

**MEMORIA DE LAS ACTIVIDADES DESARROLLADAS**  
**PROYECTOS DE INNOVACIÓN PARA GRUPOS DOCENTES**  
**CURSO 2015/2016**

**DATOS IDENTIFICATIVOS:**

**1. Título del Proyecto**

Integración didáctica de la experimentación real y por ordenador. Estudio del Efecto Skin

**2. Código del Proyecto**

2015-2-2016

**3. Resumen del Proyecto**

El proyecto consiste en la integración del estudio de un fenómeno físico (el efecto skin) mediante su investigación por medio de un montaje experimental y por medios computacionales.

**4. Coordinador/es del Proyecto**

Nombre y Apellidos	Departamento	Código del Grupo Docente
EDUARDO CASADO REVUELTA	FÍSICA	82

**5. Otros Participantes**

Nombre y Apellidos	Departamento	Código del Grupo Docente	Tipo de Personal (1)
LUIS FRANCISCO MARTÍNEZ BERNAL	FÍSICA		ALUMNO
RAFAEL CARMONA CABEZAS	FÍSICA		ALUMNO
FRANCISCO JAVIER DEL MORAL RUIZ	FÍSICA		ALUMNO

(1) Indicar si se trata de PDI, PAS, becario/a, alumnado, personal contratado, colaborador o personal externo a la UCO

**6. Asignaturas implicadas**

Nombre de la asignatura	Titulación/es
ELECTROMAGNETISMO II	GRADO EN FÍSICA

## **MEMORIA DEL PROYECTO DE INNOVACIÓN DOCENTE**

### **Integración didáctica de la experimentación real y por ordenador. Estudio del Efecto Skin**

**Eduardo Casado Revuelta, Rafael Carmona Cabezas, Luis Francisco Martínez Bernal y Francisco Javier del Moral Ruiz**

**Departamento de Física, Universidad de Córdoba, España**

#### **1. Introducción**

En los últimos años la experimentación numérica, en la cual se investiga un fenómeno físico mediante la implementación en ordenador de las ecuaciones que lo rigen, se ha desarrollado ampliamente gracias a la disponibilidad de ordenadores y software cada vez más potentes. Estos programas se han usado beneficiosamente en la docencia, pero generalmente desvinculados de la experimentación real en la que el alumno realiza un experimento físico en el laboratorio. De esta forma la experimentación por ordenador y la experimentación tradicional de laboratorio se han visto generalmente desvinculadas en la práctica docente. Con esto se afecta el proceso de aprendizaje con resultados contraproducentes, entre ellos: que el alumno se acostumbre a la simulación como sustituto de la realidad, que acostumbrado a las simplificaciones de las simulaciones se sienta frustrado ante la falta de presencia en el laboratorio de todos los factores que conforman la realidad, que pretenda exigir a los resultados del experimento real la exactitud y rapidez de las soluciones numéricas, que ante la confrontación de resultados de ambas vías sea incapaz de discernir y sacar las conclusiones adecuadas.

Por ello, consideramos pedagógicamente muy beneficioso la realización conjunta por parte del alumno del experimento real en el laboratorio junto con la implementación del fenómeno estudiado en el ordenador, integrando así diferentes métodos de aprendizaje y desarrollando múltiples competencias, como la capacidad de gestión de la información, capacidad para la resolución de problemas, el razonamiento crítico, la creatividad, etc. Esta integración es una línea de innovación docente que puede ser desarrollada en cualquier ciencia experimental.

Por otra parte, el electromagnetismo en los medios materiales es parte importante de la asignatura Electromagnetismo II del tercer curso del grado en Física en la Universidad de Córdoba. Sin embargo, hay una escasez notable a nivel mundial de prácticas de laboratorio sobre ese tema (véanse, por ejemplo, los catálogos de las principales firmas productoras de material experimental docente). Por ello hemos seleccionado el efecto skin, tema específico del electromagnetismo en la materia, para el desarrollo del proyecto que proponemos.

#### **2. Objetivos**

Con el presente proyecto se ha pretendido disponer de un montaje experimental, de un programa de cálculo por ordenador y de una guía didáctica para integrar en el estudio de un fenómeno concreto (el efecto skin) la experimentación real y la investigación numérica por ordenador.

#### **3. Descripción de la experiencia**

En esta etapa nos hemos centrado en la creación de los medios materiales necesarios para la integración didáctica que proponemos.

En primer lugar hemos construido un dispositivo experimental para el estudio del efecto skin con fines docentes. El dispositivo experimental que hemos construido (figura 1) consiste en una base de madera cuadrada de 40 cm de lado con unas guías por las que pueden moverse dos bloques de madera de 13 cm de altura y lados de 10.4 cm y 25.5 cm. Uno de estos bloques se mantendrá fijo y el otro se desplazará al realizar la experiencia. Sobre cada uno de los bloques hay dos bobinas conectadas en serie (formando así una única bobina) y enrolladas alrededor de un núcleo de hierro en forma de U con el plano de la U colocado horizontalmente.

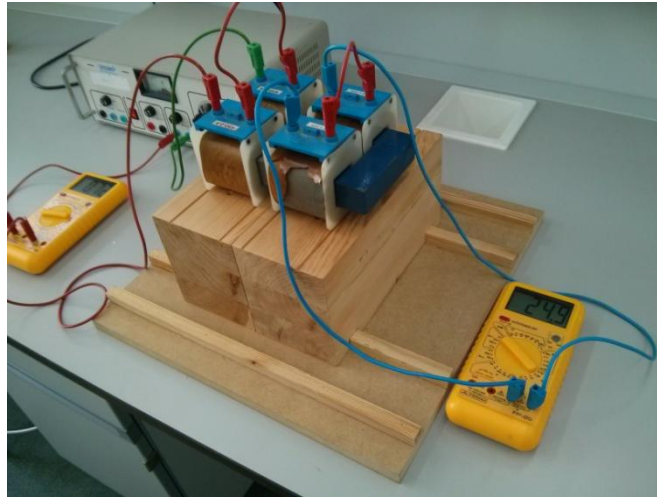


Figura 1: Dispositivo experimental construido

La sección transversal de cada núcleo es cuadrada con un lado de 29 mm, la distancia entre los centros de las secciones transversales es de 72 mm. Los núcleos están colocados de forma que los extremos de cada U quedan enfrentados, formando así un circuito magnético con un entrehierro. La pieza móvil permite separar los núcleos hasta la distancia deseada. Cada una de las bobinas conectadas en serie que forman la bobina fija (llamaremos así a la que está sobre el bloque que se mantiene fijo) tiene 450 vueltas, mientras que cada una de las que forman a la bobina móvil (sobre el bloque móvil) tiene 900 vueltas (ver figura 2). La bobina fija está conectada a un generador de corriente alterna y actuará como circuito primario. En serie con ella se coloca un amperímetro (a la izquierda en la figura 1) para medir la intensidad de corriente y evitar sobrepasar la corriente máxima permitida por las bobinas (3 A). La bobina móvil está conectada a un voltímetro de corriente alterna (a la derecha en la figura 1) y actuará como circuito secundario.

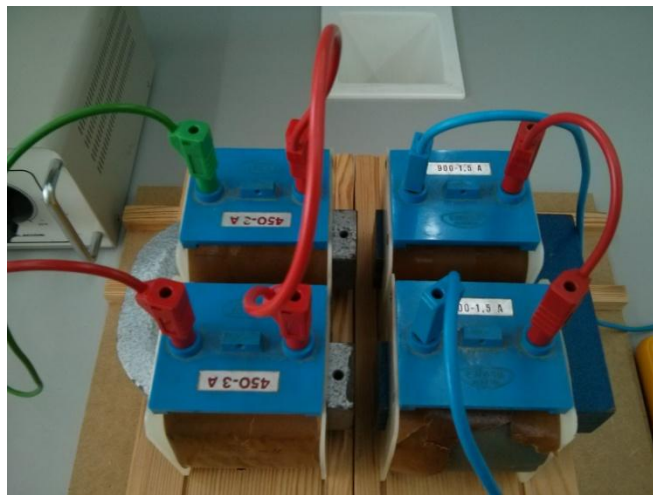


Figura 2: Las dos parejas de bobinas y los dos núcleos de hierro

En el espacio entre los núcleos se colocan las placas del metal a estudiar, en contacto unas con otras (figura 3). Aumentando el número de placas se varía el espesor de la muestra de metal considerada. El voltaje  $V$  medido en el circuito secundario es proporcional a la intensidad del campo magnético que atraviesa las placas. Por ello, el cociente  $V(z)/V(0)$ , entre el voltaje  $V(z)$  medido con un espesor  $z$  de las placas y el  $V(0)$  medido sin placas, varía con  $z$  de la misma forma que el cociente  $A(z)/A(0)$  entre las amplitudes del campo de una onda electromagnética que se propaga en un conductor, siendo  $A(z)$  la amplitud a la distancia  $z$  de la superficie del conductor, y  $A(0)$  la amplitud en la superficie del mismo:

$$\frac{V(z)}{V(0)} = \frac{A(z)}{A(0)} = \exp(-z/\delta). \quad (1)$$

Aquí  $\delta$  es la longitud de penetración de la onda en el medio conductor (skin depth) y es el parámetro físico que se investiga. La disminución de la amplitud de la onda electromagnética en el conductor constituye el efecto skin (también llamado efecto pelicular o efecto piel). Ajustando una recta al gráfico de  $\ln(V(z)/V(0))$  frente a  $z$ , puede determinarse el valor de  $\delta$  a partir de la pendiente de la recta.

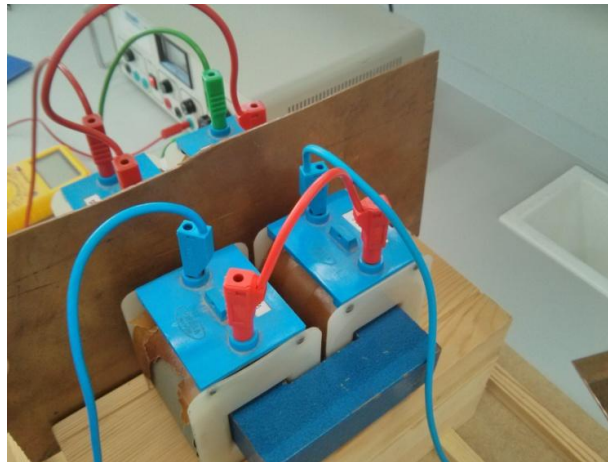


Figura 3: Placa de metal colocada entre los núcleos de las bobinas

En segundo lugar hemos elaborado una guía didáctica que integra el estudio del efecto skin mediante la experimentación con el dispositivo experimental construido y su estudio por ordenador. Esta guía la hemos escrito en forma de protocolo de laboratorio lista para usar por profesores y alumnos en una práctica dedicada al estudio integrado, experimental y numérico, del efecto skin. La guía incluye una breve introducción teórica, las indicaciones y tareas para realizar la investigación numérica, la descripción del dispositivo experimental construido, las indicaciones y tareas para realizar la investigación experimental y las indicaciones para contrastar los resultados experimentales con los numéricos, realizando así la integración didáctica que nos interesa. La guía se presenta como anexo a esta memoria, ya que por su contenido constituye en sí misma la evidencia digitalizada del resultado del presente proyecto de innovación.

En tercer lugar hemos confeccionado un programa de ordenador realizado con *Mathematica* en el que se resuelven las tareas numéricas planteadas en la guía anteriormente descrita. Inicialmente pensamos en proporcionar al alumno el programa ya hecho, pero durante la realización del proyecto decidimos que es pedagógicamente beneficioso que el alumno cree su propio programa. Las tareas numéricas son simples, por lo que no consumirán un tiempo excesivo al alumno. Confeccionando su propio programa de cómputo, en vez de limitarse a introducir datos y obtener resultados numéricos en un programa ya hecho, el alumno aprenderá más sobre las virtudes y limitaciones numéricas, y realizará una mejor integración con la experimentación de laboratorio.

#### 4. Materiales y métodos

El dispositivo experimental ha sido construido por medios propios y con la utilización de material de laboratorio existente en el Laboratorio de Electromagnetismo del Departamento de Física. Los principales materiales utilizados son:

- Soporte y guías en madera (no debe usarse metal ni siquiera para el ensamblaje) de las bobinas y núcleos de hierro. Ha sido diseñado y construido con medios propios.
- Un par de bobinas de 450 vueltas ( $I$  máxima de 3 A) y un par de bobinas de 900 vueltas ( $I$  máxima de 1.5 A).
- Generador de corriente alterna (Sedisa modelo 030110) con salida de 0-30 V, intensidad máxima de 10 A y frecuencia de 50 Hz.
- Generador de corriente alterna con frecuencia variable (Promax, 20 MHz Pulse-Function Generator GF-232).
- Placas metálicas.
- Multímetros digitales.
- Conexiones.

La metodología seguida ha sido: i) realizar en primer lugar una valoración numérica de los valores de los parámetros físicos que intervienen en el proceso. ii) En base a esos valores se ha diseñado el dispositivo experimental y se ha construido. iii) Se ha hecho una validación experimental del dispositivo construido. iv) Se han definido y resuelto las tareas numéricas a resolver por el alumno y las mediciones experimentales que éste debe realizar. v) Finalmente, se ha escrito la guía didáctica.

#### 5. Resultados obtenidos

i. Se ha construido un montaje experimental para el estudio del efecto skin, que está disponible para su utilización.

A modo de ejemplo mostramos en la figura 4 datos experimentales obtenidos con el montaje utilizando placas de aluminio. El gráfico muestra un comportamiento decreciente consistente con la ecuación (1). En la figura 5 se muestran los datos experimentales obtenidos para el decrecimiento de la amplitud del campo en función de la frecuencia angular de la onda electromagnética. La experiencia se realizó con placas de aluminio con un espesor total de 3 mm. El gráfico muestra el comportamiento lineal que se espera teóricamente.

Conviene indicar que las placas utilizadas fueron de aluminio comercial laqueado por ambas caras, con dimensiones laterales de  $12 \times 22$  cm, que teníamos disponibles en el laboratorio. Utilizamos placas de aluminio porque para este metal se han reportado los mejores resultados (MacDougell, J. W.: Am. J. Phys. **44** (1976) 978-80). Sin embargo, hubiera sido preferible utilizar placas de aluminio de alta pureza, sin laquear y de mayores dimensiones (por ejemplo, cuadradas con 25 cm de lado). Las dimensiones son importantes para garantizar que el circuito magnético se cierra íntegramente a través de las placas, sin líneas de campo magnético que pudieran bordear las placas. Estuvimos buscando y tratando de adquirir estas placas óptimas hasta el último momento, reservando para ellas los recursos económicos asignados al proyecto, pero no las encontramos.

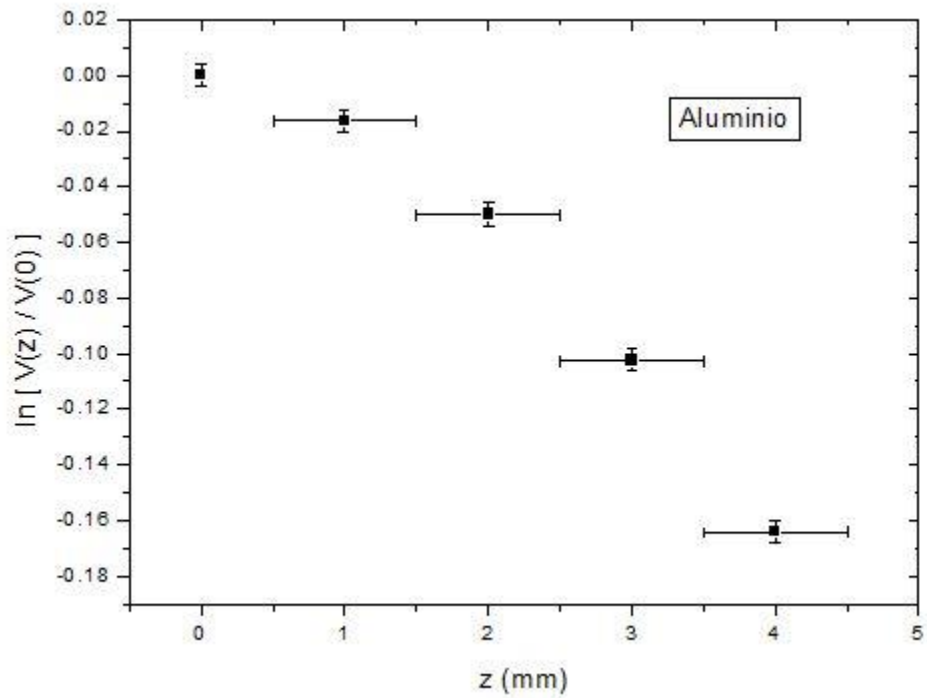


Figura 4: Mediciones de la disminución de voltaje para diferentes espesores de aluminio

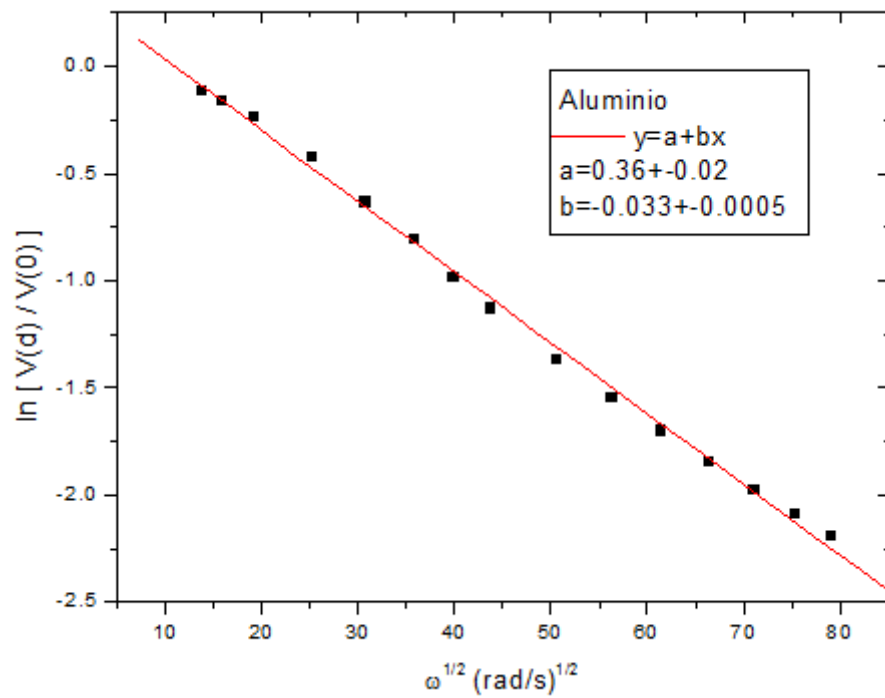


Figura 5: Datos experimentales de disminución del voltaje al aumentar la frecuencia del campo

ii. Se ha elaborado una guía didáctica que integra el estudio experimental y numérico del efecto skin.

La guía se ha escrito en forma de protocolo de laboratorio en el que se plantean las tareas numéricas y experimentales a resolver en el estudio del efecto skin. Esta guía se adjunta como anexo de la presente memoria.

iii. Se ha confeccionado un programas de ordenador en que se resuelven las tareas numéricas planteadas en la guía didáctica.

El programa ha sido realizado en el lenguaje *Mathematica*. A modo de ejemplo mostramos a continuación el código para la evaluación de la longitud de penetración de forma exacta y aproximada, y su aplicación al aluminio para una frecuencia dada.

```
(*** Evaluación de delta y deltaExacta ***)
delta[f_, sigma_] := 1 / Sqrt[mu0 * pi * sigma * f];
deltaExacta[f_, sigma_] :=
  1 / (Sqrt[2] * pi * f / cluz * Sqrt[Sqrt[1 + (sigma / (epsilon0 * 2 * pi * f))^2] - 1]);
error[f_, sigma_] :=
  Abs[(delta[f, sigma] - deltaExacta[f, sigma]) / deltaExacta[f, sigma]];
(* Al *)
Print["Aluminio:"];
Print[" para f1=", f1Al, " Hz:"];
Print["delta=", delta[f1Al, sigmaAl], " m. deltaExacta=", deltaExacta[f1Al, sigmaAl],
  " m. error relativo=", error[f1Al, sigmaAl]];

Aluminio:
  para f1=6.78306×1017 Hz:
delta=9.94787×10-11 m. deltaExacta=1.54567×10-10 m. error relativo=0.356406
```

## 6. Utilidad

El proyecto desarrollado ha servido para tener todos los medios necesarios para la integración didáctica de la experimentación real y por ordenador en el estudio del Efecto Skin. Esto es de utilidad directa para los profesores y estudiantes de Electromagnetismo.

Por otra parte, el proyecto desarrollado puede servir de modelo para la integración didáctica de experimentación real y por ordenador en cualquier asignatura de ciencias exactas.

## 7. Observaciones y comentarios

Debemos indicar que no hemos utilizado ninguna parte de los recursos económicos asignados a la realización del proyecto. Esto se debe a que decidimos, como hemos explicado antes, reservar esos recursos en su totalidad para la obtención de placas de aluminio de alta calidad, sin laquear y relativamente grandes (25×25 cm y 1 mm de espesor). Hasta el último momento estuvimos buscando dichas placas pero no aparecieron, por lo cual no se utilizó el dinero asignado.

## 8. Bibliografía.

1. MacDougell, J. W.: *An experiment on skin effect*, Am. J. Phys. **44** (1976) 978-80
2. Griffiths, D. J.: *Introduction to electrodynamics*, 3<sup>a</sup> ed, Prentice Hall 1999, § 9.4.1

3. Reitz, J.R.; Milford, F. J. y Christy, R. W.: *Fundamentos de la teoría electromagnética*, 4ª ed, Addison-Wesley Iberoamericana,1993; §17.4.

### **9. Mecanismos de difusión**

Difusión mediante la página web del departamento de Física y de la UCO.

### **10. Relación de evidencias que se anexan a la memoria**

Archivo pdf con la guía didáctica escrita en forma de protocolo de laboratorio para usar por profesores y alumnos en una práctica dedicada al estudio integrado (experimental y numérico) del efecto skin. Esta guía incluye abundante material fotográfico.

**Córdoba, 9 de septiembre de 2016**

**Sra. Vicerrectora de Estudios de Postgrado y Formación Continua**