

Candidate Marks Report

Series : M18 2018

This candidate's script has been assessed using On-Screen Marking. The marks are therefore not shown on the script itself, but are summarised in the table below.

Centre No :	Assessment Code :	PHYSICS EE EXTENDED ESSAY in SPANISH
Candidate No :	Component Code :	EE(SPA)TZ0
Candidate Name :		

In the table below 'Total Mark' records the mark scored by this candidate.
'Max Mark' records the Maximum Mark available for the question.

Examiner:	
Paper:	M18physiEEES0XXXX
Paper Total:	29 / 34
Question	Total / Max Mark Mark
Criterion A	5 / 6
Criterion B	5 / 6
Criterion C	10 / 12
Criterion D	3 / 4
Criterion E	6 / 6

Coursework confirmation

Yes

Hours supervisor spent with candidate

3

Declaration

Yes

Confirmo que soy el autor de este trabajo y que es la versión final. He citado debidamente las palabras o ideas de otras personas, ya se hayan expresado estas de forma escrita, oral o visual.

Levitación de un Conductor Mediante un Campo Magnético Oscilante: ¿Cuál es la relación entre la fuerza en un conductor generada por un campo magnético oscilante y la distancia entre la fuente del campo y el conductor?



Física

Total de palabras: 3,565



Índice

i. Introducción	3
1. Marco Teórico	5
1.1 Campo Magnético de un Solenoide.....	6
1.2 FEM Inducida en un Anillo.....	8
1.3 Fuerza de Lorentz para Anillo.....	9
2. Experimentación	10
2.1. Diseño Experimental	10
2.2. Construcción del Solenoide.....	12
2.3. Captura de FEM y Fuerza a Diferentes Alturas	14
3. Análisis de datos obtenidos.....	15
3.1. Propuesta de modelo inversamente proporcional.....	15
3.2. Linealización del modelo propuesto.....	16
3.3. Evaluación cuantitativa de ecuación obtenida.....	18
4. Conclusiones.....	19
Referencias	21



Abstract**CiD**


debe estar en español


Se investigaron distintos fenómenos electromagnéticos usando un solenoide para levitar un anillo conductor. La pregunta que guió la investigación fue: ¿Cuál es la relación entre la fuerza en un conductor generada por un campo magnético oscilante y la distancia entre la fuente del campo y el conductor? La investigación se basó en un experimento propuesto en la Olimpiada Asiática de física 2011. Trabajos previos con arreglos similares investigaron principalmente la fundición de materiales conductores, por lo que se analizará el aspecto de levitación en este experimento. Se construyó el solenoide con un núcleo de alambre recocido, enrollado con alambre de cobre magneto. Se conectó el arreglo a una fuente de voltaje de corriente alterna de 110V, y se midió la fuerza que atraía a un anillo de alambre recocido a distintas distancias midiendo el peso del anillo antes de encender la fuente y después de encenderla. Con un análisis estadístico de los datos, se obtuvo una relación cuadrática inversa, es decir, se encontró que la fuerza entre el solenoide y el anillo es proporcional al inverso del cuadrado de la separación entre ellos. Esto implica una mayor fuerza se presenta a menores distancias.



Palabras: 193

i. Introducción

Los medios de transporte actuales presentan limitantes para las velocidades máximas posibles, una de éstas es la fricción causada por el contacto existente en las diferentes partes de los vehículos y las vías. Un método para reducir este efecto es el uso de objetos metálicos que puedan levitar, reduciendo la fricción de contacto con el suelo. Se planea investigar el fenómeno de levitación utilizando un material conductor de electricidad y un campo magnético oscilante generado por una corriente eléctrica variable en un solenoide.

El solenoide está formado por un alambre de cobre enrollado en forma de bobina, en el cual se deja pasar corriente. Si la corriente cambia con el tiempo, es decir, si se conecta a una fuente de corriente alterna, puede generarse un campo magnético.  campo magnético induce una corriente en el material conductor, conocida como corriente de Eddy, que a su vez genera una fuerza al interactuar con el campo magnético del solenoide.

Al encontrar la relación entre la fuerza y la distancia que se separa el conductor del solenoide, se busca encontrar las posibles fuentes de errores y sus posibles aplicaciones en área de la tecnología, específicamente relacionadas con la eficiencia de los vehículos. Esto llevó a la pregunta de investigación: ***¿Cuál es la relación entre la fuerza en un conductor generada por un campo magnético oscilante y la distancia entre la fuente del campo y el conductor?*** 

La investigación se centra en el caso simple en el que se mide la fuerza generada a diferentes alturas, medida entre el conductor y la parte más baja del solenoide. El material experimental fue relativamente sencillo de conseguir; lo difícil fue encontrar un transformador de corriente alterna,  por lo que se utilizó la corriente de un enchufe simple de hogar. 

Se tomarán medidas de la fuerza a diferentes alturas, posteriormente se encontrará la ecuación que las relacione, y utilizando la teoría se busca encontrar la autoinductancia del material conductor que se desea levitar.

Es necesario investigar este caso en particular ya que abarca diferentes fenómenos que juntos hacen levitar a un conductor; uno de ellos es la fuerza electromagnética, utilizada en los motores eléctricos con aplicaciones que van desde los ventiladores hasta en automóviles eléctricos; y otro fenómeno presente es la inducción electromagnética que toma lugar en

una corriente eléctrica directa genera un campo magnético constante

diferentes circuitos de aparatos eléctricos. Me llamó la atención el estudio de este fenómeno debido a sus aplicaciones en los vehículos que levitan, de tal manera que se reduzca la energía consumida en la transportación.

El objetivo de esta investigación es encontrar la ecuación que describe el comportamiento de la fuerza con respecto a la altura con su incertidumbre, por lo que se hará un análisis de datos estadístico y una demostración teórica para encontrar la respuesta a la pregunta de investigación. Otro de los límites es que no se puede hacer un experimento de este tipo para todos los materiales conductores; a pesar de esto, es relevante estudiarla debido al proceso que permitiría conocer la relación ya mencionada para cualquier conductor.

¿conoce el alumno que la teoría la expresa sencillamente?

1. Marco Teórico

La investigación se realiza debido a la importancia de los medios de transporte en el desarrollo del mundo, interconectando las diferentes sociedades y disminuyendo los costos de trayectos largos. Esta idea surgió a partir del experimento realizado en la Olimpiada Asiática de Física en el año 2011, llevada a cabo en Israel.

Por la naturaleza electromagnética del experimento, se decidió utilizar como fuentes el libro “Introducción a electrodinámica”, por el autor Griffiths, escrito para un curso universitario de física avanzada; dos investigaciones llevadas a cabo por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, “Eddy current magnetic levitation” de Thompson, M. (2000) y “Eddy-currents levitation system” de Rabinovici (2012); también se escogió la investigación “Dimensionless Analysis and Mathematical Modeling of Electromagnetic Levitation (EML) of Metals” de Gao, L. (2014); y por último “Electromagnetic Levitation of a Disc” Valle, R. (2012).

Otras dos fuentes relevantes son “New Technology for Electromagnetic Levitation Melting of Metals” de Spitans, S. (2014), que muestra un análisis numérico y experimental de la fundición de metales por medio de corrientes inducidas y “Un Nuevo Modelo Basado en Funciones Exponenciales para un Sistema de Levitación Magnética Uniaxial” de Martínez, J. (2013), que consiste en dos bobinas y dos imanes permanentes que levitan sobre un mismo eje, creando un sistema de suspensión magnética, similar a la levitación electromagnética.

1.1 Campo Magnético de un Solenoide

En la investigación realizada por Thompson, M., “Eddy current magnetic levitation” (2000), se buscó hacer levitar a un solenoide sobre una gran placa metálica. Thompson menciona que para analizar la estructura de levitación se utiliza la forma cuasi estática de las ecuaciones de Maxwell. Una corriente en movimiento genera un campo magnético, esto sale de la ley de Ampère; esta ley demuestra que el campo magnético cambia tanto en el plano axial como en el radial. ✓

Según Thompson, a partir de la ley de Faraday se deduce que con el campo magnético cambiante, se induce una corriente en la placa conductora inferior. El cambio en el flujo magnético crea corrientes circulares, llamadas corrientes de Eddy; en el caso del anillo conductor y un solenoide, las corrientes se generarían en el anillo. El campo magnético no pasa a través de la placa debido a las grandes corrientes inducidas sobre la misma. Las corrientes pueden calentar la placa o pueden generar una fuerza repulsiva sobre el solenoide.

Según Griffiths, las ecuaciones de Maxwell, específicamente la ley de Ampère, (1) sirven para encontrar el campo magnético dentro de un solenoide. La ley dice que la integral cerrada del campo magnético por el producto punto de un diferencial de longitud es igual a la permeabilidad del espacio libre por la corriente encerrada.

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I_{enc} \quad (1)$$

Para calcular el campo magnético en el caso de un solenoide con densidad de vueltas por unidad de longitud es “n”, la ecuación se aplica considerando el camino encerrado como un rectángulo (figura 1). El campo en el exterior es 0, mientras que en el interior es B. A partir de (1) se obtiene que el campo se puede calcular como (2).

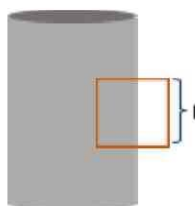


Figura 1. Donde l es la longitud del cable paralela al solenoide y B es el campo magnético en el centro del mismo.

$$B(I) = \mu_o knI(t) \quad (2)$$

Se puede encontrar la longitud característica sobre la cual decae el campo en función de la frecuencia de oscilación, ω , la permeabilidad magnética y la conductividad de la placa, según Thompson. Si se pone a oscilar a la espira, ésta presentaría una oscilación amortiguada. Utilizando el método de la energía, se puede conocer la fuerza utilizando el cambio en la inductancia. Entre más grande es el material experimental, más eficiente se vuelve en la conversión de la energía. Un arreglo más pequeño podría consumir mucha energía y calentar la placa antes de que haya levitación.

“Eddy-Current Levitation System” es una investigación llevada a cabo por Rabinovici, Berdichevsky y Shvartsas, de la “Ben-Gurion University of the Negev Beer Sheba, Israel” (2012). Consiste en encontrar el punto de equilibrio de levitación del metal, aumentando la eficiencia del proceso de fundición de metales por medio de inducción de corrientes de Eddy. La fundición sucede debido al efecto Joule, que hace que se pierda energía en forma de calor debido a la resistencia del metal conductor y las corrientes inducidas, en un determinado tiempo. El efecto surge a partir de la potencia que se transforma en calor al ambiente (3), dependiendo de la diferencia de potencial y la corriente en el material; debido a este aumento de temperatura, para el experimento se realizaron las medidas en un tiempo corto para evitar un sobrecalentamiento de los componentes y un posible cambio de las propiedades electromagnéticas del anillo a levitar.

$$P(t) = U(t)I(t) \quad (2)$$



Una investigación relevante es “Dimensionless Analysis and Mathematical Modeling of Electromagnetic Levitation (EML) of Metals”, por Gao, L (2015). El enfoque de esta investigación fue la búsqueda de un proceso que permita fundir metales, con el uso de un análisis sin unidades. Posteriormente las ecuaciones generales fueron probadas con diferentes experimentos y se evaluaron con modelaciones numéricas. Se utilizó el método de Gao en esta investigación, primero encontrando la solución de manera analítica y evaluando esto con los resultados de la modelación experimental.

Como la corriente en el solenoide no es constante, se aproxima el campo magnético en el centro del solenoide a través de una función de seno (4), debido a que la corriente es alterna.

$$B(t) = \mu_o k n I_o \sin(\omega t) \quad (4)$$

Con base en un problema propuesto por Griffiths, se sabe que en el experimento el campo magnético se medirá fuera del solenoide; se puede realizar una integral en función de la densidad de vueltas por unidad de longitud, n , y los ángulos cercano y lejano, θ_1 y θ_2 , como se muestra en la figura 2; se basará en el campo magnético producido por un diferencial de anillo con una corriente I , longitud dz y la ley de Biot-Savart. Se soluciona con una sustitución trigonométrica, llegando a una relación entre el campo, la corriente y las dimensiones del solenoide (5), que en términos de la distancia x entre el solenoide y el aro es (6).

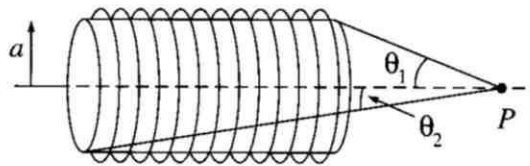


Figura 2. Donde a es el radio del solenoide y P es el punto donde se medirá el campo magnético.

Griffiths, 1989

$$B = \frac{\mu_o n I}{2} \int_x^{x+l} \frac{a^2 dz}{(a^2 + z^2)^{3/2}} = \frac{\mu_o n I}{2} (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) \quad (5)$$

$$B = \frac{\mu_o n I}{2} \left(\frac{z+l}{\sqrt{a^2 + l^2}} - \frac{z}{\sqrt{a^2 + z^2}} \right) \quad (6)$$

?

1.2 FEM Inducida en el Anillo

Según la ley de inducción de Faraday, la Fuerza Electromotriz inducida es (7), donde Φ_B es el flujo magnético en un anillo (8)

$$\varepsilon(t) = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (7)$$

$$\Phi_B(t) = \Phi_{Bi} \sin(\omega t) \quad (8)$$

Con esto se encuentra que la FEM inducida en el anillo es (9). En el momento inicial, se demuestra que la corriente se relaciona con la FEM inducida por la ecuación (10), donde R es la resistencia en el anillo, ω es la velocidad angular de la corriente en el anillo y L es la inductancia.


$$\varepsilon(t) = \Phi_{Bi} \omega \cos(\omega t) \quad (9)$$

$$\varepsilon_o = I_o \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad (10)$$

A partir de esto se encuentra que la relación entre la FEM inducida y la corriente en el anillo es (11), donde δ es la fase de la corriente con respecto a la FEM (12)

$$I(t) = - \frac{\Phi_{Bi} \omega}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \cos(\omega t - \delta) \quad (11)$$

$$\delta = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R} \quad (12)$$

Griffiths menciona que si varía la corriente en un cable conductor, la fuerza electro-motriz depende directamente del producto de la autoinductancia por el cambio negativo de la corriente con respecto al tiempo. Esta fuerza electro-motriz hace que sea más difícil cambiar la corriente que pasa por el cable. La autoinductancia es análoga a la masa en sistemas mecánicos, entre más grande, es más difícil de mover. Las corrientes de Eddy son difíciles de calcular, sin embargo se demuestran fácilmente, según Griffiths. Además de existir una FEM inducida por el solenoide sobre el anillo, existe una FEM autoinducida que se puede deducir a partir de la Ley de Faraday y depende de la autoinductancia del anillo, L y del cambio de la corriente con respecto al tiempo (13). 

$$\varepsilon = -L \frac{di}{dt} \quad (13)$$

1.3 Fuerza de Lorentz

Según Griffiths, en un aro la fuerza puede ser expresada a partir de la Fuerza de Lorentz (14), donde l es el diámetro del aro; esto se utilizará para las medidas de la FEM inducida en el aro en el análisis de datos, y se utilizará en conjunto con la FEM inducida en el anillo para encontrar su autoinductancia.

$$|\vec{F}| = |I \vec{l} \times \vec{B}| = 2\pi r I(t) B(t) \quad (14)$$

A partir de la ley de flujo magnético de Gauss, los campos magnéticos en todo el espacio de cancelan entre sí, por lo tanto el campo en las paredes y en las bases del solenoide se debe cancelar. A partir de esto se puede llegar a (15). Sustituyendo esto en (14). Debido a que la fuerza no es constante, la báscula dirá la lectura de la fuerza promedio y usando (11), se puede llegar a (16)

La investigación “Electromagnetic Levitation of a Disc”, por Valle, R. (2012), se centró en la levitación de un disco ferromagnético en presencia de un campo magnético producido por un electroimán. En este caso, se realizan cálculos adicionales acerca del sistema gracias a que existe un espacio entre el disco que levita y la bobina. La investigación es relevante debido a que combina fenómenos electromagnéticos con mecánicos; Valle considera que el signo negativo en la ecuación de la fuerza indica atracción, por lo que se considera que la ecuación (16) indica lo mismo.

$$B = -\frac{1}{2\pi r} \frac{d\phi_B}{dz} \quad (15)$$

$$F = -\frac{L}{2(R^2 + L^2 \omega^2)\pi r} \frac{d(i)^2}{dz} \quad (16)$$

Las citas teóricas son correctas pero no demuestran comprensión. El tipo de escritura necesita una explicación más profunda.

2. Experimentación

2.1. Diseño Experimental

Se construyó un solenoide con alambre recocido en el centro, de tal manera que se intensifique y concentre el campo magnético para generar la mayor fuerza posible sobre el conductor; consiste en un aro cerrado de alambre recocido. Para ajustar la altura del solenoide sobre el conductor se utilizó un riel vertical de papel, como se muestra en la figura 2.

no explica

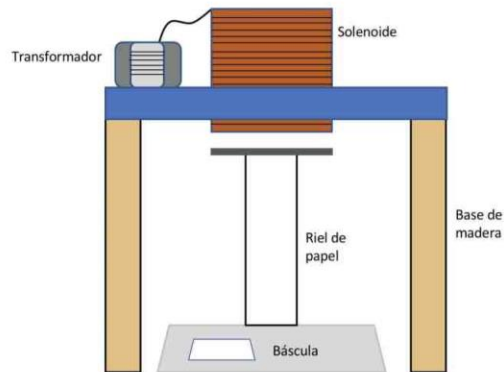


Figura 2. Diagrama del arreglo experimental

Se hace uso del riel de papel entre la báscula y el conductor, para evitar que corrientes en los componentes metálicos de la báscula influyan en los resultados experimentales. Con ella se realizarán mediciones del peso del aro cerrado a diferentes distancias del solenoide. Se

registrarán 18 datos a 18 diferentes alturas para reducir el error en los análisis estadísticos. Para medir la distancia se colocó un palillo con el papel milimétrico alrededor, como se muestra en la figura 3.



Figura 3. Palillo con papel milimétrico alrededor para medir la distancia entre el anillo y la base del solenoide.

A partir de estas medidas se sabe que la variable independiente fue la altura del solenoide sobre el conductor, mientras que la variable independiente a medir fue el peso del aro a distintas alturas. Al final se encontrará una relación entre la fuerza ejercida por el solenoide sobre el anillo y la distancia. ✓

Con base en esto, se formula que a menor distancia desde la base del solenoide al aro conductor se tendrá una mayor fuerza y un mayor voltaje, es decir, las variables serán inversamente proporcionales.

2.2. Construcción del solenoide:

Para construir el núcleo, que intensifica y concentra el campo magnético del solenoide, y la parte externa del solenoide fueron necesarios los siguientes materiales:

- (1 ± 0.01) kg de alambre recocido
- Tubo de PVC de (7.8 ± 0.1) cm de diámetro y (10.0 ± 0.1) cm de longitud
- Pinzas para cortar
- Sierra manual
- (100 ± 1) g de cable de cobre magneto del número 16

En el núcleo de la bobina primaria, dentro del tubo de PVC, se pusieron las varillas de alambre recocido de 10 ± 0.1 cm de longitud de manera que estuvieran completamente apretadas; se procedió a enrollar el cable de cobre magneto del número 16 de manera que no quedaran uno sobre otro ni espacios entre ellos, visto en la figura 4.



Figura 4. Pedazos de alambre recocido dentro del tubo de PVC, como núcleo del solenoide. ✓

Para la base del arreglo se utilizaron los siguientes materiales:

- 2 Tablas cuadradas de madera, con dimensiones de (30 ± 0.1) cm x (40 ± 0.1) cm
- Caja de cartón
- Fuente de voltaje de corriente alterna de (12 ± 0.01) V.
- Cinta métrica
- Papel milimétrico
- Báscula digital con resolución de 0.01 gramos.

Se colocaron las tablas de madera una frente a otra de manera paralela de tal manera que se mantenga una estabilidad durante todo el proceso; sobre ambas se colocó una caja de cartón con el solenoide y el transformador, como se muestra en la figura. Se usó un pequeño taladro para perforar el tubo de PVC e insertar los extremos del cable de cobre magneto; debajo de este se coloca la báscula digital; el arreglo se muestra en la figura 5.



Figura 2. Arreglo experimental, con solenoide arriba, anillo sobre el riel y abajo la báscula digital.

2.3 Captura de Fuerza a Diferentes Alturas

Se realizó el experimento en un laboratorio con clima a una temperatura de $(24 \pm 1)^\circ\text{C}$ para evitar que el solenoide y el transformador se calentaran; de igual manera, se realizó la toma de datos en el menor tiempo posible para evitar dilataciones en los metales del experimento. La primera parte consiste en realizar 18 medidas del peso registrado en la báscula con el anillo cerrado, mostrados en la tabla 1. Para calcular la fuerza se usó la relación $F=mg$, como se muestra en (17); como ejemplo se calcula la fuerza para el primer valor de la masa en la tabla 1. La incertidumbre en la fuerza se calculó con la propiedad de multiplicación, como se muestra en (18); se dejó a una cifra significativa por ser una incertidumbre. Se ajustó el riel de papel para los intervalos establecidos, después se marcó el cero en la báscula con el riel de papel sobre ella, para obtener la lectura únicamente del peso del anillo de metal y la fuerza que hace que el peso del anillo cambie.

$$F = mg = (0.00036)(9.81)\text{N} = 3.5 \times 10^{-3}\text{N} \quad (17)$$

$$\delta F = g\delta m = (9.81)(0.00001)\text{N} = 9.81 \times 10^{-5}\text{N} \approx 1 \times 10^{-4}\text{N} \quad (18)$$

3. Análisis de datos

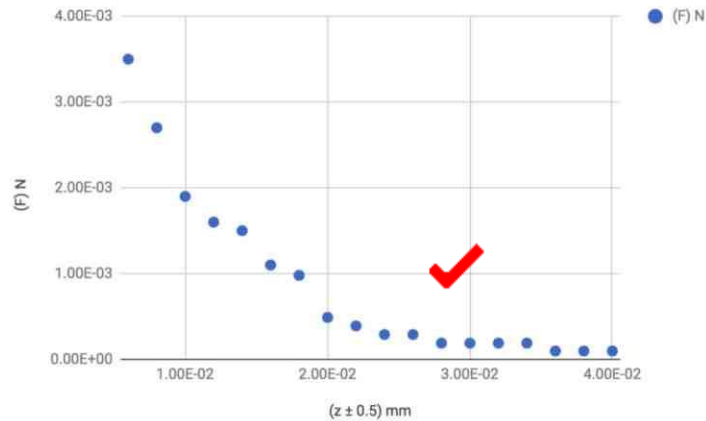
3.1 Propuesta de modelo inversamente proporcional

Dichos puntos se graficaron en Excel, mostrados en la gráfica 1. En dicha gráfica se ve una relación inversamente proporcional, con un coeficiente de correlación lineal de Pearson de -0.874, lo que indica poca correlación lineal entre los datos; debido a esto, se propone una linealización de la gráfica con base en las propiedades de los logaritmos.

$(z \pm 0.001) \text{ m}$	$(Fg \pm 0.01) \text{ g}$	$(F \pm 0.0001) \text{ N}$
0.006	0.36	3.5×10^{-3}
0.008	0.28	2.7×10^{-3}
0.010	0.19	1.9×10^{-3}
0.012	0.16	1.6×10^{-3}
0.014	0.15	1.5×10^{-3}
0.016	0.11	1.1×10^{-3}
0.018	0.10	9.8×10^{-4}
0.020	0.05	4.9×10^{-4}
0.022	0.04	3.9×10^{-4}
0.024	0.03	2.9×10^{-4}
0.026	0.03	2.9×10^{-4}
0.028	0.02	1.9×10^{-4}
0.030	0.02	1.9×10^{-4}
0.032	0.02	1.9×10^{-4}
0.034	0.02	1.9×10^{-4}
0.036	0.01	9.8×10^{-5}
0.038	0.01	9.8×10^{-5}
0.040	0.01	9.8×10^{-5}



Tabla 1. Donde z es la distancia solenoide-anillo, Fg es el registro del peso en gramos y F el peso en Newtons.



Gráfica 1. Altura “z” vs F, a partir de valores de la tabla 1. Las barras de error se cubren por los puntos. Incertidumbre de $z=0.001$ m, incertidumbre de $F=0.0001$ N

3.2 Linealización del modelo propuesto

A partir de la gráfica 1, se propone un modelo del tipo (19), en el que “c” es una constante, “F” es la fuerza que ejerce el solenoide sobre el anillo y “z” la distancia entre los dos. Se obtiene el logaritmo de ambos lados y se llega a (20), donde la ecuación lineal es equivalente a una ecuación con pendiente y ordenada al origen, donde $\ln(z)$ es la coordenada “x”, $\ln(c)$ es la ordenada al origen, $\ln(F)$ es la variable “y” y a es la pendiente m. Se muestra como ejemplo el cálculo de los logaritmos para el primer valor en la tabla 1 (21). Dichos puntos linealizados se muestran en la tabla 2, donde se obtiene el logaritmo natural de los datos en la tabla 1.

$$F = cz^a \quad (19)$$

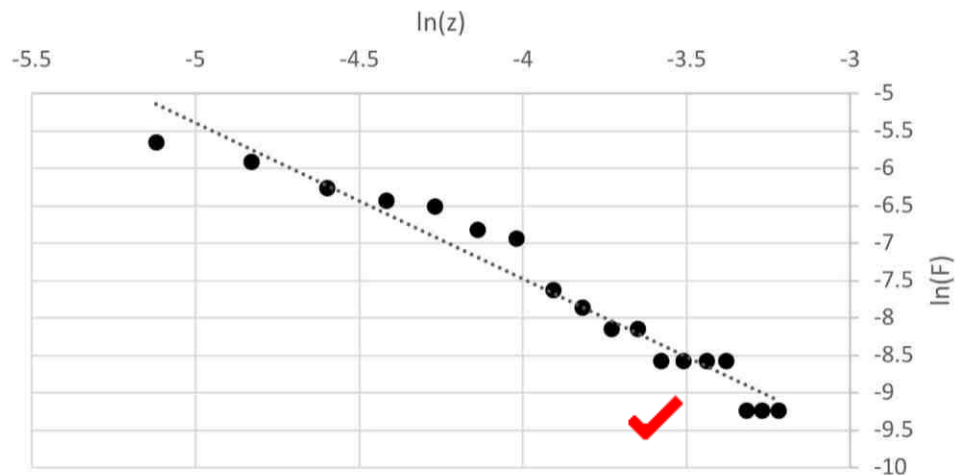
$$\ln(F) = \ln(cz^a) = \ln(c) + a \ln(z) \quad (20)$$

$$\ln(0.0035) = -5.65 = \ln(c) + a \ln(0.006) = \ln(c) + a(-5.12) \quad (21)$$

$\ln(z)$	$\ln(F)$
-5.12	-5.65
-4.83	-5.91
-4.6	-6.26
-4.42	-6.43
-4.27	-6.5
-4.14	-6.81
-4.02	-6.93
-3.91	-7.62
-3.82	-7.85
-3.73	-8.14
-3.65	-8.14
-3.58	-8.57
-3.51	-8.57
-3.44	-8.57
-3.38	-8.57
-3.32	-9.23
-3.27	-9.23
-3.22	-9.23

Tabla 2. Logaritmos naturales de la altura “z” y la fuerza “F”, para linealización de la gráfica 1.

A partir de los puntos en la tabla 2, se realizó una gráfica en la que se ve una tendencia lineal negativa, mostrada en la gráfica 2; para calcular qué tan lineal es la relación, se calculó el coeficiente de correlación lineal de Pearson para el conjunto de datos, y se obtuvo que es igual a -0.973, lo que indica que la relación puede ser aproximada a una línea. De igual manera, se puede ver que existe un error en la pendiente y en la ordenada al origen.



Gráfica 2. $\ln(z)$ vs $\ln(F)$, a partir de valores de tabla 2. Ecuación: $\ln(F) = \ln(c) + a \ln(z)$

Para obtener la recta que mejor se ajusta a los datos se utilizó la función de regresión lineal de Excel, obteniendo que la pendiente es igual a -2.1 y que la ordenada al origen es igual a -15.8. De igual manera, se calculó que la incertidumbre para la pendiente es de 0.1, lo que indica un error del 5% para el exponente de la ecuación 17. La ecuación (17) se muestra con los valores obtenidos sustituidos en la ecuación (19) y con sus dichas incertidumbres. Debido a que se desea obtener Newtons como unidades de fuerza, se establece que las unidades de la constante “c” son Newtons por metros elevado al mismo exponente de la altura.

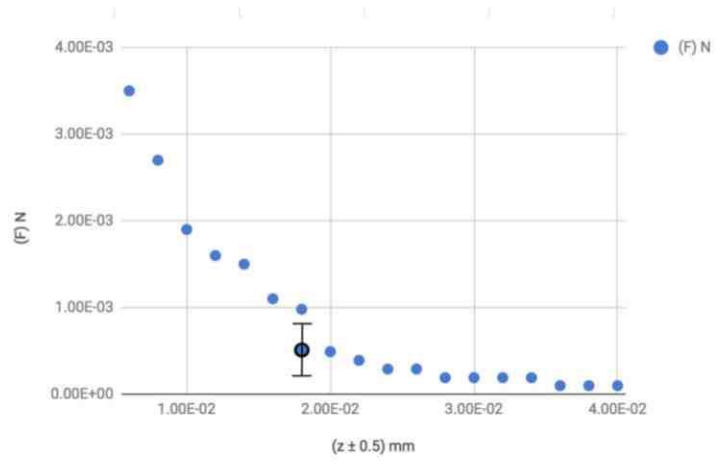
$$F = (1.4 \times 10^{-7} \text{ Nm}^{2.1 \pm 0.1}) z^{-2.1 \pm 0.1} \quad (21)$$

3.3. Evaluación cuantitativa de ecuación obtenida

Para hacer válido el modelo establecido, se tomará un punto aleatorio en el eje “x” en el dominio de la gráfica 1, siendo el valor numérico de la fuerza dependiente de dicho valor. Se calcula que para una “x” igual a 0.018 metros, la fuerza es igual a $(6 \pm 3) \times 10^{-4}$, con la incertidumbre obtenida de la diferencia de las fuerzas, mayor y menor, dividida entre dos. Empíricamente se obtuvo un valor de 9.8×10^{-4} para una distancia de 0.018 metros, lo que está



dentro del rango obtenido con la ecuación e indica que el modelo es adecuado para predecir valores empíricos. Dicho punto se muestra en la gráfica 3, comparado con los puntos de la gráfica 1 y con su correspondiente barra de error.



Gráfica 3. Punto obtenido con la ecuación (19) sobre la gráfica 1.

5. Conclusiones

Se contestó la pregunta de investigación: ¿Cuál es la relación entre la fuerza en un conductor generada por un campo magnético oscilante y la distancia entre la fuente del campo y el conductor? La hipótesis planteada se cumplió, esto debido a que los objetos en la naturaleza tienden a producir campos que tienen relaciones inversamente proporcionales a la distancia; de igual manera, se pudo justificar la hipótesis con base en las ecuaciones obtenidas en el marco teórico, cuya aplicación podría servir para los futuros experimentos ya mencionados. Los datos presentaron una clara relación de proporcionalidad inversa, ya que la fuerza iba decreciendo conforme iba aumentando la distancia. ✓

Debido a que en el modelo obtenido se tiene incertidumbre en el exponente, los pequeños cambios incrementan la incertidumbre en la fuerza; esto se puede mejorar con el uso de

instrumentos de medición con mayor resolución, como lo sería un Vernier. También resulta pertinente realizar un mayor número de mediciones, específicamente en el intervalo de 0 a 0.001 metros de la distancia entre el anillo y la base del solenoide, para así tener un modelo que se ajuste a los datos en un mayor dominio.



Futuros cambios a realizarse en el experimento es la mejora del riel para ajuste de la altura del solenoide, no del anillo; esto reduciría la dificultad de las mediciones y permitiría mantener el anillo estático. De igual manera se podrían usar distintos materiales para el núcleo; esto podría incrementar exponencialmente la fuerza que experimenta el anillo, resultando en datos distintos. Se puede analizar también el cambio en la fuerza cuando se varía la frecuencia de la corriente en el solenoide encontrando así las constantes en la ecuación (4).


Otra investigación que podría ser útil es el cálculo del voltaje a distintas alturas para así unirlo con el modelo obtenido en el experimento y hacer cálculos de constantes del metal, como lo es la autoinductancia; ésta tiene numerosas aplicaciones en la electrónica y podría utilizarse como forma de calcular la autoinductancia para distintos conductores.

Un aspecto que se podría calcular con otros datos a calcular es la energía perdida en forma de calor para evaluar la eficiencia del arreglo y así comprobar los altos costos para utilizarlo como forma de transporte levitatorio. Sin embargo, es necesario también proponer una justificación ambiental para este tipo de transporte eléctrico, ya que si bien no se genera energía por combustión, se utiliza energía eléctrica con una eficiencia que podría ser menor a la de un motor de combustión.



Si bien totalmente basado en la fuente indicada de la olimpiada asiática, el trabajo es excelente y el análisis de datos correcto. Las explicaciones teóricas no demuestran una clara comprensión del fenómeno que sin embargo es analizado correctamente.

Referencias

- Gao, L., Shi, Z., Li, D., Yang, Y., Zhang, G., Mclean, A., & Chattopadhyay, K. (2015). Dimensionless Analysis and Mathematical Modeling of Electromagnetic Levitation (EML) of Metals. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 47(1), 67-75.
doi:10.1007/s11663-015-0457-0
-  Griffiths, D. J. (1989). *Introduction to Electrodynamics*. Englewood Cliffs NJ: Prentice Hall.
- Martínez, J. E., & Bedoya, C. L. (2013). Un Nuevo Modelo Basado en Funciones Exponenciales para un Sistema de Levitación Magnética Uniaxial. *Universidad de Antioquia*. 63-75.
- Rabinovici, R., Berdichevsky, V., & Shvartsas, M. (2012). Eddy-currents levitation system. 2012 IEEE 27th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel.
doi:10.1109/eeei.2012.6377036
- Spitans, S., Baake, E., & Jakovics, A. (2014). New Technology for Electromagnetic Levitation Melting of Metals. *Applied Mechanics and Materials*, 698, 237-244.
doi:10.4028/www.scientific.net/amm.698.237
- Thompson, M. (2000). Eddy current magnetic levitation. Models and experiments. *IEEE Potentials*, 19(1), 40-44. doi:10.1109/45.825642
- Valle, R., Neves, F., Andrade, R. D., & Stephan, R. M. (2012). Electromagnetic Levitation of a Disc. *IEEE Transactions on Education*, 55(2), 248-254. doi:10.1109/te.2011.2167975



EE/RPPF

Para uso a partir de mayo o noviembre de 2018

Página 1/3

Código personal del alumno:

Monografía: formulario de reflexión sobre la planificación y el progreso

Alumno: Este formulario debe ser completado por el alumno durante el transcurso y la finalización de su monografía. Este documento deja constancia de la reflexión sobre su progreso y planificación, así como sobre la naturaleza de los debates con su supervisor. Debe llevar a cabo tres sesiones de reflexión formal con su supervisor: la primera sesión de reflexión formal deberá centrarse en las ideas iniciales y en su planificación del desarrollo de la investigación; la sesión de reflexión intermedia se llevará a cabo cuando haya completado una parte significativa de su investigación; y la última sesión consistirá en una entrevista final que tendrá lugar una vez haya completado y entregado su monografía. Este documento sirve de registro para respaldar la autoría original de su trabajo. La suma de las tres reflexiones no deberá superar las 500 palabras.

Completar este formulario será un requisito obligatorio de la Monografía a partir de la convocatoria de exámenes de mayo de 2018 y deberá enviarse junto con la monografía finalizada para su evaluación, según lo dispuesto en el criterio E.

Supervisor: Debe llevar a cabo tres sesiones de reflexión con cada alumno: una en la primera etapa del proceso, una durante la etapa intermedia y la entrevista final. Se permite celebrar otras sesiones de consulta, pero no es necesario registrarlas en esta hoja. Después de cada sesión de reflexión los alumnos deben dejar constancia de sus reflexiones, y el supervisor debe firmar y fechar este formulario.

Primera sesión de reflexión

Comentarios de los alumnos:

Debido a mi gusto por la ciencia y mi experiencia en concursos de Física he decidido hacer mi monografía acerca de la levitación de un conductor en un campo magnético oscilante; considero que soy bueno en problemas de electromagnetismo, y que tengo la posibilidad de aprender cosas nuevas al hacer investigación para la monografía. Haciendo un poco de investigación acerca de experimentos en el área de electromagnetismo (Rabinovici, R., Berdichevsky, V., & Shvartsas, M. (2012). Eddy-currents levitation system.; Thompson, M. (2000). Eddy current magnetic levitation.) me di cuenta de que haciendo levitar un anillo conductor con un campo magnético puedo encontrar casi todo lo que se engloba en la Electrodinámica. Le comenté esto a mi supervisor, el Dr. Rodrigo Ponce, y me ayudó a completar mi pregunta de investigación para incluir precisamente las variables que voy a medir y a definir cómo voy a hacer el experimento. Con esto ya definido pude construir un esquema general de mi investigación, y pude darme cuenta de que necesito hacer un análisis de datos extenso, que me permitirá exponer mi pensamiento y razonamiento acerca del experimento y cómo relacionar las variables unas con otras. Voy a hacer un énfasis en la física detrás del experimento de manera teórica, basado en lo visto en la clase de Física, y usar eso en una interpretación estadística de los datos obtenidos. Pude encontrar distintas dificultades, como la forma en la que iba a construir el modelo experimental y los materiales que iba a usar.

Fecha: 26/04/2017

Iniciales del supervisor:

Reflexión intermedia

Comentarios de los alumnos:

La dificultad de construir el arreglo experimental la pude solucionar comprando finalmente los materiales y viendo empíricamente cómo iba a funcionar el acomodo de los materiales. Debido a la dificultad de conseguir una fuente de voltaje en corriente alterna decidí usar un transformador pequeño para convertir el voltaje de los enchufes comunes a una voltaje más pequeño para evitar que se caliente el arreglo. Pensé en usar una regla para medir la altura entre el conductor y el solenoide, pero me di cuenta de que es más sencillo usar papel milimétrico debido a que puedo asegurar también de que el movimiento del solenoide sea completamente vertical. Mi supervisor me aconsejó en revisar mis fuentes para analizar la forma en la que se acomodaban los experimentos, y leyendo los artículos me di cuenta de que podía realizar una medición de más variables que cambian con la altura, como el peso, el voltaje y la corriente. Esto me sirve para hacer un análisis más completo del fenómeno de manera estadística, considerando que voy a hacer más gráficas que me permitan encontrar una ecuación y a hacer predicciones del material conductor que flote en el campo magnético.

Para poder llevar a cabo el experimento me di a la tarea de hacer ecuaciones que describan el fenómeno, y me di cuenta de que algunas ecuaciones no me quedaban claras, por lo que volví a leer mis fuentes acerca de las corrientes de Eddy en conductores y los campos que se generan en estos para aumentar mi comprensión y asegurar que lo aplique correctamente.

Fecha: 21/11/2

Iniciales del supervisor:

Reflexión final (entrevista final)

Comentarios de los alumnos:

Pude completar la monografía haciendo cambios al hacer el experimento, ya que modelé la relación de la fuerza con la distancia de una manera exponencial, linealizando posteriormente con un análisis logarítmico de la ecuación propuesta. Fue la parte de estadística la que a mi parecer le agregó un valor al análisis de los datos, ya que tuve que considerar tanto la parte teórica como la experimental para obtener conclusiones. Con lo que realicé de teoría me di cuenta de que podía llegar a hacer más experimentos que me ayudarían a encontrar constantes de los metales, como lo sería la autoinductancia. Me pareció difícil entender las ecuaciones que se presentaban en algunas investigaciones al inicio, pero al trabajarlas por mi cuenta al final vi un avance en relación a mi entendimiento del experimento. Mi supervisor me hizo recomendaciones acerca de detalles que hay que considerar al hacer la investigación, por lo que hice cambios en el formato de las tablas, gráficas y pequeñas aclaraciones. Me pareció muy útil escuchar estos comentarios del supervisor, ya que me permitieron ver el punto de vista de un experto en el área. Habría sido bueno encontrar algunas fuentes que traten de manera teórica algún arreglo similar, para así comparar mi forma de modelar la interacción del anillo con el solenoide con la de investigaciones publicadas; esto definitivamente habría facilitado la comprobación de mis ecuaciones.

Fecha: 20/02/2018

Iniciales del supervisor:

Comentarios del supervisor:

Nota para el supervisor: Al enviar el trabajo de este alumno para que se evalúe, usted se hace responsable de su autoría original. Ningún trabajo de un alumno debe cargarse o enviarse al sistema de carga de trabajos en formato electrónico si su autoría original está en duda o si en este formulario aparecen comentarios contradictorios. Si surge alguna duda sobre la autoría original del trabajo a partir del texto que usted incluya en el espacio a continuación, este componente no se evaluará.

El alumno con folio _____ realizó su monografía en el área de física y estuve dando seguimiento a su trabajo de investigación. El trabajo realizado por el alumno fue original y de su autoría, realicé sesiones de revisión en las tres principales etapas: definición del trabajo, avance intermedio y avance final. En cada una de las etapas corroboré la originalidad de su trabajo, observando evidencias de su trabajo en cada etapa. ✓

El asesoramiento se enfocó en dar guía para la delimitación del problema, ajustes en el diseño experimental y en el análisis de los datos. En ningún momento se le sugirieron actividades o acciones que no fueran diseñadas por el alumno.

Finalmente la monografía cumple con los requisitos para ser enviada a revisión, como parte de la evaluación del trabajo realizado en el programa de Diploma del IB. Sin más por el momento de despido, y quedo a su disposición para cualquier aclaración futura sobre el trabajo del alumno.

SEEN