

**ACTIVIDADES EXPERIMENTALES CENTRADAS EN EL TUBO DE LENZ PARA LA
ESCUELA SECUNDARIA**

PAULA XIMENA QUIMBAY SUAREZ

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
LICENCIATURA EN FÍSICA**

2023

**ACTIVIDADES EXPERIMENTALES CENTRADAS EN EL TUBO DE LENZ PARA LA
ESCUELA SECUNDARIA**

Trabajo de grado para optar por el título de Licenciatura en Física

PAULA XIMENA QUIMBAY SUAREZ

ASESORA: DOCTORA MARÍA CRISTINA CIFUENTES ARCILA

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
LICENCIATURA EN FÍSICA
LÍNEA DE PROFUNDIZACIÓN: LA ACTIVIDAD EXPERIMENTAL PARA LA
ENSEÑANZA DE LA FÍSICA.**

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a Dios por permitirme alcanzar este logro y por acompañarme siempre en este camino. En segundo lugar, deseo agradecer a mis padres, Luis Alfonso Quimbay y Bertha Lucía Suárez, así como a mis hermanos Sandra Lucía, Juan Francisco, Susana Sofía, María de los Ángeles y Andrea del Pilar, por su infinito apoyo y confianza en mí.

Además, quiero reconocer a las personas que Dios puso en mi camino para guiarme, entre ellas, Laura Rincón, Laura Pardo y Danna Anzola. Por último, pero no menos importante, quiero expresar mi gratitud hacia mi asesora, la Doctora María Cristina Cifuentes Arcila.

Sin su orientación y apoyo, este trabajo no habría sido posible.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1 UN VIAJE A TRAVÉS DE LAS CORRIENTES PARÁSITAS: DESDE ARAGO HASTA FOUCAULT.....	7
1.1 El legado de Faraday, Oersted y Lenz en las Corrientes Parasitas	7
1.2 Corrientes Parásitas	10
1.2.1 Aplicaciones Actuales más Reconocidas de las Corrientes de Foucault	11
2 MONTAJES EXPERIMENTALES PARA EL ESTUDIO DE LOS FENÓMENOS DE INDUCCIÓN YA LAS CORRIENTES PARASITAS	13
2.1 Experimentos Cuantitativos y Cualitativos de Amortiguación Magnética en el Tubo de Lenz.....	15
3 EL TUBO DE LENZ CON IMÁN TIPO ARANDELA: MODELO MATEMÁTICO, MONTAJE EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS DEL MOVIMIENTO	18
3.1 Montaje experimental.....	24
3.2 Análisis del Movimiento	26
3.2.1 Estudio Cualitativo de la Caída del Imán por el Tubo del Lenz: La Amortiguación Magnética	27
3.2.2 Estudio Cuantitativo de la Caída del Imán por el Tubo del Lenz: La Amortiguación Magnética	30
4 ACTIVIDADES EXPERIMENTALES CENTRADAS EN EL TUBO DE LENZ PARA LA ESCUELA SECUNDARIA.....	35
4.1 Actividades Experimentales Propuestas.....	37
5 CONCLUSIONES.....	47
6 BIBLIOGRAFÍA	50
7 Anexos	52

TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Experimento de Arago	7
Ilustración 2. Disco cuantitativo corrientes circulares	13
Ilustración 3. Disco cuantitativo	14
Ilustración 4. Tubo de Lenz Arandela.....	17
Ilustración 5. Imán Arandela y sus ejes	21
Ilustración 6. Imán Arandela y ejes 2.....	22
Ilustración 7. Tubo de Lenz	28
Ilustración 8. Campos magnéticos	29
Ilustración 9. Posición vs Tiempo.....	31
Ilustración 10. Velocidad vs Tiempo	33
Ilustración 11. Tubo de Lenz	44
Ilustración 12. Campo Eléctrico.....	55

INTRODUCCIÓN

La enseñanza de la física en la educación secundaria en Colombia enfrenta diversos desafíos. Uno de los principales es otorgar un lugar destacado a la actividad experimental en el aula, ya que esta estimula el pensamiento y permite a los estudiantes construir conocimientos, así como establecer relaciones entre dichos conocimientos y su vida diaria. En este sentido, Ruiz, Cardona y Romero (2021) resaltan que la actividad experimental es esencial en la enseñanza de las ciencias, ya que genera curiosidad en los estudiantes, promueve la construcción conceptual y facilita la conexión entre lo aprendido en clase y algunos aspectos de su vida cotidiana.

García (2011) amplía esta idea cuando afirma que “Es necesario admitir que en la acción hay pensamiento, hay un lenguaje diferente que se expresa en la actividad experimental y del cual surgen pensamientos e ideas que posteriormente se articulan conceptualmente” (pp. 92).

Lamentablemente, en muchas aulas no se llevan a cabo este tipo de actividades; incluso en muchos contextos educativos, estas son subestimadas o infravaloradas (Álvarez & Carlino, 2004). Por esta razón, es imperativo que reivindicar el papel central de la experimentación en los procesos de construcción de conocimiento en el aula, que se contraponen a la visión predominante de que el papel de la actividad experimental, tanto en las ciencias como en el aula de clase, es el de verificar los conocimientos teóricos (Koponen y Mäntylä, 2006).

Algunas de las razones que esgrimen los docentes para no incluir estas actividades son la carencia o escasez de equipos de laboratorio y aulas especializadas, la obsolescencia de los equipos de laboratorio disponibles y el desconocimiento del funcionamiento de dichos equipos (Álvarez & Carlino, 2004).

La falta de equipos de laboratorio se convierte en un obstáculo para realizar actividades experimentales, ya sean demostrativas, verificativas, exploratorias, de indagación o de investigación, que contribuyan significativamente a los procesos de construcción de conocimiento de los estudiantes de secundaria. Este hecho, en parte, puede ser responsable del malestar generalizado de la población hacia la ciencia, como señalan Ramírez, Peñaloza, & Moreno (2018) al indicar que "...la relación entre los jóvenes y la ciencia no es la mejor.

Al indagar a los estudiantes sobre su percepción de la ciencia, se encuentra que es apreciada como difícil y que <<poco estimula el interés por estudiar>>" (pp.20).

Lo expuesto hasta aquí resalta la necesidad de fomentar la construcción de conocimiento en el aula y de facilitar la experimentación con equipos de laboratorio de bajo, costos: asequibles para la mayoría de las instituciones.

De acuerdo con lo expuesto, surge la siguiente pregunta como eje central de la presente investigación:

¿Cómo diseñar actividades experimentales centradas en el tubo de Lenz para favorecer la construcción de conocimientos sobre las corrientes parásitas en la escuela secundaria?

Como preguntas complementarias se plantean las siguientes:

- ¿Cuáles son las contribuciones experimentales y teóricas que respaldan el diseño de actividades experimentales centradas en las corrientes parásitas?
- ¿Cuáles son las limitaciones y potenciales enfoques de mejora del Tubo de Lenz como herramienta para enseñar corrientes parasitarias?
- ¿Cuál es el modelo matemático más adecuado para determinar las corrientes parasitarias en actividades experimentales con tubos de Lenz que involucran el deslizamiento externo de un imán?
- ¿Cuáles son las características que debería poseer las actividades experimentales para favorecer la construcción de conocimiento escolar acerca de las corrientes parásitas?

Es importante precisar que la investigación se enfoca en un contenido específico: las corrientes parásitas, ya que este contenido destaca debido a su creciente aplicación en la industrialización. Gil (2014) señala que los procesos de inducción y corrientes parásitas se utilizan en sistemas de levitación magnética, como los trenes Maglev¹, que presentan mayor eficiencia en comparación con otros medios de transporte como trenes, buses y autos. Además, se aplican en artefactos como inspectores especiales que localizan partes dañadas en máquinas, agilizando así su reparación y evitando desmontajes completos (Gil, 2014).

¹ En la literatura revisada, tanto en la expuesta como en la que fue decantada uno de los principales usos de las corrientes parásitas mencionadas fue el del tren de levitación Maglev. Estas fueron las principales donde se encontró y exploró dicha referencia. (McGraw-Hill, 1950), (Wiley & Sons, 1975), (Gil, 2014).

Otras aplicaciones industriales incluyen el desarrollo de contadores de luz, detectores de metales y dispositivos que detectan el campo magnético modificado generado por la corriente inducida en el metal (Wood, 1991).

En la actualidad, donde la tecnología, la electricidad y la electrónica son indispensables y omnipresentes, el aprendizaje sobre estos temas proporciona bases sólidas para comprender y aprovechar la tecnología actual y futura².

Conforme a lo expuesto la presente investigación tiene como objetivo general diseñar un conjunto de actividades experimentales para favorecer la construcción de conocimientos sobre las corrientes parásitas en estudiantes de escuela secundaria.

Con el fin de alcanzar este objetivo central, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Analizar el desarrollo de las corrientes parasitarias desde Arago hasta Foucault, con el fin de proporcionar un fundamento sólido para el diseño de actividades experimentales en la escuela secundaria.
- Identificar y valorar diferentes montajes experimentales, con énfasis en el Tubo de Lenz, para determinar su ventajas y limitaciones para la enseñanza de las corrientes parasitarias en la escuela secundaria.
- Proponer mejoras específicas al Tubo de Lenz, considerando tanto aspectos teóricos como experimentales, con el objetivo de optimizar su uso en la escuela secundaria.
- Validar un modelo matemático para determinar las corrientes parasitarias en actividades experimentales específicas que involucren tubos de Lenz.
- Definir las características que deben poseer las actividades experimentales con el fin de favorecer la construcción de conocimiento escolar sobre las corrientes parásitas.

Finalmente, la metodología estuvo comprendida por tres fases:

Fase 1: En esta fase inicial, se realizó una revisión exhaustiva y selección de documentos relacionados aspectos experimentales de equipos de laboratorio, con un enfoque específico sobre las corrientes parásitas y el tubo de Lenz. En esta fase se investigó en

² Este hecho no es una conclusión propia, sino una afirmación respaldada por la realidad, como podemos encontrar en varios libros de texto, especialmente de electricidad y magnetismo (Giancoli, 2007).

literatura científica, investigaciones previas, antecedentes; con el fin de tener una base de datos profunda sobre aspectos teóricos y experimentales respecto al efecto de corrientes parasitas. Los más significativos se encuentran tanto en el Capítulo 2 como en la bibliografía.

Fase 2: En la segunda fase se construyó el montaje experimental Tubo de Lenz. En esta fase, se seleccionaron múltiples materiales, y se eligieron 3 específicos para el tubo (plástico, cobre y aluminio), para que el efecto fuera visualmente atractivo. Además, se realizó un análisis cualitativo y cuantitativo del montaje experimental para identificar y destacar las ventajas, que posteriormente se utilizan en el diseño de las actividades experimentales propuestas.

Fase 3: La última fase, se enfocó en el diseño y desarrollo actividades experimentales semiestructuradas, con metodología tipo: predecir, observar y explicar (POE). Estas actividades fueron diseñadas de forma secuencial, y estaban centradas en la construcción de conocimiento por parte de los estudiantes.

VISIÓN GENERAL DEL DOCUMENTO

Este documento se divide en cinco capítulos.

El primer capítulo de este trabajo se hace una investigación y revisión del desarrollo histórico de las corrientes parasitarias desde Arago hasta Foucault. Se inicia con un contexto sobre los avances en electricidad y magnetismo en el siglo XIX, destacando inventos revolucionarios. El capítulo explora experimentos fundamentales para el electromagnetismo, como el de Arago, cuya exploración experimental llegó al descubrimiento de un “magnetismo en rotación”. En 1831, Faraday complementó el descubrimiento de Arago con una explicación matemática conocida como la “Ley de Inducción magnética”, la cual también se vio influenciada con otros pensadores como Oersted, quien previamente habían establecido la relación entre electricidad y magnetismo. La sección concluye con la exposición de las corrientes de Foucault, y las condiciones necesarias para su inducción. Además, se abordan las aplicaciones actuales, desde su papel en el frenado de trenes Maglev hasta la detección de metales y su contribución a la industrialización moderna. Este viaje sienta las bases para comprender la importancia de las corrientes parasitarias en diversos contextos tecnológicos y científicos.

En el segundo capítulo se revisan diversos montajes experimentales para la enseñanza de los fenómenos de inducción y corrientes parasitarias en escuela secundaria y universidad. Se destacan experimentos comunes, como experimentos cualitativos y cuantitativos del frenado de un disco de cobre cerca de un imán. Se mencionan montajes relevantes, como el "Freno Magnético" y la levitación magnética en trenes Maglev, pero se enfatiza en el "Tubo de Lenz" debido a su representación visual impactante y su accesibilidad en costos. El capítulo se centra luego en antecedentes cuantitativos y cualitativos del Tubo de Lenz, abordando limitaciones y proponiendo una aproximación integral para la enseñanza, considerando aspectos teóricos y experimentales.

En el tercer capítulo se aborda un modelo matemático específico para el tubo de Lenz cuando el imán de neodimio tipo arandela se desliza de forma externa a lo largo de un tubo conductor. En consecuencia, se plantea un modelo basado en el trabajo de Chávez (Bacilio, 2019), que considera diversos factores como el campo magnético, el material conductor y sus propiedades. Adicionalmente, se describe el montaje experimental desarrollado por la autora, utilizando tubos de aluminio, cobre y plástico. Finalmente, se presenta el análisis cualitativo y cuantitativo del movimiento del imán en relación con la 'amortiguación magnética', realizado por la autora considerando aspectos teóricos y experimentales.

En el cuarto capítulo de este trabajo, se presenta una secuencia de actividades experimentales diseñadas para estudiantes de décimo a undécimo grado en la educación secundaria, con el objetivo de proporcionarles oportunidades para construir conocimiento sobre las relaciones entre los campos magnéticos, los cambios en el tiempo y la generación de corriente eléctrica, centrándose específicamente en las corrientes parasitas. Las actividades se dividen en fases de predecir, observar y explicar (POE), promoviendo la participación activa de los estudiantes y el desarrollo de habilidades como la anticipación, resolución de problemas y trabajo en equipo. Se incluyen detalladamente cinco actividades experimentales propuestas, cada una con sus objetivos, materiales y fases de desarrollo específicas.

En el quinto capítulo, se presentan las conclusiones sustanciales derivadas de la investigación realizada, las cuales nos brindan la oportunidad de inferir y proponer actividades de carácter experimental centradas en el estudio del fenómeno del tubo de Lenz. Estas actividades se perfilan como instrumentos pedagógicos para ser implementados en el

ámbito educativo de estudiantes de secundaria, facilitando así la construcción de conocimiento y comprensión más profunda y participativa de los principios físicos involucrados por parte de los estudiantes.

1 UN VIAJE A TRAVÉS DE LAS CORRIENTES PARÁSITAS: DESDE ARAGO HASTA FOUCAULT.

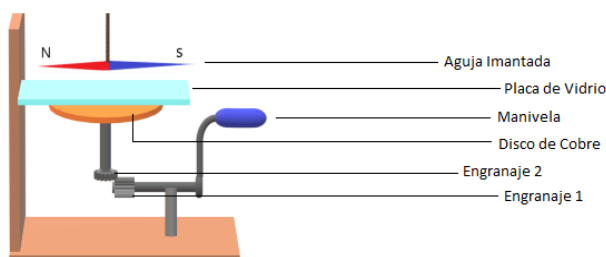
En la historia de la física del siglo XIX se realizaron los primeros desarrollos teóricos y experimentales sobre la electricidad y el magnetismo, dichos estudios permitieron el descubrimiento de la inducción de una corriente eléctrica debido a un campo magnético variable y las corrientes parásitas. Esto provocó un cambio en la perspectiva de vida y produjo cambios positivos en el ser humano ya que gracias a estos desarrollos se llegaron a inventos tales como el motor, el transformador, la bobina, entre otros.

En este capítulo se presenta la base teórica necesaria para comprender el efecto de las corrientes parásitas: Inicialmente, hay un recorrido histórico que abarca la experimentación, los descubrimientos correspondientes y las leyes que permitieron su formulación, como la Ley de Faraday-Lenz, además, de mencionar a otros influyentes pensadores como Oersted; todo esto para contextualizar las corrientes parásitas, ya que sin su contribución sería imposible comprender el efecto en el tubo de Lenz. Finalizando el capítulo, se encuentra una mención de los dispositivos tecnológicos actuales que sirvieron de inspiración para el desarrollo del presente trabajo.

1.1 El legado de Faraday, Oersted y Lenz en las Corrientes Parásitas

El científico francés llamado Francois Arago (1786-1853), fue el pionero en estudiar el fenómeno del “magnetismo en rotación” -quien, sin saberlo, era el experimento precursor de las corrientes parásitas-, realizó varios experimentos entre los que destacó la disminución del movimiento de una aguja magnetizada suspendida y el disco de Arago.

Ilustración 1. Experimento de Arago



Fuente: Realización propia.

El disco de Arago, (Ilustración 1) el cual consiste en una manivela conectada a dos engranajes, que a su vez hacen girar un disco metálico ubicado al final del eje del segundo engranaje, sobre el disco metálico hay una placa de vidrio que separa el disco de la aguja magnetizada, en este experimento concluyó que existía una relación entre el magnetismo y los metales no férricos. Aunque no pudo proporcionar una explicación matemática para estos fenómenos, sus observaciones sentaron las bases para investigaciones posteriores.

Como resultado, el 22 de noviembre de 1824, lo publicó en la Academia de Ciencias de Francia y lo llamo “Magnetismo en rotación” (McGraw-Hill, 1893), sin embargo, no logro dar una explicación matemática del fenómeno, el cual solo fue resuelto hasta 1831 por Michael Faraday.

Hans Oersted, con sus trabajos investigativos desarrolló un experimento con un circuito galvánico, entre otros, estos contribuyeron a la discusión que se estaba dando en el siglo XIX, sobre la relación entre la electricidad y magnetismo.

Al mismo tiempo, algunos científicos de la época se esforzaron por explicar este fenómeno dentro de las teorías existentes, como la ley de acción a distancia de Newton; uno de ellos fue Biot, quien propuso que el circuito galvánico de Oersted generaba un efecto circular alrededor del alambre, Biot postuló con la ayuda de Savart con la configuración geométrica y matemática disponible, lo que resultó como la ley de Biot-Savart:

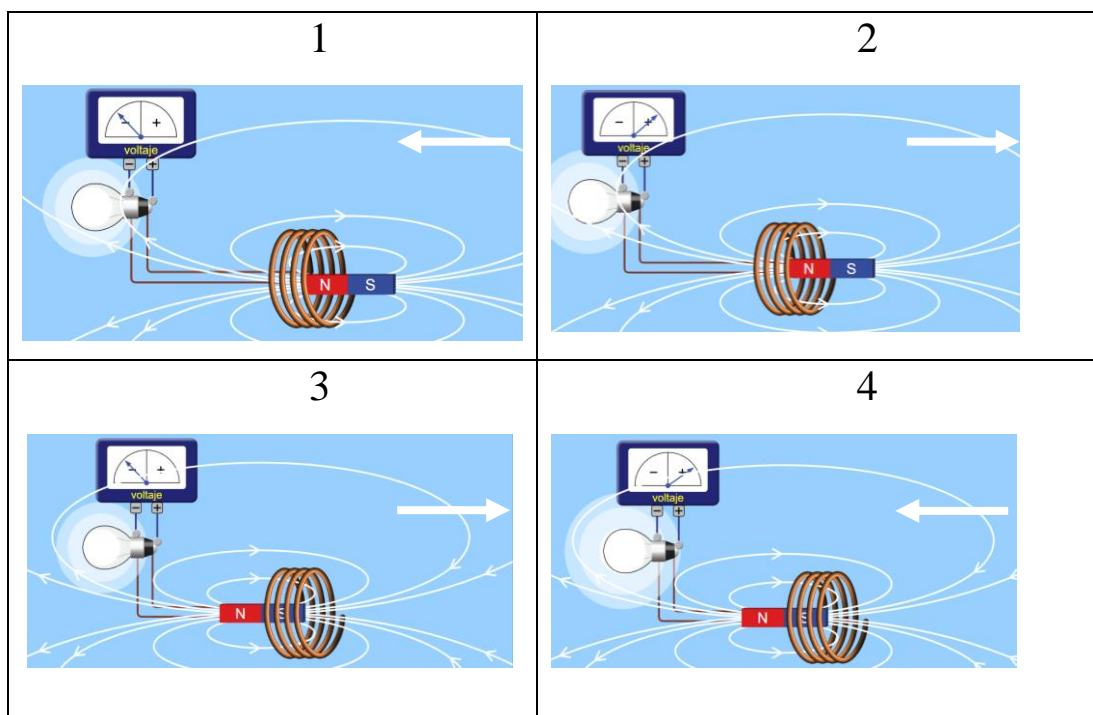
Ecuación 1 Ley de Biot-Savart

$$dB = \left(\frac{\mu\sigma}{4\pi}\right) \cdot \frac{I \cdot dl}{r^2}$$

Fuente: (Sears, Zemansky, & Young, 1988)

En paralelo, Michel Faraday realizó experimentos inspirados en los trabajos de Arago, Oersted y Biot Savart desde 1821. En el año 1831, Faraday postuló la ley de inducción magnética, después de observar que un campo magnético variable en el tiempo generaba una corriente que se alcanzaba a registrar en un galvanómetro. Además, Heinrich Lenz formuló la Ley de Lenz, que establece que la polaridad de la fuerza electromotriz inducida en una espira genera una corriente cuyo campo magnético generado se opone al cambio en el flujo magnético inicial, estas dos leyes se pueden evidenciar en la siguiente tabla.

Tabla 1 Escala de galvanómetro cuando un campo magnético perturba el circuito.



Fuente: PhET. Colorado.

Figura 4 (Halliday Resnick, Robert Resnick, 1977)

Así, los experimentos de Faraday (Alonso & Onofre, 1987), lo llevaron a deducir que el cambio en el flujo de inducción magnética para la bobina del primer circuito puede ser producido con un imán o con una espira común, la ley de Faraday es la siguiente:

Ecuación 2 Ley de Faraday.

$$v_{ind} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

En la anterior ecuación podemos observar cómo v_{ind} es la fuerza electromotriz inducida (fem) en un circuito, es igual al valor negativo de la rapidez con la cual está cambiando el flujo magnético que atraviesa el circuito, el signo negativo indica el sentido de la fem y N el número de vueltas del alambre que tiene la bobina (Resnick & Halliday, 1977). Por este descubrimiento Faraday fue “considerado como el mayor físico experimental del siglo XIX” (Jewett, 2004).

Con sus resultados obtenidos, concluye que un campo magnético en movimiento genera una corriente inducida en un material conductor siempre que este se encuentre de

forma perpendicular al desplazamiento; también concluyó que, si dejaba quieto el imán, en otras palabras, si el campo magnético no variaba, no existiría esa fem.

Para concluir, los avances producidos en el campo del electromagnetismo en el siglo XIX, como los experimentos de Arago, la Ley de inducción y la Ley de Lenz sentaron las bases para el desarrollo de la teoría electrodinámica y el estudio del campo electromagnético, lo que a su vez impulsó importantes avances tecnológicos en la generación y transmisión de energía eléctrica, motores y otros dispositivos electromagnéticos.

1.2 Corrientes Parásitas

Las corrientes de León Foucault (1819-1868) llevan su nombre debido a que él fue quien descubrió estas, o también llamadas corrientes de Eddy³ o corrientes parasitas⁴, son “corrientes circulares que crean electroimanes con campos magnéticos que se oponen al efecto del campo magnético aplicado” (Reyes, Pinto, 2014), estas circulan por el material preferiblemente en la superficie de este, siendo conocido este fenómeno como efecto skin o efecto piel “son muy efectivas en apantallar los campos electromagnéticos de alta frecuencia” (Gil, 2014).

En otras palabras, las corrientes parásitas son el resultado de un campo magnético variable, estas describen una trayectoria circular en un material conductor, que a su vez produce una fuerza electromotriz en el material.

En consecuencia, las corrientes de Foucault generan una “*potencia Joule disipada en los conductores a consecuencia de este efecto varia aproximadamente como la frecuencia del campo aplicado al cuadrado*” (Gil, 2014) en otras palabras, al producirse estas corrientes, el material que inicialmente era para aumentar la eficiencia se ve afectado y produce una pérdida de energía que se transforma en calor.

Además, se deben tener unos factores específicos para que se produzca esta inducción como lo son: la conductividad, la magnitud del campo magnético primario, la permeabilidad del conductor, las variaciones geométricas, el acoplamiento magnético, la falta de homogeneidad, la discontinuidad, entre otros factores.

³ Nombre de las corrientes parásitas en países de habla inglesa (Eddy currents).

⁴ Principalmente se les reconoce así en países hispanohablantes, y esto debido a que estas corrientes, tienen un efecto “indeseado” en algunas aplicaciones, en sistemas eléctricos y magnéticos (Gil, 2014).

1.2.1 Aplicaciones Actuales más Reconocidas de las Corrientes de Foucault

Las corrientes parásitas aparecen como “problemas” o fenómenos indeseados debido a sus efectos disipativos, como en núcleos de transformadores, partes metálicas de motores y generadores etc., (González M. I., Experiments with eddy currents: the eddy current brake, 2004). Sin embargo, tienen diferentes aplicaciones funcionales como las que se mencionan a continuación.

Las corrientes parásitas desempeñan un papel crucial en el tren de levitación Maglev, que es conocido por su singularidad como medio de transporte terrestre. A diferencia de los trenes comunes, no está sujeto a la fuerza de la fricción, ya que este se encuentra levitando debido a unas fuerzas magnéticas que actúan sobre él. Esta característica elimina la fricción mecánica; sin embargo, estos viajan a altas velocidades, necesitando un sistema de frenado eficaz, y aquí es donde aparecen las corrientes parásitas (Serway & Jr., 2004) Estas se inducen en el material del tren para reducir su velocidad o detenerlo progresivamente. Además de que estos sistemas de frenado también se están desarrollando para camiones y otros medios de transporte terrestre, sin embargo, aún se han desarrollado estudios no destructivos.

En la industria se pueden encontrar fallas en materiales, se identifican las corrientes parásitas mediante un detector de metales; cuando se acerca un metal conductor al campo magnético del detector, este sufre una variación, debido a que, en el metal se genera una corriente eléctrica, que a su vez origina un campo magnético alrededor de este y que afectará el campo magnético del detector, enviando una señal para advertir que hay una variación en el metal conductor (Wood, 1991).

Adicionalmente, se pueden encontrar estas corrientes en otros artefactos tales como hornos de inducción, los cuales usan altas frecuencias de corriente inducida, en donde esta circula por los hornos produciendo un rápido aumento de temperatura en un intervalo de tiempo relativamente breve.

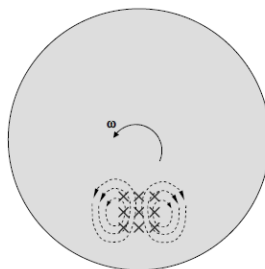
En la industria del reciclaje, estas tecnologías se emplean no solo para detectar y separar material no férnico, sino que los equipos más avanzados incorporan un rodillo magnético de alta velocidad, este rodillo genera un potente campo magnético alterno de alta frecuencia, induciendo un movimiento rotativo en el material y facilitando así su separación

efectiva. (Felemang, S.L., 2016). En este sentido las corrientes parásitas han tenido un gran auge en la industrialización moderna y por lo tanto se considera que debe ser importante que los estudiantes conozcan que tipo de efecto es el que se utiliza en la industrialización actual.

2 MONTAJES EXPERIMENTALES PARA EL ESTUDIO DE LOS FENÓMENOS DE INDUCCIÓN YA LAS CORRIENTES PARASITAS

En la revisión bibliográfica, se encuentran diversas propuestas de experimentos destinados a la enseñanza de las corrientes parasitarias en los niveles de escuela secundaria y universidad. Uno de los experimentos más comunes implica el uso de un disco de cobre que gira cerca de un imán, ilustrando claramente cómo estas corrientes pueden frenar el movimiento (González, 2004). En este experimento, se calculan las pérdidas por corrientes parasitarias en discos de metales conductores, como aluminio, cobre, latón y acero, permitiendo cuantificar las corrientes en estos discos y establecer comparaciones significativas. Aunque proporciona una representación palpable de los efectos de las corrientes parasitarias, como se observa en la ilustración 3, puede carecer de profundidad teórica.

Ilustración 2. Disco cuantitativo corrientes circulares



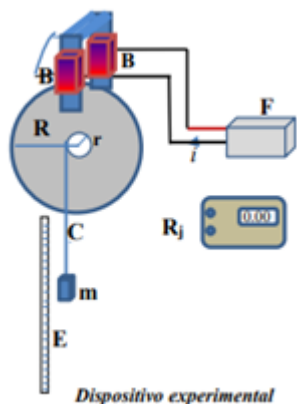
Fuente: (González M. I., Experiments with eddy currents: the eddy current brake, 2004)

Otro experimento relevante implica la observación de cómo una moneda de cobre se calienta cerca de un imán, destacando el efecto térmico asociado a las corrientes parasitarias (Escobar, 2017). Este experimento proporciona una conexión tangible entre las corrientes parasitarias y los cambios en la temperatura de un material conductor bajo la influencia de un campo magnético.

Otro montaje experimental hace uso de una máquina de Atwood en donde para cuantificar la aceleración de la gravedad, se utiliza en vez de una polea un disco de aluminio, que este perturbado por un campo magnético, cuando se hace girar el disco colocándole una masa que pende de él, el campo magnético presente lo frena, como se ve en la Ilustración 3; el objetivo del estudio es enfrentar dos campos, el gravitacional y el magnético. Este estudio,

es una muestra de los avances que se hacen de estos efectos electromagnéticos, ya que este estudio se construye como posible primer prototipo de un freno electromagnético, este estudio está limitado a la interacción de los dos campos (Hernández, Sola de los Santos, & Fernández, 2019).

Ilustración 3. Disco cuantitativo



Fuente: Latin-American Journal of Physical Education.

El "Freno Magnético" (González, Hernández, & Mora, 2010) es otro montaje experimental relevante, que estudia el sistema dinámico de un deslizador sobre un riel, experimentando desaceleración debido al freno electromagnético. Este prototipo educativo es un primer acercamiento a la modernización del uso de corrientes parasitarias.

La enseñanza sobre corrientes parasitarias se amplía mediante experimentos que ilustran la levitación magnética, como se evidencia en la aplicación de trenes Maglev, así como en su uso en detectores de metales (Wood, 1991). Estos ejemplos prácticos ofrecen una comprensión más completa de cómo las corrientes parasitarias no solo afectan el movimiento de objetos, sino que también tienen aplicaciones tecnológicas significativas en la actualidad.

En el ámbito de la enseñanza de las corrientes parasitarias, se destaca el uso del "Tubo de Lenz", que ofrece una representación visual impactante de cómo estas corrientes pueden influir en el movimiento de un objeto magnético que cae dentro de un tubo metálico (Autor 1). Este enfoque visual no solo refuerza la comprensión del efecto, sino que también brinda una experiencia educativa memorable para los estudiantes.

En conclusión, aunque existen diversas actividades y montajes experimentales para la enseñanza de corrientes parasitarias, la elección del "Tubo de Lenz" se justifica por varias razones clave. Este experimento ofrece una representación visual impactante, captando la atención de los estudiantes y facilitando la comprensión del impacto de las corrientes parasitarias. Permite a los estudiantes explorar la relación entre el campo magnético y las corrientes inducidas mediante la observación directa, fomentando una comprensión más profunda del fenómeno. Además, el Tubo de Lenz es más accesible en términos de costo de los equipos, facilitando su implementación en entornos educativos con recursos limitados. La naturaleza "contraintuitiva" de este experimento tiene el potencial de despertar la curiosidad de los estudiantes, estimulando la reflexión crítica y promoviendo una comprensión más completa de las corrientes parasitarias.

Por estas razones, se procedió a revisar la literatura para identificar trabajos experimentales con tubos de Lenz con fines educativos y establecer criterios para la formulación de actividades experimentales en el aula. Los estudios identificados incluyen propuestas tanto cualitativas como cuantitativas relacionadas con el Tubo de Lenz, proporcionando una base sólida para la creación de actividades educativas.

2.1 Experimentos Cuantitativos y Cualitativos de Amortiguación Magnética en el Tubo de Lenz.

El primer antecedente se titula "Análisis descriptivo de la inducción electromagnética en el tubo de Lenz mediante el uso de una interfaz" (Arango, 2016), en donde se miden las corrientes inducidas en una interfaz⁵ para el análisis de señales eléctricas con el fin de explicar el movimiento de caída del imán dentro del tubo de aluminio y cobre; por medio de una conexión del tubo de Lenz con unas bobinas pequeñas y el computador; esta conexión se daba por medio de un conector Jack (plug de sonido), estos "plugs" llegan a la interfaz, que analizaba estos "archivos de audio"; el trabajo propone un análisis magnético del imán que relaciona su efecto a pequeñas diferenciales de área del tubo que relaciona como espiras. Este trabajo ayuda a la construcción teórica del presente trabajo ya que, gracias a su propuesta

⁵ En este trabajo de diseño una interfaz capaz de analizar señales eléctricas, que el conector Jack transformaba archivos de audio, y así poder describir y explicar el problema de la caída lenta del imán dentro del tubo conductor, esta fue desarrollada en el software Matlab.

de hacer un análisis electromagnético de espiras, fue más fácil estudiar el efecto, sin embargo, al caer el imán por dentro del tubo no es apreciable su efecto y esto dificulta la apreciación del efecto.

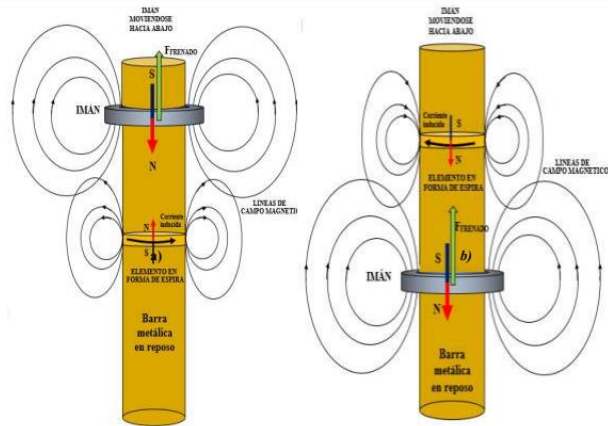
El segundo antecedente titulado “Un Experimento Para El Estudio Del Fenómeno De Inducción Electromagnética En El Aula” (Garzón, 2013) es similar al anterior, ya que en él podemos encontrar el estudio de la caída de un imán por el interior de un tubo de cobre, donde, por medio de una interfaz hecha en el software Audacity, se detectan de audio conectados a unas bobinas distribuidas a lo largo del tubo.

Este trabajo, tiene un desarrollo conceptual cualitativo sobre el momento magnético del imán, y el momento magnético de una espira del corriente, estas explicaciones precisas y detalladas permiten entender el fenómeno de manera clara y eficaz. Sin embargo, tiene la misma carencia del anterior, lo que impide que el estudiante pueda visualizar el efecto y solo lo pueda relacionar con los números que aparecen en la pantalla.

El tercer antecedente, titulado “A quantitative magnetic braking experiment” (MacLatchy, Backman, & Bogan, 1993) consta de la experimentación con un tubo de Lenz tradicional, en el cual se deja caer un imán cilíndrico que está conectado en sus dos extremos dentro del tubo por unos muelles, unas bobinas por fuera del tubo miden la corriente inducida mientras el imán oscila. Aunque es un enfoque innovador al modelo tradicional del tubo, porque se centra en el cambio del momento magnético durante la oscilación, omitiendo fuerzas producidas en la caída del imán. En el presente trabajo se explora tanto el momento magnético como las implicaciones de la caída del imán ampliando la perspectiva del estudio.

El último antecedente y el más importante debido a la semejanza que tiene con el presente trabajo, es el artículo titulado “*Determinación de la fuerza de frenado electromagnético sobre un imán cilíndrico hueco que se mueve por una barra de aluminio*” (Bacilio, 2019), en este se propone un experimento, en donde un imán en forma de arandela cae a través de tubo conductor como se encuentra en la Ilustración 4. A diferencia de la mayoría de los trabajos con tubos de Lenz, en donde se trabaja con un imán cilíndrico que cae dentro del tubo, en este, se trabaja con un imán en forma de arandela que cae por fuera del tubo, lo cual permite observar el efecto de las corrientes parásitas; este antecedente es relevante ya que propone un modelo de cuantificación del campo magnético que se utiliza como referente para el modelado del presente trabajo.

Ilustración 4. Tubo de Lenz Arandela



Fuente: (Bacilio, 2019).

Aunque este antecedente es primordial, presenta limitaciones, como la ausencia de actividades experimentales que orienten el uso del Tubo de Lenz para el estudio de las corrientes. Aunque se mide la velocidad del descenso del imán, el material del tubo se mantiene constante, lo cual impide relacionar el material conductor y el “amortiguamiento magnético”⁶. En este sentido, el presente trabajo de grado pretende abordar estas carencias para ofrecer una propuesta integral para la enseñanza.

⁶ Revisar el Capítulo 2, sección 2.3 Modelo Matemático de la Caída el Imán tipo Arandela por el Tubo de Lenz.

3 EL TUBO DE LENZ CON IMÁN TIPO ARANDELA: MODELO MATEMÁTICO, MONTAJE EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS DEL MOVIMIENTO

No existe una ecuación específica para medir las corrientes parásitas, debido a los múltiples factores que se necesitan para producirlas, las condiciones que debe tener el campo magnético que las produce y adicionalmente el tipo de material conductor, su permeabilidad, su volumen, etc., por lo tanto se debe proponer un modelo para cada caso específico, como en el presente trabajo de grado se utiliza un montaje experimental específico⁷ en donde un imán de neodimio tipo arandela se desliza a lo largo de un tubo conductor, aquí se presenta una propuesta de modelo matemático para calcular aproximadamente la ‘amortiguación magnética’, esta fuerza que se contrapone a el peso del imán. Este modelo está basado en el modelo matemático propuesto por Mario Elder Chávez, profesor de la Universidad Nacional de Trujillo (Bacilio, 2019).

Para cada experimento se deja suspendido el tubo de metal no magnético de uno de los extremos, cuando el imán de neodimio tipo arandela se suelta desde la parte superior del tubo de cobre o aluminio (metales no magnéticos y que son los seleccionados para este trabajo de grado), se puede observar la caída del imán externamente al metal no magnético, se puede notar además que la caída del imán no es un movimiento de caída libre, sino que es un movimiento ralentizado por fuerzas inducidas de atracción y repulsión. Así mismo, mediante este experimento se puede ver directamente la amortiguación o frenado magnético del imán.

Durante la caída del imán, se presenta una variación del flujo magnético que induce unas corrientes (corrientes I_1 e I_2) en la sección transversal del tubo de metal, tanto en la parte superior e inferior del imán (conocidas como corrientes parásitas).

De acuerdo con la polaridad de caída del imán y según la dirección de la corriente inducida al circular por el tubo genera un campo magnético cuya polaridad produce una fuerza de atracción y repulsión sobre la caída del imán. Aparece la fuerza de repulsión en la parte inferior del imán y la fuerza de atracción en la parte superior del imán. Cada porción

⁷ Revisar el capítulo 3, sección 3.1 Ilustración (Artefacto Tubo de Lenz).

del tubo tanto en la parte superior o inferior del imán se comporta como una espira circular de corriente, tratando dicha espira como un dipolo magnético.

Las corrientes inducidas producen una fuerza magnética⁸, que llamaremos amortiguación magnética $\overrightarrow{A_m}$ sobre el imán cuyo efecto será siempre oponerse al peso del imán, notándose que el imán cae lentamente impidiendo el descenso libre del mismo es decir tiende a tener una velocidad constante.

Tenemos la ecuación de movimiento⁹, \overrightarrow{W} : el peso del imán; m: la masa del imán; g: la aceleración de la gravedad.

Ecuación 3 Peso: W.

$$\overrightarrow{W} = m\overrightarrow{g}$$

Como la amortiguación magnética $\overrightarrow{A_m}$ se opone a la caída libre del imán, tenemos la siguiente expresión del modelo electromecánico:

Ecuación 4 Amortiguación Magnética y W.

$$\overrightarrow{W} - \overrightarrow{A_m} = m\overrightarrow{g}$$

Como el movimiento del imán es unidireccional, tomamos el eje z, por ejemplo, como dirección del movimiento, en este caso la ecuación (2) tendrá la forma:

Ecuación 5 Amortiguación Magnética 2

$$m \frac{d^2z}{dt^2} + \overrightarrow{A_m} = mg$$

Ahora, $\overrightarrow{A_m}$ se puede expresar como:

Ecuación 6 Amortiguación Magnética 3

$$\overrightarrow{A_m} = -\kappa v$$

⁸ Es esta capacidad de atracción o repulsión, en este caso del imán, que como se mencionó en el párrafo anterior, se genera de forma opuesta a la fuerza magnética del imán, en la parte inferior, su efecto es repelerlo y en la parte superior atrae el imán.

⁹ Ya que en este capítulo se plantea una posible propuesta para analizar el movimiento del imán durante la caída, se utilizarán algunos de los principios fundamentales de la física establecidos en ecuaciones generales, ampliamente reconocidas en la comunidad científica. Dada la amplia aceptación de estas ecuaciones, se procede a utilizar las provenientes de textos y materiales universitarios como: “Serway 1 y 2”, (Serway & Jewett, 2003) (Serway & Jr., 2004), “Física, Campos y Ondas” (Alonso & Onofre, 1987) , “Introducción a la Mecánica” (Londoño V., 2003) entre otra literatura científica citada en el trabajo.

Siendo κ una constante sujeta a la naturaleza y forma geométrica del sistema imán-tubo, y v la velocidad del imán, depende del momento magnético (M), σ conductividad del tubo, c radio medio del tubo, ϵ el espesor del tubo.

Por lo tanto, la ecuación de amortiguación magnética queda de la siguiente forma:

Ecuación 7 Amortiguación Magnética 4

$$\vec{A}_m = \frac{(45\mu_0 M)^2 \sigma \epsilon}{1024 c^4}$$

Fuente: Realización Propia

Esta fuerza es proporcional a la primera potencia de la velocidad (Arango, 2016).

El campo magnético del imán lo modelamos como un dipolo magnético, este campo en coordenadas cilíndricas tiene dos componentes, una en dirección radial y otra a lo largo del eje z . La fuerza que ejerce este dipolo sobre la sección transversal del tubo (tomamos el tubo como una conformación de espiras), por lo tanto, asumimos que es una porción de espira dl de corriente inducida de intensidad I , está dada por la relación de Lorentz:

Ecuación 8

$$d\vec{F} = Idl \times \vec{B}$$

o bien si se hace $\vec{dl} = \vec{a}_t dl$ siendo \vec{a}_t un vector tangente unitario a la espira

Ecuación 9

$$d\vec{F} = Idl \vec{a}_t \times \vec{B}$$

Para encontrar el campo magnético del imán de neodimio en forma de arandela (cilíndrico hueco) con magnetización permanente, uniforme y axial se puede expresar mediante las dos componentes una radial y la otra axial; por lo tanto, el campo magnético es producido por las densidades superficiales de corriente que se presentan en las superficies laterales con radio interior y la superficie lateral con radio mayor.

Seleccionamos el modelo donde el campo magnético del imán permanente tipo arandela (cilíndrico hueco) es producido por una distribución de corriente equivalente. De acuerdo con las ecuaciones de Maxwell, podemos obtener una expresión para el campo magnético mediante la introducción del potencial vector magnético \mathbf{A} así:

Ecuación 10

$$\mathbf{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_S \frac{\mathbf{M} \times \mathbf{n}}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} dS = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_S \frac{J_{sm}}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} dS$$

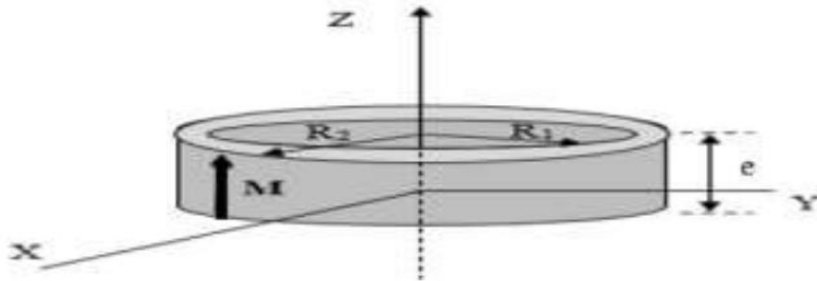
S, es la superficie que rodea al imán permanente, $|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$ es la distancia desde el elemento diferencial dV al punto \mathbf{p} donde se evalúa el campo, \mathbf{n} es el vector unitario normal saliente a la superficie del imán y $\mathbf{M} \times \mathbf{n} = \mathbf{J}_{sm}$, como una densidad superficial de corriente equivalente, obtenemos:

Ecuación 11

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} = \mu_0 4\pi \oint \frac{J_{sm} \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} dS$$

Tomando el imán tipo arandela (cilíndrico hueco) uniformemente magnetizado, $\mathbf{M} = M \mathbf{k}$, de radios interior R_1 y exterior R_2 , y espesor que se muestra en la ilustración 4.

Ilustración 5. Imán Arandela y sus ejes



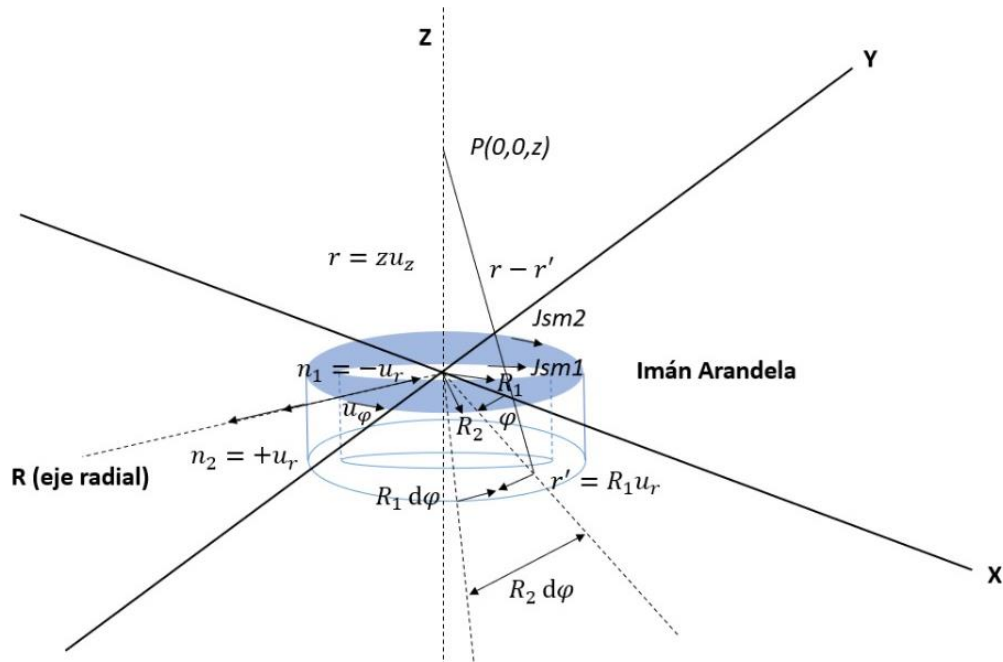
Fuente: (Gil, 2014)

Figura 4. Imán en forma de arandela (cilíndrico hueco) uniformemente magnetizado en la dirección del eje axial Z. (tomado de Chávez, M.; revista Ciencia y Tecnología, pág. 114)

De acuerdo con el producto vectorial para $\mathbf{J}_{sm} = \mathbf{M} \times \mathbf{n} = \mathbf{0}$ este valor se cumple en las superficies de la cara superior e inferior del imán tipo arandela porque los vectores \mathbf{M} y \mathbf{n} tienen la misma dirección; Para las superficies laterales interna y externa del imán tipo arandela existe las corrientes superficiales porque la dirección del vector unitario normal \mathbf{n} saliente para cada superficie, este es perpendicular al vector de magnetización \mathbf{M} (ver figura 5). En la superficie lateral interior $\mathbf{J}_{sm} = \mathbf{M} \times \mathbf{n}$ tiene sentido opuesto al de la superficie lateral exterior. Por lo tanto, las corrientes en estas superficies son de sentido contrario, y por lo tanto el imán tipo arandela se puede asociar como un sistema de dos espiras concéntricas

por donde fluyen corrientes de sentidos opuestos. Por lo indicado antes el campo generado por el imán en forma de arandela se puede evaluar en cualquier punto del eje axial Z de la siguiente manera:

Ilustración 6. Imán Arandela y ejes 2



Fuente: Realización propia

En la ilustración 6 se encuentra el imán en forma de arandela¹⁰, se observan la orientación de los vectores unitarios normales en las superficies laterales interior y exterior y sentido de la circulación de las corrientes superficiales (tomado de Chávez, M.; revista Ciencia y Tecnología, pág. 114)

Adicionalmente en el imán en forma de arandela, se usa una geometría para determinar el campo magnético producido por las corrientes superficiales en el punto P (0, 0, z); a) sistema de referencia (tomado de Chávez, M.; revista Ciencia y Tecnología, pág. 114)

Según la ecuación 7 calculamos el campo magnético para la superficie lateral interior B1 y la lateral exterior B2. Para la superficie lateral interior B1 y reemplazándolos luego en la ecuación 7:

¹⁰ Cilíndrico hueco.

Ecuación 12

$$J_{sm1} = M \times n_1 = Mk \times n_1 = Mk \times (-u_r) = -Mu_\varphi$$

Ecuación 13

$$r = zk ; r' = R_1 u_r ; |r - r'|^3 = (z^2 + R_1^2)^{\frac{3}{2}}$$

Ecuación 14

$$dS = e R_1 d\varphi$$

Ecuación 15

$$B_1 = - \frac{\mu_0 M e R_1^2}{2(R_1^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \hat{k}$$

Similarmente encontramos la ecuación para la superficie lateral exterior:

Ecuación 16

$$B_2 = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{S_2} \frac{J_{sm2} \times (r - r')}{|r - r'|^3} dS = \frac{\mu_0 M e R_2^2}{2(R_2^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \hat{k}$$

El campo magnético total sobre el eje Z es:

Ecuación 17

$$B = B_1 + B_2 = \frac{\mu_0 M e}{2} \left[\frac{R_2^2}{(R_2^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{R_1^2}{(R_1^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \right] \hat{k}$$

Para continuar con el estudio de las corrientes inducidas y la fuerza de frenado en el imán con forma de arandela (cilíndrico hueco) tomaremos el modelo que se ha estudiado más y que por su similitud con el modelo de nuestro proyecto y es el del imán cilíndrico que cae dentro de un tubo de metal diamagnético. Al caer el imán dentro del tubo metálico de cobre o aluminio existe una variación del flujo magnético y que al atravesar la superficie del tubo induce una fuerza electromotriz en el tubo, que produce corrientes de Foucault también conocidas, como corrientes de Eddy o corrientes parasitas.

Cuando el imán cilíndrico cae dentro del tubo conductor, éste experimenta una fuerza de frenado magnético que equilibra el peso del imán y hace que este se mueva con velocidad

constante. Como indicábamos antes, la componente radial del campo magnético es la que produce la fuerza de frenado magnético o amortiguación magnética sobre el imán.

Para continuar con el estudio es posible hacer una semejanza entre un imán permanente y una espira de corriente y que por su geometría permite hacer simple los cálculos.

Para concluir el análisis, la segunda Ley de Newton establece que la fuerza total sobre un cuerpo es igual a la masa por la aceleración. En este caso específico, la fuerza que impulsa el movimiento del imán es la fuerza gravitatoria, dicho de otra manera, el peso del imán: $F = ma$. Siendo F la fuerza, m la masa del imán y a la aceleración, que en este caso sería la gravedad. Esta es la fuerza que actúa sobre el imán para que caiga inicialmente, no obstante, la amortiguación magnética actúa en sentido contrario.

Para que la fuerza (F), en este caso el peso, sea cero como se puede observar en el movimiento, realizamos esta propuesta de la ecuación que describe un equilibrio de fuerzas en el movimiento vertical:

$$0 = A_m - F = m * \frac{dv}{dt}$$

En donde A_m es la amortiguación magnética, F el peso del imán. Ya que la velocidad es una constante (Tabla 4 Velocidad) entonces ese producto daría cero; la ecuación simplificada sería:

$$0 = A_m - F$$

Esto implica que la fuerza de la amortiguación magnética es igual al peso del imán, pero en dirección opuesta, como la sumatoria de estas dos fuerzas contrarias es cero, mantienen al imán en un movimiento constante, sin aceleración apreciable.

3.1 Montaje experimental

En el presente estudio, se realizó un montaje experimental para estudiar la caída amortiguada de un imán en forma de arandela por un tubo de Lenz. El montaje se diseñó para registrar con precisión el comportamiento del imán; a diferencia de los tubos de Lenz tradicionales, en este, el imán cae por fuera por lo tanto se puede observar el efecto en la caída y posteriormente, se procede al análisis de los datos obtenidos.

Para ello, en primer lugar, se construyó una estructura con materiales reciclados que permitiera que tres tubos colgaran libremente. Los tubos eran de aluminio, cobre y plástico, respectivamente, y sus dimensiones (longitud y diámetro) eran relativamente equivalentes.

Se seleccionaron dos materiales conductores diamagnéticos (cobre y aluminio) y un material no conductor (plástico), con el fin de que, al realizar el análisis cualitativo y cuantitativo del movimiento, se pudiera apreciar la diferencia del movimiento de caída del imán en materiales conductores diamagnéticos y no conductores. Adicionalmente, los tres materiales seleccionados para los tubos son fáciles de conseguir y tienen un bajo costo en el mercado. En la tabla 2 se indican la resistencia, conductividad eléctrica, diámetros interno y externo y longitud de cada uno de los tubos.

En segundo lugar, se utilizó un imán tipo arandela, con las siguientes características: diámetro interno de 0.013 m, diámetro externo 0.022 m, altura 0.005 m y campo magnético de aproximadamente 0.355 T (Teslas).

Fotografía 1 Artefacto Tubo de Lenz



Fuente: Realización propia.

Tabla 2 Características de los Tubos.

Propiedad	Tubo de Cobre	Tubo de Aluminio	Tubo de Plástico
Longitud	1.000 m	1.00 m	1.000 m
Diámetro interno	0.010 m	0.010 m	-----
Diámetro externo	0.0120 m	0.13 m	0.0123m
Resistencia	2.7 Ω	2.2 Ω	∞ ¹¹
Conductividad eléctrica del material	5.96x10 ⁷ S/m	3.5x10 ⁷ S/m	-----

Para capturar y analizar el proceso de caída se utilizó una combinación de videograbación y el software Tracker Physics¹². Se registró el movimiento del imán en el tubo mediante una cámara de video integrada en un dispositivo móvil¹³, que se colocó a un metro del tubo de Lenz y se dispuso paralelamente a este de forma vertical. De esta forma, se obtuvo una visualización nítida y completa del desplazamiento. La cámara permaneció inmóvil durante el experimento, para disminuir posibles errores derivados de movimientos indeseados.

¹¹ Debido a que el plástico no es un material conductor, su resistencia eléctrica es prácticamente infinita.

¹² En el anexo 3 se presentan pantallazos de la utilización del programa Tracker Physics.

¹³ No es necesario tener una cámara profesional para registrar el movimiento, puede ser con la cámara de un celular, siempre y cuando sean nítidos sus fotogramas.

Es importante resaltar que la caída del imán se llevó a cabo de manera controlada, sujeta a un sistema de sujeción regulable. Esto permitió liberar el imán desde una posición inicial conocida. El proceso se repitió 10 veces por cada tubo para obtener un conjunto de datos lo suficientemente robusto para el posterior análisis.

Una vez completada la grabación, se procedió a analizar los videos obtenidos con el software Tracker Physics. Este software permitió seguir con precisión la posición del imán en cada cuadro de video, lo que facilitó la determinación de la posición del imán en el tiempo transcurrido y, posteriormente, el cálculo de la velocidad y la aceleración.

3.2 Análisis del Movimiento

En esta sección del capítulo, se expondrán dos enfoques complementarios de estudio: uno cualitativo y otro cuantitativo.

El estudio cualitativo presente en este trabajo se centra en la observación y descripción del efecto de la ‘amortiguación magnética’ cuando el imán de tipo arandela de neodimio cae externamente en un tubo de cobre o en uno de aluminio. De la observación y descripción, se puede deducir que el movimiento del imán se ve amortiguado debido a su interacción magnética con el tubo conductor no magnético, en contraste con una caída del imán en un tubo no conductor donde se presenta el movimiento de caída libre, se aprecia que el movimiento es más veloz. Además, se puede inferir que la ‘amortiguación magnética’ está relacionada con los cambios en el campo magnético y las corrientes inducidas en el tubo que se oponen al movimiento del imán. Este análisis, que resulta particularmente valioso en la etapa inicial de la investigación, nos permite explorar el fenómeno de manera abierta y creativa antes de llevar a cabo mediciones. Este se detalla minuciosamente en la sección 3.2.1.

El análisis cuantitativo se presenta en la sección 3.2.2 y su importancia radica en que proporciona medidas del desplazamiento del imán a través de los tubos, además, de la realización de un análisis numérico que facilita la comprensión del efecto de ‘amortiguación magnética’. La construcción de esta cuantificación proporciona parámetros suficientes para hallar variables como la velocidad, la aceleración, y otras magnitudes relacionadas, conocidas para los estudiantes, lo que facilita aún más que relacionen el efecto con problemas prácticos y/o situaciones de la vida cotidiana. Para el estudio cuantitativo de la amortiguación

magnética aplicamos los conceptos y leyes teóricas fundamentales en el electromagnetismo como: la Ley de Inducción de Faraday, la Ley de Lenz, y el concepto de corrientes parasitas.

3.2.1 Estudio Cualitativo de la Caída del Imán por el Tubo del Lenz: La Amortiguación Magnética

Mediante la observación, describimos el efecto de la amortiguación magnética al presentarse la caída de un imán de neodimio tipo arandela externamente a un tubo de cobre o aluminio. Se observa que la caída del imán no es un movimiento de caída libre, sino que existe una interacción magnética entre el imán tipo arandela y el tubo conductor no magnético de cobre o aluminio.

Para excluir que la amortiguación o el frenado pudieran atribuirse al rozamiento entre las superficies del tubo y el imán tipo arandela, como suelen ser sistemas de frenado, se eligió el diámetro externo de los tubos de 0,012 m menor que el diámetro interno del orificio de la arandela que es de 0,013 m, adicionalmente las superficies externas de los tubos e imán fueron pulidos.

Para continuar con el análisis de esta amortiguación, se consideró la rapidez con la que cae el imán, su ubicación a lo largo del tubo en diferentes tiempos, su masa y, por consecuencia, su peso. Estas variables se abordaron desde una perspectiva cualitativa, aprovechando las primeras impresiones perceptuales e imágenes recopiladas mediante vídeo y grabaciones, y escalas gruesas de organización comparativas que usan términos como 'mayor que' o 'menor que'.

Se puede observar un movimiento de caída libre cuando se utiliza un tubo de plástico o de materiales no conductores ya que el imán al caer externamente por estos tubos no presenta amortiguación originada por el fenómeno de inducción magnética.

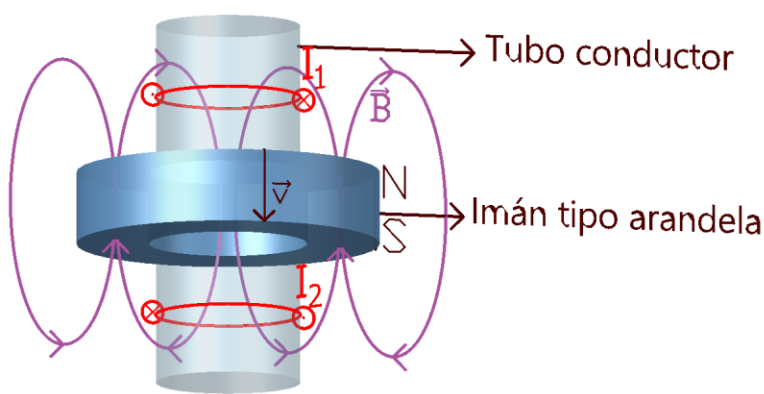
Por lo tanto, se puede concluir que cuando el imán tipo arandela cae por un tubo de metal no magnético, el imán en su caída presenta una amortiguación magnética visible, mientras que, si el imán cae por un tubo de material no conductor, como un plástico, tendrá una rapidez considerable y esta será semejante a si se dejara caer el imán libremente; por consiguiente, se aprecia una caída con menor rapidez en el tubo de cobre y aluminio, que en el tubo de plástico.

Como parte de este análisis, se elaboró una representación gráfica que esquematiza el imán tipo arandela, el tubo conductor, el vector velocidad de la caída del imán a través de

este último y los vectores de campo magnético del imán desde una perspectiva frontal (véase la Ilustración 6 Tubo de Lenz).

En esta representación, se simbolizan algunas de las líneas del campo magnético \vec{B} del imán, el vector velocidad del imán y se señalan los polos utilizando "N" para el polo norte y "S" para el polo sur, estas líneas del campo magnético son cerradas, emanan del polo magnético norte y retornan al polo magnético sur. El flujo magnético, se entiende como una medida del campo magnético que atraviesa un área, el flujo hace referencia a las líneas de campo magnético que atraviesan una superficie, entre más líneas del campo magnético halla mayor será el flujo¹⁴. Para poder describir mejor el efecto, se considera el tubo como una serie de 'espiras' consecutivas, ya que de esta manera podemos considerar mejor el efecto en cada área de cada 'espira', y su vector superficie, y así construir mejor la explicación del efecto.

Ilustración 7. Tubo de Lenz



Fuente: Realización propia

Durante la caída del imán (Ilustración7), se presenta una variación del campo magnético que induce unas corrientes en la sección transversal del tubo de metal (corrientes I_1 e I_2), tanto en la parte superior e inferior del imán (conocidas como corrientes parásitas).

De acuerdo con la polaridad de caída del imán y según la dirección de la corriente inducida al circular por el tubo genera un campo magnético cuya polaridad produce una fuerza de atracción y repulsión sobre la caída del imán, es entonces cuando aparece la fuerza de repulsión en la parte inferior del imán y la fuerza de atracción en la parte superior del imán,

¹⁴ En el Anexo 1, se puede encontrar una explicación más detallada sobre la definición del flujo magnético, entre otros conceptos básicos del electromagnetismo.

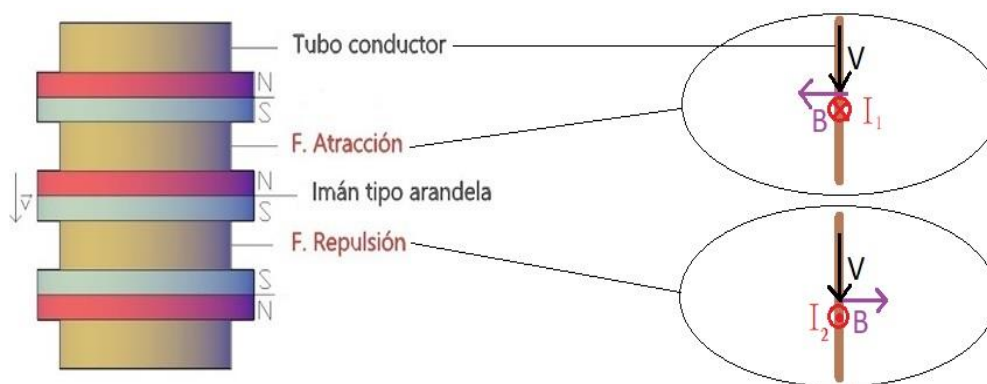
cada porción del tubo tanto en la parte superior o inferior del imán se comporta como una espira circular de corriente, tratando dicha espira como un dipolo magnético.

Las corrientes inducidas producen una fuerza magnética¹⁰, que llamaremos amortiguación magnética

sobre el imán cuyo efecto será siempre oponerse al peso del imán, notándose que el imán cae lentamente impidiendo el descenso libre del mismo es decir tiende a tener una velocidad constante.

Para determinar la dirección de la corriente inducida (I_1) debemos considerar la Ley de Lenz: El sentido de la corriente inducida produce un campo magnético cuyo flujo se opone a las variaciones del flujo magnético del campo inductor (Serway & Jr., 2004). Por lo tanto, hallamos la corriente inducida con la ley de la mano derecha, como se ve en la Ilustración 6, las corrientes (I_1, I_2) producen a su vez un campo magnético que se opone al cambio del flujo magnético. Este campo opuesto, producido por las corrientes inducidas (I_1, I_2) se representa en la Ilustración 7.

Ilustración 8. Campos magnéticos



Fuente: Realización propia

En conclusión, el experimento del tubo de Lenz ilustra de manera vívida los principios de la inducción electromagnética y la ley de Lenz. Al dejar caer un imán dentro del tubo conductor, se genera una corriente inducida que crea campos magnéticos opuestos en las partes superior e inferior del tubo. Este fenómeno se debe a la variación del flujo magnético externo al tubo, que aumenta y disminuye a medida que el imán se mueve a través de él.

Mediante la aplicación de la ley de la mano derecha, se puede determinar la dirección de la corriente inducida y, por ende, la polaridad de los campos magnéticos generados. En la parte superior del tubo, donde el campo magnético resultante tiene una polaridad norte-sur, se produce una fuerza de atracción que reduce la velocidad del imán. Por otro lado, en la parte inferior del tubo, donde el campo magnético resultante tiene una polaridad sur-norte, se genera una fuerza de repulsión que también contribuye a disminuir la velocidad del imán.

Estas fuerzas magnéticas, contrarias al movimiento del imán, actúan en conjunto con la fuerza gravitatoria, lo que resulta en una velocidad constante de descenso del imán a medida que avanza por el tubo conductor. Este fenómeno, confirmado por el análisis cuantitativo de la caída del imán por el tubo de Lenz, demuestra de manera efectiva la capacidad del campo magnético inducido para resistir cambios en el flujo magnético, como lo postula la ley de Lenz (3.2.2).

3.2.2 Estudio Cuantitativo de la Caída del Imán por el Tubo del Lenz: La Amortiguación Magnética

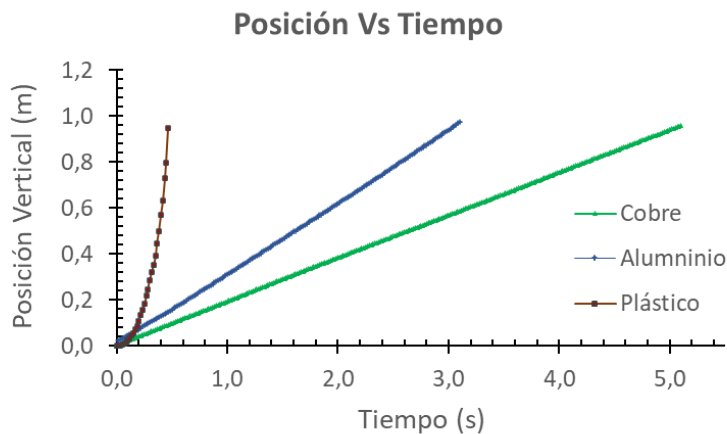
El análisis cuantitativo de la caída del imán se hará con dos tubos conductores de material distinto: cobre y aluminio; y uno tubo no conductor de plástico. Inicialmente se hará a partir del análisis dinámico del movimiento, la cuantificación en el cobre, aluminio y plástico.

Para iniciar el análisis del movimiento, se utilizan los datos obtenidos en el software de análisis de movimiento Tracker Video, este programa nos permite obtener datos precisos. Inicialmente, se sube el video que registra la caída del imán en el tubo de cobre, y a partir de ahí, Tracker empieza a registrar la posición del imán en el tubo a medida que el tiempo transcurre. El movimiento debería describir un M.R.U.A. (Movimiento Rectilíneo Uniformemente Acelerado), pero al hacer varias mediciones y grabaciones, no se aprecia este movimiento inicial.

La caída total del imán en el tubo de cobre es 5,10 segundos, tomando 307 fotogramas en total, y por lo tanto tomando aproximadamente 60 fotogramas por segundo; en el tubo de aluminio dura 3,10 segundos, tomando 187 fotogramas en total, y por lo tanto tomando aproximadamente 60 fotogramas por segundo; por último, la caída en el tubo de plástico dura 0,46 segundos, tomando 31 fotogramas en total. Los resultados obtenidos de las tablas de

posición, velocidad y aceleración versus tiempo se encuentran en el Anexo 2 del presente trabajo.

Ilustración 9. Posición vs Tiempo



Fuente: Realización propia.

El análisis detallado de la ilustración 9, que muestra el cambio de posición en función del tiempo de un imán de neodimio tipo arandela cayendo por tres diferentes tubos (cobre, aluminio y plástico), proporciona una comprensión más profunda sobre el comportamiento del movimiento y los efectos del amortiguamiento magnético.

En primer lugar, al observar la caída del imán a través del tubo de plástico, se nota que esta corresponde a una caída libre. Esto significa que el imán está sujeto únicamente a la aceleración debida a la gravedad, sin experimentar fuerzas de resistencia significativas que afecten su movimiento. Como resultado, el imán aumenta su velocidad de forma constante a medida que cae, lo que se refleja en la forma parabólica de la gráfica de posición versus tiempo. La relación funcional $y = 5,72 \frac{m}{s} t^2$ describe adecuadamente este comportamiento, indicando un aumento cuadrático en la posición a medida que avanza el tiempo.

Por otro lado, la caída del imán a través de los tubos de cobre y aluminio muestra un comportamiento distinto. Desde el inicio del movimiento, se observa que los imanes caen con velocidad constante. Esto sugiere la presencia de fuerzas de amortiguamiento magnético que contrarrestan parcialmente la aceleración debida a la gravedad. En este caso, la gráfica de posición versus tiempo corresponde a una línea recta. Las relaciones funcionales $y = 0,19 m/s t$, para el cobre, y $y = 0,31 m/s t$, para el aluminio, modelan este comportamiento, indicando una velocidad constante a lo largo del tiempo.

Tabla 3 Relaciones funcionales que describe el movimiento de caída del imán

Tubos	y (t) (m)
Tubo de Cobre	$y = 0,19 \frac{m}{s} t$
Tubo de Aluminio	$y = 0,31 \frac{m}{s} t$
Tubo de Plástico	$y = 5,72 \frac{m}{s} t^2$

Fuente: Realización propia.

A partir de las relaciones funcionales establecidas, se pudo determinar la velocidad instantánea para los tres casos estudiados. La velocidad para el plástico cambia de acuerdo con la relación funcional $11,45 \text{ m/s } t$, mientras que para el cobre y el aluminio la velocidad es constante y corresponde a $0,19 \text{ m/s}$ y $0,31 \text{ m/s}$ respectivamente. Estos valores indican que no hay amortiguamiento magnético para el caso del plástico, como era de esperarse, mientras que para el cobre y el aluminio sí lo hay, siendo más pronunciado en el cobre.

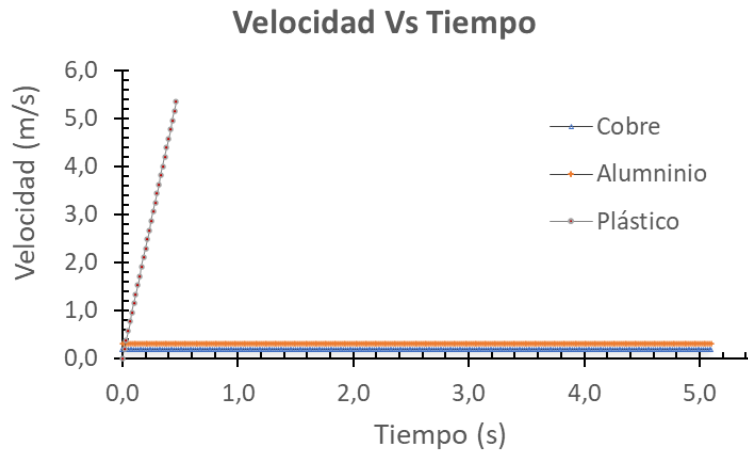
Si bien el peso del imán es una fuerza que se ejerce constantemente cuando cae por los tres tubos conductores, es importante considerar también la fuerza de amortiguamiento magnético que actúa simultáneamente al peso. Esta fuerza se opone al movimiento del imán y ralentizando su caída. La ecuación utilizada para calcular la amortiguación magnética¹⁵,

$$A_m - F = m * \frac{dv}{dt}$$

muestra que la amortiguación magnética es igual en magnitud al peso del imán, pero en dirección opuesta.

¹⁵ Véase capítulo 2.3.

Ilustración 10. Velocidad vs Tiempo



Fuente: Realización propia.

Tabla 4 Magnitudes

Tubos	Velocidad (m/s)	Aceleración (m/s ²)	Peso (N)
Tubo de Cobre	$0,19 \frac{m}{s}$	$0 \frac{m}{s^2}$	$F = 0,3 N$
Tubo de Aluminio	$0,31 \frac{m}{s}$	$0 \frac{m}{s^2}$	$F = 0,3 N$

Fuente: Realización propia

Surge entonces la pregunta sobre por qué se demora más en caer el imán en el tubo de cobre que en el de aluminio, a pesar de que el peso sea el mismo en ambos casos. La respuesta radica en la conductividad del material: tanto el cobre como el aluminio son buenos conductores eléctricos, lo que significa que los electrones tienen una alta movilidad a través de estos materiales. Cuanto mayor sea la conductividad del material, mayor será el efecto de la amortiguación magnética, lo que resulta en una caída más lenta del imán a través del tubo. En este sentido, el cobre, al tener una mayor conductividad que el aluminio, muestra un efecto más pronunciado de la amortiguación magnética y, por lo tanto, una caída más lenta del imán.

En conclusión, el análisis detallado de la ilustración 9 y las relaciones funcionales obtenidas proporcionan una comprensión integral del movimiento del imán de neodimio tipo arandela en diferentes materiales de tubos, así como de los efectos del amortiguamiento magnético en dicho movimiento. Esto nos permite profundizar en la comprensión de los

principios físicos involucrados y sus aplicaciones en diversos contextos científicos y tecnológicos.

4 ACTIVIDADES EXPERIMENTALES CENTRADAS EN EL TUBO DE LENZ PARA LA ESCUELA SECUNDARIA

En este capítulo, se presenta una secuencia de actividades experimentales diseñadas para estudiantes de décimo a undécimo grado de educación secundaria. Su objetivo es proporcionarles oportunidades para que los estudiantes construyan conocimiento sobre las relaciones entre los campos magnéticos con cambios en el tiempo y la generación de corriente eléctrica, con un enfoque específico en las corrientes parasitas.

Además, mediante estas actividades, se pretende que los estudiantes amplíen sus saberes sobre algunas leyes teóricas fundamentales del electromagnetismo, entre las cuales se destacan la Ley de Inducción de Faraday y la Ley de Lenz. Se sugiere a los profesores que dichas leyes hayan sido previamente abordadas en el aula de clase.

En un primer aspecto, las actividades experimentales propuestas son en su mayoría de tipo cualitativo, dado que se reconoce su valor en la educación inicial, tanto en la primaria como en la secundaria. Según Ferreirós y Ordoñez “los experimentos cualitativos han sido una parte fundamental de los procesos de formación de conceptos (parte indispensable de los procesos de formación de datos)” (Ferreiros & Ordoñez, 2002, 86). Cadavid Chica & López Moná (2011) extrapolan esta idea al ámbito escolar al sugerir que este tipo de experimentos deberían ser considerados como procesos fundamentales para la construcción de conocimiento escolar.

También se privilegia el uso de actividades experimentales cualitativas, porque permiten a los estudiantes explorar el mundo físico de manera más abierta y creativa, empleando sus impresiones perceptuales y organizando la información mediante escalas gruesas comparativas que utilizan términos como 'mayor que' o 'menor que', antes de proceder a realizar mediciones precisas, con lo cual se promueve la “intuición” y la construcción de conocimiento en el aula. En estas actividades la observación, descripción, clasificación, organización y explicación de los eventos y/o procesos del mundo físico se realizan prescindiendo de mediciones numéricas precisas.

Al final de la secuencia, se plantea una actividad cuantitativa, que implica hacer mediciones numéricas precisas. En comparación con las cualitativas, estas actividades fomentan el análisis e interpretación de datos y la construcción de gráficos para obtener y justificar conclusiones. Se espera que este proceso se lleve a cabo considerando que los

estudiantes tienen unos conocimientos teóricos previos, o han abordado el tema previamente en clase. En consecuencia, estas actividades dan oportunidades enriquecedoras para impulsar la construcción de conocimiento en el aula, complementando las actividades cualitativas.

En un segundo aspecto, todas las actividades experimentales se organizan mediante una metodología que se desarrolla a través de tres fases: predecir, observar y explicar (POE). Esta metodología al tener un enfoque centrado en el estudiante fomenta la participación activa promoviendo el desarrollo de habilidades de anticipación a través de la experimentación. Esto confronta al estudiante con situaciones cotidianas donde se exige justificar hipótesis bajo conocimientos previos; de esta forma relaciona contextos del mundo real con conceptos adquiridos en contextos escolares.

Asimismo, promueve el desarrollo de habilidades de resolución de problemas, ya que permite el análisis de estos en entornos escolares, y fomenta el trabajo en equipo donde se pueden realizar discusiones a partir de los distintos puntos de vista. En la estrategia POE, existen 3 fases:

1. Predecir:

En esta fase los estudiantes anticipan los resultados de la actividad antes de llevarla a cabo. Desde los conocimientos adquiridos proponen hipótesis sobre lo que podría suceder durante la experimentación, fomentando así, la destreza en la anticipación de eventos. Asimismo, durante esta fase los estudiantes justifican sus hipótesis desarrollando habilidades críticas y comprometiéndose con la actividad planteada.

2. Observar:

Después de formular las predicciones, los estudiantes llevan a cabo la exploración experimental. En esta etapa de experimentación y observación, analizan y registran cuidadosamente los efectos observados. Posteriormente, establecen conexiones entre los datos recopilados y los resultados obtenidos, identifican posibles inquietudes en relación con esos resultados y formulan preguntas reflexivas. Finalmente, reflexionan sobre la información adquirida durante el proceso experimental, buscando una explicación coherente y completa.

3. Explicación:

En esta última fase, luego de haber experimentado, los estudiantes plantean una explicación en la que intervienen las diferentes discusiones presentadas alrededor de los datos obtenidos donde buscan patrones o relaciones con lo aprendido. En esta etapa, se fomenta la reflexión crítica y la construcción de conocimiento, desarrollando teorías y modelos conceptuales, evaluando su coherencia.

Las actividades son de tipo semiestructurado, ya que, si bien la autonomía de los estudiantes es controlada, durante la fase de observación se les permite interactuar y explorar el efecto permitiendo al estudiante “jugar” con las variables sin desviarse de la guía planteada por el docente.

4.1 Actividades Experimentales Propuestas

En esta sección del capítulo, se exponen detalladamente las actividades experimentales propuestas teniendo como referencia la metodología POE anteriormente descrita, con el respectivo procedimiento y enfoque diseñado para los experimentos propuestos; estas actividades tienen como propósito guiar a los estudiantes a través de un proceso crítico y participativo.

Actividad 1: Introducción al Magnetismo.

Desempeños Esperados:

En la siguiente actividad experimental, los estudiantes observarán y describirán patrones en la organización de las limaduras de hierro al interactuar con un imán; con el objetivo de reconocer y explicar la formación de patrones visuales a partir de las ideas de campo magnético (intensidad y dirección).

Ideas Clave:

- Las limaduras de hierro actúan como indicadores visuales del campo magnético.
- La disposición de las limaduras revela la dirección y la intensidad del campo magnético.
- La concentración y patrones de las limaduras cambian en función de la proximidad y orientación del imán.

¿En qué consiste?: El objetivo de esta actividad visualizar con las líneas de fuerza de un campo magnético.

Materiales:

- 1 o 2 Imanes de forma arandela.
- 2 hojas examen y lápices.
- Limadura de hierro.
- Hojas blancas.

Desarrollo de la Actividad:

1 Fase: Predecir

Se debe iniciar la actividad pidiendo a los estudiantes que se organizaran de a parejas para realizar la actividad propuesta, luego, en las hojas examen, registren su nombre, y el título de la actividad, el objetivo principal, y los materiales que se utilizan en la actividad.

Teniendo el conocimiento previo de que el imán perturba el espacio y tiene una mayor influencia en materiales ferromagnéticos; los estudiantes deben describir en las hojas examen siguiendo las preguntas ¿qué creen que sucederá si se acercan las limaduras de hierro al imán? y ¿por qué?.

2 Fase: Observar

Luego, se solicita a los estudiantes que coloquen cada uno el imán sobre el pupitre y sobre él la hoja blanca, después, deben colocar las limaduras de hierro sobre la hoja y registrar las observaciones realizadas.

Para facilitar la descripción y construcción de la idea de líneas de campo, se les proponen las siguientes preguntas optativas: ¿cómo cambian las limaduras de hierro al caer sobre el espacio de la hoja donde está el imán?, ¿qué sucede con las limaduras de hierro si mueves el imán debajo de la hoja?, ¿qué sucede si se acerca otro imán por debajo de la hoja, al primer imán? ¿Qué otras cosas puedes observar?

3 Fase: Explicar

Finalmente, se les pide que dibujen un diagrama donde se aprecie el patrón que describen las limaduras de hierro cuando se ven afectadas por el imán, todo esto para una interiorización más profunda sobre la idea de líneas de campo magnético, se concluye la actividad con una sesión donde los estudiantes comparten sus dibujos y participan en una discusión final sobre las conclusiones de la actividad.

Actividad 2: Fuerza de atracción.

Desempeños Esperados:

- Reconocer y evidenciar la interacción entre los diferentes tipos de metales y el imán.
- Clasificar los metales de acuerdo a su atracción magnética a partir de la actividad experimental.
- Concluir y reforzar la idea de que solo algunos metales experimentan una fuerza de atracción cuando hay un campo magnético.

Ideas Clave:

- No todos los metales son atraídos por un imán.
- La atracción depende de varios factores, como la propiedad de cada metal, o la distancia que existe entre el imán y el metal.
- El nivel de atracción que existe entre el imán y el metal, no es el mismo en todos los metales, ya que algunos tienen una atracción fuerte, media o nula.

¿En qué consiste?: Comparar la atracción que ejerce un imán tipo arandela sobre diferentes metales.

Materiales: Los estudiantes deben traer para la clase los siguientes materiales.

- 1 o 2 Imanes de forma arandela.
- Pequeñas arandelas de aluminio o llaves de aluminio viejas.
- 2 puntillas de Hierro.
- Monedas: acero (100 y 50 pesos COP) alpaca (200 pesos y 500 pesos COP).
- 5 cm de alambre de cobre.
- 2 hojas examen y lápices.
- Hojas blancas.

Desarrollo de la Actividad:

Fase 1: Predecir

Se debe iniciar la actividad pidiendo a los estudiantes que se organizaran de a parejas para realizar la actividad propuesta, luego, en las hojas examen, registren su nombre, y el título de la actividad, el objetivo principal, y los materiales que se utilizan en la actividad.

Antes de realizar el experimento los estudiantes deben plantear hipótesis sobre la interacción entre los diferentes elementos y el imán.

2 Fase: Observar

A continuación, se indicará a los estudiantes para que interactúen con los materiales, es decir, los imanes y los objetos metálicos. Deberán colocar el imán cerca de cada metal, observando con cuál de ellos existe atracción e identificando los polos magnéticos del imán.

Después de esa exploración inicial, se les pedirá que registren sus observaciones sobre cómo los imanes interactúan con objetos metálicos, cómo varía su interacción cuando cambia la cara del imán y cómo interactúan los imanes entre sí. Para guiar y crear una posible discusión entre los estudiantes se le presentan las siguientes preguntas orientadoras que deben responder en su hoja examen: ¿La llave se doblara si acerco un imán por una cara y acerco otro imán por otra cara? ¿Qué pasa cuando se acerca el imán a las monedas? ¿Qué pasa cuando se acerca el imán a la puntilla de hierro?. Ya que los estudiantes pueden tener diferentes conclusiones a partir de experiencias previas que el metal sufre una fuerza de atracción hacia el imán, o algunos pueden decir que no todos los metales sufren esa atracción, por lo tanto, se les pedirá a los estudiantes que identifiquen, que metales no sufren esta fuerza de atracción y los separen.

Una vez seleccionados los metales, se les pide a los estudiantes que acerquen el imán a cada material con una rapidez apreciable, evidenciando su comportamiento magnético,

Objeto	Tipo de Metal	Comportamiento Magnético
Llave		
Puntilla		
Moneda 1		
Moneda 2		
Alambre		

registren sus observaciones en la siguiente tabla.

3 Fase: Explicar

Se finaliza la actividad con una breve explicación sobre por qué algunos metales tienen un mayor grado de atracción que otros, enfatizando en la conducción de los metales y concluyendo, se realiza una discusión en la que cada estudiante comparte sus observaciones y conclusiones, validando las hipótesis planteadas y proporcionando explicaciones sobre su certeza.

Actividad 3: Demostración de Inducción Electromagnética

Desempeños Esperados:

- Reconocer la inducción electromagnética producida en el Tubo de Lenz.
- Observar y describir el efecto de “amortiguación magnética”.
- Relacionar la Ley de Faraday con el Tubo Lenz.

Ideas Clave:

- La variación de un campo magnético en el tiempo genera en un material conductor, una corriente inducida.
- Existe una amortiguación magnética cuando hay un movimiento del campo magnético cerca de un material conductor.

¿En qué consiste?: Reconocer que, en el Tubo de Lenz, debido al cambio del campo magnético en el tiempo se genera una corriente inducida.

Materiales:

- 2 imanes de neodimio tipo arandela.
- 1 tubo de un metro de cobre.
- 1 tubo de un metro de aluminio.
- 1 tubo de un metro de acero.
- Estructura para colocar los tubos.
- Superficie suave para la caída del imán (Cojín).
- 1 hoja examen.

Desarrollo de la Actividad:

Fase 1 Predecir:

Se debe iniciar la actividad pidiendo a los estudiantes que se organizaran de a parejas para realizar la actividad propuesta, luego, en las hojas examen, registren su nombre, y el título de la actividad, el objetivo principal, y los materiales que se utilizan en la actividad.

Responde las siguientes preguntas, antes de empezar la experimentación.

¿Qué función puede cumplir un LED dentro del tubo?

¿Qué pasara con el LED cuando se deje caer el imán?

¿En que influye el movimiento del imán en el Tubo?

Fase 2 Observar:

Se les indica a los estudiantes que ubiquen el tubo en la estructura, y luego dejen caer el imán por el tubo observando el LED; se propone que dejen caer los dos imanes juntos por el tubo y observen el comportamiento del LED.

A partir de la caída del imán identificar el cambio de velocidad según el tubo.

Fase 3 Explicar:

Posterior a la experimentación, los estudiantes deben discutir y registrar cómo el movimiento del imán genera una corriente eléctrica en el tubo y como esta se puede evidenciar mediante la luz producida por el LED.

Actividad 4: Aplicación de la Ley de Lenz

Desempeños Esperados:

- Reconocer la Ley de Lenz, para prever la dirección de las corrientes inducidas en el Tubo de Lenz.
- Observar y describir el efecto de las corrientes parasitas en el Tubo de Lenz.

Ideas Clave:

- La Ley de Lenz establece que la corriente inducida generará un campo magnético opuesto al cambio del campo magnético original.
- Las corrientes parasitas son corrientes eléctricas no deseadas que se generan en un conductor debido a la variación del campo magnético.
- La aplicación de la Ley de Lenz permite prever la dirección de las corrientes parasitas en un tubo de Lenz.

¿En qué consiste?: Aplicar la Ley de Lenz para comprender la dirección de las corrientes inducidas (corrientes parásitas).

Materiales:

- Imán de neodimio tipo arandela.
- 1 tubo de un metro de cobre.
- 1 tubo de un metro de aluminio.
- 1 tubo de un metro de acero.
- 1 tubo de un metro de balsa.
- 1 tubo de un metro de plástico.
- Estructura para colocar los tubos.

- Superficie suave para la caída del imán (Cojín).
- 1 hoja examen.

Desarrollo de la Actividad:

Fase 1 Predecir:

Se debe iniciar la actividad pidiendo a los estudiantes que se organizaran de a parejas para realizar la actividad propuesta, luego, en las hojas examen, registren su nombre, y el título de la actividad, el objetivo principal, y los materiales que se utilizan en la actividad.

Según lo anterior y de acuerdo con tus conocimientos previos, plantea una hipótesis de cómo debe ser el movimiento del imán por medio del tubo, utiliza las siguientes preguntas como apoyo para construirla.

¿Qué crees que pase cuando el imán caiga por el tubo?

¿Crees que existe alguna relación entre el material del tubo y el movimiento del imán?

¿Qué fuerza afecta a los cuerpos en una caída libre?

Fase 2 Observar:

1. Inicialmente, colocar los tubos en la estructura para que cuelguen libremente.
2. Una vez ubicados los tubos, antes de tomar datos, realizar una observación previa de la caída del imán por cada tubo, con el fin de reconocer el movimiento.

3. Luego dejar caer el imán de neodimio tipo arandela, a través del tubo de cobre, observar la caída y se tomar notas de las observaciones hechas, así como el tiempo total de la caída.

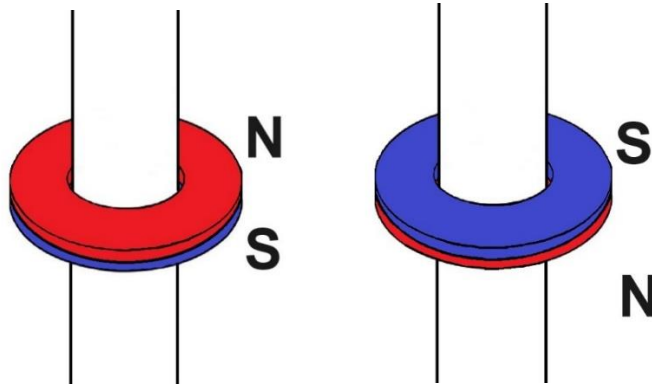
4. Realizar el mismo procedimiento con el tubo de aluminio y posteriormente con el tubo de balsa.

5. Finalmente, con los apuntes de las observaciones y las investigaciones previas, realizar el análisis de datos.

6. Realizar el siguiente ejercicio para que los estudiantes organicen mejor sus ideas:

- En la siguiente imagen se encuentra el imán cayendo por el tubo de cobre, dibujar la dirección de la corriente (parásita) inducida y de los campos magnéticos resultantes de la corriente inducida, justifica tu respuesta.

Ilustración 11. Tubo de Lenz



Fase 3 Explicar:

Después de realizar los ejercicios propuestos, se debe iniciar la discusión respondiendo y registrando en la hoja examen, las siguientes respuestas. ¿Existe alguna relación entre la hipótesis planteada y los resultados obtenidos en la observación? ¿Cómo crees que la comprensión de estos conceptos y fenómenos electromagnéticos puede contribuir para el avance de la investigación y al aumento del conocimiento científico en nuestra sociedad? Plantea un invento propio en el cual se haga uso del fenómeno de corrientes (parásitas) inducidas.

Actividad 5: Exploración de la Amortiguación Magnética en el Tubo de Lenz y Cuantificación del Movimiento.

Desempeños Esperados:

- Observar y describir el efecto de “amortiguación magnética” en el Tubo de Lenz.
- Reconocer como la velocidad del imán se perturba con respecto al material del Tubo de Lenz.
- Reconocer los conceptos simples del electromagnetismo y la ley de inducción de Faraday.
- Explicar la presencia de unas corrientes parásitas por medio de ecuaciones de cinemática como son las de los MRUA y MRU.

Ideas Clave:

- La “amortiguación magnética” en el Tubo de Lenz es el resultado de la inducción de corrientes.

- La “amortiguación magnética” solo ocurre en los tubos de material conductor.
- La Ley de Inducción de Faraday explica como el cambio del flujo magnético induce una corriente eléctrica en el tubo, en este caso, una corriente parásita.

¿En qué consiste?: Estudiar y comprender el efecto de “amortiguación magnética” por medio de la utilización del Tubo de Lenz.

Objetivo Principal: Observar y registrar la “amortiguación magnética” al dejar caer un imán en tubos de diferentes materiales. Además, se busca que al comparar estas observaciones identifiquen y discutan las diferencias en la velocidad de caída.

Materiales:

- Un imán tipo arandela.
- 1 tubo de un metro de cobre.
- 1 tubo de un metro de aluminio.
- 1 tubo de un metro de acero.
- 1 tubo de un metro de balsa.
- 1 tubo de un metro de plástico.
- Estructura para colocar los tubos.
- Superficie suave para la caída del imán (Cojín).
- Guía 1 (Anexos)

Desarrollo de la Actividad:

Fase 1 Predecir:

Se debe iniciar la actividad pidiendo a los estudiantes que se organizaran en grupo de a 5 personas, para realizar la actividad propuesta. Luego, en las hojas examen registren su nombre, y el título de la actividad, el objetivo principal, y los materiales que se utilizan en la actividad, antes de comenzar con la experimentación se les pedirá a los estudiantes que anoten que creen que sucederá cuando dejen caer el imán por cada uno de los tubos.

¿Cuál de estos dos movimientos MRUA y MRU encaja más con la caída libre de un cuerpo? ¿cuáles son las diferencias entre estos dos?

Fase 2 Observar:

1. Inicialmente, se coloca una marca con un marcador negro cada 10 centímetros en los tubos y luego se colocan en la estructura para que cuelguen libremente.

2. Una vez ubicados los tubos, se comenzará con posicionar el imán en la parte superior del tubo y empezará la observación de la caída del imán

3. A continuación, se graba la caída del imán de neodimio tipo arandela, a través del tubo de cobre, y a 50 centímetros de distancia se grabará la caída en el tubo de cobre, aluminio y balsa; se tomarán notas de las observaciones hechas.

4. Para concluir la observación se tomará el dato del tiempo total de la caída del imán en los tres tubos diferentes (cobre, aluminio, balsa).

5. Finalmente, con los apuntes de las observaciones y las investigaciones previas.

Después los estudiantes deben comparar las observaciones y registradas, tendrán alrededor de 30 minutos para realizar la actividad y los registros. Con el objetivo de asegurar un registro más exhaustivo y proporcionar una guía detallada del experimento, se propone usar la guía que se encuentra en los anexos de este capítulo.

Fase 3 Explicar:

Para concluir la actividad, se debe entregar la guía completada por los estudiantes al docente.

5 CONCLUSIONES

La enseñanza de la física en la educación secundaria se enfrenta a diversos desafíos, uno de los principales es la implementación de la actividad experimental en el aula, y esto se da debido a diversas problemáticas. Aunque existen actividades experimentales para la enseñanza de las corrientes parásitas -entre otros fenómenos electromagnéticos-, los docentes a menudo muestran resistencia a utilizarlas en sus clases, ya sea por limitaciones de tiempo, recursos, o por la complejidad del equipo.

En consecuencia, surge la presente propuesta experimental que consiste en un conjunto de actividades experimentales y un montaje experimental "Tubo de Lenz", diseñados para favorecer la construcción de conocimientos sobre las corrientes parásitas. Estas actividades fueron diseñadas de tal manera que el docente sea motivado a utilizarlas, dado que se trata de un montaje experimental sencillo, económico, versátil y, además, atractivo para los estudiantes debido a la peculiaridad visual del efecto de amortiguamiento magnético. Para llegar a la anterior conclusión se responden las siguientes preguntas que guiaron el desarrollo de la investigación.

- ¿Cuáles son las contribuciones experimentales y teóricas que respaldan el diseño de actividades experimentales centradas en las corrientes parásitas?

Las contribuciones realizadas por científicos como Faraday, Oersted y Lenz son fundamentales para nuestra comprensión actual de las corrientes parasitarias, ya que estas resaltan la relación entre la electricidad y el magnetismo.

Además, el análisis del desarrollado sobre las corrientes parásitas desde Arago, sus experimentos y construcciones teóricas hasta posteriormente los de Foucault, proporcionan un valioso estudio sobre los desarrollos teóricos y experimentales relacionados con este efecto (amortiguación magnética). El análisis permite comprender cómo se han estudiado estas corrientes parásitas, su construcción teórica en el tiempo, y genera una base sólida para diseñar actividades experimentales para la escuela secundaria.

- ¿Cuáles son las limitaciones y potenciales enfoques de mejora del Tubo de Lenz como herramienta para enseñar corrientes parasitarias?

Al identificar diferentes montajes experimentales y realizar una valoración, se destacan varios artefactos, tales como, el disco de Arago, la máquina de Atwood, el freno magnético, entre otros. Se elige el Tubo de Lenz debido a las ventajas significativas para la

enseñanza de las corrientes parasitarias. Su bajo costo lo hace accesible para instituciones educativas con recursos limitados, mientras que su apariencia visualmente atractiva captura la atención de los estudiantes y facilita la comprensión del efecto de amortiguación magnética. Además, el montaje permite realizar los experimentos de forma sencilla, segura y rápida en el aula.

- ¿Cuál es el modelo matemático más adecuado para determinar las corrientes parasitarias en actividades experimentales con tubos de Lenz que involucran el deslizamiento externo de un imán?

No existe una ecuación específica para medir las corrientes parásitas debido a los múltiples factores involucrados en su generación. La propuesta matemática presentada para modelar el movimiento es específica para el tubo de Lenz cuando un imán tipo arandela se desplaza a través de tubos de cobre, aluminio y plástico. Este análisis equipara el modelo matemático al propuesto por el profesor Chávez, para determinar las corrientes parasitarias y el campo magnético resultante.

Además, se lleva a cabo un análisis del movimiento cualitativo para comprender y describir el efecto de amortiguación magnética. Este análisis es de suma importancia en la etapa inicial de la investigación, ya que permite explorar el fenómeno de manera abierta y creativa antes de realizar mediciones cuantitativas.

Por otra parte, también se realiza un análisis cuantitativo que permite comprender el efecto de amortiguación magnética mediante la toma de medidas, como la posición del imán en función del tiempo. Esta cuantificación proporciona parámetros suficientes para calcular variables como la velocidad, la aceleración y otras magnitudes relacionadas, conocidas para los estudiantes. Esto facilita aún más que relacionen el efecto con problemas prácticos y situaciones de la vida cotidiana.

- ¿Cuáles son las características que debería poseer las actividades experimentales para favorecer la construcción de conocimiento escolar acerca de las corrientes parásitas?

Las actividades experimentales diseñadas para estudiantes de décimo a undécimo grado de educación secundaria facilitan la construcción de conocimiento sobre las corrientes parásitas y otros conceptos fundamentales del electromagnetismo, ya que se desarrollaron

diferentes tipos de actividades, con dos enfoques diferentes (cualitativo y cuantitativo), lo que permite a los estudiantes desarrollar habilidades de análisis del movimiento e interpretación de datos para justificar conclusiones.

Además, se ha empleado la metodología POE, con el fin de promover la participación de los estudiantes y el desarrollo de habilidades de anticipación y resolución de problemas. Esta metodología fortalece la conexión entre la vida cotidiana y los conceptos aprendidos en el colegio. Las actividades se diseñaron semiestructuradas, lo que proporciona una guía del docente, pero permite a los estudiantes interactuar y explorar libremente, fomentando el pensamiento crítico, la creatividad y la autonomía.

Además, las actividades se diseñaron secuencialmente, comenzando con aspectos cualitativos como la observación y descripción de patrones, y avanzando hacia aspectos más cuantitativos como mediciones y construcción de gráficos para llegar a conclusiones sólidas. Este enfoque progresivo permite una comprensión más profunda y completa de los conceptos relacionados con las corrientes parásitas y el electromagnetismo.

En conclusión, esta propuesta busca no solo enriquecer la comprensión de los estudiantes sobre las corrientes parasitarias, sino también fomentar su interés y motivación hacia el estudio de la física, contribuyendo así a una educación científica más significativa y completa.

6 BIBLIOGRAFÍA

- Alonso, M., & Onofre, R. (1987). *Física Campos y Ondas*. México: Addison-Wesley Iberoamericana.
- Álvarez, S., & Carlino, P. (2004). La distancia que separa las concepciones didácticas de lo que se hace en clase: el caso de los trabajos de laboratorio en biología. *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, 22(2), págs. 251-261. Obtenido de <https://raco.cat/index.php/Ensenanza/article/view/21976>.
- Arango, F. E. (2016). *Análisis descriptivo de la inducción electromagnética en el tubo de Lenz mediante el uso de una interfaz*. Bogotá: Universidad Pedagógica Nacional de Colombia.
- Askeland, D. R., & Wright, W. J. (2022). *Ciencia e ingeniería de Materiales*. Mexico, Mexico: Cengage. Obtenido de <http://www.ebooks7-24.com.ezproxy.unal.edu.co/?il=19639>
- Bacilio, M. E. (2019). *Determinacion de la fuerza de frenado electromagnético sobre un imán cilíndrico hueco que se mueve por una barra de aluminio*. España : Facultad de Ciencis Físicas Universidad Nacional de Trujillo.
- Escobar, M. I. (2017). *APLICAÇÃO DA LEI DE LENZ-FARADAY EM EXPERIMENTOS*. UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO.
- Felemamg, S.L. (7 de Noviembre de 2016). *Canales sectoriales- interempresas*. Obtenido de novaagora: <https://www.interempresas.net/Reciclaje/Articulos/164210-Separadores-de-corriente-de-Foucault-Felemamg.html>
- Ferreirós, J., & Ordóñez, J. (diciembre de 2002). HACIA UNA FILOSOFÍA DE LA EXPERIMENTACIÓN. *Hispanoamericana de Filosofía*, pág. 86.
- García A., E. (Diciembre de 2011). Modelos de explicación, basados en prácticas experimentales. Aportes de la filosofía historicista. ([. Distrital], Ed.) *Educación científica*, 14(2), págs. 89-96. doi:<https://doi.org/10.14483/23448350.3704>
- Garzón, H. D. (2013). *Un experimento para el estudio del fenómeno de inducción*. Bogotá D.C.: Universidad Pedagógica Nacional.
- Giancoli, D. C. (2007). *Física Principios con Aplicaciones* (Sexta ed., Vol. 2). México: Pearson Educación.

- Gil, S. (2014). *Experimentos de Física usando las TIC y elementos de bajo costo*. Autonoma de Buenos Aires: Alfaomega.
- Gil, S. (2014). *Experimentos de Física usando las TIC y elementos de bajo costo*. Buenos Aires: Alfaomega.
- González, A., Hernández, A., & Mora, C. (28 de enero de 2010). Freno Magnético. *Latinoamérica Journal of Physical Education*, 4, 928-933.
- González, M. I. (20 de Abril de 2004). Experiments with eddy currents:. (I. O. PUBLISHING, Ed.) *EUROPEAN JOURNAL OF PHYSICS*, 463-468. doi:10.1088/0143-0807/25/4/001
- González, M. I. (2004). Experiments with eddy currents: the eddy current brake. *European Journal of Physics*, 463-468. doi:10.1088/0143-0807/25/4/001
- Gussow, M. (2000). *Fundamentos de Electricidad*. Mexico: McGrawHill.
- Hernandez, J., Sola de los Santos, J., & Fernández, R. D. (2019). *Estudio empírico de las corrientes de Foucault, combinando un campo magnético con el campo gravitatorio* (Vol. 13). Madrid: Edvcatio Physicorum Quo Non Ascendam. Obtenido de <http://www.lajpe.org>
- Londoño V., M. F. (2003). *Introduccion a la Mecanica*. Medellin: Universidad Nacional de Colombia.
- MacLatchy, C., Backman, P., & Bogan, L. (1993). A Quantitative Magnetic Braking Experiment. *American Journal Physics*. doi:10.1119/1.19060
- Maquinas Eléctricas*. (23 de Mayo de 2015). Obtenido de Maquinas Eléctricas: <https://maquinaselectricasmecp.wordpress.com/2015/05/23/ley-de-lenz/>
- McGraw-Hill. (1950). *Static and Dynamic Electricity*. New York: W.B. Smythe.
- Ramirez, L., Peñaloza, G., & Moreno, P. (2018). *Actitudes, Emociones y Naturaleza de la Ciencia en la Educacion Científica*. Bogotá D.C.: Planetario de Bogotá.
- Resnick, R., & Halliday, D. (1977). *Física*. México: cecsa.
- Ruiz, M., Cardona, C., & Romero, Á. (15 de octubre de 2021). La experimentación cualitativa exploratoria y la construcción social de conocimiento. *Revista Tecné Episteme y Didaxis: TED*(impreso 0121-3814), págs. 1-7. doi:<https://hdl.handle.net/10495/30627>

- Sears, F. W., Zemansky, M. D., & Young, H. (1988). *Física Universitaria*. Estados Unidos: Addison Wesley.
- Serway, R. A., & Jr., J. W. (2004). *Física II*. México: Thomson.
- Serway, R., & Jewett, J. (2003). *Física I*. México: Impresora Apolo.
- Wiley, J., & Sons. (1975). *Classical electrodynamics*. J.D.Jackson.
- Wood, R. (1991). *Magnetismo De la brujula a los imanes superconductores*. España: McGrawHill.

7 Anexos

Anexo 1

A continuación, se encuentran los anexos del siguiente trabajo.

En el primer anexo encontramos un marco referencial, con conceptos necesarios para entender el fenómeno.

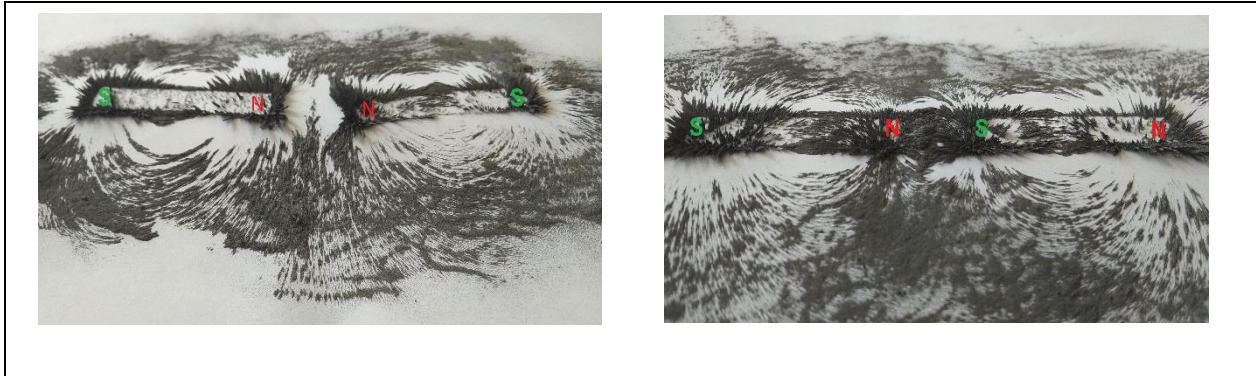
Magnetismo y campo magnético

Para hablar del campo magnético debemos hablar de magnetismo, y el magnetismo es “*la propiedad que presentan determinadas sustancias, especialmente algunos minerales de hierro, cobalto y níquel, de atraer ciertos cuerpos tales como pedacitos de hierro*” (Alonso & Rojo, 1981) en otros términos, es la cualidad que poseen algunos materiales de atraer o repeler algunos tipos de materiales especialmente metales; el magnetismo se encuentra principalmente en los imanes; si observamos y estudiamos los imanes por unas horas podemos observar que se atraen o repelen entre sí debido a unas fuerzas invisible entre ellos. Esta atracción o repulsión se produce cuando se aproximan entre los externos de los imanes, a los que se les denomina polos.

Con respecto a los polos Serway afirma que “*Experimentos subsecuentes han demostrado que todo imán, independientemente de su forma tiene dos polos, llamados norte y sur, que ejercen fuerzas entre sí*” (Serway & Jr., 2004). Cuando dos polos iguales de dos imanes se acercan estos se repelen, cuando los polos son contrarios se atraen.

Si colocamos una hoja de papel sobre un imán, y vertemos sobre ella limadura de hierro, vemos que la limadura adquiere una configuración espacial muy singular: se distribuyen en el espacio siguiendo un patrón de zonas vacías y zonas cargadas de limadura. Adicionalmente, también se evidencia que la cantidad de limaduras que se agrupan cerca del

imán, sobre todo en la zona de los polos, es mayor, que las que se agrupan lejos del imán. A esta configuración la llamamos patrón de campo magnético. En la ilustración podemos observar esta situación: en la parte superior se coloca una hoja y sobre esta las limaduras de hierro; la N en mayúscula y en rojo de las imágenes, se refiere al polo norte del imán, y la S verde al polo sur.



Fuente: Realización Propia.

La a medida de las líneas de campo magnético que atraviesan una superficie se llaman flujo magnético y se representan con la letra griega ϕ (phi) (Gussow, 2000). Por lo tanto, cuando este flujo se encuentra afectando un área se producirá un efecto sobre esta área, la ecuación que describe esta densidad de flujo magnético B sería:

Ecuación 18 Flujo Magnético.

$$B = \frac{\phi}{A} \cos\theta$$

Fuente: (Askeland & Wright, 2022)

Donde ϕ se mide en Wb (Weber) sobre el A que sería el área medida en (metros cuadrados) y por lo tanto Wb/ es igual a T (Teslas), que es la unidad de medida del campo magnético; esta multiplicada por un coseno, porque cuando el área que está afectado el campo no se encuentra perpendicular a este, y tiene un ángulo de inclinación, este afecta a la fuerza que ejerce el campo magnético, el campo magnético es inversamente proporcional al ángulo de inclinación que tenga el área afectada; reconociendo que es el campo magnético el que ejerce una fuerza según el número de cargas que se encuentren dentro del área afectada. (Gussow, 2000) (Gussow, 2000).

Flujo Magnético

$$\phi = \vec{B} \cdot \vec{S}$$

$$\phi = \vec{B} \cdot \vec{S} \cos(\alpha)$$

Propiedades de los Materiales

Los metales tienen ciertas propiedades características a diferencia de otros materiales, como los plásticos, las maderas entre otros; las propiedades magnéticas se encuentran más presente en estos, ya que no solo pueden ser atraídos y repelidos por un imán, sino que también pueden ser magnetizados, esto quiere decir que después de ciertos procesos pueden adquirir esta cualidad magnética de atraer o repeler de forma temporal.

Esta *“habilidad de una sustancia para pasar o conducir las líneas de fuerza magnética se denomina permeabilidad...La permeabilidad relativa compara la habilidad de un material o sustancia para conducir una fuerza magnética y la habilidad del espacio libre para conducir esa misma fuerza eléctrica.”* (Wood, 1991), por lo tanto, esta permeabilidad, esta capacidad de agrupar el flujo magnético, es mayor en algunos metales ya que tienen mayor facilidad de magnetizarse y esto significa que su permeabilidad es dominante. *“Por lo tanto la permeabilidad relativa es un número, esto es no tiene dimensiones, solo valores numéricos”* (Wood, 1991).

Materiales Ferromagnéticos

Podríamos clasificar los materiales ferromagnéticos como los más fuertes, que se pueden imanar más intensamente; la capacidad de permeabilidad en estos materiales es tan alta que sus valores pueden estar entre los 50 y 5000, incluso en algunos materiales como el permaloy puede llegar a 100000.

Los principales materiales ferromagnéticos son, el hierro, el acero, el níquel, el cobalto y algunas aleaciones comerciales. (Gussow, 2000).

Materiales Paramagnéticos

A diferencia de los anteriores, los materiales paramagnéticos son aquellos que tienen una permeabilidad relativa ligeramente mayor a 1; por lo tanto, la atracción magnética que tienen estos materiales es débil, cuando se imanar tienden a imantarse igual que el campo imanador original, algunos de estos materiales son aluminio, platino manganeso y cromo (Wood, 1991)

Materiales Diamagnéticos

Finalmente, los materiales diamagnéticos son aquellos que tienen una permeabilidad relativa ligeramente menor a 1, por lo tanto, estos materiales se imanar muy débilmente pero

su imanación es contraria al campo imanador, algunos de estos materiales son el cobre, el oro, mercurio, zinc entre otros. (Wood, 1991).

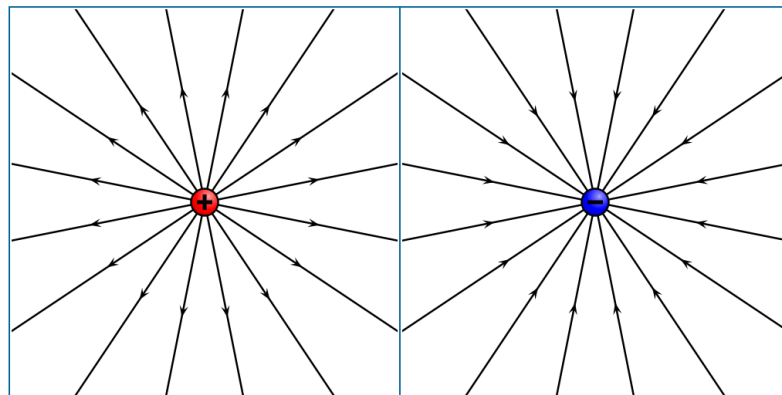
Corriente y campo eléctrico

La corriente se define como “*el número de cargas que fluyen por unidad de tiempo a través de un área*” (Serway & Jr., 2004) o en otras palabras es el movimiento de las cargas en un material conductor, eso es una corriente.

Por su parte, el campo eléctrico es “Se define como el cociente entre la fuerza eléctrica que actúa sobre una partícula cargada” (Serway & Jr., 2004) en otras palabras, en donde se encuentra una carga alrededor de esta hay un campo eléctrico, o donde se encuentra un cuerpo cargado y se coloque una carga cercana a este, la carga sufrirá una fuerza sobre esta, este cuerpo tendría un campo eléctrico resultante, aunque tenga varias cargas.

Como se puede observar en la siguiente figura podemos encontrar el campo eléctrico de dos cargas, a la derecha la carga negativa (electrón) y a su izquierda la carga positiva (protón) además, podemos observar las líneas de campo en el caso del negativo entrando y en el caso de la carga positiva sus líneas se ven saliendo de esta, esto significa el tipo de fuerza que ejerce sobre otra carga, la carga positiva atrae a la negativa. Muy parecido a lo que pasa con el campo magnético, el polo positivo tiene líneas de fuerza que se dirigen hacia el negativo. (Serway & Jr., 2004)

Ilustración 12. Campo Eléctrico.



Fuente: Universidad de Sevilla.

Materiales Conductores

Los materiales conductores son aquellas sustancias que permiten una mejor fluidez de carga o cargas a través del área del material, ya que “*la resistividad o conductividad eléctrica no depende de las dimensiones del material*” (Askeland & Wright, 2022) podemos

deducir que se pueden comparar distintos materiales según su conductividad y no su tamaño o las dimensiones que este posea.

Ahora bien, la conductividad y resistividad eléctrica de los materiales conductores se pueden relacionar mediante una ecuación conocida, la ley de Ohm, donde V es el voltaje medido en voltios, I es la corriente medida en amperios y R es la resistencia del material medida en ohmios.

Ecuación 19 La ley de Ohm.

$$V = IR$$

Fuente: (Askeland & Wright, 2022)

Y la ley de la resistencia del material se puede expresar como:

Ecuación Resistencia de los materiales.

$$R = \rho \frac{l}{A} = \frac{l}{\sigma A} = \frac{E}{J}$$

Fuente: (Askeland & Wright, 2022)

Donde R es la resistencia, ρ es la resistividad eléctrica medida en ohmios*cm (), l es la longitud del resistor (cm), y σ la conductividad eléctrica del material. (Askeland & Wright, 2022).

La resistividad se puede definir como “*el campo eléctrico por unidad de densidad de corriente*” (Sears, Zemansky, & Young, 1988) esta resistividad esta relacionada con la resistividad termica, pero tambien con la resistividad electrica, existe una relacion entre ambas, a mayor temperatura mayor conductividad electrica, menor resistivilidad.

Cuando existe un movimiento, hay una energía que acompaña el movimiento, si este movimiento es del campo magnético, en los materiales conductores se va a generar una corriente como se ha dicho a lo largo de este trabajo y dicha corriente genera una transformación energética que se puede interpretar como una “pérdida calórica”, ya que el material debido al movimiento circular de las corrientes se calienta; a este fenómeno también lo llamamos “Efecto Joule”.

Conservación de la Energía

En la siguiente sección se encuentran conceptos relacionados con la energía, la transformación y conservación de esta, esos conceptos son importantes para comprender el

funcionamiento correcto del artefacto. “La energía no se crea ni se destruye solo se transforma” (Serway & Jewett, 2003).

El trabajo es un término que está muy ligado a la energía, por lo tanto, no se puede hablar del teorema de la energía sin hablar del trabajo, el trabajo hace referencia a un cuerpo o una masa que “*ejerce una fuerza constante sobre un sistema, es el producto de la componente $F\cos\theta$ de la fuerza a lo largo de la dirección de desplazamiento del punto de aplicación de la fuerza*” (Serway & Jewett, 2003).

Ecuación 20 Trabajo.

$$W = F\Delta r \cos\theta$$

Fuente: (Serway & Jewett, 2003)

Siendo W el trabajo, F la fuerza ejercida por la masa, cuerpo o agente, Δr la magnitud del desplazamiento y θ es el ángulo que hay entre la fuerza y el desplazamiento, la unidad resultante de medida es julios, ya que las unidades que se multiplican son F, que se mide en newtons y r que es desplazamiento medido en metros.

Como podemos observar en la ecuación, es necesario que se ejerza una fuerza y un desplazamiento que sea diferente de cero, porque si alguno de estos dos es cero, el trabajo final será cero, otra deducción que se puede hacer es que si la fuerza que se aplica es perpendicular al desplazamiento el trabajo será cero, porque el $\cos 90^\circ=0$.

Cuando consideramos la energía de un cuerpo, una masa o un agente que está en movimiento, debemos considerar que este tipo de energía se le llama energía mecánica, esta es la resultante de la suma de dos energías totales según la dirección que toma el movimiento, si el movimiento se da en el plano horizontal la energía es cinética, si el movimiento se da en el plano vertical es la energía potencial, como la mayoría de los movimientos naturales de los cuerpos se conforma de los dos planos, se separa el movimiento para que la medida de este sea más precisa y más fácil de tomar. Se explicará cada una de estas energías y luego su relación con el trabajo, para llegar a un marco inercial de referencia que exponga la suma de estas energías igual al trabajo.

Se iniciará considerando la energía cinética, definida como:

Ecuación 21 Energía Cinética.

$$K = \frac{1}{2}mv^2$$

Fuente: (Serway & Jewett, 2003).

Siendo K la energía cinética, m la masa del cuerpo con unidad internacional en kilogramos (Kg) y v la velocidad del cuerpo. La ecuación general es válida para decir la energía cinética en un punto del movimiento, si se quiere obtener la energía total se debe considerar que la velocidad puede cambiar en el movimiento.

La energía cinética da como resultado la multiplicación de unidades de masa y velocidad al cuadrado, esto es Julios (J) como se indica en la siguiente operación donde colocaremos la ecuación anterior con las unidades de medida para encontrar la unidad de medida resultante:

Ecuación 22 Energía cinética y Trabajo.

$$K = Kg * \left(\frac{m}{s}\right)^2 = Kg * \frac{m^2}{s^2} = Kg * \frac{m}{s^2} * m = N * m = J$$

Fuente: (Serway & Jewett, 2003)

En la operación podemos observar cómo newtons (N) multiplicado con metros (m) dan como resultado la unidad de la energía julios (J).

Como resultado el trabajo y la energía cinética tienen la misma unidad de medida, el teorema del trabajo-energía cinética, como nos dice Serway y Jewett (2003)

“cuando se realiza un trabajo sobre un sistema y lo único que cambia en el sistema es la magnitud de la velocidad, el trabajo neto realizado sobre el sistema por las fuerzas externas es igual al cambio de la energía cinética del sistema” (p.202).

Por lo tanto, el trabajo con respecto a la energía cinética es:

Ecuación 23 Trabajo y E. Cinética.

$$W_f = K_f - K_i = W_{TK} = K_T$$

Fuente: Fuente: (Londoño V., 2003)

Donde K_f es la energía cinética final del movimiento, K_i es la energía cinética inicial, y como se observa en la operación K_T es la energía cinética total del movimiento que es igual a W_{TK} siendo el trabajo total cinético.

Ahora continuamos con la energía potencial, definida como

Ecuación 24 Energía Potencial.

$$U = mgh$$

Fuente: (Serway & Jr., 2004)

Donde U es la energía potencial m la masa del cuerpo (Kg), g la aceleración que tiene el cuerpo en el movimiento, en el caso de los movimientos en la tierra, se toma comúnmente la aceleración de la gravedad ($10 \frac{m}{s^2}$) y por último h que es la altura que tiene el objeto que se mide en metros, teniendo en cuenta que esta es la ecuación general para para un cuerpo en un punto específico del movimiento si queremos la energía potencial final hay que tener en cuenta que es posible que las variables de gravedad y altura cambien.

El trabajo en este tipo de movimiento que tiene energía potencial se lo encontramos al remplazar las unidades de medida en la ecuación como se obtiene en la siguiente operación:

Ecuación 25 Energía Potencial Unidades.

$$U = kg * \frac{m}{s^2} * m = N * m = J$$

Fuente: (Sears, Zemansky, & Young, 1988)

La ecuación del trabajo en este tipo de movimiento es igual, pero como la dirección del movimiento es de manera vertical tenemos que, $W = F\Delta r \cos 180^\circ$ ya que la dirección que tiene la fuerza siempre va a ser contraria y paralela a la del desplazamiento, y coseno de 180° es igual a -1 por lo tanto en la ecuación de la energía potencial final tendrá un negativo que multiplica el resultado final, ya que la energía no puede ser negativa como se muestra en la siguiente ecuación

Ecuación 26 Despeje de E. Potencial y Trabajo.

$$U_T = -(mgh_f - mgh_i)$$
$$W_T = -(U_f - U_i) = W_{TU} = U_T$$

Fuente: (Londoño V., 2003)

En donde U_f es la energía potencial final, U_i es la energía potencial inicial, U_T es la energía potencial total, W_{TU} es el trabajo total potencial.

Por lo tanto, la aplicación del teorema del trabajo para la conservación de la energía es:

Ecuación 27 Energía y Trabajo.

$$W_T = W_{TK} + W_{TU}$$
$$W_T = K_f - K_i * (- (U_f - U_i))$$
$$W_T = (K_f + U_f) - (K_i + U_i)$$

Fuente: (Londoño V., 2003)

Como podemos observar se suman las energías finales e iniciales dando como resultado la energía mecánica final e inicial del movimiento, que en la siguiente ecuación y representara con E, como se ve en la siguiente ecuación:

Ecuación 28 Trabajo y Energía.

$$W_T = E_f - E_i$$

Fuente: (Londoño V., 2003)

Ahora suponemos que las fuerzas que realizan el trabajo son conservativas, o sea que en el trabajo total (W_T) será cero en este caso y por lo tanto las energías serán iguales como se muestra a continuación:

Ecuación 29 Conservación de la energía.

$$0 = E_f - E_i$$

$$E_i = E_f$$

Fuente: (Londoño V., 2003)

Esto significa que la energía mecánica se mantiene constante durante el movimiento, y esta es la ley de la conservación de la energía en mecánica. Toda esta demostración de la conservación de la energía la explica el Profesor Felipe Londoño de la Universidad Nacional de Colombia, en su libro Introducción a la mecánica (Londoño V., 2003).

La Energía Mecánica y la Energía Eléctrica

El movimiento de un objeto consta de un sistema donde se pueden estudiar ciertas variables, si el objeto se mueve este cambia de posición, lo que implica una velocidad y un cambio de su estado de reposo hasta un punto determinado. La energía mecánica se asocia a la interacción del cuerpo en relación con su posición, alude al trabajo necesario para mover el objeto de un punto a otro, según explica el apartado anterior.

Ahora bien, esta energía mecánica puede transformarse en otros tipos de energía según el sistema ya sea energía calórica, energía eléctrica, química, entre otras. Dichas transformaciones permiten que se conserve la energía pasando de una forma en otra y generando cambios en el sistema. Esto se puede ver, por ejemplo, en los automóviles, molinos de viento o simplemente al encender una lámpara; uno de los cambios más frecuentes es cuando debido al movimiento, el objeto se calienta, es decir, pasa de energía

cinética a calórica y esta última se suele representar como una “perdida” de energía mecánica o” perdida calórica”.

El cambio de energía mecánica en energía eléctrica se debe al movimiento de objetos conductores en un campo magnético como es el caso de un generador eléctrico o en el tubo de Lenz, el movimiento de un imán alrededor de un tubo conductor; al igual que en cualquier transformación, la energía total se conserva y esta puede evidenciarse de distintas maneras dentro del sistema, por ejemplo, en el tubo disminuye su energía mecánica amortiguando el movimiento.

Anexo 2

En el siguiente anexo se encuentran dos guías que se proponen para dirigir algunas actividades experimentales.

Guía 1

Dirección de la corriente inducida y Orientación del imán

Introducción

En el siglo XIX, se produjeron desarrollos teóricos y experimentales cruciales en el campo de la electricidad y el magnetismo. Estos estudios llevaron al descubrimiento del fenómeno de inducción electromagnética llevado a cabo por Michael Faraday y Oersted, el cual nos dice que, si existe un “magnetismo” con movimiento cerca de un alambre de cobre, en este se genera una corriente, corriente que se le denomina como “corriente inducida” más reconocida como Ley de Faraday.

Adicionalmente Heinrich Lenz, formuló una ley que establece que “cuando se genera una corriente inducida en un alambre enrollado, la corriente eléctrica genera un campo magnético alrededor del alambre, este campo magnético se opone, como si “peleara” contra el campo magnético que genera la corriente inducida.” Este fenómeno se le llama Ley de Lenz, como se observa en la siguiente imagen.

Ley de Lenz

Las fem inducidas tiene un sentido tal que con sus efectos tienden a oponerse a las causas que las producen

Se acerca un **N** se crea un **N** ← Ley de Lenz → Cara N
 Se aleja un **N** se crea un **S** ← Ley de Lenz → Cara S

Debilita el campo magnético principal
 Refuerza el campo magnético principal

Realización: (Maquinas Eléctricas, 2015)

La ley de Lenz complementa la ley de Faraday ya que nos da la dirección de la corriente eléctrica inducida, esta se opondrá al cambio original del campo magnético.

En este sentido, la presente actividad cualitativa tiene como objetivo explorar los fenómenos de la inducción electromagnética y la ley de Faraday y Lenz, analizando el movimiento de un imán por medio del Tubo de Lenz; este artefacto consta de un tubo, generalmente de cobre, por el cual se deja caer un imán, el movimiento del imán experimenta una perturbación llamada “amortiguación magnética”.

La utilización del fenómeno de amortiguación magnética tiene aplicaciones en la vida cotidiana como en el sistema de seguridad de un ascensor, el cual utiliza un frenado electromagnético, para reducir la velocidad o detener la cabina del ascensor y garantizar de esta manera un funcionamiento seguro.

Planteamiento del Problema:

Según lo anterior y de acuerdo con tus conocimientos previos, plantea una hipótesis de cómo debe ser el movimiento del imán por medio del tubo, utiliza las siguientes preguntas como apoyo para construirla.

PREGUNTAS ORIENTADORAS

1. ¿Qué crees que pase cuando el imán caiga por el tubo?
2. ¿Crees que existe alguna relación entre el material del tubo y el movimiento del imán?
3. ¿Qué fuerza afecta a los cuerpos en una caída libre?

Procedimiento:

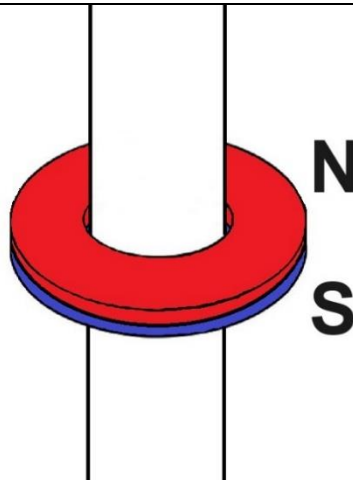
Desarrollar los siguientes pasos para utilizar el Tubo de Lenz y observar el efecto electromagnético:

1. Inicialmente, colocar los tubos en la estructura para que cuelguen libremente.
2. Una vez ubicados los tubos, antes de tomar datos, realizar una observación previa de la caída del imán por cada tubo, con el fin de reconocer el movimiento.
3. Luego dejar caer el imán de neodimio tipo arandela, a través del tubo de cobre, observar la caída y se tomar notas de las observaciones hechas, así como el tiempo total de la caída.
4. Realizar el mismo procedimiento con el tubo de aluminio y posteriormente con el tubo de plástico.
5. Finalmente, con los apuntes de las observaciones y las investigaciones previas, realizar el análisis de datos.

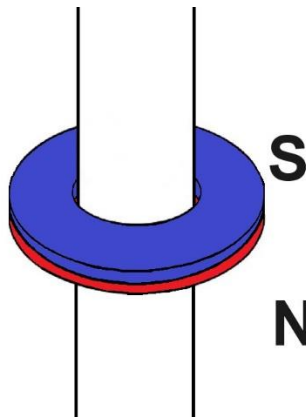
Análisis de datos:

1. Identificar y discutir los conceptos electromagnéticos involucrados en la actividad.

2. En la siguiente imagen se encuentra el imán cayendo por el tubo de cobre, dibujar la dirección de la corriente (parásita) inducida y de los campos magnéticos resultantes de la corriente inducida, justifica tu respuesta.



3. En la siguiente imagen se encuentra el imán cayendo por el tubo de cobre, dibuja la corriente (parásita) inducida y los campos magnéticos resultantes de la corriente inducida, justifica tu respuesta.



Discusión:

1. ¿Existe alguna relación entre la hipótesis planteada y los resultados obtenidos en la observación?
2. ¿De qué forma la orientación del imán en la caída, afecta la corriente (parásita) inducida?

3. De acuerdo con los resultados obtenidos, ¿cómo relacionas estos con la ley de Faraday-Lenz?

Conclusión:

1. En relación con tus conocimientos previos y lo realizado en esta actividad ¿cómo crees que este experimento te ayudo a explorar y comprender el concepto de inducción electromagnética y los otros conceptos del electromagnetismo, como corriente o magnetismo?
2. ¿Qué aspecto de esta actividad te resultó más interesante en términos de la física?
3. ¿Cómo crees que la comprensión de estos conceptos y fenómenos electromagnéticos puede contribuir para el avance de la investigación y al aumento del conocimiento científico en nuestra sociedad? Plantea un invento propio en el cual se haga uso del fenómeno de corrientes (parásitas) inducidas.

Guía 2

Del MRUA al MRU: el poder del electromagnetismo

Introducción:

La presente actividad cuantitativa tiene como objetivo explorar los fenómenos de la inducción electromagnética y la ley de Faraday y Lenz, analizando el movimiento de un imán por medio del Tubo de Lenz.

Se hará el análisis del movimiento por medio de las ecuaciones del movimiento rectilíneo uniformemente acelerado (MRUA) y del movimiento rectilíneo uniforme (MRU).

Planteamiento del Problema:

El Tubo de Lenz es un artefacto consta de un tubo, generalmente de cobre en el que se deja caer a través de este un imán y se estudia su movimiento; este movimiento sufre una perturbación llamada “amortiguación magnética”.

El imán se deja caer libremente, por lo tanto, por la aceleración de la gravedad debería reconocerse un MRUA, sin embargo, se presenta otro tipo de movimiento MRU; la superficie de los tubos impide que exista una fricción aparente, entonces ¿Qué sucede?

El MRUA, es un tipo de movimiento en el cual el cuerpo que se está desplazando presenta una aceleración constante, lo que significa que su velocidad aumenta en cantidades homogéneas, por ejemplo, en un cuerpo que está cayendo libremente, la

gravedad perturba la caída, esta aceleración es constante, y el aumento de su velocidad también estará en aumento

Preguntas Orientadoras:

Responde las siguientes preguntas:

1. ¿Cuál es la relación entre el movimiento del imán, y la corriente parásita en el tubo de Lenz?
2. ¿Cuál de estos dos movimientos MRUA y MRU encaja más con la caída libre de un cuerpo? ¿cuáles son las diferencias entre estos dos?

Procedimiento:

1. Inicialmente, se coloca una marca con un marcador negro cada 10 centímetros en los tubos y luego se colocan en la estructura para que cuelguen libremente.
2. Una vez ubicados los tubos, se comenzará con posicionar el imán en la parte superior del tubo y empezará la observación de la caída del imán
3. A continuación, se graba la caída del imán de neodimio tipo arandela, a través del tubo de cobre, y a 50 centímetros de distancia se grabará la caída en el tubo de cobre, aluminio y plástico; se tomarán notas de las observaciones hechas.
4. Para concluir la observación se tomará el dato del tiempo total de la caída del imán en los tres tubos diferentes (cobre, aluminio, plástico).
5. Finalmente, con los apuntes de las observaciones y las investigaciones previas, se responden las siguientes preguntas.

Análisis de datos:

1. Para ayudar al análisis de datos y a la exploración del fenómeno, se presentan las siguientes pautas. Comparte tus observaciones con tus compañeros y compara.

Tiempo total registrado:

- Tubo de cobre: _____ segundos.
- Tubo de aluminio: _____ segundos.
- Tubo de plástico: _____ segundos.

2. Completar la tabla con los tiempos registrados en los videos.

Posición	T. de Cobre	T. de Aluminio	T. de plástico
0 cm			
10 cm			
20 cm			

30 cm			
40 cm			
50 cm			
60 cm			
70 cm			
80 cm			
90 cm			
100 cm			

3. Realiza un plano cartesiano de las gráficas de posición del imán en los tres tubos.
4. Realiza un plano cartesiano de las gráficas de velocidad del imán en los tres tubos.
5. Realiza un plano cartesiano de las gráficas de aceleración del imán en los tres tubos.

Discusión:

1. ¿Qué resultados se esperaban del movimiento del imán a través de los tubos?
¿Qué diferencia hay en el movimiento que describe cada imán según el tubo?
Relaciónalo con la magnitud del tiempo.
2. ¿Qué se puede deducir de las gráficas obtenidas, con respecto a la posición, velocidad y aceleración de las caídas?
3. ¿Qué diferencias notó del movimiento del imán cuando tenía un comportamiento con MRU y cuando se aceleraba con MRUA?
4. ¿Qué relación tienen los resultados obtenidos y la ley de inducción?

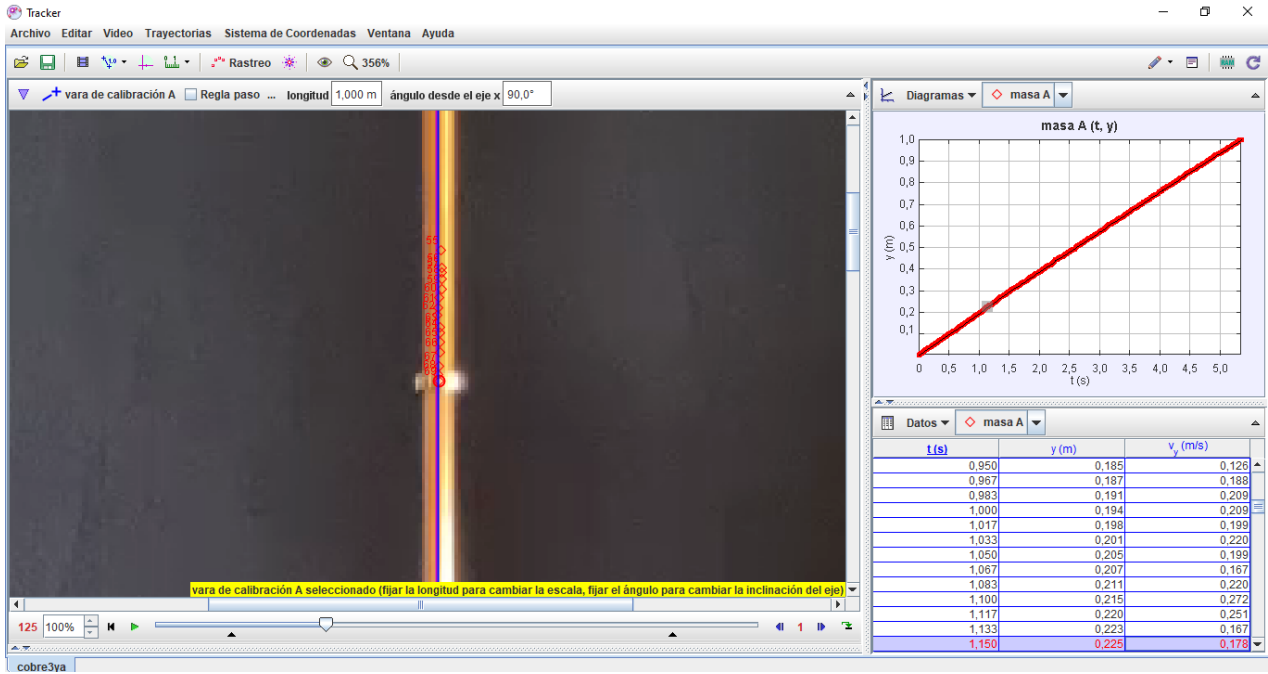
Conclusión:

Responda las siguientes preguntas según los resultados obtenidos:

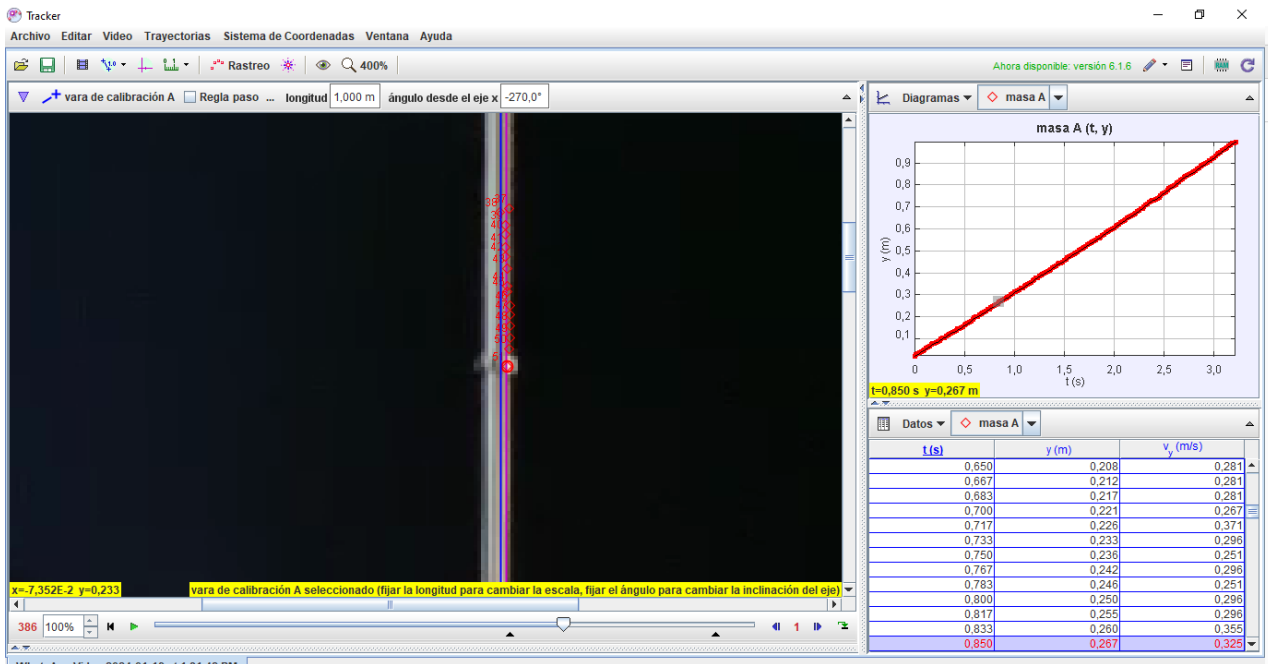
1. En relación con tus conocimientos previos y lo realizado en esta actividad ¿cómo crees que este experimento te ayudo a explorar y comprender el concepto de inducción electromagnética y los otros conceptos del electromagnetismo, como corriente o magnetismo?
2. ¿Qué aplicaciones pueden tener estos conceptos en la vida cotidiana?
3. ¿Cuál es la importancia de conocer la relación entre los fenómenos electromagnéticos del tubo de Lenz y los movimientos MRUA, MRU?

Anexo 3

Pantallazo de programa Tracker de una de las caídas del imán a través del tubo de cobre.



Pantallazo de programa Tracker de una de las caídas del imán a través del tubo de aluminio.



Pantallazo de programa Tracker de una de las caídas del imán a través del tubo de plástico.

