

Experimentos sencillos en magnetismo con materiales de bajo costo: desarrollo de modelos y terminología a partir de las observaciones



Shitu, Jorge^{1,2}

¹*Departamento de Ciencias Exactas, Naturales e Ingeniería, Sede Andina, Universidad Nacional de Río Negro Mitre N° 631 San Carlos de Bariloche (8400), Río Negro, Argentina.*

²*Extensión Áulica de la Universidad Tecnológica Nacional, Sede Administrativa: Moreno 69, 5° piso, San Carlos de Bariloche (8400), Río Negro, Argentina.*

E-mail: jshitu@unrn.edu.ar

(Recibido el 27 de Febrero de 2014, aceptado el 18 de Junio de 2014)

Resumen

Se presenta en este trabajo una propuesta didáctica para enseñar varios conceptos básicos del magnetismo, tales como *campo magnético, intensidad de campo magnético, magnetización inducida e interacciones magnéticas*. La propuesta está orientada fundamentalmente a cursos universitarios de nivel introductorio, aunque varias de las actividades que se proponen pueden ser usadas para la enseñanza en el nivel medio. Se propone una construcción modelada de fenómenos magnéticos básicos, partiendo de experiencias sencillas y evitando expresamente el uso previo a la realización de las experiencias de cualquier nomenclatura existente en libros de texto, con el objetivo de mostrar el aspecto empírico de la ciencia, y teniendo en cuenta las ideas previas de los estudiantes. Se discute el uso de modelos didácticos para la enseñanza de las ciencias en el aula.

Palabras clave: Magnetismo. Interacciones magnéticas, campo magnético, modelos didácticos, ideas previas, construcción de terminología científica.

Abstract

A didactic proposal to teach several basic concepts of magnetism, such as magnetic field, magnetic field strength, induced magnetization and magnetic interactions is presented. The proposal is aimed primarily at introductory level college courses on the subject, although several of the activities proposed can be used for teaching at the secondary level. We propose a model building basic magnetic phenomena, starting from simple experiments and specifically avoiding the use prior to the completion of the experiences of any existing nomenclature in text books, aiming to show the empirical aspect of science, and taking into account students' previous ideas. We discuss the use of instructional models for teaching science in the classroom.

Key Words: Magnetism, magnetic interactions, magnetic field, didactic models, preconceptions, construction of scientific terminology.

PACS: 01.40.gb, 01.40.gf, 01.40.Ha

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

Muchos de los cursos tradicionales universitarios de Física cuya temática incluye la enseñanza de los fenómenos magnéticos, en general, tienen una fuerte carencia en la construcción de modelos ligados a fenómenos y conceptos básicos tales como los de campo magnético, la interacción entre imanes permanentes, y los fenómenos de magnetización inducida.

En general, la enseñanza se limita por un lado, a la proposición verbal de los contenidos que suelen encontrarse en los libros tradicionalmente escogidos como referencia en estos cursos, tanto los de nivel introductorio como los más avanzados, y en segundo lugar se hace énfasis en una presentación que, si bien describe con mayor o menor

claridad según el caso los aspectos fenomenológicos de estos conceptos, está fuertemente anclada en formalismos lógico-matemáticos (ver, por ejemplo, [1, 2, 3, 4, 5]).

Sin embargo, es notable que el mismo Maxwell no diera tanta importancia a este enfoque en sus construcciones iniciales:

“...deliberadamente no estudió «la matemática de los alemanes», como él expresa, antes de entender las explicaciones de los fenómenos dados por Faraday, y verificó que «muchos de los métodos más fértiles de investigación descubiertos por los matemáticos podrían ser mejor expresados en ideas de Faraday» (Maxwell, 1873), quien no escribió ni una sola fórmula” [6].

Shitu, Jorge

En función de lo que he observado, reflexionado y experimentado a lo largo de varios años de enseñanza en estos temas, tanto en cursos de nivel básico en diversas carreras de Ciencias e Ingeniería, Profesorados de Física y de Química, así como en la enseñanza de la Física en nivel medio, para que los alumnos lleguen a un conocimiento conceptual sustentable en el tiempo, más allá del formalismo matemático y eviten la repetición automática de explicaciones de ciertos comportamientos de los sistemas magnéticos para explicar los fenómenos que se observan, y a la vez, poder aplicarlos a situaciones no discutidas en el aula, es necesaria una enseñanza basada en la construcción de modelos sencillos, desarrollada sobre la base de la fenomenología experimental.

En este contexto, y de acuerdo a esta experiencia de trabajo en este campo, propongo en el presente artículo una propuesta didáctica de enseñanza basada en lo expuesto en el último párrafo.

II. LA CONSTRUCCIÓN DE MODELOS CIENTÍFICOS DESDE CERO: LA IMPORTANCIA DE LLEGAR A DARLE NOMBRE A LOS FENÓMENOS A PARTIR DE LA CONSTRUCCIÓN DE MODELOS BASÁNDOSE EN EXPERIENCIAS CONCRETAS

En el libro *“La ciencia en el aula”* de Gellon *et al.* [7], los autores proponen que el trabajo en el aula debería centrarse en la construcción de modelos y conceptos partiendo de la base de que las ideas que la ciencia construye están ligadas de una manera muy profunda con la forma en la que la ciencia produce conocimientos. Para ello, señalan, hay aspectos claves vinculados con la construcción del conocimiento científico que deben ser tenidos especialmente en cuenta, a saber, los aspectos *empírico, metodológico, abstracto, social y contraintuitivo*.

En particular, son de pertinencia para este trabajo algunas reflexiones en relación al primero de los aspectos mencionados:

“Como el camino está trazado, es fácil olvidar en el aula los orígenes empíricos de las ideas científicas, y quedarse con el resultado final, sin tener en cuenta cómo esas ideas se conectan con evidencias en el mundo de los fenómenos. Esto se da en extremo si se utiliza una forma declarativa de enseñanza de las ciencias, en la que el docente (o el libro de textos) les cuenta a los alumnos como “es” la realidad. En este caso, la fuente fundamental del saber no es la observación o el experimento, sino la palabra consagrada en el libro de texto o en la autoridad del docente”.

“Presentar en clase abundantes experiencias que pongan a los estudiantes en contacto con la realidad a explicar es un buen comienzo para llevar el aspecto empírico de la ciencia al aula. Pero hay que prestar atención al uso de prácticas verbales que puedan interferir insidiosamente con este buen comienzo”.

“Con frecuencia, los estudiantes creen que nombrar un fenómeno es entenderlo, que comprender radica en nombrar algo o referirse a terminología sofisticada”.

“Al ceñirnos lo más estrictamente a la secuencia fenómeno-idea-terminología, estamos siguiendo la secuencia lógica que sigue la investigación científica”.

“Si quisiéramos respetar el aspecto empírico de la ciencia al máximo posible, deberíamos desarrollar actividades en que las ideas se construyan desde “cero”.

En un programa de este tipo, los estudiantes empiezan usando sus sentidos y su experiencia cotidiana, dejando conscientemente de lado conceptos y términos científicos aprendidos previamente....”.

III. LOS MODELOS MENTALES Y SU INFLUENCIA EN EL APRENDIZAJE DE LA FÍSICA DEL MAGNETISMO

Es bien conocida la importancia de los modelos en los procesos de aprendizaje de los fenómenos, leyes y teorías físicas. En el marco de esta propuesta didáctica, dentro de la extensa cantidad de artículos publicados sobre tema, me parecen relevantes los trabajos de Greca [6], Morrison [8], Galagovsky [9] y Justí [10].

En el primero de esos artículos, los autores basan su trabajo en la Teoría de los Modelos Mentales de Johnson-Laird [11], que clasifica los modelos mentales en tres grandes categorías: (a) las representaciones proposicionales (definidas como representaciones mentales que pueden ser expresadas verbalmente); (b) los modelos mentales (análogos estructurales de una situación del mundo real o imaginario); (c) las imágenes mentales («perspectivas» particulares de un modelo mental).

Además, los autores del artículo plantean que la construcción de un modelo es el *“...resultado de la percepción, interacción social o experiencia interna”*. A su vez, basándose en la propuesta de Johnson-Laird, mencionan que, en ausencia de un profesor, las personas construyen modelos de los fenómenos físicos a partir de tres principios: (1) todos los eventos tienen causa; (2) las causas preceden a los eventos y (3) la acción sobre un objeto es la principal causa para cualquier cambio que ocurra en él.

Respecto al trabajo de Galavosky y Adúriz-Bravo [9], hacen una comparación muy interesante entre los modelos científicos escolares y los eruditos, en el marco de los conceptos de ciencia escolar y ciencia erudita. Visualizan la enseñanza de las ciencias como un proceso de aproximación progresivo a las construcciones de la ciencia erudita, y para ello, presentan una aproximación de carácter selectivo, que consiste en un relevamiento de los conceptos estructurantes de la ciencia, y su adaptación a la máxima profundidad posible de acuerdo al nivel de escolaridad, lo que daría lugar a un proceso de alfabetización científica.

Esta elección tiene como consecuencia concebir a la ciencia escolar, ya no como una versión simplificada de la ciencia erudita, sino más bien como una entidad con identidad y herramientas propias, cuyo objetivo es acercar

paulatinamente al alumno a formas más elevadas de representaciones científicas. Dentro de esta caracterización, plantean la diferencia entre modelos científicos eruditos y escolares, y proponen lo que constituye el aporte novedoso de su trabajo, que denominan Modelo Didáctico Analógico (MDA)

Justi [10] propone un modelo de enseñanza de las ciencias basado en actividades de construcción de modelos, partiendo de una descripción del tipo de formación en ciencias que requieren los alumnos de nuestros tiempos a fin de poder enfrentar los desafíos que les depara el mundo en que vivimos, caracterizado por la complejidad, los cambios rápidos, la evolución permanente de la ciencia y la

tecnología, y las implicancias en la sociedad y el medio ambiente.

Como señala la autora del artículo, los libros de textos tratan poco y nada la construcción de modelos, pese a que es posible, a partir de las investigaciones en didáctica, epistemología, y la reflexión sobre la praxis científica moderna poder describir algunos elementos que ayuden a los estudiantes a aprender a proponer y construir modelos. Al respecto, es muy ilustrativo el gráfico de flujo que se presenta en la Figura 1 de ese artículo, que grafica el modelo de construcción de modelos que propone la autora del trabajo.

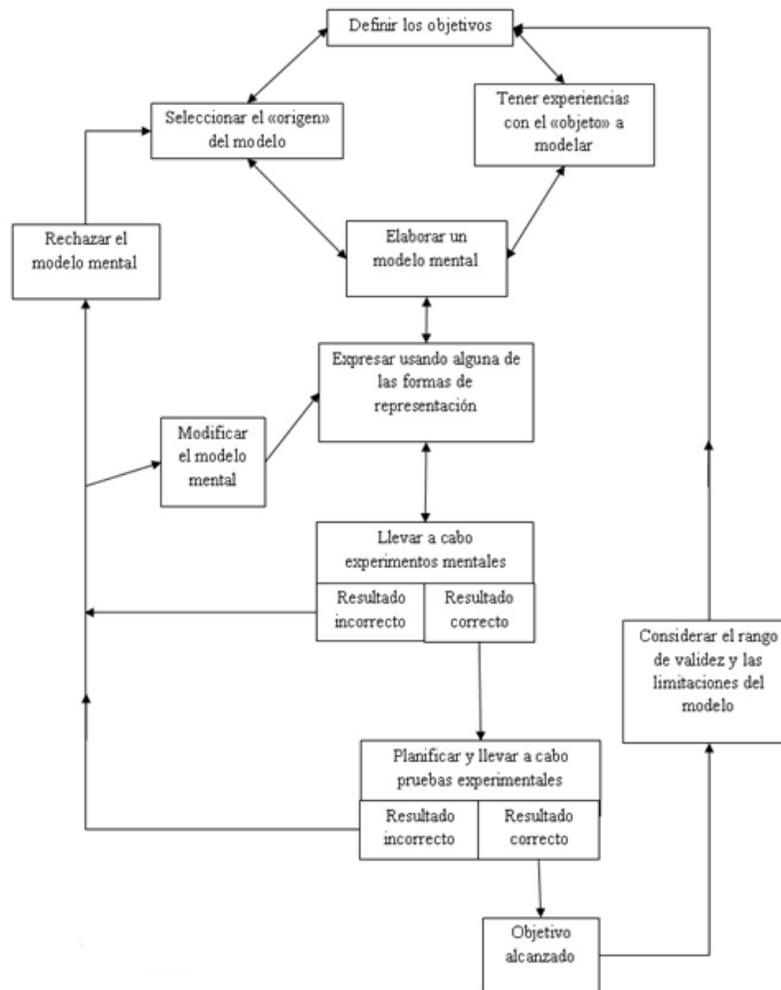


FIGURA 1. Gráfico de flujo del modelo de enseñanza de las ciencias basado en actividades de construcción de modelos.

V. LAS CONCEPCIONES ALTERNATIVAS DE LOS ESTUDIANTES SOBRE ALGUNOS DE LOS FENÓMENOS MAGNÉTICOS

Al contrario de lo que sucede con otras áreas de la Física, no existe una gran cantidad de trabajos de investigación que muestren las concepciones alternativas de los estudiantes

sobre el magnetismo, sus causas y las interacciones entre imanes permanentes.

Tal vez, la mejor recopilación de los resultados conocidos en esta área de investigación se encuentre en el trabajo de Guisasola *et al.* [12], resumido en la tabla I.

De los trabajos citados allí, me parece interesante rescatar algunas de las conclusiones de Meneses [13] y

Guisasola *et al.* [14] por la pertinencia que tienen para la propuesta de trabajo que desarrollaré más adelante.

De la primera de estas dos referencias, destacamos lo siguiente:

“Existe una gran confusión entre campo eléctrico y campo magnético. Los alumnos expresan, en general, que un imán crea a su alrededor un campo magnético. Sin embargo al predecir sus efectos indican los debidos a la existencia de un campo eléctrico y no magnético. Asimismo, al explicar la atracción del hierro por un imán, consideran que existe una inducción eléctrica en lugar de magnética. En consecuencia, se desconoce el fenómeno de inducción magnética”.

“Al explicar los efectos de un imán sobre cuerpos cargados o viceversa casi nunca mencionan el estado de reposo o movimiento de las cargas”.

“Se cree que las interacciones visibles se producen entre imanes y toda sustancia metálica. Desconocen, en su mayoría, la existencia de sustancias diamagnéticas, paramagnéticas y ferromagnéticas y su interacción (aunque sea débilmente) con un imán”.

.....“Para explicar la interacción entre imanes y metales, los alumnos dan varias explicaciones:

a) Asocian al metal la doble polaridad del imán sin dar detalles.

b) Creen que el imán tiene en sí mismo una fuerza capaz de atraer cuerpos («efecto mágico»).

c) Estiman que hay un paso (transferencia) de carga del imán al hierro, produciéndose la interacción al estar los dos cargados.

d) Consideran (como ya se ha dicho) que se produce una redistribución de cargas en el hierro (orientación de los dipolos eléctricos), en lugar de la orientación de los dipolos magnéticos que son totalmente desconocidos”.

“Hay un cierto conocimiento de experiencias sobre fenómenos electromagnéticos. Los más conocidos son: el experimento de Oersted (15%), las experiencias sencillas de inducción eléctrica, mover un imán en las proximidades de un circuito (25%) y el electroimán (20%).

“Un porcentaje elevado (30%) no menciona (desconoce) experiencias o fenómenos que se relacionen con estos hechos”.

“La mayoría de los alumnos conocen que la Tierra es un gran imán, pero desconocen que cerca del polo norte geográfico se encuentra el sur magnético y que cerca del polo sur geográfico se encuentra el norte magnético. Para explicar que una aguja magnética se orienta hacia el norte geográfico dan las siguientes razones:

a) Existe un potente imán en el norte geográfico capaz de atraer la aguja metálica de la brújula, aunque se encuentre muy lejos.

b) Debajo de la aguja de la brújula existe un imán que es orientado por el imán Tierra”.

“Al explicar cómo está constituido un electroimán, indican que se trata de un imán cargado al que se le ha enrollado un conductor por el que circula una corriente”.

“Se constata un desconocimiento casi total del efecto que produce un imán sobre una corriente. Sin embargo, el efecto contrario es relativamente conocido”.

De la segunda referencia, remarco lo siguiente:

Un alto porcentaje de respuestas pertenecientes a la categoría aludida considera la interacción magnética como una fuerza central de igual dirección y sentido que la eléctrica. Todos estos resultados sugieren que los estudiantes no identifican correctamente las fuentes del campo magnético y que además muchos de ellos tienen dificultades para distinguir la interacción eléctrica de la magnética.

La imantación se produce porque algo pasa de «un agente» a «un paciente».....

En definitiva, los resultados de esta cuestión parecen indicar que los estudiantes entienden que el imán es fuente del campo magnético en función de la propia naturaleza de imán, o bien que los cuerpos que interactúan lo hacen debido a la diferente carga electrostática que tienen.....

En función de los resultados de este trabajo, los autores del trabajo plantean diversos modelos.

Modelo A: «Magnetismo como atracción». Según este modelo, el magnetismo es visto como una atracción en una región alrededor del imán y se debe a una propiedad intrínseca de los imanes; es decir, los imanes atraen a algunos materiales a causa de su propia naturaleza y no parece necesaria ninguna explicación añadida.

Modelo B: «Magnetismo como una nube». En este modelo, el imán estaría rodeado por una región limitada dentro de la cual se actuaría sobre otros cuerpos; los fenómenos magnéticos son explicados en términos de la acción de esta región y no de la acción del imán sobre los objetos. Este tipo de concepción parece que proviene de hacer una analogía entre la acción magnética y la gravitatoria.

Modelo C: «Magnetismo como electricidad». Este modelo incluye un mecanismo para explicar la interacción magnética que está basada en la idea de interacción eléctrica. En ese sentido, la atracción magnética, por ejemplo, es vista como la atracción entre cargas de diferente signo, no existiendo una conexión entre atracción y la noción de campo magnético. Los polos de un imán son vistos como regiones que tienen exceso o déficit de cargas eléctricas (concretamente cargas positivas, el polo Norte, y negativas, el polo Sur).

Modelo D: «Magnetismo como polarización eléctrica». Este modelo es una sofisticación del anterior (encontrado entre los estudiantes de alto nivel y también entre alguno de los profesores e ingenieros). El imán polarizaría los objetos cercanos en el sentido eléctrico del término y luego interactuaría con ellos de forma electrostática.

Modelo E: «Modelo de campo». En este caso, que aparece fundamentalmente entre profesores e ingenieros, se reconocería que los «electrones giratorios» del imán crearían campos magnéticos muy pequeños que al sumarse darían lugar a un campo magnético importante a nivel macroscópico, que actuaría a través de la fuerza magnética sobre las cargas en movimiento.

Si bien la propuesta didáctica que presento trabaja sobre algunas de estas ideas previas, el objetivo de la misma no es el de abordarlas, aunque deben tenerse muy en cuenta a la hora de trabajar con nuestros alumnos. De hecho, en los trabajos de Guisasola *et al* (2005), Meneses (2005) y Greca

(1998) se pueden encontrar una serie de actividades destinadas a este fin, que aconsejo fuertemente usar en forma conjunta con las actividades que presento en este trabajo.

En una primera aproximación al tema, me parece importante que se elijan actividades que permitan a los alumnos construir las siguientes nociones básicas:

- La fuente del magnetismo es la existencia de corrientes de algún tipo.
- A nivel microscópico, estas corrientes tienen que ver con el movimiento de los electrones en los átomos.
- En cuanto a lo que se refiere a los efectos magnéticos, podemos imaginarnos al movimiento de los electrones como el que tienen en una pequeña bobina por la que circula corriente. Teniendo en cuenta que si tengo dos o más bobinas centradas en el mismo eje, el campo magnético total será la suma de los campos magnéticos producidos individualmente por cada bobina, una configuración tal como la de dos bobinas iguales, con corrientes circulando en sentidos diferentes, centradas sobre el mismo eje axial producirán un campo magnético total nulo, ya que sus campos magnéticos individuales se compensan.
- El modelo de la bobina como representación del movimiento de los electrones en un átomo se basa en las relaciones entre el modelo semi-clásico de movimiento circular orbital y de spin de los electrones, que habitualmente se encuentra en los libros de texto que suelen usarse en cursos introductorios al tema.
- En un primer modelo muy simple, debido a esos movimientos de carga, cada átomo se puede transformar en un pequeño imán (un dipolo magnético). Cada dipolo tiene en sí mismo dos polos definidos, imposibles de separar en virtud del modelo que se propone.

En función del tiempo disponible, de la organización de los contenidos de la materia y de los objetivos que se espera alcanzar en la misma, estas primeras ideas básicas pueden complejizarse y ampliarse de acuerdo a lo que el docente considere. Sin embargo, un alumno que llegue a aprobar un curso universitario básico de electro-magnetismo debería tener construido, al menos, un modelo de magnetismo que esté cimentado sobre este conjunto de supuestos básicos.

V. PROPUESTA DIDÁCTICA

En relación a la propuesta didáctica de mi trabajo, de la lectura a primera vista de algunas de las actividades que se proponen en la misma podría deducirse que son más adecuadas a la enseñanza de la física a nivel medio que a nivel universitario, y de hecho, los resultados obtenidos en el trabajo cotidiano con mis alumnos indican que pueden ser usadas en dicho ámbito.

Pero si contextualizamos esta propuesta en el ámbito de la educación universitaria, la experiencia de los alumnos universitarios en su formación previa en la construcción de modelos para explicar los fenómenos físicos suele ser tan pobre (Meneses [13]), que las actividades que se proponen en este trabajo resultan totalmente relevantes a la hora de

sentar las bases para un proceso de aprendizaje significativo.

En otras palabras, un conjunto de actividades como el que se propone en este trabajo, cimienta las bases para un aprendizaje profundo en términos fenomenológicos de varios conceptos magnéticos básicos, y se transforma en un andamiaje para una posterior conceptualización más rigurosa y abstracta de los mismos, necesaria en los procesos de enseñanza de nivel universitario.

Asimismo, la resolución de problemas dentro del formalismo matemático propio de cursos de este nivel, tendrá un nivel de riqueza conceptual que no se alcanzaría en cursos tradicionales, basados en el esquema habitual de clases teóricas, resolución de problemas matemáticos a partir de esas teorías, el estudio de los libros de texto mencionados anteriormente, y la realización de experiencias que apuntan fundamentalmente a la comprobación de leyes enunciadas por los docentes o los libros de texto.

A. Interacciones entre imanes permanentes

La idea de estos experimentos sencillos consiste en probar experimentalmente afirmaciones que los alumnos repiten por haberla leído en los libros o revistas, o bien por haberlas escuchado en documentales de ciencia, revistas de divulgación, etc.

Elementos necesarios:

- Imanes.
- Objetos de diferentes metales (de diferentes características magnéticas: ferromagnéticos, paramagnéticos, diamagnéticos).
- Soporte universal.
- Brazo universal.
- Ovillo de hilo.

¿Cómo podemos ayudar a nuestros alumnos a construir fenomenológicamente la idea de que cuando el polo norte de un imán se enfrenta al polo sur del otro, ambos se atraen? ¿Y qué cuando lo hacen enfrentando sus polos sur (o bien sus polos norte) se repelen? La siguiente es una serie de actividades diseñada con ese propósito.

En primer lugar, propongo que realicen algunas actividades exploratorias, con el objetivo de identificar que existen regiones en los imanes donde sus propiedades de

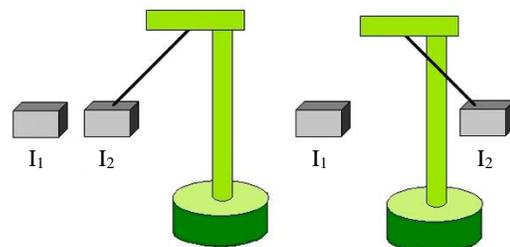


FIGURA 3. Esquema correspondiente al montaje de la experiencia A3.

atracción y/o repulsión se manifiestan con mayor intensidad. Conocemos estas regiones como *polos magnéticos*. Una vez identificadas estas regiones, procedemos de la siguiente manera:

Actividad 1 (A1): ¿Qué sucede cuando uno acerca un imán I_1 a un objeto metálico M que cuelga de un hilo, suspendido en el aire (Figura 2) ?

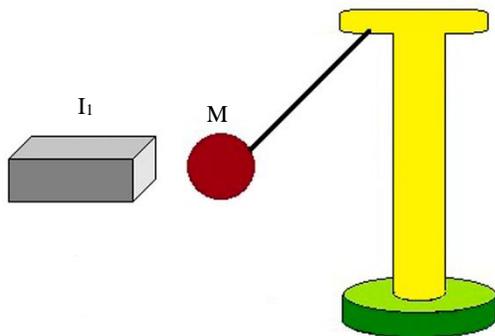


FIGURA 2. Esquema correspondiente al montaje de la actividad A1

Comentarios y sugerencias: En general, los alumnos esperan que un imán atraiga a los metales. Por lo que observar que un metal no es atraído por el imán (materiales no magnéticos), y mucho más, si es repelido (material diamagnético), los sorprenderá mucho.

De manera que es conveniente contar con objetos metálicos de sustancias tanto ferromagnéticas, diamagnéticas o paramagnéticas.

De todas maneras, les aclararemos a nuestros estudiantes que nos centraremos en estas primeras actividades con los objetos que son fuertemente atraídos por los imanes (o sea, los materiales ferromagnéticos), pero que discutiremos sucintamente que sucede con los otros materiales más adelante¹. El imán puede atraer, o no al objeto, inclusive puede llegar a repelerlo (podemos anticipar en este punto que posteriormente veremos con otras experiencias si afirmar las cosas de esta manera es correcto, o si en realidad el fenómeno es un poco más complejo).

Actividad 2 (A2): Si uno toma otro imán I_2 , y repite la prueba anterior, ¿podría haber diferencias con lo observado anteriormente? ¿Cuáles?

Comentarios y sugerencias: en líneas generales, se verificará que se repite lo observado en (A1), pero la intensidad de la interacción dependerá del imán

Actividad 3 (A3): Si se cuelga el imán I_1 de un hilo, y se le acerca I_2 , (Figura 3) ¿qué crees que sucederá ?

Comentarios y sugerencias: Dependiendo de cómo se los acerque, ambos imanes experimentarán una atracción o repulsión, según el caso.

Actividad 4 (A4): ¿Y si invierto los imanes (cuelgo I_2 del hilo y acerco I_1)? ¿Qué sucederá?

Actividad 5 (A5): Si repetimos las actividades anteriores con los objetos sin colgar de ningún soporte, y apoyados sobre una superficie horizontal, ¿Será lo mismo? ¿Porqué sí o porque no?

Comentarios y sugerencias: En este caso, la atracción o repulsión observada en las experiencias anteriores será menor que la observada en aquellas, debido a las fuerzas de roce. Inclusive, puede suceder que en determinadas circunstancias, los objetos que se movieron en las experiencias anteriores, no lo hagan en esta. Se invitará a los alumnos a discutir porque sucede esto, y se les pedirá que diseñen una experiencia en la que los objetos apoyados sobre la mesa se muevan.

No es difícil conseguir que los imanes no se muevan cuando, apoyados sobre una superficie horizontal, se los deja en libertad. Si colocamos ambos imanes muy cerca el uno del otro, se moverán (ya sea atrayéndose o repeliéndose). Pero basta con alejarlos uno del otro para que, a partir de una cierta distancia entre ambos, dejen de moverse cuando se los libera. Una alternativa es la hacer las experiencias sobre dos superficies lisas, una seca y la otra con una capa de aceite (haciéndola sobre esta última, después de haberse preguntado porque no se movían los objetos que antes sí lo hacían)

En principio, se supone que lo que se observa en las actividades anteriores forma parte del conocimiento general de los alumnos, pero los ítems que siguen deben ser llevados a cabo con más cuidado, prestando atención en especial a no ponerle nombre a los fenómenos y sus causas antes de realizar las experiencias, sino en sentido inverso.

Actividad 6 (A6): Es oportuno en este punto trabajar en grupos y darles a leer a cualquier referencia bibliográfica donde simplemente se enuncie la consabida frase “Polos iguales se repelen, polos iguales se atraen”.

Comentarios y sugerencias: La idea es plantearle al grupo el siguiente desafío: ¿Cómo podemos probar la veracidad de esa frase? ¿Cómo sé que no es al revés? ¿Qué experimento puedo diseñar para comprobarlo?

En mi experiencia, a veces los alumnos llegan a encontrar la forma de demostrar la validez de la afirmación a partir de experiencias como las que se describen en los párrafos de abajo. En otras ocasiones, dependiendo de las características del grupo, el docente tendrá que intervenir en mayor o menor medida para guiar la actividad, teniendo en claro la idea de no dar respuestas directas, sino ayudar a encontrarlas.

Para desarrollar una de las alternativas que podemos usar para demostrar la veracidad o no de la frase puesta a prueba, podemos servirnos de un tercer imán de referencia (I_R), en el que tendremos que identificar las dos regiones donde se concentra la interacción magnética. Marquemos una de esas

¹ Por razones de brevedad, no se incluyen en este trabajo este tipo de propuestas, que quedarán para un artículo posterior.

regiones con un símbolo (por ejemplo, una cruz) y la otra con otro diferente (un punto).

Tomando cada uno de los dos imanes I_1 e I_2 , busquemos cuál de los dos polos de estos imanes es repelido (o atraído) por uno de los polos de I_R (para fijar ideas, el marcado con un punto). Identifiquemos estos polos con letras, para fijar ideas, A en el caso de que sea atraído y B si es repelido

Podemos verificar que cuando acercamos I_1 e I_2 con su polo B al polo de I_R marcado con un punto, sufren la interacción opuesta que la que sufren los polos marcados por A.

Finalmente, ¿qué sucede si acercamos I_1 e I_2 con polos rotulados por letras iguales? ¿qué sucede si enfrentamos I_1 e I_2 enfrentados por polos rotulados por letras distintas?

La conclusión a la que debería arribar el grupo es que imanes enfrentados por polos opuestos se atraen y si se los enfrenta por polos iguales, se repelen. Pero nótese que todavía no hemos hablado de polos norte o sur. Recién ahora es conveniente introducir esa discusión.

Identificación de los polos del imán como Norte o Sur

Actividad 7 (A7): Explica el funcionamiento de una brújula.

Comentarios y sugerencias: Es importante alentar a los estudiantes a que expliquen cuál es la razón por la que una brújula queda siempre orientada en una determinada dirección. Si los estudiantes contestan “porque queda orientada por la acción del campo magnético de la Tierra” se les pedirá que expliquen con más claridad que quiere decir esa frase, y que es eso que llaman campo magnético de la Tierra, que tiene la propiedad de hacer mover la aguja de la brújula y que la misma quede orientada en una determinada dirección.

Actividad 8 (A8): ¿Qué sucede si acercamos la brújula a un clip o un clavo liviano de acero o hierro? ¿Y si la ubicamos cerca de limaduras de hierro? ¿Cómo explicas lo que ocurre?

Comentarios y sugerencias: Se observa que la brújula atrae o mueve estos objetos, al igual que lo hace un imán. El objetivo de esta experiencia es mostrar que la brújula es un pequeño imán.

En este punto, es interesante realizar un recorrido histórico acerca de la historia de los imanes y su uso en la construcción de brújulas, para que quede claro que en el fondo, una brújula no es otra cosa que un imán montado sobre un mecanismo con poco rozamiento, de manera que pueda reaccionar fácilmente cuando se lo coloca en una región donde existe un campo magnético, orientándose en la dirección de las líneas de campo.

Actividad 9 (A9): ¿Qué sucede con la brújula si la ubicamos en diferentes posiciones cerca de un imán? ¿Por

qué? ¿Tiene algo que ver con alguna de las actividades anteriores?

Comentarios y sugerencias: Aprovecharemos esta experiencia para introducir el concepto de *línea de campo magnético*. La brújula se orienta siguiendo las líneas del campo magnético del imán, porque justamente ella en sí mismo es un imán (un dipolo magnético).

Actividad 10 (A10): Cuando alejas una brújula de la influencia del campo magnético de cualquier imán, ¿qué sucede con ella? ¿esto depende de la brújula que uses, o es algo común a todas las brújulas? ¿cómo interpretas este hecho? Discute esto en función de lo que viste que sucedía cuando colocabas un imán a una cierta distancia de otro.

Comentarios y sugerencias: Todas las brújulas que podamos usar quedan orientadas aproximadamente en la dirección Norte-Sur. Esto significa que la tierra posee un campo magnético, que determina la dirección en la que queda alineada la brújula².

Actividad 11 (A11): Pensando en el último experimento, ¿se te ocurre alguna razón por la que los polos de la brújula puedan haber sido llamados norte o sur?

Comentarios y sugerencias: La razón es que el polo de la brújula que quedó apuntando aproximadamente hacia el norte geográfico se denominó norte y el opuesto, por la misma razón, sur.

Actividad 12 (A12): Combinando las actividades que hemos hecho, ¿Qué te está indicando lo discutido en el punto anterior acerca de la ubicación de los polos magnéticos de la Tierra?

Comentarios y sugerencias: Qué el Polo Norte geográfico se encuentra relativamente cerca del Polo Sur magnético (ya que este el polo que atrae al polo norte de la brújula) y viceversa.

Actividad 13 (A13): Las actividades que acabamos de hacer, ¿nos permiten identificar los polos norte y sur de un imán? ¿De qué manera?

Comentarios y sugerencias: Con la ayuda de una brújula, y recordando que polos iguales se repelen y polos distintos se atraen, se toma uno de los imanes de las primeras actividades (I_1 , I_2 ó I_R) y se identifican sus polos norte y sur.

B. Las interacciones a distancia y el concepto de campo: interacciones entre imanes y objetos de materiales magnetizables.

Cuando se intenta explicar sin una construcción fenomenológica la idea de que la razón por la que un imán atrae a un objeto de hierro, simplemente afirmando que el imán magnetiza el hierro y que por lo tanto, lo que está sucediendo es que se produce a partir de ese fenómeno una atracción entre imanes, es posible que nuestros alumnos

en objetos ferromagnéticos cercanos a la zona donde se realizan las experiencias propuestas.

² Es importante que el campo magnético de las brújulas con las que se trabaja no sea muy intenso, de manera que se minimice lo más que se pueda la influencia de campos magnéticos inducidos por este campo magnético

digan que sí con la cabeza, y hasta puedan repetir la explicación, incluso aplicándola a otros fenómenos.

Bastante más complejo es que añadamos a esta explicación primaria la razón física de la magnetización del objeto en términos de dominios magnéticos, o comparando el movimiento de los electrones en los átomos con el de pequeñas corrientes que producen campos magnéticos. En cursos universitarios, hasta podemos hablar de torques actuando sobre el momento orbital de los electrones, el spin, las órbitas de los electrones, etc., etc.

Desde el punto de vista del convencimiento profundo y de la generación de nuevos modelos sobre el fenómeno que se está estudiando, estas explicaciones pueden aportar bastante poco a nuestros estudiantes. Es posible que las puedan repetir mecánicamente, y hasta que estén convencidos de que las entienden, pero en cuanto uno pregunta cómo se muestra experimentalmente que lo que está sucediendo es una interacción entre imanes, uno permanente y el otro inducido, es muy probable que lo que la respuesta que se obtenga sea el silencio.

Las razones de este silencio pueden ser variadas. De hecho, puede ocurrir que algunos alumnos hayan construido un cierto nivel de conocimiento del tema (incluso que lo entiendan bastante bien), pero simplemente no se les ocurre como demostrar experimentalmente esos conocimientos o como elaborar una hipótesis, un modelo, y diseñar experimentos para comprobarlos. Es muy probable que se este tipo de situaciones sea habitual en aquellos alumnos (e incluso profesionales) que hayan recibido una formación en estos temas en cursos tradicionales. Pero, como bien se reflexiona en el artículo de Meneses Villagrà y Caballero Sahelices [13]:

*“Consideramos muy preocupante que un alumno, ya universitario, sea incapaz de realizar un posible diseño sobre cualquier cuestión que se le proponga. **Este hecho pone en evidencia la escasa importancia que se atribuye a este aspecto clave en toda investigación científica.** No se pretende que describan correctamente lo que ocurre en los experimentos sino que confeccionen diseños sencillos y susceptibles de ser realizados en el aula o laboratorio.*

Uno de nuestros objetivos de la asignatura consiste precisamente en potenciar una verdadera aplicación de la metodología científica, en donde aspectos claves y escasamente tenidos en cuenta como la emisión de hipótesis, planificación de diseños experimentales, confección de informes, etc. sean considerados en su justa medida”.

Si bien este aspecto de la formación en ciencias puede resultar particularmente difícil para nuestros alumnos, es sumamente importante generar situaciones áulicas como las que propongo en este trabajo, donde los estudiantes aprendan a desarrollar esta metodología propia de la actividad científica. El aprendizaje de estas habilidades requiere de una participación muy activa de los docentes, procurando en sus alumnos un aprendizaje espiralado de las mismas, en las que seguramente los docentes tendrán un papel más protagonista al principio del curso, pero sabiendo que deberán conducir un proceso de enseñanza-aprendizaje

que permita a los estudiantes ir logrando paulatinamente un mayor grado de autonomía en el proceso.

Es muy importante que el docente reflexione sobre este tipo de cuestiones y que se pregunte permanentemente cómo evitar caer en la tentación y el facilismo de dar las respuestas correctas, evitando a los estudiantes el necesario proceso de construir conocimiento por ellos mismos. Si bien una de las formas en las que aprendemos física es mirando las cosas que hacen los expertos, es necesario en todo momento buscar los elementos que puedan inducir procesos autónomos de construcción del conocimiento.

Además de lo señalado, me parece de suma importancia recurrir a la historia de la ciencia como fuente de estudio en el proceso de desarrollo del aspecto empírico de la ciencia. Por mencionar solamente uno de los recursos bibliográficos altamente recomendables, podemos señalar los excelentes libros de Hecht [16] y Cassidy *et al* [17]. Asimismo, hoy en día existe una enorme cantidad de recursos muy valiosos para la actividad docente desarrollados por una gran cantidad de colegas, que se pueden encontrar en Internet, en particular, en Youtube.

A continuación, propongo una serie de actividades dirigida a modelar el fenómeno de la atracción entre imanes y objetos magnetizables, a partir de experiencias sencillas.

Actividad 14 (A14): ¿Qué sucede si, habiendo colocado un imán en la cercanía de una brújula, colocas otro imán también en la misma región, en diferentes ubicaciones?

Discute con tus compañeros que se observará en la experiencia, justificando tus respuestas. Una vez hecho esto, comprueba experimentalmente la validez de las diferentes respuestas que se propusieron.

Comentarios y sugerencias: Para desarrollar esta actividad, propongo la siguiente metodología de trabajo:

- (a) Cada alumno deberá escribir sus respuestas en papel para la primera pregunta que se propone sin consultar a nadie.
- (b) Una vez hecho esto, se forman grupos, donde cada integrante del grupo expondrá a sus compañeros sus respuestas, se debatirán los argumentos de cada uno, y el grupo tratará de llegar a alguna respuesta en común, tratando de modelar lo mejor posible el fenómeno sin haber hecho el experimento, a partir de los conocimientos previos de los estudiantes. Si no sucediera esto, se aceptarán todas las respuestas que hayan quedado en pie luego del debate. El docente debe quedar al margen de esta etapa de discusión, y los alumnos tienen que llegar a un modelo usando únicamente sus ideas sobre el tema, sin usar ninguna fuente bibliográfica, ni tener acceso a internet.
- (c) Se hará una puesta en común de todos los grupos coordinada por el docente. Se evaluarán las fortalezas y debilidades de todos los modelos y resultados propuestos para la experiencia. Cada grupo deberá anotar todo lo que se derive de esta discusión.
- (d) Una vez finalizado el punto (c), el docente repartirá a cada grupo textos seleccionados sobre el campo magnético de los imanes permanentes, con figuras que muestren las líneas de campo. Cada grupo leerá el material, y a partir de esta lectura, analizará los modelos propuestos en el punto

anterior, y deberá elegir cuál es el mejor modelo que se ha propuesto, justificando la respuesta.

(e) Solamente después de haber terminado con los puntos anteriores, los alumnos realizarán la experiencia para comprobar sus hipótesis. A la luz de la experiencia, comprobarán la validez de la misma, y si lo que observan es diferente de lo esperado, deberán volver a reevaluar el o los modelos propuestos, para obtener uno que describa mejor lo que se observa en la experiencia.

(f) Se hará una puesta en común, coordinada por el docente, donde cada grupo expondrá sus conclusiones, y las someterá a la opinión del resto de los participantes. El docente solamente intervendrá para orientar la discusión.

(g) Cuando se haya terminado con el punto (f), si no se hubiera arribado a la predicción y modelo correcto, el docente mostrará la solución correcta al problema: *la brújula es un imán, que se orienta en todos los casos en la dirección definida por la suma del campo magnético total en cada uno de los puntos donde se coloca. Este campo magnético es la suma de los campos magnéticos de cada imán en el punto dado.*

Para las siguientes actividades, sugerimos trabajar con la misma metodología que en la Actividad 14.

Actividad 15 (A15): Si en lugar de un segundo imán colocas un clavo de hierro en los mismos puntos de la actividad anterior, sin tocar la brújula ¿qué crees que sucederá?

Comentarios y sugerencias: *El clavo de hierro se magnetiza, por estar ubicado en el campo magnético del imán, transformándose el mismo en un imán, por lo que deberían repetirse las conclusiones de la actividad A14.*

Actividad 16 (A16): Si se retira el imán de las cercanías de la brújula, pero se deja el clavo en cada una de las posiciones de las dos actividades anteriores, ¿qué sucederá?

Comentarios y sugerencias: *La brújula se orienta en la dirección del campo magnético terrestre, porque ante la ausencia de campo magnético externo, el clavo se desmagnetiza³.*

Actividad 17 (A17): ¿Y si el clavo fuera de acero?

Comentarios y sugerencias: Para realizar esta actividad, se deberá recurrir a un clavo de un acero tal que, una vez magnetizado, retenga parte de esa magnetización en ausencia de un campo magnético externo⁴. Al retener algo del magnetismo inducido, la brújula se orientará en la dirección del campo magnético total, dado por la suma del campo magnético terrestre y el campo magnético del clavo.

C. Una actividad con sentido doble: diferenciar intensidad de campo y fuerzas magnéticas y comprobar

³ Si bien uno podría argumentar que el campo magnético terrestre podría magnetizar el clavo, la intensidad de dicho campo es pequeña y no produce efectos mensurables a efectos de las actividades que se proponen en este trabajo.

la validez de la tercera ley de Newton aplicada a fenómenos magnéticos.

Cuando un imán atrae a un objeto de un material magnetizable, es habitual que los estudiantes expliquen este fenómeno en los términos que han sido descritos en la sección dedicada a las ideas previas sobre estos fenómenos. En particular, es habitual que, dependiendo del grado de desarrollo que tengan acerca de la naturaleza de las interacciones magnéticas.

- Piensen que el imán atrae al objeto, pero no al revés.
- La fuerza con la que el imán atrae al objeto, es mayor que la fuerza con la que el objeto atrae al imán.
- Confundan la intensidad de la fuerza magnética con la intensidad de campo magnético.

La siguiente es una serie de actividades pensadas para poner en tela de juicio estas concepciones alternativas y ayudar a construir otras más cercanas a las teorías aceptadas por la comunidad científica. Se puede trabajar con la metodología descrita en la sección anterior o directamente en grupos, con la asistencia del docente como orientador de las actividades. En cualquiera de los casos, es fundamental que los alumnos respondan a las preguntas antes de hacer las actividades, justificando en todos los casos las respuestas, en función de (de los) modelo(s) a los que hayan arribado en las actividades anteriores.

Para las dos siguientes actividades, se necesitan los siguientes materiales:

- un grupo de imanes (en lo posible, potentes, por ejemplo, como los de óxidos de tierras raras).
- Un bloque de madera de forma prismática rectangular.
- Un clavo de acero o hierro.
- Una tabla de madera lisa.

Actividad 18 (A18): Si uno coloca un imán y un clavo cerca el uno del otro, apoyados sobre la tabla y los deja en libertad ¿qué sucederá?

Comentarios y sugerencias: Es importante que en esta etapa del trabajo la masa del clavo sea bastante menor que la del imán, en vistas a que comparen los resultados cualitativos de esta actividad con las observaciones que hagan en la actividad siguiente.

⁴ Por ejemplo, consultar “*Materiales Magnéticos*”, de Juan C. Fernández, Apuntes de cátedra, Curso regular de Electromagnetismo B. Ingeniería en Electrónica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires.

Disponibles en <http://materias.fi.uba.ar/6209/download/4-Materiales%20Magneticos.pdf>

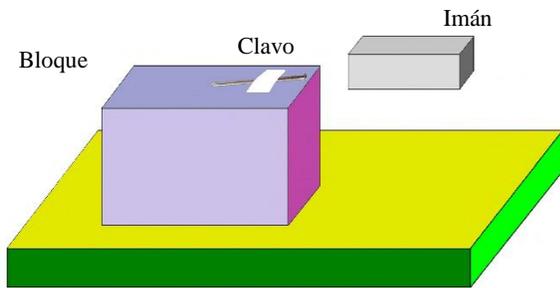


FIGURA 4. Esquema correspondiente al montaje de la experiencia A19.

Actividad 19 (A19): Si ahora sujeto el clavo sobre la parte superior de un bloque de madera, acerco el imán al conjunto bloque-clavo, colocándolo a la misma distancia a la que estaba en la Actividad 18, y vuelvo a dejarlos en libertad (Figura 4) ¿Qué crees que sucederá? En particular, ¿ocurrirá lo mismo que en la experiencia anterior o crees que se observarán cosas diferentes?

Justifica tus respuestas teniendo en cuenta todas las fuerzas que actúan sobre cada cuerpo.

Comentarios y sugerencias: Esta experiencia es bastante compleja, y conviene dedicarle bastante tiempo. Las fuerzas de atracción de origen magnético serán iguales en este caso, pero la fuerza de roce que actúa entre la mesa y el bloque es claramente mayor que la que había entre el clavo y la mesa, pero a su vez, la masa también es diferente. Por lo tanto, no es una experiencia que se pueda comparar directamente con la anterior. El motivo de ponerla en este lugar de la secuencia es justamente mostrar a los alumnos el cuidado que hay que tener al diseñar experiencias científicas para llegar a conclusiones válidas.

Un aspecto importante en esta experiencia, es mostrar a los estudiantes la importancia del control de variables en las experiencias científicas, para sacar conclusiones válidas. Por un lado, el aumento de la masa del sistema clavo-bloque produce modificaciones respecto a lo que se observa en la actividad 18, produciendo una disminución en la aceleración del sistema, pero también aumenta la fuerza de roce (se puede medir con un dinamómetro, por ejemplo), hecho que opera en la misma dirección que el aumento de masa. Por lo tanto, no tenemos forma de saber cuanto influye cada factor en la disminución de la aceleración.

Independientemente de esto, se observa un efecto importante: si la masa del bloque es lo suficientemente importante, se moverán tanto el imán como el sistema clavo-bloque, poniendo en tela de juicio la idea de que es el imán el que atrae al clavo, mostrando que en realidad ambos se atraen entre sí. No obstante esto, dependiendo de las variables en juego, lo que se observa puede inducir a los alumnos a seguir creyendo que el imán atrae al objeto con una fuerza mayor que la fuerza con la que el objeto atrae al imán.

En este momento, es oportuno recordar la tercera ley de Newton y preguntarles si creen que se cumplirá en este

caso o no, y por qué. Luego de escuchar las argumentaciones sin intervenir, sugiero proponerles la actividad 20 y a continuación, la 21. Para llevarlas a cabo, se necesitan los siguientes elementos:

- Un grupo de imanes (en lo posible, potentes, como los de óxidos de tierras raras);
- Dos bloques iguales de madera, de forma prismática rectangular, con al menos una de sus superficies bien pulidas;
- Plastilina,
- Un clavo de acero o hierro;
- Una tabla de madera lisa,
- Una balanza electrónica de precisión 0,1 mg.

Actividad 20 (A20): “Bueno...hemos escuchado diferentes ideas. Supongan que acordamos en que efectivamente se cumple en este caso la tercera ley de Newton, y tienen que proponer una experiencia para convencer a alguien de que, efectivamente, tenemos razón. ¿Qué experiencia propondrían?”

Comentarios y sugerencias: Sin recurrir a instrumentos de medición que nos permitan determinar tiempos, velocidades y aceleraciones, uno puede recurrir a la segunda ley de Newton para diseñar una experiencia que nos permita comprobar en este caso el cumplimiento de la tercera. Como lo que determina la aceleración de cada cuerpo es la suma de las fuerzas externas que actúan sobre ellos y sus masas, tenemos que asegurarnos de que ambas cosas sean iguales en todo momento de su recorrido, y de esta manera, se moverán exactamente igual, chocando en el punto medio del segmento que une los puntos de partida.

Así, tomando como hipótesis que es válida la tercera ley de Newton, la fuerza magnética que ejerce el imán sobre el clavo es en todo punto del recorrido, la misma que la que ejerce el clavo sobre el imán. Debemos asegurarnos que la fuerza de roce sea la misma para ambos objetos.

Para ello, debemos montar imán y clavo sobre bloques iguales en forma y dimensiones, del mismo material, y que tengan una superficie igual de pulida. Si hay diferencia de masa entre el imán el clavo, se agrega plastilina en el bloque que corresponda para igualar las masas, ya que la fuerza de roce depende de la normal, y está, a su vez, depende de las masas. Este hecho, además, nos garantiza que las masas son iguales.

Una vez hecho esto, se hace la experiencia, que debe resultar en el resultado esperado. La conclusión es que *imán y clavo se atraen con la misma fuerza, independientemente del hecho de que es el imán el que induce la magnetización en el clavo.*

Actividad 21: ¿Qué sucedería si agrego más masa al sistema bloque-clavo?

Comentarios y sugerencias: Nuevamente, se discute lo que puede llegar a ocurrir en la experiencia, donde cada resultado predicho deberá ser justificado. Al hacer la experiencia, el sistema Bloque-Imán y el sistema Bloque-Clavo chocarán en un punto más cercano al punto de partida de este último.

VI. CONCLUSIONES

Una de las características más importante que deben poseer procesos de enseñanza-aprendizaje de Física de carácter constructivista de nivel universitario, es el de ser congruentes con el aspecto empírico de la ciencia, brindando a los estudiantes que toman cursos de nivel introductorio la posibilidad de construir el conocimiento en un campo como el del magnetismo, a partir de experiencias sencillas, que permitan la construcción de modelos con anclaje fuertemente fenomenológico, donde se llegue a definir la terminología apropiada para describir y explicar los fenómenos físicos a partir de las experiencias, y no al revés.

Propuestas didácticas como la que se ha presentado en este trabajo son una de tantas las posibles alternativas para desarrollar este tipo de procesos formativos, tan necesarios para una sólida formación científica de base en los estudiantes universitarios.

Es muy importante que los docentes que tengan a cargo cursos introductorios de física a nivel universitario (no solamente en el campo del magnetismo, sino en cualquier campo de la física) se comprometan con el desarrollo de propuestas de este tipo, aunque naturalmente, las mismas requieren de un gran compromiso de los docentes.

Sin embargo, el nivel que han alcanzado hoy en día los aportes de la investigación en la didáctica de las ciencias naturales, en particular en lo que hace al conocimiento de las concepciones alternativas de los alumnos, así como el estudio de la enseñanza por modelos (por mencionar los dos campos de la didáctica de las ciencias que me parecieron más significativos para construir esta propuesta), y el conocimiento de la historia de la Física, brinda elementos muy valiosos que sin duda alguna son de inestimable ayuda para la tarea docente en los tiempos que corren, y las exigencias que nos plantean como formadores.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Omar G. Benvenuto, por la lectura cuidadosa del trabajo y sus sugerencias para mejorarlo.

A mis alumnos, sin cuyo aporte este trabajo hubiera sido imposible. En particular, a los alumnos de los Profesorados de Física y de Química, que han cursado durante los años 2010 y 2011 el Taller de Práctica Docente en la Enseñanza de las Ciencias Experimentales, materia que está a mi cargo en la Universidad Nacional de Río Negro (en la que se implementaron la mayoría de las propuestas que presento en este trabajo), por desafiarme a mejorar continuamente mi práctica docente.

REFERENCIAS

- [1] Alonso, M. y Finn, E.J., *Física: Volumen II. Campos y Ondas*. (Addison Wesley Iberoamericana, México, 1987).
- [2] Halliday, D., Resnick, R. y Krane, K.S., *Física 2*. (Compañía Editorial Continental, México, 1996).
- [3] Sears, F.W., Semansky, M.W., Young, H.D.; y Freedman, R., *Física universitaria con física moderna*. (Addison Wesley Iberoamericana, México, 2005).
- [4] Jackson, J. D., *Classical Electrodynamics*. (John Wiley & Sons, New York, 1998).
- [5] Panofsky, W. y Phillips, M., *Classical electricity and magnetism*. 2da. Edición. (Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1962).
- [6] Greca, I. M. y Moreira, M. A., *Modelos mentales y aprendizaje de física en electricidad y magnetismo*, Enseñanza de las Ciencias **16**, 289-303 (1998).
- [7] Gellon, G.; Rosenvasser Feher, E.; Furman, M. y Golombek, D., *La ciencia en el aula. Lo que nos dice la ciencia sobre cómo enseñarla. Capítulo 1: El aspecto empírico de la ciencia*. (Paidós, Buenos Aires, 2005).
- [8] Morrison, M. y Morgan, M. S., *Models as mediating instruments*, en *Models as mediators*, (Cambridge University Press, Cambridge, 1999).
- [9] Galagovsky, L. y Adúriz-Bravo, A., *Modelos y analogías en la enseñanza de las ciencias naturales. El concepto de modelo didáctico analógico*, Enseñanza de las ciencias **19**, 231-242 (2001).
- [10] Justi, R., *La enseñanza de ciencias basada en la elaboración de modelos*, Enseñanza de las Ciencias **24**, 173-184 (2006).
- [11] Johnson-Laird, P., *Mental models*. (Cambridge University Press, Cambridge, 1983).
- [12] Guisasola, J., Almudí, J.M. y Zubimendi, J.L., *Dificultades de aprendizaje de los estudiantes universitarios en la teoría del campo magnético y elección de los objetivos de enseñanza*, Enseñanza de las Ciencias **21**, 79-94 (2003).
- [13] Meneses Villagrà, J. A. y Caballero Sahelices, M. C., *Secuencia de enseñanza sobre el electromagnetismo*, Enseñanza de las Ciencias **13**, 36-45 (1995).
- [14] Guisasola, J., Almudí, J.M. y Ceberio, M., *Concepciones alternativas sobre el campo magnético estacionario. Selección de cuestiones realizadas para su detección*, Enseñanza de las Ciencias **21**, 281-293, (2003).
- [15] Guisasola, J., Almudí, J. M.; Zubimendi, J. L. y Zuka, K., *Campo Magnético: diseño y evaluación de estrategias de enseñanza basadas en el aprendizaje como investigación orientada*, Enseñanza de las Ciencias **25**, 303-320 (2005).
- [16] Hecht, E., *Física en Perspectiva*. (Editorial Addison-Wesley Iberoamericana, S. A., México, 1987).
- [17] Cassidy, D., Holton, G. and Rutherford, J., *Understanding physics*. (Springer Verlag, Nueva York, 2002).