

UNA EXPERIENCIA DE LABORATORIO PARA UN CURSO INTRODUCTORIO DE ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO

HOYOS E.[1],[2]]; DOMÍNGUEZ D.[1]; GONZÁLEZ J. .[1,3] MARTÍNEZ C. C.[4],

1- Facultad de Ciencias Exactas – 2- Sede Regional Tartagal
3- Facultad de Ingeniería 4- Facultad de Ciencias Naturales
Consejo de Investigación - Universidad Nacional de Salta
ehoyos@unsa.edu.ar; martinec@unsa.edu.ar

En este trabajo se presenta el diseño de una experiencia de laboratorio que tiene como objetivo medir la permeabilidad magnética del aire, utilizando materiales disponibles en la mayoría de los laboratorios de Física. La propuesta para la aplicación de este laboratorio en clases requiere que los alumnos analicen e interpreten distintos conceptos desarrollados en el dictado de la materia. De esta manera se consigue una integración de temas que consideramos importantes.

Palabras claves: laboratorio, inducción magnética, permeabilidad magnética.

In this work the design of a laboratory experience is presented for measuring the air magnetic permeability, using available materials in the majority of the laboratories of Physics. The proposal for the application of this laboratory requires that students have to analyze and realize different concepts developed previously. Thus an integration of topics is reached that we considered important.

Key Word: laboratory, magnetic induction, magnetic permeability.

I. INTRODUCCIÓN

El esbozo de propuestas didácticas con experiencias realizadas en el laboratorio, en las que el alumno toma conciencia de los modelos, se capacita en el manejo de instrumentos e incluso realiza experimentos que involucren cierta complejidad, puede favorecer el desarrollo de la capacidad de análisis crítico en los estudiantes (Cámara, Giorgi, 2005).

En la enseñanza del electromagnetismo básico la mayoría de los laboratorios que se desarrollan son de carácter cualitativos, sin el énfasis adecuado en la obtención de medidas y su correspondiente cálculo de errores. Además, los temas son desarrollados tradicionalmente de forma abstracta centrandolo la atención en el simple manejo de ecuaciones.

Se decide abordar el tema inducción magnética: Ley de Faraday Lenz debido a las dificultades que presentan los alumnos en la comprensión de dichos conceptos, y porque este tema está incluido en la mayoría de los programas de electromagnetismo básico.

La propuesta para la aplicación de este laboratorio en clases requiere que los alumnos analicen e interpreten distintos conceptos desarrollados en el dictado de la materia, como son campo magnético generado por un solenoide, flujo magnético, circuitos de corriente alterna y fem inducida, además de la teoría de errores y el manejo del instrumental de medición.

De esta manera se consigue una integración de temas que se consideran importantes.

II. DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIENCIA

Para determinar la permeabilidad magnética del aire con su respectivo error, se diseñó la siguiente experiencia. Los materiales utilizados en la misma fueron los siguientes: alambres de cobre, multímetros, reostato (resistencia variable), fuente de tensión alterna y conectores. Con los alambres de cobre se armaron

dos solenoides, uno de los cuales (primario) se conecta en un circuito serie junto a la fuente y al reostato. El segundo solenoide (secundario) se construye bobinando el alambre de cobre sobre el primario y ambos se encuentran aislados eléctricamente. Finalmente el secundario se conecta a un multímetro, permitiendo medir *fem* inducida debido a las variaciones del flujo magnético que se generan en el solenoide primario.

Un esquema del circuito utilizado se muestra en la figura 1.

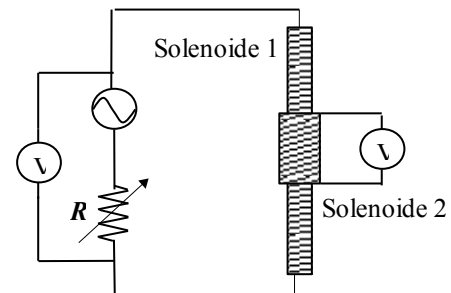


Figura 1: Esquema del circuito utilizado en la experiencia.

Las consideraciones teóricas que permiten determinar la permeabilidad magnética se presentan a continuación.

Mediante un solenoide infinito por el que circula una corriente alterna se genera un campo magnético variable:

$$B = \mu_0 n_1 I_0 \text{sen}(\omega t) \quad (1)$$

donde n_1 es el número de espiras por unidad de longitud.

El segundo solenoide (secundario) se dispone alrededor del primero tal como se muestra en la fotografía de la figura 2. Cabe aclarar que los

solenoides pueden construirse con alambres de cobre de distintos diámetros y que los mismos están aislados electricamente a través de su recubrimiento esmaltado.

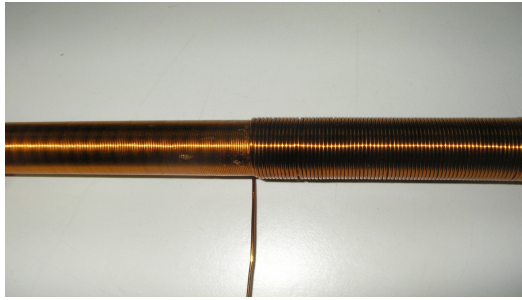


Figura 2: Solenoide primario y secundario.

El flujo magnético en el mismo es

$$\phi = \int N_{esp} \vec{B} dS = \int \frac{\mu_0 N_{esp} N_1 I_0 \text{sen}(\omega t)}{L_1} dS \quad (2)$$

reemplazando el campo magnético se tiene

$$\phi = \frac{\mu_0 N_{esp} N_1 I_0 \text{sen}(\omega t) \pi D^2}{4L_1} \quad (3)$$

donde D es el diámetro de este segundo solenoide.

La fem inducida en este ultimo es:

$$fem = - \frac{d\phi}{dt} \quad (4)$$

reemplazando y bajo las condiciones de la ecuación cuasiestática se obtiene

$$fem = - \frac{d}{dt} \left(\frac{\mu_0 N_{esp} N_1 I_0 \text{sen}(\omega t) \pi D^2}{4L_1} \right) \quad (5)$$

y entonces

$$fem = - \frac{\mu_0 N_{esp} N_1 \pi D^2 \omega}{4L_1} I_0 \cos(\omega t) \quad (6)$$

donde:

- μ_0 : permeabilidad magnética del vacío.
- N_{esp} : número de espiras del segundo solenoide.
- N_1 : número de espiras del primer solenoide.
- I_0 : amplitud de la corriente en el solenoide (valor que se hace variar).
- D : diámetro de la sección transversal del segundo solenoide.
- L_1 : longitud del primer solenoide.
- ω : frecuencia de la señal alterna.

Debido a los instrumentos de medidas utilizados, dos multimetros, se trabaja con valores eficaces de las magnitudes eléctricas.

De la ecuación (6) se puede ver que la $fem_{max} = \mu_0 N_{esp} N_1 \pi D^2 \omega I_0 / 4L_1$, entonces si se divide ambos miembros de la ecuación por $\sqrt{2}$, se obtiene finalmente el valor eficaz de la fem inducida.

$$fem_{ef} = \frac{\mu_0 N_{esp} N_1 \pi D^2 \omega}{4L_1} I_{ef} \quad (7)$$

En el desarrollo de la experiencia se mide, en el primer solenoide, diferencias de potencial en lugar de corrientes.

Para incluir en la ultima expresión las diferencia de potencial medidas, se tiene en cuenta las siguientes consideraciones: la corriente que circula por el primer solenoide se obtuvo considerándolo como un dispositivo ideal que consta de una resistencia R_L en serie con una inductancia L . La diferencia de potencial eficaz V_{Lef} en el primer solenoide es:

$$V_{Lef} = I_{ef} Z_L \quad (8)$$

donde

$$Z_L = \sqrt{R_L^2 + X_L^2} \quad (9)$$

Z_L es la impedancia, R_L es la resistencia del solenoide y X_L la reactancia inductiva.

Se puede calcular el valor de la reactancia inductiva utilizando las medidas de las características geométricas del solenoide.

$$X_L = \omega L \quad (10)$$

en función de los factores geométricos, la inductancia toma la siguiente expresión

$$L = \frac{\mu_0 N^2 \pi D^2 L_1}{4} \quad (11)$$

Para este trabajo se utilizaron valores de $X_L = 0,24 \Omega$ y $R_L = 10 \Omega$, con lo cual se puede realizar la siguiente consideración:

$$X_L^2 \ll R_L^2 \quad (12)$$

y despreciando la reactancia inductiva se tiene

$$Z_L \approx R_L \quad (13)$$

con lo cual, teniendo en cuenta la consideración anterior, de la ecuación (8) se tiene

$$I_{ef} = \frac{V_{Lef}}{R_L} \quad (14)$$

Reemplazando en ecuación (7) se obtiene la expresión para la fem inducida en el segundo solenoide

$$fem_{ef} = \frac{\mu_0 N_{esp} N_1 \pi D^2 \omega}{4L_1 R_L} V_{ef_L} \quad (15)$$

Considerando valores constantes para la permeabilidad del medio, la frecuencia y las características geométricas de los solenoides, se puede analizar la relación entre fem inducida eficaz, en el secundario, y la diferencia de potencial eficaz, en el primario, como una relación lineal.

$$fem_{ef} = a V_{ef_L} \quad (16)$$

El desarrollo de la experiencia consiste en variar la amplitud de la diferencia de potencial aplicada al primer solenoide y medir la variación de la amplitud de fem inducida en el segundo solenoide, es decir se miden pares de valores de V_{ef} y fem_{ef} .

El método de cuadrados mínimos permite determinar la pendiente a de la recta obtenida para estos valores como se muestra en la Figura 4. Finalmente, con el valor de la pendiente a se puede obtener el valor de la permeabilidad magnética del aire.

De las ecuaciones (15) y (16) se encuentra la relación de la pendiente de la recta con las magnitudes mensurables

$$a = \frac{\mu_0 N_{esp} N_1 \pi D^2 \omega}{4L_1 R_L} \quad (17)$$

despejando, el valor de la permeabilidad del aire es

$$\mu_0 = \frac{4aL_1 R_L}{N_{esp} N_1 \pi D^2 \omega} \quad (18)$$

Las dos diferencias de potencial medidas son señales alternas, es decir, se pueden realizar utilizando un osciloscopio. Si bien, el uso del osciloscopio permite visualizar las señales en función del tiempo y además verificar que las mismas se encuentran desfasadas, la fem inducida es una señal deformada y por lo tanto la medida de su valor máximo de amplitud se hace engorrosa. Debido a este problema se decidió utilizar como instrumentos de medidas dos multímetros trabajando con sus correspondientes valores eficaces. Cabe señalar que la variación en la amplitud de la señal de alterna sobre el secundario se consigue a través de la resistencia variable conectada a la fuente.

III. RESULTADO DE LA EXPERIENCIA

El solenoide primario, se construyó con un diámetro aproximado de 1,7 cm y una longitud de 43 cm. La longitud del solenoide primario es mucho mayor que la correspondiente al segundo, con lo cual se tienen las condiciones requeridas en el planteo teórico y se

consigue una distribución uniforme del campo magnético.

En la Figura 3 se muestra una fotografía del circuito utilizado en la experiencia. En ella se observa, la fuente de energía alterna, el reostato, los solenoides, el instrumental de medición y las conexiones.

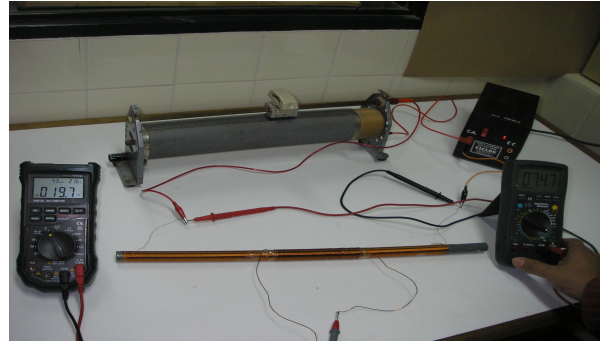


Figura 3: Fotografía del circuito utilizado.

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 4. Se puede apreciar que la relación entre V_{Lef} y la fem_{ef} es una relación lineal tal como se dedujo en el análisis teórico.

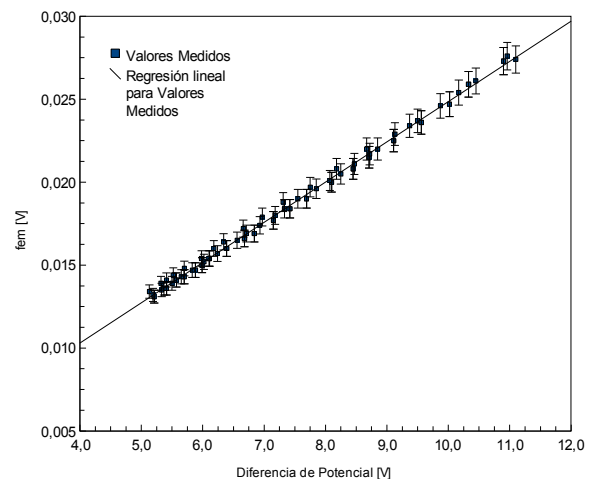


Figura 4: Valores medidos y regresión lineal

Utilizando el método de cuadrados mínimos se obtienen los siguientes resultados. El valor de la pendiente de la recta es $a = 2,4 \times 10^{-3}$, mientras que la ordenada al origen tiene el valor de $b = 0,6 \times 10^{-3} \text{ V}$.

Realizando los cálculos correspondientes, la permeabilidad magnética del aire resulta $\mu_0 = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ s}\Omega/\text{m}$ y realizando la propagación de errores de la expresión de la ecuación (18), se obtiene

$$\mu_0 = (1,1 \pm 0,2) 10^{-6} \text{ s}\Omega/\text{m} \quad (19)$$

Teniendo en cuenta que el valor de la permeabilidad magnética que ofrecen los textos de física básica corresponde al del vacío, se compara el valor obtenido con este. Cabe acotar que en dichos textos siempre se

menciona lo indistinto de trabajar con los valores del vacío y del aire.

El valor de teórico de la permeabilidad en el vacío es:

$$\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ s}\Omega/\text{m}$$

Se puede ver que el valor teórico de la permeabilidad está contenido en el intervalo encontrado con la experiencia realizada.

Sin embargo, el valor obtenido es menor que el valor teórico, esto puede deberse a varios factores entre los cuales se pueden mencionar dos muy importantes. Primero, se trabaja con la hipótesis teórica de bobina infinita. Segundo, durante la experiencia no se tiene en cuenta la influencia de la variación de la temperatura en el análisis realizado.

IV. CONCLUSIONES

Se diseñó y se puso a punto una experiencia de electromagnetismo básico utilizando materiales comunes de laboratorio.

Se lograron obtener resultados cuantitativos realizando medidas y usando el método de cuadrados mínimos y de propagación de errores para el procesamiento de dichos datos.

Se consiguió la medida de la permeabilidad magnética del vacío la cual contiene en su intervalo de incerteza el valor real de esta magnitud.

Durante el desarrollo de la experiencia se logran integrar temas como:

- campo magnético generado por un solenoide.

- flujo magnético.
- circuitos de corriente alterna y cálculo de reactancia inductiva de un solenoide.
- *fem* inducida por la variación de un campo magnético variable con el tiempo.
- teoría de errores.
- Destreza en el manejo de instrumental de medición.

Se espera implementar este laboratorio al final del cursado de alguna materia donde se desarrollen temas de electromagnetismo. En el desarrollo del mismo se buscará que los alumnos realicen la deducción teórica de la ecuación a utilizar, que realicen la discusión de qué tipo de instrumentos y método de medida les resulta más convenientes en esta experiencia.

REFERENCIAS

- 1-Taylor, John R. *Error Analysis*. The study of uncertainties in physical measurements. Second Edition. (1997).
- 2- Purcell, Edward M. *Electricidad y Magnetismo*. Berkeley physics course. Volumen 2. Editorial Reverté. (1973).
- 3- Feynman, Richard P., Leighton, Robert; Sans, Matthew. *The Feynman lectures on physics*. Editorial Addison Wesley. Volumen II. (1964).
- 4- Kip, Arthur F. *Fundamentos de Electricidad y Magnetismo*. Libros McGraw-Hill. (1972).

Este Trabajo esta desarrollado en el marco del Trabajo N° 1625 "El aprendizaje del Concepto de Inducción Magnética: Diseño y Puesta en Practica de Experiencias" del Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta.