



**Experiencias de innovación
docente en la enseñanza de
la Física Universitaria
(4^a Edición)**



Albacete, abril de 2015

© De cada capítulo, sus autores. 2015.



El presente trabajo se distribuye bajo licencia Reconocimiento-Compartir Igual (by-sa) - Creative Commons 3.0 España.

<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/es/>

Usted es libre de:



copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra.



hacer obras derivadas.



<http://freedomdefined.org/Definition>

Bajo las condiciones siguientes:



Reconocimiento. Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciador (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o apoyan el uso que hace de su obra).



Compartir bajo la misma licencia. Si altera o transforma esta obra, o genera una obra derivada, sólo puede distribuir la obra generada bajo una licencia idéntica a ésta.

- Al reutilizar o distribuir la obra, tiene que dejar bien claro los términos de la licencia de esta obra.
- Alguna de estas condiciones puede no aplicarse si se obtiene el permiso del titular de los derechos de autor.
- Nada en esta licencia menoscaba o restringe los derechos morales del autor.

ISBN: 978-1-326-25328-8

**Capítulo 12:
Medida del campo magnético de imanes pequeños
con un smartphone: una práctica de laboratorio
muy económica**

Enrique Arribas Garde

Isabel Escobar García

Carmen del Pilar Suárez Rodríguez

Alberto Nájera López

Augusto Beléndez Vázquez

Medida del campo magnético de imanes pequeños con un smartphone: una práctica de laboratorio muy económica

Enrique Arribas Garde[§]

Departamento de Física Aplicada, Escuela Superior de
Ingeniería Informática de Albacete, UCLM, España

Isabel Escobar García

Departamento de Física Aplicada, Escuela Politécnica de
Cuenca, Universidad de Castilla-La Mancha, España

Carmen del Pilar Suárez Rodríguez

Coordinación Académica Región Huasteca Sur, Universidad
Autónoma de San Luis Potosí, Tamazunchale, San Luis Potosí,
México

Alberto Nájera López

Departamento de Ciencias Médicas, Facultad de Medicina,
Universidad de Castilla-La Mancha, Albacete, España

Augusto Beléndez Vázquez

Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la
Señal, Universidad de Alicante, Alicante, España

RESUMEN

Proponemos en este trabajo una práctica barata y muy bien recibida por nuestros estudiantes donde un smartphone (iOS, Android o Windows Phone es irrelevante) se usa junto algunos pequeños imanes, de los que colocamos en la puerta de nuestras neveras, una regla escolar de 20 cm, un papel y una aplicación gratuita (*app*) para medir el campo magnético utilizando el sensor de campos magnéticos de o magnetómetro que lleva incorporado el smartphone. No se necesita nada más. El costo de esta práctica: 0 euros. El propósito principal de la práctica es determinar la dependencia del campo magnético con la distancia. El

[§] enrique.arribas@uclm.es

objetivo secundario es a través de la técnica de mínimos cuadrados obtener el error del exponente de la distancia y del momento magnético de los imanes, con sus correspondientes errores absolutos. Comprobaremos que el acuerdo con la teoría es excelente.

Palabras claves – Física Universitaria, Laboratorio de Física, Nuevas Tecnologías

ABSTRACT

We propose in this work an inexpensive practice and very well received by our students where a smartphone (iOS, Android or Windows Phone is irrelevant) is used together some mini magnets, those that have hung in the door of our fridges, a school rule of 20 cm, a paper and a free application (app) for measuring the magnetic field using the sensor magnetic fields or magnetometer. Nothing else is needed. Cost of this practice: 0 dollars. The main purpose of the practice is to determine the dependence of the magnetic field with distance. The secondary objective is through the technique of least squares to obtain the exponent distance error and the magnetic moment of the magnets, with theirs corresponding absolute error. We will check that the agreement with theory is excellent.

Keywords – university physics, lab physics, new technologies

1 INTRODUCCIÓN

El aprendizaje significativo de la Física en los primeros cursos universitarios de Ciencias e Ingeniería resulta, en muchas ocasiones, relativamente complejo. Además de las clases de teoría y de problemas, es necesario que los estudiantes lleven a cabo prácticas de laboratorio, porque estamos convencidos de que la frase de Benjamin Franklin: “Dime y lo olvido, enséñame y lo recuerdo, involúcrame y lo aprendo” (“*Tell me and I forget, teach me and I may remember, involve me and I learn*”) sigue siendo paradigmática en la enseñanza de la Física a cualquier nivel educativo y especialmente en la universidad. Según Vygotsky^{1,2}, de la actividad práctica se propicia el desarrollo de los procesos mentales superiores tan característicos de los seres humanos, lo que permite la generación y adquisición constructivista del conocimiento que se logra desarrollar favorablemente mediante la participación del sujeto en procesos cooperativos grupales y en el intercambio de ideas impulsando la apropiación del conocimiento.

Como bien sabemos, la Física (junto con otras Ciencias) es diferente a otras asignaturas, porque, la mayoría de las veces, las respuestas a las preguntas que nos podemos hacer no se encuentran en los libros, sino que se logran mediante razonamientos y deducciones, los cuales resultan ser a veces laboriosos. El conocimiento de los físicos proviene de la observación de las evidencias obtenidas en un laboratorio y un posterior análisis detallado. La excepción podría ser la Física Teórica y sus bellas teorías, algunas tan difíciles de comprobar; recordemos la historia del bosón de Higgs: 40 años después de su predicción teórica se confirmó experimentalmente su existencia, aunque de manera indirecta y muy compleja.

El laboratorio es casi “sagrado”, es el lugar donde se hace Física (con mayúsculas). Allí los estudiantes aprenden (o debería aprender) a hacerse preguntas, a seguir protocolos, a responder dudas y a germinar nuevas cuestiones en sus mentes que les permitan explorar el conocimiento de manera más autónoma. La asistencia misma al laboratorio, la toma de datos, su anotación en un cuaderno o en un ordenador portátil, la precisa adquisición y tratamiento de los datos experimentales, su ajuste y posterior interpretación, el cálculo de errores y la realización de una gráfica autosuficiente, son tareas que nuestros estudiantes deben aprender y hacer trabajando, normalmente, en grupos de dos. La realización de experimentos de laboratorio no sólo permite adquirir una experiencia –diferente y complementaria a la adquirida en las clases teóricas y de problemas– sobre los fenómenos, leyes y teorías de la Física, sino también aumentar las competencias sobre la síntesis de las ideas y capacidad de plasmarlo por escrito en una memoria. Esto proporciona a nuestros estudiantes la oportunidad de que se familiaricen con los aparatos de medida y que respiren en una atmósfera de trabajo científico, similar –aunque a otra escala– a la de un laboratorio de investigación. El laboratorio de Física es un complemento imprescindible de las clases teóricas para que los estudiantes se involucren en su propio aprendizaje de una manera altamente significativa. Podemos decir que las clases de laboratorio son aquellas actividades docentes en las que el estudiante es el principal protagonista.

Somos defensores de que los estudiantes deben realizar medidas precisas utilizando distintos aparatos de laboratorio: amperímetro, voltímetro, capacímetro, etc. Sin embargo, y aunque no estamos en contra de las prácticas de laboratorio automatizadas en las que mediante un interface las medidas van directamente a un ordenador, opinamos que estas últimas son quizás más interesantes para cursos avanzados que para los cursos introductorios de Física, pues pretendemos que el estudiante de los primeros cursos universitarios se

involucre más en la toma de datos. Los laboratorios de Física se están llenando cada vez más de prácticas muy sofisticadas y muy caras, lo que conduce a tener pocos puestos de trabajo – en ocasiones sólo uno y que además utiliza el propio profesor para hacer una demostración en clase– y, lo que es más importante, la necesidad de realizar una inversión económica significativa, lo que en muchas escuelas técnicas y facultades universitarias resulta muy dificultoso.

Desde hace varios años los dispositivos portátiles están colonizando casi todos los niveles de la enseñanza, tanto universitaria como no universitaria. Se han publicado ya numerosos trabajos sobre experimentos de laboratorio en los que se utilizan cámaras digitales o webcams³⁻⁷, ratones ópticos^{8,9} y videoconsolas y sus dispositivos inalámbricos para el control de juegos¹⁰⁻¹⁴. También se están empezando a utilizar los propios sensores de los smartphones para realizar medidas precisas¹⁵⁻²⁰. Estos sensores permiten llevar a cabo medidas directas de magnitudes físicas si previamente nos hemos descargado unas aplicaciones, la mayoría de las cuales son gratuitas, que nos permiten mostrarlas en la pantalla del smartphone, almacenarlas e incluso hacer una gráfica con los resultados. Teniendo esto en cuenta, en este trabajo nos vamos a centrar en el empleo del sensor magnético de los smartphones para medir la dependencia del campo magnético producido por un imán en función de la distancia al mismo y comparar los resultados con las predicciones teóricas.

2 MATERIAL Y MOTIVACIÓN

Proponemos en este trabajo una práctica de laboratorio muy barata y que ha tenido muy buena aceptación por parte de nuestros estudiantes. ¿Qué necesitamos? Un smartphone para cada dos estudiantes (iOS, Androide o Windows Phone, es indiferente) un imán pequeño, de esos que tenemos pegados en la puerta de nuestros frigoríficos, una regla escolar de 20 cm, un papel y un lápiz. No necesitamos nada más. Teniendo en cuenta que hoy en día es difícil encontrar algún estudiante sin smartphone, podemos afirmar que el coste de esta práctica de laboratorio es de 0 euros.

La penetración de los teléfonos celulares de última generación (smartphones o teléfonos celulares inteligentes) entre nuestros estudiantes ronda un porcentaje cercano al 100% y además ellos son quizás los mayores expertos en usarlos, seguramente mucho más que los profesores. Creemos que es positivo usar los smartphones como una nueva herramienta en el laboratorio por varios motivos: son tremendamente motivadores, son muy versátiles, están

lentos de sensores que correctamente utilizados permiten realizar medidas directas instantáneas y además los estudiantes sienten una especial atracción por las nuevas tecnologías por lo que podemos aprovechar, de manera indirecta, ese interés para que aprendan Física.

3 TEORÍA BÁSICA

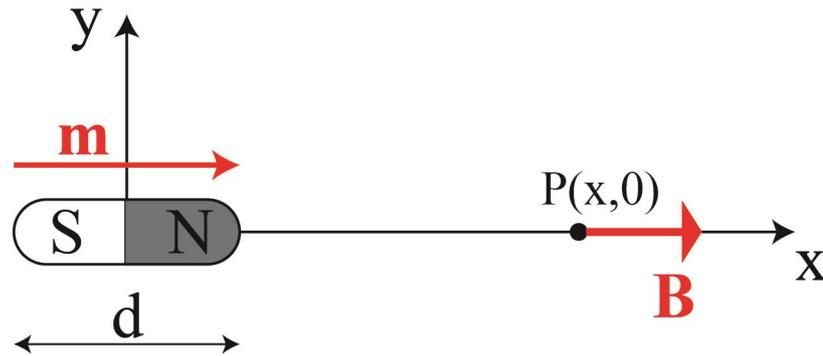


Figura. 1. Pequeño imán de longitud d y momento magnético m colocado sobre el eje X centrado en el origen de coordenadas y su campo magnético en un punto P del eje X.

El campo magnético creado por un imán pequeño de longitud d y momento magnético m en un punto situado a una distancia x a lo largo del eje del imán (el cual coincide con la dirección del momento magnético del imán) viene dado por la ecuación (ver Figura 1) ²¹

$$B = \frac{\mu_0 m x}{2\pi(x^2 - d^2/4)^2} \quad (1)$$

siendo μ_0 la permeabilidad magnética del vacío ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ N/A² o H/m). En el S.I., las unidades del momento magnético de un imán, m , son A·m² o J/T. Si evaluamos dicho campo magnético a una distancia, x , mucho mayor que el tamaño del imán, d , podemos simplificar el resultado anterior teniendo en cuenta que para $x \gg d$ la expresión anterior toma la forma

$$B = \frac{\mu_0 m}{2\pi x^3} \quad (2)$$

De este modo se obtiene que el campo magnético de un dipolo magnético es proporcional a x^{-3} , apareciendo en la constante de proporcionalidad la permeabilidad magnética del vacío, μ_0 , y el momento magnético del imán, m . Con estas herramientas

matemáticas vamos a proceder a medir el campo magnético de un imán pequeño en función de la distancia al centro del imán usando un smartphone ²¹⁻²⁴.

4 METODOLOGÍA

Para poder llevar a cabo esta práctica de laboratorio necesitamos tener instalada en nuestro smartphone una aplicación que mida el campo magnético. Es importante instalar una aplicación que sea capaz de determinar las tres componentes espaciales del campo magnético, no sólo su módulo, con el módulo no es suficiente. En la red existen diferentes apps que permiten realizar estas medidas y nosotros empleamos “*Magnetometer*”. En la Figura 2 se muestra una pantalla de esta app, en smartphones con sistema operativo iOS²⁵ o “*Detector de metales magnetometer*” y “*Physics Toolbox Magnetometer*” en smartphones con sistema operativo Android²⁶.

Estas apps suelen tener una pantalla de ajustes y en ella aparece la frecuencia de refresco de la lectura (*update frequency*) que suele oscilar entre 2-10 Hz. Para valores altos es difícil leer la parte decimal porque varía muy rápido, debido a que la app toma del sensor un dato cada décima de segundo. Si lo ajustamos a 2 Hz, toma un dato cada medio segundo y es fácil anotar, tanto la parte entera como el primer dígito decimal. No hace falta tener más precisión, siempre que tomemos tres medidas (al menos) y calculemos la media aritmética, que es mejor que cualquiera de ellas.

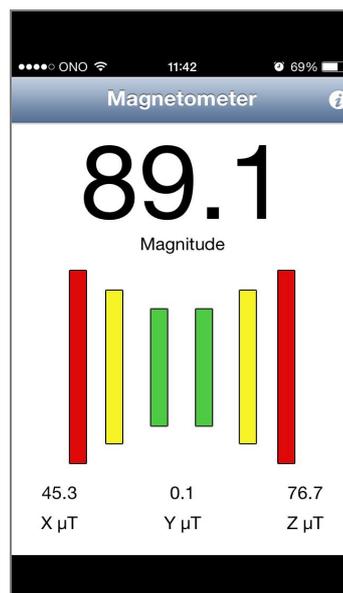


Figura. 2. Pantalla de la App *Magnetometer* que permite determinar las tres componentes y el módulo del campo magnético de un imán pequeño.

Puesto que el objetivo de la práctica es determinar la dependencia del campo magnético con la distancia, consideraremos únicamente una componente del campo magnético, por ejemplo la componente x . Pero, ¿cómo sabemos la disposición de ejes XYZ en nuestro smartphone? Basta un pequeño proceso de descubrimiento que consiste en acercar un imán pequeño (de los que usamos en los frigoríficos) a nuestro teléfono en las diferentes direcciones y observar la componente que varía. De este modo podemos determinar la dirección de los ejes cartesianos XYZ, que están orientados como se muestra en la Figura 3.



Figura 3. Orientación de los ejes espaciales en un smartphone

Otro aspecto relevante a tener en cuenta es la posición del detector en el interior del smartphone. Nuevamente, y de manera experimental, vamos desplazando el imán lentamente sobre la pantalla del teléfono y anotamos la posición en la que el módulo del campo magnético es máximo. En ese punto exactamente, dentro del smartphone, se encontrará situado el sensor magnético. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra, como ejemplo, la posición del detector magnético en un iPhone 5. Esa distancia se debe sumar luego a la variable x .



Figura. 4. Localización del sensor magnético dentro de un iPhone 5.

Como bien sabemos, la Tierra misma es un imán. Su polo Norte geográfico está relativamente cerca del polo Sur magnético, lo cual es la razón de que el polo Norte de la aguja de una brújula señale hacia el Norte geográfico de la Tierra. También sabemos que el campo magnético terrestre es del orden de $50 \mu\text{T}$. El campo magnético producido por los imanes del laboratorio se encuentra en el rango μT – mT , dependiendo de la distancia del detector al imán. De estos datos, podemos concluir que el campo magnético terrestre influirá en nuestras medidas debido a que son de órdenes de magnitud similares o superiores. Para evitar tener un fondo de campo magnético proveniente del campo magnético terrestre, lo único que debemos hacer es orientar en una determinada posición nuestro smartphone a la hora de realizar las medidas. De manera experimental, iremos girando lentamente el smartphone hasta detectar una posición en la que el valor de la componente x del campo magnético sea prácticamente nula. Si no logramos que nos aparezca el valor 0 debemos anotar el valor mínimo (la media de tres observaciones) y los llamaremos $B_{x,0}$, posteriormente lo tendremos que restar o sumar de nuestras medidas en función de que sea positivo o negativo, respectivamente. Si analizamos esta posición nos daremos cuenta de que justamente el teléfono ha quedado orientando en la dirección N-S, y por tanto, el eje x es perpendicular a dicha dirección, como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Una vez que hemos tenido en cuenta todos estos ajustes preliminares, podemos realizar el montaje experimental de la práctica, que es muy sencillo como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Situamos nuestro smartphone en la orientación adecuada sobre una hoja de papel tamaño DIN A4 y dibujamos el correspondiente eje x del teléfono que debe pasar por el sensor. A continuación, iremos colocando un imán a diferentes distancias y anotamos el valor de la componente x del campo magnético con la aplicación descargada (recordando que hay que sumar la distancia a la que se encuentra el magnetómetro del origen de coordenadas).

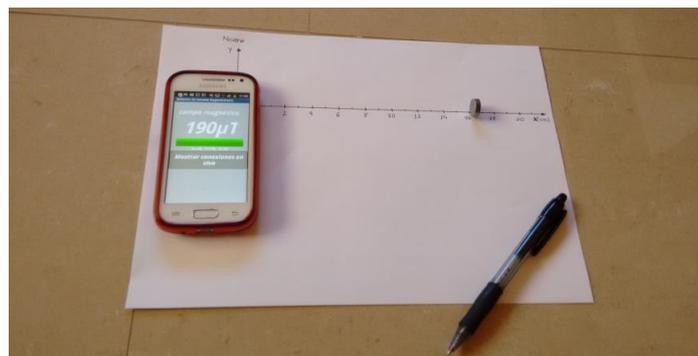


Figura. 5. Montaje experimental en el que se aprecia el imán pequeño y el smartphone con su cabeza orientada hacia el Norte geográfico (Sur magnético).

5 RESULTADOS

A continuación analizaremos los resultados obtenidos con diferentes modelos de smartphones y con imanes de distintas formas y momentos magnéticos, desde los típicos imanes que se ponen de decoración en los frigoríficos hasta un anillo imantado (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).



Figura. 6. Diversos imanes empleados: esferas, anillo y dos imanes típicos de frigorífico.

Para el desarrollo de la experiencia, primero se propone a los estudiantes la siguiente ecuación para el campo magnético del dipolo:

$$B = \frac{\mu_0 m x^n}{2\pi} \quad (3)$$

De modo que deben determinar el valor de n a partir de los datos experimentales. Si el modelo teórico (Eq. 2) es correcto, el valor que se obtenga para n debe ser aproximadamente -3.

La Figura. 7. Medidas experimentales (♦) del campo magnético de un imán de frigorífico usando el sensor del smarthphone y ajuste potencial de las medidas experimentales (---) para dos smartphones distintos; a) Sony Xperia Play con la aplicación Physics Toolbox, función Magnetometer; b) Jiayu G3 con la aplicación Physics Toolbox, función Magnetometer.

muestra la representación gráfica de los datos tomados con el sensor magnético del smartphone para la componente x del campo magnético B en función de la distancia x , para el caso de dos imanes poco potentes, de los típicos que se suelen poner en los frigoríficos. En

esta figura también se ha incluido el ajuste de los datos experimentales realizado con EXCEL, usando para ello de la opción “ajuste potencial”. Puede verse la curva de ajuste, la ecuación que ajusta los datos experimentales (B en función de x) y el coeficiente de correlación, R , al cuadrado.

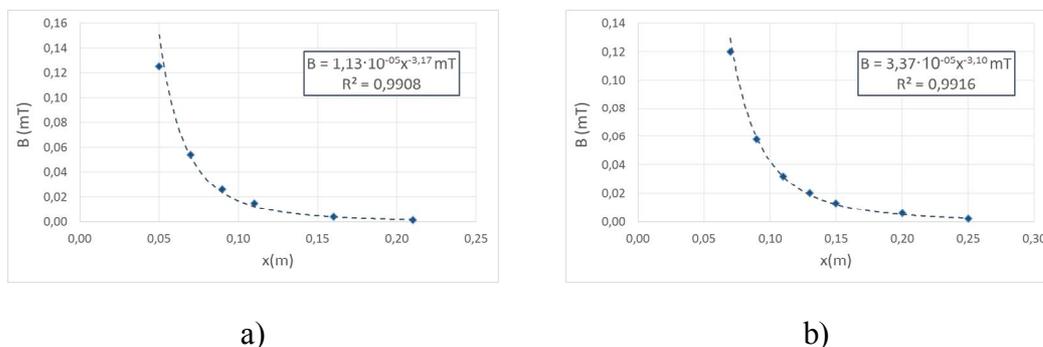


Figura. 7. Medidas experimentales (♦) del campo magnético de un imán de frigorífico usando el sensor del smarthphone y ajuste potencial de las medidas experimentales (---) para dos smartphones distintos; a) Sony Xperia Play con la aplicación Physics Toolbox, función Magnetometer; b) Jiayu G3 con la aplicación Physics Toolbox, función Magnetometer.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran los mismos resultados que en la Figura 7 pero para dos imanes más potentes, uno esférico y otro en forma de anillo. Para el esférico es necesario averiguar previamente dónde se encuentran sus polos Norte y Sur.

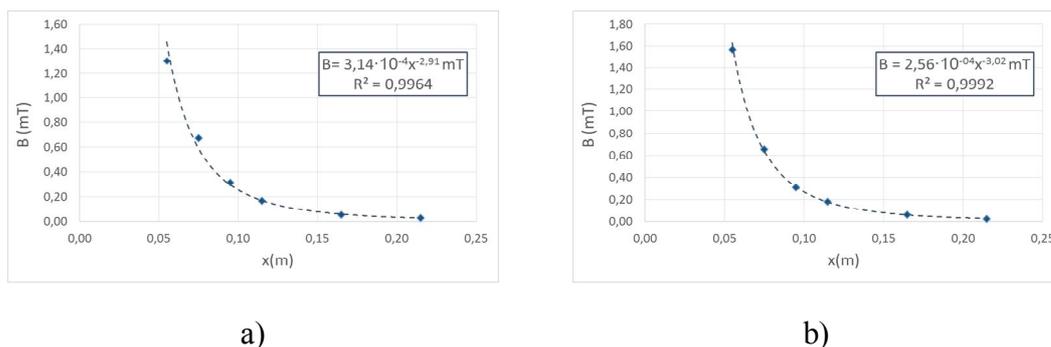


Figura. 8. Medidas experimentales (♦) del campo magnético de imanes algo más potentes usando el sensor del smarthphone y ajuste potencial de las medidas experimentales (---) para los siguientes casos particulares: a) Imán esférico y smartphone Samsung Galaxy Ace 2, aplicación Detector de metales magnetómetro; b) Anillo imantado y smartphone iPhone 5 con la aplicación Magnetometer

A partir de los resultados de las Figs. 7 y 8, es posible observar que las cuatro medidas realizadas con diferentes smartphones, tienen una correlación al cuadrado muy alta, próxima a

la unidad, siendo la más baja 0.9908 (imán de frigorífico) y la más alta 0.9992 (imán en forma de anillo), muy superiores al mínimo que exigimos en el laboratorio, 0.95.

Además observamos que los valores de n que hemos obtenidos varían entre -3.17 (imán de frigorífico) y -2.91 (imán esférico), lo cual nos indica que la dependencia del campo magnético con la distancia es de la forma x^{-3} , en total concordancia con el análisis teórico (Eq. 2).

Llegados a este punto, para muchos estudiantes es un objetivo suficiente el darse cuenta de que el exponente n es muy cercano a -3. Sin embargo, hay cerca de un 25% del total de los estudiantes que pueden, desean y están preparados para realizar cálculos más elaborados y obtener nuevos resultados. A dichos estudiantes se les propone tratar las mismas medidas experimentales que han utilizado para determinar el valor de n de una manera alternativa, mediante el ajuste de una recta por el método de mínimos cuadrados. Para ello debemos linealizar los resultados obtenidos en las Figura. 7. Medidas experimentales (♦) del campo magnético de un imán de frigorífico usando el sensor del smarthphone y ajuste potencial de las medidas experimentales (---) para dos smartphones distintos; a) Sony Xperia Play con la aplicación Physics Toolbox, función Magnetometer; b) Jiayu G3 con la aplicación Physics Toolbox, función Magnetometer.

y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, tomando logaritmos decimales en la Eq. (3) se obtiene

$$\log B = \log \left(\frac{\mu_0 m}{2\pi} \right) + n \log(x), \quad (4)$$

donde n es el exponente de x y cuyo valor teórico sabemos que debe ser -3. De esta manera, ya tenemos una ecuación lineal con la que podemos trabajar mediante el método de mínimos cuadrados. Si representamos $\log(B)$ frente a $\log(x)$, podemos obtener información tanto del exponente de x como del módulo del momento magnético y sus errores absolutos, a través de la pendiente y ordenada en el origen, respectivamente, como se muestra en la Tabla I. Como podemos observar, el momento magnético, m , de cada imán es diferente, pero el exponente de x , es decir n , en todos los casos, salvo en el imán de frigorífico 1, es compatible con lo esperado teóricamente (un valor próximo a -3), siendo la discrepancia de tan sólo 2 centésimas (0.6%).

Tabla I. Resultados experimentales del valor del exponente de x y del módulo del momento magnético del imán, tras el correspondiente ajuste por mínimos cuadrados para los cuatro imanes usados en esta práctica y cuyas gráficas aparecen en Figuras 7 y 8.

	$n \pm \varepsilon(n)$	$m \pm \varepsilon_a(m)$ (A · m ²)
Imán nevera 1	-3.17 ± 0.15	0.056 ± 0.019
Imán nevera 2	-3.10 ± 0.13	0.17 ± 0.05
Imán esférico	-2.91 ± 0.09	1.6 ± 0.3
Anillo imantado	-3.02 ± 0.04	1.29 ± 0.12

Otra observación que podríamos hacer es que los imanes de frigorífico tienen un momento magnético entre un 3% y un 10% del momento magnético de los dos imanes más potentes que hemos considerado, la esfera y el anillo.

6 CONCLUSIONES

Se ha diseñado una práctica de laboratorio sencilla y muy barata para el laboratorio de un curso introductorio de Física para cualquier grado de Ciencias e Ingeniería. Con la ayuda del sensor magnético de los smartphones y una app adecuada, los estudiantes son capaces de determinar, de una manera sencilla y muy económica, la dependencia con la distancia del campo magnético, producido por diferentes imanes. Pueden realizar una gráfica y deducir de los datos experimentales de una forma relativamente sencilla que el campo magnético es inversamente proporcional a la distancia al cubo. Además, mediante un ajuste por mínimos cuadrados se puede deducir el momento magnético de cada imán con una buena precisión.

Usando el sensor de posición de los smartphones, es posible determinar cómo cambia el campo magnético de los imanes pequeños con la distancia. El experimento ha sido realizado por los alumnos del primer año del Grado de Ingeniería Informática en la Universidad de Castilla-La Mancha. Antes de la realización del experimento se estudiaron los conceptos teóricos relacionados con el campo magnético producido por un imán. La realización del experimento permitió a los estudiantes comprender la importancia de la distancia en la medida del campo magnético. Como se ha mostrado, los resultados están totalmente de acuerdo con la predicción teórica. Por último, y con la ayuda de las app adecuadas, pensamos que podrían

utilizarse los smartphones para la realización de prácticas de laboratorio en otros campos de la Física.

7 AGRADECIMIENTOS

Uno de nosotros (AB) agradece al Vicerrectorado de Tecnologías de la Información de la Universidad de Alicante (Spain) la ayuda GITE-09006-UA. (IE) agradece al Ministerio de Economía y Competitividad la ayuda prestada a través del proyecto DPI2012-32994

8 BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Cole, Cognitive development and formal schooling: The evidence from cross-cultural research. L.C. Moll (editor), Vygotski and education: Instructional implications and applications of sociohistorical psychology, Cambridge University Press, Cambridge UK (1990).
- [2] E. Bodrova and D.J. Leong, Herramientas de la mente: El aprendizaje en la infancia desde la perspectiva de Vygotsky, Pearson Educación, México 2004.
- [3] J.A. Monsoriu, M.H. Giménez, J. Riera and A. Vidaurre, Euro. J. Phys. **26**, 1149 (2005).
- [4] S. Shamin, W. Zia and M.S. Anwar, Am. J. Phys. **78**, 433 (2010).
- [5] H.C. Chung, J. Liang, S. Kushiyama and M. Shinozuka, Int. J. Non-Linear Mech. **39**, 691 (2004).
- [6] T. Greczylo and E. Debowska, Eur. J. Phys. **23**, 441 (2002).
- [7] C. Sirisathitkul, P. Glawtanong, T. Eadkong and Y. Sirisathitkul, Rev. Bras. Ensino Fis. **35**, 1504 (2013).
- [8] O.O. Romulo and K.N. Franklin, Am. J. Phys. **65**, 1115 (1997).
- [9] T.W. Ng and K.T. Ang, Am. J. Phys. **73**, 793 (2005).
- [10] S.L. Tomarken et al., Am. J. Phys. **80**, 351 (2012).
- [11] M. Vannoni and S. Straulino, Eur. J. Phys. **28**, 781 (2007).
- [12] A. Kawam and M. Kouh, Phys. Teach. **49**, 508 (2011).
- [13] R. Ochoa, F.G. Rooney and W.J. Somers, Phys. Teach. **49**, 16 (2011).

- [14] J. Breitbart and G. Khanna, Numerical Analysis and Applied Mathematics, **1168**, 1065 (2009).
- [15] P. Vogt and J. Kuhn, Phys. Teach. **50**, 439 (2012).
- [16] J. Kuhn and P. Vogt, Phys. Teach. **50**, 504 (2012).
- [17] J.C. Castro-Palacio, L. Velazquez-Abad, M.H. Gimenez and J.A. Monsoriu, Am. J. Phys. **81**, 472 (2013).
- [18] J.C. Castro-Palacio, L. Velazquez-Abad, F. Gimenez and J. A Monsoriu, Eur. J. Phys. **34**, 737 (2013).
- [19] J.C. Castro-Palacio, L. Velazquez, J.A. Gómez Tejedor, F.J. Manjón and J.A. Monsoriu, Rev. Bras. Ensino Fis. **36**, 2315 (2014).
- [20] L.P. Vieira, V.O.M. Lara and D.F. Amaral, Rev. Bras. Ensino Fis. **36**, 3505 (2014).
- [21] H.D. Young and R.A. Freedman, “University Physics with Modern Physics Technology Update”, 13th edition, chapter 21, Pearson Education, Inc., 2012.
- [22] W. Bauer and G.D. Westfall, “University Physics with Modern Physics”, chapter 22, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2011.
- [23] J.A. Manzanares, J. Bisquert, G. Garcia-Belmonte and M. Fernandez-Alonso, Am. J. Phys. **62**, 702 (1994).
- [24] A. Franco, <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/electromagnet.htm>. Este sitio web se visitó por última vez el 6-1-2015.
- [25] Esta app puede descargarse en el siguiente enlace:
<https://itunes.apple.com/es/app/magnetometer/id342782714?mt=8>. Este sitio web se visitó por última vez el 31-12-2014.
- [26] Esta app puede descargarse en el siguiente enlace:
<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.chrystianvieyra.android.physicstoolboxmagnetometer&hl=es>. Este sitio web se visitó por última vez el 31-12-2014.