

# Optimización del mapeo de campos físicos con la adición de un sensor giratorio

M. Flores and B. Melissari

*Instituto de Física, Facultad de Ciencias, Universidad de la República.  
Iguá 4225, 11400 Montevideo, Departamento de Montevideo, Uruguay,  
e-mail: maiccolsfv@gmail.com; brumelissari@gmail.com*

Received 19 February 2024; accepted 12 January 2025

En este trabajo se propone una técnica para optimizar el mapeo de campos en la física experimental. La metodología propuesta combina instrumentos de medición convencionales con un sensor de movimiento giratorio, permitiendo la obtención de mapeos continuos con una mayor densidad de datos y una reducción en los tiempos de medición. La misma fue puesta a prueba en prácticas básicas que se realizan en los primeros años de la licenciatura en Física, tales como mapeo de campos magnéticos y caracterización de fuentes de ondas por medio de un mapeo de intensidad.

*Descriptores:* Mapeo de campos; mapeo continuo; sensor de movimiento giratorio; física educativa; física experimental, doble rendija.

This work introduces a technique aimed at optimizing field mapping in experimental physics. The proposed methodology integrates traditional measurement instruments with a rotary motion sensor, facilitating the generation of continuous mappings with increased data density and reduced measurement times. The effectiveness of this approach was evaluated through practical experiments typically conducted in the initial stages of a Physics degree, including magnetic field mapping and the characterization of wave sources through intensity mapping.

*Keywords:* Field mapping; continuous mapping; rotary motion sensor; measurement instruments; Hall tip; educational Physics.

DOI: <https://doi.org/10.31349/RevMexFis.72.030901>

## 1. Introducción

El mapeo de campos constituye una de las prácticas fundamentales en la física experimental, la cual es utilizada en una gran variedad de áreas de investigación y tiene como objetivo principal el determinar el comportamiento de una magnitud física en un dominio de interés. Esta técnica, más allá de su aplicación experimental, tiene un gran valor a nivel académico, siendo uno de los primeros desafíos a los que se enfrentan los estudiantes de la Licenciatura en Física [1,2]. Esta experiencia inicial busca familiarizar a los estudiantes con el concepto de *campo* y proporcionar una comprensión tangible de su comportamiento [3-5]. Algunas de las prácticas iniciales comúnmente incluyen el mapeo del campo eléctrico entre placas metálicas paralelas sometidas a una diferencia de potencial, así como la caracterización de fuentes emisoras de ondas mediante un mapeo de intensidad [1,2].

La práctica convencional al llevar a cabo un mapeo implica dividir la región de interés en pequeñas secciones y, para cada una de ellas, registrar el valor de la magnitud mediante el instrumento correspondiente [1,2]. No obstante, este enfoque presenta desventajas significativas. En primer lugar, al enfrentarse a regiones extensas o al buscar una gran precisión, la necesidad de tomar medidas en numerosos puntos implica un tiempo considerablemente largo. En segundo lugar, al depender de mediciones puntuales, el proceso de mapeo no es continuo, lo que puede resultar en lagunas en la representación del campo. Por lo tanto, la interpolación o ajuste posterior se convierte, entonces, en un recurso necesario para inferir de manera continua el comportamiento del campo, in-

truyendo complejidad y prolongando el tiempo requerido para el proceso.

Teniendo en cuenta estas desventajas, en este trabajo se propone y aborda una posible solución para la optimización del mapeo de campo al combinar los instrumentos de medición con un sensor de movimiento giratorio. El objetivo es desarrollar una técnica que disminuya el tiempo requerido y aumente la densidad de datos registrados, buscando lograr un mapeo que se aproxime a la continuidad ideal. El abordaje consistió en realizar 3 prácticas típicas de la Licenciatura en Física con el nuevo método [1,2].

## 2. Dispositivo experimental y métodos

### 2.1. Propuesta metodológica

Comencemos describiendo el sensor de movimiento giratorio y su funcionamiento. En este trabajo se utilizó el «*Sensor Rotary Motion*» de Vernier, que es un medidor de ángulo bidireccional [6], el cual consta de un sistema de ejes y poleas capaces de registrar ángulo de rotación en función del tiempo a través de la interfaz de recolección de datos *LabPro* de Vernier [7]. La frecuencia de muestreo de este instrumento depende de cómo sea configurada la interfaz *LabPro*, ya que es esta quien recopila los datos, y tiene una frecuencia de muestreo mínima de 100 Hz y una máxima de 100,000 Hz [7]. No obstante, el sensor utilizado tiene una velocidad máxima de 30.0 rev/s y una resolución de 1° [6].

El dispositivo permite una gran adaptabilidad, tal que se puede tomar una tanza (o hilo inextensible) y conectar uno de

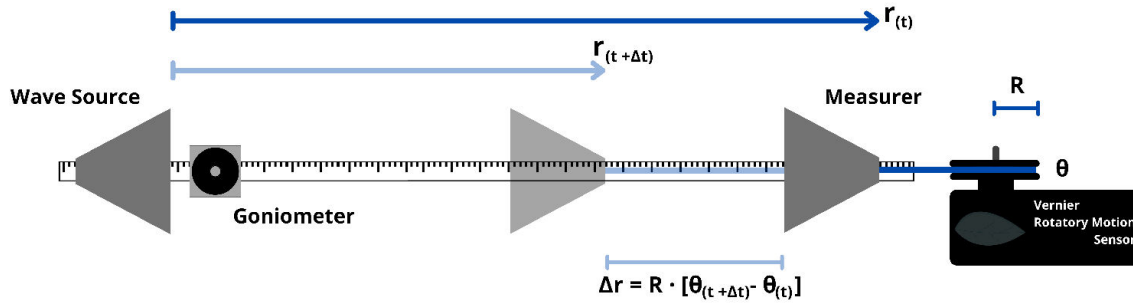


FIGURE 1. Ilustración de la técnica de mapeo lineal de campos con sensor de movimiento giratorio para el caso de una fuente emisora de ondas y un receptor. Se aprecia a estos sobre un goniómetro, siendo el receptor el que está conectado al sensor de rotación mediante una tanza y se mueve acercándose a la fuente.

sus extremos a una de las poleas, mientras que el otro extremo puede vincularse a otro objeto. Al desplazar este segundo objeto en línea recta, asegurándonos de que la tanza esté recta y tensa en todo momento, el sensor registrará el ángulo de rotación de su polea en función del tiempo  $\theta(t)$ . Con esto, podemos determinar la posición del segundo objeto respecto al tiempo  $r(t)$ . Este procedimiento es factible porque el desenrollado del hilo representa el desplazamiento del objeto, y esta distancia, a su vez, corresponde a la longitud de arco asociada al ángulo de rotación de la polea  $s(\theta)$ . Así, utilizando la *relación de arco*, obtenemos:

$$r(t) = s(\theta) = \theta(t) \cdot R, \quad (1)$$

donde  $s(\theta)$  es la longitud de arco y  $R$  el radio de la polea.

Si consideramos el segundo objeto como un instrumento de medición conectado a la interfaz *LabPro* (por ejemplo, un sensor de campo magnético), se abre la posibilidad de realizar un mapeo continuo de la magnitud medida por el instrumento. En este contexto, cada registro de posición  $r(t)$  se asocia directamente con la magnitud medida en tiempo real (como en el ejemplo del campo magnético, donde sería  $|\vec{B}(t)|$ ). Dado que ambos, la posición y la magnitud medida, son registrados por la misma interfaz, el tiempo empleado para ambas mediciones es el mismo, permitiendo obtener la magnitud medida en función de la posición ( $|\vec{B}(r)|$  en el ejemplo).

De esta manera, al desplazar el objeto en línea recta, generamos un perfil continuo de la magnitud a lo largo de la trayectoria del desplazamiento, obteniendo así un mapeo detallado y continuo del campo de interés. La interfaz *LabPro* permite registrar hasta 100,000 muestras por segundo [7], de modo que, al mover el instrumento lentamente, obtenemos una gran densidad de datos en la región del mapeo. En la Fig. 1, se ilustra la técnica con una fuente emisora de ondas y un receptor que mapea la intensidad de la fuente en línea recta, al que nos referiremos como mapeo lineal o radial.

No obstante, a veces no es suficiente con un mapeo en línea recta; se busca también comprender el comportamiento del campo en la dirección angular, lo que lleva a la realización de un mapeo angular. El procedimiento típico para este tipo de mapeo implica la elección de un radio de circunferencia específico para las mediciones  $R_1$ . Colocamos el instrumento de medida sobre un goniómetro a una distancia  $R_1$

y registramos medidas para diversos ángulos de apertura del goniómetro  $\alpha$  [8]. En este caso, buscamos obtener el módulo de la magnitud física en función del ángulo de apertura del goniómetro ( $|\vec{B}|(\alpha)$ , continuando con el ejemplo).

Este método también puede mejorarse mediante la integración del sensor de movimiento giratorio. Podemos mantener el montaje tradicional y añadir, al costado del brazo móvil del goniómetro (a una distancia  $R_1$ ), el sensor de movimiento giratorio conectado al instrumento de medición. Esto se ilustra en la Fig. 2. La idea es que para cada ángulo de apertura  $\alpha$  se crea un triángulo isósceles entre la posición del sensor de rotación, el centro del goniómetro y la posición del instrumento de medición. Este triángulo tiene dos lados de longitud  $R_1$  y uno de longitud  $r(t)$ . Dividimos este triángulo isósceles (mediante la bisectriz de  $\alpha$ ) en dos triángulos rectángulos de hipotenusa  $R_1$  y cateto opuesto al ángulo  $\alpha/2$  de longitud  $r(t)/2$ . De esta manera, se establece la relación:

$$\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{r(t)}{2R_1}, \quad (2)$$

podemos despejar  $\alpha$

$$\alpha = 2 \arcsin\left(\frac{r(t)}{2R_1}\right), \quad (3)$$

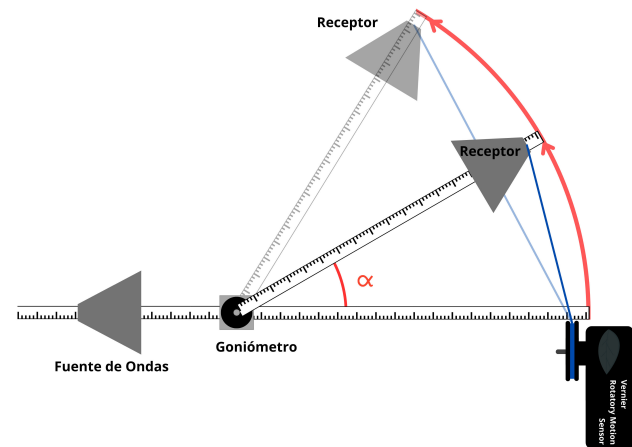


FIGURE 2. Ilustración del montaje para el mapeo angular. Se muestran, sobre un goniómetro, a una fuente emisora y un receptor. El sensor de rotación permanece conectado al receptor mientras se varía el ángulo de apertura del goniómetro.

y sustituir  $r(t)$  por su expresión en función de  $\theta(t)$  de la Ec. (1) dando como resultado la expresión final:

$$\Rightarrow \alpha = 2 \arcsin \left( \frac{\theta(t) \cdot R}{2R_1} \right). \quad (4)$$

Habiendo descrito cómo estas técnicas pueden optimizarse con la adición del sensor de movimiento giratorio, se abordarán tres prácticas de mapeos de campos que son típicas en la Licenciatura en Física:

- **Caracterización de fuente desplazando el instrumento de medida:** Mapeo de intensidad para una fuente de microondas.
- **Caracterización de fuente desplazando fuente:** Mapeo de campo magnético de imán en función de la distancia.
- **Caracterización de sistema:** mapeo de campo magnético para un arreglo de 49 imanes.

## 2.2. Caracterización de fuente de microondas: mapeo de intensidad

Esta práctica resulta imprescindible al llevar a cabo experimentos con fuentes, ya que proporciona un entendimiento detallado de su funcionamiento. De esta manera, se logra un control preciso de las variables involucradas en los experimentos, asegurando su reproducibilidad. En el desarrollo de este trabajo, se empleó el sistema óptico completo de microondas WA-9316A de PASCO [8], compuesto por una fuente emisora (Microwave Transmitter WA-9801) y un receptor (Microwave Receiver WA-9800). Ambos dispositivos se situaron sobre un goniómetro, siguiendo una disposición similar a la ilustrada en la Fig. 2, donde el receptor estaba conectado al sensor de movimiento giratorio.

Se realizaron mediciones de la intensidad de la onda electromagnética emitida por la fuente y recibida por el receptor en función del ángulo de apertura del goniómetro (mapeo angular) para distintos radios de separación entre la fuente y el receptor [8].

Adicionalmente, se llevó a cabo el experimento de la «doble rendija», también conocido como «experimento de Young» [8-10]. Este experimento permite determinar la longitud de onda  $\lambda$  de las emisiones. Para ello, se mantuvo el montaje previamente descrito y se añadieron tres placas metálicas reflectantes frente a la fuente. Estas placas formaban rendijas de 2.0 cm de ancho, con una separación entre ellas de 8.0 cm.

La presencia de las placas, formando pequeñas rendijas, tiene como objetivo provocar un fenómeno de difracción, permitiendo que cada rendija se comporte como una fuente independiente [9,10]. La emisión de una rendija interfiere con

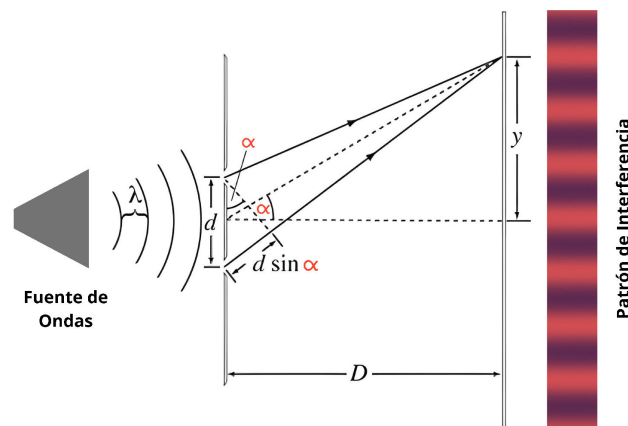


FIGURE 3. Ilustración del experimento de la doble rendija y el patrón de interferencia resultante. Se detalla el esquema geométrico que debe utilizarse para determinar la posición de los máximos de interferencia.

la emisión de la otra, generando un patrón de interferencia que se registró y analizó. En el caso de ondas electromagnéticas en el rango de luz visible, este patrón se manifiesta como una sucesión de máximos y mínimos de intensidad que puede visualizarse a simple vista sobre una pantalla, como se ilustra en la Fig. 3. Aunque las microondas no son visibles directamente en una pantalla, un mapeo de la intensidad puede reflejar este comportamiento, siendo el enfoque analítico de este estudio.

Los datos obtenidos para la intensidad en función del ángulo de apertura del goniómetro  $I(\alpha)$  fueron comparados con el modelo de Young, el cual predice que el comportamiento de la intensidad está regido por la ecuación [10]:

$$I(\alpha) = I_M \cos^2 \left( \frac{\pi d \sin(\alpha)}{\lambda} \right) \text{sinc}^2 \left( \frac{\pi b \sin(\alpha)}{\lambda} \right), \quad (5)$$

siendo  $\lambda$  la longitud de onda,  $b$  el ancho de las rendijas y  $d$  la separación entre ellas.

## 2.3. Campo magnético de imán cilíndrico en función de la distancia

Otra variante de mapeo que podemos emplear consiste en desplazar la propia fuente, lo cual puede ser más práctico en ciertos casos que mover el instrumento de medida. En esta configuración, se ató un imán cilíndrico permanente a la cuerda enrollada al sensor de movimiento giratorio, permitiendo que este último registrara el desplazamiento del imán en función del tiempo. El imán se movía en línea recta hacia un sensor de punta Hall. Con este montaje, logramos medir el campo magnético en función de la distancia para el imán permanente, sin necesidad de desplazar el instrumento de medición. Este proceso se ilustra en la Fig. 4.

Esta caracterización del imán resulta útil en diversos experimentos realizados durante los primeros años de la Licenciatura en Física, abarcando estudios sobre el fenómeno de frenado magnético, experiencias de levitación magnética, circuitos magnéticos y otros temas afines.

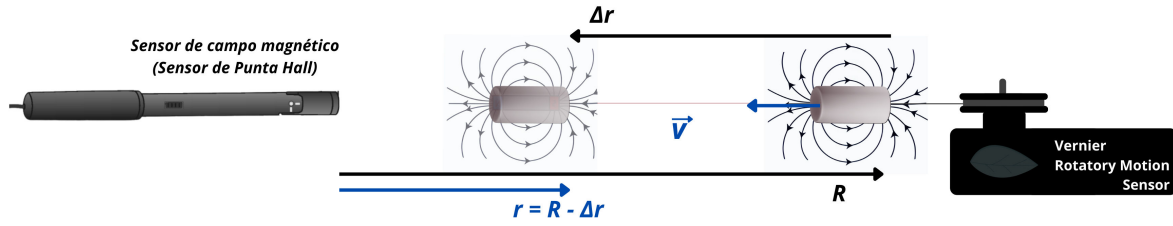


FIGURE 4. Ilustración de la técnica de medición del campo magnético en función de la distancia para un imán cilíndrico permanente con la ayuda de un sensor de movimiento giratorio.

## 2.4. Mapeo de campo magnético en arreglo de imanes

Además de la caracterización de fuentes, también es frecuente querer caracterizar un sistema mediante el mapeo de alguna de sus magnitudes. En este caso, se utilizó la técnica propuesta para mapear un campo magnético para un arreglo de imanes.

El sistema utilizado constaba de una placa rectangular de acrílico  $42.5 \times 42.5$  cm con orificios hechos para colocar imanes cilíndricos. Los orificios de la placa formaban 7 filas de 7 orificios cada una, pudiendo poner en total 49 imanes. Cada fila estaba separada por 5.0 cm de la siguiente y, dentro de cada fila, cada imán estaba separado por 5.0 cm del siguiente. Los imanes se colocaron en una disposición conocida como «tablero de ajedrez», donde un imán se colocaba con su polo norte hacia arriba y el siguiente con el polo norte hacia abajo. Por encima de la placa con los imanes, se colocó una cuba rectangular  $42.5 \times 42.5$  cm y el mapeo se hizo por dentro, es decir, en la base de la cuba. Este montaje es habitual en el estudio de la turbulencia bidimensional [11-13].

El mapeo realizado fue similar a lo que se muestra en la Fig. 1. Se marcaron 15 puntos en una de las paredes de la cuba (cada 3.0 cm) y, desde cada uno de esos puntos, se hicieron mapeos en línea recta (con ayuda de una guía) moviendo un sensor de punta Hall en dirección perpendicular a dicha pared, hasta llegar al otro extremo de la cuba. Esto se ilustra en la Fig. 5.

Debe tenerse en cuenta que en este caso el desplazamiento registrado por el sensor de rotación se corresponde con el desplazamiento de la parte superior del sensor de punta Hall, donde la tanza está conectada. Esto implica que, para que el

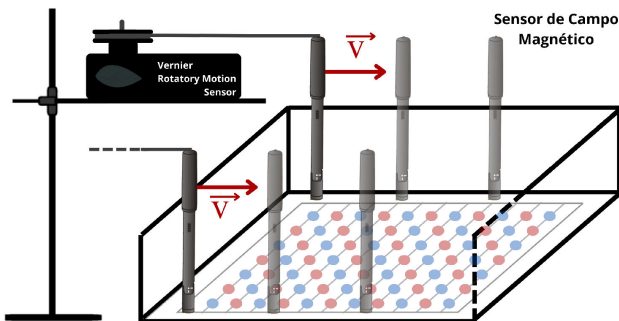


FIGURE 5. Ilustración del mapeo del campo magnético para un arreglo de imanes debajo de un recipiente rectangular. Los imanes están en disposición de «tablero de ajedrez».

mapeo sea legítimo y pueda obtenerse el módulo del campo magnético en función de la distancia, el sensor de punta Hall debe mantenerse vertical respecto al suelo, tal que el movimiento del extremo inferior (donde se encuentra la sonda que mide) sea el mismo que el del extremo superior (donde se enlaza la tanza).

## 2.5. Calibración del sensor de movimiento giratorio

Para asegurar la precisión y fiabilidad de las mediciones realizadas con el sensor de movimiento giratorio, se recomienda un método de calibración sistemática. Este método implica sujetar un hilo de longitud  $l$  a una polea de radio  $R$ , de manera que se cumpla la relación  $l = N \cdot (2\pi R)$ , donde  $N$  es un número natural. Esta condición garantiza que la longitud del hilo sea exactamente  $N$  veces el perímetro de la polea. De esta manera, al desenrollar completamente el hilo, se espera que el sensor de movimiento giratorio registre  $N$  vueltas. Este método sistemático asegura que las mediciones futuras con el sensor sean consistentes y confiables.

Si se requieren mediciones aún más precisas, se puede llevar a cabo el mismo procedimiento utilizando un motor con velocidad de rotación constante, el cual puede ser controlado, por ejemplo, mediante un sistema como Arduino. Esta variante del procedimiento permite repetir la calibración para diferentes velocidades de rotación de manera controlada, ofreciendo así la posibilidad de evaluar y ajustar el sensor de movimiento giratorio en un rango más amplio de condiciones.

## 3. Resultados

### 3.1. Caracterización de fuente de microondas: mapeo de intensidad

Se realizaron barridos angulares para mapear la intensidad de la fuente para 7 diferentes radios entre 25 y 55 cm. Estos resultados se presentan en la Fig. 6.

En la Fig. 6a) se muestra en coordenadas cartesianas (XY) la región del espacio donde se midió la intensidad junto a los valores registrados (vista superior), siendo el punto  $(x, y) = (0, 0)$  la ubicación de la fuente. En la Fig. 6b) se muestra una vista lateral con el objetivo de mostrar el decaimiento de la intensidad con la distancia. Se observó un decaimiento con el cuadrado de la distancia, es decir,  $I \propto (1/r^2)$

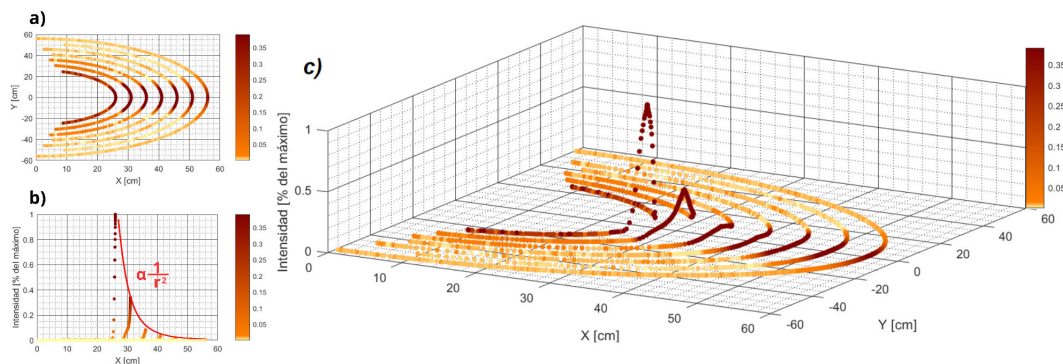


FIGURE 6. Resultados del mapeo de la intensidad de la onda (relativa al máximo medido). En Fig. 6a) se muestra una vista superior, para apreciar la región del espacio donde se midió. En la Fig. 6b) se muestra una vista lateral para mostrar el decaimiento de los máximos según aumenta el radio. En la Fig. 6a) se muestra el comportamiento general de la intensidad relativa para cada punto del espacio mapeado. La posición de la fuente se corresponde con el punto de  $(x, y) = (0, 0)$ .

(este ajuste tiene un coeficiente de correlación de  $R^2 = 0,990$ ). En la Fig. 6c) se presentan los datos desde una perspectiva isométrica que permite visualizar el comportamiento de la intensidad en la región del mapeo.

Una vez realizado el montaje experimental, la experiencia tardó un tiempo menor a 12 minutos. En ese tiempo se pudo registrar la intensidad de 1248 puntos diferentes del dominio. Esto refleja la eficiencia y rapidez de la técnica, así como también la ventaja que representa añadir el sensor de movimiento giratorio a las prácticas convencionales de mapeo.

Posterior al mapeo, se realizó el experimento de la doble rendija, colocando tres placas metálicas reflectantes en frente de la fuente emisora. La experiencia consistió en realizar un barrido angular, registrando la intensidad para cada ángulo de apertura. Los resultados obtenidos se presentan en la Fig. 7.

Los datos muestran un máximo de interferencia principal para el ángulo de apertura  $\theta = (0.0 \pm 0.5)^\circ$ , es decir, cuando el receptor está frente al emisor. Junto con este, se ven otros dos máximos de interferencia en los ángulos  $\theta = (23.0 \pm 0.5)^\circ$  y  $\theta = (42.0 \pm 0.5)^\circ$ . El fenómeno es

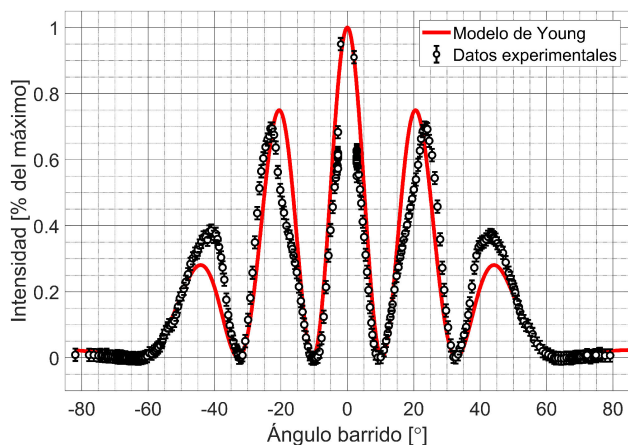


FIGURE 7. Gráfica del barrido angular para el experimento de la doble rendija con fuente de microondas. Se presentan los resultados junto a la curva que predice el modelo de Young para los valores utilizados de ancho de rendija y separación de las mismas. Estas curvas tienen un coeficiente de determinación de  $R^2 = 0,945$ .

simétrico (simetría par), de forma que se observan el mismo comportamiento para ángulos negativos que para los positivos.

Se realizó una comparación con el modelo de Young al sustituir los valores de  $b = 8.0$  cm,  $d = 2.0$  cm y  $\lambda = 2.85$  cm en la Ec. (5), siendo esta última la longitud de onda proporcionada por el fabricante en el manual de la fuente [8]. Los datos se ajustaron a la predicción del modelo, alcanzando un coeficiente de determinación de  $R^2 = 0.945$ .

La experiencia, una vez logrado el montaje, tomó un tiempo menor a 3 minutos, donde se obtuvieron 305 datos de intensidad para distintos ángulos entre  $-85^\circ$  y  $85^\circ$ , correspondientes a la parte frontal de la fuente.

### 3.2. Mapeo de campo magnético en arreglo de imanes

En la base rectangular se disponían 7 filas de 7 imanes cada una, y se llevaron a cabo 15 mapeos lineales, paralelos a las filas mencionadas. Estos 15 mapeos corresponden a las 7 filas de imanes, las 6 filas entre imanes y 2 en los límites de la base. En cada uno de los mapeos, se registraron 300 datos de campo magnético. La práctica en su conjunto demandó un tiempo de 20 minutos, durante el cual se registró el módulo del campo magnético para 4500 puntos en el dominio. Los datos resultantes se presentan en la Fig. 8. A partir de las Figs. 8a) y 8b) puede deducirse la disposición de los imanes similar a un «tablero de ajedrez». Además, en la Fig. 8a) se aprecia que el comportamiento del campo magnético entre un imán y el siguiente, el cual se aproxima a un comportamiento lineal.

El comportamiento próximo a la linealidad entre imanes, en conjunto con la elección de que se mida sobre las filas de imanes y en las filas entre de imanes, permite que sea adecuado graficar el mapeo como una superficie y que este represente correctamente el comportamiento del campo, lo cual facilita la comprensión del comportamiento del campo. Este gráfico se presenta en la Fig. 8c).

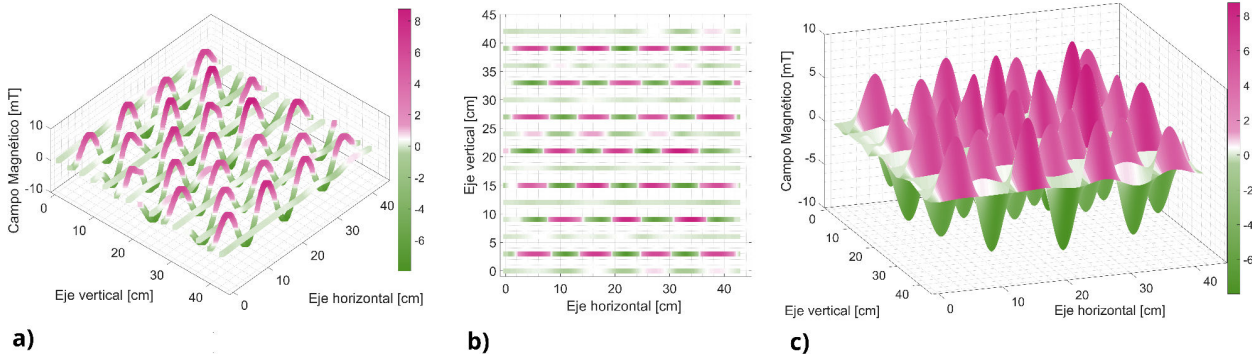


FIGURE 8. Gráfica del mapeo de campo magnético para un arreglo de 49 imanes. (a) Se muestra el campo magnético obtenido para 15 líneas de mapeo a lo largo del dominio desde una vista superior. (b) Se muestran los datos desde una vista isométrica.

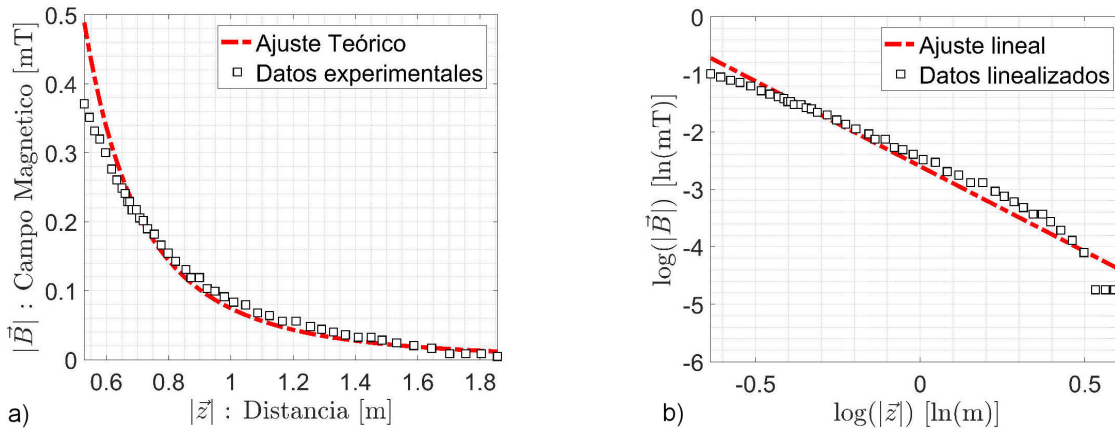


FIGURE 9. a) Gráfica del mapeo de campo magnético de un imán cilíndrico permanente en función de la distancia a la base junto con su ajuste por mínimos cuadrados. b) Gráfica de la linealización de los datos de campo magnético en función de la distancia a la base del cilindro. El ajuste verifica la relación  $|\vec{B}| \propto z^{-3}$  y tiene un coeficiente de determinación  $R^2 = 0,978$ .

### 3.3. Campo magnético de imán cilíndrico en función de la distancia

Se realizaron mediciones del módulo del campo magnético  $|\vec{B}|$  en función de la distancia a la base de un imán cilíndrico permanente  $z$ . El imán cilíndrico tenía una altura de 1.0 cm y un radio de 0.5 cm. La práctica, una vez logrado el montaje experimental, tomó un tiempo menor a 1 minuto. En ese tiempo se registraron 46 mediciones del campo magnético del imán distribuidos en una longitud de 1,8m de distancia. Estos resultados se presentan en la Fig. 9.

Adicionalmente, la linealización de los datos presentada en la Fig. 9b) tiene una pendiente de  $-3$ , lo cual representa una relación proporcional del tipo:  $|\vec{B}| \propto z^{-3}$ , tal como se aprecia en la Fig. 9a). Este comportamiento es típico de un dipolo magnético, de manera que, dada la relación entre las escalas de medición y las dimensiones del imán, se puede aproximar el comportamiento de su campo magnético como el de un dipolo magnético.

## 4. Conclusiones

En este trabajo se propuso y evaluó una técnica innovadora para mejorar las prácticas de mapeo de campos en el ámbito

de la física experimental, mediante la introducción del sensor de movimiento giratorio. Este componente se destacó como una herramienta versátil que optimiza la adquisición de datos, posibilitando mapeos continuos con alta densidad informativa y reduciendo significativamente el tiempo invertido en las prácticas experimentales.

Se abordaron diversas prácticas comunes de la Licenciatura en Física mediante esta nueva metodología, destacando la caracterización de fuentes de microondas, el experimento de la doble rendija, el mapeo del campo magnético de un imán cilíndrico en función de la distancia y el mapeo en un arreglo de imanes. Los resultados obtenidos en cada una de estas prácticas evidenciaron la eficacia del enfoque propuesto, proporcionando datos detallados y precisos sobre el comportamiento de los campos estudiados.

En última instancia, este trabajo no solo introduce una mejora técnica que se prevé beneficiará futuros experimentos, sino que también subraya la importancia de la innovación en la enseñanza y práctica de la física experimental. Al ofrecer a los estudiantes herramientas más eficientes y accesibles, se contribuye al fortalecimiento de la comprensión de fenómenos físicos complejos y se promueve una experiencia educativa más enriquecedora.

1. Comisión de Carrera Licenciatura Astronomía (UdelaR), Programa de Taller **2** (2020), URL <https://hdl.handle.net/20.500.12008/26978>, Plan 2016, Plan 2007, Plan 2019, Plan 2011.
2. Comisión de Carrera en Física (UdelaR), *Programa de Laboratorio* **3** (2020) <https://hdl.handle.net/20.500.12008/27150>, Plan 2019.
3. S. Törnkvist, K.-A. Pettersson, and G. Tranströmer, Confusion by representation: On student's comprehension of the electric field concept, *Am. J. Phys.* **61** (1993) 335, <https://doi.org/10.1119/1.17265>
4. E. Campos *et al.*, El papel de la utilización de representaciones de los conceptos en las dificultades de su comprensión: el caso del campo eléctrico, *Rev. Bras. Ensino Fís.* **44** (2022), <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2022-0146>
5. C. P. Mejía Villagrán, El marco de la enseñanza para la comprensión aplicado al aprendizaje del concepto de campo eléctrico en estudiantes de ingeniería de sistemas, Ph.D. thesis (2011), <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/7911>
6. I. Vernier, Rotary Motion Sensor User Manual (2018), <https://www.vernier.com/manuals/rmv-btd/>
7. V. S. . Technology, Vernier LabPro User's Manual (2013), <https://www.vernier.com/files/manuals/labpro.pdf>
8. PASCO, Microwave Optics Experiment Guide-WA-9316A, PASCO scientific, 10101 Foothills Blvd. Roseville, CA 95747-7100.
9. T. Young, II. The Bakerian Lecture. On the Theory of Light and Colours, *Philos. Trans. R. Soc. London* (1802) 12, <https://doi.org/10.1098/rstl.1802.0004>
10. F. A. Jenkins and H. E. White, Fundamentals of Optics, *Indian J. Phys.* **25** (1957)
11. C. O. Tabeling P., Burkhart S. and W. H., Experimental Study of Freely Decaying Two-Dimensional Turbulence. *Phys. Rev. Lett.*, **67** (1991) 3772, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.67.3772>.
12. K. V. A. Dolzhanskii F. V. and M. D. Yu., An Advanced Experimental Investigation of Quasi-Two-Dimensional Shear Flows. *J. Fluid Mech.* **241** (1992) 705,, <https://doi.org/10.1017/S0022112092002209>.
13. M. D. Cardoso O. and T. P., Quantitative Experimental Study of the Free Decay of Quasi-Two-Dimensional Turbulence. *Phys. Rev. E* **49** (1994) 454, <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.49.454>.