

Evaluation of the efficiency of an electromagnet for attracting polymetallic particulate matter at the laboratory level - 2024

Evaluación de la eficiencia en un electroimán para la atracción de material particulado polimetálico a nivel de laboratorio - 2024

Alejandro Reyna Pinedo¹, Grethell Yaneth Trujillo Aguilar², Haniel Solís Muñoz³, Luis David Moncada Torres⁴, Elias Fernando Haro Aro⁵, Willian Antonio Blas Roeder⁶, Antonio Manuel Otoya Zelada⁷

¹ Universidad Nacional de Trujillo, Perú, areynap@unitru.edu.pe

² Universidad Nacional de Trujillo, Perú, gtrujilloa@unitru.edu.pe

² Universidad Nacional de Trujillo, Perú, hsolism@unitru.edu.pe

³ Universidad Nacional de Trujillo, Perú, lmoncadat@unitru.edu.pe

⁴ Universidad Nacional de Trujillo, Perú, eharoa@unitru.edu.pe

⁵ Universidad Nacional de Trujillo, Perú, wblasro@unitru.edu.pe

⁶ Universidad Nacional de Trujillo, Perú, amotoyaz@unitru.edu.pe

Resumen- El presente trabajo de investigación tuvo como finalidad evaluar la eficiencia de un electroimán para la atracción de material particulado polimetálico en condiciones de laboratorio. Se elaboraron tres prototipos de electroimán con 40, 70 y 110 vueltas, siendo este último el que generó el mayor campo magnético, en concordancia con la Ley de Ampère. Para la experimentación se utilizaron residuos metálicos provenientes de fresadora, disco de corte y molienda, los cuales fueron clasificados según rangos granulométricos: 50–150 μm , 10–50 μm y 1–20 μm , respectivamente. Se aplicaron análisis estadísticos como la prueba de Shapiro-Wilk, prueba de Levene, ANOVA de un factor y prueba de Tukey HSD, verificándose la normalidad y homogeneidad de los datos. Los resultados mostraron que el electroimán fue más eficiente en la retención de partículas de mayor tamaño: 48.02 % para fresadora, 46.73 % para disco de corte y 21.45 % para molienda. Se concluye que el tamaño del material particulado y el diseño del electroimán influyen directamente en la eficiencia de atracción, validando la viabilidad de su aplicación en contextos industriales.

Palabras clave: electroimán, eficiencia magnética, material particulado, retención magnética.

Abstract – The purpose of this research was to evaluate the efficiency of an electromagnet in attracting polymetallic particulate matter under laboratory conditions. Three electromagnet prototypes were built with 40, 70, and 110 turns, with the latter generating the strongest magnetic field, in accordance with Ampère's Law. Metallic residues from milling, cutting discs, and grinding were used in the experiments and classified by particle size ranges: 50–150 μm , 10–50 μm , and 1–20 μm , respectively. Statistical

analyses such as the Shapiro–Wilk test, Levene's test, one-way ANOVA, and Tukey HSD test were applied to verify data normality and homogeneity. The results showed that the electromagnet was more efficient in retaining larger particles: 48.02% for milling, 46.73% for cutting disc, and 21.45% for grinding. It is concluded that particle size and electromagnet design directly influence attraction efficiency, supporting the feasibility of its application in industrial contexts.

Keywords: electromagnet, magnetic efficiency, particulate matter, magnetic retention.

I. INTRODUCCIÓN

La industria metalmecánica representa una de las principales fuentes de emisión de material particulado (MP) a nivel mundial, destacando especialmente la liberación de partículas polimetálicas. Estas partículas, compuestas por metales de diferentes tamaños y composiciones, se generan en procesos como el corte con disco, esmerilado, fundición y soldadura [4]. Su presencia en el aire no solo representa una amenaza para la calidad ambiental, sino que también está asociada a efectos adversos en la salud humana, como enfermedades respiratorias y cardiovasculares [14].

En el caso de Perú, este sector industrial es clave para el desarrollo económico, pero su crecimiento ha traído consigo una preocupante alza en la emisión de contaminantes. Para el año 2021, el país fue calificado como el de peor calidad del aire en América Latina [2], y aunque se ha avanzado en normativas más estrictas, los esfuerzos por su implementación

efectiva y monitoreo aún son insuficientes. Trujillo, ciudad emblemática del norte peruano, alberga un sector metalmecánico en expansión, con proyecciones de crecimiento hasta el año 2030 [13]. Sin embargo, el aumento de la actividad también conlleva una mayor generación de partículas metálicas en suspensión, cuyo control sigue siendo limitado.

Pese a la magnitud del problema, en el distrito de Trujillo no se han reportado acciones concretas para mitigar la emisión de este tipo de material particulado en empresas metalmecánicas. En la empresa “Fredy Aguilar”, por ejemplo, los trabajadores señalan que las partículas metálicas impregnan su ropa, piel y vías respiratorias, incluso cuando se hace uso de equipos de protección personal (EPP). Este hecho evidencia una situación crítica que compromete la salud ocupacional, la eficiencia operativa y la sostenibilidad ambiental.

En este contexto, se plantea como respuesta innovadora el diseño y evaluación de un electroimán a escala de laboratorio que permita reducir la concentración de material particulado polimetálico en el ambiente de trabajo. Esta propuesta no solo pretende aportar una solución tecnológica aplicable al sector, sino que también busca contribuir a la mejora de las condiciones laborales, a la protección del medio ambiente y al cumplimiento de las regulaciones vigentes. Además, se espera que el rendimiento del prototipo, medido a través de su capacidad de atracción magnética, permita identificar si configuraciones específicas generan una diferencia significativa en la eficiencia de captura del material particulado, aportando así evidencia útil para futuras aplicaciones a mayor escala.

II. METODOLOGÍA

2.1. Localización y contexto del Área de Trabajo

La presente investigación se desarrolló en dos espacios complementarios: un entorno productivo industrial y un espacio académico controlado.

Por un lado, las muestras de material particulado polimetálico fueron recolectadas en la empresa metalmecánica “Fredys Aguilar”, ubicada en Guzmán Barrón 416, Trujillo 13001, región La Libertad, Perú. Esta empresa se encuentra en una zona urbana de la ciudad de Trujillo, lo cual facilita el acceso a procesos industriales activos como el corte, fresado y fundición de metales, que generan residuos metálicos de interés para este estudio. Por otro lado, todas las pruebas experimentales relacionadas con la construcción y evaluación de los electroimanes, así como las mediciones del campo magnético y de atracción del material, se llevaron a cabo en el Laboratorio de Electrónica de la Escuela Profesional de Física de la Universidad Nacional de Trujillo.

2.2. Materiales y Métodos

2.2.1. Materiales y Equipos

Los recursos principales empleados se clasifican en:

Materiales para la construcción del electroimán:

Alambre de cobre esmaltado calibre 24 AWG

Seleccionado por su bajo nivel de resistencia eléctrica, adecuada capacidad de conducción de corriente, facilidad de enrollado y estabilidad térmica. Según la [9], el calibre 24 AWG permite una densidad de corriente equilibrada sin sobrecalentarse, y su dimensión permite realizar un mayor número de vueltas, optimizando la generación del campo magnético [24]; [21].

Núcleo de acero

Se utilizó acero de construcción debido a su buena permeabilidad magnética, alta saturación y accesibilidad. Aunque no supera al acero al silicio en eficiencia, el acero es económico y funcional para fines de laboratorio [8]; [11]. Su uso también está justificado por su aceptable comportamiento ante las pérdidas por corrientes de Foucault.

Equipos empleados en el proyecto:

Se utilizó una fuente digital DC de 30V 5A, que permitió regular la corriente entre 0.1 A y 1.0 A, rango seguro para alambre calibre 24 AWG, cuya capacidad máxima sin ventilación alcanza 0.577 A en corriente continua. Este rango es común en ensayos de laboratorio y garantiza seguridad operativa [3].

Para la medición del campo magnético se empleó un teslámetro Teslameter 10008537/3B, calibrado mediante una bobina sin núcleo de 600 vueltas, aplicando la fórmula:

$$B = \frac{N \times \mu \times I}{2\pi R}$$

Considerando la permeabilidad del vacío:

$$\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} T \cdot \frac{m}{A}$$

La cuantificación de material particulado retenido se realizó con una balanza analítica METTLER TOLEDO, que garantiza precisión al minimizar interferencias externas como vibraciones o carga electrostática, incluso en condiciones no controladas [16].

2.2.2. Construcción de prototipos

Se construyeron tres prototipos de electroimán tipo solenoide con núcleo de acero de 11 cm y alambre de cobre esmaltado calibre 24 AWG, variando únicamente el número de vueltas: 40, 70 y 110. Esta variación permitió analizar el efecto del número de espiras sobre la eficiencia magnética, manteniendo constantes las demás variables estructurales. A diferencia del estudio de Vargas y Juárez (2013), que utilizó un núcleo de 5.7 cm con 100 vueltas, este diseño adapta la relación entre longitud del núcleo (L) y número de vueltas (N) considerando corrientes limitadas entre 0.1 A y 1.0 A.

La elección del alambre 24 AWG, con menor resistencia eléctrica que el calibre 25 AWG empleado por Vargas y Juárez (2013), asegura mejor estabilidad térmica y electromagnética bajo condiciones de laboratorio [9]; [24]; [21].

2.3. Diseño de la Investigación

El estudio es de tipo aplicado, al abordar un problema real mediante la evaluación de la eficiencia de un electroimán en la atracción de material particulado polimetálico en entornos

metalmecánicos. Presenta un diseño experimental, ya que se manipula la variable independiente (electroimán) para observar su efecto sobre la variable dependiente (material particulado). El enfoque es cuantitativo y de corte transversal, basado en datos medibles recolectados en laboratorio en un momento específico.

2.4. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Se empleó el teslámetro para medir el campo magnético, para poder tener datos más certeros se optó por realizar una calibración del equipo realizando 14 mediciones teóricas empleando la fórmula derivada de la Ley de Ampere y práctico (este último medido con el teslámetro) de una bobina estandarizada de N=600, un radio de 4.2 cm y un rango de corriente continua de 0.2 – 1.5A

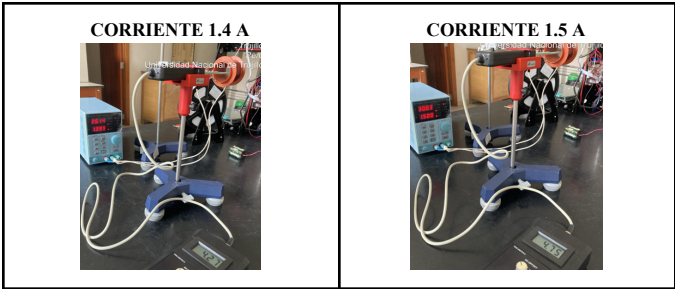
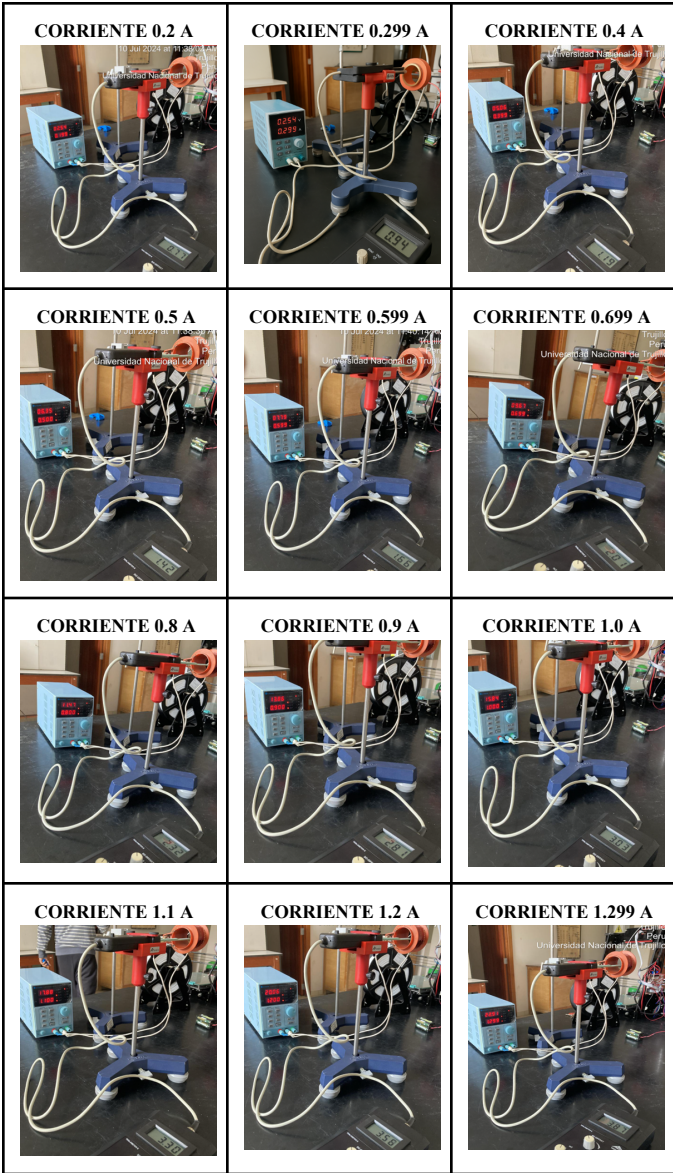


Fig 1. Mediciones para la calibración del Teslámetro con bobina estandarizada (N: 600; R: 4.2 cm)

Para lo cual se obtuvieron los siguientes resultados:

TABLA I
VALORES OBTENIDOS DE LA MEDICIÓN TEÓRICA Y PRÁCTICA DE LA BOBINA DE N=600

NÚMERO DE VUELTAS	RADIO DE LA BOBINA (m)	CORRIENTE (A)	B= TEORICO (mT)	B= PRÁCTICO (mT)
600	0.042	0.2	1.7951	0.77
		0.299	2.683818	0.94
		0.4	3.590392	1.19
		0.5	4.48799	1.42
		0.599	5.376611	1.66
		0.699	6.274209	2.01
		0.8	7.180783	2.32
		0.9	8.078381	2.81
		1	8.975979	3.03
		1.1	9.873577	3.3
		1.2	10.771175	3.56
		1.299	11.659797	3.87
		1.4	12.566371	4.27
		1.5	13.463969	4.75

Nota. Las mediciones se realizaron en el centro de la bobina la cual no posee un núcleo.

Con los resultados obtenidos se derivó una fórmula en el software OriginPro para realizar lo que es un ajuste lineal entre los valores obtenidos en las mediciones teóricas y prácticas, la cual se empleó para calibrar las mediciones posteriores obtenidas por el teslámetro:

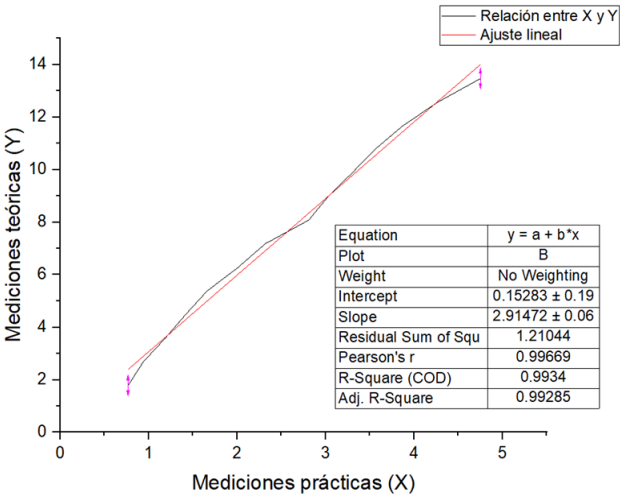


Fig 1. Gráfica obtenida del ajuste lineal entre los valores teóricos y prácticos de la medición del campo magnético.

Nota. Se observa que existe un coeficiente de determinación del 99.34% de la variación en el campo magnético teórico se explica por el modelo lineal aplicado lo cual muestra una muy alta calidad del ajusta. Elaborado empleando el software OriginPro.

Finalmente se obtuvo la siguiente formula a partir de la gráfica:

B = 0.15283 + 2.91472 x A

Donde:

- B = campo magnético (mT)
- A = valor proporcional a la medición práctica o corriente usada en el experimento
- 0.15283 = intercepto, representa el valor estimado de B cuando A=0
- 2.91472 = pendiente, indica el incremento de B por cada unidad de A

Se utilizó una balanza analítica de la marca METTLER TOLEDO con resolución de 0.001 g y capacidad máxima de 320 g, adecuada para el pesaje de pequeñas cantidades de material particulado con alta exactitud y repetibilidad. Esta balanza cumple con los estándares requeridos para experimentos de laboratorio que demandan alta sensibilidad en la medición, especialmente en estudios donde la eficiencia se calcula a partir de pequeñas diferencias de masa antes y después del proceso de atracción magnética.

Se utilizó una balanza analítica de la marca METTLER TOLEDO con resolución de 0.001 g y capacidad máxima de 320 g, adecuada para el pesaje de pequeñas cantidades de material particulado con alta exactitud y repetibilidad.

2.5. Muestra y Población Población

La población del estudio estuvo constituida por el material particulado metálico generado por las máquinas de la empresa metalmecánica “Fredys Aguilar”. La muestra se obtuvo de tres fuentes específicas: molienda, disco de corte y fresadora, clasificándose por granulometría (fina, media y gruesa), con cinco corridas por tipo. Todo el material recolectado correspondió a acero VCN. El muestreo fue no probabilístico por conveniencia.

2.6. Análisis Estadístico Eficiencia porcentual

El cálculo de la eficiencia de retención del material particulado polimetálico fue determinado mediante el cálculo del porcentaje de masa retenida por el electroimán respecto a la masa inicial del material expuesto.

Se aplicó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, adecuada para muestras pequeñas y medianas por su alta potencia en detectar desviaciones respecto a la distribución normal [17]. Para evaluar la homogeneidad de varianzas, se utilizó la prueba de Levene, reconocida por su robustez ante datos no normales y esencial para validar los supuestos del análisis de varianza.

Posteriormente, se empleó un ANOVA de un factor para determinar si existían diferencias significativas entre las

medias de los grupos evaluados, según tipo de prototipo o material particulado. Finalmente, ante la existencia de diferencias, se aplicó la prueba post hoc de Tukey, recomendada por su balance entre potencia estadística y control del error tipo I en comparaciones múltiples.

III. RESULTADOS

3.1. Elaboración de prototipos de electroimanes y selección del prototipo con mayor campo

TABLA II CARACTERÍSTICAS DE LOS PROTOTIPOS DE ELECTROIMÁN

Parámetros	Proto tipo 1	Prototipo 2	Prototipo o 3
Nº vueltas	110	70	40
Alambre de cobre	24 AWG	24 AWG	24 AWG
Material del núcleo (11cm)	acero	acero	acero

Nota. Las características determinadas se basan en fundamentos teóricos y en pruebas experimentales de ensayo y error realizadas en el laboratorio de física.

Con los electroimanes se procedió a realizar las mediciones en sus 3 lados, abarcando lado izquierdo, centro y lado derecho.

TABLA III PROMEDIO DEL CAMPO MAGNÉTICO GENERADO POR LOS PROTOTIPOS EN SUS DIFERENTES PUNTOS.

Ubicación	Prototipo	B Práctico Promedio	B Teórico promedio
Extremo izquierdo	110 vueltas	0.265	0.9252
	70 vueltas	0.165	0.6338
	40 vueltas	0.088	0.3918
Centro	110 vueltas	0.435	1.3916
	70 vueltas	0.175	0.6599
	40 vueltas	0.112	0.4822
Extremo derecho	110 vueltas	0.027	0.2315
	70 vueltas	0.092	0.4209
	40 vueltas	0.037	0.2607

Nota. El campo magnético práctico fue obtenido mediante mediciones con sensor tipo teslámetro, mientras que el campo magnético teórico se calculó aplicando la fórmula.

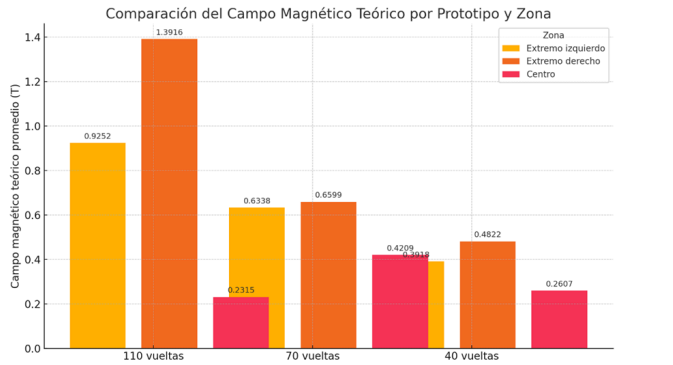


Fig 2. Comparación del campo magnético teórico promedio por prototipo y zona del núcleo

Nota. La figura 2 muestra los valores promedio del campo magnético teórico generado por tres prototipos de electroimán (40, 70 y 110 vueltas) en tres zonas del núcleo: extremo izquierdo, centro y extremo derecho. Los valores fueron calculados aplicando la fórmula de regresión ajustada mediante el software Origin.

Se observa que el prototipo de 110 vueltas presenta consistentemente el mayor campo magnético teórico promedio en las tres zonas del núcleo, lo que evidencia su mayor capacidad de generación de campo magnético.

3.2. Medición de la atracción del material particulado polimetálico con el electroimán seleccionado

El proceso se inicia con la medición exacta de 5 g de material (izquierda), seguido de la activación del electroimán y la atracción del residuo metálico (centro), y finalmente la medición del peso final del material no atraído (derecha). Para evitar interferencias magnéticas externas, el sistema se montó sobre una estructura de cartón reciclado reforzado con una capa externa de cemento, simulando un entorno tipo taller metalmeccánico, evitando que partículas metálicas se adhieran a las paredes.

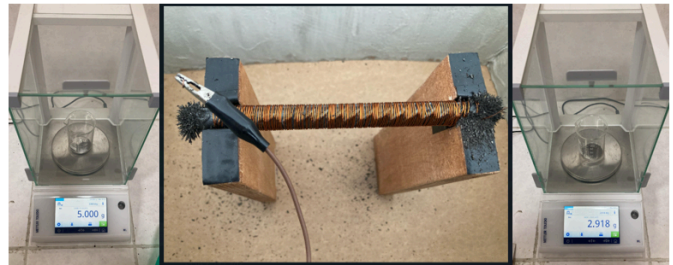


Fig 3. Proceso de la parte experimental de atracción de material particulado polimetálico mediante el prototipo de electroimán de 110 vueltas.

TABLE IV
PROMEDIO DE MATERIAL PARTICULADO ATRAÍDO POR EL ELECTROIMÁN DE 110 VUELTAS SEGÚN TIPO DE MATERIAL PARTICULADO.

Material particulado	Promedio de material atraído (g)
Molienda (1)	1.0726
Disco de Corte (2)	2.3366
Fresadora (3)	2.4012

Nota. Los valores corresponden al promedio de cinco mediciones experimentales realizadas con 5 gramos de cada tipo de residuo metálico sin presencia de corrientes de aire.

3.3. Determinación de la eficiencia de retención del electroimán y análisis estadísticos

Se realizó un análisis estadístico considerando como variable dependiente la cantidad de material atraído en gramos y como variable independiente el tipo de residuo proveniente de las maquinarias de molienda, disco de corte y fresadora.

TABLE V
RESUMEN DE PRUEBAS ESTADÍSTICAS APLICADAS AL ANÁLISI DEL MATERIAL PARTICULADO RETENIDO

Prueba estadística	Propósito	Resultado principal	Nivel de significancia
--------------------	-----------	---------------------	------------------------

Shapiro-Wilk	Verificar la normalidad de los datos	Todos los grupos presentaron distribución normal ($p > 0.05$)	$p = .732, .360, .115$
Levene	Evaluar homogeneidad de varianzas	No se encontraron diferencias significativas en las varianzas ($p > 0.05$)	$p = .062, .194, .212$
ANOVA de un factor	Comparar medias entre los tres grupos	Se encontraron diferencias significativas entre grupos ($F = 82.103; p < 0.001$)	$p < .001$
Tukey HSD (Post Hoc)	Comparaciones múltiples entre pares de grupos	Diferencias significativas entre Molienda y Disco, y entre Molienda y Fresadora ($p < 0.001$); no entre Disco y Fresadora ($p = .847$)	$p < .001, p = .847$

Nota. La prueba de Shapiro-Wilk confirmó que los datos de los tres grupos presentan distribución normal. La prueba de Levene indicó homogeneidad de varianzas. Esto permitió aplicar el ANOVA de un factor, el cual reveló diferencias estadísticamente significativas en la retención de material particulado entre los tipos de residuos. La prueba post hoc de Tukey HSD mostró que dichas diferencias ocurren entre el residuo de molienda y los otros dos grupos, pero no entre disco de corte y fresadora.

Porcentaje de eficiencia de retención

Se procedió a calcular la eficiencia de retención como porcentaje, considerando la proporción de material efectivamente atraído respecto al total inicial (5 gramos).

TABLE VI
PORCENTAJE DE EFICIENCIA EN LA RETENCIÓN DE MATERIAL PARTICULADO SEGÚN EL TIPO DE RESIDUO METÁLICO

Tipo de material	Promedio de material retenido (g)	Eficiencia (%)
Molienda (1)	1.0726	21.45 %
Disco de Corte (2)	2.3366	46.73 %
Fresadora (3)	2.4012	48.02 %

Nota. Los valores corresponden al promedio de cinco mediciones experimentales realizadas con 5 gramos de cada tipo de residuo metálico, bajo condiciones controladas sin presencia de corrientes de aire.

IV. DISCUSIONES

El prototipo de electroimán con 110 vueltas generó un campo magnético significativamente mayor que los de 70 y 40 vueltas en todas las zonas del núcleo, validando la relación teórica de la Ley de Ampère (Tipler & Mosca, 2014). Este comportamiento coincide con lo reportado por la referencia [19], quienes observaron que un mayor número de espiras incrementa sustancialmente la intensidad del campo. No obstante, en una medición puntual del extremo derecho del núcleo, el prototipo de 70 vueltas superó al de 110 vueltas (0.092 mT vs. 0.027 mT), atribuido al fenómeno de fringing magnético [7]; [24].

El uso de alambre de cobre calibre 24 AWG resultó óptimo por su baja resistencia eléctrica y buena disipación térmica, permitiendo un enrollado eficiente y seguro [9]; [21]. El núcleo de acero estructural (11 cm) ofreció buena permeabilidad magnética, aunque materiales como el acero al silicio podrían reducir pérdidas por corrientes parásitas [8]; [11]; [24].

Respecto a la granulometría, se establecieron tres rangos

según la maquinaria: fresadora (50–150 μm), disco de corte (10–50 μm) y molienda (1–20 μm), con validación práctica por operarios especializados. Aunque no se aplicaron métodos como tamizado o difracción láser, la clasificación cumplió con el objetivo del estudio: evaluar la eficiencia magnética frente a residuos reales y sin manipulación adicional [4]; [20].

El electroimán presentó mayor atracción sobre residuos de fresadora (2.4012 g) y disco de corte (2.3366 g), mientras que el residuo de molienda presentó menor eficiencia (1.0726 g), debido a su menor masa y mayor dispersión. Estos resultados concuerdan con [5], quienes demostraron que el campo magnético de un solenoide es más intenso en los extremos. A su vez, [20] y [4] destacan que partículas de mayor tamaño responden mejor a campos magnéticos.

El diseño experimental evitó interferencias magnéticas externas al emplear una estructura no ferromagnética y soportes aislantes, lo que aseguró la validez de las mediciones. La prueba de Shapiro-Wilk indicó distribución normal ($p > 0.05$), y la prueba de Levene confirmó homogeneidad de varianzas ($p > 0.05$), habilitando el uso de ANOVA. Este análisis reveló diferencias significativas entre los tres grupos ($F = 82.103$; $p < 0.001$), especialmente entre el residuo de molienda y los otros dos.

Los porcentajes de retención fueron: 48.02% para fresadora, 46.73% para disco de corte, y 21.45% para molienda, en línea con Cao et al. (2022), quienes evidencian que la eficiencia de separación mejora con partículas de mayor tamaño. Si bien el acero VCN empleado contiene níquel y cromo que favorecen su respuesta magnética, el contenido de carbono (~0.4%) puede limitar su permeabilidad [12].

En conjunto, los resultados validan la hipótesis alterna: la eficiencia de retención magnética varía significativamente según el tipo y tamaño del residuo.

V. CONCLUSIONES

El prototipo de electroimán con 110 vueltas fue el más eficiente en la generación de campo magnético, superando significativamente a los de 70 y 40 vueltas, en concordancia con la Ley de Ampère. Su rendimiento lo posiciona como el más adecuado para aplicaciones experimentales de separación magnética.

Se evidenció que la eficiencia de atracción del material particulado estuvo relacionada con el tamaño y origen del residuo. Las partículas de fresadora (50–150 μm) y disco de corte (10–50 μm) mostraron mayores porcentajes de retención (48.02% y 46.73%), en contraste con las de molienda (1–20 μm), que solo alcanzaron un 21.45%. Esto confirma la influencia del tamaño sobre la susceptibilidad magnética.

El sistema experimental, basado en alambre 24 AWG y núcleo de acero estructural, operó de forma segura y estable entre 0.1 y 1 A, evitando sobrecalentamientos. Los análisis estadísticos (Shapiro-Wilk, Levene y ANOVA) validaron la significancia de las diferencias observadas ($p < 0.001$), lo que respalda la fiabilidad del diseño experimental y su viabilidad para aplicaciones industriales a pequeña escala.

REFERENCES

[1] 3B Scientific. (2024). *TESLAMETER E 10008537 – Manual técnico*.

Recuperado de <https://www.3bscientific.com/>

[2] AAP (2022) 2021: *PERÚ CON LA PEOR CALIDAD DE AIRE ENTRE LOS PAÍSES DE LA REGIÓN*. <https://aap.org.pe/iqair-calidad-de-aire-peru-mala-aap/>

[3] Bo, G., Jun L., Junjie G., Qiru Z., Wenhao S., Yukai Z., Yingxin H., Qiang W., Gang J. Yuan Y., Youjin Z. (2024). Electrical conductivity of copper under ultrahigh pressure and temperature conditions by both experiments and first-principles simulations. *Physical Review B*, 109 (12), 1–11. <https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.109.115129>

[4] Buljat, A., Cargonja, M., & Mekterović, D. (2024). Source apportionment of particulate matter in a metal workshop. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 21(6), 768. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38929014/>

[5] Caciagli, A., Baars, R. J., Philipse, A. P., & Kuipers, B. W. M. (2018). Exact expression for the magnetic field of a finite cylinder with arbitrary uniform magnetization. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 456, 423–432. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304885317334662>

[6] Carbonell, M. V., Flórez, M., Martínez, E., & Álvarez, J. (2017). Aportaciones sobre el campo magnético: historia e influencia en sistemas biológicos. *Revista Intropica*, 12(2), 143–159. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6769197.pdf>

[7] Caushaj, S., Imberti, G., de Carvalho Pinheiro, H., & Carello, M. (2024). Electromagnetic Interaction Model between an Electric Motor and a Magnetorheological Brake. *Designs*, 8(2), 1–21. <https://www.mdpi.com/2411-9660/8/2/25>

[8] Choi, S. I., Feng, J., Kim, S. B., & Jo, Y. M. (2018). Magnetize of Metal for Fine Dust Capture. *Aerosol and Air Quality Research*, 18, 1932 - 1943. <https://aaqr.org/articles/aaqr-17-11-2017aac-0491.pdf>

[9] Copper Development Association Inc. (2019). *Properties of Wrought and Cast Copper Alloys*. <https://www.copper.org/resources/properties/db/basic-search.php>

[10] Du, Y., O'Malley, R., & Buchely, M. (2023). Review of Magnetic Properties and Texture Evolution in Non-Oriented Electrical Steels. *Applied Sciences*, 13(10), 2–16. <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/10/6097>

[11] Elgamli, E., & Anayi, F. (2023). Advancements in Electrical Steels: A Comprehensive Review of Microstructure, Loss Analysis, Magnetic Properties, Alloying Elements, and the Influence of Coatings. *Applied Sciences*, 13(18), 10283. <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/18/10283>

[12] Gang, S., Qian, Y., Xiong, T., Li, Y., Li, W., Ma, Z., Zhang, W., Long, H., Wei, Y., Li, X., Jiang, Q., Luo, Y., & Yang, J. (2024). High electromagnetic wave absorption performance from all-scale hierarchically defective Ni-Mn-Co-Cu-Al high entropy alloys@carbon. *Chemical Engineering Journal*, 499, 156254. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894724077453>

[13] Gobierno Regional La Libertad (2016). *ESTUDIO PROSPECTIVO: REGIÓN LA LIBERTAD AL 2030*. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/604282/-10069171419290640620200416-16848-lq2eks.pdf>

[14] Guo J., Chai G., Song X., Hui X., Li Z., Feng X., Yang K. (2023). Long-term exposure to particulate matter on cardiovascular and respiratory diseases in low- and middle-income countries: A systematic review and meta-analysis. *Front Public Health*. 28,1-13. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10089304/>

[15] Ku, J., Wang, K., Wang, Q., & Lei, Z. (2024). Application of Magnetic Separation Technology in Resource Utilization and Environmental Treatment. *Separations*, 11(5), 130. <https://www.mdpi.com/2297-8739/11/5/130>

[16] Mettler Toledo. (2023). *Analytical balances: Excellence line and precision series*. https://www.mt.com/int/en/home/products/Laboratory_Weighing_Solutions/Analytical_Balances.html

[17] Mishra, P., Pandey, C. M., Singh, U., Gupta, A., Sahu, C., & Keshri, A. (2019). Descriptive statistics and normality tests for statistical data. *Annals of Cardiac Anaesthesia*, 22(1), 67–72. https://journals.lww.com/aoca/fulltext/2019/22010/descriptive_statistics_and_normality_tests_for.11.aspx

[18] OpenStax. (2023). *Física Universitaria Volumen 2 (Sección 11.6: El*

- efecto Hall.
<https://openstax.org/books/fisica-universitaria-volumen-2/pages/11-6-el-efecto-hall>
- [19] Rivera, J.; Gómez, J. & Villalobos, J. (2020). *Diseño y construcción a escala de una matriz de electroimanes para proyección de imágenes basadas en ferrofluidos*. [Título profesional, Universidad Piloto de Colombia]. Repositorio academia de la Universidad Piloto de Colombia. <http://repository.unipiloto.edu.co/bitstream/handle/20.500.12277/9874/PROYECTO%20DE%20GRADO%20PG-20-1-03.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [20] Singh, A., Anand, A., Singh, J., Singh, M., Kumar, K., Bhandari, P., Srivastava, V. K., Singh, A., & Sinha, M. K. (2022). Suitability of turning and grinding steel chips to synthesize metal matrix composite via powder metallurgy route. *Materials Today: Proceedings*, 69(2), 215–219.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785322056413>
- [21] Smith, J., & Brown, A. (2019). Effect of Wire Gauge on Electromagnetic Efficiency. *IEEE Trans. on Magnetics*, 55(4), 7100205. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2019.2898965>
- [22] Smith, Y. R., Nagel, J. R., & Rajamani, R. K. (2019). Eddy current separation for recovery of non-ferrous metallic particles: A comprehensive review. *Minerals Engineering*, 133, 149–159. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S089268751830582X>
- [23] Universidad Nacional Autónoma de México. (2022). *Generación de campo magnético por efecto de la corriente eléctrica*. Facultad de Química, UNAM. https://amyd.quimica.unam.mx/pluginfile.php/17687/mod_folder/content/0/01Generaci%C3%B3n%20de%20campo%20magn%C3%A9tico%20por%20efecto%20de%20la%20corriente%20el%C3%A9ctrica.pdf
- [24] Wang, Y., & Zhang, X. (2020). Optimization of Wire Gauge in Electromagnetic Coils. *Journal of Materials Science*, 55(11), 4789–4800. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-04329-8>