

INCORPORACIÓN DE EXPERIMENTOS EN LAS CLASES TEÓRICAS DE ELECTROMAGNETISMO.

A. Usón, J.S. Artal, J. Mur, J. Letosa y M. Samplón.

Departamento de Ingeniería Eléctrica.

Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial. Universidad de Zaragoza.

Campus Tecnológico del Actur.

María de Luna nº 3. Edificio C, 'Torres Quevedo'.

50018. Zaragoza.

Tlfnº: +34 976 762589. Fax: +34 976 762226.

auson@unizar.es, jsartal@unizar.es, joako@unizar.es, jletosa@unizar.es y msamplon@unizar.es

1. RESUMEN

El presente documento es una reflexión sobre la conveniencia de incorporar experimentos de forma regular durante el desarrollo de las clases magistrales de teoría en un curso básico de Electromagnetismo. Estos experimentos, conocidos como "experimentos de cátedra", ayudan a comprender mejor los contenidos teóricos y su aplicación práctica. Contrariamente a lo ocurrido en otros países, durante los últimos años del siglo XX han sido escasamente utilizados en la universidad española, relegándose, caso de realizarse, a las sesiones de prácticas de laboratorio junto con otras actividades típicas de dicha sala.

Los autores comenzaron a incorporar, de forma regular y sistemática, experimentos en clase en el curso 2000-01, coincidiendo con la renovación del plan de estudio de una de las especialidades en las que impartían docencia. Aunque la mayor parte de los materiales necesarios fueron adquiridos con fondos asignados a la renovación del plan de estudios, otros han sido contruidos por los propios profesores y por alumnos en trabajos voluntarios de la asignatura, actividad que se sigue realizando cada curso.

2. INTRODUCCIÓN

Los contenidos del Electromagnetismo, asignatura incluida actualmente en el primer curso de muchos planes de estudios de enseñanzas técnicas de grado medio en titulaciones de Ingeniería Técnica Industrial, se encuentran entre los de mayor dificultad de aprendizaje. Esa dificultad tiende a provocar en el estudiante una sensación de desánimo y de falta de utilidad práctica que, en muchas ocasiones, hace que abandone el estudio de la asignatura o lo posponga. El fracaso académico asociado a esta asignatura y su "mala prensa" entre los estudiantes es también causa de que sea una de las disciplinas que primero se recorta o incluso desaparece de los planes de estudios cuando hay que reestructurar la carga en créditos del plan. [1]

El carácter vectorial de las magnitudes incluidas en el estudio de los campos eléctricos y magnéticos, la herramienta matemática necesaria para expresar esos fenómenos físicos y resolver problemas (como la ley de Gauss o la ley de Ampère), la necesidad de tener una desarrollada imaginación espacial y la

complejidad asociada a los experimentos electromagnéticos pueden ser algunas de las razones de la dificultad anteriormente citada.

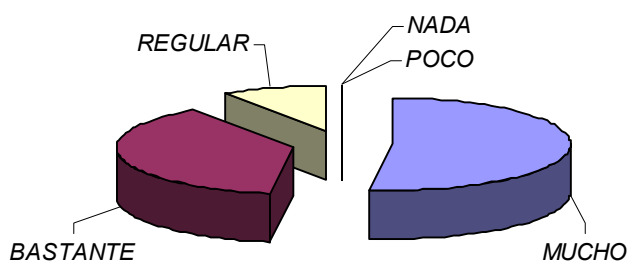
Un recurso docente marginado en la docencia del Electromagnetismo en la universidad española durante la segunda mitad del siglo XX ha sido el uso de los experimentos realizados por el propio docente durante el transcurso de las clases magistrales. Los motivos radican tanto en la falta de recursos económicos y humanos para realizarlas, como en la propia percepción del docente hacia esta metodología que generalmente la considera anticuada. Los nuevos planes de estudio en la enseñanza secundaria, así como el cambio en la forma de aproximarse a la realidad física que las nuevas tecnologías están teniendo en las nuevas generaciones de estudiantes, nos han inducido a considerar la conveniencia de reincorporar estos recursos docentes.

Este trabajo forma parte de las actividades incluidas en el Proyecto de Innovación Docente y Renovación Pedagógica que, financiado por la Universidad de Zaragoza, han desarrollado los autores durante los cursos 2001-2002 y 2002-2003 [2], [3].

3. JUSTIFICACIÓN Y ESTADO ACTUAL DE LOS EXPERIMENTOS DOCENTES

Cuando un profesor enseña Electromagnetismo puede advertir la gran cantidad de conceptos que exige que sus alumnos visualicen: "imaginemos un conductor esférico cargado...", "imaginemos un solenoide de n espiras...". Este esfuerzo de visualización al que se somete a los estudiantes se impone debido a la falta de un ejemplo concreto, real, que puedan observar y que les permita concretar en algo material todo aquello que se les exige imaginar, con el riesgo añadido de visualizaciones incorrectas o impropias. Una vez que se muestra una experiencia real al alumno ya no es necesario posteriormente hablar de imaginar, sino que se trata de recordar, o de visualizar sistemas más complejos a partir de ejemplos reales. Por ello hemos considerado necesario ir, progresivamente, incorporando de nuevo experimentos durante las clases teóricas.

Tabla 1. Respuestas de alumnos en la asignatura Electricidad y Electrometría, curso 2000-01.



Electricidad y Electrometría.
Pregunta 10. *¿Son necesarias las demostraciones experimentales en clase para entender mejor la teoría?.*

MUCHO.	52,27 %.
BASTANTE.	37,88 %.
REGULAR.	9,85 %.
POCO.	0,0 %.
NADA.	0,0 %.

La reacción de los alumnos, reflejada en sus respuestas a las encuestas (tabla 1, curso 2000-2001), ha sido muy positiva. De un total de 132 alumnos encuestados, 119 (90%) consideran como muy útil o útil las experiencias en clase para entender mejor la teoría que se explica. Aunque no independiente

de otras innovaciones docentes llevadas a cabo, esta iniciativa ha servido para mejorar el grado de aceptación hacia la asignatura mostrado por los alumnos. Su respuesta a la pregunta "Utilización de medios y recursos didácticos" (incluida en la encuesta de evaluación docente de la Universidad de Zaragoza), obtiene en el curso 2000-2001 una puntuación de 4,20 sobre 5 siendo superior a la media del centro. En el curso 1995-1996 esa puntuación fue de 3,84.

Otra ventaja de la incorporación de los experimentos es la mayor amenidad de las clases teóricas. Así como el material audiovisual puede ayudar a dinamizar una clase y ser insustituible por su contenido (tormentas eléctricas, grandes generadores electrostáticos), sigue siendo algo intangible, virtual, para el que lo observa. El experimento es algo que ocurre en el aula, en el mismo espacio y en el mismo tiempo del que lo observa. En ocasiones, incluso espolea la curiosidad del estudiante quien repite más tarde la experiencia si cuenta con medios para ello, y propone otras nuevas.

El planteamiento docente basado en estos recursos didácticos se aproxima, en parte, al empleado en universidades anglosajonas, fundamentalmente norteamericanas. El científico y profesor Charles Alfred Taylor, publicó un libro [4] únicamente dedicado a las experiencias de clase, conocidas en inglés como "lecture demonstrations". En Estados Unidos, el Physics Instructional Resource Association (PIRA), a través del comité DCS (proyecto para la clasificación de demostraciones) [5] clasificó las demostraciones para la enseñanza de la Física en nueve grandes grupos, uno de ellos dedicado al Electromagnetismo.

Poco o nada conocemos de la historia de las experiencias de clase en la universidad española, que no sea la vivida como alumnos por los autores de esta comunicación (1980-2000). En ninguna de las clases a la que los autores asistieron se usaron los experimentos. En algunas ocasiones se utilizaron medios audiovisuales, como películas y vídeos, pero siempre fuera de las clases teóricas (sesiones de prácticas o sesiones voluntarias).

4. EMPLEO DOCENTE DE LOS EXPERIMENTOS

Solo una pequeña parte de los experimentos electromagnéticos con finalidad docente pueden realizarse en clase. Limitaciones de espacio, de seguridad y de transporte del material restringen su número. En nuestro caso, los experimentos que hemos realizado durante las clases teóricas se pueden clasificar en dos grandes grupos: aquellos que exigen su proyección en una pantalla, como los que emplean corrientes eléctricas y limaduras de hierro, y los que se muestran directamente, como el generador de Van de Graaff. En todos los casos, el peso y complejidad del equipo necesario para realizar el experimento se minimizó al máximo, al ser el propio docente el que lo debe trasladar y montar en clase.

En la tabla 2 se presentan los experimentos realizados durante el curso académico 2002-2003, junto con una estimación del tiempo dedicado a cada uno de ellos, el peso de los materiales necesarios y su precio.

En los siguientes apartados se describe con detalle algunos de los experimentos incluidos en la tabla.

Tabla 2. Relación de experimentos realizados en el curso académico 2002-2003.

<i>Experimento</i>	<i>Tiempo</i>	<i>Peso</i>	<i>Coste Orientativo</i>	<i>Notas</i>
El péndulo electrostático y las barras dieléctricas	10 min	1 kg	90 €	Sensible a la humedad ambiental y sudor en las manos
El generador de Van de Graaff y la Jaula de Faraday	15 min	6 kg	500 €	Sensible a la humedad y a la suciedad
La bola luminosa	8 min	1 kg	50 €	Se puede adquirir en jugueterías
Condensadores y baterías Fuerza electromotriz	10 min	2 kg	100 €	
Imanes permanentes y el experimento de Oersted	5 min	3 kg (básicamente la fuente de alimentación)	30 € (sin incluir fuente)	La fuente de alimentación puede ser un cargador de baterías cortocircuitable
Campo magnético creado por conductores	15 min	3 kg (básicamente la fuente de alimentación)	80 € (sin incluir fuente)	Algunos de los prototipos proyectables han sido realizados por alumnos
Magnetización	5 min	3 kg (básicamente la fuente de alimentación)	80 € (sin incluir fuente)	Se puede utilizar el material de las experiencias anteriores, sin coste adicional
Ley de Faraday	15 min	3 kg	50 € (sin incluir galvanómetro)	El galvanómetro proyectable se puede construir montando en una carcasa transparente uno convencional
Levitación	10 min	5 kg	30 € (sin incluir transformador)	El levitador puede construirse para conectarse a 127 V/50 Hz. Se necesita un transformador 220/127 V
Corrientes parásitas de Foucault	10 min	2 kg	400 €	Se deja caer un imán permanente por el interior de un tubo conductor de aluminio. Chapas conductoras que son frenadas por imanes permanentes

4.1. EXPERIMENTOS DE ELECTROSTÁTICA

4.1.1. El péndulo electrostático y las barras dieléctricas.

Los fenómenos electrostáticos son, por la propia naturaleza del electromagnetismo, los primeros que se explican en el curso. A pesar de lo obvio de la existencia de las cargas eléctricas una vez se ha asumido que la materia está esencialmente compuesta de protones, neutrones y electrones

constituyendo los átomos, ningún alumno puede ver esas partículas. Si debe creer que la carga eléctrica existe no es porque la vea, sino porque observa sus consecuencias cuando la carga no está equilibrada en trozos de materia que se encuentran próximos. La posibilidad de desequilibrar cargas mediante fricción entre materiales aislantes y el distinto signo de dichas cargas en función del tipo de material dieléctrico utilizado, permiten comprobar experimentalmente la ley de Coulomb. En la clase se utilizan dos barras iguales (PVC), que al ser frotadas con un paño de lana se cargan con el mismo signo, y por tanto se repelen, y dos barras de materiales distintos (PVC - metacrilato), que tras ser frotadas se cargan con signos distintos y se atraen.

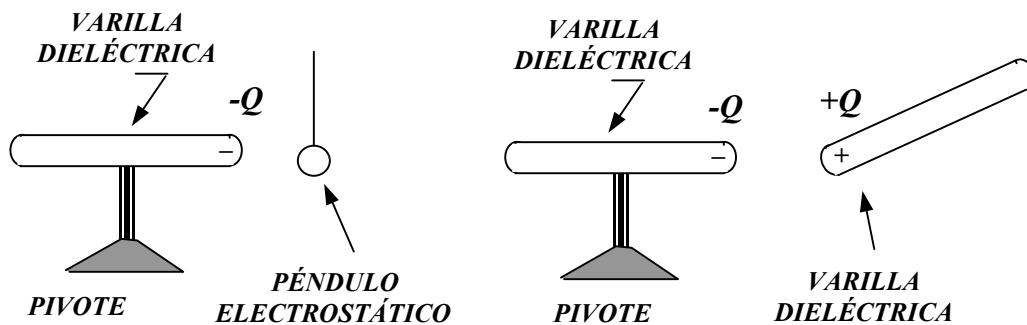


Figura 1. Barras dieléctricas y péndulo electrostático.

Una vez se ha introducido el concepto de carga eléctrica y la ley de Coulomb en el vacío, el siguiente concepto que se explica en las clases teóricas es la polarización de la materia aislante y la aparición de las cargas equivalentes o ligadas. El péndulo electrostático, que consiste en una pequeña bola de médula de sauco suspendida de un hilo de algodón, permite demostrar que las cargas ligadas que se inducen cambian de signo en función del campo eléctrico-carga eléctrica que aparece a su alrededor. Para ello se acercan consecutivamente la barra dieléctrica de PVC con carga positiva y la barra de metacrilato con carga negativa, observando en ambos casos que la bola de sauco, que se encuentra descargada, es atraída por ambas barras. Esta experiencia se asocia entonces a una muy familiar que casi todos los alumnos han realizado alguna vez, y que consiste en observar como son atraídos pequeños trozos de papel por un bolígrafo que se frota con un paño o la manga de una camisa o jersey.

4.1.2. El generador de Van de Graaff y la jaula de Faraday.

Tanto en las explicaciones del comportamiento de la materia conductora como en la demostración práctica de la ley de Gauss en presencia de conductores, se hace muy difícil acostumbrar al alumno a sistematizar el análisis necesario para determinar correctamente la distribución de cargas en las distintas superficies. Se trata de evitar que el alumno se guíe de su intuición. Para ilustrar estos fenómenos muy difíciles de entender, y plantear situaciones experimentales que estimulen la curiosidad del alumno se usa el generador de Van de Graaff [6] junto con el péndulo electrostático y la jaula de Faraday.

Conforme la cúpula del generador se va cargando, la aparición de una intensa fuerza de atracción sobre la bola de sauco hace que ésta se mueva y se aproxime a la cúpula. El carácter radial de dicha fuerza puede detectarse moviendo la bola alrededor de la cúpula. Si se introduce la bola en el interior de

una pequeña jaula metálica situada cerca del generador, los alumnos observan el fenómeno de apantallamiento eléctrico en el interior de un conductor. Este fenómeno se ha explicado anteriormente en clase de forma aparentemente muy sencilla con la escueta aplicación matemática de la ley de Gauss (explicación que muy pocos alumnos entienden la primera vez que se expone, a pesar de su aparente sencillez).



Figura 2. Generador de Van de Graaff y jaula de Faraday.

4.1.3. La bola luminosa.

La explicación de los fenómenos electrostáticos alcanza su parte más espectacular al tratar la rigidez dieléctrica y describir los fenómenos de ruptura dieléctrica. La justificación electrostática de la tormenta eléctrica y el rayo como la descarga repentina del condensador nube-tierra, provoca una intensa atención y curiosidad entre los estudiantes que asisten a las clases teóricas. Otro fenómeno que es muy habitual observar es la bola luminosa. Este dispositivo, que se puede encontrar con facilidad en los comercios y que se ha hecho popular por su uso en películas y series de televisión, se puede modelizar como un condensador esférico en el que se producen fenómenos de ruptura dieléctrica como consecuencia de los altos valores de intensidad de campo eléctrico que aparecen en la esfera conductora interior. Durante una clase dedicada a la resolución de problemas se muestra la bola en funcionamiento antes y después de resolver teóricamente con detalle el modelo electrostático. Una vez descrito el fenómeno se relaciona con otro que resulte muy familiar y de mayor aplicación práctica; en este caso son los tubos fluorescentes que se encuentran en las luminarias de las aulas.

4.2. EXPERIMENTOS DE MAGNETOSTÁTICA

4.2.1. Imanes permanentes y el experimento de Oersted.

Los temas que tratan los fenómenos de magnetismo son posteriores al de conducción eléctrica. Lograr que el alumno advierta que los fenómenos asociados a los imanes permanentes y a la orientación de la brújula pueden ser

explicados y analizados matemáticamente en términos de corrientes eléctricas (o movimiento espacial de cargas) que ya conocen, es fundamental para facilitar el estudio posterior y dar continuidad y coherencia al curso. Para ello se comienzan las explicaciones teóricas con la descripción del experimento de Oersted. Con una fuente de alimentación sencilla se alimenta un alambre conductor que se encuentra sobre una placa de metacrilato. Debajo del cable se sitúa la brújula, que es desviada por el campo magnético creado por la corriente que circula por el alambre. El conjunto puede proyectarse en una pantalla mediante un proyector convencional de transparencias.

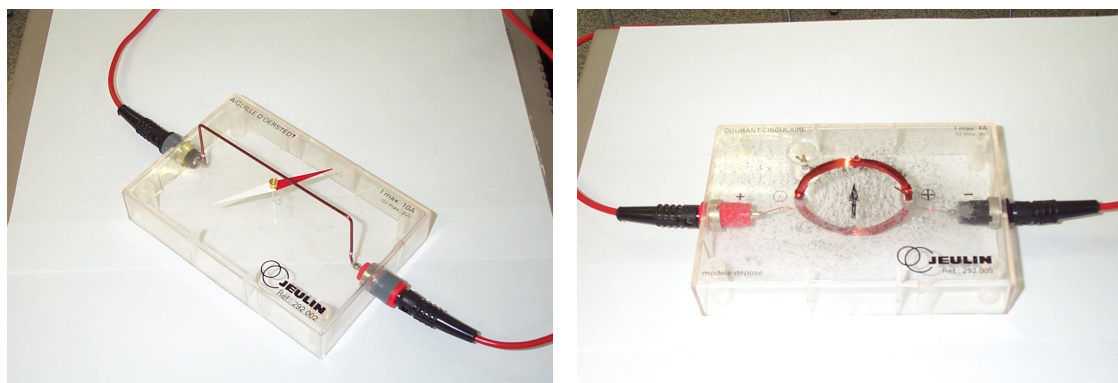


Figura 3. Experimento de Oersted y visualización de campo magnético.

4.2.2. Conductores infinitos, solenoides, espiras circulares (limaduras de hierro y brújulas).

Antes de introducir la ley de Ampère, el alumno debe conocer y saber aplicar la ley de Biot-Savart. Esta ley contiene un producto vectorial y una integral de línea asociada a un elemento de longitud de la corriente eléctrica. Por esa doble dificultad matemática y vectorial, pocos son los alumnos que llegan a aplicarla correctamente. Para facilitar la parte vectorial e insistir en el concepto de líneas de fuerza asociadas a los campos magnéticos, se emplean circuitos reales contruidos sobre bases de metacrilato que pueden ser proyectados en la pantalla. Antes, durante o después de la resolución teórica de los problemas para determinar el vector inducción magnética en puntos del espacio debidos a circuitos finitos de corriente (hilo recto, espiras, solenoides, etc.) se muestran dichos circuitos. Si se espolvorean limaduras de hierro alrededor de los conductores cuando se hace circular una corriente eléctrica, se observa claramente como estas limaduras se ordenan según líneas que coinciden con las deducidas aplicando el producto vectorial de la ley de Biot-Savart. El sentido de las líneas de fuerza se confirma con una pequeña brújula que, situada sobre la placa, va siendo desplazada por el profesor en el entorno del circuito, observándose en la pantalla como cambia su dirección y sentido.

4.2.3. Magnetización de la materia.

La justificación teórica del vector magnetización que permite generalizar la ley de Ampère se encuentra en las corrientes de magnetización o corrientes equivalentes. Estas corrientes ficticias contribuyen a la creación del campo magnético de igual forma que las corrientes reales que se hacen circular mediante una fuente de alimentación. Una forma muy sencilla de demostrar en la práctica el efecto de las corrientes de magnetización es utilizar, de forma

combinada en la misma demostración, el solenoide finito usado al demostrar la ley de Biot-Savart y un imán permanente cilíndrico con magnetización axial que tenga la misma longitud que el solenoide. Primero se muestra el efecto de la corriente eléctrica real circulando por el solenoide sobre las limaduras de hierro y la brújula. Después se desconecta el solenoide de la fuente, se desordenan las limaduras de hierro y se introduce en el interior del solenoide el imán permanente correctamente orientado. Se observa entonces que las limaduras y la brújula se orientan de la misma forma que lo harían con corrientes reales.

4.3. EXPERIMENTOS BASADOS EN LA LEY DE FARADAY

4.3.1. Imanes y bobinas.

El objetivo principal que debe proponerse el profesor cuando explica el fenómeno de la inducción electromagnética en un curso básico para ingenieros es conseguir que el alumno observe y entienda que una bobina o circuito en el que existe un cambio de flujo magnético se comporta de forma análoga a una pila seca o batería en cuanto a la existencia de una fuerza electromotriz. Para ello puede usarse un galvanómetro proyectable, como el que se muestra en la fotografía. Este dispositivo fue construido por profesores del área de Ingeniería Eléctrica, partiendo del galvanómetro de un amperímetro de cuadro móvil en desuso procedente de un antiguo laboratorio.

El experimento comienza mostrando a los alumnos una pila seca de 1,5 V, conectada a través de una resistencia al galvanómetro. Se observa entonces que si se conecta el terminal positivo de la pila al terminal positivo del galvanómetro, la aguja se mueve hacia la derecha, y hacia la izquierda si se invierte la polaridad. Si posteriormente se sustituye la pila por una bobina de sección circular, y se acerca un imán con la polaridad previamente determinada, el efecto sobre el galvanómetro es idéntico al de la pila. Si el imán se acerca, por ejemplo, la aguja se desvía hacia la derecha; si el imán se aleja, la aguja se desvía hacia la izquierda. También se observa que la aguja se desvía un ángulo mayor cuanto mayor es la velocidad con que se acerca o se aleja el imán.

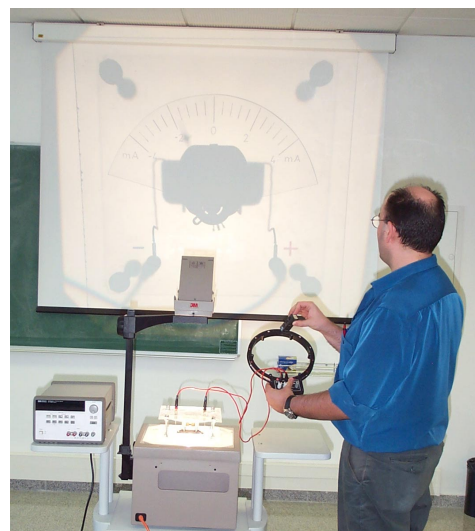
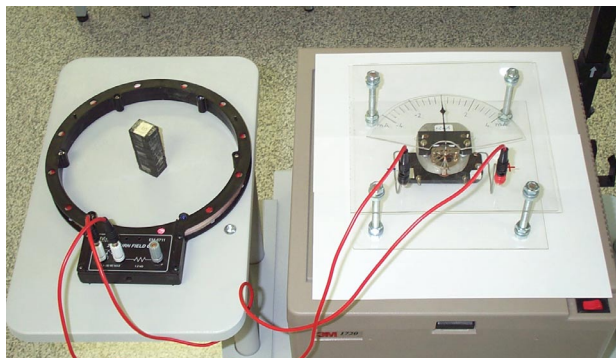


Figura 3. Demostración de la ley de inducción de Faraday.

4.3.2. Fenómenos de Levitación.

La levitación electromagnética es otro ejemplo de fenómeno electromagnético de gran espectacularidad y que despierta un gran interés entre los estudiantes de la asignatura. Como en el caso de la bola mágica, se parte de un prototipo (en este caso realizado dentro del mismo proyecto de innovación educativa [6]) del experimento de Elihu-Thomson [7], y de un ejercicio planteado en la colección de problemas de la asignatura donde se propone el cálculo de la corriente inducida y la fuerza sobre un anillo cortocircuitado en un modelo simplificado del experimento, figura 4. El fenómeno de la levitación se muestra antes, durante y después de la resolución del problema, intentando que el alumno no distraiga su atención cuando el profesor resuelve matemáticamente el problema.

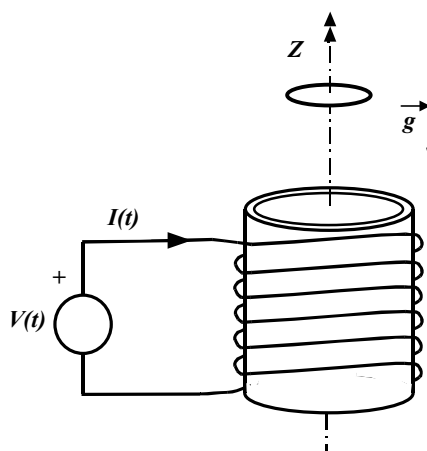
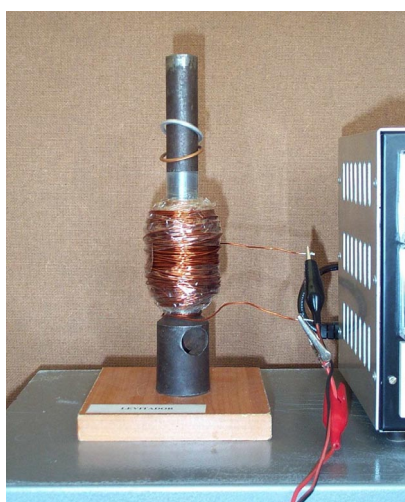


Figura 4. Experimento del salto del anillo (Elihu-Thomson).

5. CONCLUSIONES

A pesar de estar inmersos en la era multimedia, recursos docentes como los experimentos “en vivo” que el profesor realiza delante de los alumnos en mitad de una explicación teórica siguen siendo insustituibles. La principal virtud de estos experimentos es su inmediatez. Se pueden realizar justo al terminar la explicación teórica, ratificando experimentalmente lo que se acaba de exponer. Este efecto no se obtiene con los ensayos de prácticas, ya que dichas sesiones no se realizan inmediatamente después de acabar la clase, perdiendo así el interés del alumno.

Se han descrito diversos experimentos, analizando su utilidad didáctica, el tiempo que exige su preparación, su accesibilidad económica y las posibilidades de su traslado al aula.

AGRADECIMIENTOS

Esta comunicación ha sido desarrollada con la financiación del Programa de Innovación Docente y Renovación Pedagógica de la Universidad de Zaragoza. Convocatoria 2002/2003.

REFERENCIAS

- [1] Kettunen, L.; "*Electromagnetism and academic training of electrical engineers.*" The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol 19 No. 4 2000 pp. 1045-1052. MCB University Press.
- [2] Artal J.S., Letosa J., Usón A., Samplón M. y Arcega F.J. "*Potencial y Campo Eléctrico. Concepto, análisis y simulación en un entorno didáctico.*" X Congreso de Innovación Educativa en Enseñanzas Técnicas (CIEET'02). Valencia, julio 2002. ISBN 84-9705-207-2.
- [3] Mur J., Artal J.S., Letosa J., Usón A. and Samplón M. "*Finite elements software for electromagnetics applied to electrical engineering training.*" International Conference on Engineering Education (ICEE'03). Valencia, julio 2003.
- [4] Taylor, C. A "*Art and Science of Lecture Demonstration.*" Adam Hilger Publ.; December 1988, ISBN: 0852743238
- [5] Physics Instructional Resource Association;
<http://www.wfu.edu/physics/pira/PIRAHome3.html>
- [6] Lambea P.J., Larrén A., Artal J.S., Mur J., Usón A., y Letosa J. "*Una experiencia de innovación docente en la enseñanza del electromagnetismo.*" XI Congreso de Innovación Educativa en Enseñanzas Técnicas (CIEET'03). Vilanova y Geltrú (Tarragona), julio 2003.
- [7] Barry N., Casey R.; "*Elihu Thomson's jumping ring in a levitated closed-loop control experiment.*", IEEE Transactions on Education, V. 42, N° 1, February, 1999.