TRES EXPERIMENTOS DE LEVITACIÓN PARA SU REALIZACIÓN EN CLASES DE ELECTROMAGNETISMO

C. Millán; J. Mur; J.S. Artal; A. Usón; J. Letosa

Departamento de Ingeniería Eléctrica
Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Zaragoza

C/ María de Luna 3, Edificio C "Torres Quevedo", 50018-Zaragoza
Tel: 976 76 25 89; FAX: 976 76 22 26
cmillan@unizar.es, joako@unizar.es, jsartal@unizar.es, auson@unizar.es, jletosa@unizar.es

Resumen

Un importante número de personas que deciden estudiar carreras experimentales, fundamentalmente Ingenierías y Física, lo hacen atraídos por los fenómenos físicos que han observado y han visto aplicados tecnológicamente en máquinas e instrumentos de uso diario. La ausencia de experimentos reales, insertados en el desarrollo de los contenidos teóricos de asignaturas, de primer curso, de Física (o electromagnetismo en el caso que nos ocupa), provoca en parte de los estudiantes una impresión de pérdida de tiempo, inutilidad del esfuerzo exigido y frustración. Hace varios cursos, los autores comenzaron a insertar en sus explicaciones teóricas pequeñas demostraciones o experimentos que podían transportarse fácilmente al aula y eran, de alguna manera, "espectaculares". La reacción de los estudiantes fue muy positiva, constatándose incluso casos de fuerte motivación como consecuencia de la observación de estos fenómenos. En los párrafos siguientes se describen tres de estos experimentos con el objeto de que puedan ser reproducidos y utilizados en clase por los docentes que estén interesados.

1. INTRODUCCIÓN

Este texto está dirigido a profesores de asignaturas de Electricidad y Magnetismo o de Física general. Por ello, nos limitaremos a mostrar como realizar los experimentos, el material necesario y su factibilidad para la realización en el aula. No desarrollaremos aquí el material didáctico (histórico y explicativo) necesario para su utilización en clase, dando simplemente las referencias en que pueden encontrarse estos datos y quedando a disposición de cualquier lector o asistente al congreso que nos requiera mayor información. Explicaremos nuestra experiencia en la utilización de estos experimentos para la docencia en la materia y las principales ventajas que encontramos en su uso.

Los experimentos pueden utilizarse tanto en enseñanzas técnicas como científicas ya que ilustran principios básicos. Están orientados a enseñanzas universitarias pero también pueden utilizarse como demostraciones a estudiantes de secundaria que puedan despertar su motivación por posteriores estudios en la materia.

Las ventajas de utilizar experimentos de aula en la docencia de la Electricidad y Magnetismo y otras asignaturas básicas de la ciencia y la técnica ya ha sido discutida por los autores en otros trabajos [1] y está ampliamente avalada por la experiencia anglosajona [2] aunque poco utilizada aquí en España.

El argumento de la levitación, es decir cancelar la fuerza gravitatoria de los cuerpos, es didácticamente interesante en la enseñanza del electromagnetismo ya que despierta una viva curiosidad. Además permite demostrar conceptos teóricos básicos como las corrientes de Foucault inducidas, las fuerzas de Lorenz, y los fenómenos de inducción. Por otra parte, da pie a introducir aplicaciones prácticas de mucho interés tecnológico en la actualidad como los motores lineales de inducción, el transporte terrestre mediante levitación magnética, los cojinetes magnéticos de baja fricción, el almacenamiento de energía en volantes de inercia levitados o la fundición de metales en levitación.

Aparte de los tres experimentos presentados aquí, durante el curso se explican también cuestiones relacionadas con la levitación de superconductores mediante el efecto Meissner, de levitación de materiales diamagnéticos mediante campos magnéticos muy intensos y de la levitación por atracción o por repulsión de imanes permanentes. Nuestra experiencia es que los experimentos en el aula ayudan a mantener el interés de los estudiantes y a conectar la teoría con cuestiones más aplicadas.

2. EL EXPERIMENTO DE ELIHU THOMSON O DEL SALTO DEL ANILLO

Este experimento fue construido a partir de la lectura del trabajo citado en [3]. Un estudiante se encargó de construir una versión simplificada de la mostrada dicho artículo, como trabajo de asignatura, y siendo posteriormente mejorado por otros estudiantes. Hace varios años que utilizamos el prototipo en clase e incluso proponemos la resolución de un problema basado en este efecto, como se explica después. Los resultados hasta la fecha los consideramos satisfactorios.

2.1. Descripción del experimento

El experimento del salto del anillo fue realizado por primera vez por Elihu Thomson en el American Institute of Electrical Engineers de Nueva York en mayo de 1887, repetido en París en 1889 y explicado detalladamente por Fleming en 1891. Consta de una bobina enrollada en torno a un vástago de hierro, ocupando únicamente la parte inferior de él (véase Figura 2). En la parte superior se colocan aros de distintos materiales y pesos. Si se alimenta con una fuente de tensión continua se observa un salto del anillo, tanto al cerrar como al abrir el circuito. En el caso que nos ocupa se alimenta con una tensión alterna de frecuencia de red y amplitud regulable, mediante un autotransformador, que produce una levitación estable del aro, si éste tiene un peso suficientemente bajo.

2.2. Detalles constructivos

La construcción de un prototipo para este experimento es muy simple. Solo es necesario un vástago, preferentemente de sección circular, y aros de diversos materiales no magnéticos que tengan cierta holgura respecto al vástago. El vástago puede ser macizo o compuesto por un conjunto de alambres para evitar su calentamiento por efecto de las corrientes parásitas. Es fundamental que sea de material ferromagnético de alta permeabilidad (hierro dulce, acero con un alto contenido de hierro,...). Por último, se necesita construir una bobina que se adapte a la parte inferior del vástago. La sección del cable de cobre hay que seleccionarla con cuidado, ya que dependiendo del material del núcleo será preciso que la bobina tenga un alto número de vueltas y que la corriente eléctrica que circule sea intensa.

2.3. Explicación

La explicación de este experimento está en las corrientes que se producen en el aro inducidas por la variación de flujo magnético producido por la bobina, tanto en régimen transitorio como en régimen senoidal permanente. La fuerza ascendente aparece como consecuencia de la acción del campo magnético dispersado en dirección no axial sobre la corriente inducida en la bobina. Para más detalles véase [3].

2.4. Utilidad didáctica

Su utilidad está en la explicación de las corrientes inducidas en un circuito cerrado por variación de flujo, según predice la ley de Faraday y Lenz. Nosotros, desde hace varios años, proponemos para su resolución en clase el problema cuyo enunciado se muestra después. Este problema se resuelve en la pizarra, con la colaboración de los estudiantes, y acto seguido se demuestra el experimento en la misma aula.

El enunciado del problema utilizado para explicar este experimento es el siguiente:

"Sobre un solenoide de eje vertical, recorrido por una corriente eléctrica I(t), variable con el tiempo, se sitúa un anillo conductor de cobre, cortocircuitado, coaxial con el solenoide, de radio R_a = 2 cm, tal como se representa en Figura 1. La resistencia eléctrica total del anillo es R_e = 650 $\mu\Omega$. El campo magnético creado por el solenoide en los puntos del entorno del anillo tiene una componente axial y otra componente radial, ambas dependientes del tiempo. Su expresión en coordenadas cilíndricas es:

$$\left\{\vec{B}\right\}_{r\,\phi\,z} = \alpha \cdot t \cdot \vec{u}_r + \beta \cdot t \cdot \vec{u}_z;\ 0\ s \le t \le 0{,}1\ s;\ \alpha = 284 \cdot 10^{-3}\ \frac{T}{s};\ \beta = 6{,}2\ \frac{T}{s}$$

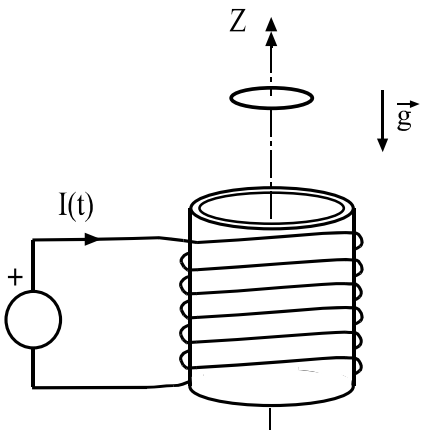

Figura 1.- *Esquema del sistema propuesto en el enunciado del problema.*

a) Calcular, para cualquier instante t, la intensidad de corriente eléctrica inducida, I_a, que circulará por el anillo, indicando claramente su sentido de circulación.

b) Experimentalmente se observa que en esta situación y en el instante t = 80 ms el anillo levita, como consecuencia de la aparición de una fuerza de origen electromagnético sobre el anillo, del mismo módulo y dirección que la debida a la aceleración de la gravedad, pero de sentido contrario. Si la masa del anillo es $m_a = 3{,}5 \cdot 10^{-3}$ kg, calcular la corriente eléctrica inducida que estará circulando por el anillo, comparándola con la obtenida en el apartado anterior."

El material necesario para realizar la demostración en clase se reduce al prototipo más un autotransformador que proporcione corrientes hasta 4 A (Figura 2). Aunque el autotransformador es un elemento pesado, todavía el conjunto resulta transportable. Puede reducirse el peso construyendo una fuente específicamente diseñada para alimentar este experimento.

Figura 2.- *A la izquierda prototipo para experimento del salto del anillo con aro levitando. A la derecha autotransformador necesario para el experimento.*

Una buena referencia sobre este fenómeno está en el curso interactivo de Física en Internet de Angel Franco García de la Escuela Universitaria de Eibar

[4]. Dicha página web posee simulaciones por ordenador que ayudan a la comprensión del tema.

3. LEVITACIÓN DE BOBINAS SOBRE UNA LÁMINA METÁLICA NO MAGNÉTICA

La idea sobre la construcción de este experimento partió de la lectura del trabajo citado en [5]. Este experimento es muy ilustrativo sobre la influencia de las corrientes parásitas de Foucault que aparecen en la lámina no magnética. La bobina original fue construida por un estudiante y después se realizaron perfeccionamientos sucesivos. De este modo la bobina inicial requería 40 A para su funcionamiento, mientras que las actuales funcionan con corrientes entre 4 A y 8 A, lo que permite su realización en clase.

3.1. Descripción del experimento

En este experimento se observa que al colocar una bobina plana, centrada sobre una lámina conductora no magnética, y alimentarla con corriente alterna, ésta levita. Es posible conseguir una separación de más de 1 cm con el prototipo desarrollado. La posición de la bobina con respecto a la lámina no es estable por lo que se requieren topes mecánicos de estabilización.

Para ninguna de las bobinas construidas se ha conseguido un régimen de funcionamiento continuo ya que la densidad de corriente que es necesario introducir en los cables es demasiado elevada. Esto hace que tras un periodo relativamente corto de tiempo (~ 1 minuto) la bobina se caliente considerablemente, siendo necesario desconectar el equipo. No obstante, el tiempo es suficiente para llevar a cabo la demostración.

3.2. Detalles constructivos

La sección de los conductores de la bobina se ha de escoger en función de la corriente máxima que pueda suministrar la fuente. La densidad de corriente es $J \leq 30$ A/mm^2 y el producto amperios-vuelta es $NI \leq 1720$ Av para el prototipo de cobre; $J \leq 12$ A/mm^2 y $NI \leq 1360$ Av para el de aluminio. Las bobinas construidas son aproximadamente de 7 y 11 cm de diámetro interior y exterior, un centímetro de altura (el caso más favorable es realizar una bobina de aluminio bastante plana, con un factor NI elevado, sobre una plancha de cobre de aproximadamente 1 cm).

Los datos de los prototipos utilizados en clase son:

Prototipos	$Ø_{cable}$	I_{max}	Nº vueltas	Peso
Aluminio	0,9 mm	8 A	170	87 g
Cobre	0,4 mm	4 A	430	135 g

Tabla 1. *Parámetros de los prototipos realizados..*

También es necesaria una lámina de material no magnético de espesor aproximado 1 cm, y área mucho mayor que la bobina. Nosotros hemos

construido la lámina de aluminio a partir de chapas de 1mm de espesor apiladas.

Por último hemos utilizado un autotransformador para alimentar la bobina a través de la red. Para las bobinas construidas se inyecta una corriente máxima de 8 A, obteniéndose separaciones entre la bobina y la lámina del orden de 1 cm, como se aprecia en Figura 3.

Figura 3.- Detalle *de una bobina levitando sobre una placa de aluminio.*

3.3. Explicación

La explicación a este fenómeno reside en las corrientes de Foucault que se inducen en la lámina no magnética debido a la variación de flujo magnético que sobre ella produce la bobina. Estas corrientes originan a su vez un campo magnético que crea la fuerza de repulsión sobre la bobina. Si esta fuerza supera su peso la bobina levita. Es necesario que la placa sea de material no magnético, ya que sino domina el efecto de atracción debido a la orientación de los dipolos magnéticos del material.

3.4. Utilidad didáctica

Las corrientes inducidas en medios conductores debido a variación del campo magnético en su entorno son difíciles de entender por los estudiantes. Por ello es importante disponer de recursos experimentales para su explicación. Nosotros, entre otros, usamos este experimento para la ilustración de las corrientes parásitas inducidas.

Este problema puede resolverse matemáticamente mediante el método de las imágenes, de la misma forma que se hace con las cargas electrostáticas en la proximidad de superficies conductoras. Es también un ejercicio típico de resolución por elementos finitos.

En nuestro caso, al impartir un curso básico de electromagnetismo, simplemente lo utilizamos como una demostración del efecto de las corrientes parásitas resaltando su posible aplicación a sistemas de tracción de vehículos terrestres basados en levitación magnética.

En cuanto a los recursos necesarios para su realización en el aula, decir que es necesaria la bobina, la lámina de aluminio y un autotransformador.

4. EFECTO BIEFELD-BROWN O LEVITACIÓN ELÉCTRICA DE UN CONDENSADOR ASIMÉTRICO

Este experimento se ha construido este mismo curso, encontrándose todavía está en fase de experimentación y ensayo de sus posibilidades didácticas. El primero de los autores de esta comunicación encontró información sobre este sistema, denominado “lifter” en la literatura inglesa y realizó un prototipo. Dado que se trata de un experimento menos conocido que los anteriores y su fundamento teórico no está totalmente aclarado daremos una breve explicación sobre su historia y fundamentos que basaremos esencialmente en [6] y [7].

4.1. Descripción del experimento

En la década de 1920 Thomas Townsend Brown, experimentando con un tubo de rayos X, denominado tubo de Coolidge descubrió que sobre el tubo se ejerce una fuerza neta cuando se conecta. Inicialmente creyó haber encontrado una relación entre las fuerzas electromagnéticas y gravitatorias, patentando el descubrimiento en 1928. El descubrimiento se atribuye a Brown y a su profesor P. A. Biefeld, denominándose efecto Biefeld-Brown.

En la actualidad el fenómeno se describe del siguiente modo: Cuando se establece un alto voltaje entre los electrodos de un condensador asimétrico se observa una fuerza neta sobre dicho condensador. Entenderemos por un condensador asimétrico, aquel en que las dimensiones físicas de ambas placas son muy diferentes. Basándose en este fenómeno es posible construir prototipos en los que la fuerza originada supera su peso, como el que se presenta en esta comunicación y otros que pueden encontrarse en internet [7].

Se observa que siempre aparece una fuerza dirigida hacia el electrodo pequeño y que dicha fuerza aparece independientemente del signo de la tensión DC utilizada.

4.2. Detalles constructivos

Debe construirse un prototipo muy ligero para el condensador asimétrico, que pese lo menos posible (unos pocos gramos). Para ello una posibilidad es construir el electrodo grande con papel de aluminio y el electrodo pequeño con un cable muy fino. El soporte físico y el aislamiento entre ambos electrodos puede realizarse con palillos (véase Figura 4). Son posibles geometrías diversas.

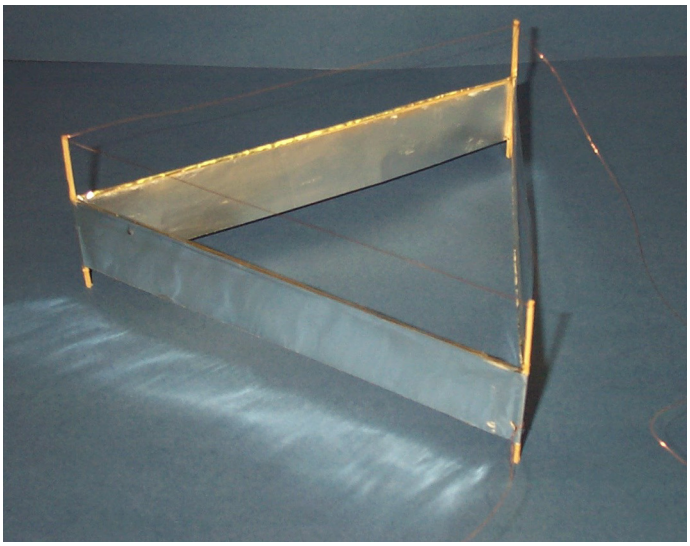

Figura 4.- *Prototipo de condensador asimétrico*

Como generador de alta tensión se utiliza un transformador de muy alta tensión (MAT) de televisión, que junto a una pequeña circuitería electrónica consigue una tensiones en torno a los 30 kV. El esquema de un posible circuito de alimentación del MAT se muestra en Figura 5.

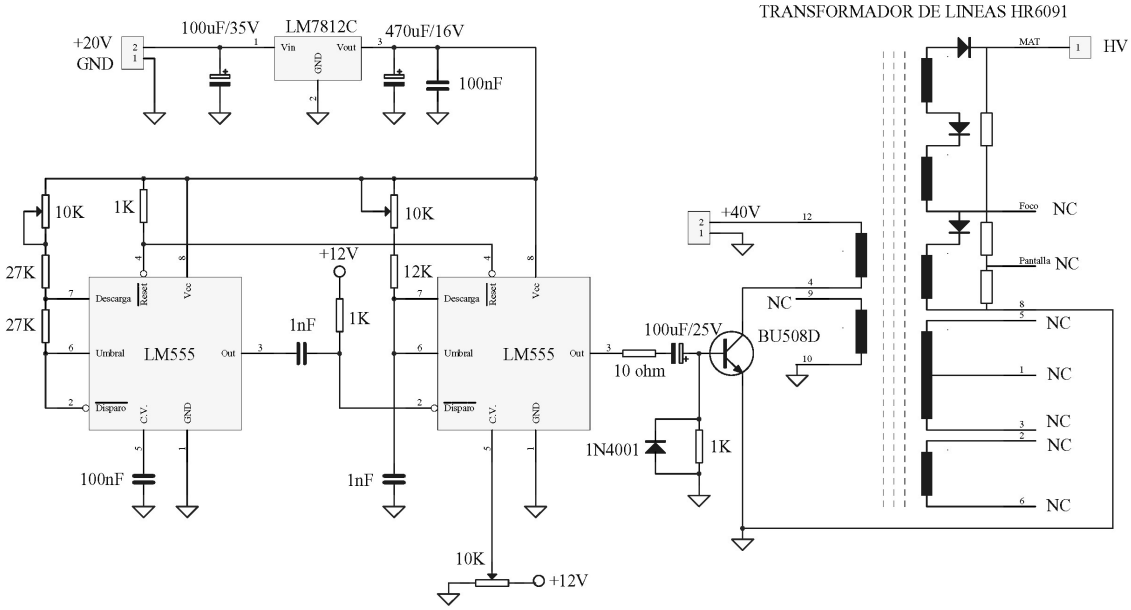

Figura 5.- *Esquema de operación del transformador de MAT*

Las distancias entre los electrodos tienen que ser suficientes para que no se produzca ruptura dieléctrica entre ambos electrodos; así que en caso de utilizar una fuente de 30 kV deben separarse un poco más de 1 cm. Para una información más detallada véanse las referencias citadas o ponerse en contacto con los autores.

4.3. Explicación

Hasta la fecha no existe una explicación totalmente satisfactoria sobre el mecanismo detallado en el que se basa este experimento. Esto hace que su potencial en aplicaciones tecnológicas sea aún desconocido.

La explicación más habitual es la basada en el intercambio de cantidad de movimiento en los electrodos debido al“viento iónico” generado por acción del elevado campo eléctrico en la región de dichos electrodos. Bajo un alto voltaje DC electrones o iones pesados son arrancados de un electrodo y acelerados por el campo eléctrico hasta que se recogen en el otro. La fuerza de reacción es la que se observa sobre el condensador. Los cálculos muestran que la fuerza debido a este fenómeno es, al menos, tres ordenes inferior a la que se observa experimentalmente [véase p. 11 de 6]. Mientras que este fenómeno no puede explicar los experimentos en aire debe tenerse en cuenta para los experimentos en vacío.

Otra explicación tiene que ver con la deriva de portadores de carga del dieléctrico que rodea los electrodos del condensador en presencia del campo eléctrico. Esta es una explicación que no entra en el mecanismo detallado del fenómeno y que, con cálculos realizados, con gruesas aproximaciones, da un orden de magnitud para la fuerza coherente con el experimento. No obstante requiere mayores estudios teóricos y experimentales. Según esta teoría, debido a que el electrodo pequeño tiene un radio de curvatura mucho menor, el campo eléctrico a su alrededor es mucho mayor que el que aparece en las proximidades del otro electrodo. Esto hace que ionice parcialmente las moléculas de aire que lo rodean, generalmente electrones e iones pesados con carga positiva. Dado que los electrones tienen una masa muy inferior, presentan una movilidad muy superior a los iones. Esto provoca la creación de una zona de carga espacial, alrededor del electrodo pequeño, que atrae al otro electrodo desplazando el conjunto. Al desplazarse, una nueva nube de carga sustituye a la anterior entorno al electrodo pequeño. Esta explicación es fácil de razonar cuando el electrodo pequeño es el positivo pero resulta difícil de entender en el caso contrario.
Los autores de la referencia [6] proponen una tercera explicación, basada en las ecuaciones de movimiento de un fluido dieléctrico en un campo eléctrico externo creado por conductores cargados. En este modelo, el fluido dieléctrico es el aire parcialmente ionizado que rodea los electrodos y éstos son los conductores cargados que crean el campo eléctrico. En p. 17 y siguientes de [6] puede verse la deducción realizada. Esto es sólo un cálculo teórico que requiere constatación experimental, como indican sus autores.

4.4. Utilidad didáctica

Este experimento puede utilizarse como parte de un conjunto de demostraciones de levitación, que pueden incluir los dos experimentos anteriores y otros de levitación con imanes permanentes, diamagnética o de efecto Meissner. Concretamente no hemos utilizado aún este experimento con estudiantes, pero los experimentos de levitación son bien acogidos tanto en demostraciones divulgativas del electromagnetismo como parte de las explicaciones teóricas.

Otra forma de utilización es al describir los fenómenos de ruptura dieléctrica, cerca del final de la electrostática. Puede introducirse al hilo de la ionización parcial del aire como una aplicación, junto con los generadores de ozono y otros. El problema es que no se disponga de una explicación teórica suficientemente sencilla.

Para la realización de este experimento solamente es necesario el transformador de MAT con su circuitería de operación, que puede construirse en un pequeño aparato de poco peso, y el prototipo de "lifter". Todo ello es perfectamente transportable, como se mostrará en el transcurso del congreso.

5. CONCLUSIONES

Se han descrito tres experimentos de levitación eléctrica y magnética muy fáciles de construir, baratos y ligeros, que pueden transportarse y realizarse durante una clase convencional de teoría. Frente a otros recursos docentes, como el empleo de visualizaciones, simulaciones numéricas, estas demostraciones tienen la ventaja de ser observadas directamente por los estudiantes, quienes pueden incluso probar posteriormente a realizarlas ellos mismos. Esta inmediatez y proximidad física permite al docente justificar la necesidad de aprender los conceptos teóricos que está enseñando como un paso previo para entender, construir e incluso perfeccionar experimentos como los observados.

Los resultados de la incorporación de estos experimentos han sido muy positivos. Es importante recordar que en los primeros cursos universitarios los estudiantes carecen de base matemática suficiente para trabajar con ecuaciones diferenciales y que, por lo tanto, se les hace muy difícil conectar la matemática con la que se trabaja en las asignaturas con la realidad física que les rodea. Este recurso docente permite la justificación de unos desarrollos teóricos-matemáticos, que difícilmente son aceptados por los estudiantes cuando comienzan sus estudios técnicos. Son también un importante elemento de motivación, que despierta la curiosidad de estudiantes apáticos o desinteresados.

Referencias

[1] Usón A., Artal J.S., Mur J., Letosa J. y Samplón M.; "Incorporación de experimentos en las clases teóricas de electromagnetismo"; XI congreso de innovación educativa en las enseñanzas técnicas, CIETT'03; Vilanova i la Geltrú; julio, 2003.

[2] Pueden encontrarse referencias a experimentos de aula realizados en USA clasificados en la página de Physics Instructional Resource Association, (PIRA) http://www.wfu.edu/physics/pira/index.htm o en http://www.wfu.edu/physics/pira/webring/PIRAwebring.html

[3] Barry N., Casey R.; “Elihu-Thmsom’s jumping ring in a levitated closed-loop control experiment”; IEEE Transactions on Education, V. 42, N. 1, pp. 72-80; February, 1999.
[4] Franco García Angel; “Curso de física por ordenador”, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Eibar, http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/elecmagnet/induccion/anillo/anillo.htm (Última actualización: 7 de Mayo de 2004)
[5] Thompson M. T.; “Electrodynamic magnetic suspension-Models, scaling laws, and experimental results”; IEEE Transactions on Education, V. 43, N. 3, pp. 336-342; August, 2000.
[6] Bahder B., Fazi C.; “Force on an asymetric capacitor”; Army Research laboratory, ARL-TR-3005; june 2003. Este informe puede descargarse en la dirección dada en la referencia siguiente.
[7] Referencias completas sobre este experimento pueden encontrarse en: http://jnaudin.free.fr/lifters/main.htm (last update 13 april 2004).