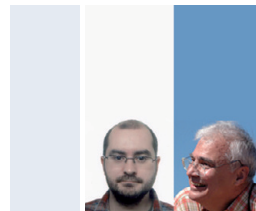


Las líneas de fuerza de Faraday: una representación mental muy útil en la enseñanza



Esteban Moreno Gómez*

VACC-CSIC. El CSIC y la Fundación BBVA en la Escuela

J. M. López Sancho

IFF-CSIC. El CSIC y la Fundación BBVA en la Escuela

Palabras clave

Faraday, campo, magnetismo, líneas de fuerza, modelo, herramienta mental, enseñanza.

Resumen

En este trabajo presentamos el nacimiento de uno de los modelos más importantes en la historia de la física, el de las líneas de fuerza de Faraday, que fue utilísima herramienta mental en las investigaciones de Maxwell sobre la naturaleza de la luz, la relatividad de Einstein y el actual modelo de campos. Intentaremos, pues, describir la imagen mental que empleó Faraday para reducir las fuerzas a distancia que aparecen en masas, cargas y polos magnéticos a un modelo de fuerzas mecánicas, cuyo conocimiento intuitivo estaba generalizado en su época. Es, en realidad, la segunda parte de una publicación anterior en la que presentábamos un nuevo instrumento, muy sencillo, que ayuda a materializar las líneas de fuerza de Faraday, para las que los seres humanos no disponemos de sentidos, y que constituyen la única representación de un campo, sea cual sea su naturaleza.

Introducción

La idea de que la historia de la ciencia sigue la senda del constructivismo no solo es aceptada por los historiadores de la ciencia sino que la sucesión de conceptos, definiciones y modelos se toma como paradigma del método constructivista. Igualmente extendida está la idea de la utilidad didáctica de conocer modelos científicos que han sido superados. Si bien en algunos casos puede resultar superfluo para los alumnos siempre es útil para los profesores ya que permite evitar explicaciones erróneas y caminos sin salida que se han dado, en muchas ocasiones, en la historia de la ciencia.

.....
* E-mail del autor: esteban@orgc.csic.es.

Los cambios de paradigma, cuyo conocimiento es imprescindible para los que se dedican a la actividad docente, muestran la belleza de los resultados de la creatividad humana y los difíciles procesos de aceptación por la sociedad de las nuevas ideas, como nos explica Kuhn cuando estudia la estructura de las revoluciones científicas.

En este segundo escrito sobre la materialización y modelización del campo magnético profundizaremos en el modelo mecanicista de línea de fuerza utilizado por Faraday como herramienta mental en sus investigaciones.

Breve historia del magnetismo

Los efectos de los imanes sobre los materiales ferromagnéticos fueron descritos por Tales de Mileto en el siglo XI a. C., tan solo doscientos años después de la guerra de Troya. Platón también hace alusión a las propiedades de la piedra imán en sus escritos poniendo en boca de Sócrates la descripción de una de sus extraordinarias propiedades (**Imagen 1**):

Esta piedra no solo atrae los anillos de hierro, sino que les comunica la virtud de producir el mismo efecto y de atraer otros anillos, de suerte que se ve algunas veces una larga cadena de trozos de hierro y de anillos suspendidos los unos de los otros, y todos estos anillos sacan su virtud de esta piedra.

En el siglo I d. C. el historiador y divulgador Plinio el Viejo, contemporáneo de Julio Cesar y Cicerón, nos introduce en el mundo de los efectos magnéticos utilizando un cuento, el del pastor Magnes, en el que unas misteriosas piedras negras atraen los clavos de las botas del pastor y los cercos de las ovejas, hechos de hierro. Por esa misma época Tito Lucrecio Caro describe en su poema *De Rerum Natura (La Naturaleza de las Cosas)* que ha visto moverse trozos de hierro dentro de un recipiente de bronce cuando en el exterior se movía un trozo de piedra imán, poniendo de manifiesto que las propiedades magnéticas atraviesan los materiales no magnéticos.

Pero Lucrecio, además, observa que *algunos trozos de hierro que han permanecido en contacto con la piedra imán adquieren las propiedades de esta de forma permanente*, describiendo por primera vez en la historia un procedimiento para construir imanes.

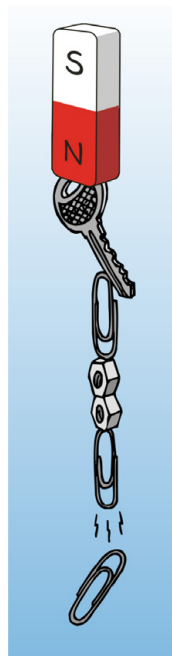


Imagen 1. Magnetismo por inducción. Modificado de López Sancho et al. (2005).

Una larga serie de experimentos, entre los que destacan los de Alexander Neckam, dieron lugar a uno de los instrumentos científicos más útiles, la brújula. Marco Polo la encontró también en sus viajes a oriente, donde se fabricaban dándoles la forma de una cuchara.

En el siglo XIII se comienza a pensar sobre la ciencia como una forma especial de conocimiento, el mayor exponente de este pensamiento fue Roger Bacon (conocido como *doctor mirabilis*, doctor admirable), cuyo movimiento filosófico daría lugar, tres siglos más tarde, a la Revolución científica.

Ese mismo siglo se escribe el primer artículo científico sobre magnetismo con el título: *Epistola Petri Peregrini de Maricourt ad Sygerum de Foucaucourt, militem, de magnete*. Su autor es también conocido como Pedro Peregrino quien lo redactó durante el asedio de la plaza fuerte de Lucera, en sur de Italia, el día ocho de agosto del día del Señor 1269.

En el siglo XVI Gilbert, médico de la Reina Isabel I de Inglaterra, recopila los conocimientos que del magnetismo se tenían en su libro, *De Magnete*, dando paso a un periodo en el que son conocidas las leyes del magnetismo y sus principales propiedades (**Imagen 2**).

En 1800 Volta inventa un aparato que produce electricidad sin necesidad de frotar objetos y por ello Napoleón lo nombra Conde de Volta. Veinte años más tarde, en Dinamarca, Oersted descubre que la circulación de cargas eléctricas produce un campo magnético igual al de los imanes, y Ampere describe ese campo por medio de ecuaciones: el magnetismo de ha unido a la electricidad. Pero falta un modelo que proporcione un soporte mental a ambos tipos de fenómenos.

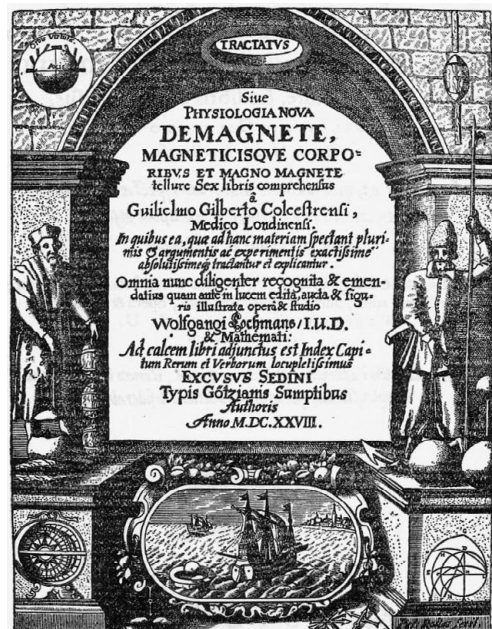


Imagen 2. Portada de *De Magnete* en la edición de 1628.

El modelo de magnetismo de Faraday

Faraday (**Imagen 3**), autodidacta en gran medida y dotado de una mente intuitiva, se planteó el problema de inventar modelo intuitivo de la electricidad y el magnetismo.

En este trabajo nos ocuparemos únicamente del segundo, ya que el caso de la electricidad es mucho más sencillo debido a que las cargas positivas y negativas tienen existencias separadas.

Faraday es consciente de que los modelos analógicos tienen una utilidad limitada, pero comprende su utilidad, al menos, en los primeros contactos con un nuevo fenómeno. Así, el modelo que asemeja la corriente eléctrica a la de un líquido circulando por una tubería es especialmente útil cuando los alumnos se enfrentan por primera vez con circuitos de corriente continua. Y se comprende la razón por la que a la carga que circula se la llama *corriente*, a lo que se opone a la circulación, resistencia, y llamamos diferencia de potencial a lo que, en el caso de una tubería, es la diferencia de presión.

Por eso Faraday piensa que un modelo mecánico del magnetismo sería útil para acostumbrarse al comportamiento de los imanes, predecir lo que va a ocurrir en experimentos nuevos y, sobre todo, detectar las diferencias de comportamiento que llevan a nuevas leyes. Así lo explica en una de sus publicaciones:

It is not to be supposed for a moment that speculations of this kind are useless, or necessarily hurtful, in natural philosophy. They should ever be held as doubtful and liable to error and to change; but they are wonderful aids in the hands of the experimentalist and mathematician. For not only are they useful in rendering the vague idea more clear for the time, giving it something like a definite shape, that it may be submitted to experiment and calculation; but they lead on, by deduction and correction, to the discovery of new phaenomena, and so cause an increase and advance of real physical truth, which, unlike the hypothesis that led to it, becomes fundamental knowledge not subject to change.

Con este razonamiento presenta su modelo de *líneas de fuerza* que examinamos a continuación, junto con la justificación del mismo.

Partiremos, como hemos dicho, del punto en que dejamos nuestro trabajo experimental en el primer artículo dedicado a este tema, en el que se había puesto de manifiesto la existencia de líneas de fuerza en el espacio que rodea a un imán; es-



Imagen 3. Óleo de Faraday por Thomas Phillips.

tas líneas se materializaban mediante el uso de una aguja de brújula suspendida por medio de un hilo y libre de seguir las líneas magnéticas de fuerza presentes en cualquier punto del espacio (**Imagen 4**).

Faraday ideó una *herramienta mental* de las líneas de fuerza (en el sentido que a esta frase le asignaba Vygotsky). Aunque no describió el modelo de forma pormenorizada, nosotros intentaremos adivinarlo y exponerlo de forma sencilla.

Uno de los experimentos más sorprendentes es el de materializar las líneas de fuerza por medio de limaduras de hierro. Siempre nos impresiona ver cómo van colocándose en unos caminos invisibles, pero que sin duda existen. Los alumnos de edades tempranas asocian el fenómeno a lo que ocurre cuando se revela una frase escrita con tinta invisible (zumo de limón) cuando calentamos el papel en el que está escrita y, ciertamente, las limaduras de hierro revelan la existencia de algo que realmente debe estar allí, aunque oculto a nuestra vista.

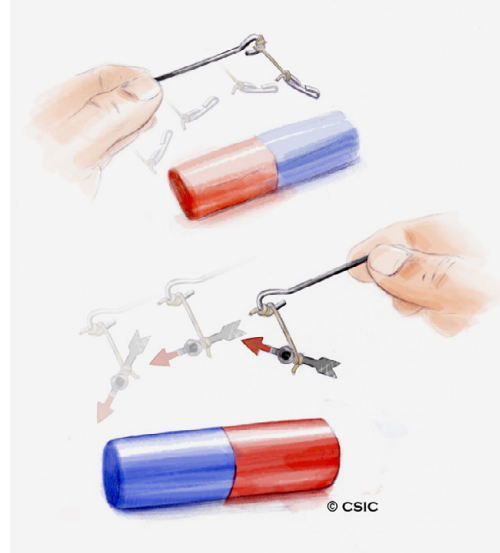


Imagen 4. Ilustración de las experiencias propuestas en Moreno & López (2011).

Faraday dibuja las líneas de la manera siguiente (**Imagen 5**) y coinciden con los caminos que señala nuestra aguja cautiva cuando se sitúa en las inmediaciones del imán.

En principio Faraday se contentó con dibujar las curvas y enunciar tres hipótesis:

- 1) Un imán situado en el espacio, alejado de campos magnéticos, produce líneas de fuerza o de campo que salen por el polo norte del imán y entran por el polo sur. Estas líneas se colocan unas sobre otras de manera que llenen ordenadamente todo el espacio, sin dejar espacios entre ellas y de manera que su longitudud

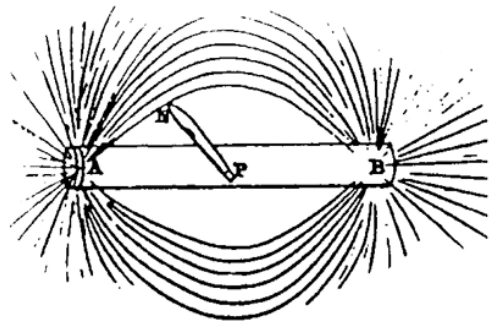


Imagen 5. Ilustración de Faraday sobre las líneas de fuerza entorno a un imán (1855).

sea la menor posible, como si se tratara de tubos de diámetro microscópicos. Todas las líneas elásticas están en tensión, dotando al espacio de una cierta energía, debida al campo.

Debemos darnos cuenta de que este enunciado dota a las líneas de una naturaleza vectorial asignándolas un sentido determinado.

2) Un imán situado en un campo magnético siente una fuerza que lo lleva a una posición en la que las líneas de fuerza del campo entren por su polo sur y salgan por su polo norte.

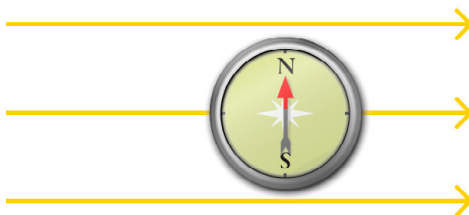
3) Las líneas de fuerza deformadas se comportan como hilos elásticos que tienden a recuperar su forma y longitud inicial por medio de la aparición de fuerzas que responden a la ley de Hooke de tensión-deformación.

Provistos de estas hipótesis de trabajo procedemos a estudiar lo que le ocurre a una brújula (**Imagen 6**) en una región del espacio solo sometido al débil campo magnético terrestre en el que se orientará en la dirección norte-sur.



Imagen 6. Ilustración de una brújula orientada según el campo magnético terrestre.

Supongamos ahora que situamos un imán mucho más potente que el de la Tierra en las proximidades de nuestra brújula; aparecerá un campo magnético (**Imagen 7**) que podemos representar por las líneas de fuerza y que orientará la aguja de la brújula cuando responda a su presencia.



Campo magnético

Imagen 7. Situamos nuestra brújula en el campo magnético generado por el imán.

Por efecto de la presencia de esas líneas de fuerza los dos polos del pequeño imán (aguja de la brújula) sufren sendas fuerzas que lo empujan en sentidos contrarios.

Estas fuerzas ejercen un par que obliga a la aguja a girar hasta situarse en una dirección en la que el momento del par sea nulo (**Imagen 8**).

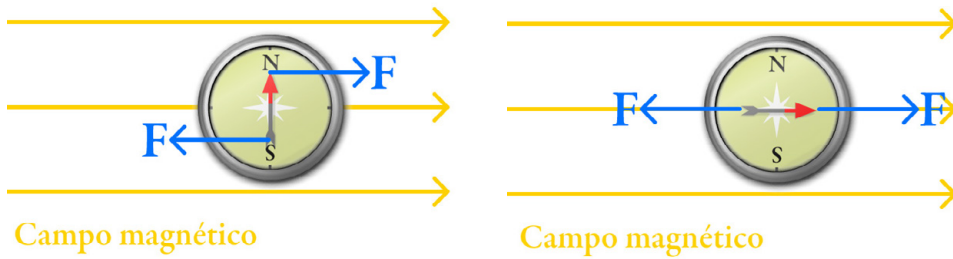


Imagen 8. La aguja de la brújula (imán) sufre un par de fuerzas y se orienta conforme al campo magnético.

En este sencillo experimento se condensa toda la información que necesitamos para construir nuestro modelo.

Observamos que la línea de fuerza arrastra al polo norte de la brújula en su misma dirección y sentido y al polo sur en sentido contrario.

Para explicarlo por medio de un modelo mecánico, Faraday postuló la existencia de unos hilos (de naturaleza magnética e indetectables, por lo tanto, para nosotros). Estos hilos están dotados de gran elasticidad, como los anillos de caucho que estamos acostumbrados a ver pero con mayor resistencia al cambio de forma, de manera que si se alargaban o deformaban aparecía una fuerza elástica que tendía a obligarlos a recuperar su forma y tamaño iniciales. Fotografiamos y representemos la situación que nos indica la primera hipótesis (**Imagen 9**).



Imagen 9. Fotografía y representación de los «hilos» (líneas de fuerza del campo) entorno a un imán.

Para simplificar nuestra exposición podemos considerar una única línea de fuerza. Supongamos ahora que introducimos la aguja magnética en el campo del imán. La línea de fuerza que hemos aislado se encontrará con nuestro pequeño imán y se deformará para cumplir con la segunda hipótesis: entrar por el polo sur de la aguja y salir por el norte. Pero, aplicando la tercera hipótesis, esta deformación provoca la aparición de dos fuerzas que se ejercen en los polos de la aguja y que tienden a recuperar la forma y longitud inicial de la línea de campo.

Pero, y esto es importante, este es un modelo construido *ad hoc* para explicar el efecto de un campo sobre un imán. Para validarlo como digno de llevar ese nombre debemos llevar a cabo el segundo paso en la vida de un modelo: comprobamos si es efectivo en una situación diferente de la que ha dado origen a su nacimiento, en este caso a la fuerza que aparece entre dos imanes cuando se aproximan.

Si acercamos un polo norte a un polo sur de otro imán, las líneas de fuerza que salen del polo norte del imán de la derecha (arrastrándolo hacia la izquierda) irán directamente al polo sur del segundo imán en vez de ir al polo sur del primero, acortando así su longitud. Esta distribución de líneas se puede detectar con nuestra aguja cautiva, como ilustramos en la **Imagen 10**.

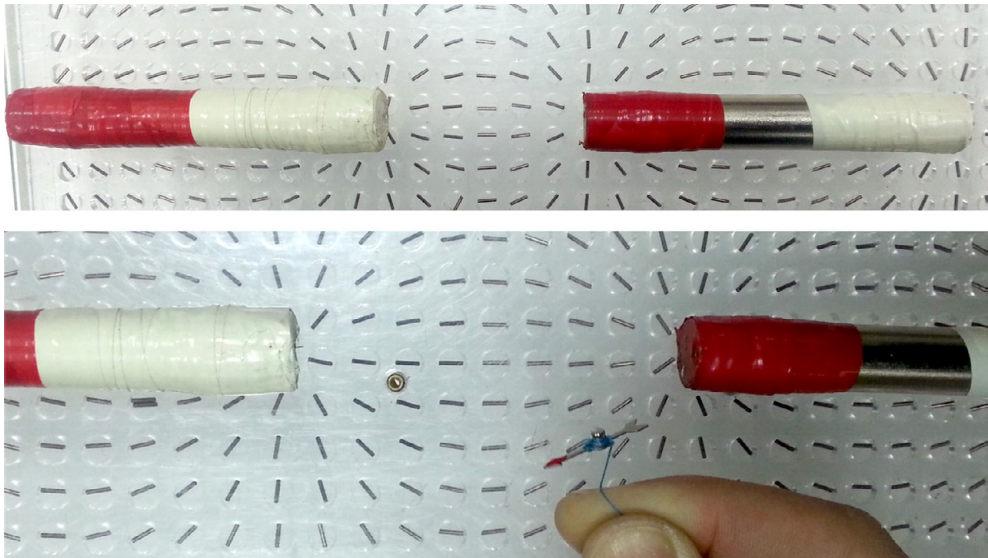


Imagen 10. Distribución de líneas de fuerza al acercar dos polos contrarios y detección del campo con la aguja volante.

La interacción entre las líneas elásticas del campo provoca la aparición de una fuerza que tiende a acercar ambos imanes, de acuerdo con lo que se observa al realizar el experimento (**Imagen 11**).

En el caso en el que se encuentren dos polos iguales encontrados y los forcemos a acercarse, las líneas de fuerza se deformarán. Como no pueden ocupar el mismo lugar se deformarán apareciendo una fuerza elástica de repulsión entre los imanes, de acuerdo con lo observado. Esta distribución de las líneas de fuerza se hace observable utilizando nuestra aguja volante (**Imagen 12**).



Imagen 11. Ilustración del comportamiento de las líneas de fuerza cuando acercamos dos imanes por polos opuestos e ilustración de la fuerza de atracción resultante.

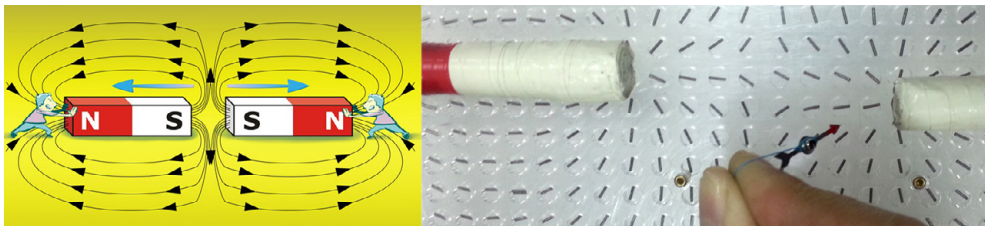


Imagen 12. Ilustración del comportamiento de las líneas de fuerza cuando acercamos dos imanes por polos iguales y fotografía del fenómeno con nuestra aguja volante.

Una comprobación más

Finalmente queremos señalar la extraña aparición de un patrón que muestra a las líneas de campo separadas cuando se realiza el experimento de las limaduras de hierro en el campo de un imán.

La aplicación de las hipótesis de Faraday predice que las líneas de fuerza ocupan **todo el espacio** que abarca el campo, pero esto entra en contradicción con la observación de la estructura en la que se disponen las limaduras de hierro (**Imagen 13**).

Aplicaremos las hipótesis de las líneas de fuerza al caso de las limaduras de hierro y veremos lo que predicen.

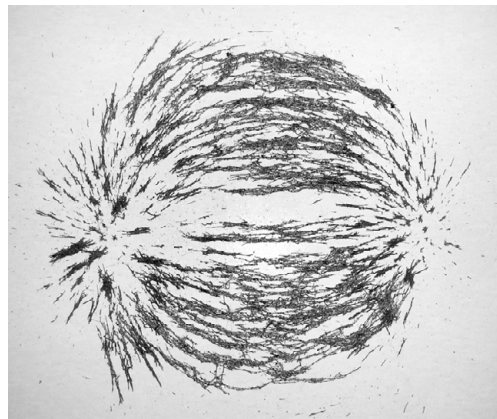


Imagen 13. Disposición de las limaduras de hierro entorno a un imán. Aparente contradicción con una de las hipótesis de Faraday.

Consideremos el campo magnético que rodea a un imán. Para mayor claridad en la exposición representaremos solo tres líneas adyacentes del campo del imán permanente (**Imagen 14**).

Cuando situamos una limadura de hierro en el campo magnético esta pasa a comportarse como un imán debido al magnetismo inducido (en realidad una reorientación de los dominios de Weiss). Este pequeño imán produce sus propias líneas de fuerza (**Imagen 15**) que, debido a su carácter vectorial se suman a las del campo principal de la siguiente forma: las líneas debidas al imán inducido en la limadura se oponen a las del campo principal, por lo que debilitan estas en el espacio superior e inferior al ocupado por la limadura y lo refuerzan en los extremos de esta, produciendo la conocida concentración de las líneas de fuerza resultantes.

Por esa razón las limaduras siguientes se sitúan preferentemente a lo largo de las líneas del campo principal, evitando colocarse por encima o debajo de la limadura. Esto provoca la estructura rayada de la distribución total de limaduras que se observa en el experimento (**Imagen 16**).

Nota

Queremos señalar que el primer modelo de Faraday relativo a los campos supone que la magnitud relevante en las interacciones es la fuerza. Las tres interacciones conocidas entonces, gravitación, electricidad y magnetismo, se

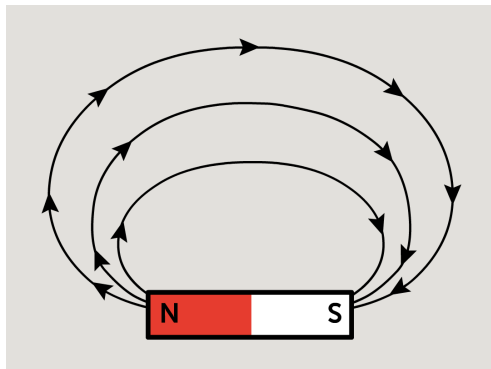


Imagen 14. Ilustración de tres líneas del campo magnético generado por un imán.

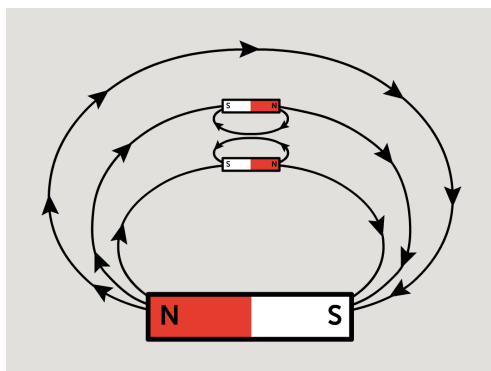


Imagen 15. Ilustración dos limaduras de hierro interaccionan con las líneas de fuerza del imán. Para simplificar la imagen solo se muestran tres líneas del imán y una línea de cada limadura.

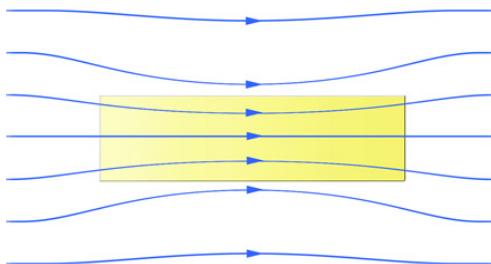


Imagen 16. Ilustración de la disposición de las líneas del campo del imán entorno a una limadura de hierro: las líneas del campo generado por el imán tienden a concentrarse en los extremos de la limadura disminuyendo su densidad por encima y debajo de esta.

propagan por el espacio por medio de las líneas de fuerza, con la única diferencia entre unas y otras en la fuente de las mismas y la naturaleza de la magnitud sobre la que actúan: masa, carga eléctrica y carga magnética.

Algunas consideraciones sobre el concepto de campo

Lo verdaderamente interesante del ejercicio que acabamos de realizar es que refleja la forma en que se construye la ciencia.

En las palabras anteriormente citadas de Faraday, las representaciones mentales no solo son útiles porque ayudan a aclarar y organizar los hechos observados, sino porque:

...mediante deducciones y correcciones nos ayudan a descubrir nuevos fenómenos contribuyendo al avance real de la ciencia y estas hipótesis se pueden convertir en conocimiento fundamental...

Podemos decir que el concepto de campo nace de dividir en dos partes la expresión de la fuerza entre dos cargas eléctricas o la de fuerza entre dos masas (**Imagen 17**).

CAMPO ELECTROSTÁTICO DESDE LA LEY DE COULOMB

$$\vec{F} = k \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \Rightarrow F = \frac{\boxed{k \cdot q_1}}{r^2} \cdot q_2 \Rightarrow \vec{F} = \vec{E} \cdot q_2 \Rightarrow \vec{F} = \vec{E} \cdot q \Rightarrow \vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

\vec{E} = campo electrostático

CAMPO GRAVITATORIO DESDE LA LEY DE LA GRAVITACIÓN DE NEWTON

$$\vec{F} = G \cdot \frac{M \cdot m}{r^2} \Rightarrow \vec{F} = G \cdot \frac{\boxed{M}}{r^2} \cdot m \Rightarrow \vec{F} = \vec{g} \cdot m \Rightarrow \vec{g} = \frac{\vec{F}}{m}$$

\vec{g} = campo gravitatorio

Imagen 17. Desarrollo algebraico de los campos eléctrico y gravitatorio a partir de la Ley entre cargas de Coulomb y de la Ley de Gravitación de Newton.

El campo es una modificación del espacio, un vector asociado a cada punto del espacio y que aparece en presencia de una masa o una carga.

La conceptualización de esta magnitud nos permite asignar a cada punto del espacio un vector campo, independientemente de que exista en ese punto una carga o una masa sobre la que actúe.

Podemos preguntarnos si existe realmente ese campo puesto que no sabemos de él hasta que «ponemos» una carga o una masa: la respuesta es positiva pues la propia variación de un campo produce otro campo.

Maxwell utiliza este campo eléctrico de tal manera que, cuando varía, aparece un campo magnético, también imposible de observar sin la presencia de un imán o un hilo conductor (antena), que, si a su vez varía, da lugar a la aparición de un nuevo campo eléctrico en un proceso sin fin que constituye una onda electromagnética.

Es una forma de razonar matemática en la que, como señaló Faraday, se deja que tome el mando la lógica que subyace en el formalismo, pero ese es parte del encanto de las matemáticas.

Conclusiones

A lo largo de estos dos trabajos publicados en esta Serie hemos pretendido ayudar al profesorado de las primeras etapas educativas a tener una visión lo más completa y manejable posible del fenómeno del magnetismo.

Nuestra experiencia con maestros y profesores nos indica que si bien el uso de imanes en las aulas está aceptado como herramienta didáctica de primer orden, las actividades desarrolladas pocas veces se llevan a sus «últimas consecuencias», y muy rara vez se aborda el concepto de campo magnético.

Respetando y entendiendo que es el docente el que debe decidir hasta donde conducen (que conceptos pretende que asimilen los alumnos) las experiencias con imanes, creemos que muchas veces se infrutilizan estos materiales y no se llegan a abordar conceptos claves del magnetismo. Esperamos que estos dos trabajos contribuyan a mejorar la metodología y práctica educativa con imanes.

Agradecimientos

Esta publicación forma parte de las actividades de comunicación social de la ciencia previstas en el Proyecto *El CSIC y la Fundación BBVA en la Escuela 2013-2015* que cuenta con la financiación de la Fundación BBVA.

Referencias bibliográficas

- FARADAY, MICHAEL. *Experimental Researches in Electricity*. Philosophical Transactions of 1846-1852. Vol. 3. 1855. [En línea]: <http://books.google.es/books?id=yzgLAAAAYAAJ&hl=es&source=gbs_navlinks_s> [Consulta: septiembre 2014].
- IEEE Global History Network. *Michael Faraday*. [En línea]: <http://www.ieeeahn.org/wiki/index.php/Michael_Faraday> [Consulta: septiembre 2014].
- KUHN, THOMAS S. *La estructura de las revoluciones científicas*. México: Fondo de cultura Económica, 2005. 361 pp.
- LÓPEZ SANCHO, JOSÉ MARÍA; GÓMEZ DÍAZ, MARÍA JOSÉ; REFOLIO REFOLIO, MARÍA DEL CARMEN; LÓPEZ ÁLVAREZ, JOSÉ MANUEL. *Magnetismo en el Aula. Material didáctico para profesores de Educación Infantil y Primaria*. Material Didáctico. Madrid. Comunidad de Madrid. Consejería de Educación. Dirección de orientación académica, 2005. 170 pp. <<https://digital.csic.es/handle/10261/85706>>
- LUCRECIO CARO, TITO. *De la naturaleza de las cosas*. Libro 8. Traducción José Marchena. Biblioteca Virtual Miguel de Cervantes. [En línea]: <<http://www.cervantesvirtual.com/>> [Consulta: septiembre 2014].
- MORENO GÓMEZ, E. & LÓPEZ SANCHO, J. M. «Una propuesta para sentir el campo magnético de un imán». *Serie El CSIC en la Escuela: Investigación sobre la enseñanza de la ciencia en el aula*. N.º 3. pp. 68-73. Editorial CSIC. 2011. <<http://libros.csic.es/index.php?cPath=95>>
- NERSESIAN, NANCY J. *Creating Scientific Concepts*. MIT Press, 2008. 272 pp.
- PLATÓN. *Ion o de la poesía. Diálogos socráticos. Obras completas de Platón*. Traducción de Patricio de Azcárate. 1871. Proyecto Filosofía en español. Filosofía.org. [En línea]: <<http://www.filosofia.org/cla/pla/img/azf02181.pdf>> [Consulta: septiembre 2014].
- PLINIO, EL VIEJO. *Historia natural. De la naturaleza de las piedras, de su uso en construcción, de los principales monumentos y otros usos*. Libro 36. 25. Capítulo 16. La escultura en la historia natural de Plinio el viejo. Libro 36. [En línea]: <http://www.historia-del-arte-erotico.com/Plinio_el_viejo/libro36.htm> [Consulta: septiembre 2014].
- BODROVA, ELENA & DEBORAH, J. LEONG. *Herramientas de la mente: El aprendizaje en la infancia desde la perspectiva de Vygotsky*. Secretaría de Educación Pública, 2008. 180 pp.
- Wikipedia. *De Magnete*. [En línea]: <http://en.wikipedia.org/wiki/De_Magnete> [Consulta: septiembre 2014].