

Determinación del momento dipolar magnético y magnetización de un imán permanente de neodimio N48

Determination of the magnetic dipolar moment and magnetization of a permanent neodymium N48 magnet

 **Ausberto Wilson Urquiaga Vásquez**

Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Perú

 **Pablo Aguilar Marin**

Universidad Nacional de Trujillo, Perú

 **Mario Elder Chávez Bacilio**

Universidad Nacional de Trujillo, Perú

RESUMEN

En el presente trabajo se determinó el momento dipolar magnético y la magnetización de un imán de neodimio N48 de geometría anular. Se introdujo el imán en un campo magnético uniforme generado por dos bobinas de helmholtz para medir la frecuencia de oscilación y el campo magnético de las bobinas. El movimiento oscilatorio del imán fue filmado con una cámara de video Samsung S8 que tiene una velocidad de 240 fotogramas por segundo. El video fue analizado con el software Tracker para el cálculo de la frecuencia angular. Finalmente se calculó el momento dipolar magnético y la magnetización mediante fórmulas empíricas. Se encontró que la frecuencia oscilatoria es 18 r/s, el campo magnético resultante de las bobinas de Helmholtz 123,44 μT , el momento dipolar magnético 2,6 Am^2 y la magnetización del imán de neodimio N48 $1,14 \times 10^6 \text{ A/m}$.

Palabras clave: Imanes de neodímio; campo magnético; momento dipolar magnético; bobinas de Helmholtz; analizador Tracker.

ABSTRACT

In the present work, the magnetic dipole moment and the magnetization of a neodymium magnet N48 of annular geometry were determined. The magnet was introduced into a stable magnetic field generated by two Helmholtz coils to measure the frequency of oscillation and the magnetic field of the coils. The oscillatory movement of the magnet was filmed with a Samsung S8's video camera that records at 240 frames per second. The video was analyzed with the Tracker software to calculate the angular frequency. Finally the magnetic dipole moment and magnetization were calculated using empirical formulas. The oscillatory frequency was found to be 18 r/s, the magnetic field resulting from the Helmholtz coils 123.44 μT , the magnetic dipole momentum 2.6 Am^2 and the magnetization of the neodymium magnet N48 $1.14 \times 10^6 \text{ A/m}$.

Keywords: Neodymium magnets; magnetic field; magnetic dipole moment; Helmholtz coils; Tracker analyzer.

INTRODUCCIÓN

Desde la antigüedad los materiales magnéticos han sido utilizados como brújulas y como juguetes mágicos. A fines del siglo XIX, desde que se descubrió la ley de Faraday, se dio inicio a la aplicación industrial del Magnetismo en los procesos de producción, transporte y reconversión de energía eléctrica. Los núcleos de los transformadores, generadores y motores están constituidos por una aleación de hierro y silicio que al poseer una elevada permeabilidad magnética y baja cifra de pérdidas constituye un material ideal para hacer rentable eficazmente la utilización de la ley de Faraday (Grande, 2003).

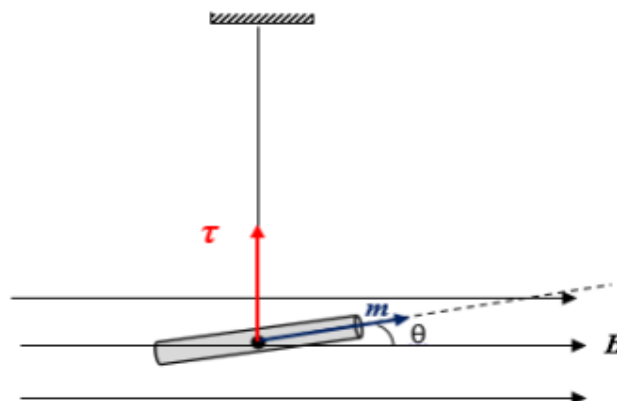
Desde el siglo XX, entendemos que los materiales magnéticos conocidos como imanes son aquellos con los que se fabricaban las agujas de navegación o que se usaban como misteriosos generadores de fuerzas no menos misteriosas hasta el siglo XIX, son almacenes de energía en realidad. En este concepto físico se basan todas las aplicaciones actuales de los imanes. Los equipos de resonancia magnética nuclear, los rotores y estatores de motores fabricados con imanes permanentes, los imanes utilizados en telefonía, microelectrónica y vídeos, se utilizan como almacenes de energía (Grande, 2003).

Cuando alrededor de un núcleo atómico gira un electrón, hay un flujo de carga o corriente alrededor del núcleo. El momento magnético correspondiente determina la interacción de dicho electrón con un campo magnético aplicado (Kane y Sternheim, 2007)

Cuando un imán permanente de momento dipolar magnético m , se suspende mediante un hilo flexible e inextensible dentro de una región donde existe un campo magnético horizontal uniforme B , al desviar el imán de su posición de equilibrio, se observa que este puede oscilar en un plano horizontal alrededor del eje vertical debido al torque magnético restaurador τ , que experimenta, ver figura 1 (Bisquert et al, 1992; Fuentes, 2011).

Figura 1

Torque magnético sobre un imán oscilando dentro de un campo magnético uniforme.



$$\tau = -m * B \quad (1)$$

De la ecuación fundamental de la rotación se tiene

$$\tau = I\alpha \quad (2)$$

Siendo I el momento de inercia del imán y α la aceleración angular de su movimiento.

Reemplazando la ecuación (1) en (2)

$$-mB\text{sen}\theta = I\alpha \quad (3)$$

De donde,

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + mB\text{sen}\theta = 0 \quad (4)$$

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{mB}{I} \text{sen}\theta = 0 \quad (5)$$

Para oscilaciones pequeñas $\text{sen } \theta < \theta$, obtenemos,

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{mB}{I} \theta = 0 \quad (6)$$

La cual corresponde a la ecuación diferencial del movimiento armónico simple y tiene una solución de la forma.

$$\theta = \theta_0 \text{sen}(\omega t + \varphi) \quad (7)$$

Donde: θ_0 es la amplitud angular inicial del movimiento y $\omega = (mB/I)^{1/2}$ La frecuencia angular de sus oscilaciones.

Si se conoce el campo magnético, el momento de inercia y la frecuencia angular de sus oscilaciones, se puede determinar el momento dipolar magnético usando la relación.

$$m = \omega 2I/B \quad (8)$$

Pueden o no tener un momento dipolar magnético neto los átomos y moléculas, dependiendo de sus orbitas electrónicas respectivas y de su simetría. Así mismo, la presencia de un campo magnético externo modifica el movimiento electrónico, dando lugar a una polarización magnética o Magnetización del material (Álvarez et al, 2011).

Una sustancia magnética de magnetización M es definida como el momento dipolar magnético del material por unidad de volumen. Si m es el momento dipolar magnético inducido por átomo o molécula y n el número de átomos o moléculas por unidad de volumen, la magnetización está dada por (Belendez, 2000):

$$M = nm \quad (9)$$

Se puede escribir también la magnetización como:

$$M = m/V \quad (10)$$

Los materiales magnéticos se pueden caracterizar a través de un ciclo de histéresis, es decir mediante una curva de inducción magnética (B) o una curva de magnetización en función de un campo magnético aplicado (H). Estas variables se relacionan mediante la expresión

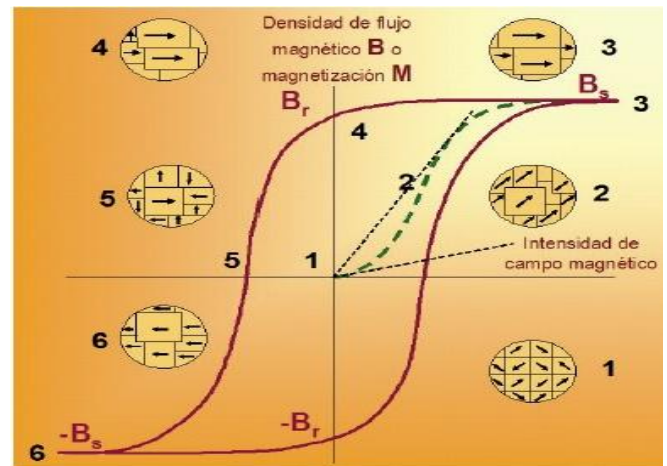
$$\mu_0 M = B - \mu_0 H \quad (11)$$

Un material magnético tiene una curva típica de la forma que se muestra en la Figura 2, para mostrar la estructura de los dominios en la presente curva de histéresis usamos los números. La notación SI muestra que se trabajó en el Sistema Internacional. En la Figura 2 se observa el ciclo obtenido de B vs. H o M vs. H y así mismo se representa también el comportamiento de la estructura de dominios. En la curva de magnetización inicial (a trazos) se muestra la estructura de dominios inicial (1) se observa como ellos están orientados en direcciones muy diferentes (o direcciones de fácil magnetización), cambia esta estructura de dominios con el aumento del campo. Aquellos dominios con dirección cercana al campo crecen, y decrecen los que tienen orientación contraria (2). Cuando se alcanza la

magnetización de saturación M_s para un determinado campo, todos los dominios se orientan en la dirección del campo y se tiene un monodominio (3). Para este tipo de campo aplicado la inducción magnética está dado por la siguiente expresión: $B_s = \mu_0(M_s + H)$. Luego de la saturación llevamos H a 0, y a este campo magnético se le conoce como inducción magnética remanente B_r (4), y le corresponde una magnetización remanente M_r . Si el campo H aumenta en dirección contraria se llega al campo coercitivo, $-H_c$, o coercitividad, que es el campo para el cual B y M son cero (5). Estos dominios se orientan de tal manera que la magnetización total es nula. Si se sigue aumentando el campo se llegará a la saturación negativa con valores $-B_s$ o $-M_s$ (6).

Figura 2

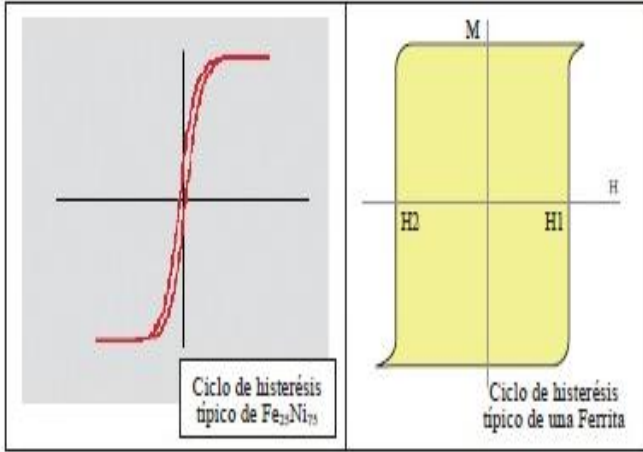
Estructura de dominio del ciclo de histéresis para un material magnético (B vs H o M vs H).



De acuerdo al campo coercitivo los materiales magnéticos se pueden clasificar en materiales magnéticos blandos y materiales magnéticos duros. Se ilustra en la Figura 3 los ciclos de histéresis para el caso de un material magnético blando (Izq.) y duro (Der.). Los materiales blandos son utilizados ampliamente en la fabricación de transformadores, los materiales duros en imanes permanentes, y los semiduros, con ciclos rectangulares para almacenamiento de datos (memorias magnéticas) (4) (Pérez, 2016).

Figura 3

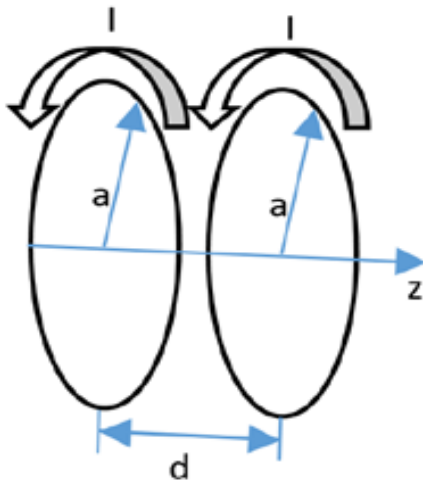
Ciclo de histéresis de materiales blandos ($Izq.$), es estrecho para bajos valores de H_c y grandes valores de B_s . Y duros ($Der.$), para grandes valores de H_c y altos valores de B_r el ciclo de histéresis es ancho.



Las bobinas de helmholtz consiste en un arreglo de dos bobinas circulares de N espiras circulares de radio a , que conducen una corriente I y están separadas una distancia d , como se observa en la figura 4. Son empleadas para producir campos magnéticos uniformes (Araújo y Felix, 2016).

Figura 4

Sistema de referencia para bobinas de Helmholtz.



El campo magnético es obtenido mediante el principio de Biot-Savart y el principio de superposición, con el origen de coordenadas en el punto medio de la distancia d , la expresión que describe el campo magnético de las bobinas se muestra enseguida.

$$B(z) = \frac{\mu_0 I N a^2}{2} \left[\left(a^2 + \left(z - \frac{d}{2} \right)^2 \right)^{-3/2} + \left(a^2 + \left(z + \frac{d}{2} \right)^2 \right)^{-3/2} \right] \quad (12)$$

El campo magnético resultante apunta en la dirección del eje z . Las condiciones de uniformidad son $\partial B / \partial z = 0$, $\partial^2 B / \partial z^2 = 0$ en el plano $z = 0$. La distancia $d = a$ cumple dichas condiciones. La magnitud del campo magnético en el centro de las bobinas está dada por,

$$B = \frac{8\mu_0 N I}{5\sqrt{5}} \quad (13)$$

El campo magnético resultante en el interior de las bobinas está dado por la suma del campo producido por las bobinas de Helmholtz y el campo magnético terrestre.

$$B_{Res} = \frac{8\mu_0 N I}{5\sqrt{5}} + B_{Terres} \quad (14)$$

Las bobinas de Helmholtz comúnmente se utilizan para establecer una zona de campo magnético conocido y uniforme para aplicaciones diversas (Fano et al., 2017).

Las aplicaciones de la bobina Helmholtz son diversas; por ejemplo: determinan las componentes del campo magnético terrestre tanto vertical como horizontal; calibración de medidores de campo magnético de baja frecuencia; estudiar los efectos del campo magnético en los componentes o equipos electrónicos; medida de la susceptibilidad magnética; calibración de equipos de navegación; estudio de efectos biomagnéticos; ajuste de tubos de rayos catódicos; estudio del comportamiento de los tubos fotomultiplicadores en campos magnéticos; medidas de magnetorresistencia; desmagnetización de pequeñas piezas de materiales ferromagnéticos utilizados en la ciencia de las naves espaciales. En la enseñanza de la física, se utiliza principalmente en experimentos para la determinación de la carga específica del electrón (Rene, 2003).

A través del software Tracker se realiza un análisis de video y se construye su correspondiente modelo que lo caracteriza basado en el modelo Java del proyecto Open Source Physics (Brown, 2009), combina videos y modelación en computadora. Tracker es un paquete de análisis de vídeo y una herramienta de modelado. Las características incluyen el seguimiento de objetos, posición, velocidad, aceleración, gráficas, filtros de efectos especiales, marcos múltiples de referencia, puntos de calibración y perfiles de línea para el análisis de patrones de espectros e interferencia.

Este software en la mayoría de trabajo reportados es usado para el estudio de la cinemática y como estrategia didáctica en el proceso de enseñanza aprendizaje de sistemas físicos sencillos (Montero et al., 2018; Caicedo et al., 2018; Diaz y Cala, 2014; Pablo et al., 2018).

Los diversos artículos de Investigación revisados no se ha encontrado trabajos donde se haya calculado la magnetización y el momento dipolar magnético de un imán de Neodimio e inclusive haciendo uso del software Tracker. A pesar de los diversos estudios reportados, en este trabajo se determinó la magnetización y el momento dipolar magnético de un imán de neodimio N48 mediante el software analizador de videos Tracker, para caracterizar el imán permanente de neodimio y sirva de base para otras futuras investigaciones.

Las Variables de estudio que comprenden la presente Investigación, por su relación de dependencia, tipo y escala de medición se enmarca en la siguiente clasificación:

Variable Independiente: Momento dipolar magnético (frecuencia angular de oscilación y campo magnético de las bobinas de helmholtz).

Variable dependiente: Magnetización.

El objetivo de estudio de este trabajo de Investigación fue determinar la magnetización del imán permanente de neodimio N48 producido por el momento dipolar magnético, mediante el uso del analizador de videos Tracker.

MATERIALES Y MÉTODO

1. Objeto de estudio

El objeto de estudio de este trabajo de Investigación está dado por el imán de neodimio N48, ver figura 5.

Figura 5

Forma geométrica del Imán permanente de Neodimio N48.

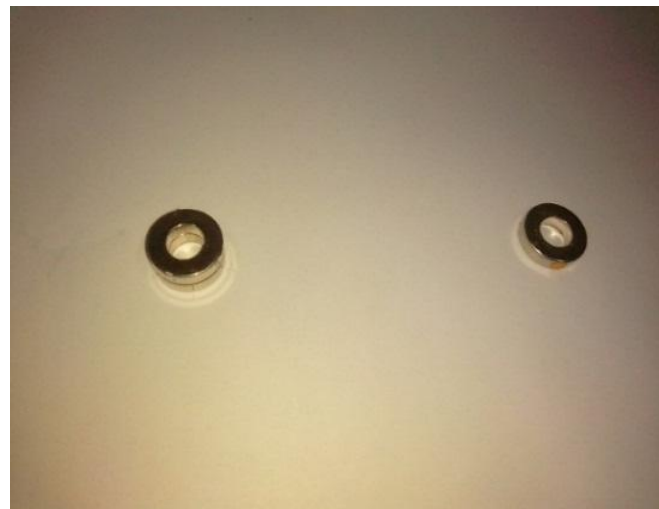


Tabla 1

Propiedades del imán de Neodimio N48 (según IMAMAGNETS).

Magnitud	Cantidad
Masa	19,05 g
Diámetro exterior	25,40 mm
Diámetro interior	12,80 mm
Espesor	6 mm
Densidad	7,1 g/cm ³
Campo magnético radial externo	48,765 gauss
Remanencia	1,38 T-1,40 T

2. Instrumentos, equipos y materiales

A continuación, se describe los instrumentos, equipos y materiales que se han utilizado:

- Software Tracker para analizar los videos y hacer un registro de los valores de la posición en función del tiempo (con una precisión 0,1 mm en la longitud y 0,001 s. en el tiempo).
- Celular Samsung Galaxy S8, el cual registra de 30-240 fotogramas por segundo, para grabar la rotación del imán en el interior de las bobinas de helmholtz.
- Bobinas de Helmholtz (tiene un arrollamiento igual a 154 espiras y un radio de 0,2 m).
- Brújula NAHITA que se utiliza para verificar la polaridad del imán y la dirección de las bobinas.

- Fuente de alimentación (3B Scientific U33020-230, 0 - 20 V, 0 – 5 A, 50/60 Hz), para suministrar corriente a las bobinas de helmholtz.
- Trípode de plástico para sujetar la cámara de vídeo de un celular
- Soporte universal con varilla y nuez para sujetar el imán de neodimio.

3. Métodos y técnicas

Momento magnético del imán de neodimio

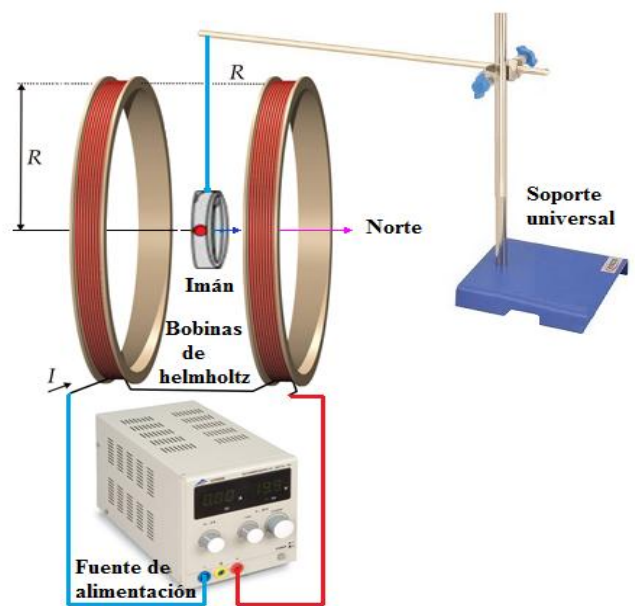
- Fijamos la brújula en la parte central de las bobinas de helmholtz (sin conectar la fuente de corriente) y con la brújula en reposo manipulamos las bobinas hasta que la aguja indique hacia al Norte, quedando alineado con el eje axial de las bobinas.
- Conectamos la fuente de corriente en serie con las bobinas de helmholtz, encendemos la fuente y haciendo girar la perilla suministramos muy lentamente corriente, de modo que las bobinas crean su propio campo magnético orientado en el mismo sentido del campo magnético terrestre.
- Determinamos la polaridad del imán a través de la brújula, quedando identificada las caras planas del imán que corresponde a los polos Norte y Sur, respectivamente. Así se determinó la orientación de su momento dipolar magnético (orientado de Sur al Norte).
- Se realizó una marca en la parte lateral del imán, para detectarlo con el software Tracker.
- Suspendemos el imán de un soporte universal de modo que queda en el centro de las bobinas, quedando alineados y apuntando en el mismo sentido del momento del imán y el campo magnético terrestre como se muestra en la figura 6.
- Se le suministro lentamente corriente hasta que el imán realice un movimiento oscilatorio apreciable, para ser detectado por el analizador de video Tracker.
- Con el celular se registró el movimiento oscilatorio del imán. Así mismo se realizaron 6 videos y se escogió los tres mejores videos con la finalidad de

encontrar un valor promedio de la frecuencia angular.

- Finalmente exportamos los videos al software Tracker para su respectivo análisis, de donde se obtuvo los parámetros para construir la ecuación que relaciona la posición con el tiempo y a partir de ello se determinó la frecuencia angular del movimiento oscilatorio del imán.

Figura 6

Montaje experimental para determinar el momento dipolar magnético del imán de neodimio, en donde se observa el imán dentro de las bobinas de helmholtz.



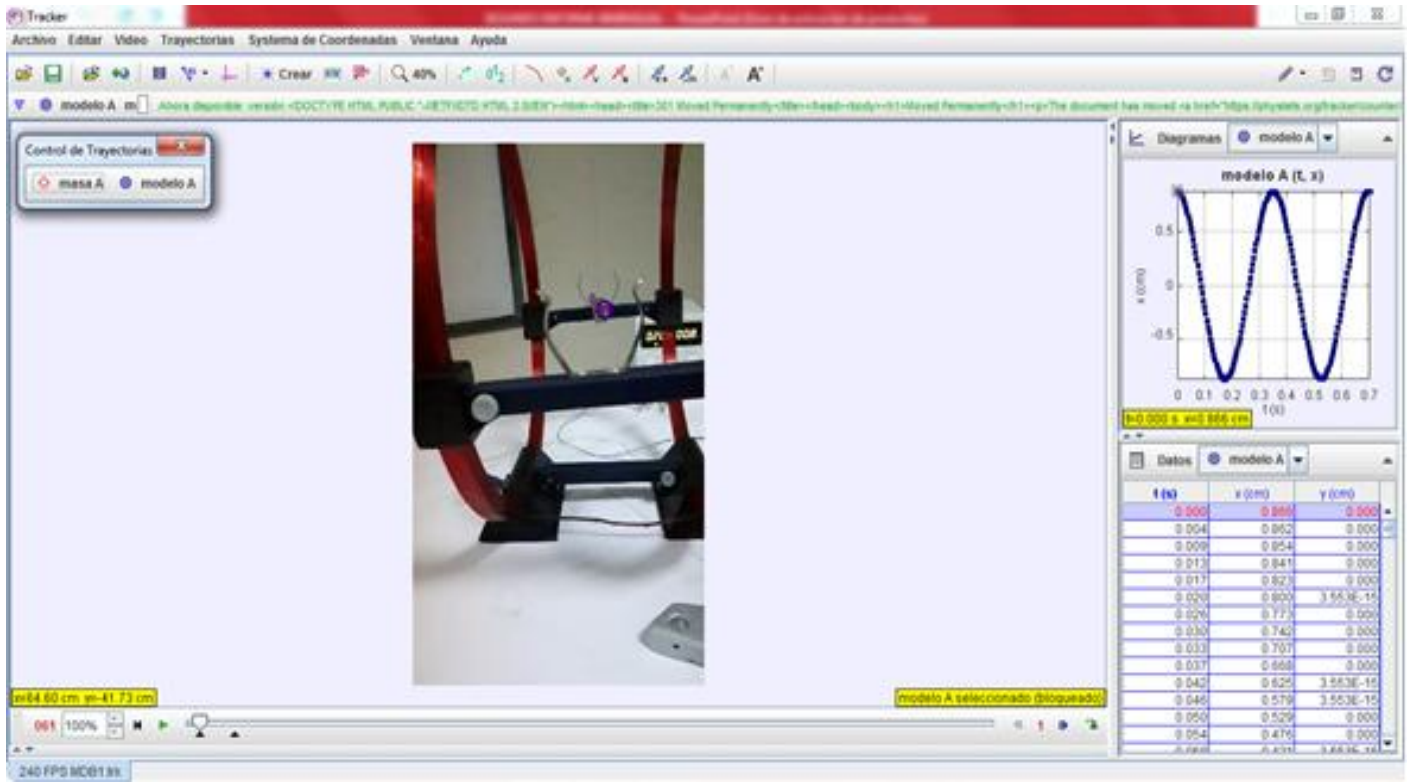
RESULTADOS

1. Momento dipolar magnético

Se observa en la figura 7 la ventana del analizador de videos Tracker correspondiente a la captura de datos experimentales de la posición vs tiempo del movimiento oscilatorio del imán de neodimio dentro del campo magnético creado por las bobinas de Helmholtz.

Figura 7

Ventana del software Tracker para el video 1, donde se muestra en la parte izquierda el equipo utilizado y en la parte derecha superior observamos la gráfica sinusoidal del modelo y la tabla de valores obtenidos de la posición vs tiempo en la parte inferior.

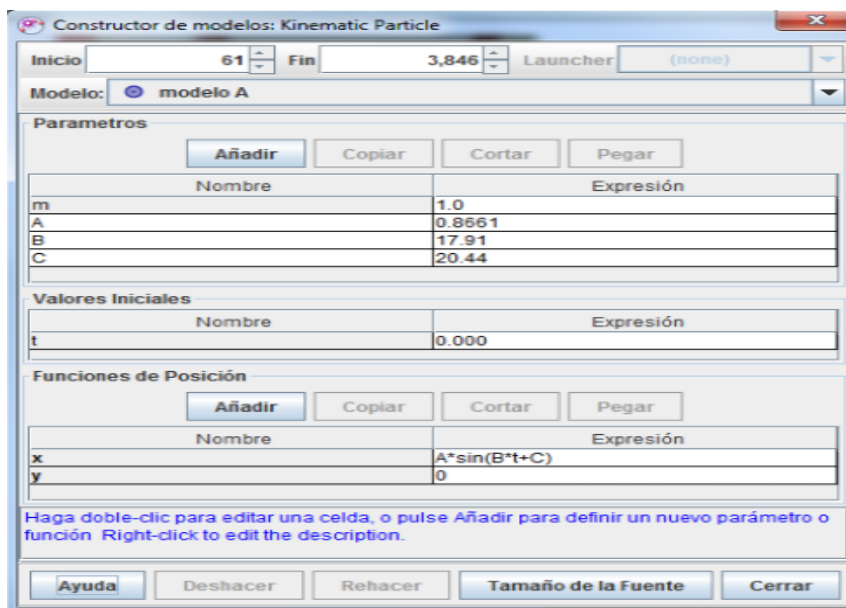


En la figura 8 se muestra la ventana del Tracker del constructor de modelos cinemáticos para los videos, los cuales se obtuvieron después de realizar un

modelamiento en el software (ver procedimiento en anexo).

Figura 8

Ventana del Tracker en donde se observa los parámetros y la ecuación cinemática que representa dicho modelo, el cuál relaciona la posición y el tiempo para del movimiento oscilatorio del imán.



Posteriormente se muestra la ecuación del movimiento oscilatorio y los parámetros del modelo obtenido, el cual se fundamenta en la teoría de un imán oscilando dentro de un campo magnético uniforme como se muestra en la figura 1.

$$x = A \sin(Bt + C) = 0,8661 \sin(17,91t + 20,44) \text{ cm} \quad (15)$$

Donde:

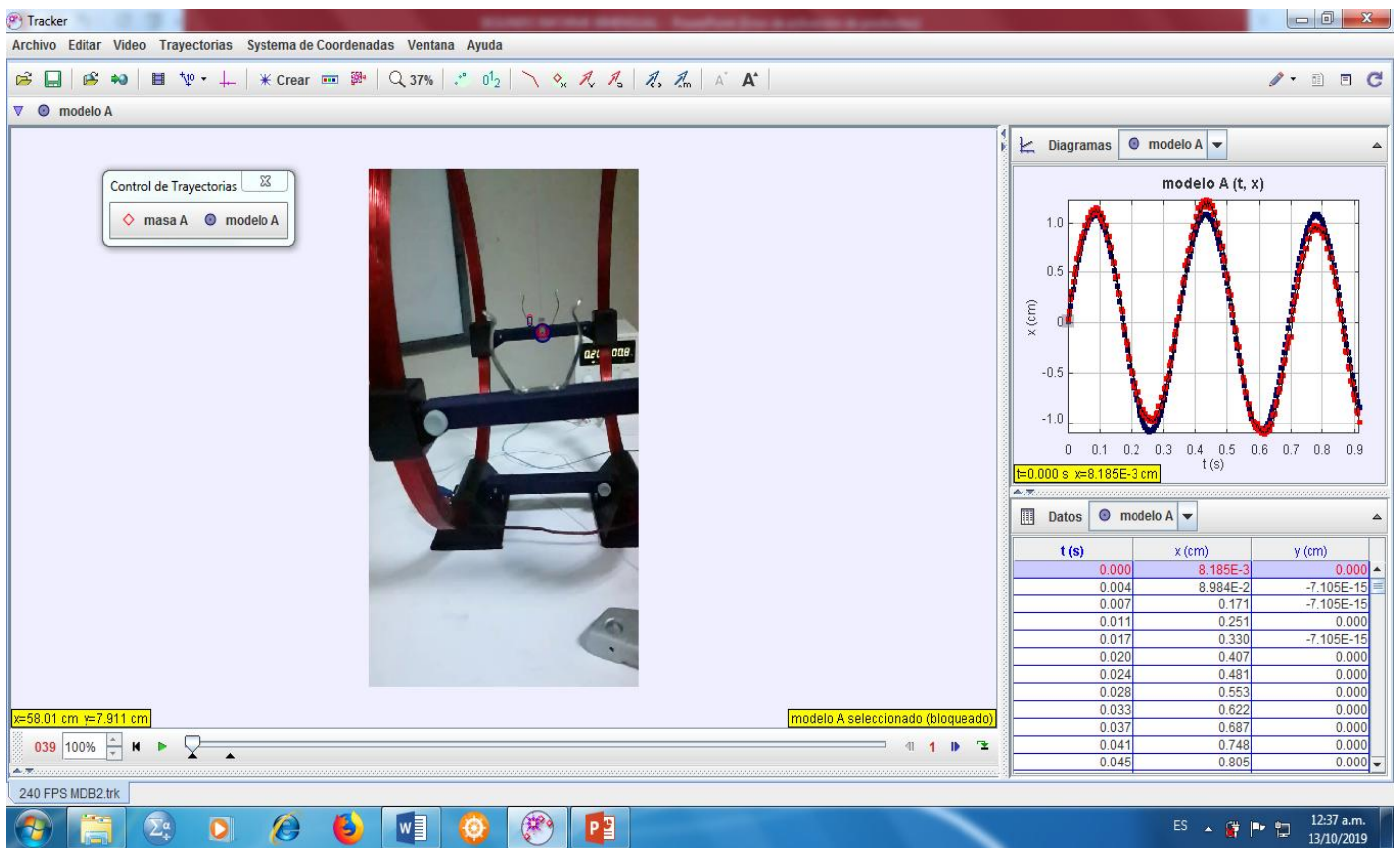
$A = 0,8661 \text{ cm}$ (Amplitud del Movimiento);

$B = \omega = 17,91 \text{ rad/s}$ (Frecuencia Angular)
 $C = 20,44 \text{ rad}$ (fase inicial)

Se observa en la figura 9 la ventana del analizador de videos Tracker correspondiente a la captura de datos experimentales de la posición vs tiempo del movimiento oscilatorio del imán de neodimio dentro del campo magnético creado por las bobinas de Helmholtz.

Figura 9

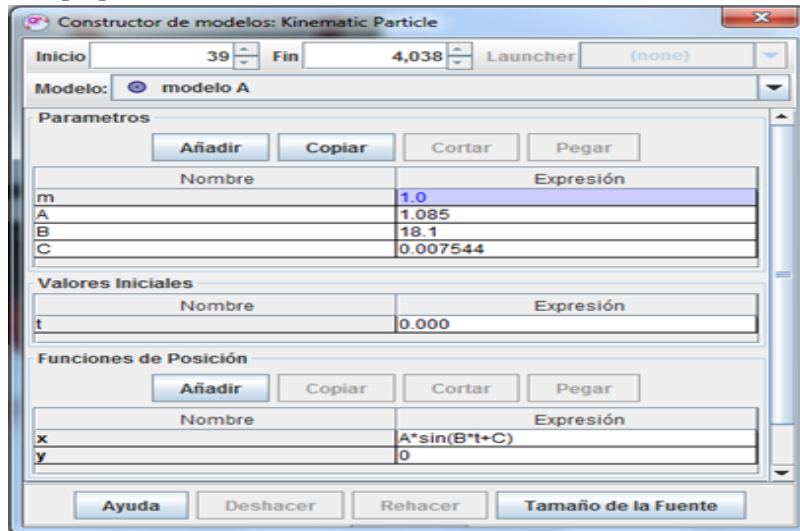
Ventana del software Tracker para el video 2, donde se muestra en la parte izquierda el equipo utilizado y en la parte derecha superior observamos la gráfica sinusoidal del modelo y la tabla de valores obtenidos de la posición vs tiempo en la parte inferior.



En la figura 10 se muestra la ventana del Tracker del constructor de modelos cinemáticos para los videos, los cuales se obtuvieron después de realizar un modelamiento en el software (ver procedimiento en anexo).

Figura 10

Ventana del Tracker en donde se observa los parámetros y la ecuación cinemática que representa dicho modelo, el cuál relaciona la posición y el tiempo para el movimiento oscilatorio del imán.



Posteriormente se muestra la ecuación del movimiento oscilatorio y los parámetros del modelo obtenido, el cual se fundamenta en la teoría de un imán oscilando dentro de un campo magnético uniforme como se muestra en la figura 1.

$$x = A \sin(Bt + C) = 1,085 \sin(18,1t + 0,00754) \text{ cm} \quad (16)$$

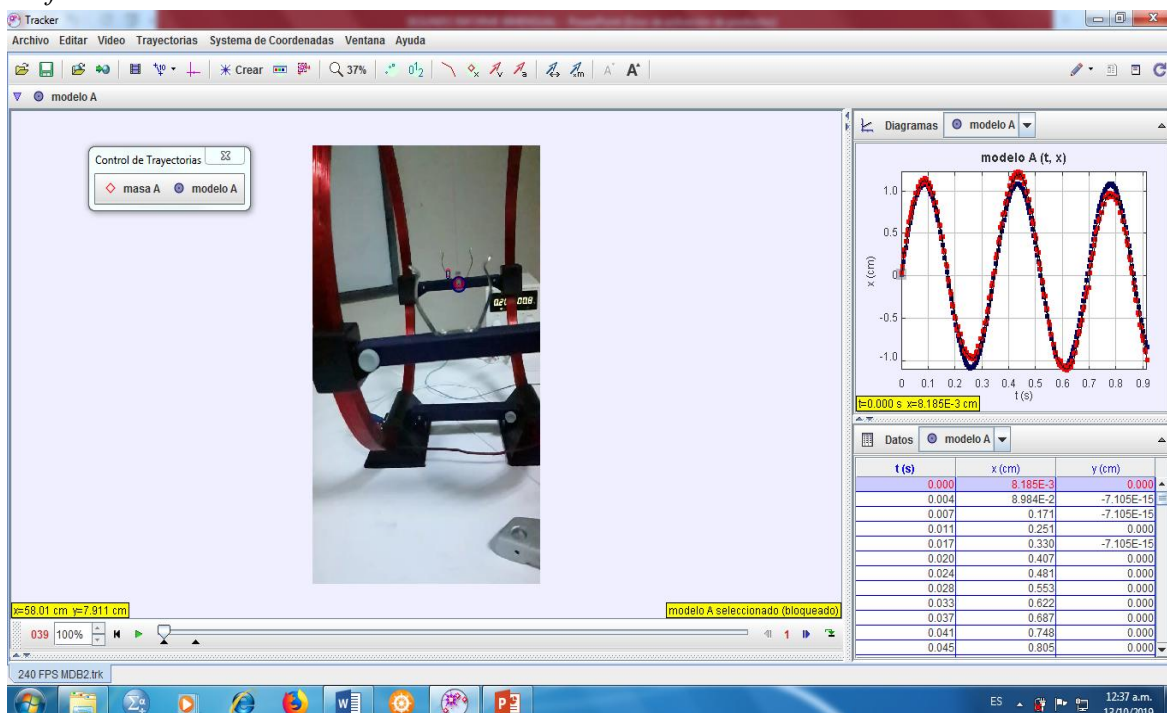
Donde:

- A = 1,085 cm (Amplitud del Movimiento)
- B = $\omega = 18,1$ rad/s (Frecuencia Angular)
- C = 0,00754 rad (fase inicial)

Se observa en la figura 11 la ventana del analizador de videos Tracker correspondiente a la captura de datos experimentales de la posición vs tiempo del movimiento oscilatorio del imán de neodimio dentro del campo magnético creado por las bobinas de Helmholtz.

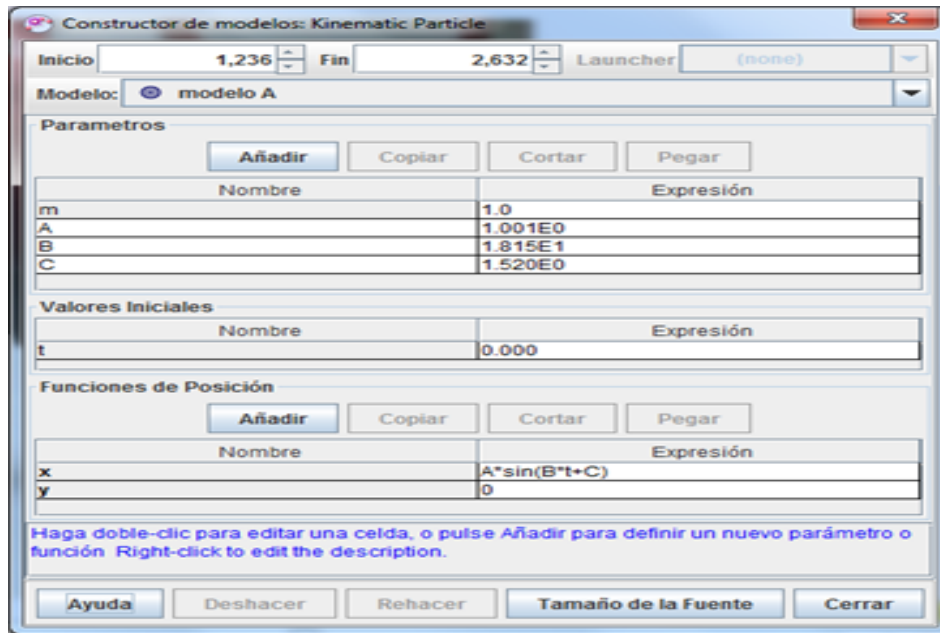
Figura 11

Ventana del software Tracker para el video 3, donde se muestra en la parte izquierda el equipo utilizado y en la parte derecha superior observamos la gráfica sinusoidal del modelo y la tabla de valores obtenidos de la posición vs tiempo en la parte inferior.



En la figura 12 se muestra la ventana del Tracker del constructor de modelos cinemáticos para los videos, los cuales se obtuvieron después de realizar un **Figura 12**

Ventana del Tracker en donde se observa los parámetros y la ecuación cinemática que representa dicho modelo, el cual relaciona la posición y el tiempo para el movimiento oscilatorio del imán.



Posteriormente se muestra la ecuación del movimiento oscilatorio y los parámetros del modelo obtenido, el cual se fundamenta en la teoría de un imán oscilando dentro de un campo magnético uniforme como se muestra en la figura 1.

$$x = A \sin(Bt + C) = 1,001 \sin(18,15t + 1,520) \text{ cm} \quad (17)$$

Donde:

- A = 1,001 cm (Amplitud del Movimiento)
- B = $\omega = 18,15$ rad/s (Frecuencia Angular)
- C = 1,520 rad (fase inicial)

Si:

$$\omega = (\omega_1 + \omega_2 + \omega_3)/3 \quad (18)$$

Reemplazando la frecuencia angular de las ecuaciones (15), (16), (17) en la ecuación (18) obtenemos,

$$\omega = 18 \text{ r/s}$$

El momento de inercia de un anillo está dado por:

$$I = 1 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2$$

El campo magnético resultante dentro de las bobinas se tiene reemplazando en la ecuación (14), si N=154 (número de espiras), a = 0,2m (radio de la espira), I = 0,14 A (corriente suministrada) y Bterr = 26,5 μ T.

modelamiento en el software (ver procedimiento en anexo).

El campo magnético terrestre en Trujillo (ubicado a 34 m.s.n.m. y 7° latitud sur) medido con el gaussímetro Keuwlsofff fue BT = 26,5 μ T (Chávez, 2019).

$$B_{res} = 123,44 \mu\text{T}$$

Reemplazando los valores obtenidos en la ecuación (8) tenemos el momento dipolar magnético:

$$m = 2,6 \text{ Am}^2$$

3.2 Momento

La magnetización del imán de neodimio N48 se obtiene reemplazando en la ecuación (10).

$$M_{exp} = 1,14 \times 10^6 \text{ A/m}$$

Si consideramos el campo magnético aplicado H = 0 en la ecuación (11), la inducción magnética recibe el nombre de inducción magnética remanente (Br), según estos valores obtenemos la magnetización del imán de neodimio N48 según IMAMAGNETS.

$$M_{ima} = 1,11 \times 10^6 \text{ A/m}$$

La variación porcentual está dada por:

$$V_p = \left(\frac{V_{exp} - V_{ima}}{V_{ima}} \right) \times 100\% = \left(\frac{1,14 \times 10^6 - 1,11 \times 10^6}{1,11 \times 10^6} \right) \times 100\%$$

De donde se tiene:

$$V_p = 2,7\%$$

DISCUSIÓN

Se muestra en las figuras 7, 9 y 11 las gráficas de la posición vs tiempo del movimiento oscilatorio del imán, los cuáles presenta gráficas de tipo sinusoidal y a partir de estas funciones sinusoidales lo modelamos para encontrar las ecuaciones matemáticas que represente dicho modelo.

Al comparar el valor promedio de magnetización del imán de neodimio N48 que figura en la tabla 2 del fabricante de imanes IMAMAGNETS (ver anexo) con el calculado, obtenemos una variación porcentual de 2,7 %, lo cual nos muestra que nuestro resultado es aceptable.

CONCLUSIONES

Se calculó la frecuencia angular del movimiento oscilatorio del imán de neodimio N48, mediante el analizador de videos Tracker, cuyo valor es 18 r/s².

Se determinó también el campo magnético resultante dentro de las bobinas de helmholtz haciendo uso del imán de neodimio N48, cuyo valor es 123,44T.

Se determinó que el momento dipolar magnético del imán de neodimio N48, mediante el uso de las bobinas de helmholtz es 2,6 Am².

Se determinó la magnetización del imán de neodimio N48 a través del momento dipolar magnético cuyo valor es 1,14x10⁶ A/m

Al comparar los valores de la magnetización conocido en tablas con el experimental, se obtuvo una variación porcentual de 2,7 %, lo cual nos indica la veracidad del método.

Finalmente, también se puede realizar el mismo estudio, usando diferentes tipos de configuraciones de imanes de neodimio.

REFERENCIAS

Aguilar, P.; Chávez, B.; Jáuregui, S. (2018). Using analog instruments in Tracker videobased experiments to understand the phenomena of electricity and magnetism in Physics education. *European Journal of Physics* 39 035204.

Álvarez, M.; Beléndez, A.; Hernández, A. (2011). *Fundamentos Físicos de la Ingeniería: campo magnético*. Editorial Universidad de Alicante, Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal. España.

Araujo, A.; Félix, J. (2016). Diseño, construcción y caracterización de un dispositivo para generar un campo magnético uniforme. *Revista de Divulgación Científica: Jóvenes en la Ciencia* 2(1): 252-257.

Beléndez, A. (2000). *Fundamentos de la ingeniería*. 1ra Edición. Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la señal. Editorial Universidad de Alicante. Valencia, España. 9 pp.

Bisquert, J.; Manzanares, J.; Mafé, S. (1992). Determinación experimental del momento dipolar magnético: Un método estático y dos dinámicos. *Revista española de física, ISSN0213-862X* 6(2): 43-47.

Brown, D. (2009). *Tracker video analysis and modelling tool for Physics*. Cabrillo College, California, U.S.A.

Caicedo, H.; Santiago, E.; Castañeda, H.; Hernández, C. (2018). Cohetes hidráulicos con video en cámara lenta. *Revista Mexicana de Física* 64: 232-240.

Chávez, M. (2019). Efectos de la intensidad del campo magnético del imán del sistema imán-aluminio sobre el frenado electromagnético. Trujillo, Perú.

Díaz, D.; Cala, F. (2014). Análisis de videos y modelado de sistemas físicos sencillos como estrategia didáctica. *Revista Educación en Ingeniería, ISSN1900-8260* 9 (18): 190-200.

Fano, W.; Alonso, R.; Quintana, G. (2017). El campo magnético generado por las bobinas de Helmholtz y su aplicación a la calibración de sondas. *Revista elektron, ISSN2525-0159* 1(2): 91-96.

Fuentes, C. (2011). *Momento Magnético de un imán*. Editorial Universidad nacional Autónoma de Honduras, Escuela de Física. Honduras.

- Grande, A. (2003). Imanes hoy. Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales 97(2): 289-302.
- Kane, J.; Sternheim, M. (2007). Física, Segunda edición. Editorial Reverte, S.A. Barcelona, España.
- Montero, G.; García, A.; Ríos, V.; Román, A. 2018. Estudio de la Caída libre utilizando diferentes técnicas experimentales. Latin-American Journal of Physics Education, EISSN 1870-9095 12 (1): 1302-1310.
- Pérez, G. (2016). Imanes Permanentes: Características, Aplicaciones y Futuro. Revista de la Académica Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales 40(155): 221-223.
- René, R. (2003). Bobina de Helmholtz. Revista Brasileira de Ensino de Física 25 (1): 40-44.
- Restrepo, A.; Franco, E.; Pinedo, C. (2014). Metodología de Diseño e Implementación de un Sistema para Generación de Campos Magnéticos Uniformes con bobinas Helmholtz Cuadrada Tri-Axial. Revista de Información Tecnológica 25(2): 3-14.

ANEXOS


Manejo y uso del analizador de videos Tracker

Procedimiento:

- Abrir el software Analizador de videos Tracker.
 - Importar el vídeo del Archivo seleccionado.
 - Luego para rotar el vídeo hacemos lo siguiente:
En el software la opción video, Filtro, Nuevo, Rótate - 90°
 - Identificar el ajuste de corte
Seleccionamos el rango de medición
Seleccionamos el tamaño de paso dado que se tiene muchos datos
Aceptar
 - Elegir la escala de calibración (para el caso del imán)
Opción escala de calibración, Nuevo, vara de calibración, presionamos ship y con el maus lo dirigimos hacia el inicio donde queremos marcar presionando el lado izquierdo del maus, luego presionamos ship y con el maus lo dirigimos hacia dónde queremos marcar el final presionando el lado izquierdo del maus y traza una línea.
Opción editar, Numbers, Units (mm, cm, etc.).
Escribir la dimensión correcta en la línea trazada, teniendo en cuenta una escala conocida.
- Fijar el eje de coordenadas
Teniendo en cuenta que el origen de coordenadas debe ubicarse desde donde se empiezan a tomar las medidas dentro del rango clasificado y el ángulo necesario desde el eje horizontal
 - Crear trayectoria nueva
Opción crear masa puntual, masa, trayectoria automática, ship-ctrl y con el maus lo dirigimos donde queremos marcar presionando el lado izquierdo del maus donde empezamos a tomar las medidas.
 - En la parte izquierda del Tracker hacer click derecho del maus en datos y marcar las Variables de posición, tiempo, frecuencia angular, step y frame.
 - Dirigir con el maus y hacer click derecho en la gráfica.
 - Herramientas de datos, click en analize, click en constructor de ajustes en la parte inferior, presionar nueva luego añadir parámetros y la ecuación que gobierna el movimiento, teniendo en cuenta que los parámetros son opcionales, luego ajustamos los parámetros, posteriormente le asignamos a la curva un color azul para distinguirlo, luego marcamos autoajuste.
 - Crear modelo, modelo analítico de partícula, constructor de modelos: Kinematic particle, agregar parámetros y la ecuación del movimiento oscilatorio y presionar cerrar ventana.
 - Reproductor de video y realizar el control de la trayectoria para ver los datos experimentales y los datos del modelo.
 - Guardar el trabajo en un archivo Tracker.
 - Copiar o pegar (datos, gráficas, etc.) para reportes.

Tabla 2

Propiedades físicas de imanes de Neodimio (según IMAMAGNETS).

 Neodymium Magnets	Grado	Nomenclatura	Remanencia		Fuerza Coercitividad		Coercitividad Intrínseca		Energía Máxima Producto		Temperatura de Trabajo
			Br		bHc		Fuerza lhc		(BH) max		Max. Temp. trabajo: (°C)
			Br max (T)	Br min (T)	HcB min (kA/m)	HcB max (kA/m)	HcJ min (kA/m)	HcJ max (kA/m)	BHmax min (kJ/m³)	BHmax max (kJ/m³)	
NdFeB N33 anisotropic	N33	NdFeB 247/96	1,14	1,17	820	876	955	-	247	263	80
NdFeB N35 anisotropic	N35	NdFeB 263/96	1,17	1,20	860	900	955	-	263	279	80
NdFeB N38 anisotropic	N38	NdFeB 287/96	1,22	1,26	900	915	955	-	287	303	80
NdFeB N40 anisotropic	N40	NdFeB 303/96	1,26	1,29	908	924	955	-	303	318	80
NdFeB N42 anisotropic	N42	NdFeB 318/96	1,29	1,31	915	939	955	-	318	334	80
NdFeB N45 anisotropic	N45	NdFeB 342/96	1,33	1,36	924	955	955	-	342	358	80
NdFeB N48 anisotropic	N48	NdFeB 367/88	1,38	1,40	810	860	875	-	367	383	80
NdFeB N50 anisotropic	N50	NdFeB 383/88	1,40	1,43	794	860	875	-	383	398	80
NdFeB N52 anisotropic	N52	NdFeB 398/88	1,42	1,45	794	860	875	-	398	414	80
NdFeB N35M anisotropic	N35M	NdFeB 263/111	1,17	1,20	868	900	1114	-	263	279	100
NdFeB N38M anisotropic	N38M	NdFeB 287/111	1,22	1,26	900	939	1114	-	287	303	100
NdFeB N40M anisotropic	N40M	NdFeB 303/111	1,26	1,29	924	955	1114	-	303	318	100
NdFeB N42M anisotropic	N42M	NdFeB 318/111	1,29	1,32	955	987	1114	-	318	334	100
NdFeB N45M anisotropic	N45M	NdFeB 342/111	1,33	1,35	971	1003	1114	-	342	358	100
NdFeB N30H anisotropic	N30H	NdFeB 223/135	1,08	1,12	794	836	1353	-	223	239	120
NdFeB N33H anisotropic	N33H	NdFeB 247/135	1,14	1,17	836	876	1353	-	247	263	120