuerza, como se muestra en la ecuación 7, la cual impulsa los portadores de carga son impulsados hacia la derecha.

$$\vec{F}_m = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (7)$$

La separación de cargas produce un campo eléctrico, dirigido hacia la izquierda., equivalente el equivalente a una fuente de fuerza electromotriz inducida es igual a la diferencia de potencial medida en circuito abierto.

$$\varepsilon i = V_\varepsilon = vBa \quad (8)$$

Figura 8. Sentido de las corrientes inducidas y fem.



Fuente: Anónimo. Sentido de las corrientes inducidas y fem. Imagen tomada de www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/induccin/foucault

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.

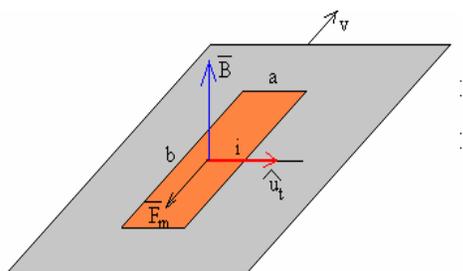
$$r = \frac{a}{\sigma \delta b} \quad (9)$$

Siendo δ el espesor de la pieza metálica y σ la conductividad del metal. La ecuación del circuito se escribe $i(r+R)=V_\varepsilon$

$$i = \frac{vBa}{R+r} = \frac{\sigma \delta b B}{(1+R/r)} v \quad (10)$$

El cálculo de la resistencia R de la pieza metálica excepto la región rectangular es muy complicado.

Figura 9. Fuerza magnética aplicada sobre una sección rectangular.



Fuente: Anónimo. Fuerza magnética aplicada sobre una sección rectangular. Sentido de las corrientes inducidas y fem. Imagen tomada de www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/induccin/foucault

La fuerza que ejerce el campo magnético B sobre esta porción de corriente rectilínea es:

$$\vec{F}_m = i(\vec{u}_t \times \vec{B})a \quad (11)$$

Se supone que la intensidad está uniformemente distribuida en la sección bδ.

La fuerza Fm se opone a la velocidad v de la pieza metálica y es proporcional a su velocidad, y al cuadrado del campo magnético B Ec. (8). El producto δab es el volumen de la porción de la pieza metálica que está bajo la influencia del campo magnético uniforme B.

$$F_m = \frac{\sigma \delta ab}{1 + R/r} B^2 v \quad (12)$$

La fuerza magnética que genera el campo constante en el tiempo sobre las corrientes que este mismo induce en la pieza metálica y que se denomina fuerza de frenado queda directamente proporcional a la velocidad al cuadrado de la intensidad del campo magnético, a la conductividad y a la forma geométrica del metal (Ecuación 12).⁶

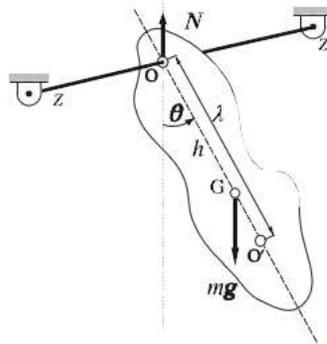
⁶ Corrientes de Foucault, física por ordenador (Disponible en: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/induccin/foucault/foucault.htm>. Consultado el: 21 de Noviembre de 2012).

1.2.2. Modelo simplificado 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' (Figura7). La posición del péndulo físico queda determinada, en cualquier instante, por el ángulo θ 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.

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 θ , 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.

Figura 10. Diagrama de fuerzas del péndulo físico.



Fuente: Anónimo. Diagrama del péndulo físico. Imagen tomada de http://es.wikipedia.org/wiki/P%C3%A9ndulo_f%C3%ADsico

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 θ , 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.

$$M_e = -mgh \sin \theta \quad (13)$$

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:

$$\ddot{\theta} + \frac{mgh}{I_O} \sin \theta = 0 \quad (14)$$

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 (14) adopta la forma:

$$\ddot{\theta} + \frac{mgh}{I_O} \theta = 0 \quad (15)$$

Que corresponde a un movimiento armónico simple.

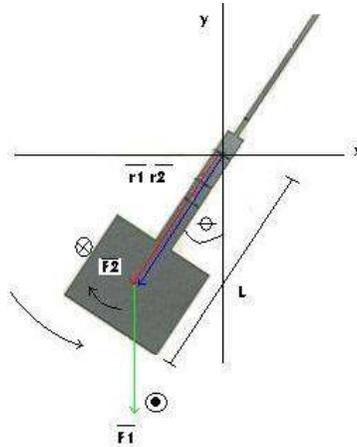
El periodo de las oscilaciones es:⁷

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I_O}{mgh}} \quad (16)$$

1.2.3. Acercamiento al modelo matemático del 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.

Figura 11. Diagrama de fuerzas del péndulo físico.



Fuente: Personal

⁷ PENDULO FISICO, (Disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/P%C3%A9ndulo_f%C3%ADsico. el 26 de Noviembre de 2012)

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

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

Dónde:

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

r_1 y r_2 son los vectores de posición de las fuerzas ejercidas por la gravedad y la fuerza magnética, respectivamente. Se tiene entonces que:

$$\tau_1 = r_1 F_1 \text{ Sen} \Theta \quad \text{en la dirección } k$$

$$\tau_2 = r_2 F_2 \text{ Sen} \Theta \quad \text{en la dirección } -k$$

Se puede hacer la siguiente aproximación:

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

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

$$r_1 F_1 \theta - r_2 F_2 \theta = I \ddot{\theta}; \quad \text{donde } \ddot{\theta} = \frac{d^2 \theta}{dt^2}$$

Y F_2 es la fuerza magnética que le ejerce el campo magnético a las corrientes parásitas y es contraria al movimiento, se describe como, se tiene por la ecuación 12:

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

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

$$r_1 F_1 \theta - r_2 F^m \theta = I \ddot{\theta}$$

$$r_1 F_1 \theta - r_2 \eta V \theta = I \ddot{\theta}$$

$$r_1 F_1 \theta - r_2 \eta_L \theta \dot{\theta} = I \ddot{\theta}$$

$$I \ddot{\theta} + r_2 \eta_L \theta \dot{\theta} - r_1 F_1 \theta = 0$$

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

$$\mathbf{a}\ddot{\theta} + \mathbf{b}\dot{\theta} - \mathbf{c}\theta = \mathbf{0} \quad (17)$$

La solución a esta ecuación 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.

2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN 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.

2.1. Diseño del montaje básico para medición manual

El primer montaje básico para medición manual incluye un par de bobinas de Helmholtz (Figura12) 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.

Figura 12. Bobinas de Helmholtz.

- $N = 240$ (Número total de espiras por Bobina).
- $R_{int} = 1.8$ ohmios (Resistencia interna de cada bobina).
- $I_{máx.} = 6$ A (Corriente máxima de circulación en la bobina).
- Radio medio 14 centímetros.



Fuente: Personal.

Posteriormente las pruebas realizadas con un par de bobinas con núcleo de ferrita, como se muestra en la figura 13, conectadas en serie arrojan resultados satisfactorios ya que

con una corriente máxima de dos Amperios se logra generar campos magnéticos del orden de 25 mT suficientes para frenar las nuevas “peinetas” (Material que realizara movimiento pendular y que se sumergirá en el campo continuo) diseñadas en distintos tipo de materiales y con un calibre 14, un poco mayor que las anteriores, lo cual les da mayor estabilidad durante el movimiento.

Figura 13. Bobinas con núcleo de ferrita.



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.

Figura 14. Bobinas diseñadas con núcleo de ferrita.



Fuente: Personal.

En las pruebas iniciales realizadas con las bobinas Helmholtz se utilizó un reóstato de 10 ohmios para limitar la corriente con el fin de no superar la corriente máxima de operación de las bobinas (6A), ya que se exigió a las mismas con corrientes de valores cercanos para tratar de frenar las peinetas, sin lograrlo. En el prototipo final no se hizo necesario la utilización de este elemento ya que las bobinas diseñadas tienen un valor nominal máximo de corriente de seguridad de 15 Amperios, se logra frenar el péndulo con corrientes que no superan el 50% del valor nominal (Figura14).

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

2.2. Diseño de montaje con el sistema de adquisición de datos

El sistema Cobra3 es un sistema de adquisición de datos que tiene tres unidades que pueden ser utilizadas en muchas áreas de las ciencias. El sistema esta conformado por las siguientes unidades de operación.

- Unidad BÁSICA Cobra3
- Unidad COM Cobra3.
- Unidad DISPLAY Cobra3.

Para este proceso de experimentación solo se utiliza la Unidad Básica Cobra3 y especialmente el modulo Timer/Counter.

2.2.1. Unidad básica Cobra3

La Unidad Básica Cobra3 es una interfaz de medida que puede ser empleada en física, química y biología, la cual permite determinar cantidades no eléctricas usando módulos de medida y sensores.

Este instrumento cuenta con tres entradas análogas (Un puerto para módulos, dos puertos para sensores), Una salida análoga, tres salidas de control digital, dos entradas *timers/counters* y una salida de voltaje fijo (Figura 15). Sin embargo, el número de entradas o salidas puede aumentarse al acoplar varias unidades básicas.

Este instrumento está recubierto en plástico resistente y está equipado con pie de posicionamiento, tiene diversas posibilidades de montaje y conectores laterales para futuras conexiones.

La Unidad Básica Cobra3 puede ser operada por medio de la Unidad de operación COM Cobra3 (Figura 15) o por computador y tiene la facilidad de actualizar el sistema operativo por medio de la interfaz RS232.

Figura 15. Unidad básica Cobra 3



Fuente: PHYWE: Cobra3 Operating Instructions.version 01.04/2. Göttingen: Phywe GmbH & Co., 2004

A continuación se describirán los elementos enumerados en la figura 15:

- **Puerto para módulos**

Conector de 25 pines para los módulos de medida. Al conectar un módulo, la entrada análoga 1 es cubierta y no se puede usar. Sin embargo, el puerto para el sensor 1 se puede usar.

- **Conexión de extensión para unidades**

Conector de 48 pines en la cara lateral izquierda para conexión con otras unidades. El conector es asegurado por elementos de conexión especial.

- **Entrada análoga 1**

Entrada análoga referenciada a tierra, rangos de medida de ± 10 V y ± 30 V. Con *conector* de seguridad de 4 mm que sirven como guía cuando un módulo es conectado y por lo tanto no se pueden usar.

- **Puerto sensor S1**

Conector para sensores, módulos de medida o instrumentos especiales, no solo la entrada análoga 1 sino también la salida análoga, 3 fuentes de voltaje y 3 salidas de control digital son deshabilitadas. Para la conexión del módulo de medida se necesita el módulo conversor de medida y un cable de datos.

- **Puerto sensor S2**

Conector para sensores, módulos de medida o instrumentos especiales, la entrada análoga 2, 3 fuentes de voltaje y 3 salidas de control digital son deshabilitadas. Para la conexión del módulo de medida se necesita el módulo conversor y un cable de datos.

- **Entrada análoga 2**

Entrada análoga no referenciada a tierra. Con *conector* de seguridad de 4mm. Con 6 rangos de medida de ± 30 V, ± 10 V, ± 3 V, ± 1 V, ± 0.3 V, ± 0.1 V.

- **Timer/Contador 1**

Conectores de 4 mm con las funciones de START, STOP y tierra común. Estos son controlados por impulsos de un TTL o por contactos abriendo y cerrando. Esta entrada puede ser usada como *timer*, como contador o como entrada TTL.

- **Timer/Contador 2**

Tiene la misma función de la entrada 7 y adicionalmente con la posibilidad de usarse como contador con intervalo de tiempo ajustable.

- **Conexión RS232**

Conector de 9 pines ubicado en la cara lateral derecha del instrumento para la conexión con la interfaz serial del computador.

- **Conexión de extensión para unidades**

Conector de 48 pines en la cara lateral derecha para conexión con otras unidades. El conector es asegurado por elementos de conexión especial.

- **Elemento conector con pie de posicionamiento, amarillo**

Este elemento deslizante puede ser movido en dirección de la flecha y sirve para conectar dos unidades entre sí. El pie de posicionamiento amarillo puede ser ajustado para que la Unidad Básica Cobra3 pueda ser utilizada en diferentes posiciones.

- **Alimentación**

Conector estándar: positivo adentro, tierra afuera. Se utiliza una fuente de 12 V DC a 2 A.

- **Lámpara de control.**

Diodo de luz verde, muestra que el instrumento está encendido.

- **Salida de voltaje fijo**

Un par de conectores de seguridad de 4mm de los cuales se obtiene un voltaje de directa de 5 V, máximo 0.2 A.

- **Conexión para pinza de soporte**

Conector roscado para unir un soporte en la parte de atrás de la Unidad Básica Cobra3, que puede sostenerse en una repisa para mayor visualización.

- **Abrazadera**

Conector que permite a varias unidades ser sujetadas firmemente una encima de la otra.

- **Lámpara indicadora**

Este diodo de luz amarilla sirve para guía del usuario, y también se puede usar como lámpara indicadora para experimentos.

- **Elemento conector con pie de posicionamiento gris**

Este elemento no es deslizante. Sirve para conectar dos unidades entre sí. El pie de posicionamiento gris puede ser ajustado para que la Unidad COM Cobra3 pueda ser utilizada en diferentes posiciones⁸.

2.2.2. Software Measure

Para el prototipo del freno electromagnético y la práctica de laboratorio diseñada para experimentar con él, se utiliza el módulo Timer/Counter 2 mediante cambios de nivel TTL tomados de una señal entregada por un sensor de proximidad que se describirá en un capítulo posterior para la toma de datos de tiempo de frenado. La otra variable importante a medir dentro de la práctica de laboratorio es el campo magnético asociado al tiempo de frenado. Debido a que el software de los módulos Force/Tesla y Timer/Counter no pueden “correr” al tiempo por la demanda de memoria RAM que esto implica para el equipo Cobra 3 y por disposición del fabricante PHYWE, los valores de campo magnético serán medidos con el Teslámetro Leybold didactic descrito en el Anexo 1 y se realiza un procedimiento dentro de la práctica que permita asociar y graficar ambas medidas (Tiempo de frenado y campo magnético asociado). Este procedimiento se describirá en el Anexo 5.

Software Cobra3 Timer/Counter

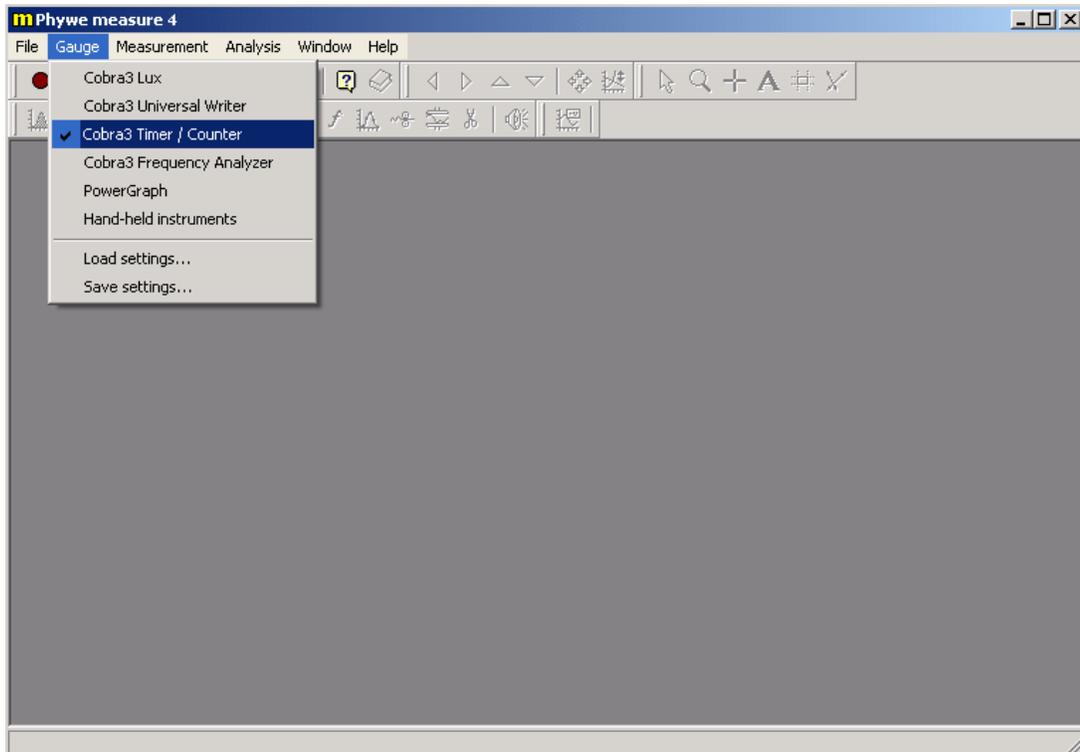
Esta función de Cobra3 sirve para medir tiempos o para contar eventos (señales TTL), por lo que puede ser una herramienta muy útil en la elaboración de pruebas o experimentos. El contador tiene una capacidad de 32 a 40 bits y una resolución de 1 ms a 250 ns. Las

⁸ Gómez Ardila Felipe, Guerra Moncada Carolina, Restrepo Parra Carolina. ANEXO C: MANUAL EQUIPOS DE LABORATORIO COBRA3 Y SOFTWARE MEASURE. Páginas 13 a 18. [consulta: Dic. 2012].

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.

Para empezar a trabajar con esta función desde el software se debe conectar la unidad Básica Cobra3 al computador con el cable serial RS232 y después en el menú Gauge del Measure seleccionar el software para el manejo del *timer* o contador, que es Cobra3 *Timer / Counter*.

Figura 16. Selección del software en Measure.



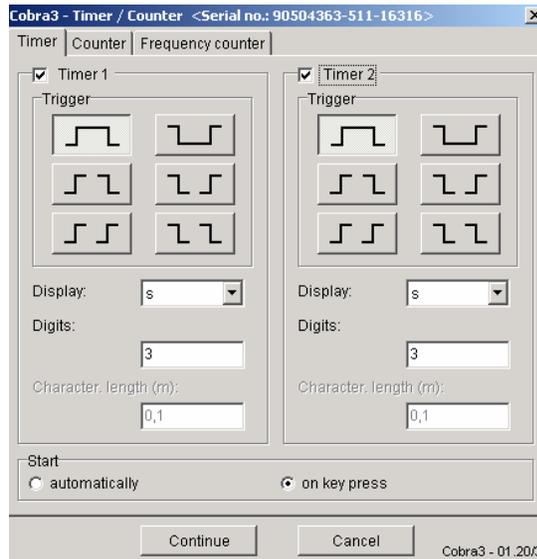
Fuente: Gómez Ardila Felipe, Guerra Moncada Carolina, Restrepo Parra Carolina. ANEXO C: MANUAL EQUIPOS DE LABORATORIO COBRA3 Y SOFTWARE MEASURE. Figura 100, pagina 79.

Al dar clic se abre el cuadro de configuración, este tiene tres ventanas la primera para configurar el *timer*, la segunda para configurar el contador y la tercera para configurar el contador de frecuencia.

Timer. En esta ventana se selecciona el timer que se va a utilizar o si se van a utilizar ambos en la casilla de selección que se encuentra a la izquierda del nombre del timer. Debajo aparece de forma gráfica la configuración del *trigger* para el inicio y el final del funcionamiento de los *timer* seleccionados, la primera figura es la condición para el inicio y la segunda para el final, si se selecciona la figura  quiere decir que se activa con una transición de bajo a alto de la señal y si se selecciona la figura  se activa con una transición de alto a bajo de la señal, esta señal es la detectada en la entrada de *Start (7)* y *Stop (8)* de la Unidad Básica (Figura 15).

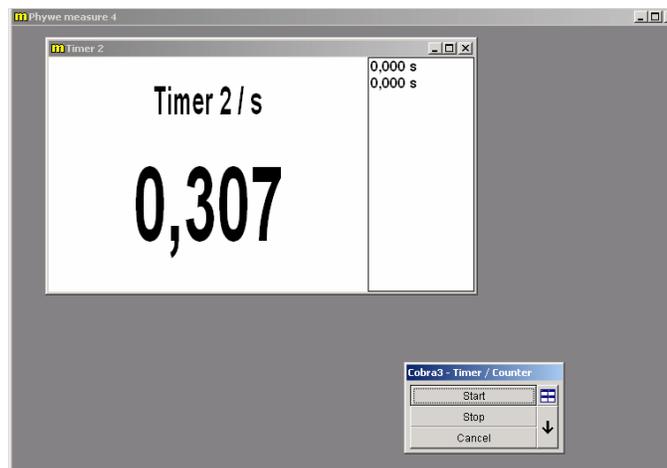
Además de esto se puede seleccionar como se va a mostrar el *timer* en el display si en segundos, en milisegundos o en metros por segundo colocando una distancia de referencia en metros y la cantidad de dígitos que se van a mostrar. También se determina si el *timer* empieza automáticamente con las condiciones del *trigger* o al presionar una tecla.

Figura 17. Ventana de configuración del timer.



Fuente: Gómez Ardila Felipe, Guerra Moncada Carolina, Restrepo Parra Carolina. ANEXO C: MANUAL EQUIPOS DE LABORATORIO COBRA3 Y SOFTWARE MEASURE. Figura 101, pagina 80.

Figura 18. Visualización del timer.



Fuente: Gómez Ardila Felipe, Guerra Moncada Carolina, Restrepo Parra Carolina. ANEXO C: MANUAL EQUIPOS DE LABORATORIO COBRA3 Y SOFTWARE MEASURE. Figura 104, pagina 82.

En el caso del contador muestra al lado de la palabra *Counter* un temporizador regresivo del intervalo de conteo que se seleccionó en el cuadro de configuración y en una subdivisión del display en la parte derecha muestra una columna con unos (1) que agrega cada vez que el temporizador regresivo llega a cero⁹.

Manipulación de los datos medidos.

Tabla de datos- Data Table.  Los valores que han sido medidos se guardan en una tabla de datos. Se puede observar la tabla de datos usando el ítem del menú llamado tabla de datos en el menú de medidas (“*Measurement*”) o con el botón ubicado en la barra de herramientas.

La primera columna contiene los datos de *X* y las columnas siguientes contienen los datos de *Y* (máximo 16 columnas). Para cambiar un valor medido, simplemente se debe dar clic sobre él con el mouse y cambiarlo.

Exportar datos - Export data. Este software guarda los datos en el disco por si solo en un formato propio del programa, como los datos no pueden ser leídos y procesados si se usa otros programas se puede exportar datos usando la opción “Export data” en el menú “*Measurement*”.

Como destino para la exportación, se tiene la opción del porta papeles de Windows o un archivo en el disco. También se puede escoger el formato de los datos exportados, se tiene la opción ya sea de formato mapa de bits, de valor numérico o metafile.

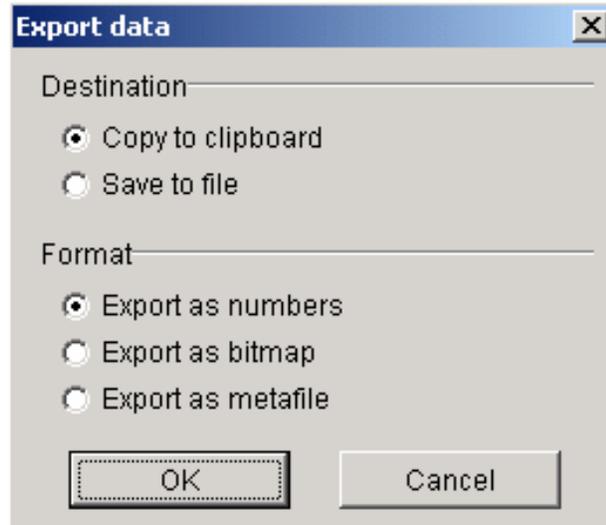
Al exportar como mapa de bits o metafile, la medida se exporta como un gráfico y se puede usar sin dificultad para una impresión desde otro programa, pero se debe tener en cuenta que al momento de guardar en cualquier de estos dos formatos de imagen se tiene que poner en el nombre la extensión correspondiente a un archivo de imagen, es decir, jpg, bmp, entre otros. Sin embargo al exportar los datos como metafile la gráfica se puede visualizar con mejor resolución en cualquier programa de visualización de imágenes o se puede insertar en un programa editor de texto.

Al seleccionar la exportación como un valor numérico se puede procesar los datos y visualizarlos con otro programa, por ejemplo en hojas de cálculo de Excel u otro programa de edición de datos.

Si los datos numéricos son guardados en un archivo de texto o copiados al portapapeles, las primeras dos líneas del archivo de exportación contienen el nombre del canal y las unidades apropiadas, la tercera línea está en blanco y los datos siguen desde la cuarta línea en adelante separado por TAB.

⁹ Gómez Ardila Felipe, Guerra Moncada Carolina, Restrepo Parra Carolina. ANEXO C: MANUAL EQUIPOS DE LABORATORIO COBRA3 Y SOFTWARE MEASURE. Páginas 78 a 84. [consulta: Dic. 2012].

Figura 19. Cuadro de exportar datos.



Fuente: Gómez Ardila Felipe, Guerra Moncada Carolina, Restrepo Parra Carolina. ANEXO C: MANUAL EQUIPOS DE LABORATORIO COBRA3 Y SOFTWARE MEASURE. Figura 134, pagina 105.

Importar datos – Import data. Cuando haya datos separados por TAB en el portapapeles, estos se pueden importar a *Measure*. El primer valor se usa como valor de *x* para el canal de *X*, los valores siguientes que llenan la línea completan los valores de cada canal de *Y* hasta que llegue a un máximo de 16 canales de *Y*. Nombres de canales y unidades se deben introducir manualmente en el cuadro de información de medición que aparece automáticamente.

3. PROTOTIPO FINAL DEL FRENO Y RESULTADOS

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.

3.1. Descripción del prototipo

El equipo se diseña con la finalidad de que se 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 cuya finalidad es la generación del campo magnético uniforme. 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 peiqueta 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 peiqueta, 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 peiqueta 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:

Elementos y partes que lo conforman

Dentro de los elementos y partes que conforman el prototipo están:

- Par de bobinas
- Sensor de proximidad inductivo
- PIC
- Base indicadora para ángulos
- Eje de oscilación de peinetas
- Base en madera MDF de $\frac{1}{2}$ " con dimensión 30*50 centímetros
- Bases metálicas para bobinas, dimensión 14*18
- Base metálica para base indicadora de ángulos y eje de oscilación

Las bobinas que hacen parte del prototipo final del freno están conectadas en serie de tiene la siguiente y tienen las siguientes características:

- $N = 1200$ (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
- Tres centímetros de diámetro y 13 centímetros de longitud
- Aislamiento térmico hasta 100°C

Los sensores de proximidad inductivos hacen uso de las propiedades magnéticas de diversos materiales y de las variaciones de diferentes parámetros asociados a los circuitos magnéticos (longitudes o secciones de núcleos, entrehierros, etc.), para alterar la

inductancia de bobinas normalmente fijas, consiguiendo variar la geometría del circuito magnético, permitiéndole detectar la presencia de objetos metálicos.

Después de varias sesiones de laboratorio dedicadas a hallar un tipo de sensor (Fotorresistores, fotoceldas, fototransistores, fotodiodos, etc) cuyas características eléctricas y de operación se adaptaran al diseño del prototipo, se determino que el sensor mas adecuado para la toma de señales de inicio y paro del tiempo de frenado a partir del movimiento del las peinetas es el sensor inductivo LM30 que se muestra en la siguiente figura.

Figura 20. Sensor inductivo LM30-3015NA.



Fuente: Personal.

Al manifestarse la necesidad de dar un tratamiento especial a la señal obtenida por el sensor de proximidad y poder aprovechar la misma de manera óptima en el proceso de comienzo y final del tiempo de frenado, se evaluó la forma de incluir un dispositivo micro controlado que nos ofreciera unas propiedades básicas de manejo de puertos de entrada y salida y entregara un par de señales de salida “tratadas” con anterioridad en el módulo interno timer. Se eligió el PIC al que hace mención este nuevo aparte y del que se dará a continuación una descripción física de sus puertos y se mostraran en el Anexo 3 las características de operación.

El microcontrolador PIC es un circuito integrado programable, capaz de ejecutar las órdenes grabadas en su memoria. Está compuesto de varios bloques funcionales, los cuales cumplen una tarea específica. Estas son básicamente algunas de sus partes:

- Memoria ROM (Memoria de sólo lectura)
- Memoria RAM (Memoria de acceso aleatorio)

- Líneas de entrada/salida (I/O) También llamados puertos
- Lógica de control que coordina la interacción entre los demás bloques

El diagrama de un sistema microcontrolado sería algo así: ¹⁰

Figura 21. Diagrama de un sistema microcontrolado.



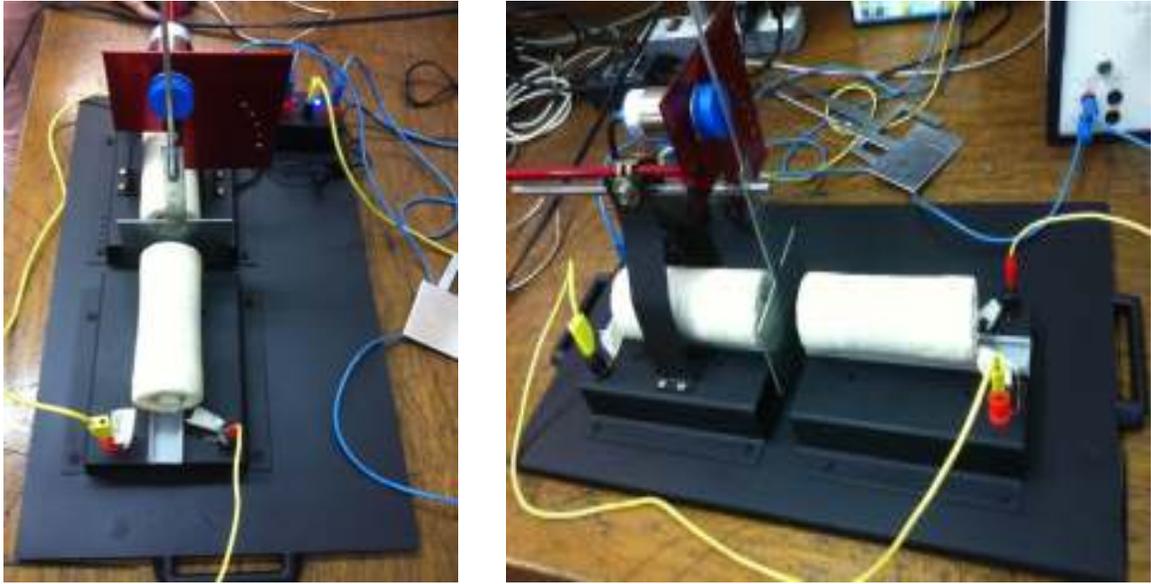
Fuente: Ju Luis. Tutorial de microcontroladores PIC. Páginas 3. Imagen tomada del sitio http://perso.wanadoo.es/luis_ju/soft/files/pic.pdf . Enero 2013.

Después de tener listo el procedimiento de toma de señales de paso de la peineta 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, para entregárselas al módulo Timer/Counter para que este registre los tiempos de frenado. Se crea un programa que toma la señal primera de paso de la peineta 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.

En la figura 22 se muestra la primer versión del prototipo diseñado, donde se integran las etapas: Eléctrica, mecánica, de medición, control y visualización que conforman el “freno electromagnético: Prototipo para experimentación”.

¹⁰ Ju Luis. Tutorial de microcontroladores PIC. Página 3. (Disponible en: http://perso.wanadoo.es/luis_ju/soft/files/pic.pdf . Consultado el 20 de Enero 2013).

Figura 22. Prototipo freno electromagnético.



Fuente: Personal.

3.2. Conexión y descripción de su funcionamiento

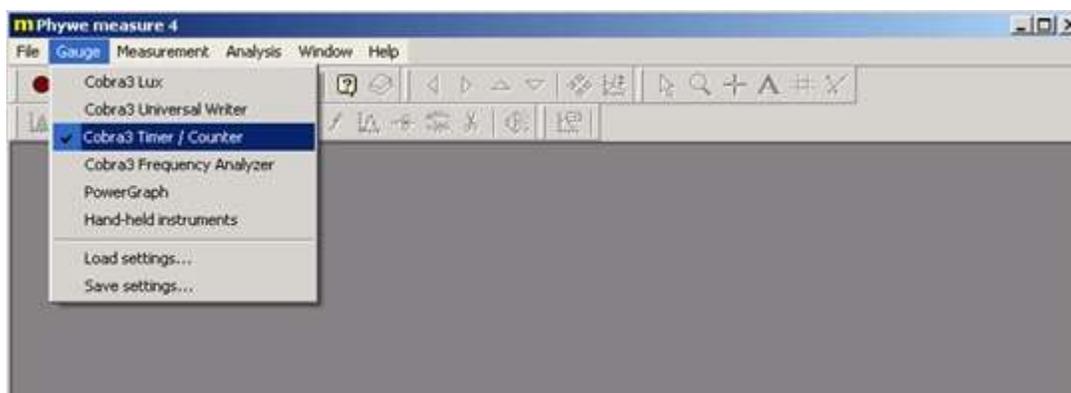
Para comenzar a usar el prototipo se debe conectar la unidad básica Cobra3 al computador a través del puerto serial RS232, luego realizar la conexión de los cables de *Start*, *Stop* y Tierra entre la caja de control y señalización del prototipo y el módulo *Timer/counter2* de la unidad básica Cobra3. 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 modulo. 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 Teslámetro. 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. (Previamente la sonda del Teslámetro debe ser calibrada - Anexo 1). Después de haber realizado este procedimiento se procede a energizar el sistema mediante el adaptador de 6V que le brinda energía al sensor y a la parte circuital y las bobinas mediante la fuente de voltaje de 0-30VDC.

Para medir el campo magnético asociado al tiempo de frenado se utiliza el Teslámetro *Leybold Didactic*, el cual arroja los datos de flujo magnético medido en militeslas (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 (Anexo 5).

Después de preparar el prototipo para poder hacer mediciones, en cada experimento que se vaya a realizar se debe:

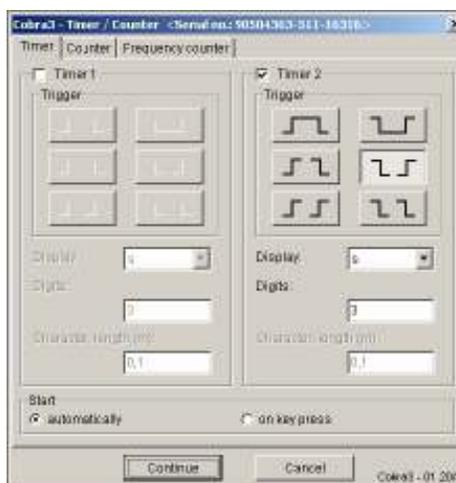
- Ya con la peineta montada en el eje de oscilación, se debe encender el computador e ingresar al programa *Measure4* y activar la función de *Timer/Counter* (Figura23) y verificar que se encuentre configurada de acuerdo a la figura23. Con este procedimiento queda activada la forma para medir el tiempo de frenado. Nota: La peineta no debe estar en contacto con el sensor después de haber activado el Timer/Counter ya que esto generaría un inicio no deseado de la medición. Para evitar esto la peineta debe ser asegurada en el ángulo de tiro deseado mediante el accesorio de fijación destinado para tal fin. (Figura23). Selección de la función Timer/Counter del software Measure4.

Figura 23. Menú Gauge.



Fuente: Personal.

Figura 24. Configuración del timer



Fuente: Personal.

- Acondicionar la corriente deseada variando el voltaje de la fuente. Estos valores de corriente se estarán verificando durante los experimentos mediante una conexión en serie del Amperímetro entre el borne positivo de la fuente y la conexión marcada en la base de la bobina como “-Fuente”
- Tomar el valor de la intensidad del campo magnético con el teslámetro en la región entre las bobinas, sin que la peineta esté posicionada allí, ya que esto generaría un valor mayor de campo debido a la influencia de las corrientes parásitas que puedan estar alojadas en este elemento.
- Liberar la peineta retirando el accesorio de fijación de los ángulos y esperar hasta que se detenga completamente y el tiempo de frenado sea mostrado en la interfaz gráfica del módulo Timer/Counter.
- Todos los pasos anteriores se deben repetir cambiando la forma geométrica de la peineta. Se sugiere iniciar la experimentación con la peineta sin perforaciones como lo ilustra la figura 25. Además se sugiere que las variables que influyen en el comportamiento del freno se cambien de una en una para efectos de hacer análisis cuidadosos y poder concluir al respecto.

Figura 25. Peineta sin perforaciones.

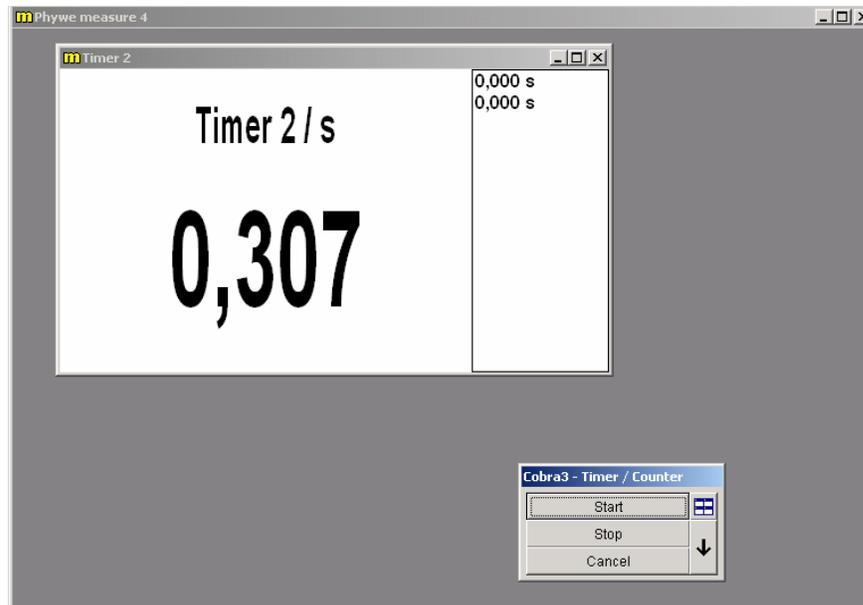


Fuente: Personal.

Al finalizar cada uno de estos procedimientos aparecerá un cuadro con los tiempos obtenidos (figura 26), estos se deben exportar de la memoria del cobra3 como números como lo muestra la figura 27. Los datos se deben exportar datos usando la opción “Export data” en el menú “Measurement”.

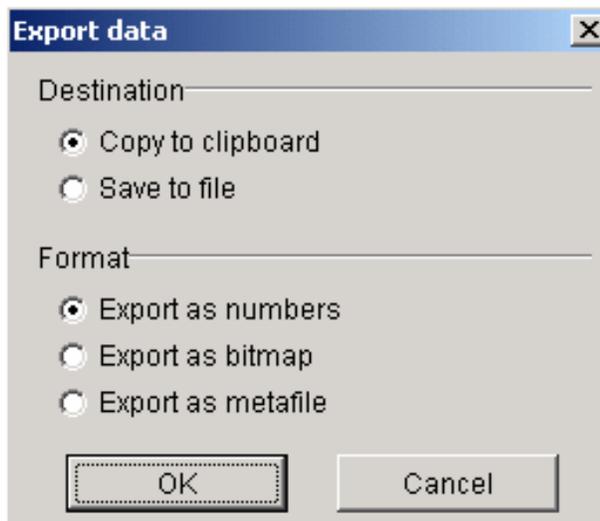
Para acceder a ellos deben ser pegados en un archivo de Excel donde se estarán ingresando también los valores obtenidos por el Teslámetro y posteriormente se generará la gráfica de los mismos.

Figura 26. Visualización del tiempo de frenado obtenido



Fuente: Personal.

Figura 27. Cuadro exportar datos.



Fuente: Personal.

3.3. Pruebas y ensayos

Desde la planeación del proyecto se dividió el desarrollo del mismo por etapas, dentro de las cuales se destacan tres principalmente: La etapa de generación del campo magnético uniforme, la etapa de adecuación mecánica del prototipo y la etapa de integración del sistema de adquisición de datos y equipo de medida teslámetro.

En cada una de las etapas anteriormente mencionadas, se realizaron numerosas pruebas y ensayos sobre todos y cada uno de los componentes del prototipo. Con los resultados obtenidos en cada una de las pruebas se toman importantes decisiones acerca del prototipo final. Por ejemplo:

1. La no utilización de las bobinas de Helmholtz dentro del diseño del freno electromagnético y el posterior diseño de las bobinas generadoras del campo magnético, se debió a pruebas realizadas con el par de bobinas de Helmholtz y péndulos iniciales de material metálico. Estos últimos no llegaban a frenarse a razón de las corrientes parásitas generadas por el campo magnético asociado a las bobinas en mención.
2. La evolución de la parte mecánica (Eje de oscilación del péndulo y base indicadora de ángulo de salida) fue una constante evolución, basada en una etapa de ensayos dedicada a optimizar el lanzamiento del péndulo y tratando de llevar a un valor cercano a cero la fricción entre piezas.
3. El diseño y la optimización de la forma de tomar los datos de frenado del péndulo y su posterior visualización, apoyados en el sistema de adquisición de datos Cobra3.

De esta manera se llega al prototipo final de experimentación, el cual tiene como prioridad garantizarle al estudiante que la práctica de laboratorio diseñada cumple a cabalidad con todas las especificaciones técnicas, de seguridad y conceptuales y se pueda centrar en apreciar el fenómeno, medirlo, realizar el informe de laboratorio y sacar sus propias conclusiones. Las tablas de pruebas realizadas durante el desarrollo del prototipo se encuentran en el Anexo 8.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

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 28. Este proceso de pruebas y ensayos permitió mejorar el entorno de experimentación, y diseñar una guía de trabajo denominada practica de laboratorio (Anexo 5) para que el estudiante pueda experimentar con la aplicación de las corrientes parásitas 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 tres procedimientos, por ejemplo:

- Variación de la intensidad del campo
- Variación de forma geométrica y material del péndulo
- Variación de ángulo de salida del péndulo

Figura 28. Prototipo de freno electromagnético para experimentación.



Fuente: Personal.

Después de arduos meses de trabajo y muchas pruebas de laboratorio desarrolladas con mediciones cuidadosas manuales, automáticas y la poca discrepancia entre ellas, se logró mejorar y optimizar el prototipo para el freno electromagnético. Se concluye que los resultados obtenidos con el desarrollo del proyecto fueron muy satisfactorios. Se cumplen los objetivos planteados y se elabora un prototipo muy didáctico y de fácil uso que permite un proceso de experimentación dinámico y enriquecedor.

Los tiempos de frenado obtenidos mediante el sistema de control y el modulo Timer/Counter del Cobra3 fueron de notable exactitud. Se realizaron pruebas de comparación de tiempos de frenado entre una persona midiendo con un cronometro y el tiempo mostrado en el PC por la interfaz del Cobra3 y en la mayoría su distanciamiento no paso de 0,1 segundos.

También pudo observarse que realizando varias veces el experimento con una peineta del mismo material y forma los tiempos eran casi idénticos, lo cual brinda bastante confiabilidad a la hora de concluir acerca del fenómeno.

La principal aplicación de este prototipo es la práctica de laboratorio diseñada para realizar el procedimiento de experimentación de las corrientes parasitas. 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.

5. PRÁCTICA DE LABORATORIO: FRENO DE EDDY

La práctica de laboratorio se diseña con el objetivo de que el estudiante pueda apreciar como al ingresar un péndulo (Peineta) de material metálico en el interior de un campo magnético, este es detenido por los efectos de las corrientes parásitas o corrientes de Eddy generadas en el interior de la lámina a razón del campo. Dentro de la práctica de laboratorio el estudiante realizará el cambio de la forma geométrica, el ángulo de salida del péndulo y el material metálico del mismo y podrá apreciar lo que acontece en cada una de estas variaciones de parámetros. Así mismo se espera que el estudiante después de realizar la práctica de laboratorio del freno de EDDY tenga claridad acerca de todos los fenómenos físicos asociados a ésta como lo son las corrientes parásitas, campos magnéticos uniformes, fuerza electromotriz inducida, entre otros. Lo anterior apoyado en el procedimiento de experimentación planteado en la guía de laboratorio diseñada (ANEXO 5)

6. CONCLUSIONES

- Se da cumplimiento a los objetivos propuestos en el anteproyecto en común acuerdo con el Director del proyecto y se entrega a la comunidad educativa de la Universidad Pontificia Bolivariana un equipo de experimentación con el fin de contribuir a la formación del ingeniero Bolivariano.
- 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 Eddy o corrientes parásitas.
- Se realiza de manera óptima la integración del módulo Timer/Counter del sistema de adquisición de datos Cobra3 y el circuito de control, medición y visualización diseñado, permitiendo así cuantificar y manipular los tiempos de frenado obtenidos de los péndulos (Peinetas) con diferentes formas geométrías y poder concluir al respecto.
- A través de una planeación detallada y de procesos de pruebas y ensayos se logra llegar a la versión mas óptima de un prototipo de freno electromagnético para experimentación y su correspondiente guía para experimentación.
- Se logra el aprovechamiento y la utilización del equipo de medida de campo magnético (Teslámetro) y del sistema de adquisición de datos Cobra3 de propiedad de la Universidad Pontificia Bolivariana y que se encontraban subutilizados dentro de los laboratorios.

7. BIBLIOGRAFÍA

Ambardar, A., (2003). Procesamiento de Señales Analógicas y Digitales (2da Ed.). Thomson Paraninfo.

Manuel, A., Olive, J. y Solesanchez, B. (2001). Instrumentación virtual - Adquisición, procesado y análisis de señales. Edicions UPC.

Serway, Raymond A. (2001). FÍSICA para ciencias e ingeniería Tomo II- Corrientes parásitas. Mc Graw Hill.

Gómez, F., Guerra, D., Restrepo, C., (2007). Diseño e implementación de practicas con el cobra 3 para el laboratorio de física del centro de ciencia básica. UPB.

Gómez, F., Guerra, D., Restrepo, C., (2007). Anexo C: Manual equipos de laboratorio Cobra 3 y software measure. UPB.

LEYBOLD DIDACTIC. Instrucciones de servicio. Enero de 2012
<http://www.lddidactic.de/ga/5/516/51662/51662FS.PDF>

Freno Electromagnético, diseño y funcionamiento. Enero de 2012
<http://www.youtube.com/watch?v=c6JJMLdsAmo>

Freno Electromagnético, diseño y funcionamiento. Enero de 2012
<http://cmagnetico.blogspot.com/2009/06/funcionamiento-delfreno.html>

Física por ordenador. Marzo de 2013
<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/elecmagnet/induccion/foucault/foucault.htm>.

8. ANEXOS

ANEXO 1. Teslámetro Leybold Didactic

El teslámetro es un instrumento de medida que permite determinar la magnitud del campo magnético. En nuestro proceso de experimentación nos interesa conocer el campo magnético de intensidad continua generado en el interior de la bobina de Helmholtz.

El teslámetro en la mayoría de los casos se compone de dos partes: El teslámetro en sí y de la sonda Hall, con la cual se toman las medidas a procesar en el equipo. Ésta en nuestro caso será una sonda axial por comodidad en la toma de muestras.

Este equipo de proporciona las medidas en Teslas (T) o militeslas (mT). Es importante antes de utilizar este instrumento ajustarse el punto cero, pues las corrientes que producen otros aparatos electrónicos ajenos al experimento pueden entorpecer la medida. A partir del *data sheet* ó la hoja de parámetros elaborada por el fabricante se dará a conocer el paso a paso para llevar a cabo este procedimiento.

El teslámetro funciona gracias al efecto Hall, el cual consiste en que cuando un conductor recorrido por una corriente se posiciona en un campo magnético uniforme, en el conductor aparece un campo electrostático cuya dirección es perpendicular al campo causante y a la corriente produciendo un potencial, que es lo que mide el teslámetro.

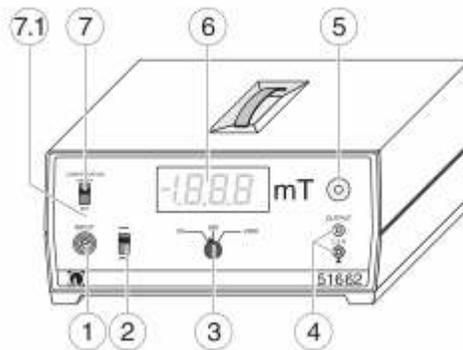
El teslámetro con el que se mide la densidad de flujo magnético en el freno electromagnético: Prototipo para experimentación, es de la marca Leybold Didactic, modelo 51662 obtenido por la universidad Pontificia Bolivariana para su laboratorio de física. Con la sonda tangencial B (516 60) o la sonda axial (516 61) el teslámetro sirve para indicar digitalmente densidades de flujo magnético B entre 0.01 mT hasta 2 T; allí se pueden medir campos magnéticos continuos y alternos. Con este aparato también es posible compensar densidades de flujos de campos magnéticos de hasta $B_{comp} = 500$ mT, lo cual permite realizar mediciones sensibles de variaciones en los campos magnéticos. Los valores medidos se obtienen como tensiones analógicas a través de una salida amplificada adicional para alimentar luego a un instrumento de medición analógico.

Teslámetro Leybold Didactic.



A continuación se da una descripción detallada del teslámetro Leybold Didactic modelo 51662:

Teslámetro Leybold Didactic modelo 51662.



1. Clavijero múltiple para conectar la sonda B tangencial y axial.
 2. Conmutador para las mediciones de campos magnéticos continuos o alternos.
 3. Conmutador selector del rango de medición para los rangos escalonados en décadas ± 20 , ± 200 , ± 2000 mT. Resolución 0.01 mT, 0.1 mT, 1 mT.
 4. Salida analógica: par de clavijeros de 4 mm, el clavijero inferior puesto a tierra; tensión de salida máxima ± 2 V (respectivamente ± 20 ó 200 ó 2000 mT de acuerdo a la selección del rango 3), resistencia de salida 100Ω .
 5. Espacio apantallado magnéticamente para la recepción de las sondas de campo para la compensación del cero con 7.
 6. Visualizador digital, de 3 dígitos, con punto decimal dependiente del rango de medición.
 7. Pulsador para la compensación automática del cero, así como para la compensación de las densidades de flujo magnéticas hasta ± 500 mT. (Función *Set-Reset*).
- (7.1) Visualizador LED para indicar la compensación realizada. Los dos pies desdoblables del piso de la carcasa sirven para colocar el dispositivo en posición inclinada. El dispositivo está equipado con un interruptor de red en el lado posterior y un enchufe empotrado con porta fusible integrado.

Datos técnicos adicionales:

- Sensibilidad: 0.01 mT
- Precisión: 1% ± 1 dígito en campos constantes. 3% ± 1 dígito en campos alternos
- Rango de frecuencia en campos alternos: 20 Hz - hasta 10 kHz
- Tensión de conexión a la red: 115 VAC, 50 a 60 Hz
- Consumo de potencia: 20 VA
- Dimensiones (BxAxP): 30 cm x 14 cm x 23 cm
- Peso: 2,3 kg

Compensación del offset ("función Tara")

El ajuste del punto cero y la compensación del offset sólo tienen importancia para el caso de campos continuos; la medición de estos campos continuos se selecciona con el conmutador 2.

Para el ajuste del punto cero se debe elegir el rango de medición más sensible mediante el conmutador selector 3, a continuación se inserta la sonda de campo magnético en el espacio apantallado magnéticamente 5 y se pone el visualizador (aproximadamente) a cero a través del pulsador 7.

Para la compensación de campos magnéticos continuos se procede de acuerdo a ello; sin embargo, esta vez la sonda se sitúa dentro del espacio del campo a ser compensado cuando el pulsador 7 es accionado. La compensación de densidades de flujos magnéticos de hasta ± 500 mT puede efectuarse en cada rango de medición.

Luego de realizada la compensación el LED (7.1) ilumina. El ajuste del punto cero o la compensación del offset pueden ser anuladas mediante la función Reset del pulsador 7 (el LED (7.1) se apaga).

Mediciones de campos magnéticos constantes

Después de efectuar el ajuste del punto cero y la compensación del offset se puede empezar con la medición de las densidades de campo magnético. Para ello, coloque la sonda respectiva dentro del campo a medir y lea el valor respectivo en el visualizador. Efectúe mediciones mediante la salida analógica. Para efectuar mediciones de campos magnéticos alternos, con el conmutador 2 seleccione el servicio para la medición de campos alternos.

Indicación de sobrecarga

Cuando el rango de medición ha sido sobrepasado, en el visualizador 6 aparece 1 ó -1, según la dirección del campo magnético. En este caso, seleccione el próximo rango de medición más alto mediante el conmutador selector 4. Si es necesario compensar campos magnéticos, entonces primero hay que verificar, en el rango de 2000 mT, si la condición $B_{comp} \leq 500$ mT se cumple. Si no se puede efectuar la compensación, entonces se tendrá, o bien, la indicación de saturación 1 ó -1 en el visualizador, o bien, una indicación $\neq 0$, según sea la relación entre rango de medición y la intensidad de campo. Esto puede ser remediado cambiando las condiciones del experimento y realizando una nueva compensación o un nuevo ajuste del punto cero.

Indicador de sobrecarga.



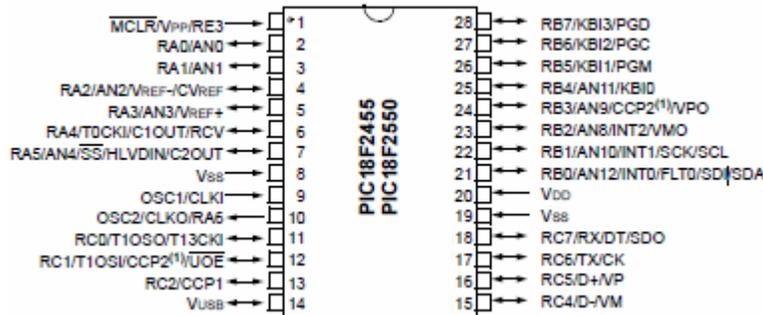
Empleo de la salida analógica

Si se conecta a la salida 4 ($R_i \geq 100$ k Ω) un instrumento analógico o un registrador, la tensión máxima de salida $U_{max} = \pm 2$ V corresponde a $B = 20$ mT, 200 mT ó 2000 mT dependiendo de la posición del conmutador selector del rango de medición 3.11

ANEXO 2. PIC Microchip 18f2550

Al manifestarse la necesidad de dar un tratamiento especial a la señal obtenida por el sensor de proximidad para poder aprovechar la misma de manera óptima en el proceso de comienzo y final del tiempo de frenado, se evalúa la forma de incluir un dispositivo micro controlado que ofreciera unas propiedades básicas de manejo de puertos de entrada y salida y entregara un par de señales de salida “tratadas” con anterioridad en el módulo interno timer, se eligió el PIC al que hace mención este nuevo aparte y del que se dará a continuación una descripción física de sus puertos y se mostrara en la tabla 3 las características de operación.

Microchip 18f2550, diagrama de pines PDIP.



Características del dispositivo PIC Microchip 18f2550.

Features	PIC18F2455	PIC18F2550	PIC18F4455	PIC18F4550
Operating Frequency	DC – 48 MHz			
Program Memory (Bytes)	24576	32768	24576	32768
Program Memory (Instructions)	12288	16384	12288	16384
Data Memory (Bytes)	2048	2048	2048	2048
Data EEPROM Memory (Bytes)	256	256	256	256
Interrupt Sources	19	19	20	20
I/O Ports	Ports A, B, C, (E)	Ports A, B, C, (E)	Ports A, B, C, D, E	Ports A, B, C, D, E
Timers	4	4	4	4
Capture/Compare/PWM Modules	2	2	1	1
Enhanced Capture/Compare/PWM Modules	0	0	1	1
Serial Communications	MSSP, Enhanced USART	MSSP, Enhanced USART	MSSP, Enhanced USART	MSSP, Enhanced USART
Universal Serial Bus (USB) Module	1	1	1	1
Streaming Parallel Port (SPP)	No	No	Yes	Yes
10-bit Analog-to-Digital Module	10 Input Channels	10 Input Channels	13 Input Channels	13 Input Channels
Comparators	2	2	2	2
Resets (and Delays)	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST), MCLR (optional), WDT	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST), MCLR (optional), WDT	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST), MCLR (optional), WDT	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST), MCLR (optional), WDT
Programmable Low-Voltage Detect	Yes	Yes	Yes	Yes
Programmable Brown-out Reset	Yes	Yes	Yes	Yes
Instruction Set	75 Instructions; 83 with Extended Instruction Set enabled	75 Instructions; 83 with Extended Instruction Set enabled	75 Instructions; 83 with Extended Instruction Set enabled	75 Instructions; 83 with Extended Instruction Set enabled
Packages	28-pin PDIP 28-pin SOIC	28-pin PDIP 28-pin SOIC	40-pin PDIP 44-pin QFN 44-pin TQFP	40-pin PDIP 44-pin QFN 44-pin TQFP

ANEXO 3. Sensor de proximidad inductivo LM30-3015NA

Las características del sensor inductivo del fabricante YHZ adquirido para el desarrollo del prototipo se describen a continuación:

Especificaciones técnicas del sensor inductivo LM30-3015NA.

Diametro ø 30mm, Metalicos, Proteccion IP67

Referencia	Alcance	Voltaje	Hilos	Salida	Corriente	Deteccion
LM30-3015NA	15mm	6-36 Vdc	3	NPN-NA	200mA	Saliente
LM30-3015PA	15mm	6-36 Vdc	3	PNP-NA	200mA	Saliente
LM30-2015A	15mm	90-250 Vac	2	NA	200mA	Saliente

El siguiente es el modelo de explicación de interruptor de proximidad LM30:

LM30-3015NA

1. Categoría switch (**LM: tipo Inductancia**; CM: Tipo de Capacitance; SM: tipo Hall; AM: La seguridad a prueba de explosiones, XM: Mimic tipo lineal).
2. Tensión de servicio (**30: 6-36VDC**; 310: 5-24VDC, 320: 12-60VDC, 20: 90-250VAC, 210: 24-250VAC, 220: 380VAC, 40: 12-240VDC/24-240AC; 50: Especial voltaje).
3. Distancia de detección (01: 1 mm; 05: 5mm; 10: 10 mm; **15: 15 mm**)
4. Método de salida (**N: tres líneas de salida de CC NPN**; P: tres líneas de salida de CC PNP; L: dos líneas de salida de CC, AC Salida de dos hilos; J: Salida de relé; NP: NPN + salida PNP)

ANEXO 4. Especificaciones técnicas de la Unidad Básica Cobra3

Entradas análogas	
Rango de medida	±10 V
Conexión	Conector SUB-D de 25 pines
Entrada análoga 1 o sensor 1:	
Rango de medida	±30 V/ ±10 V
Conexión	Conector de 4mm o SUB-D de 9 pines
Entrada	Aterrizada
Resistencia a la entrada	519 kΩ
Entrada análoga 2 o sensor 2:	
Rango de medida	± 30 V, ± 10 V, ± 3 V, ± 1 V, ± 0.3 V, ± 0.1 V
Conexión	conector de 4 mm o SUB-D de 9 pines
Entrada diferenciada	no aterrizada
Resistencia a la entrada	1038 kΩ
Para todas las entradas análogas:	
Tasa de muestreo	Máx. 500 kHz
Modo <i>On line</i>	mas de 5 kHz
Modo Rápido	5 Hz – 500 kHz
Resolución	12 bits
Protección de sobrevoltaje	230 V AC
<i>Triggering</i>	Ajustable
Timer /Contador 1 ó 2	
Capacidad de conteo	32 ó 40 bits
Resolución	1 ms o 250 ns

Protección sobrevoltaje	mas de 35 V
Conexión	<i>Sockets</i> 4 mm
Configuraciones posibles para:	
<i>Timer</i> /contador 1	<i>timer</i> , contador
<i>Timer</i> /contador 2	<i>timer</i> 1, contador, <i>timer</i> 2, contador con compuerta de tiempo
Salida análoga	
Rango de voltaje	± 10 V
Resolución	5 mV
Conexión	<i>Socket</i> SUB-D de 9 ó 25 pines
Salida de voltaje	
Voltaje fijo	5 V / 0.2 A
Conexión	<i>Sockets</i> 4 mm
Datos generales	
Interfaz RS232	<i>Socket</i> SUB-D de 9 pines
Tasa de transmisión	Máx. 115200 bits/s
Almacenamiento de valores medidos	12000 valores
Conector para unidades	<i>socket</i> de 48 pines
Voltaje de DC	12 V, > 6 W
Conector	<i>socket</i> de bajo voltaje, positivo adentro
Dimensiones de la carcasa	190 x 135 x 90 mm
Peso	850 g

ANEXO 5.
GUÍA PARA EXPERIMENTACIÓN CON EL PROTOTIPO DE FRENO DE EDDY



CENTRO DE CIENCIA BÁSICA
ÁREA DE FÍSICA
LABORATORIO ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO

PRÁCTICA: FRENO DE EDDY

1. PROPÓSITO

- Estudiar el comportamiento de las corrientes parasitas en un material metálico, en movimiento pendular dentro de un campo magnético uniforme.
- Analizar de manera experimental la influencia que tienen en el tiempo de frenado del objeto metálico, variables como intensidad del campo magnético, el ángulo con que inicia el movimiento el péndulo, la forma geométrica y la conductividad del material

2. 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. 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*.

La inducción electromagnética constituye una pieza destacada en ese sistema de relaciones mutuas entre electricidad y magnetismo que se conoce con el nombre de electromagnetismo y se han desarrollado un sin número de aplicaciones prácticas de este fenómeno físico. La representación del campo magnético en forma de líneas de fuerza permitió a Faraday encontrar una explicación intuitiva para este tipo de fenómenos. Un concepto fundamental en la inducción electromagnética es el flujo magnético Φ , determina el número total de líneas de fuerza que atraviesan una superficie. En términos matemáticos, para un campo magnético constante y una superficie plana de área S , el flujo magnético se expresa en la forma:

$$\Phi = B.S.\cos \varphi \quad (1)$$

Siendo B , la intensidad del campo magnético, S el valor del área que ese atraviesa y φ el ángulo entre los vectores campo magnético y el área. La unidad de flujo magnético es el Weber (Wb)..

Cuando el flujo magnético que atraviesa una pieza metálica es variable, se presenta el fenómeno de Inducción electromagnética, conocido como Ley de Faraday - Henry que dice: *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 2.*

$$\epsilon_i = - N \cdot \partial\Phi/\partial t \quad (2)$$

Siendo ϵ_i la fuerza electromotriz inducida y $\partial\Phi$ la variación de flujo magnético que se produce en el intervalo de tiempo Δt . De acuerdo con esta ecuación², la magnitud de f.e.m. 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.

Si no hay variación con el tiempo del flujo magnético que atraviesa un circuito, el fenómeno de la inducción electromagnética no se presenta. Tal circunstancia explica los fracasos de aquellos físicos contemporáneos de Faraday que pretendieron conseguir corrientes inducidas en situaciones estáticas, o de reposo, del circuito respecto del imán o viceversa. Cuando la ley de Faraday-Henry se aplica a una bobina formada por N espiras iguales toma la forma

$$\epsilon_i = - N \cdot \partial\Phi/\partial t \quad (3)$$

Siendo $\partial\Phi/\partial t$ la variación del flujo magnético por unidad de tiempo para una sola espira en la bobina.

Corrientes Eléctricas inducidas

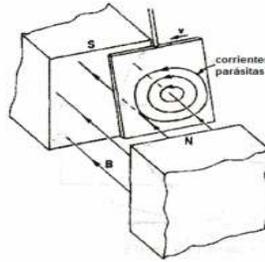
La ley de Faraday-Henry establece que se induce una fuerza electromotriz (f.e.m.) ϵ_i en un circuito eléctrico siempre que varíe el flujo magnético Φ que lo atraviesa. Pero de acuerdo con la definición de flujo magnético (ecuación 1), éste puede variar porque varíe el área S limitada por el conductor, porque varíe la intensidad del campo magnético B o porque varíe la orientación entre ambos dada por el ángulo ϕ . Por ejemplo, Si se hace rotar una espira conductora en un campo magnético uniforme, se produce en la espira una fuerza electromotriz inducida, que a su vez permite calcular la corriente eléctrica inducida usando para ello la relación de Ohm, que se visualiza en la siguiente ecuación

$$\mathcal{E}_i = - \frac{\partial\Phi}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial t} (\vec{B} \cdot \vec{S}) \quad (4)$$

Corrientes parásitas o corrientes de Foucault

Cuando el objeto que se mueve no es una espira sino un cuerpo masivo, la variación del flujo magnético sobre esta pieza debida al movimiento produce una fuerza sobre los portadores de carga movilizándolos de tal forma que generan corrientes eléctricas curvas que se denominan corrientes parásitas, de Eddy o de Foucault (ver figura 1).

Figura 2. Corrientes inducidas por un campo magnético en una lámina metálica.



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. 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 generados.

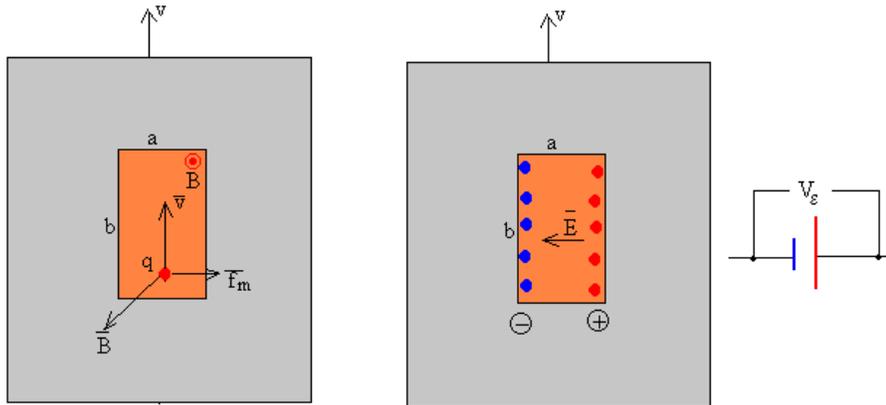
Las corrientes parásitas producen dos efectos, por un lado se produce un frenado magnético del disco y por otro un calentamiento por efecto Joule, que puede suponer un inconveniente. Éste se puede reducir evitando los posibles caminos en el interior de las piezas metálicas.

El efecto de frenado se produce porque el campo magnético le hace una fuerza a la corriente eléctrica inducida en tal dirección que se opone al movimiento del material. Este efecto se utiliza en frenos magnéticos de trenes de alta velocidad, motores, balanzas de precisión, etc.

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 . Se supone 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.

Figura 3. Acción del campo magnético externo sobre las corrientes inducidas.

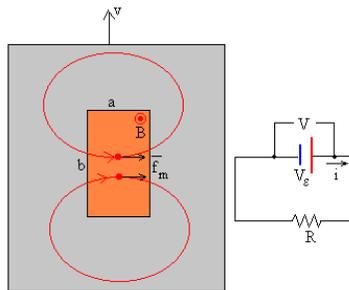


Supongamos que el campo magnético \mathbf{B} es perpendicular al plano de la hoja metálica, al moverse la pieza metálica con velocidad v , los portadores de carga q existentes en la pequeña región rectangular de dimensiones a y b experimentan una fuerza tal como se describe en la Ecuación 5 y que puede apreciarse en la figura 3.

$$\vec{F}_m = q(\vec{V} \times \vec{B}) \quad (5)$$

Los portadores de carga son impulsados por la fuerza magnética hacia la derecha. Se tiene el equivalente a una batería cuya fem es igual a la diferencia de potencial (Ecuación 6) medida en circuito abierto.

Figura 4. Acción del campo magnético externo sobre las corrientes inducidas.



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.

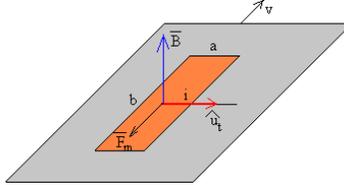
$$r = \frac{a}{\sigma \delta b} \quad (6)$$

Siendo δ el espesor de la pieza metálica y σ la conductividad del metal. La ecuación del circuito se escribe $i(r+R)=V_e$

$$i = \frac{vBa}{R+r} = \frac{\sigma\delta bB}{1+R/r}v \quad (7)$$

El cálculo de la resistencia R de la pieza metálica excepto la región rectangular es muy complicado.

Figura 5. Acción del campo magnético externo sobre las corrientes inducidas.



La fuerza que ejerce el campo magnético B sobre esta porción de corriente es:

$$\vec{F}_m = i(\vec{u}_t \times \vec{B})a \quad (8)$$

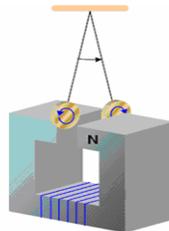
Se supone que la intensidad está uniformemente distribuida en la sección $b\delta$. La fuerza F_m se opone a la velocidad v de la pieza metálica y es proporcional a su velocidad, y al cuadrado del campo magnético B . El producto δab es el volumen de la porción de la pieza metálica que está bajo la influencia del campo magnético uniforme B .

$$F_m = \frac{\sigma\delta ab}{1+R/r} B^2 v \quad (9)$$

Movimiento pendular de la pieza metálica

Si se hace oscilar un péndulo constituido por una placa de metal, entre los polos de un electroimán (figura 6) se observará que se va frenando hasta pararse por completo, produciéndose este efecto más rápidamente cuanto mayor sea la intensidad del campo.

Figura 6. Efecto de frenado producido por una corriente eléctrica en el interior de un campo magnético.

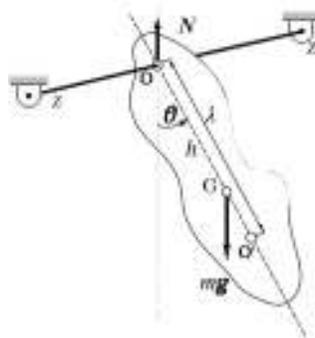


El Péndulo Físico

El péndulo físico es un sistema con un sólo grado de libertad; el correspondiente a la rotación alrededor del eje fijo ZZ' (Figura 7). La posición del péndulo físico queda determinada, en cualquier instante, por el ángulo θ , 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.

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 θ , 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; i.e.,

Figura 7. Diagrama de fuerzas del péndulo físico



Si I_O , es el momento de inercia del péndulo respecto al eje de suspensión ZZ' y se llama $\ddot{\theta}$ a la aceleración angular del mismo, la ecuación dinámica diferencial del péndulo es:

$$-mgh \sin \theta = I_O \ddot{\theta} \quad (10)$$

Que se puede escribir en la forma de una ecuación diferencial de segundo orden.

$$\ddot{\theta} + \frac{mgh}{I_O} \sin \theta = 0 \quad (11)$$

En el caso de que la amplitud angular de las oscilaciones sea pequeña, $\sin \theta \approx \theta$ y la anterior ecuación, adopta la forma:

$$\ddot{\theta} + \frac{mgh}{I_O} \theta = 0 \quad (12)$$

Que corresponde a un movimiento armónico simple, cuyo periodo de oscilación es:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I_O}{mgh}} \quad (13)$$

Acercamiento al Modelo Matemático del Prototipo de Freno Electromagnético

Cuando el péndulo metálico se mueve en el campo magnético uniforme, aparecen las corrientes parásitas y la fuerza que el campo le hace a dichas corrientes. Estas fuerzas se oponen al movimiento, haciendo que el péndulo físico sea amortiguado y por ende en un freno electromagnético. Un acercamiento al modelo matemático del prototipo de freno electromagnético para experimentación, se presenta a continuación.

Figura 8. Diagrama de fuerzas de la peineta sumergida en un campo magnético uniforme



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

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

Dónde:

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

r_1 y r_2 son los vectores de posición de las fuerzas ejercidas por la gravedad y la fuerza magnética, respectivamente. Se tiene entonces que:

$$\tau_1 = r_1 F_1 \text{ Sen} \theta \quad \text{en la dirección } k$$

$$\tau_2 = r_2 F_2 \text{ Sen} \theta \quad \text{en la dirección } -k$$

Se puede hacer la siguiente aproximación:

$$\text{Sen} \theta \approx \theta$$

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

$$r_1 F_1 \theta - r_2 F_2 \theta = I \ddot{\theta}; \quad \text{donde } \theta = \frac{d^2 \theta}{dt^2}$$

F_2 es la fuerza magnética que le ejerce el campo magnético a las corrientes parásitas y es contraria al movimiento.

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

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

$$r_1 F_1 \ddot{\theta} - r_2 F^m \theta = I \ddot{\theta}$$

$$r_1 F_1 \ddot{\theta} - r_2 \eta V \theta = I \ddot{\theta}$$

$$r_1 F_1 \ddot{\theta} - r_2 \eta_L \theta \dot{\theta} = I \ddot{\theta}$$

$$I \ddot{\theta} + r_2 \eta_L \theta \dot{\theta} - r_1 F_1 \theta = 0$$

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

$$\mathbf{a \ddot{\theta} + b \theta \dot{\theta} - c \theta = 0} \quad (14)$$

La solución a esta ecuación no puede hallarse mediante los métodos tradicionales y por el contrario requiere de avanzados procedimientos que involucran los métodos numéricos en un nivel superior, que no abarcan el alcance de este experimento.

3. MONTAJE Y EQUIPOS

3.1 Descripción del montaje

El diseño estructural esta soportada en una base de madera MDF de 1/2" de grosor y de una área de 30 * 50 cms y se compone de dos bases metálicas de lámina de acero calibre 16 (Área operativa de dimensiones 12 * 17 cms) separadas entre sí tres centímetros y con una altura de 3,2 centímetros donde se alojan las bobinas, la base para el sensor y el eje para el movimiento pendular. Las bobinas se soportan y alinean por medio de dos rieles o canaletas de material plástico que soportan la poca temperatura de operación de las bobinas (Aproximadamente 20°C) y que están sujetas a las bases mediante cinta adhesiva de doble faz. En una de las bases se encuentra el soporte compuesto por dos laminas verticales de acero calibre 16 unidas por medio de una mordaza o "Tornillo partido o de empalme" donde se ubican los soportes del sensor de proximidad y del eje para la peineta y cuya función es dar estabilidad, modularidad y garantizar el paralelismo entre estos soportes elaborados con varillas de acero de 3/8" de diámetro. Dentro de la parte estructural también se encuentra la "caja" metálica de calibre 16 de las siguientes

dimensiones 7 * 5 * 3 cms, donde se alojan el circuito de control y las salidas hacia el módulo *timer* del Cobra3.

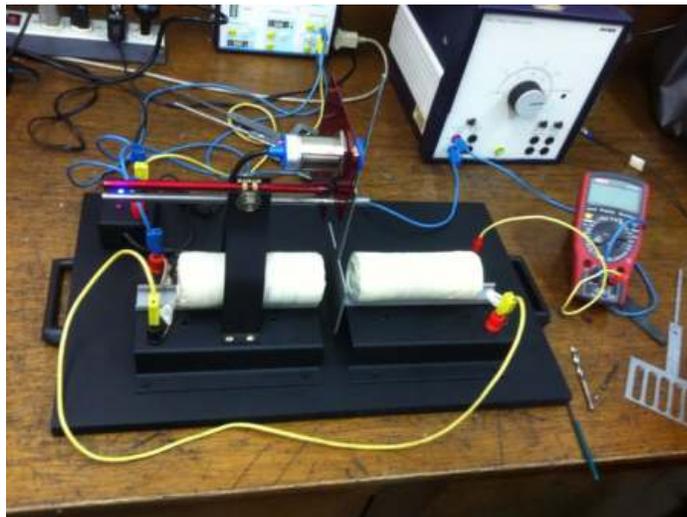
3.2 Materiales y Equipos

- Computador con software *Measure* versión 4 instalado.
- Prototipo del freno electromagnético para experimentación.
- Unidad Básica Cobra3 PHYWE.
- Multímetro Digital.
- Teslametro Leybold didactic
- Fuente de Voltaje 0-30 VDC PHYWE
- 4 pares de cables banana-banana
- Peinetas de 4 formas geométricas diferentes (Acero galvanizado y Aluminio)

4. PROCEDIMIENTO E INFORME

4.1 Realizar el montaje y las conexiones de los circuitos del prototipo, que se visualiza en la figura 9.

Figura 9. Montaje y las conexiones de los circuitos del prototipo



Para la realización de esta práctica de laboratorio es necesario realizar el montaje de la figura 9 de la siguiente manera:

1. Conectar la unidad básica Cobra3 al computador por el puerto serial RS232, luego realizar el conexionado de los cables de Start, Stop y Tierra entre la caja de control, medición y señalización del prototipo y el módulo Timer/counter2 de la unidad básica Cobra3. También debe realizarse la conexión de la serie entre las bobinas y de estas 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 modulo.
2. Luego se deben asegurar correctamente en el eje de oscilación mediante la tapa roscada, las peinetas metálicas que van a ser utilizadas.
3. Ubicar correctamente la sonda Axial del Teslámetro (Ingresarla a través del interior de alguna de las bobinas) de forma que la punta de esta sonda que de ubicada en la región del campo magnético uniforme a una distancia tal que la punta no tenga contacto físico con la peinetas. Se adhiere la base diseñada para la fijación de la sonda axial y se ubicala (Previamente la sonda del Teslámetro debe ser calibrada)
4. Después de haber realizado este procedimiento se procede a energizar el sistema mediante el adaptador de 6V que le brinda energía al sensor y a la parte circuital y las bobinas mediante la fuente de poder de 0-30V.

4.2 Proceso de toma de datos

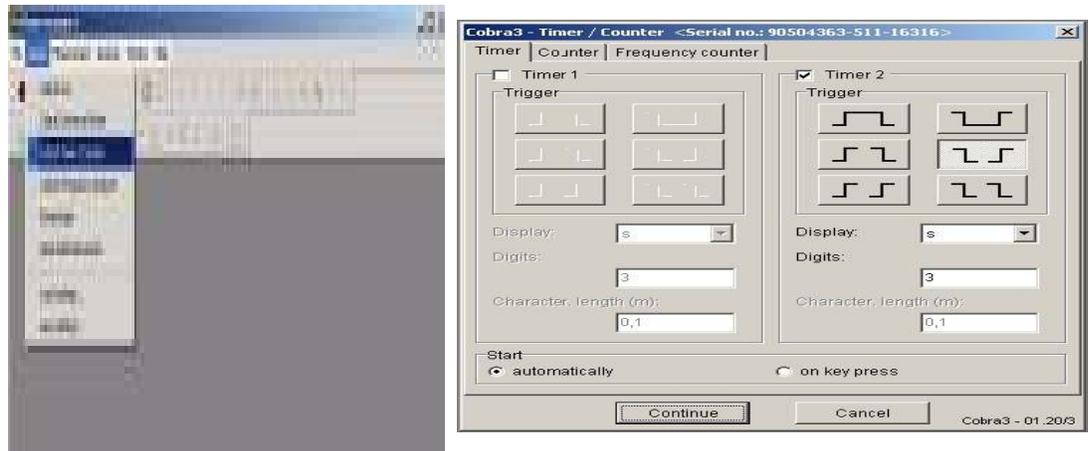
Escogencia de las características de las variables: de acuerdo a la selección de las variables se pueden implementar los siguientes procesos de medición:

- ✓ Campo magnético fijo Variación de ángulo: hacer cinco (5) variaciones de ángulos (Desde 90° hasta 50°)
- ✓ Campo magnético fijo, ángulo fijo (El mejor) y variar las formas de las peinetas (péndulos) en acero galvanizado
- ✓ Dejar un ángulo fijo (se recomienda 80° para apreciar mejor el fenómeno) y realizar cinco (5) variaciones de campo (Por seguridad se recomienda no pasar de 1.6A y hacer pasos de a 0.2A).
- ✓ Campo magnético fijo, ángulo fijo (El mejor), variar el material de las peinetas (usar ahora las de aluminio)

Procedimiento para activar la forma para medir el tiempo de frenado:

Una vez se ha ubicado la peinetas en el soporte piramidal del prototipo, se enciende el computador y se ingresa al programa *Measure4*, *activando* la función de Timer/Counter. Verifique que configuración esté como se muestra en la figura 10.

Figura 10. Selección de la función Timer/Counter del software Measure4



Nota importante: La peineta no debe estar en contacto con el sensor después de haber activado el Timer/counter, ya que esto generaría un inicio no deseado de la medición. Para evitar esto la peineta debe ser asegurada en el ángulo de tiro deseado mediante el accesorio de fijación destinado para tal fin.

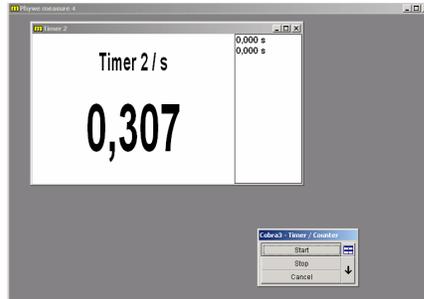


Procedimiento para escoger el valor de la intensidad del campo magnético:

Acondicionar la corriente deseada variando el voltaje de la fuente, este valor se visualiza en el amperímetro conectado en serie en dicho circuito. El valor del campo magnético se lee directamente en el teslámetro, (ubicado como se indicó antes), la lectura se debe hacer sin la presencia de la peineta de metal, porque el valor del campo sería erróneo.

La peineta debe estar ubicada en el ángulo escogido y fijada con accesorio diseñado para tal efecto. Libere la peineta del ángulo de fijación y podrá observar en la interfaz gráfica del Cobra3 mediante el Pc como el módulo timer comienza el conteo del tiempo de frenado. Espere hasta que el péndulo se detenga completamente, ello le permitirá observar el tiempo que se tardó en frenar el péndulo (Figura 11).

Figura 11. Visualización del tiempo de frenado obtenido



Al finalizar el movimiento pendular, aparece en la pantalla del computador un cuadro con los tiempos obtenidos (ver figura 10).

Exportar los datos de tiempo de frenado con la opción "Export data" en el menú "Measurement".de la memoria del cobra3 como números como lo muestra la figura11.

Figura 12. Cuadro exportar datos



Para poder acceder a estos datos, ellos deben ser pegados en un archivo de Excel donde se digita además los valores de intensidad de campo magnético obtenidos con el Teslámetro. Posteriormente se procede a realizar la gráfica de estos datos.

Método Para Obtener Las Gráficas de cada Experimento:

Abrir el archivo de Excel llamado "FRENO ELECTROMAGNETICO UPB" ubicado en el escritorio del computador usado en este experimento (ubicado en el Laboratorio de Física Ondas).

Figura 13. Archivo del experimento.



Ubicar el cursor en la celda "A1" y pegar los datos del tiempo de frenado obtenidos con el módulo timer/counter del cobra3. Luego de pegarlos se obtendrá algo como lo mostrado en la figura 12.

Figura14. Datos de tiempo de frenado pegados en Excel

	A	B	C	D
1	Number n/#	Channel2	B (mT)	
2	1	0,615		
3	2	0,345		
4	3	0,212		
5	4	0,187		
6	5			
7	6			
8	7			
9	8			
10	9			
11	10			
12	11			
13	12			
14	13			
15	14			
16	15			
17	16			
18				
19				

Luego se procede a anotar los valores intensidad de campo magnético obtenidos con el Teslámetro a partir de la celda "C2" hacia abajo en el área demarcada para tal fin. Nota: se recomienda anotarlos directamente en el archivo de "FRENO ELECTROMAGNETICO UPB". Luego de pegar los datos se obtendrá algo como lo mostrado en la figura 13.

Figura13. Datos obtenidos del flujo de campo magnético

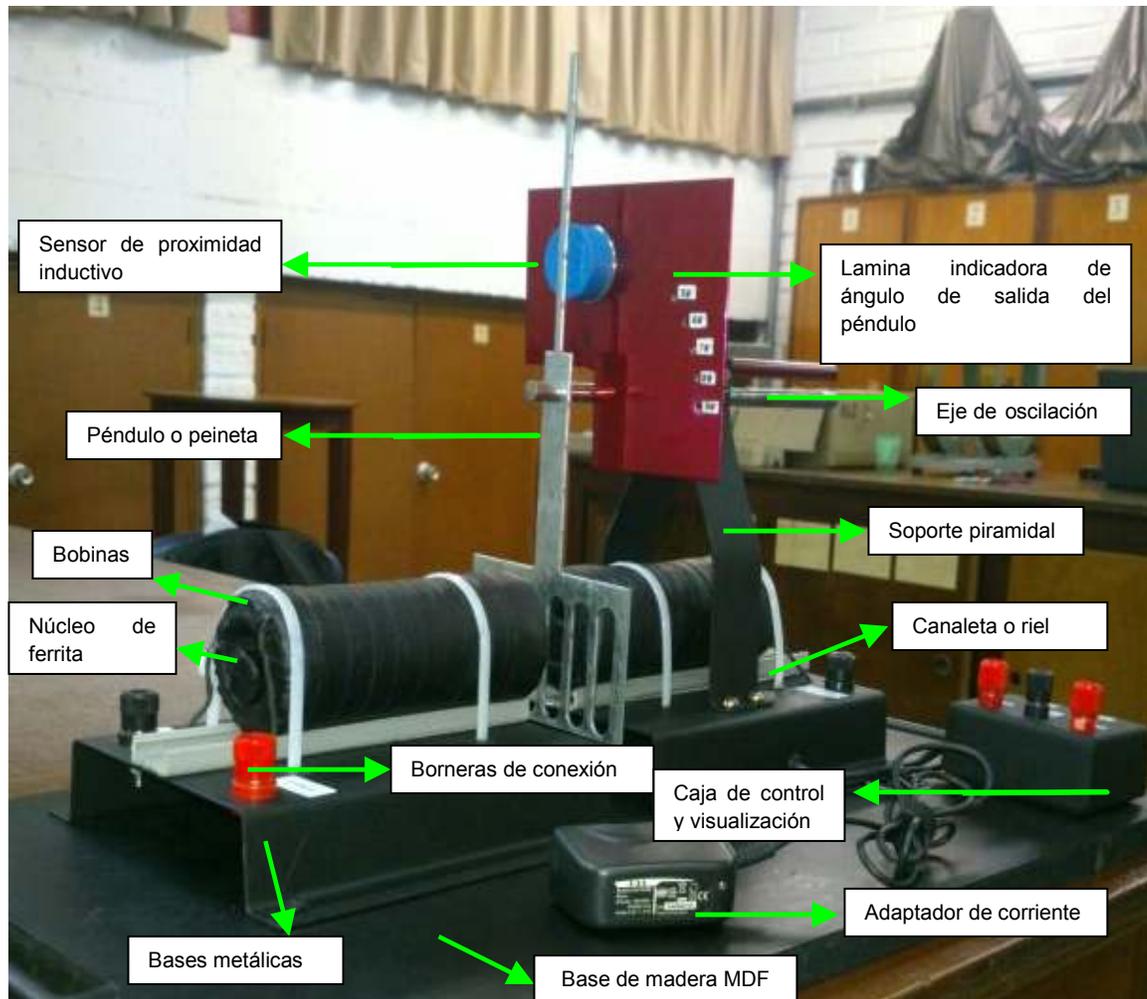
	A	B	C	D
1	Number n/#	Channel2	B (mT)	
2	1	0,615	0,05	
3	2	0,345	0,37	
4	3	0,212	1,8	
5	4	0,187	3,31	
6	5			
7	6			
8	7			
9	8			
10	9			
11	10			
12	11			
13	12			
14	13			
15	14			
16	15			
17	16			
18				
19				

Una vez organizada la tabla de datos, proceda a generar de manera automática la gráfica de campo magnético (B) Versus El tiempo de frenado. La cual debe ser archivada para posteriores análisis.

ANEXO 6. MANUAL DE MANTENIMIENTO DEL PROTOTIPO

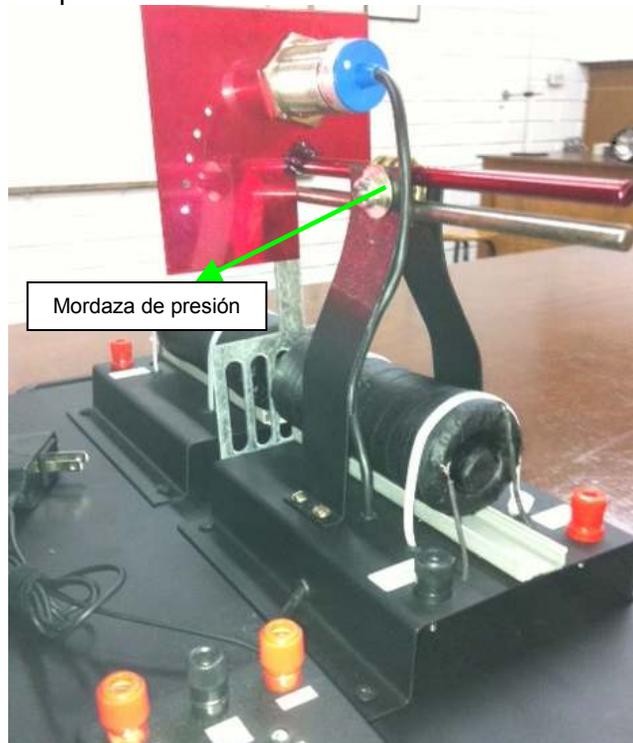
En este aparte se detallan los componentes del prototipo y se muestra la forma adecuada para realizar los procedimientos de mantenimiento preventivos periódicos y/o correctivos tanto de la parte estructural como de la parte eléctrica y del circuito de control, medición y visualización del prototipo del freno electromagnético para experimentación.

A continuación se ilustran y se da una listado de los principales elementos que conforman el prototipo de freno electromagnético para experimentación:



1. La parte estructural del prototipo está soportada en una base de madera MDF de $\frac{1}{2}$ " de grosor y de una área de 30 * 50 centímetros.
2. El prototipo se compone de dos bases metálicas de lámina de acero calibre 16 (Área operativa de dimensiones 12 * 17 centímetros) separadas entre sí tres centímetros y con una altura de 3,2 centímetros. Allí se alojan las bobinas, la base para el sensor y el eje de oscilación para el movimiento pendular.
3. Las bobinas se soportan en las bases metálicas mencionadas anteriormente y se alinean por medio de dos rieles o canaletas de material plástico que soportan la poca temperatura de operación de las bobinas (Aproximadamente 20°C) y que están sujetas a las bases mediante cinta adhesiva de doble faz.
4. En una de las bases metálicas, se encuentra el soporte vertical de forma piramidal compuesto por dos láminas verticales de acero calibre 16 donde se ubican el eje de oscilación y la base indicadora de ángulo de salida.
5. Las láminas del soporte piramidal del numeral anterior están unidas por medio de una mordaza o "Tornillo partido o de empalme" donde también se ubican los soportes del sensor de proximidad y del eje de oscilación del péndulo y cuya función es dar estabilidad, modularidad y garantizar el paralelismo entre estos soportes.
6. Los soportes del sensor de proximidad y el eje de oscilación del péndulo están elaborados con varillas de acero de $\frac{3}{8}$ " de diámetro.
7. Dentro de la parte estructural también se encuentra la "caja" metálica de calibre 16 de las siguientes dimensiones 7 * 5 * 3 centímetros, donde se alojan el circuito de control y las salidas hacia el modulo timer del Cobra3. A continuación se muestran las imágenes de los componentes descritos anteriormente.

Componentes del prototipo.



A todas las estructuras laminadas utilizadas dentro del desarrollo del prototipo del freno electromagnético para experimentación se les dio un acabado con pintura electrostática aplicada a alta temperatura (180°C) de color negro mate micro texturizado y de color rojo translucido para el soporte del sensor y la lámina indicadora del ángulo de salida del péndulo, lo anterior con el fin de protegerlos de la corrosión y hacer estas estructuras en lo posible libres de mantenimiento, ya que con esta capa de pintura y un uso adecuado del prototipo las posibilidades de que las mismas pierdan la pintura por simple contacto de operación son mínimas. Dentro del kit de mantenimiento entregado a la universidad se encuentra un aerosol color negro mate para dar de ser necesario un retoque, bien sea a alguna de las láminas o a la superficie de madera.

Descripción del proceso de mantenimiento del prototipo

Dentro del proceso de mantenimiento del equipo se deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Revisión / Inspección.
- Verificaciones / Comprobaciones / Puesta en servicio.
- Preparación / Calibración / Ajustes.
- Limpieza.
- Reparación de partes defectuosas.

Para llevar a cabo una adecuada rutina de mantenimiento del prototipo se debe:

1. Realizar una inspección o chequeo visual del estado de las partes que componen el prototipo. Esta inspección consiste en verificar que las bases metálicas se encuentren sujetas a la base de madera y mantengan la distancia adecuada entre ellas para el experimento (3 Centímetros), además de comprobar que las borneras o clavijas de conexión no se encuentren flojas, que el soporte piramidal se encuentre sujeto a la base metálica y contenga la mordaza de presión, que los cables de conexiones de las bobinas no se vean reventados y que las bobinas conserven sus núcleos de ferrita, que el sensor de proximidad se encuentre bien posicionado dentro de su base, que el eje de oscilación tenga en su extremo la tapa roscada y éste conserve el paralelismo con la varilla del soporte de los ángulos, que los péndulos o peinetas no se encuentren deformados o doblados ya que esto afectaría el buen funcionamiento de la practica. Esta inspección visual nos da una idea inicial del estado del equipo.



2. Después de realizar la revisión visual, se recomienda hacer una inspección técnica del prototipo que consiste en el chequeo con el multímetro de la continuidad de la conexión en serie entre bobinas y comprobar que el valor de la inductancia de cada bobina sin el núcleo sólido este alrededor de los 15mH. Este último procedimiento se realiza midiendo con el multímetro en el módulo para medir inductancia o Henrios (H) y las puntas insertadas en las borneras que se encuentran en cada base metálica correspondientes a cada punta de conexión de cada bobina.

Comprobar con el multímetro que el nivel de voltaje mostrado por el objeto (Perilla) indicador de la fuente, coincida con el nivel medido con el multímetro. Esto con el fin de garantizar el buen funcionamiento de la fuente que energizará las bobinas encargadas de crear el campo magnético.

Comprobar que el led indicador del adaptador de corriente enciende cuando este se conecte a la toma. Esto con el fin de garantizar el buen funcionamiento de la fuente que energizará el circuito de control, medición y visualización.



3. Dentro del proceso de preparación previo a la utilización del equipo se debe garantizar también la continuidad de los cables de conexión desde las borneras de las bobinas hacia la fuente de voltaje y de la conexión en serie entre ellas, midiendo continuidad con el multímetro. También se debe conectar el adaptador de corriente y comprobar mediante el piloto del sensor de proximidad el correcto funcionamiento del mismo.

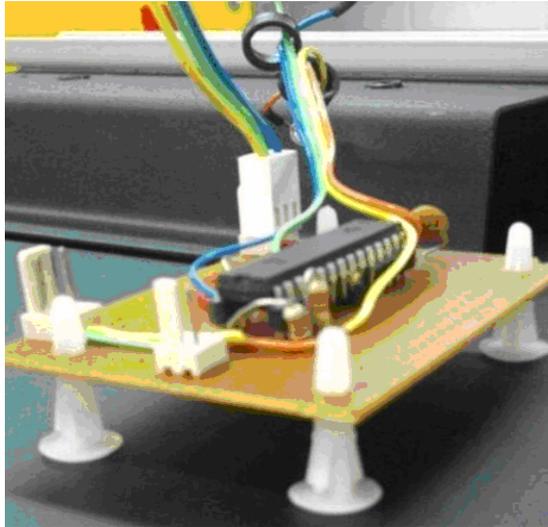
Led piloto del sensor de proximidad.



4. Un procedimiento más de preparación previo al desarrollo de la práctica sería chequear con el multímetro en la escala de voltaje DC y sin excitar el sensor de proximidad (Sin poner material metálico cerca del embolo azul) que el nivel de voltaje entre la bornera de tierra de la caja de control, medición y señalización (Negra) y la bornera roja de la izquierda o Start este alrededor de 5-6 VDC y que entre la bornera de tierra y la bornera roja de Stop este un nivel por debajo de los 2 VDC.



5. Antes de proceder a poner en operación el equipo se debe garantizar que el péndulo ubicado en el eje de oscilación quede centrado en la región entre las bobinas (1,5 centímetros), para evitar que el campo lo trate de acercar con un movimiento brusco hacia alguna de ellas.
6. Revisar previo a la operación del prototipo que el teslámetro se encuentre bien calibrado como se explica en el Anexo 1 y que la sonda axial este bien conectada y posicionada dentro de la región del campo magnético uniforme.
7. Para realizar el mantenimiento de la parte electrónica se recomienda en estado pasivo (Sin conexión de energía) retirar la tapa de la caja de control parcialmente (No la retire en su totalidad, solo que permita acceder al circuito impreso), medición y señalización con cuidado y realizar limpieza al circuito impreso, retirando precavidamente el integrado PIC, limpiar o soplar el mismo y volver a colocar tratando de no doblar alguno de sus pines.



8. Por último realice una limpieza al prototipo después de cada uso. Esta consiste en limpiar de manera sencilla y con un trapo seco los elementos, sin aplicar limpiadores o jabones, ya que estos pueden averiar alguno de los componentes.

Se recomienda realizar estos procedimientos dentro de una rutina de mantenimiento preventivo semestral programado y dejar un *acta o check list* de este procedimiento por parte del ejecutor con el fin de llevar un seguimiento del estado del equipo. Aunque depende de la utilización del equipo, se deja a consideración del usuario realizar estos mantenimientos en periodos de tiempo más cortos para alargar la vida útil del prototipo.

Descripción de algunos procedimientos en caso de falla

9. Para desmontar por algún motivo alguna de las dos bases de bobinas (aunque las bases permiten fácil acceso a las conexiones de energía de las bobinas sin tener que desmontarlas) o la caja de conexión y señalización solo deben quitarse con destornillador de estría o “Estrella” los 4 tornillos de ensamble para madera de $\frac{1}{2}$ ” (Todos los tornillos para sujetar elementos a la placa de madera son de la misma medida) con los cuales se adhiere cada una de estas a la placa de madera. Dentro del kit de mantenimiento entregado se encuentran 24 unidades de repuesto.
10. Las bases independientes que conforman el soporte piramidal del sensor y del eje de movimiento se sujetan a la base metálica mediante un par de tornillos de $\frac{3}{16}$ ” y de rosca ordinaria. Si se requiere retirar estas, solo debe utilizarse un destornillador de punta plana o de “Pala”. Durante el desarrollo del diseño y después de varios montajes de pruebas realizados, se pensó el diseño del prototipo para que estas bases no sean de constante desmonte, y que por el contrario los ajustes necesarios se realicen desde la mordaza de acople ya que esta proporciona movilidad tanto al sensor como al eje de las peinetas. El prototipo

se entrega calibrado para que la peineta se mueva entre las 2 bobinas en la mitad del espacio entre ambas, 1,5 centímetros. Con lo anterior se incluyen estas bases dentro de las estructuras libres de mantenimiento.

11. La mordaza utilizada es de tipo mecánico, de uso habitual en la industria eléctrica para el empalme de cables eléctricos desnudos, normalmente para circuitos de tierra. La mordaza sirve para ajustar el diámetro de sus 2 orificios mediante un tornillo de rosca milimétrica de 10mm, el cual además, individualiza los 2 orificios y ajusta con una tuerca del lado final la amplitud de los orificios. El mantenimiento preventivo de este elemento se aconseja realizarse en periodos semestrales de tiempo, lubricando adecuadamente la rosca del tornillo y verificando el buen funcionamiento de la tuerca de ajuste. Esta mordaza al no estar expuesta a un valor muy alto de presión en sus partes y al no estar en constante desarme, no sufre mucho desgaste en sus partes. Dentro del kit de mantenimiento se encuentra un recipiente de lubricante en aerosol y tornillos milimétricos por si se requiere cambio.
12. Las peinetas diseñadas para cumplir con la función de objeto a frenar, se construyeron en dos tipos de materiales metálicos (Acero galvanizado y Aluminio), libres de corrosión y cortadas con una punsonadora industrial de precisión que garantiza cortes y perforaciones exactas, con diferencias de 0,1 milímetros entre superficies de contacto, de las cuales se dejan los planos con sus debidas medidas. Estas peinetas dependiendo del buen uso que se les de, pueden durar largo tiempo sin requerir cambio. El mantenimiento que se debe realizar a estas peinetas y a la base roscada donde se alojan, implica limpiar y lubricar constantemente con el fin de tender a cero la fricción entre ambas (Perforación de las peinetas y varilla roscada). Se deja dentro del kit de mantenimiento entregado a la universidad una varilla roscada de repuesto con las mismas características.
13. Para el mantenimiento y/o reparación de la parte electrónica de control se muestra en este anexo el esquemático del circuito donde se puede apreciar cada uno de sus componentes y conexiones con el fin de que sea fácil detectar algunos posibles puntos de falla y tener claro procedimientos de descarte.
14. El circuito y el sensor de proximidad están ambos alimentados por el adaptador de corriente. Este adaptador toma una señal de 110 VAC y entrega a la salida un nivel de 6 VDC @ 200mA suficientes para la operación de ambos. Este voltaje se entrega a la tarjeta por medio de un conector zip de dos pines conectado a un bus de doble línea que recibe en un cable rojo la señal de +6VDC y el cable de color negro que es la tierra. El PIC se alimenta por medio de los pines 19 (Tierra) y 20 (+V). Se conectan con resistencias de 220 ohmios @1/4 vatios el led de paso por cero (Azul) entre el pin 2 del PIC y el borne positivo (conexión *pull up*) y el led de paro (Rojo) el pin 21 del PIC y el borne negativo (conexión *pull down*).

15. La conexión del sensor de proximidad se hace por medio de un conector zip de tres pines de donde se conecta el cable negro del sensor (Salida siempre en nivel alto +6VDC) al pin 2 del PIC, el cable café se conecta al borne positivo y el cable azul se conecta al borne negativo.
16. Las borneras de salida de las señales que van hacia el modulo timer del Cobra 3 están conectadas de la siguiente manera:
 - La bornera de *start* está conectada desde el pin 2 del PIC.
 - La bornera de *stop* está conectada desde el pin 21 del PIC.
 - La bornera de tierra esta conectada desde el borne de tierra del circuito.
17. Ya que solo se cuenta con una fuente de energía de ingreso a la parte electrónica, lo primero que debe hacerse en caso de que se presenten problemas con el procedimiento de adquisición de datos de frenado es ir a la caja que aloja el circuito, destaparla con cuidado sin tirar totalmente hasta arriba y desconectar y verificar que el nivel de voltaje sea optimo (6VDC) en el zip doble.
18. Una prueba de descarte del funcionamiento del sensor puede ser energizar el circuito desde el adaptador, ubicar algún material metálico cerca del embolo del sensor y comprobar que el piloto de la parte posterior este mostrando los cambios de estado. En caso de que lo anterior no se cumpla debe realizarse posteriormente el descarte mencionado en el párrafo anterior.
19. Al estar el circuito energizado y el sensor sin tener material metálico cerca del embolo, la bornera de *start* respecto a tierra debe tener un voltaje de aproximadamente 0.8VDC y la bornera de *stop* respecto a tierra debe tener un voltaje de aproximadamente 6VDC. Estas dos señales muestran un cambio inverso de nivel cuando el sensor toma una muestra. Como es de conocimiento común los dispositivos pasivos son de muy alto rendimiento y pocas veces fallan.

En caso de que alguno de los dispositivos electrónicos que conforman el circuito de control, medición y señalización del prototipo llegara a fallar se deben retirar del circuito impreso y cambiarse, no se debe tratar de reparar ninguno de estos dispositivos. En caso de que el microcontrolador fallara se debe comprar uno nuevo y mediante un compilador se uso libre se debe cargar a este el siguiente código elaborado.

```

#include <timer.h>

#int_TIMER1

void TIMER1_isr(void)

{
    output_low(LED1);
}

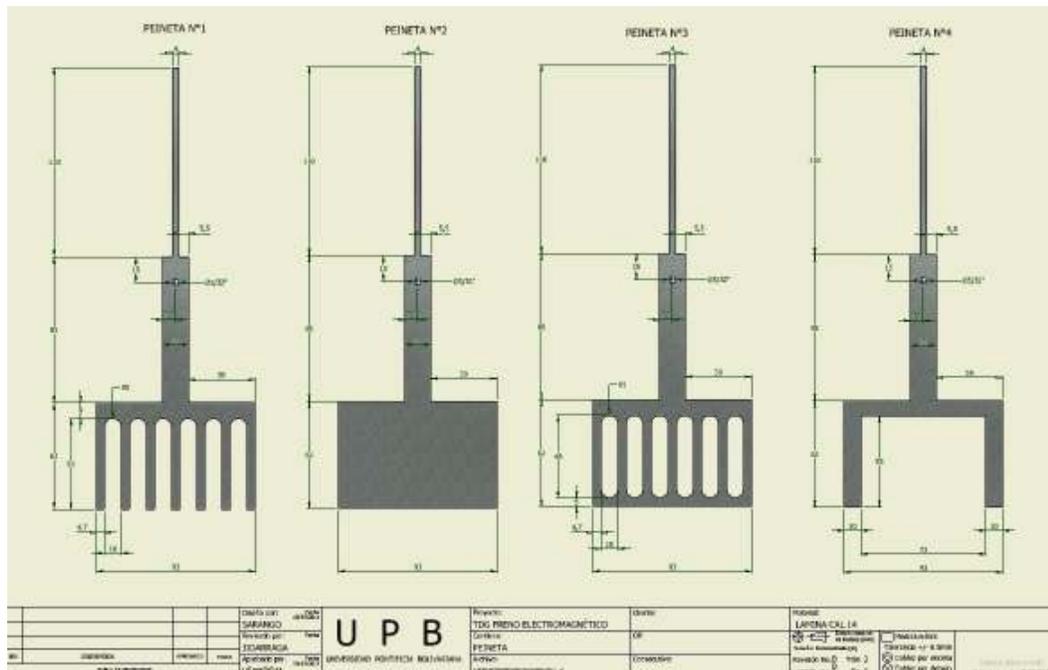
void main()

{
    setup_timer_0(RTCC_INTERNAL|RTCC_DIV_1|RTCC_8_bit);    //256 us overflow
    setup_timer_1(T1_INTERNAL|T1_DIV_BY_8);    //524 ms overflow
    setup_timer_3(T3_DISABLED | T3_DIV_BY_1);
    enable_interrupts(INT_TIMER1);
    enable_interrupts(GLOBAL);
    setup_oscillator(OSC_8MHZ);
    while(TRUE)
    {
        if (input(BOTON1)==1){
            output_low(LED2);
            setup_timer_1(T1_DISABLED);
            set_timer1(1);
            setup_timer_1(T1_INTERNAL|T1_DIV_BY_8);
            delay_ms(100);
        }
    }
}

```

En este anexo se muestran a continuación los planos estructurales, las dimensiones a detalle de las peinetas metálicas y el diagrama circuital del prototipo de freno electromagnético para experimentación.

En plano se dan las medidas de cada una de las cuatro peinillas diseñadas para experimentar el efecto de la fuerza aplicada por el campo magnético.



A continuación se muestra el diseño del prototipo de freno electromagnético para experimentación en una perspectiva 3D, apoyados en herramienta de diseño avanzada *Autocad*.

Prototipo del freno en 3D.

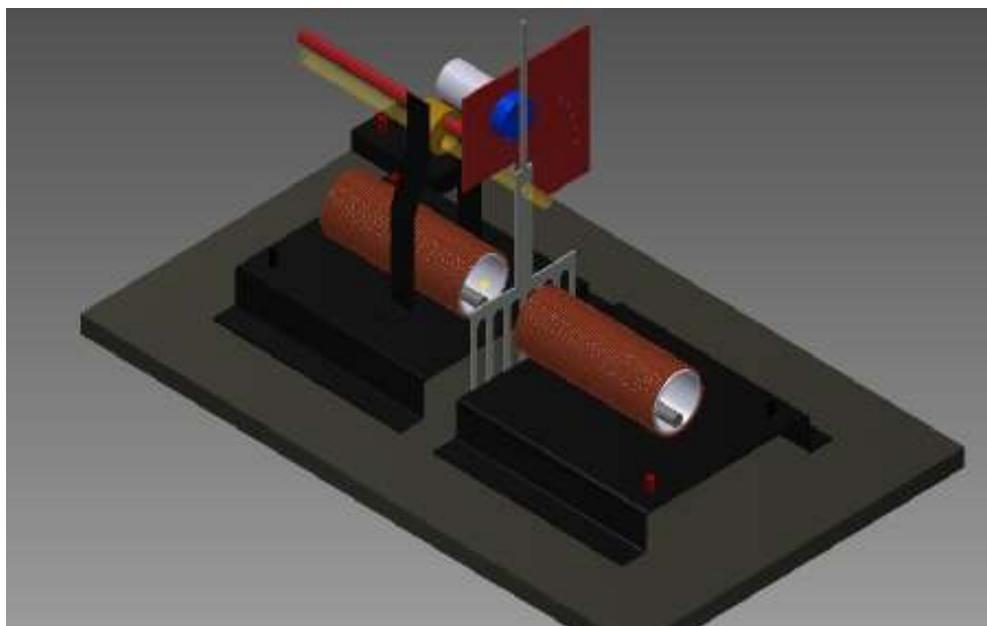
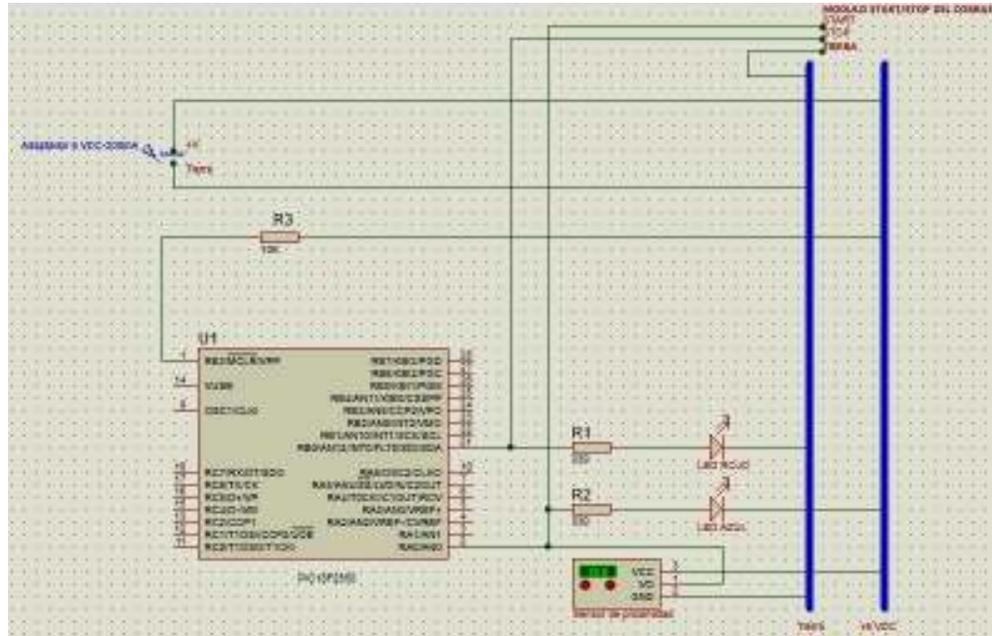


Diagrama circuital



Con la información descrita en esta guía se hace fácil el mantenimiento preventivo del prototipo completo y se muestra como proceder en caso de que algún elemento estructural o circuitual presentará algún problema.

**ANEXO 7.
ANTEPROYECTO**

PROYECTO DE TRABAJO DE GRADO

“FRENO ELECTROMAGNÉTICO: PROTOTIPO PARA EXPERIMENTACIÓN”

Estudiante: Julián Idárraga Vargas **Cédula:** 98'771.810 de Medellín
Teléfono(s): 3665542-3122953608 **Id:** 000019275
E-mail: julianidarrag@gmail.com **Programa:** *Ingeniería Electrónica*

Estudiante: Sebastián Arango Salazar **Cédula:** 8'355.468 de Envigado
Teléfono(s): 2500426-3157252904 **Id:** 000018285
E-mail: usu78@hotmail.com **Programa:** *Ingeniería Electrónica*

Director: Luz Aida Sabogal **Cédula:** 24'589.167 de Quindío
Teléfono(s): 3544522 Ext. 12840 **Id:** 000000912
E-mail: luzaida.sabogal@upb.edu.co **Empresa:** UPB

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
FEBRERO DE 2012
MEDELLÍN**

ANTEPROYECTO DE TRABAJO DE GRADO
“FRENO ELECTROMAGNÉTICO: PROTOTIPO PARA EXPERIMENTACIÓN”

Estudiante: JULIÁN ANDRÉS IDÁRRAGA VARGAS

Identificación: CC# 98'771.810 de Medellín

ID: 000019275

Programa: Ingeniería Electrónica

Teléfono: 3556642-3122953608

Email: julianidarrag@gmail.com

Estudiante: SEBASTIÁN ARANGO SALAZAR

Identificación: CC# 8'355.468 de Envigado

ID: 000018285

Programa: Ingeniería Electrónica

Teléfono: 2500426-3157252904

Email: usu78@hotmail.com

Director: LUZ AIDA SABOGAL TAMAYO

Identificación: CC# 24 589 167 de Quindío

Cargo: Coordinadora Área de Física Centro de Ciencia Básica UPB.

Teléfono: 3544522 Ext. 12840-3155193193

Email: luzaida.sabogal@upb.edu.co

INGENIERIA ELECTRÓNICA
UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
FEBRERO DE 2012

ANTEPROYECTO DE TRABAJO DE GRADO
“FRENO ELECTROMAGNÉTICO: PROTOTIPO PARA EXPERIMENTACIÓN”

Primera revisión

Recibió: _____

Fecha: _____

Lectura y asignación de evaluador en comité #: _____

Fecha: _____

Recomendación: _____

Reprobado: Aplazado: Aprobado:

Comité #: _____ Firma responsable: _____ Fecha: _____

Comentarios:

Segunda revisión

Recibió: _____

Fecha: _____

Lectura y asignación de evaluador en comité #: _____

Fecha: _____

Recomendación: _____

Reprobado: Aplazado: Aprobado:

Comité #: _____ Firma responsable: _____ Fecha: _____

Comentarios:

ANTEPROYECTO DE TRABAJO DE GRADO
“FRENO ELECTROMAGNÉTICO: PROTOTIPO PARA EXPERIMENTACIÓN”

1. INVOLUCRADOS

1.1. ESTUDIANTE: Julián Andrés Idárraga Vargas

Estudiante con la totalidad de cursos aprobados del programa de pregrado de Ingeniería Electrónica en la Universidad Pontificia Bolivariana, sede Medellín con un promedio acumulado de 3.42.

Después de haber realizado su práctica profesional por periodo de un año se encuentra actualmente trabajando en el área de las telecomunicaciones desde hace un año y cuatro meses.

1.2. ESTUDIANTE: Sebastián Arango Salazar

Estudiante con la totalidad de cursos aprobados del programa de pregrado de Ingeniería Electrónica en la Universidad Pontificia Bolivariana, sede Medellín con un promedio acumulado de 3.60.

Después de haber realizado su práctica profesional por periodo de seis meses se encuentra actualmente trabajando en el área de control desde hace tres meses.

1.3. DIRECTORA: Luz Aida Sabogal Tamayo

Profesora de Tiempo completo desde el primer semestre de 1996 hasta el presente de la Universidad Pontificia Bolivariana, sede Medellín. Magíster en Física de la Universidad de Antioquía (1992), Licenciada en Física de la Universidad del Quindío (1985) Con participaciones y logros importantes durante su carrera como Docente e investigadora tales como:

- Docente Distinguido. Universidad Pontificia Bolivariana. Centro de Ciencia Básica (2004).
- Coordinadora Área de Física Centro de Ciencia Básica UPB 2010 (Actualmente).
- Docente Líder Centro de Ciencia Básica desde 2003-2006.
- Coordinadora curso Fundamentos de Electromagnetismo 2002 (Actualmente)

MODALIDAD

El trabajo de grado se clasifica como *Servicio al docente*, según el Reglamento para Trabajos de Grado IEE – UPB, contribuyendo a ampliar, diversificar y mejorar equipos e infraestructura para los procesos de formación experimental en el área de la física del Ingeniero Bolivariano. Este proyecto pretende por un lado, diseñar una nueva aplicación para el sistema de adquisición de datos Cobra 3 y el equipo medidor de campo magnético (Teslámetro), con los que ya cuenta el Laboratorio de Física de la UPB. De otro lado, diseñar y construir un prototipo de freno magnético, para hacer experimentación con las variables involucradas en el fenómeno de inducción electromagnética y específicamente las corrientes parásitas, lo que incluye el diseño y elaboración de una práctica de laboratorio para el área de física del Centro de Ciencia Básica de la UPB.

Tipo		%
Teórico	Búsqueda	15
	Desarrollo	15
Experimental		25
Aplicado	Prototipo	50
Total		100

2. TEMA DEL PROYECTO

El proyecto consiste en la elaboración de un prototipo de freno electromagnético y la guía del mismo, para el laboratorio de física de la Universidad Pontificia Bolivariana que permita ejemplificar una aplicación de “las corrientes de Foucault ó Corrientes parásitas” y disponer en el laboratorio de un equipo para hacer procesos de experimentación con el freno magnético. El fundamento tecnológico

para el proceso de experimentación estará soportado por el sistema de adquisición de datos Cobra 3 y el Teslámetro de marca *Leybold Didactic*, elementos existentes en los laboratorios de la universidad y que se encuentran subutilizados.

Área	%
Microelectrónica	10
Informática	15
Circuitos electrónicos	25
Física	50
Total	100

3. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

Desde épocas antiguas el ser humano ha descubierto una serie de fenómenos electromagnéticos muy interesantes cuya relevancia en algunos de estos descubrimientos científicos no fue apreciada en su propia época.

Los logros, intereses y conocimientos de la humanidad a lo largo de la historia han impulsado el avance tecnológico hacia un futuro mejor. Desde el descubrimiento de la inducción electromagnética en 1831 por Joseph Henry y Michael Faraday y con el posterior estudio del físico Francés del siglo XIX León Foucault, el cual dentro de sus investigaciones descubrió que al hacer pasar un material conductor a través de un campo magnético variable (o viceversa) se inducían unas corrientes, las cuales más tarde se denominarían las “Corrientes de Foucault”, el hombre ha podido aprovechar estas teorías para ponerlas en Pro del desarrollo continuo.

Las “Corrientes de Foucault ó corrientes parásitas” resultan para muchas aplicaciones como “indeseadas” por disipar su energía en forma de calor. Existe una forma muy útil de emplear dicho fenómeno y es a manera de freno. Este fenómeno se emplea para frenar sistemas muy pesados, debido a su gran eficiencia al no tener rozamiento entre partes mecánicas, evitan el desgaste y reducen la necesidad de mantenimiento.

A diario, oímos hablar de trenes que se desplazan a grandes velocidades y poco a poco estas grandes velocidades han sido implementadas también en los autos,

pero pocas veces nos hemos preguntado por el sistema que logra detener estos veloces cuerpos.

Frenos Electromagnéticos

El funcionamiento de los frenos electromagnéticos está basado en el principio de la creación de corrientes que nacen en una masa metálica cuando esta se sitúa en un campo magnético variable. El campo magnético es una perturbación del espacio generada por la presencia de un imán o de cargas eléctricas en movimiento. Se observa experimentalmente que cuando una carga tiene una velocidad v en las proximidades de un imán o de otra carga eléctrica en movimiento, actúa sobre ella una fuerza que es proporcional al valor de la carga Q , al módulo de la velocidad, v , y al módulo de la inducción magnética, B .

El campo magnético no sólo actúa sobre cargas individuales en movimiento, sino sobre otros entes materiales. Cuando la materia es atravesada por el campo magnético, se dice que hay un flujo magnético. Si este flujo magnético es variable, se genera una fuerza electromotriz y una corriente inducida en dicho medio. De la misma manera, corrientes circulantes parásitas se establecen en piezas voluminosas de metal que se mueven a través de un campo magnético. Esto puede demostrarse fácilmente dejando que una placa metálica plana en el extremo de una barra rígida oscile como un péndulo a través de un campo magnético, en éste se generan fuerzas electromotrices inducidas que causan la circulación de corrientes inducidas obteniendo finalmente un efecto de frenado que disminuye el movimiento de la placa (*Freno Electromagnético*).

Este tipo de frenado es usado en trenes suburbanos y autos de tránsito rápidos (*Fisicanet- Apunte de electrodinámica: Electroimán. Tren de levitación magnética MAGLEV*). Un electroimán (solenoides) unido al tren se coloca cerca de los rieles de acero. La acción de frenado ocurre cuando una gran corriente pasa a través del electroimán. El movimiento relativo del imán y los rieles induce corrientes parásitas en estos y la dirección de estas corrientes produce una fuerza de arrastre sobre el vehículo en movimiento. La pérdida de energía mecánica del vehículo se transforma en calor. Puesto que las corrientes parásitas decrecen de forma estable en magnitud a medida que el vehículo frena, el efecto de frenado es bastante suave. Estos frenos de corrientes parásitas también se usan en algunas balanzas mecánicas y en diversas máquinas. Sus características más importantes son su falta de elementos de roce o fricción, sencillez, gran rendimiento, duración y un mínimo mantenimiento realizado en periodos muy largos de tiempo.

Actualmente este sistema de frenado tiene diversas aplicaciones, la mayoría de estas en el sector industrial donde se utilicen motores, alternadores, transformadores, etc., pero llama especialmente la atención el uso que se le da dentro del muy evolucionado sector férreo, en el cual por medio de este fenómeno es posible detener los trenes bala (maglev) que pueden viajar a velocidades superiores a los 500 km/h.

En la actualidad en la industria férrea Antioqueña puede verse este sistema aplicado en el metro de Medellín donde se utiliza el freno electromagnético tanto en el sistema masivo como en el metro cable y en algunas otras industrias se aplica en las balanzas mecánicas industriales.

Como se puede ver, este sistema es de gran aplicación y su estudio está un poco abandonado. Se ha podido apreciar y detectar que a este fenómeno no se le ha dado un espacio práctico con la debida importancia dentro del pensum de ingeniería, ya que en ningún programa de laboratorio de las universidades existe un aparte dedicado a éste, simplemente es mencionado escuetamente dentro de la explicación de otros fenómenos complementarios. Es por esto que nace la necesidad de que se le dedique más tiempo de estudio y análisis dentro de las aulas.

De allí nace la idea de estos dos estudiantes de ingeniería Electrónica para realizar como proyecto de grado una práctica de freno electromagnético en los laboratorios de Física 1 de la Universidad Pontificia Bolivariana donde el estudiante pueda interactuar de manera práctica con las variables físicas que este fenómeno involucra (Campo magnético, distancias, voltajes, corrientes, entre otras) con el fin de que el estudiante experimente, tome datos, varíe parámetros y lo más importante, concluya. Con el fin de enriquecer su desarrollo investigativo dentro de su formación como ingeniero.

Buscando que se profundice el estudio de este tema en los pensum de estudio de las ingenierías y fortalecer la formación experimental en este tema, se realizar como proyecto de grado una práctica de freno electromagnético en los laboratorios de Física de la Universidad Pontificia Bolivariana donde el estudiante pueda interactuar de manera práctica con las variables físicas que este fenómeno involucra (Campo magnético, distancias, voltajes, corrientes, entre otras) para mejorar las comprensiones y posibilitar usos y nuevas aplicaciones.

Desde hace un tiempo se busca agilizar en los procesos de experimentación, la toma de datos y procesamiento de los mismo usando sistemas de adquisición basados en PC. Por tanto, El proyecto se basa en el aprovechamiento de un

sistema de adquisición de datos muy práctico y subutilizado como lo es el *COBRA 3* existente en los laboratorios de Física de la Universidad Pontificia Bolivariana, y como también de la utilización de ser posible del Teslámetro marca *LEYBOLD DIDACTIC* del laboratorio y que en la actualidad se usa para la medición de campos magnéticos pero de forma manual sin aprovecharse la posibilidad que tiene de enviar los datos de manera automática en los laboratorios. Se espera que el acople que se diseñe para estos dos sistemas, y el prototipo de freno, contribuyan a mejorar las comprensiones desde los procesos experimentales sobre el fenómeno de las corrientes parásitas y motive para el estudio de todas las posibles aplicaciones a nivel de industria que ofrece el fenómeno.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo General

Diseñar y construir a partir del uso del sistema de adquisición de datos *Cobra3* y el teslametro marca *Leybold didactic* un prototipo de Freno electromagnético para el laboratorio del área de física de la Universidad Pontificia Bolivariana que permita al estudiante realizar procesos de experimentación con el fenómeno físico de las “Corrientes de Foucault ó corrientes Parásitas” y darle un uso apropiado a estas herramientas adquiridas por la universidad y que en la actualidad se encuentran subutilizadas..

4.2. Objetivos Específicos

- 4.2.1. Realizar un acoplamiento óptimo entre el sistema de adquisición de datos *cobra3* y el medidor de campo magnético (teslametro) para la toma de datos y su análisis del fenómeno de corrientes parásitas ejemplificadas en el freno magnético.
- 4.2.2. Realizar mediante el sistema acoplado *Cobra3-Teslametro* pruebas y ensayos que permitan encontrar relaciones de variables en las corrientes de Foucault.

- 4.2.3. Realizar un modelamiento matemático que permita posteriormente graficar la relación entre las variables involucradas en el fenómeno en estudio.
- 4.2.4. Diseñar y construir un prototipo de experimento de “freno electromagnético” que forme en conjunto con el sistema acoplado mencionado un buen equipo experimental para el laboratorio de Fundamentos de Electromagnetismo del área de física de la Universidad Pontificia Bolivariana.
- 4.2.5. Hacer una guía de laboratorio,, como un ejemplo para que el estudiante realice un el proceso de experimentación con el freno magnético.
- 4.2.6. Redactar un informe final de manera que este pueda ser utilizado a futuro para consultas, revisiones o estudios.

5. PRODUCTOS ESPERADOS

- 5.1.1. Informe con los aspectos generales del proyecto para ser publicado.
- 5.1.2 Copia para la Biblioteca Central Universidad Pontificia Bolivariana en medio magnético y papel.
- 5.1.3 Diseño prototipo de “freno electromagnético” para el laboratorio de Fundamentos de Electromagnetismo del área de física Centro de Ciencia Básica de la Universidad Pontificia Bolivariana.
- 5.1.4 Guía de laboratorio para el experimento “freno electromagnético”.

6 ALCANCE

Se pretende realizar el diseño e implementación de un prototipo de experimento de laboratorio llamado “freno electromagnético” que sirva como apoyo al área de física de la UPB, que sirva no sólo como un elemento didáctico para el curso de Fundamentos de Electricidad y Magnetismo, sino como infraestructura experimental para que los interesados en el tema, experimenten con él para mejorar sus procesos de comprensión del fenómeno y potencien nuevos estudios,, investigaciones y aplicaciones de las corrientes parásitas.,

7 TABLA DE CONTENIDO PRELIMINAR

0. **PRELIMINARES: Glosario, resumen**

1. **INTRODUCCIÓN.**

2. **CAPITULO 1: Fundamentación teórica**

1.1 Las Corrientes parásitas

En este capítulo se hará una breve introducción acerca todos los aspectos teóricos que servirán de apoyo a la hora de experimentar con el “freno electromagnético”.

1.2 Freno electromagnético

En este capítulo se hará una breve explicación acerca de cómo funciona este fenómeno.

3. **CAPITULO 2: Prototipo Experimental**

En este capítulo se describirá detalladamente todo lo relacionado con el funcionamiento y diseño del prototipo físico que servirá para la experimentación dentro del laboratorio.

2.1 Prototipo del freno

2.2 sistema de adquisición de datos

2.3 resultados de las pruebas y ensayos

4. **CAPITULO 3: Kit para la experimentación con el freno magnético**

3.1 Guía de laboratorio

3.2 Guía de mantenimiento y/o reparación del sistema de experimentación: el freno magnético

5. 4. CONCLUSIONES

6. 5 BIBLIOGRAFIA

7. 6. ANEXOS

8 RECURSOS, MATERIALES Y PRESUPUESTOS.

GRAN TOTAL		14620				
RECURSO	Participación (miles de pesos)				Implica Desembolso	
	Estudiante	UPB	Externo	Donación	Si (Nuevo)	No (Existente)
Bibliografía			100			X
Papelería, Fotocopias, Tinta	300				X	
Telecomunicaciones	200					X
Equipos		4500				X
Prototipo	2000				X	
Transporte	100				X	
Trabajo Estudiantes	2500					X
Trabajo Director				4000		X
Subtotal	5100		100	4000		
<i>Imprevistos (10%)</i>	510		10	400		
Total	5610	4500	110	4400		

9 FINANCIACIÓN

Los insumos necesarios para el diseño del proyecto serán financiados en un 100% por los estudiantes involucrados en el proyecto. La Universidad Pontificia Bolivariana facilitará todo lo concerniente a equipos de adquisición de datos, medición y programas utilizados en el desarrollo del proyecto (cómputo y bibliografía).

10 CRONOGRAMA Y OCUPACIÓN.

Actividad	Ene-12	Feb-12	Mar-12	Abr-12	May-12	Jun-12	Total
							(horas)
Búsqueda de información y bibliografía	X	X					60
Estudio y análisis del sistema COBRA3 y teslametro	X	X	X				80
Revisión de los equipos cobra 3 y teslametro	X						30
Elaboración anteproyecto	X	X					50
Organización preliminar de información.		X	X				50
Acoplamiento del cobra3 y el teslametro		X	X				60
pruebas y ensayos para encontrar relaciones de variables			X	X			60
Modelamiento Matemático de relaciones				X			40
Consecución de materiales			X	X	X		60
Elaboración del prototipo físico			X	X	X		80

Adaptación prototipo - sistema de adquisición de datos.				X	X	X	X	60
Elaboración de la guía de laboratorio					X	X	X	60
Pruebas Iniciales					X	X		60
Pruebas finales						X	X	60
Elaboración del informe final					X	X		60
Entrega del prototipo y del informe							X	70
Revisión por parte del director							X	50
Revisión por parte de los jurados								---
Sustentación								1
Total Proyecto								991
Número de Estudiantes								2
Total por estudiante								495,5

11. BIBLIOGRAFIA PRELIMINAR

11.1 Ambardar, A., (2003). *Procesamiento de Señales Analógicas y Digitales (2da Ed.)*. Thomson Paraninfo.

11.2 Manuel, A., Olive, J. y Solesanchez, B. (2001). *Instrumentación virtual - Adquisición, procesado y análisis de señales*. Edicions UPC.

11.3 Serway, Raymond A. (2001). *FISICA para ciencias e ingeniería Tomo II- Corrientes parasitas*. Mc Graw Hill.

- 11.4 Gómez, F., Guerra, D., Restrepo, C., (2007). *Diseño e implementación de practicas con el cobra 3 para el laboratorio de física del centro de ciencia básica*. UPB.
- 11.5 Gómez, F., Guerra, D., Restrepo, C., (2007). *Anexo C: Manual equipos de laboratorio Cobra 3 y software measure*. UPB.
- 11.6 LEYBOLD DIDACTIC. *Instrucciones de servicio*. Enero de 2012
<http://www.lddidactic.de/ga/5/516/51662/51662FS.PDF>
- 11.7 *Freno Electromagnético, diseño y funcionamiento*. Enero de 2012
<http://www.youtube.com/watch?v=c6JJMLdsAmo>
- 11.8 *Freno Electromagnético, diseño y funcionamiento*. Enero de 2012
<http://cmagnetico.blogspot.com/2009/06/funcionamiento-delfreno.html>

ACTA DE PROPIEDAD INTELECTUAL TRABAJOS DE GRADO

1. NOMBRE DEL PROYECTO

“FRENO ELECTROMAGNÉTICO: PROTOTIPO PARA EXPERIMENTACIÓN”

2. PARTICIPANTES

2.1. ESTUDIANTE

Nombre: Julián Andrés Idárraga Vargas

CC#: 98'771.810 de Medellín

Horas dedicadas al proyecto: 495

Programa: Ingeniería Electrónica

2.2. ESTUDIANTE

Nombre: Sebastián Arango Salazar

CC#: 8'355.468 de Envigado

Horas dedicadas al proyecto: 495

Programa: Ingeniería Electrónica

2.3. DIRECTOR

Nombre: Luz Aida Sabogal Tamayo.

CC#: 24'589.167 de Quindío

Empresa: Universidad Pontificia Bolivariana.

Cargo: Coordinadora Área de Física Centro de Ciencia Básica

1. Los derechos morales de autor corresponden a la Universidad Pontificia Bolivariana UPB además toda persona, que a criterio de éste, haga aportes originales intelectuales en los avances y en el resultado final del proyecto. Al director le asiste el derecho de mención.

El director y los graduandos serán autores y coautor de todas las publicaciones nacionales e internacionales que genere el proyecto. Estos a su vez determinarán cual de los colaboradores deben ser mencionados según sus aportes en el proyecto. Adicionalmente en cualquier tipo de divulgación que se haga del trabajo se dará crédito a La Universidad Pontificia Bolivariana y a su programa de Ingeniería Electrónica.

2. Derechos patrimoniales:

Los derechos patrimoniales del proyecto *“FRENO ELECTROMAGNÉTICO: PROTOTIPO PARA EXPERIMENTACIÓN”* pertenecen a la empresa Universidad Pontificia Bolivariana UPB.

Antes de iniciar cualquier explotación comercial de la publicación se deberá suscribir un acuerdo entre las partes, a saber: Universidad Pontificia Bolivariana y autores del proyecto, en el cual se determinan los derechos y obligaciones de las partes.

3. Causales de retiro:

El retiro podrá ser voluntario o ser motivado por el incumplimiento de las obligaciones de una de las partes, a criterio del director.

4. Costos:

El costo estimado total del proyecto *“FRENO ELECTROMAGNÉTICO: PROTOTIPO PARA EXPERIMENTACIÓN”* será cubierto en su totalidad por de los estudiantes en mención.

5. Constancias:

Todos los partícipes han estudiado y aceptan el “Estatuto de propiedad intelectual” de la Universidad Pontificia Bolivariana, el reglamento de elaboración de trabajos de grado IEE y el proyecto del trabajo de grado; y se comprometen a cumplir los deberes que estipulan en estos.

JULIAN ANDRES IDARRAGA VARGAS

CC#: 98'771.810 de Medellín

Graduando

LUZ AIDA SABOGAL TAMAYO

CC#: 24'589.167 de Quindío

Director del proyecto

SEBASTIAN ARANGO SALAZAR

CC#: 8'355.468 de Envigado

Graduando

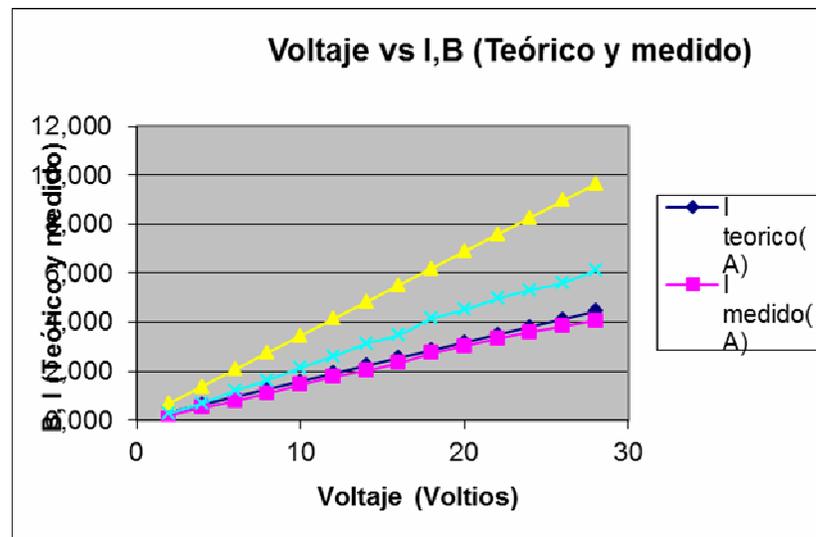
ANEXO 8. TABLAS DE RESULTADOS DE PRUEBAS

Pruebas con las bobinas de Helmholtz

Voltaje(V)	I teorico(A)	I medido(A)	R TOTAL(Ω)	Rint fuente(Ω)	Rint bobinas(Ω)	Rint total(Ω)	β (mT)Teorico	β (mT)medido
2	0,317	0,20	6,3	0,4	3,9	4,3	0,6888889	0,28
4	0,63492	0,5	6,3	0,4	3,9	4,3	1,3777778	0,69
6	0,95238	0,78	6,3	0,4	3,9	4,3	2,0666667	1,2
8	1,270	1,09	6,3	0,4	3,9	4,3	2,7555556	1,63
10	1,587	1,44	6,3	0,4	3,9	4,3	3,4444444	2,14
12	1,90476	1,77	6,3	0,4	3,9	4,3	4,1333333	2,6
14	2,22222	2,02	6,3	0,4	3,9	4,3	4,8222222	3,12
16	2,53968	2,33	6,3	0,4	3,9	4,3	5,5111111	3,48
18	2,85714	2,73	6,3	0,4	3,9	4,3	6,2000000	4,14
20	3,1746	3,03	6,3	0,4	3,9	4,3	6,8888889	4,5
22	3,49206	3,33	6,3	0,4	3,9	4,3	7,5777778	4,96
24	3,80952	3,6	6,3	0,4	3,9	4,3	8,2666667	5,31
26	4,12698	3,82	6,3	0,4	3,9	4,3	8,9555556	5,61
28	4,44444	4,07	6,3	0,4	3,9	4,3	9,6444444	6,12

Ecuación

$$B=0,15V-0,10$$



Pruebas iniciales realizadas con las bobinas del laboratorio de ingeniería y con la conexión al sistema de adquisición de datos.

Distancia entre bobinas 2.7cms
Paleta Galvanizada completa calibre 14

Corriente (A)	Tiempo (seg) Cronometro	Campo (B) (Desfase para la prueba = 0,8mT)	Tiempo (seg) Cobra3
0	11,9	0	11,94
0.2	13,6	4,6	12,5
0.4	6,9	8,81	6,998
0.6	4,5	13,18	4,688
0.8	3	17,39	3,314
1	2,1	21,6	2,595
1.2	1,7	26	2,184
1.4	1,3	29,8	0
1.6	1	33,6	0

Corriente (A)	Tiempo (seg) Cronometro	Campo (B) (Desfase para la prueba = 0,68mT)	Tiempo (seg) Cobra3
0	12	0.68	11.45
0.2	10.6	4.1	9.987
0.4	10.8	7.72	9.918
0.6	7.2	10.64	7.090
0.8	5.9	14.30	6.370
1	4	17.9	4.3
1.2	2.5	20	3.2
1.4	1.6	24.3	2.5
1.6	0.5	28.5	1.2

Pruebas iniciales realizadas con las bobinas diseñadas y con la conexión al sistema de adquisición de datos.

Exp con peinilla completa sin agujeros centrales. Dist 2.7 cms.				
Corriente (A)	Tiempo (seg) Cronometro	Campo (B)	Tiempo (seg) Cobra3	
0	26,4	0	22,24	1.4 segs delay. Sin núcleos
0	23,5	0,21	22,251	
0.2	17,6	1,36	16,415	
0.4	11	2,46	9,853	
0.6	6,8	3,61	6,81	
0.8	4,3	4,84	4,587	
1	3,4	5,87	3,798	
1.2	3,2	7,07	3,383	
1.4	1,9	8,2	2,38	
1.6	2	9,3	2,49	

Exp con peinilla con agujeros oblongos centrales. Dist 2.7 cms.				
Corriente (A)	Tiempo (seg) Cronometro	Campo (B)	Tiempo (seg) Cobra3	
0	8,9	0,08	7,126	1.4 segs delay. Sin núcleos
0	9,3	0,35	7,895	
0.2	6,2	1,62	5,544	
0.4	5,1	2,46	4,7	
0.6	3,9	3,53	3,58	
0.8	2,9	4,66	3,118	
1	2,4	5,55	2,679	
1.2	2	6,64	2,286	
1.4	1,8	7,81	2,229	
1.6	1,6	8,86	1,888	

Exp con peinilla con 6 ranuras hasta abajo. Dist 2.7 cms.				
Corriente (A)	Tiempo (seg) Cronometro	Campo (B)	Tiempo (seg) Cobra3	
0	15,8	0,08	14,133	1.67 segs delay. Sin núcleos
0	16,5	0,35	14,119	
0.2	8,4	1,31	7,631	
0.4	4,7	2,24	4,508	
0.6	2,9	3,33	2,933	
0.8	2	4,3	2,173	
1	1,5	5,32	1,894	
1.2	1,4	6,33	1,71	
1.4	1,2	7,34	1,7	
1.6	1	8,36	1,56	

Exp con peinilla con solo 2 ranuras al extremo. Dist 2.7 cms.				
Corriente (A)	Tiempo (seg) Cronometro	Campo (B)	Tiempo (seg) Cobra3	
0	7,4	0	7,377	0,145 segs delay. Sin núcleos
0	7,7	0,12	7,555	
0.2	6,4	1,05	6,036	Ensayo con núcleos
0.4	4,3	1,98	4,663	
0.6	2,9	3,1	3,185	
0.8	2,3	3,96	2,7	
1	2,4	5,16	2,9	
1,2				
1,4				

Con este experimento se logró ver que el campo trata de alojarse en uno de los 2 extremos del material.

Se continúa el proceso de pruebas con algunos procedimientos que se proponen dentro de la práctica de laboratorio, como el siguiente:

Experimento con ángulo fijo de 90° y campo fijo de 4mT, corriente fija de 0,7 A				
Corriente (A)	Tiempo (seg) Cronometro	Campo (B) Mt	Tiempo (seg) Cobra3	Tipo de peinilla
0,7	6	4	6,005	Completa, sin agujeros centrales
0,7	11,9	4	10,195	Con 6 agujeros oblongos centrales
0,7	2	4	2,137	Con 6 agujeros oblongos sin terminación
0,7	2,2	4	2,68	Con 1 superficie a cada extremo

Se realizan los experimentos con el prototipo final y los péndulos construidos en acero galvanizado y aluminio.

MATERIAL: ACERO GALVANIZADO. CON MONTAJE ACTUALIZADO

Exp con peinilla completa sin agujeros centrales. Dist 2.7 cms.				
Corriente (A)	Tiempo (seg) Cronometro	Campo (B)	Tiempo (seg) Cobra3	
0	31,8	0,02	28,937	1.4 seg delay. Sin núcleos
0	30,9	0,3	29,463	
0.2	24,1	1,8	22,89	Ensayo con núcleos
0.4	13,4	3	11,264	
0.6	11,6	4,3	10,517	
0.8	8,2	5,5	7,987	

1	6,7	6,86	6,54
1.2	4,7	8,3	5,016
1.4	3,9	9,58	4,289
1.6	3,1	10,85	3,389

Exp con peinilla con agujeros oblongos centrales. Dist 2.7 cms.				
Corriente (A)	Tiempo (seg) Cronometro	Campo (B)	Tiempo (seg) Cobra3	
0	12,5	0,07	11,32	1.4 seg delay, Sin núcleos
0	12,3	0,15	11,294	Ensayo con núcleos
0.2	12,8	1,67	12,802	
0.4	9,2	3,5	8,345	
0.6	5,7	5,39	5,489	
0.8	3,9	7,3	3,923	
1	3,2	9,07	3,509	
1.2	2,8	11	2,866	
1.4	2,2	12,62	2,607	
1.6	1,8	14,4	2,222	

Exp con peinilla con 6 ranuras hasta abajo. Dist 2.7 cms.				
Corriente (A)	Tiempo (seg) Cronometro	Campo (B)	Tiempo (seg) Cobra3	
0	9,1	0,03	8,623	1.67 segs delay. Sin núcleos
0	14,7	0,37	13,63	Ensayo con núcleos
0.2	9,9	1,72	9,046	
0.4	6,3	3,25	5,943	
0.6	5	4,57	4,713	
0.8	3,6	6,11	3,68	
1	3	7,63	3,144	
1.2	2,3	9,02	2,677	
1.4	2,1	10,57	2,56	
1.6	2,2	11,86	2,49	

Exp con peinilla con solo 2 ranuras al extremo. Dist 2.7 cms.				
Corriente (A)	Tiempo (seg) Cronometro	Campo (B)	Tiempo (seg) Cobra3	
0	9,3	0,05	8,727	0,145 seg delay. Sin núcleos
0	9,1	0,37	9,167	Ensayo con núcleos
0.2	7,6	1,8	7,574	
0.4	6	3,31	5,417	
0.6		4,84		

En el experimento con la peinilla con solo dos ranuras, una en cada extremo y sometida a un campo mayor de 4 mili teslas se logra ver que la peineta se frena quedando el posición diagonal y fuera del área de cobertura del sensor, lo cual impide tomar más medidas. La peineta no alcanza a realizar medio periodo cuando ya es frenada, no permite observar lentamente el fenómeno.

Con los péndulos de aluminio puede apreciarse que el campo magnético, aun en valores altos no logra frenar el péndulo. Con este material se realizaron las siguientes pruebas en varios laboratorios.

MATERIAL: ALUMINIO. CON MONTAJE ACTUALIZADO

Exp con peinilla completa sin agujeros centrales. Dist 2.7 cms.				
Corriente (A)	Tiempo (seg) Cronometro	Campo (B)	Tiempo (seg) Cobra3	
0	31,7	0,03	32,102	1.4 segs delay. Sin núcleos
0	31	0,23	31,233	Ensayo con núcleos
0.2	30,2	2,54	30,125	
0.4	30,1	4,4	32	

Exp con peinilla con agujeros oblongos centrales. Dist 2.7 cms.				
Corriente (A)	Tiempo (seg) Cronometro	Campo (B)	Tiempo (seg) Cobra3	
0				1.4 segs delay. Sin núcleos
0	31	0,48	32,089	Ensayo con núcleos
0.2	32,2	0,49	32,567	

Exp con peinilla con 6 ranuras hasta abajo. Dist 2.7 cms.				
Corriente (A)	Tiempo (seg) Cronometro	Campo (B)	Tiempo (seg) Cobra3	
0				1.67 segs delay. Sin núcleos
0	32,12	0,47	31,789	Ensayo con núcleos
0.2	32,24	0.5	33	

Exp con peinilla con solo 2 ranuras al extremo. Dist 2.7 cms.				
Corriente (A)	Tiempo (seg) Cronometro	Campo (B)	Tiempo (seg) Cobra3	
0	9,3	0,05	8,727	0,145 segs delay. Sin núcleos
0	9,1	0,37	9,167	Ensayo con núcleos
0.2	7,6	1,8	7,574	
0.4	6	3,31	5,417	