

# Enseñanza del electromagnetismo a través de aplicaciones experimentales



**R. Méndez Fragoso, M. Villavicencio Torres**

*Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. Av. Universidad 3000, Circuito Exterior S/N. Deleg. Coyoacán, C. P. 04510, Ciudad de México.*

**E-mail:** rich@ciencias.unam.mx

(Recibido el 16 de febrero de 2016, aceptado el 10 de abril de 2017)

## Resumen

La teoría electromagnética es una de las áreas de la física con mayor índice de reprobación en las asignaturas de Física que se imparten en el nivel medio superior y superior. En buena medida, esto se debe a que el electromagnetismo se basa principalmente en conceptos abstractos y poco intuitivos que resultan un reto de aprendizaje para los alumnos. Por lo general, con la intención de favorecer la comprensión de los conceptos, en los cursos teóricos, prácticos y teórico-prácticos, el docente presenta y analiza los experimentos más representativos de algunos fenómenos electromagnéticos. Sin embargo, en muchas ocasiones este esfuerzo es poco eficiente ya que los experimentos que elige están desligados de las aplicaciones que los estudiantes tienen a su alcance en la vida cotidiana o de sus implicaciones tecnológicas. Por ello, en la estrategia didáctica que se presenta en este trabajo se propone que los alumnos diseñen y hagan experimentos relacionados directamente con aplicaciones tecnológicas actuales. En la presente contribución, se muestra un experimento cuyo objetivo es producir un plasma de manera controlada utilizando materiales al alcance de muchos laboratorios escolares. En este experimento, realizado por los alumnos a lo largo de un curso de electromagnetismo de nivel superior, se muestra como se pueden aplicar los conceptos de campo eléctrico, diferencia de potencial, capacitancia, corriente directa, corriente alterna, transformadores y plasmas. Además de esto, los alumnos aprenden el funcionamiento y la forma en la que interactúan los diferentes dispositivos necesarios para generar un plasma. Con este tipo de experimentos, los alumnos no solo adquirirán los conocimientos necesarios para manipular un plasma con campos magnéticos, sino que podrán encontrar aplicaciones como la deposición o abrasión con iones que se utiliza en la fabricación de películas delgadas, espejos, celdas solares, etc. La incorporación de este tipo de actividades dentro de los cursos no sólo ha motivado a los estudiantes en el estudio de la Física, sino que ha dado lugar a una mejora en el entendimiento de la teoría electromagnética al vincularla con sus aplicaciones en el desarrollo de dispositivos tecnológicos que se utilizan en la vida cotidiana. Aunado a esto, se ha observado una disminución en los índices de reprobación en las asignaturas de Electromagnetismo I y Fenómenos Electromagnéticos, de las licenciaturas de Física y Ciencias de la Tierra, respectivamente, de la Facultad de Ciencias de la UNAM.

**Palabras clave:** Enseñanza de teoría electromagnética, Uso de las TIC's como complemento de las clases, Experimentos demostrativos.

## Abstract

Electromagnetic theory is one of the areas of physics with the highest failure rate in the subjects of physics taught at the high school and undergraduate level. This is because electromagnetism is mainly based on abstract and non-intuitive concepts that are challenging learning for students. Usually, intended to promote understanding of the concepts in the theoretical, practical and theoretical-practical courses, the teacher presents and analyzes the most representative experiments of some electromagnetic phenomena. However, often this effort is inefficient because the experiments are disconnected from its applications that students can see at their everyday life or their technological implications. Therefore, the teaching strategy presented in this paper it is proposed that students design and carry out experiments directly related to current technological applications. In this contribution, an experiment is shown which aims to produce plasma in a controlled manner using materials available to many school laboratories. In this experiment, done by undergraduate students along of a course of electromagnetism, it is shown the application of the concepts of electric field, potential difference, capacitance, direct current, alternating current, transformers and plasmas. In addition to this, students learn the workings and the way of interaction among different devices needed to generate plasma. With this type of experiments, students not only acquire the knowledge necessary to manipulate a plasma with magnetic fields, they will find applications such as deposition or abrasion ions used in the manufacture of thin films, mirrors, solar cells, etc. The inclusion of these activities within the courses has not only motivated students in the study of physics but has led to an improved understanding of electromagnetic theory by linking it with its applications in the development of technological devices they used in everyday life. Also, there has been a decrease in failure rates in the subjects of Electromagnetism I and Electromagnetic Phenomena of the Bachelor of Physics and Earth Sciences, respectively, of the School of Sciences of the UNAM.

**Keywords:** Teaching electromagnetic theory, use of IT as a complement for the lectures, Demonstrative experiments in the classroom.

**PACS:** 01.40.Di, 01.40.Fk, 01.50.My.

**ISSN 1870-9095**

## I. INTRODUCCIÓN

En la clase teórica presencial es común que el profesor utilice como único recurso didáctico al pizarrón para la discusión de los conceptos y la resolución de ejemplos que intentan reforzar el aprendizaje. En clases más dinámicas, se incluye el uso de materiales didácticos que presentan en forma gráfica los conceptos fundamentales del tema a tratar e inclusive se agregan actividades experimentales o experimentos demostrativos. Sin embargo, actualmente se ha demostrado que las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC's) y los experimentos desarrollados por los propios alumnos no sólo enriquecen el curso, sino que además constituyen un apoyo muy útil para la visualización de los conceptos e involucra a los alumnos en la construcción de su conocimiento y en el desarrollo del curso mismo. Al mismo tiempo, esto fomenta que los alumnos consideren apoyar su formación académica con cursos extracurriculares, promoviendo además su participación en eventos de divulgación de la ciencia, e incluso los puede llevar a tratar de vincularse con proyectos de investigación.

Las TIC's pueden ser desde simples presentaciones hasta complicadas unidades interactivas que pueden utilizarse en cualquier dispositivo electrónico como computadoras, tablets, teléfonos inteligentes, etc. accesibles a los estudiantes. Una de las principales ventajas que ofrecen estas herramientas es que los alumnos y el profesor pueden interactuar fuera del horario de clase, ya que éstas hacen uso de los recursos que ofrece la internet tales como páginas web, blogs, redes sociales, correo electrónico, etc. Por otro lado, los experimentos que desarrollan los estudiantes propician un ambiente de colaboración dentro y fuera del aula. Además, permiten que los alumnos se enfrenten a las dificultades que pueden llegarse a encontrar en el desarrollo de un experimento real. Esto facilita un aprendizaje en contexto, basado en las experiencias de los estudiantes, Díaz-Barriga [1]. Es claro que el uso de estos recursos puede potenciar el conocimiento que adquieren los alumnos ya que fomenta su formación continua y les motiva al estudio.

En la actualidad, puede encontrarse en la internet una gran cantidad de simulaciones computacionales que permiten visualizar fácilmente algunos fenómenos físicos que se presentan en la vida cotidiana y en la naturaleza. Sin embargo, dos de los problemas a los que se enfrentan los estudiantes de bachillerato y nivel superior son el exceso de información con errores conceptuales, que refuerzan las ideas previas equivocadas, y simulaciones con poca calidad. Es importante recalcar que los estudiantes, primordialmente los de nivel medio superior, están en plena formación académica y muchas veces no tienen un criterio que les permita discriminar la información y el material que pueden

encontrar. Por ello, es muy importante que el docente guíe a los alumnos en el uso de las TIC's y genere un ambiente propicio para el aprendizaje, dependiendo de la materia que se esté impartiendo [2]. Además, en los cursos de Física es de suma importancia mostrar que los conceptos y teorías que se estudian a lo largo del curso se puedan comprobar y visualizar experimentalmente. Más aún, como se verá más adelante, el estudiante tiene que identificar la forma de conectar la teoría con los experimentos. La principal motivación de esta contribución radica en la guía que debe tener el estudiante utilizando las TIC's para aterrizar los conceptos teóricos en experimentos relacionados con los recientes avances tecnológicos [3,4].

La estructura de la presente contribución es una versión escrita del "Taller 5: Electromagnetismo por todas partes: retos y aplicaciones tecnológicas", y del póster "Enseñanza del electromagnetismo a través de aplicaciones experimentales" que se presentaron en la reunión de la AAPT-Mx 2015. En este trabajo, se exponen los puntos clave para una correcta implementación de herramientas computacionales en los cursos de electromagnetismo y materias afines a nivel superior. En la segunda sección se presenta una motivación del uso de simulaciones computacionales para entender situaciones electrostáticas que permitirán plantear un buen experimento. En la tercera sección, se presenta un experimento desarrollado con los alumnos. Éste consiste en la generación de un plasma de forma controlada. Finalmente, en la cuarta sección se presentan los resultados y conclusiones de la estrategia didáctica propuesta.

## II. USO DE LAS TIC PARA GUIAR AL ESTUDIANTE HACIA UN EXPERIMENTO

Actualmente, una de las herramientas didácticas que se utilizan en una gran cantidad de asignaturas de Física es el uso de simulaciones computacionales. En los cursos de electromagnetismo éstas resultan de gran ayuda para que los estudiantes puedan visualizar diferentes situaciones electromagnéticas que en muchas ocasiones no se pueden mostrar con experimentos de manera sencilla. Por ejemplo, las simulaciones permiten que el alumno comprenda más fácilmente los conceptos de campo eléctrico y potencial eléctrico, evitando que los confunda con los conceptos de fuerza y energía potencial eléctrica. En la Figura 1 se muestra el campo eléctrico producido por un dipolo eléctrico y las superficies equipotenciales. En esta figura se puede apreciar la forma de las líneas de campo eléctrico y cómo éstas son perpendiculares a las superficies equipotenciales. Con este sencillo ejemplo, el alumno puede reconocer fácilmente la diferencia que existe entre la energía potencial eléctrica de este sistema:

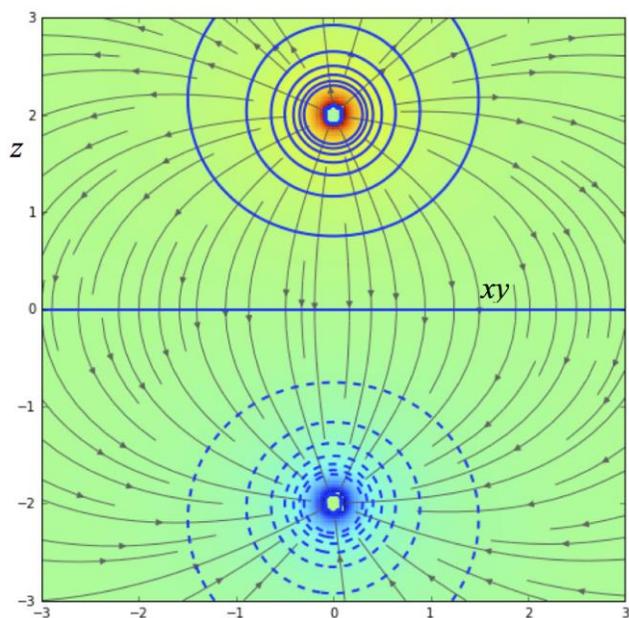
Enseñanza del electromagnetismo a través de aplicaciones experimentales en diferentes plataformas por medio de internet [8,9]. Además, los autores de este trabajo hemos puesto a disposición de la comunidad, unidades de aprendizaje que explican diferentes fenómenos en la física [10]. Otro ejemplo de cómo los alumnos pueden contextualizar sus conocimientos utilizando simulaciones se muestra en la Figura 2. En ésta se tiene un campo magnético de tipo dipolar que simula el campo magnético de la Tierra. En la simulación se coloca una carga eléctrica que se mueve en presencia de dicho campo magnético. La solución que se tiene para este sistema no tiene solución analítica. Sin embargo, se utilizan las herramientas computacionales para programar la fuerza de Lorentz sobre la partícula cargada y con ello obtener, con una alta precisión, la trayectoria de la partícula. En esta simulación se observa que la carga eléctrica viaja del polo norte al polo sur haciendo espirales que presentan una mayor oscilación en la cercanía de los polos. De esta manera es fácil explicar a los estudiantes la razón por la que se generan auroras boreales y australes en los polos de la Tierra: debido a que en estas regiones las cargas se ven aceleradas al tener un número mayor de oscilaciones empezarán a radiar. En contraste, las cargas casi no oscilan cuando se mueven por la región del ecuador por lo que en esta región no podrán observarse en condiciones normales las auroras boreales. Inclusive, se puede generar un video para que el alumno observe la dinámica de la partícula en dicho campo magnético. Adicionalmente, esta simulación permite que los alumnos puedan apreciar el llamado “efecto botella”, mismo que se observa en los polos magnéticos de la Tierra y que tiene grandes aplicaciones sobre todo en el confinamiento de partículas cargadas y plasmas.

$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|}, \quad (1)$$

y el potencial eléctrico que produce

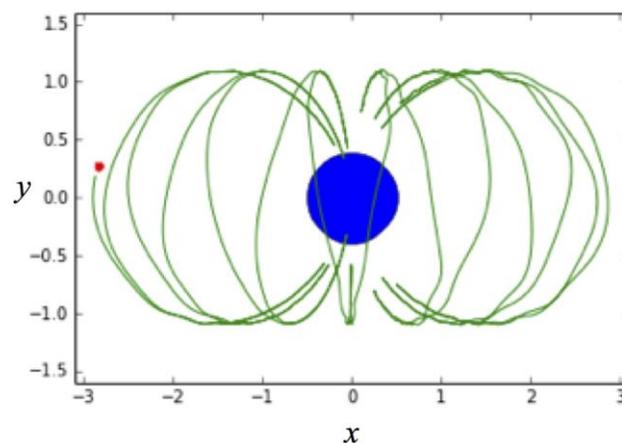
$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{q}{|\vec{r} - \vec{r}_1|} - \frac{q}{|\vec{r} - \vec{r}_2|} \right), \quad (2)$$

donde se ha considerado que  $q_1 = -q_2 = q$ ,  $\vec{r}_1$  es la posición de la carga 1 que en el caso de la Figura 1 se encuentra en (0,2,0), y  $\vec{r}_2$  es la posición de la carga 2 en (0,-2,0). De esta manera, una vez que se ha determinado el potencial eléctrico, el estudiante puede obtener el campo eléctrico aplicando la relación:  $\vec{E} = -\nabla V$ . La ayuda de las TIC permiten obtener gráficas como las de la Figura 1. Más aún, los alumnos pueden cambiar los parámetros de los programas o las simulaciones para explorar diferentes situaciones físicas que se puedan imaginar.



**FIGURA 1.** Se muestra algunas curvas equipotenciales y líneas de campo eléctrico que corresponden a dipolo eléctrico. El dipolo está alineado a lo largo del eje  $z$  en la dirección vertical de la imagen. En azul a la mitad de la imagen se representa el plano  $xy$ .

Los programas de cómputo desarrollados para la generación de las simulaciones utilizadas en el curso de Electromagnetismo I de la Licenciatura en Física de la Facultad de Ciencias de la UNAM, se han hecho utilizando el software libre IPython Notebook el cual resulta sumamente útil por su practicidad en cuanto a la implementación de simulaciones científicas y a que tiene muchas herramientas de visualización [5,6,7]. Los alumnos tienen libre acceso a dichos programas y pueden ejecutarlos *Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol. 11, No. 2, June 2017*



**FIGURA 2.** Simulación de la trayectoria de una partícula cargada en el campo magnético de la Tierra. Se muestra la proyección de la trayectoria en el plano  $xy$ .

Es claro que el uso de estas herramientas de visualización permite que los estudiantes comprendan y asimilen más claramente los conceptos que se involucran el estudio de un sistema electromagnético. Con esto se busca que los alumnos puedan además proponer experimentos con bases teóricas sólidas. Para los autores de este artículo, el objetivo principal de las simulaciones y la incorporación de las TIC <http://www.lajpe.org>

en los cursos, es que el estudiante comprenda los diferentes conceptos que se ven a lo largo del curso, además de propiciar que los propios estudiantes planteen el desarrollo de experimentos y proyectos fomentando el trabajo colaborativo y el uso del método científico sin olvidar que la Física es una ciencia experimental.

### III. PLANTEAMIENTO DE UN PROYECTO EXPERIMENTAL CON ESTUDIANTES (GENERACIÓN DE UN PLASMA)

A lo largo del curso de Electromagnetismo I, se presentó a los estudiantes diferentes situaciones relacionadas con el electromagnetismo. Para relacionar varios de los temas que se desarrollaron a lo largo del curso los estudiantes propusieron generar un plasma de manera controlada con la finalidad de hacer abrasión o deposición de iones sobre una superficie. Para ello, primero hicieron una investigación bibliográfica, tanto en libros de texto, revistas y páginas de la internet, sobre la manera de generar un plasma.

La forma más sencilla y segura de generar un plasma es poner un gas muy diluido, confinado en una cavidad, entre dos electrodos a una diferencia de potencial suficientemente grande. A pesar de que se generan cargas en el gas, el plasma es en promedio eléctricamente neutro. Al diluir el gas se busca que se tengan pocas colisiones entre las moléculas debido a que su camino libre medio aumenta. Esto hace que los iones que se produzcan no interactúen fuertemente evitando que se generen corrientes considerables entre los electrodos. Así pues, al momento de generar entre los electrodos una diferencia de potencial dentro de la cavidad no se producirán arcos que generen rayos haciendo que el sistema se descargue eléctricamente en los electrodos.

El material que se utilizó para generar el plasma es el siguiente:

- Transformador de un horno de microondas de 1200 Watts.
- Capacitor de 1  $\mu\text{f}$  de alto voltaje (2100 V).
- Bomba de vacío con capacidad de llegar a 100 mBar.
- 4 diodos de alta potencia.
- Botella de vidrio perforada con capacidad de 1.2 L.
- Electrodos de Cobre o Zinc.
- Variac.
- Placa de vidrio.
- Imanes de Neodimio
- Cables de cobre

Del material anterior hay que mencionar que por los voltajes que se manejan es necesario contar con cables gruesos que al menos resistan el paso de corriente de 15 Amperes. La botella de vidrio debe tener en uno de sus extremos dos perforaciones, una para la bomba de vacío y otra para colocar el electrodo. La botella puede ser sellada en el otro extremo con una tapa de material aislante con el otro electrodo conectado a tierra.

La forma de conectar los dispositivos anteriores se muestra en la Figura 3. Primero se tiene que generar un vacío en la botella. Para ello, ésta se sella y se utiliza la bomba de vacío para extraer el gas interior, que en nuestro caso fue aire. Se recomienda conectar la bomba aproximadamente 5 minutos dependiendo del tipo de bomba.

La corriente alterna que proviene de la línea (120 V) se conecta al Variac con la finalidad de controlar el voltaje de entrada al sistema. Conectado al Variac se encuentra el transformador que se utiliza para incrementar el voltaje aproximadamente 17.5 veces. La salida del transformador se conecta a un puente de diodos con la finalidad de obtener corriente directa. Esto último se logra conectando un capacitor en paralelo a la salida del puente de diodos para rectificar la corriente de tal manera que sea lo más constante posible. La terminal que viene del puente de diodos y del capacitor se conecta a uno de los electrodos de la botella de vidrio, mientras que el otro electrodo se encuentra conectado a tierra. En este momento, ya se está en condiciones de generar el plasma en el interior de la botella. Se recomienda subir el voltaje poco a poco hasta que en el interior de la botella se empiece a ver una nube de color rosa pálido. Este color corresponde al aire remanente dentro de la botella que ya se encuentra en su estado de plasma.

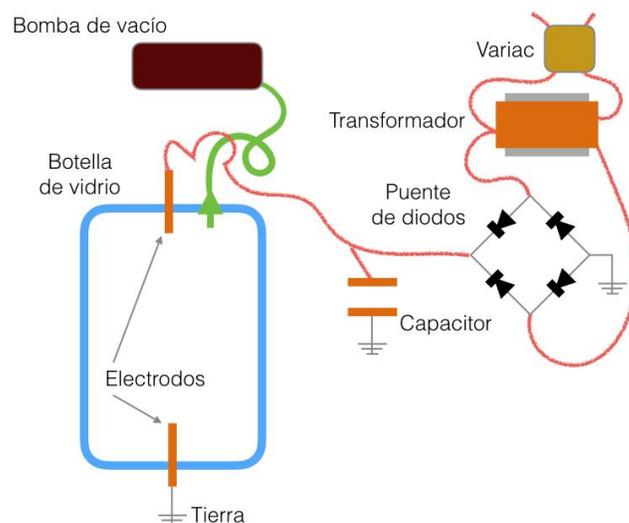


FIGURA 3. Configuración esquemática del diseño experimental para generar un plasma dentro de la botella de vidrio.

Dependiendo del gas contenido en la botella se genera un color diferente. En el caso del aire, se genera un plasma con color rosa pálido ya que la mezcla de gases es básicamente Nitrógeno (79%) y Oxígeno (21%). Debido a que la botella se encuentra a baja presión en su interior, es posible generar plasmas de otro tipo dependiendo del material contenido en la botella. Esto se debe a que la mezcla de aire poco a poco va disminuyendo si se deja funcionando la bomba de vacío el suficiente tiempo (aproximadamente 10 minutos). Cuando se enciende la diferencia de potencial, el material de los electrodos aporta partículas al ambiente dentro de la

botella. De esta manera es posible generar plasmas de Zinc o de Cobre dependiendo de los electrodos utilizados. En la Figura 4 se muestran dos tipos de plasma. A la izquierda se observa uno producido con electrodos de Zinc y tiene un color blanco, mientras que en la derecha se muestra un plasma producido con electrodos de Cobre y éste presenta un color morado. En ambos casos se tiene una región en la que se tiene plasma de color rosa pálido asociado al aire remanente en el interior de la botella.



**FIGURA 4.** Se muestra el plasma generado por el esquema experimental en la Figura 3. A la izquierda se muestra un plasma utilizando electrodos con recubrimiento de Zinc. A la derecha se muestra un plasma generado con electrodos de cobre.

Una vez que se ha generado el plasma se puede hacer que los iones se estrellen contra una superficie. Para ello, se pueden utilizar imanes para manipular el plasma y dirigir las partículas cargadas hacia alguna superficie. Este proceso puede depositar partículas o hacer abrasión sobre el material que se quiere impactar. Usualmente, este tipo de técnicas se utilizan en la fabricación de circuitos integrados, generación de capas muy delgadas en materiales, limpieza de superficies y en la fabricación de muchos dispositivos tecnológicos actuales.

Actualmente, los alumnos que participaron en la elaboración de esta actividad experimental a través del desarrollo de un proyecto generado a lo largo del curso de Electromagnetismo I, están mejorando el dispositivo experimental con la finalidad de tener mejor control del plasma y poder manipularlo para realizar limpieza de materiales.

Este tipo de estrategias didácticas ha permitido que los alumnos se involucren de manera natural en proyectos de investigación. Incluso, los mismos estudiantes han llegado a

*Enseñanza del electromagnetismo a través de aplicaciones experimentales* presentar sus trabajos en congresos a nivel nacional y/o han podido obtener su grado de licenciatura [11,12].

#### IV. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

La introducción de unidades de aprendizaje con simulaciones computacionales de calidad ha mostrado que los alumnos pueden tener un mejor entendimiento sobre los diferentes fenómenos que se presentan en un curso de electromagnetismo. Al mismo tiempo, la incorporación de los proyectos realizados por los estudiantes aumenta su motivación en el estudio de la Física al mismo tiempo que favorece que ellos mismos sean generadores de su propio aprendizaje. Más aún, se propicia el aprendizaje significativo y en contexto ya que los alumnos pueden conectar los resultados de los experimentos y proyectos que realizan con las aplicaciones tecnológicas del electromagnetismo que pueden ver en los dispositivos de uso cotidiano. Además, como se reporta en la referencia [2], el uso de simulaciones y actividades experimentales, han llevado a que el índice de aprobación en los cursos de electromagnetismo en los que se ha implementado esta dinámica de trabajo ha aumentado en un 15 %.

La estrategia didáctica que se desarrolló e implementado ha permitido que los alumnos de los cursos se puedan involucrar de manera sencilla en proyectos de investigación y/o desarrollo tecnológico. Esto se debe a que los estudiantes ven mucho más cercanas estas actividades y no como una simple aspiración de ellos o el docente.

#### AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo otorgado por los proyectos DGAPA-PAPIME PE 103114, PE 106615, PE 108216 y DGAPA PAPIIT IA 105516.

#### REFERENCIAS

- [1] Díaz-Barriga, F., *Cognición situada y estrategias para el aprendizaje significativo*, Revista Electrónica de Investigación Educativa 5 (2), (2003).
- [2] Villavicencio, M. y Méndez, R., *La enseñanza del electromagnetismo a través de sus aplicaciones y la multidisciplinaria*, Memorias del Seminario LASERA 2014, (2014).
- [3] Perrenoud, P. *Aprender en la escuela a través de proyectos: ¿Por qué? ¿Cómo?*, Revista de Tecnología Educativa (Santiago de Chile) 14, 311-321 (2000).
- [4] Roth, W. M. and Roychoudhury, A. *The development of science process skills in authentic contexts*, Journal of Research in Science Teaching 30, 127-152 (1993).
- [5] Downey, A. *Think Python*, (Green Tea Press, USA, 2013).
- [6] Blanco-Silva, F. J., *Learning SciPy for Numerical and Scientific Computing*, (Packt Publishing, Reino Unido, 2013).

R. Méndez Fragoso, M. Villavicencio Torres

[7] Pérez, F. and Granger, B. E., *IPython: A System for Interactive Scientific Computing*, (Computing in Science and Engineering, USA, 2007).

[8] <<https://jupyter.org>>, Consultado el 1 enero de 2016.

[9] <<http://www.sagemath.org>>, Consultado el 30 de junio de 2015.

[10] < [sistemas.fciencias.unam.mx/~rich/herramientas/](http://sistemas.fciencias.unam.mx/~rich/herramientas/) >, Consultado el 30 enero de 2016.

[11] Porras Flores, P., *El problema de Kepler asimétrico*. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM, México (2014).

[12] Hernández-Morales J., *Modos de vibración de sistemas no homogéneos en una y dos dimensiones*. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM, México (2016).