

Caída de un imán en un tubo de cobre

(Relación entre el tiempo de caída de un imán por un tubo de cobre posicionado a diferentes ángulos)

INTRODUCCIÓN

Los imanes forman parte de nuestra vida cotidiana, vemos cómo interactúan al posicionarlos cerca de una sustancia ferromagnética o de otros imanes.

Un imán es un cuerpo que genera un campo magnético en el espacio circundante y ejerce una fuerza sobre carga o corriente en movimiento (si existen) que se encuentra dentro del campo. La tierra misma es un imán. Estos cuerpos me parecen interesantes; así que cuando me propusieron trabajar un tema de mi elección, elegí un tema relacionado a estos portadores de campos magnéticos.

Me llamó especialmente la atención la forma en que un imán puede interactuar con el cobre, un material diamagnético. En comparación a cuando cae normalmente el imán por la fuerza gravitacional, al soltar un imán en un tubo de cobre, entre dos placas o sobre el cobre, el imán cae de forma más controlada. De esto me surgió la pregunta: ¿Cuánto tardaría en caer un imán de neodimio a través del tubo que se coloca a diferentes ángulos? ¿Cuál sería su relación con el ángulo?

Buscando un tema relacionado con imanes para la evaluación, encontré un artículo de la facultad de ciencias de la Universidad Radboud llamado “levitación diamagnética” en el cual se presentaba que en el laboratorio de imanes de alto campo de la universidad (High Field Magnet Laboratory), se estaban levitando diferentes objetos y seres vivos, con altos campos magnéticos: ranas, fresas e incluso una avellana. Investigué un poco más sobre el diamagnetismo y materiales diamagnéticos, y eventualmente encontré la sorprendente reacción que tenía el cobre ante imanes de neodimio.

MARCO TEÓRICO

FLUJO MAGNÉTICO Y DIAMAGNETISMO

El flujo siempre hace referencia a la cantidad de una sustancia que pasa a través de una superficie para un tiempo específico. El flujo que se asocia a un campo magnético se describe como $\Phi_B = \mathbf{BA}\cos(\theta)$, donde A es un área paralela a la superficie por la cual pasan las líneas del campo magnético representado por B y el ángulo que existe entre los dos (Raymond A. Serway & John W. Jewett, Jr, 2019).

El diamagnetismo, es un fenómeno que sucede cuando una sustancia o un cuerpo al ser expuesto a un campo magnético se opone a las fuerzas del campo, creando su propio campo magnético en dirección opuesta a la influencia externa. Esto se debe a que los electrones cambian su movimiento en presencia del campo para repelerlo (Propiedades magnéticas de los sólidos, s.f.)

LEY DE FARADAY Y LEY DE LENZ

La ley de Lenz y la ley de Faraday, son las dos leyes que rigen el fenómeno del experimento y se encuentran íntimamente relacionadas la una con la otra.

Se conocía que una corriente que fluía a través de un conductor generaba un campo magnético, pero no fue hasta la década de 1830, en que Faraday experimentó con la inducción electromagnética, que se descubrió que esto era recíproco. **La Ley de Faraday de la inducción se denota como:**

$$\varepsilon = \frac{d\Phi_B}{dt}$$

Con esto Faraday nos indica que el cambio en el flujo magnético ($d\Phi_B$) dentro de una espira cerrada o en una superficie conductora en un determinado tiempo (dt) crea una *fem inducida* (voltaje), generando así una *corriente inducida*.

La Ley de Lenz dicta “La dirección de cualquier efecto de la inducción magnética es la que se opone a la causa del efecto”¹, esto quiere decir que si hay un cambio en el flujo magnético que establece una corriente, esta *corriente inducida* establecerá su propio campo magnético con dirección opuesta al original (corrientes generan campos magnéticos), y se opondrá al cambio de flujo. **“La corriente inducida se opone al cambio en el flujo (magnético)”²**. Esto se puede consolidar con la conservación de energía puesto que si el campo magnético en lugar de contrariar el original se sumara a este se induciría una corriente mayor aún, que crecería al infinito porque el proceso se repetiría.

¹ Young, Hugh D., Roger A. Freedman. (2009). Física universitaria con física moderna volumen 2. (12ª. ed.)

² Ibídem

El fenómeno que ocurre al soltar un imán en un tubo de cobre es la interacción de estas dos leyes; cuando un imán cae, el cambio en flujo magnético que produce al caer, induce pequeñas corrientes a lo largo del tubo (**Ley de Faraday**) simultáneamente creando un campo magnético opuesto al del imán que lo empuja en dirección contraria (**Ley de Lenz**).

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿De qué manera afecta el cambio en el ángulo de un tubo de cobre, al tiempo de caída de un imán por el tubo?

HIPÓTESIS Y DEFINICIÓN DE VARIABLES

Se cree que el tiempo tendrá una relación inversamente proporcional a los diferentes ángulos con los que se posicionará el tubo de cobre, cuando el imán se deje caer por dicho tubo.

VARIABLES

- **Variable independiente:** **ángulo del tubo (α°)** medido en grados.
- **Variable dependiente:** **tiempo (t/s)** que toma el imán en caer por el tubo de cobre, medido en segundos.
- **Variables controladas:**
 - Largo del tubo cobre: $41cm$
 - Grosor del tubo de cobre $1mm$
 - Tipo de imán: neodimio N50
 - Masa del imán: $0.021 kg$

CONTROL DE VARIABLES

Variable independiente: se podrá medir con el uso de un goniómetro, conocido también como un transportador universal, para lograr calcular de forma más exacta posible los valores de los diferentes ángulos que se utilizarán en el experimento. También se utilizará un nivelador para prever que no se tenga un ángulo de inclinación extra, que agregue un valor al ángulo que se lee en el goniómetro.

Variable dependiente: debido a que el tubo no es transparente y no se puede cortar en dos partes exactamente iguales para lograr ver adentro (cosa que tendría consecuencias al llevar a

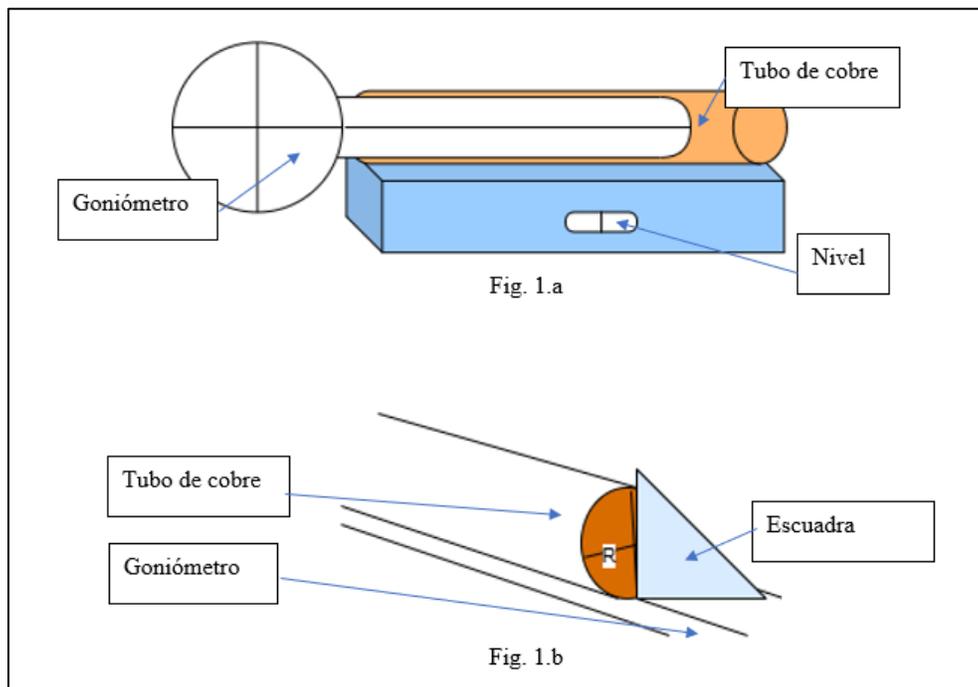
cabo el experimento, por la pequeña separación); se optó por utilizar un cronómetro y para compensar el error humano se va a medir el tiempo hasta diez veces.

Variables controladas: los materiales se pudieron conseguir con las medidas establecidas. En el caso del tubo de cobre, el corte no era exacto por lo que se tuvo que lijar y nivelar.

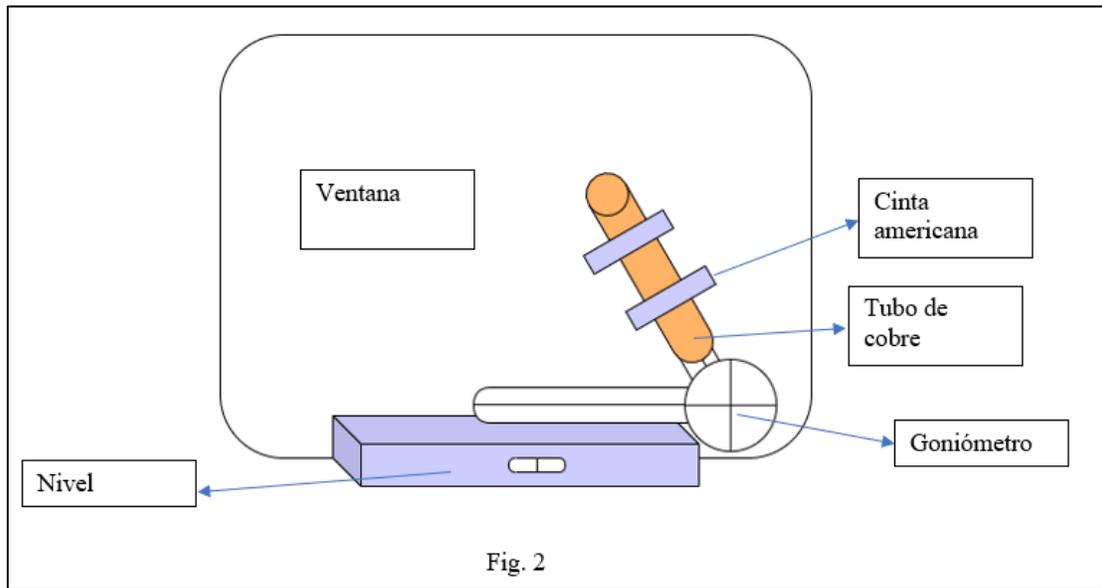
METODOLOGÍA

Antes de iniciar a obtener los valores y para obtener el máximo de las capacidades reflexivas humanas y así minimizar el error, se harán cinco repeticiones de tirar el imán y consecutivamente medir su tiempo con un cronómetro, para que así la persona que suelta el imán y la persona que toma el tiempo estén ambientados y sincronizados antes de tomar las diez medidas necesarias para sacar el promedio del tiempo.

El goniómetro se colocará sobre el nivel junto con el tubo, al estar los dos juntos se debe intentar unir los dos, que están nivelados, con algún material no conductor. Al estar unidos, cerciorarse de que el centro del tubo dividido por la línea del goniómetro, que marca el ángulo, esté equidistante al radio de las circunferencias de las aperturas del cilindro utilizando una escuadra milimétrica que se colocará junto al tubo (Fig. 1.b).



El tubo unido al goniómetro se posicionará sobre el nivel para saber que el goniómetro está en una posición paralela a la superficie nivelada. Para evitar que se mueva, se colocará sobre el nivel y se trasladará junto a una ventana transparente para poder observar los grados y su variación para poder corregirlos. Al nivel se le colocarán algunos pesos para que se mantenga estático y al medir un ángulo este se unirá al vidrio con la ayuda de cinta americana que tiene las propiedades de un aislante para que no se transfiera carga al ambiente, también se contará con la ayuda de una persona que vigile que no se mueva el goniómetro ni el nivel y así evitar cualquier cambio no deseado (Fig. 2).



Para el experimento, después de dejar caer el imán y tomar el tiempo, se debe asegurar que no se haya alterado el ángulo en que se tiró el cuerpo; se deberá verificar dicho ángulo cada vez que se repita el proceso de medición de valores.

Por otro lado, con el resto de las variables no hay un problema significativo en encontrarlas. El largo y el grosor del tubo es suficiente medirlo con un metro o escalímetro 1:100, el peso de los imanes se midió con una balanza Nordika digital con superficie de vidrio y sensibilidad de 1 gramo. Por supuesto, la medición no estará exenta de errores humanos y de calibración, cosa que se tomará en cuenta en el análisis.

Se pudo conseguir un tubo de cobre en buenas condiciones, solo los bordes se encontraban desnivelados por lo que se lijaron hasta el nivel deseado. Se compraron imanes de neodimio que podrán ser utilizados en proyectos posteriores, ya que estos cuerpos llegan a tener varias aplicaciones. Debido al campo magnético fuerte de los imanes se puso fuera del alcance de los niños, puesto que pueden producir lesiones al juntar dos imanes de forma incorrecta.

ANÁLISIS

Ángulo α $\pm 1^\circ$ *	Tiempo de caída $t \pm 0.50 s$ **										Min	Max
30	12.31	12.30	12.26	12.41	12.35	12.33	12.23	12.50	12.46	12.58	12.23	12.58
40	8.43	8.50	8.21	8.27	8.45	8.22	8.42	8.16	8.30	8.09	8.09	8.50
45	5.14	5.00	5.21	4.89	5.07	5.13	5.20	5.15	4.97	5.05	4.89	5.21
50	3.73	3.74	3.83	3.72	3.81	3.77	3.61	3.70	3.82	3.65	3.61	3.83
60	3.00	3.01	3.20	3.08	3.15	3.02	2.95	3.12	2.97	3.05	2.95	3.20
70	2.84	2.95	2.81	2.80	2.87	2.92	2.85	2.83	2.94	2.91	2.80	2.95
75	2.52	2.60	2.44	2.62	2.52	2.49	2.54	2.57	2.51	2.61	2.44	2.62

TABLA 1. Resultados

*Es la incertidumbre que calcula el goniómetro utilizado

**Es el tiempo de reacción visual del ser humano (Pérez-Tejero, Soto-Rey, & Rojo-González, 2011) considerando también el tiempo que tomaba pausar el cronómetro y su incertidumbre.

TABLA 2. Cálculo de resultados

Ángulo $\alpha \pm 1^\circ$ *	Promedio	Desviación Estándar (s)
30	12.37	0.11
40	8.31	0.14
45	5.08	0.10
50	3.74	0.073
60	3.06	0.081
70	2.87	0.055
75	2.54	0.058

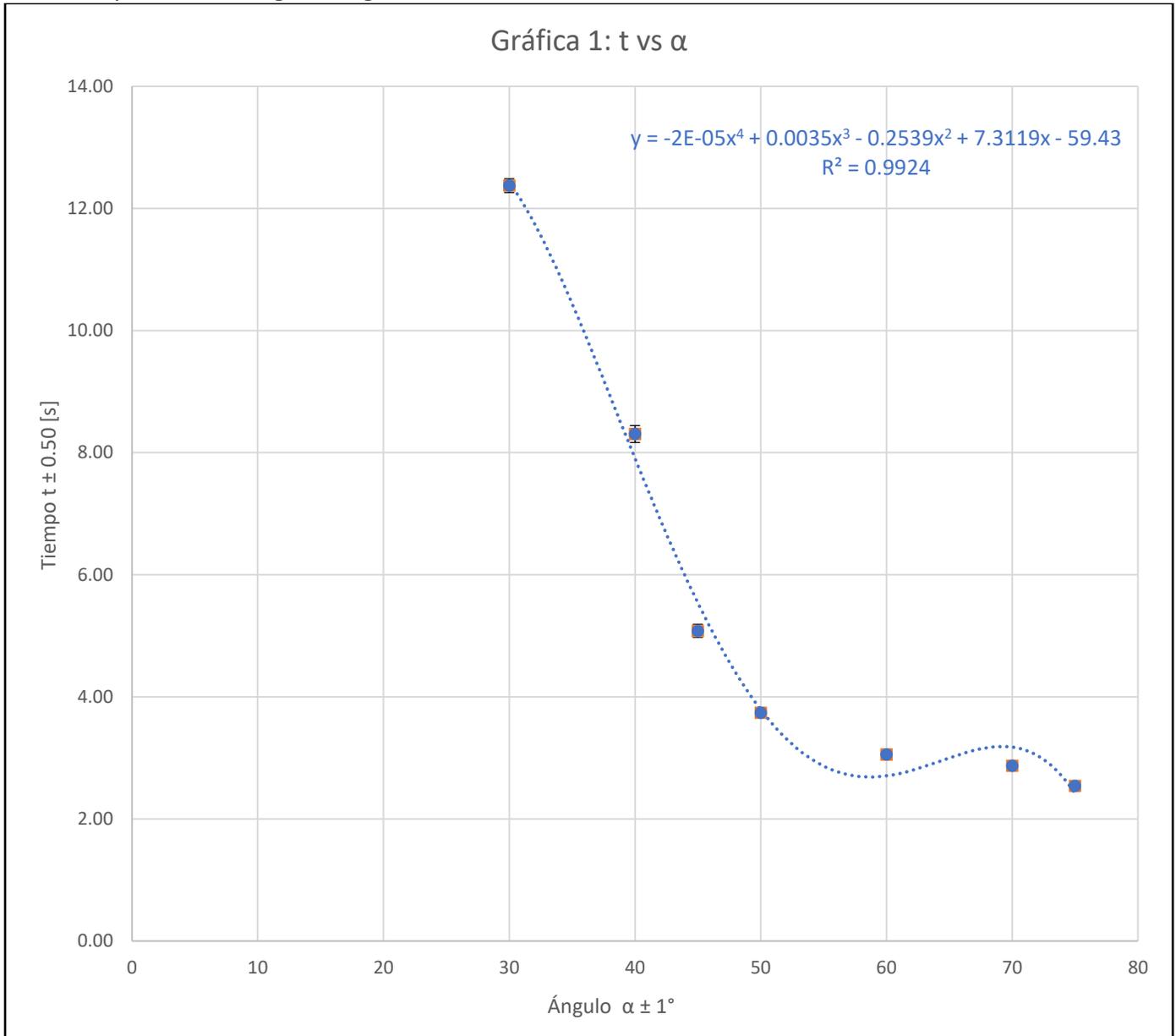
Se hizo uso de la desviación (Tabla 2) por la cantidad de datos del tiempo que se tomaron, para lograr conocer la dispersión de los datos de una forma más precisa.

Se utilizó la desviación de una muestra cuya ecuación es:

$$s = \sqrt{\frac{\Sigma(X - \bar{X})^2}{n - 1}} \rightarrow \sqrt{\frac{\Sigma(t - \bar{t})^2}{n - 1}}$$

Donde se está haciendo la sumatoria de todos los valores del tiempo t obtenidos en la experimentación, menos el promedio obtenido \bar{t} por cada uno de los datos n que hay en la muestra. También se obtuvo el promedio de estas desviaciones para reflejar el promedio aproximado en que se encuentran los datos.

Los datos presentan la siguiente gráfica:



Como se observa en la gráfica 1, los datos llegan a tener una fuerte correlación con un polinomio de cuarto grado, y la desviación de cada punto es muy pequeña así que no variará mucho de la media. Para poder analizar de mejor forma la relación entre los datos y la hipótesis planteada se llegó a linealizar la gráfica dividiendo 1 entre el promedio del tiempo, convirtiéndose $1/t$ en la nueva variable dependiente. Por esta razón, toma lugar la propagación de incertidumbre (Taylor, 1982):

$$f(t) = \frac{1}{t}$$

$$\delta f = \left| \frac{df}{dt} \right| \delta t$$

$$\Delta f = \left| \frac{df}{dt} \right| \Delta t$$

$$\Delta f = \left| -\frac{1}{t^2} \right| * 0.50$$

$$\Delta f = \Delta \left(\frac{1}{t} \right)$$

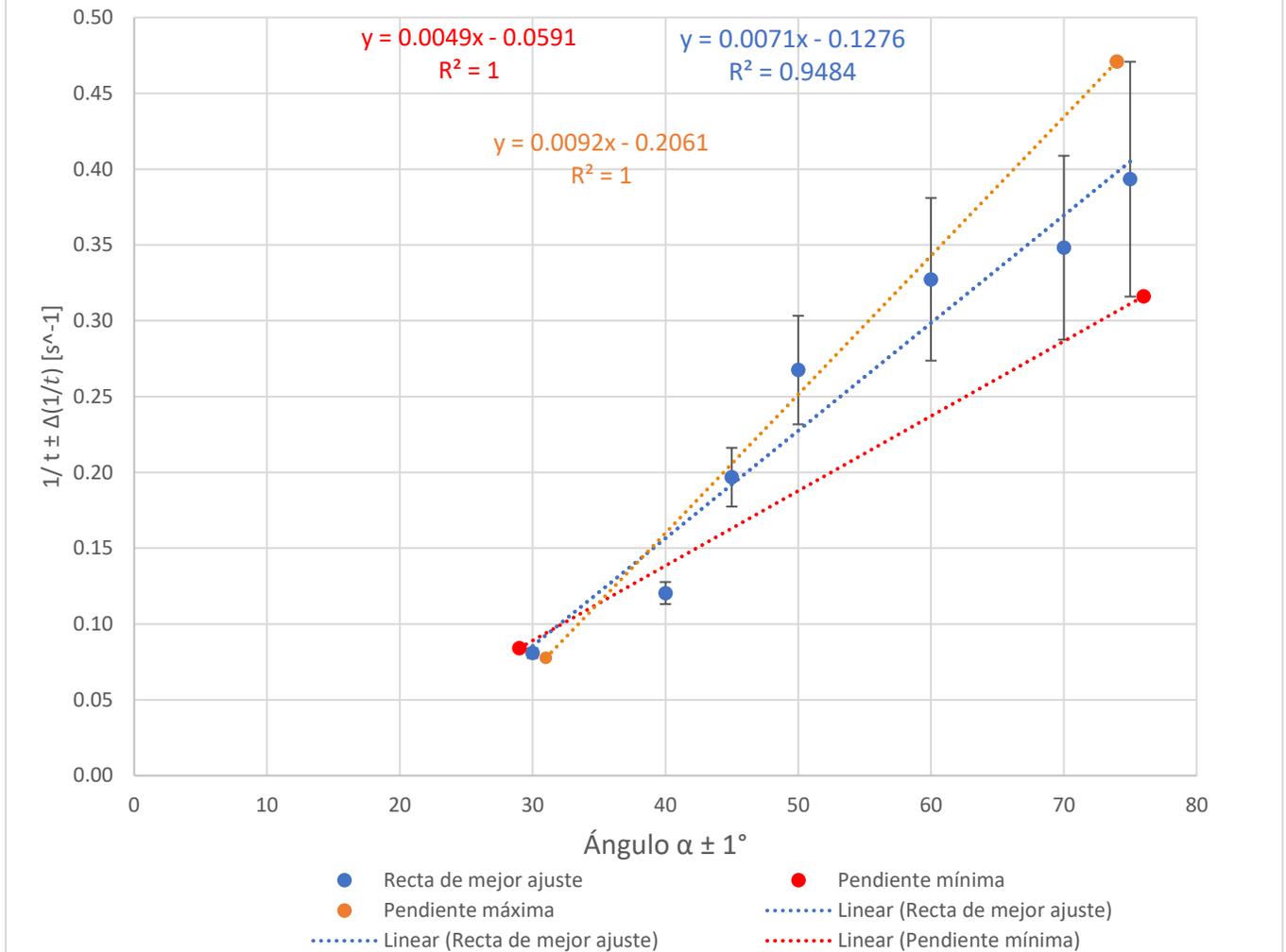
En las ecuaciones de la propagación de incertidumbre, la incertidumbre de la función $f(t)$ (δf) viene dada por la incertidumbre de t (δt) multiplicada por el valor absoluto de la derivada de la función.

Se puede ver que la incertidumbre ahora se convierte dependiente de t y por tanto variable por cada tiempo obtenido. Obteniendo los siguientes datos:

Tiempo de caída $\frac{1}{t} \pm$ variable ($\Delta \frac{1}{t}$)										Promedio $1/t$	$\Delta \frac{1}{t}$
0.081	0.081	0.082	0.081	0.081	0.081	0.082	0.080	0.080	0.079	0.081	0.0033
0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.0073
0.19	0.20	0.19	0.20	0.20	0.19	0.19	0.19	0.20	0.20	0.20	0.019
0.27	0.27	0.26	0.27	0.26	0.27	0.28	0.27	0.26	0.27	0.27	0.036
0.33	0.33	0.31	0.32	0.32	0.33	0.34	0.32	0.34	0.33	0.33	0.054
0.35	0.34	0.36	0.36	0.35	0.34	0.35	0.35	0.34	0.34	0.35	0.061
0.40	0.38	0.41	0.38	0.40	0.40	0.39	0.39	0.40	0.38	0.39	0.077

Tabla 3. Datos gráfica lineal

Gráfica 2: $1/t$ vs el ángulo α



Como se puede apreciar en la gráfica 2, la recta de mejor ajuste se encuentra entre las rectas de la mínima y máxima pendiente que reflejan el rango considerable en que los resultados pueden llegar a variar debido a la afección de las incertezas de los instrumentos de medida en las variables. Especialmente en aquellos ángulos más grandes se da el error más grande, porque el imán caía más rápido y era difícil calcular bien los valores del tiempo para estos ángulos. Puesto que la variable independiente cambió a ser $1/t$, se pueden ver los errores variables del promedio de cada serie de datos.

También se puede llegar a observar en la gráfica 2 que hubieron varios errores aleatorios que se explican en los diversos fenómenos que sucedieron durante la experimentación en el tubo de cobre, mientras caía el imán, ya que en algunos ángulos se observó que rotaba sobre sí mismo, lo que disminuía considerablemente el tiempo. La energía potencial que posteriormente se

convierte en energía cinética al caer del tubo, se llega a dotar de una energía cinética rotacional, ya que el imán rota en lugar de caer de forma directa.

Además hay errores sistemáticos que se dan tanto por el factor humano y las imperfecciones de la metodología que están presente en la investigación, que se puede deducir por la gráfica que no llega a partir de la coordenada (0, 0). Se llega a observar que a pesar de estos errores el coeficiente de relación muestra coherencia entre los datos obtenidos y una recta.

Se puede advertir que la recta que provee la Gráfica 2 es $y = 0.0071x - 0.1276$, que es inversamente proporcional al tiempo de la forma $\alpha \propto \frac{1}{t}$. Sustituyendo por las variables establecidas, se puede expresar de la siguiente forma:

$$\frac{1}{t} = 0.0071\alpha - 0.1276$$

Ya que la pendiente está sujeta a las incertezas de la experimentación es necesario agregarle el error de la pendiente utilizando:

$$\frac{m_{\text{máxima}} - m_{\text{mínima}}}{m_{\text{real}}}$$
$$\frac{0.033 - (-0.015)}{0.0071} = 6.76$$

$$\frac{1}{t} \pm \Delta\left(\frac{1}{t}\right) = (0.0071 \pm 6.76)\alpha - 0.1277$$

EVALUACIÓN

El experimento permitió observar la forma en que reaccionaba un imán al caer a diferentes ángulos, por un tubo de cobre diamagnético. Después de haber obtenido los datos para el análisis de este fenómeno, se concluye que el tiempo, efectivamente, tiene una relación inversamente proporcional al ángulo del transportador universal. Esto se da debido a que el componente de la gravedad es más fuerte al inclinar el tubo ya que el vector vertical de la fuerza crece y llega a ser más fuerte que la fricción del tubo y la fuerza magnética que se opone al movimiento.

El cambio de la incertidumbre permitió observar que ángulos crecientes tenían un mayor error que los primeros ángulos, pues el tiempo bajaba mientras se cambiaba el ángulo y era más difícil de medirlo.

La relación del cambio del tiempo y el ángulo que se alcanzó al linealizar el gráfico presenta un modelo que se podría considerar bueno en teoría, ya que la correlación entre los puntos y la recta es fuerte dando la ecuación:

$$\frac{1}{t} \pm \Delta \frac{1}{t} = (0.0071 \pm 6.76)\alpha - 0.13$$

Sin embargo, debido a la incertidumbre, los errores humanos, y factores aleatorios como la rotación del imán al caer, este modelo tiene un nivel de incerteza reflejado en los errores sistemáticos, que reflejan la inexactitud de la metodología e instrumentos utilizados.

El proyecto hubiera mejorado de forma considerable si se hubiera construido una pequeña plataforma al inicio del tubo para evitar que la persona que suelta el imán, lo haga a diferentes alturas. También se podría perfeccionar la metodología con el empleo de contadores láser; estos, se pondrían en los extremos del tubo y comenzarían a contar una vez se deja caer el imán y al cortar el láser en el otro extremo del tubo la cuenta pararía, haciéndolo menos susceptible al error humano. Desafortunadamente este equipo es muy caro y difícil de conseguir.

LIMITACIONES

- La precisión del cronómetro que se utilizó para medir el tiempo
- El desconocimiento de la fuerza de fricción que hay entre el imán y el tubo
- La precisión con que se calcularon los ángulos del lanzamiento
- La altura a la que se tiraba el imán podía llegar a variar aunque se procuró tirar el imán lo más cerca a la boca del tubo posible.
- La forma en que se tiraba el imán podía estar dotado de un pequeño ángulo que podía cambiar la forma en que se comportaba el imán en el tubo.

Bibliografía

Pérez-Tejero, J., Soto-Rey, J., & Rojo-González, J. (2011). ESTUDIO DEL TIEMPO DE REACCIÓN ANTE ESTÍMULOS SONOROS Y VISUALES. *European Journal of Human Movement*.
Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/2742/274222159010.pdf>

Propiedades magnéticas de los sólidos. (s.f.). Obtenido de HyperPhysics:
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Solids/magpr.html#c2>

Taylor, J. (1982). *An introduction to error analysis: the study of uncertainties in physical measurements*. California: University Science Books.

Young, H. D., & Freedman, R. (2009). *Física Universitaria*. Volumen 1. Decimosegunda edición. Impreso en México: Pearson Educación de México, S.A. de C.V.

Raymond A. Serway & John W. Jewett, Jr. (2009). *Física para ciencias e ingeniería con física moderna*. Volumen 2. Séptima edición.