

Efecto del fluido y de la fuerza de frenado electromagnético sobre el movimiento de caída de un imán permanente de neodimio

Effect of fluid and electromagnetic braking force on the falling motion of a permanent neodymium magnet

 **Ausberto Wilson Urquiaga Vásquez**

Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Perú

 **Pablo Aguilar Marin**

Universidad Nacional de Trujillo, Perú

RESUMEN

En el presente trabajo se determinó el efecto del fluido y de la fuerza de frenado electromagnético sobre el movimiento de caída de un imán permanente de neodimio. Se introdujo el imán a través de la barra metálica sumergido ligeramente dentro del fluido y se libera el imán para realizar el movimiento a través de la barra metálica. El movimiento vertical 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 los parámetros y obtener las ecuaciones cinemáticas del modelo. Finalmente, de los resultados obtenidos se llegó a la conclusión que la fuerza de viscosidad y la fuerza de frenado electromagnético ayudan a amortiguar el movimiento de caída del imán de neodimio a través de las barras metálicas. Así mismo se determinó que la fuerza de frenado electromagnético sobre el imán es mayor que la fuerza de viscosidad.

Palabras clave: Imán de neodimio; fuerza de frenado electromagnético; fuerza de viscosidad; velocidad límite; analizador de videos Tracker.

ABSTRACT

In the present work, the effect of the fluid and the electromagnetic braking force on the falling motion of a permanent neodymium magnet was determined. The magnet was introduced through the metal bar slightly submerged into the fluid and the magnet was released for movement through the metal bar. The vertical movement of the magnet was filmed with a Samsung S8 video camera that has a rate of 240 frames per second. The video was analyzed with the Tracker software to calculate the parameters and obtain the kinematic equations of the model. Finally, from the results obtained, it was concluded that the viscosity force and the electromagnetic braking force help to dampen the falling movement of the neodymium magnet through the metal bars. Likewise, it was determined that the electromagnetic braking force on the magnet is greater than the viscosity force.

Keywords: Neodymium magnet; electromagnetic braking force; viscosity force; limit speed; Tracker video analyzer.

INTRODUCCIÓN

Una de las aplicaciones del frenado electromagnéticos es la ley de inducción electromagnética de Faraday y la ley de Lenz. La ley de inducción nos indica que el voltaje inducido en un circuito cerrado es proporcional a la rapidez con la que cambia en el tiempo el flujo magnético que atraviesa una superficie determinada. Así mismo, muestra la ley de Lenz que las corrientes inducidas por los voltajes fluyen de manera que se oponen a los cambios en el flujo magnético (Sears et al, 2009).

Los elementos de frenado por corrientes de Foucault basados en el principio del efecto de la corriente de Foucault que produce fuerza electromagnética, con bajo desgaste mecánico, rápido tiempo de respuesta, alta estabilidad de frenado y simple mantenimiento diario, pueden utilizarse como dispositivos de frenos auxiliares y tienen una amplia perspectiva de aplicación en elevadores de tracción, automóviles eléctricos, transporte ferroviario, entre otros. Las corrientes inducidas constituyen un fenómeno electromagnético establecido por León Foucault en 1851. Las corrientes se manifiestan cuando un conductor pasa a través de un campo magnético variable en el tiempo. Este desplazamiento induce que los electrones en el interior del conductor circulen en forma de corrientes circulares, las cuales dan origen a campos magnéticos que se oponen al campo original, siguiendo la Ley de Lenz. La intensidad de estas corrientes aumenta en relación con la fuerza de campo magnético, la conductividad del material y la velocidad del movimiento relativo (Sung et al, 2009).

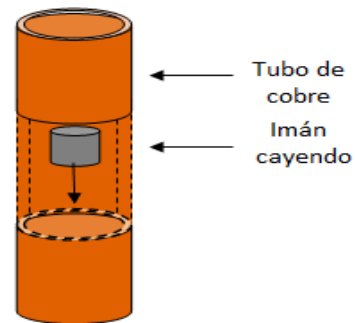
El frenado electromagnético, conocido también como freno de Foucault, es un mecanismo usado en locomotoras y otros vehículos pesados, como camiones y autobuses. Este mecanismo funciona mediante un electroimán que crea un campo magnético alrededor de las ruedas metálicas en rotación, lo que induce corrientes de Foucault en ellas.

Estas corrientes inducidas en el metal generan una oposición a su movimiento, logrando que la energía se pierda en forma de calor y de esta manera disminuyan su velocidad las ruedas. Al usar freno por corrientes de Foucault no hay contacto físico entre la rueda y el mecanismo de frenado, lo que reduce o elimina el desgaste de las piezas. A bajas velocidades, este sistema

de frenado funciona adecuadamente; sin embargo, a altas velocidades, se considera un método muy confiable tanto para frenados normales como para emergencias. Se han llevado a cabo diversos estudios en los que se utilizan un imán en caída que cae por la aceleración de la gravedad dentro de tubos cilíndricos de cobre (ver figura 1). La atracción y repulsión son las fuerzas que frenan el movimiento de caída del imán (Aguilar et al, 2018).

Figura 1

Mostramos el desplazamiento de un imán en forma de cilíndrico que se mueve dentro de un tubo de cobre.



Así mismo la Ley de Faraday nos indica que el voltaje inducido en un circuito cerrado es directamente proporcional a la rapidez con que cambia en el tiempo el flujo magnético que atraviesa una superficie cualquiera.

$$V_{ind} = - \frac{d \varphi_B}{d t} = - \frac{d}{d t} \int \vec{B} \cdot d \vec{A} \quad (1)$$

De la relación anterior el signo negativo nos indica que el voltaje inducido se opone a la variación del flujo magnético. Por lo tanto, “El sentido de la corriente inducida es tal que su propio campo magnético contrarresta el cambio en el flujo magnético”, lo cual constituye la Ley de Lenz.

Si tenemos una bobina compuesta por N espiras, la ecuación (1) toma la forma siguiente.

$$V_{ind} = - N \frac{d \varphi_B}{d t} = - N \frac{d}{d t} \int \vec{B} \cdot d \vec{A} \quad (2)$$

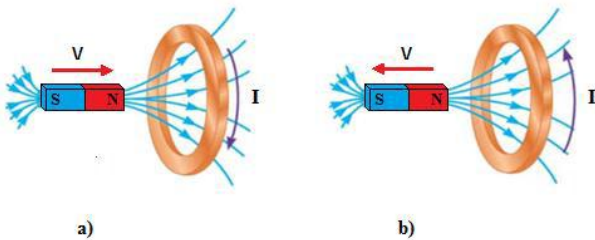
El flujo magnético que atraviesa una de las espiras se denota como El flujo magnético que atraviesa una de las espiras se denota como φ_B .

La ley de Lenz nos indica que las corrientes inducidas en un conductor actúan de manera que se oponen a los cambios en el flujo magnético que las generan. En la

figura 2 se indica la ley de Lenz para el caso de un imán que se mueve con velocidad V acercándose y alejándose de una espira conductora.

Figura 2

a) Cuando un imán se mueve hacia la espira conductora y b) Cuando el imán se retira de la espira conductora.



Si el imán se acerca a las bobinas se establece una corriente inducida que circulará de tal manera que producirá un campo magnético opuesto al aumento del flujo magnético causado por el acercamiento del imán; es decir la corriente inducida en el circuito genera un campo magnético inducido que se opone al cambio del flujo magnético que lo produce. Cuando se aleja el imán de la espira, la corriente inducida circulara en sentido opuesto, contrarrestando la disminución del flujo magnético provocado por el alejamiento del imán, si el flujo generado por el campo magnético es menor en la bobina, la corriente inducida generara un campo que tiene el mismo sentido que la fuerza electromotriz(fem) que la produce. En los dos casos mostrados en la figura 2, la variación del flujo magnético, ya sea por acercamiento o alejamiento del imán, provoca una corriente inducida en sentidos opuestos, dependiendo cómo varía el campo B que atraviesa la espira.

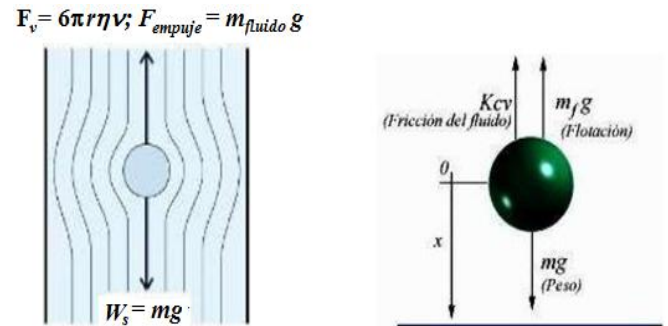
Para el caso que se describe el movimiento vertical de una esfera de masa “m” y radio “r” en el seno de un fluido viscoso, la fuerza de fricción experimentada por objetos esféricos moviéndose en el seno de un fluido viscoso se le conoce como la ley de Stokes, en honor al físico irlandés Sir George Stokes (1819-1903), quien la dedujo por primera vez en 1845. Esta ley establece que la fuerza de rozamiento que se opone al movimiento de una esfera a través de un fluido, es proporcional a la viscosidad del fluido, el diámetro de la esfera y a la velocidad de la misma en el seno de los fluidos.

Si la esfera cae verticalmente en el líquido, sobre ella actuaran las siguientes fuerzas el peso del propio cuerpo (W_s), la fuerza de empuje hidrostático (F_{empuje}) y la

fuerza de viscosidad o fuerza de fricción (F_{fr}), como se muestra en la Figura 3.

Figura 3

Diagrama de la esfera donde se observa todas las fuerzas que intervienen, cuando se mueve en un fluido líquido.



Aplicando la segunda ley de Newton en la dirección mostrada, dada por:

$$-\downarrow \sum F_z = m a_z \tag{3}$$

Cuando el peso y el empuje hidrostático permanecen constantes, la aceleración produce un incremento continuo de la velocidad. Lo que a su vez incrementa la fuerza viscosa. Sin embargo, en un momento dado la fuerza viscosa iguala exactamente a la suma del peso y el empuje, haciendo que la fuerza neta en esa dirección sea cero. En ese instante, la velocidad de la esfera se vuelve cero y a partir de ese punto, la esfera continúa moviéndose a una velocidad constante conocida como velocidad terminal o velocidad límite.

Reemplazando en la ecuación (3) se tiene lo siguiente:

$$W_s - W_f - F_v = \left[\rho_s \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right) - \rho_f \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right) \right] g - 6 \pi r \eta v = 0 \tag{4}$$

Se obtiene el coeficiente de viscosidad dinámica, reduciendo la ecuación (4), en la forma:

$$\eta = \frac{2 g r^2 (\rho_s - \rho_f)}{9 v_L} \tag{5}$$

De la ecuación del movimiento rectilíneo uniforme, se tiene la ecuación para la velocidad máxima de la esfera dada por (L es la distancia entre dos puntos y t el tiempo)

$$L = v_L t \tag{6}$$

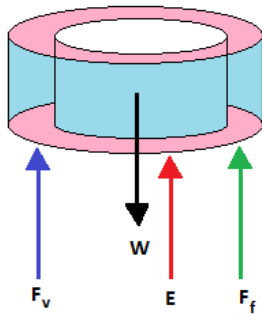
Al reemplazar la ecuación (6) en (5) se tiene (Vásquez 2014).

$$\eta = \frac{2 g r^2 (\rho_s - \rho_f)}{9 L} t \quad (7)$$

Para el caso cuando se deja caer en un fluido viscoso, el movimiento de un imán en forma de aro a través de una barra cilíndrica de material no magnético, este caso se desarrolla de forma similar cuando se deja caer una pequeña esfera de acero en un fluido viscoso. En la figura 4 se muestran todas las fuerzas que intervienen en el imán de neodimio cuando pasa a través de una barra cilíndrica de material no magnético en el seno de un fluido viscoso.

Figura 4

Diagrama de las fuerzas que actúan sobre el imán de neodimio, donde se muestra la fuerza viscosa del fluido (F_v), el peso del imán (W), el empuje (E) hidrostático en el imán que ejerce el fluido y el frenado de la fuerza (F_f) que se presenta en el imán cuando el imán se mueve a través de un material no magnético.



De la segunda ley de Newton se tiene la relación que experimenta dicho movimiento, como se muestra en la ecuación (3).

$$m \left(\frac{d v}{d t} \right) = W - E_{frenado} - F_{viscosidad} \quad (8)$$

$$m \left(\frac{d v}{d t} \right) = m g - \rho g V - v \left(k + \frac{\eta A}{d} \right) \quad (9)$$

$$v' (t) = \left(\frac{m g - \rho g V}{k + \eta A/d} \right) \left[1 - \exp \left(- \frac{k + \eta A/d}{m} t \right) \right] \quad (10)$$

Haciendo:

$$v'_L = \frac{m g - \rho g V}{k + \eta A/d}; v'_L = \frac{m g - \rho g V}{k + \eta A/d}; k' = k + \eta A/d \quad (11)$$

Se tiene:

$$v' (t) = v'_L \left[1 - \exp \left(- \frac{t}{\tau'} \right) \right] \quad (12)$$

Si τ' es la constante de tiempo de frenado, v'_L límite de velocidad, k' es el parámetro de frenado dentro de un fluido viscoso.

Así mismo de la ecuación (10) se tiene la trayectoria vertical del imán, dada por:

$$y(t) = \left(\frac{m g - \rho g V}{(k + \eta A/d)^2} \right) m \left[\frac{t}{\frac{m}{k + \eta A/d}} - 1 + \exp \left(- \frac{k + \eta A/d}{m} t \right) \right] \quad (13)$$

Teniendo en cuenta la ecuación (11) y (12) y considerando que se desplaza el imán en el interior de un fluido viscoso, se tiene la fuerza de frenado:

$$F'_{frenado} = -k' v' \quad (14)$$

Así, reemplazando (11) y (12) en (14) podemos obtener una expresión para la fuerza de frenado magnético en el seno de un fluido viscoso.

$$F'_{frenado} = - (m g - \rho g V) \left[1 - \exp \left(- \frac{k + \eta A/d}{m} t \right) \right] \quad (15)$$

El programa Videos Tracker se emplea para analizar grabaciones en video, desarrollan modelos que muestran, basándose en el programa Java (Brown, 2009), que integra funciones de video y simulación computacional. Esta herramienta facilita el seguimiento de objetos, la medición de su ubicación, velocidad y aceleración, además de permitir la obtención de gráficos, la aplicación de efectos visuales, el uso de sistemas de referencia diversos, puntos de calibración y perfiles de línea para analizar patrones espectroscópicos 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; Díaz y Cala, 2014; Pablo et al., 2018).

Entre los trabajos consultados y que han estudiado el efecto de la fuerza de frenado electromagnético tenemos los siguientes:

Irvine et al (2012) desarrollaron un modelo experimental para el estudio de frenado electromagnético de la fuerza y la rapidez terminal, mediante caída de un imán cilíndrico permanente de Neodimio a medida que se mueve usando dos masas, dentro de un tubo cilíndrico de cobre.

Gonzales y Hernández (2010) realizaron un estudio experimental sobre freno magnético, a través del movimiento de un deslizador de aluminio sobre un riel de aire en forma horizontal y sobre un riel en forma inclinada.

Donoso y Ladera (2010) realizaron un estudio experimental de la dependencia de la fuerza de frenado magnético a la distancia de caída del imán, cuando se deja caer dos imanes idénticos dentro de un tubo de cobre.

Molina et al (2012) diseñaron una estructura experimental para estudiar la fuerza de frenado electromagnético mediante las corrientes de Foucault, usando un imán de neodimio de pellet cilíndrico en una canaleta inclinada de cobre de dos espesores.

Pathare et al (2014) realizaron estudios de la fuerza de frenado electromagnético, mediante el diseño y construcción de un temporizador para medir la rapidez terminal de un imán cilíndrico permanente de neodimio que cae dentro de un tubo cilíndrico de cobre de diversos espesores.

Xavier y Amritha (2014) desarrollaron un modelo para determinar el frenado electromagnético de la fuerza, cuando cae un imán cilíndrico de neodimio en el interior de un canal de aluminio, haciendo una comparación entre el modelo teórico y el análisis de video.

Chávez (2017) desarrollo un prototipo experimental para determinar el frenado electromagnético de la fuerza, cuando se suelta un imán permanente de neodimio sobre un tubo cilíndrico de aluminio, haciendo uso del análisis de video mediante el software Tracker (exposición en la XXVII Jornada Nacional – XIV Jornada Internacional de Investigación Científica de Postgrado UNT)

La mayoría de estudios realizados solo se ha estudiado el efecto de frenado electromagnético de la fuerza sobre la caída de un imán permanente de Neodimio, dicho fenómeno se ha llevado a cabo dejando caer un imán

cilíndrico de neodimio dentro de tubos cilíndricos de cobre y aluminio en el aire, en este caso, analizaremos el movimiento de caída de un imán de neodimio en forma de aro a través de una barra cilíndrica hecha de aluminio, bronce y cobre. Colocada verticalmente y concéntrica con el imán en el seno de un fluido viscoso. Específicamente se estudiará cuál es el efecto que se produce sobre el movimiento de caída de un imán permanente de neodimio, cuando actúa sobre el fluido y sobre la fuerza de frenado que se presenta en la barra de metal no magnético.

Las Variables de estudio que forman parte de la presente Investigación, considerando su relación de dependencia, tipo y escala de medición se clasifican en la siguiente manera:

Variable Independiente: Velocidad terminal (tiempo de caída, constante de frenado, constante de amortiguamiento).

Variables dependientes: Fuerza de viscosidad y la fuerza de frenado electromagnético.

El objetivo de estudio de este trabajo de Investigación fue determinar el efecto del fluido y de la fuerza de frenado electromagnético sobre el desplazamiento de caída de un imán permanente de Neodimio N48, y sea útil a la sociedad que se dedica a este campo de la Investigación.

MATERIALES Y MÉTODO

1. Objeto de estudio

El objeto de estudio de este trabajo de investigación está dado por el imán de neodimio, barras de cobre, bronce y aluminio y aceite como se observa en la figura 5.

Figura 5

a) Imán de forma circular en forma de anillo, fabricado con Neodimio de grado N48, b) Barras cilíndricas de cobre, bronce y aluminio.



(a)



(b)

2. Instrumentos, equipos y materiales

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

- Software Tracker se utiliza para analizar los videos y registrar los valores de la posición en relación con el 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.
- Trípode de plástico para sujetar la cámara de vídeo de un celular.

- Soporte universal con varilla de fierro y nuez (para sujetar las barras metálicas.)
- Recipiente de vidrio transparente (5,5cmx5, 5 cm x15cm), que se utiliza para sumergir los imanes a través de las barras metálicas.
- Madera cuadrada de 5,5cmx5, 5 cm que sirve para colocar en el fondo del recipiente de vidrio como guía para las barras metálicas.
- Base de Melamina de 10cmx10cmx10cm, que sirve de apoyo al recipiente de vidrio transparente.

3. Métodos y técnicas

Frenado electromagnético de un imán de Neodimio a través barras de aluminio, cobre y bronce sumergido en fluido viscoso.

- Ubicamos la base de Melamina.
- Se llena el recipiente de vidrio con el fluido y se coloca sobre la base de Melamina.
- Se fijó la barra cilíndrica en el soporte universal por un extremo, y por el otro extremo queda en el centro de la madera cuadrada que sirve como guía.
- Se realizó una marca en la parte lateral del imán, para detectarlo con el software Tracker.
- Se coloca el imán de neodimio a través de las barras metálica y ligeramente sumergido en el fluido y se sujeta con la mano.
- Seguidamente se suelta el imán de neodimio y se filma el movimiento.
- Posteriormente se registró el desplazamiento del imán de neodimio con el celular a través de barras metálicas sumergidas en un fluido viscoso. Así mismo se realizaron 4 videos para cada barra y se escogió el mejor.
- Finalmente exportamos los videos al software Tracker para su respectivo análisis, de donde se obtuvo los parámetros para construir una formulación que relaciona la posición con el tiempo, la velocidad con el tiempo, la aceleración con el tiempo, la fuerza de frenado y a partir de ello se determinó la constante de tiempo de frenado y la constante de amortiguamiento para el sistema.

Figura 6

Diseño para determinar el frenado electromagnético de un imán de Neodimio mediante barras metálicas sumergidas en un fluido viscoso (aceite grado 40).



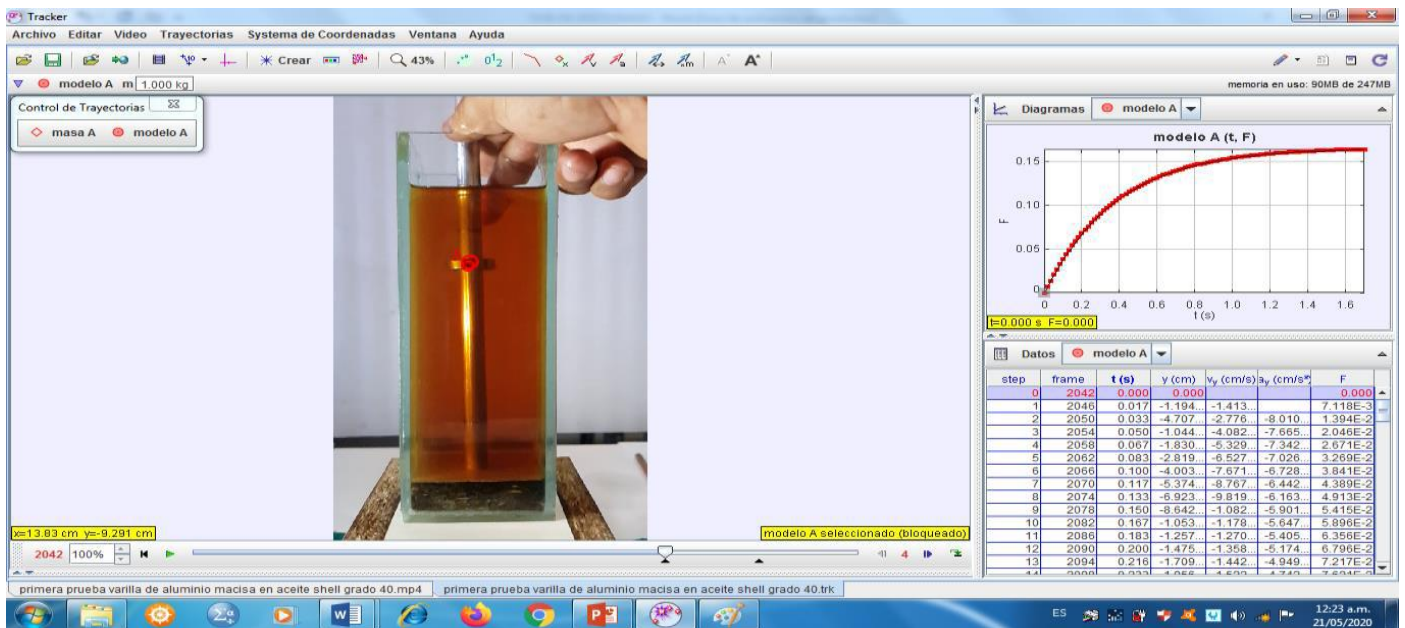
RESULTADOS

1. El imán se mueve en la barra cilíndrica de Aluminio que está sumergido en aceite grado 40

En la figura 7 se puede ver la ventana del analizador de videos Tracker que es un software utilizado para obtener datos experimentales relacionados con la posición vs tiempo del desplazamiento vertical del imán a través de la barra cilíndrica de aluminio sumergida en aceite grado 40.

Figura 7

Ventana del Tracker donde se muestra en la parte izquierda parte del equipo utilizado y en la parte derecha superior observamos la gráfica exponencial del modelo y la tabla de valores obtenidos de la posición vs tiempo en la parte inferior.

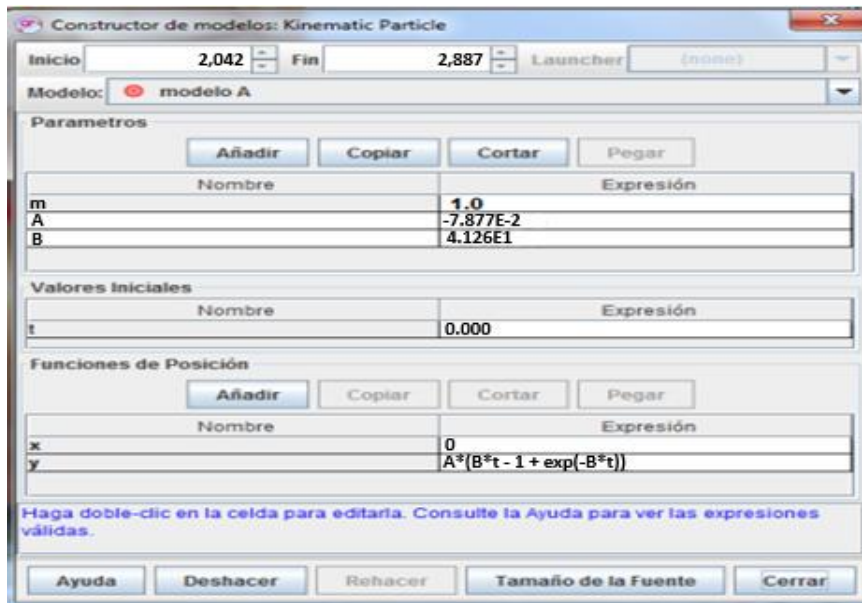


Se muestra en la figura 8, el constructor de modelos cinemáticos del Tracker para el desplazamiento vertical del imán a través de la barra cilíndrica de aluminio

sumergido en aceite grado 40, los cuales se obtuvieron después de realizar un modelamiento en el software.

Figura 8

Constructor de modelos cinemáticos del Tracker que muestra la ecuación cinemática y sus respectivas constantes, la cual relaciona la posición vs tiempo para el desplazamiento vertical del imán a través de la barra cilíndrica de aluminio sumergida en aceite grado 40.



Posteriormente se muestra la ecuación del movimiento vertical y los parámetros del modelo obtenido, el cual se basa de manera análoga a una pequeña esfera de acero que desciende en el seno de un fluido viscoso.

$$Y = A'(B't - 1 + e^{-B't}) \quad (16)$$

Si, $A' = 0,07877$ cm (desplazamiento vertical) y $B' = 41,26$ s⁻¹ (Frecuencia del movimiento) Luego reemplazando en la ecuación (16) se tiene la ecuación exponencial de la posición vs tiempo para dicho modelo.

$$Y = -0,07877(41,26 t - 1 + e^{-41,26 t}) \text{ cm} \quad (17)$$

Asimismo, se muestran las relaciones de la velocidad, fuerza de frenado magnético, la constante de frenado en el seno del fluido viscoso, la constante de tiempo de frenado y la fuerza de viscosidad

$$v_y = AB(1 - e^{-Bt}) = v_L(1 - e^{-t/\tau}) = 3,25(1 - e^{-41,26t}) \text{ cm/s} \quad (18)$$

$$F_{fren} = (mg - \rho g V)(1 - e^{-t/\tau}) = 0,16645(1 - e^{-41,26t}) \text{ N} \quad (19)$$

$$k' = k + \frac{\eta A}{d} = 11,16 \text{ kg/s}$$

$$\tau = \frac{m}{k'} = \frac{0,01905}{11,16} = 1,7 \text{ ms} \quad (20)$$

$$F_v = \frac{\eta \pi (D_e - D_i) h}{d} v = \frac{(0,12351) \pi (0,0254 - 0,0128)(0,006)}{0,0126} (3,25) = 7,56 \times 10^{-3} \text{ N} \quad (21)$$

Del software se obtuvieron las siguientes graficas:

Figura 9

Gráfica que muestra la rapidez vs tiempo de desplazamiento del imán a través de la barra cilíndrica de aluminio cilíndrica sumergido en aceite grado 40.

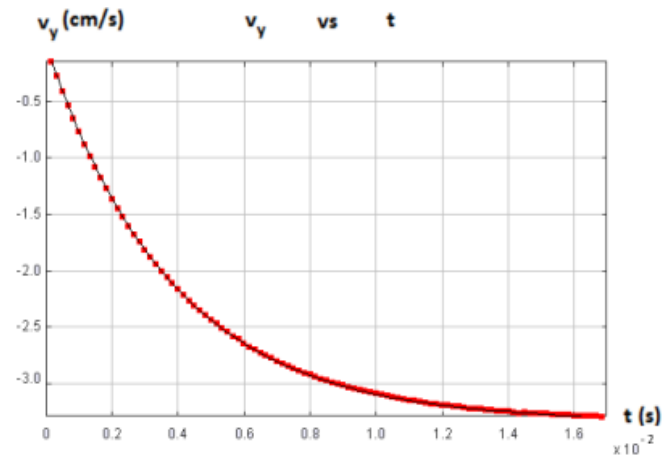
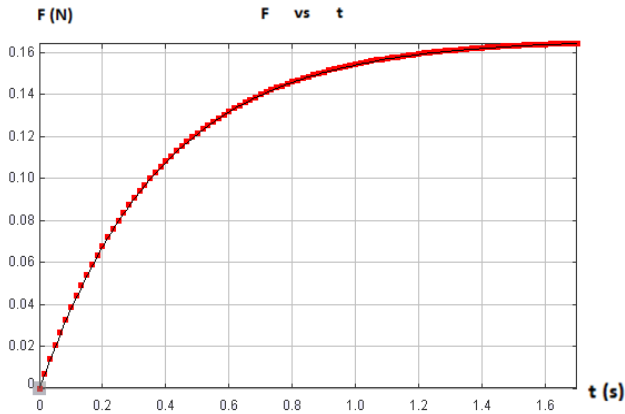


Figura 10

Gráfica que muestra la fuerza vs tiempo del desplazamiento de un imán a través de la barra cilíndrica de aluminio sumergido en aceite grado 40.

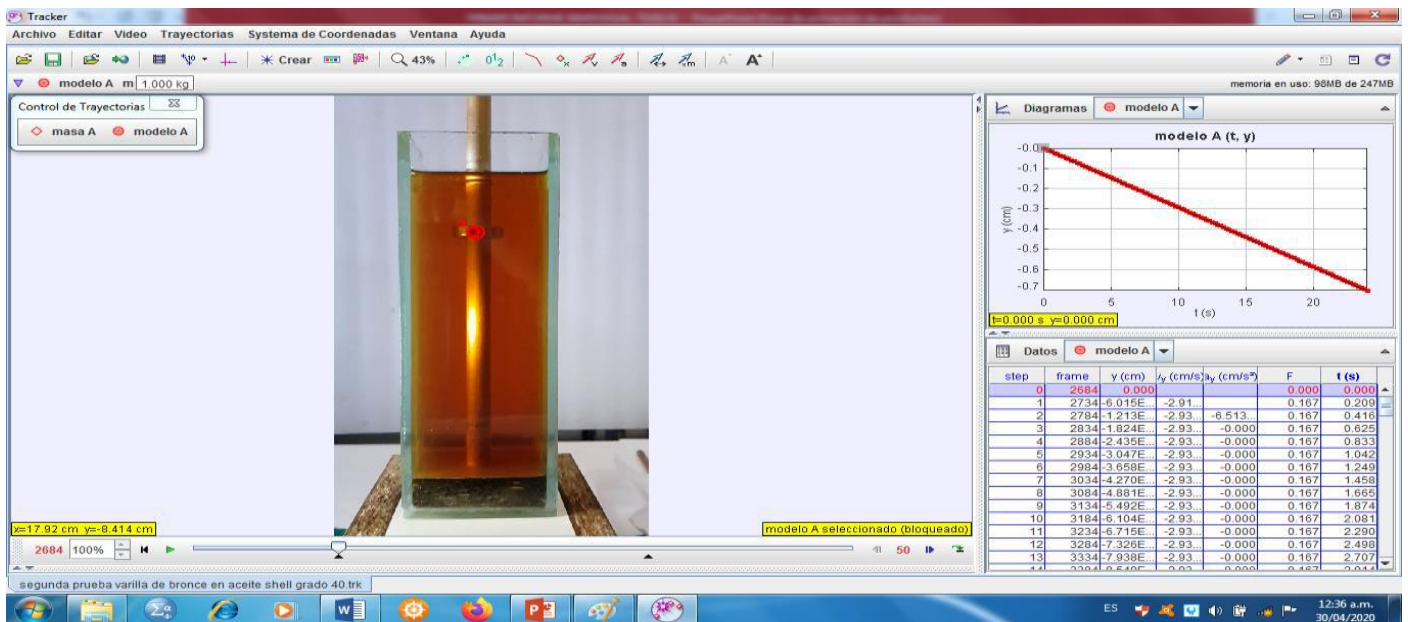


2. El imán se desplaza a lo largo de la barra cilíndrica de bronce sumergido en aceite grado 40

En la figura 11 se puede ver la ventana del analizador de videos Tracker que es un software utilizado para obtener datos experimentales relacionados de la posición vs tiempo del desplazamiento vertical del imán a través de la barra cilíndrica de bronce sumergida en aceite grado 40.

Figura 11

Ventana del Tracker donde se muestra en la parte izquierda parte del equipo utilizado y en la parte derecha superior observamos la gráfica exponencial del modelo y la tabla de valores obtenidos de la posición vs tiempo en la parte inferior.

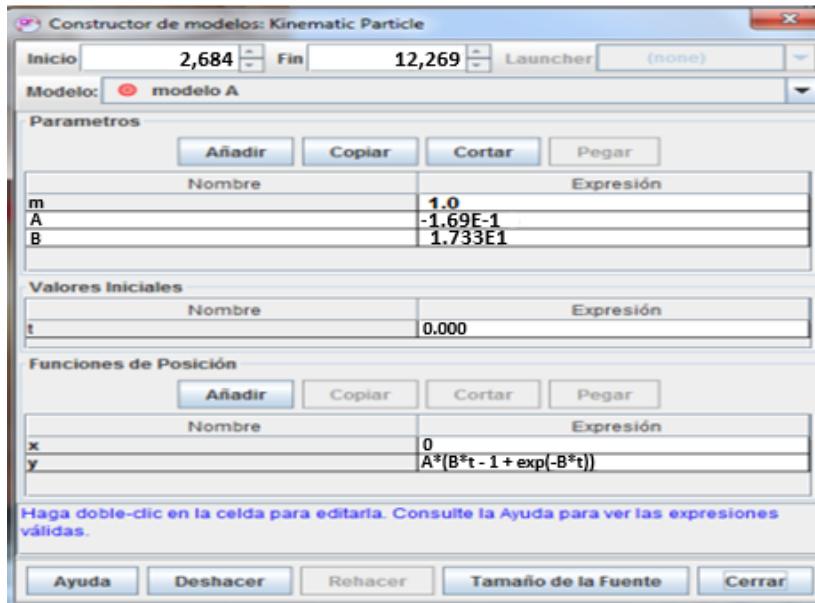


Se muestra en la figura 12, el constructor de modelos cinemáticos del Tracker para el desplazamiento vertical del imán mediante la barra cilíndrica de bronce

sumergido en aceite grado 40, los cuales se obtuvieron después de realizar un modelamiento en el software.

Figura 12

Constructor de modelos cinemáticos del Tracker que muestra la ecuación cinemática y sus respectivas constantes, la cual relaciona la posición vs tiempo para el desplazamiento vertical del imán a través de la barra cilíndrica de bronce sumergido en aceite grado 40.



Posteriormente se muestra la ecuación del movimiento vertical y los parámetros del modelo obtenido, el cual se basa de manera análoga a una pequeña esfera de acero que desciende en el seno de un fluido viscoso.

$$Y = A'(B't - 1 + e^{-B't}) \quad (22)$$

Si, $A' = 0,169$ cm (Amplitud del Movimiento) y $B' = 17,33$ s⁻¹ (Frecuencia de movimiento).

Luego reemplazando en la ecuación (22) se tiene la ecuación exponencial de la posición vs tiempo para dicho modelo.

$$Y = -0,169(17,33t - 1 + e^{-17,33t}) \text{ cm} \quad (23)$$

Asimismo, se muestran las relaciones de la velocidad, fuerza de frenado magnético, la constante de frenado en el seno del fluido viscoso, la constante de tiempo de frenado y la fuerza de viscosidad.

$$v_y = AB(1 - e^{-Bt}) = v_L(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) = 2,94(1 - e^{-17,33t}) \text{ cm/s} \quad (24)$$

$$F_{fren} = (mg - \rho g V)(1 - e^{-t/\tau}) = 0,1665(1 - e^{-17,33t}) \text{ N} \quad (25)$$

$$k' = k + \frac{\eta A}{d} = 5,667 \text{ kg/s} \quad \tau = \frac{m}{k'} = \frac{0,01905}{5,667} = 3,44 \text{ ms} \quad (26)$$

$$F_v = \frac{\eta \pi (D_e - D_i) h}{d} v = \frac{(0,12351) \pi (0,0254 - 0,0128)(0,006)}{0,0126} (2,94) = 6,8 \times 10^{-3} \text{ N} \quad (27)$$

Del software se obtuvieron las siguientes graficas:

Figura 13

Gráfica que muestra la rapidez vs tiempo de desplazamiento de un imán a través de la barra de bronce cilíndrica sumergido en aceite grado 40.

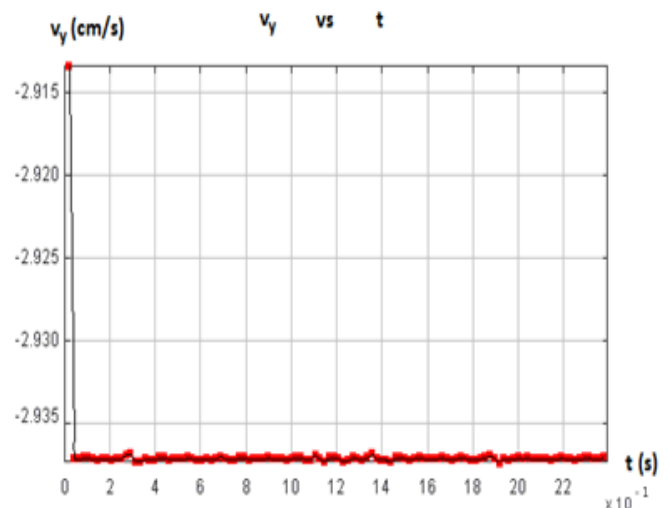
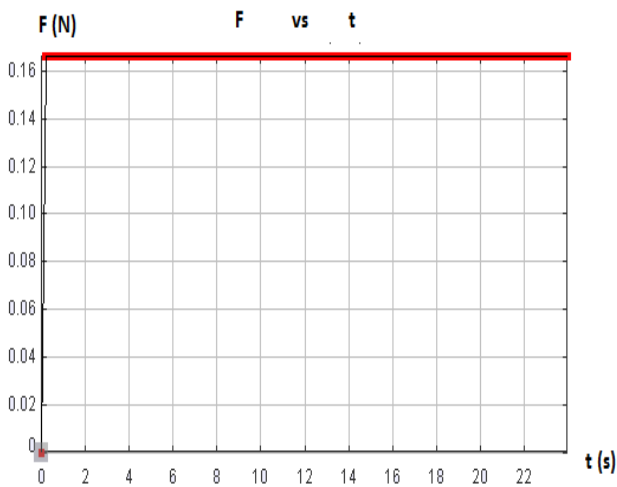


Figura 14

Gráfica que muestra la fuerza vs tiempo del desplazamiento de un imán a través de la barra cilíndrica de bronce sumergido en aceite grado 40.

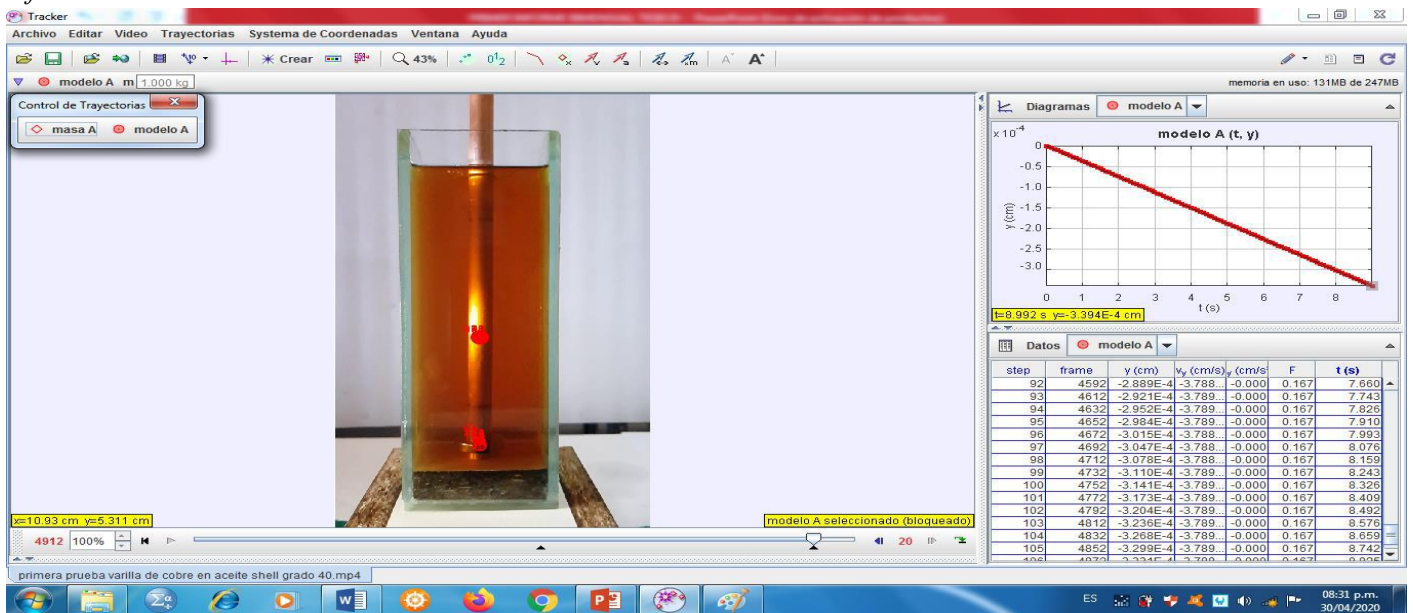


3. El imán se mueve en la barra cilíndrica de cobre que está sumergido en aceite grado 40.

Se ve en la figura 15 la ventana del analizador de videos Tracker que es un software utilizado para obtener datos experimentales relacionados de la posición vs tiempo del desplazamiento vertical del imán a través de la barra cilíndrica de cobre sumergida en aceite grado 40.

Figura 15

Ventana del Tracker donde se muestra en la parte izquierda parte del equipo utilizado y en la parte derecha superior observamos la gráfica exponencial del modelo y la tabla de valores obtenidos de la posición vs tiempo en la parte inferior.

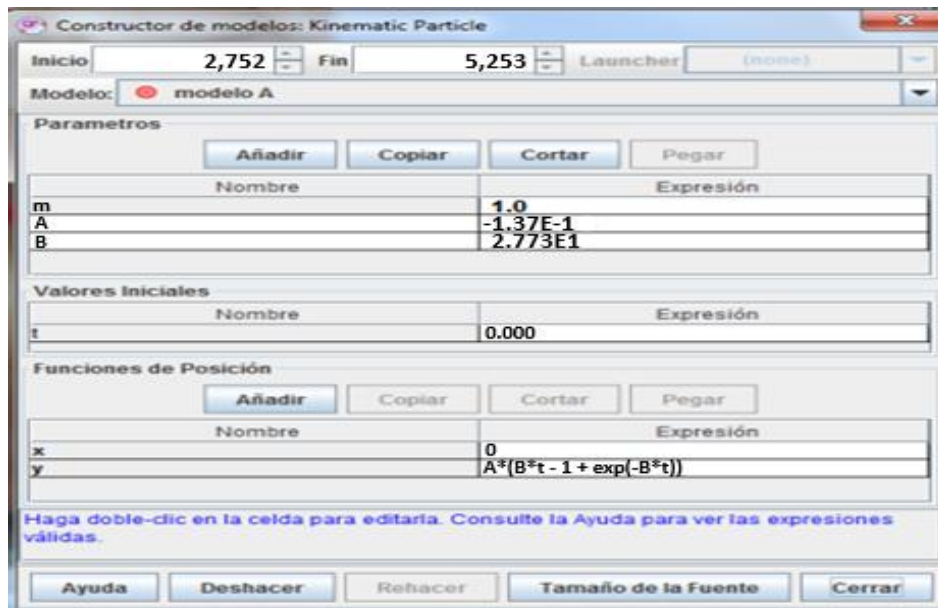


Se muestra en la figura 16, el constructor de modelos cinemáticos del Tracker para el desplazamiento vertical del imán a través de la barra cilíndrica de cobre

sumergido en aceite grado 40, los cuales se obtuvieron después de realizar un modelamiento en el software.

Figura 16

Constructor de modelos cinemáticos del Tracker que muestra la ecuación cinemática y sus respectivas constantes, la cual relaciona la posición vs tiempo para el desplazamiento vertical del imán a través de la barra cilíndrica de cobre sumergido en aceite grado 40.



Posteriormente se muestra la ecuación del movimiento vertical y los parámetros del modelo obtenido, el cual se basa de manera análoga a una pequeña esfera de acero que desciende en el seno de un fluido viscoso.

$$Y = A'(B't - 1 + e^{-B't}) \quad (28)$$

Si, $A' = 0,137$ cm (Amplitud del Movimiento) y $B' = 27,73$ s⁻¹ (Frecuencia de movimiento).

Luego reemplazando en la ecuación (28) se tiene la ecuación exponencial de la posición vs tiempo para dicho modelo.

$$Y = -0,137(27,73 t - 1 + e^{-27,73 t}) \text{ cm} \quad (29)$$

Asimismo, se muestran las relaciones de la velocidad, fuerza de frenado magnético, la constante de frenado en el seno del fluido viscoso, la constante de tiempo de frenado y la fuerza de viscosidad.

$$v_y = AB(1 - e^{-Bt}) = v_L(1 - e^{-t/\tau}) = 3,8(1 - e^{-27,73t}) \text{ cm/s} \quad (30)$$

$$F_{fren} = (mg - \rho g V)(1 - e^{-t/\tau}) = 0,1665(1 - e^{-27,73t}) \text{ N} \quad (31)$$

$$k' = k + \frac{\eta A}{d} = 49,727 \text{ kg/s} \quad \tau = \frac{m}{k} = \frac{0,01905}{49,727} = 0,39 \text{ ms} \quad (32)$$

$$F_v = \frac{\eta \pi (D_e - D_i) h}{d} v = \frac{(0,12351) \pi (0,0254 - 0,0128)(0,006)}{0,0126} (3,8) = 8,84 \times 10^{-3} \text{ N} \quad (33)$$

Del software se obtuvieron las siguientes graficas:

Figura 17

Gráfica que muestra la rapidez vs tiempo del desplazamiento del imán a través de la barra de cobre cilíndrica sumergido en aceite grado 40.

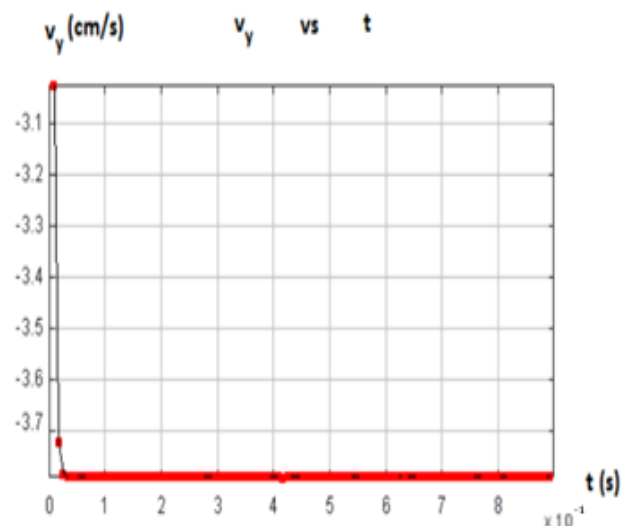
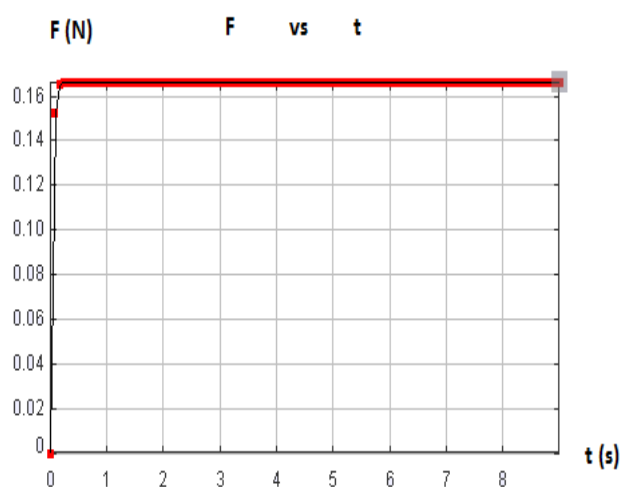


Figura 18

Gráfica que muestra la fuerza vs tiempo del desplazamiento de un imán a través de la barra cilíndrica de cobre sumergido en aceite grado 40.



DISCUSIÓN

Se presenta en la figura 7, la gráfica de la posición vs tiempo del desplazamiento vertical del imán a través de la barra cilíndrica de aluminio sumergida en aceite grado 40, el cual presenta una gráfica de tipo exponencial y a partir de esta función exponencial lo modelamos para hallar una ecuación matemática que refleje este modelo.

Luego se observa de la figura 10 que el imán inicia en reposo y posteriormente su velocidad crece de manera exponencial con el tiempo y a partir de 0,0168 segundos, alcanza una velocidad máxima constante de 3,25 cm/s.

Se muestra en la figura 11, que el frenado electromagnético de la fuerza aumenta de forma exponencial con el tiempo desde cero cuando el imán está en reposo.

Se muestra en la figura 12, la gráfica de la posición vs tiempo del desplazamiento vertical del imán a través de la barra cilíndrica de bronce sumergido en aceite grado 40, el cual presenta una gráfica de tipo exponencial y a partir de esta función exponencial lo modelamos para hallar una ecuación matemática que refleje este modelo.

Se ve en la figura 14 que el imán inicia en reposo y posteriormente su velocidad crece de manera exponencial con el tiempo y a partir de 0,04 segundos, alcanza una velocidad máxima constante de 2,94 cm/s.

Se muestra en la figura 15, que el frenado electromagnético de la fuerza aumenta de forma exponencial con el tiempo, partiendo desde cero cuando el imán está en reposo.

Se observa en la figura 16, la gráfica de la posición vs tiempo del desplazamiento vertical del imán a través de la barra cilíndrica de cobre sumergido en aceite grado 40, el cual presenta una gráfica de tipo exponencial y a partir de esta función exponencial lo modelamos para hallar una ecuación matemática que refleje este modelo.

Se puede ver en la figura 18 que el imán inicia en reposo y posteriormente su velocidad crece de manera exponencial con el tiempo y a partir de 0,025 segundos, alcanza una velocidad máxima constante de 3,8 cm/s.

Se muestra en la figura 19, que el frenado electromagnético de la fuerza aumenta de forma exponencial con el tiempo, partiendo desde cero cuando el imán está en reposo.

CONCLUSIONES

La velocidad máxima alcanzada en la barra de cobre fue 3,8 cm/s, la cual es mayor a la barra de bronce, que fue de 2,94 cm/s, y a sí mismo a la barra de aluminio, que fue de 3,25 cm/s.

Las fuerzas que contribuyen a amortiguar el desplazamiento del imán a través de las barras metálicas es la fuerza de viscosidad y el frenado electromagnético de la fuerza.

El frenado electromagnético de la fuerza generado sobre el imán es mayor que la fuerza de viscosidad del fluido.

Cuando se incrementa la velocidad límite, también lo hacen la constante de amortiguamiento (k') y la fuerza de viscosidad del fluido (2,94 m/s, 5,667 kg/s, 0,00680 N; a 3,25 m/s, 11,16 kg/s, 0,00756 N; 3,80 m/s, 49,73 kg/s, 0,00884 N).

Finalmente, también se puede realizar el mismo estudio, usando diferentes tipos de configuraciones de imanes de neodimio y otros tipos de fluidos que sean transparentes.

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.

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.

Donoso, G.; Ladera, C.; Martín P. (2011). Damped fall of magnets inside a conducting pipe, American Journal of Physics. 79, 193.

González, A.; Hernández, C. (2010). Freno Magnético. Latin. América. Journal of Physics. Education. Vol. 4, Suppl. 1. México. D.F. 928-933.

Irvine, B.; Kemnetz, M.; Gangopadhyaya, A.; Ruube, T. (2012). Magnetic traveling through a conducting pipe: a variation on the analytical approach. Department of Physics, Loyola University Chicago, Chicago, Illinois 60626.

Molina, J.; Abella, A. (2012). A laboratory activity on the eddy current brake. European Journal of Physics 33: 697-707. Málaga. España.

Montero, G.; García, A.; Rios, 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.

Pathare, S.; Saurabhee, H.; Lahane, R.; Sawant, S. (2014). Low-Cost Timer to Measure the Terminal Velocity of a Magnet Falling Through a Conducting Pipe. The Physics Teacher. Vol. 52, March 2014: 160-163.

Vásquez, O. (2014). Física II. Primera Edición. Huaraz. Perú.

Xavier, T.; Amritha, K. (2014). Theoretical Modeling of Magnetic Dragging Force and Experimental

Calculation Using Video Analysis. International Journal of Engineering Science and Innovative Technology. Volume 3, Issue 6. ISSN: 2319-5967: 214-222.

ANEXOS

Operación y Manejo del software de análisis 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 donde 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 em 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 pressionar 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.

Propiedades del aceite

- Viscosidad cinemática (40° C), $\nu = 138 \text{ cSt}$
- Densidad (15° C) $\rho = 895 \text{ kg/m}^3$
- Viscosidad dinámica $\eta = 0,12351 \text{ N s/m}^2$.