

Errores e inconsistencias en el tratamiento de la fuerza magnética en textos universitarios

Mistakes and inconsistencies in the treatment of magnetic force in university texts

Cintia N. Sposetti^{1*}, Gloria P. Colombo¹, Patricia E. Fernandez¹ e Ignacio Tabares¹

¹ Grupo TIDCyT, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Av. Pellegrini 250, CP 2000, Rosario, Santa Fe. Argentina.

*E-mail: sposetti@fceia.unr.edu.ar

Recibido el 30 de septiembre de 2022 | Aceptado el 24 de octubre de 2022

Resumen

Este trabajo es un llamado de atención sobre el rol atribuido a la fuerza magnética en los procesos de conservación de la energía en electromagnetismo, ya que no logra incorporarse con claridad ni en los libros de textos ni en la enseñanza en el nivel básico universitario a pesar de las advertencias de los investigadores en didáctica que datan de varias décadas atrás. Presentamos: (a) los llamados de atención realizados por investigadores de la didáctica de las ciencias, (b) un relevamiento de las contradicciones que aún permanecen en algunos libros de textos y fuentes multimediales y (c) una discusión final.

Palabras clave: Trabajo de la fuerza magnética; Conservación de la energía en electromagnetismo; Enseñanza de electromagnetismo; Fem de movimiento; Fuerza magnética sobre corriente.

Abstract

This work is a call for attention regarding the role attributed to the magnetic force in energy conservation processes in electromagnetism, since it fails to be clearly incorporated neither in textbooks nor in basic university level teaching despite the warnings of researchers in didactics dating back several decades. We present: (a) the calls for attention made by science education researchers, (b) a review of the contradictions that remain in some textbooks and multimedia sources and (c) a final discussion.

Keywords: Work of magnetic force; Energy conservation in electromagnetism; Teaching of electromagnetism; Motional emf; Current magnetic force.

I. INTRODUCCIÓN

Es indiscutible la afirmación de que la fuerza magnética no ejerce trabajo sobre una partícula, dado que siempre es perpendicular al desplazamiento que la origina.

$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B} \quad (1)$$

Así, docentes, investigadores y libros coinciden en afirmar que la fuerza magnética no modifica la energía cinética de una partícula. En el caso sencillo de una carga que describe una trayectoria circular en un campo magnético la fuerza magnética solo modifica la dirección de la velocidad y, en todo punto de su trayectoria, es perpendicular a dicha

fuerza. Sin embargo, cuando esto se aplica al caso de un conductor circulado por corriente en presencia de un campo magnético, aparecen una serie de situaciones donde pareciera que la fuerza magnética hace trabajo.

Un ejemplo de estas situaciones es el caso de la barra conductora que se mueve sobre unos rieles conductores con velocidad constante de la figura 1. Sobre este sistema aparece una fem inducida que puede calcularse a través de la integral sobre el circuito completo:

$$\varepsilon = \oint \vec{v} \times \vec{B} \cdot d\vec{l} \quad (2)$$

donde suele interpretarse que la fem es el trabajo por unidad de carga de una fuerza no conservativa.

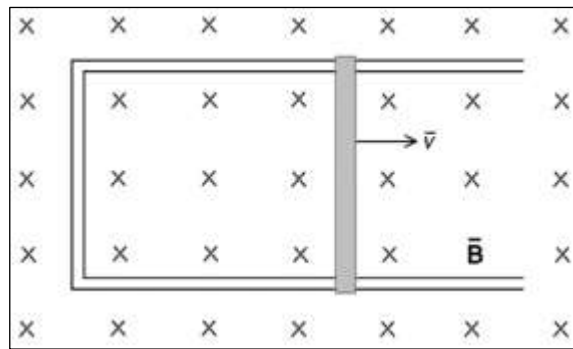


FIGURA 1. Una barra conductora se mueve con velocidad constante en un campo magnético entrante a la página.

En el abordaje de este ejemplo, los libros de textos tradicionales omiten considerar la velocidad de deriva, induciendo al lector a pensar que es la fuerza magnética la que realiza trabajo al desplazar una carga positiva desde el extremo inferior al superior de la barra.

Otra situación modelizada es el de una espira rectangular circulado por una corriente I , suspendida de forma vertical y parcialmente inmersa en un campo magnético como se muestra en la figura 2. Un ejercicio usual es el cálculo del valor de la corriente (I^*) tal que la fuerza magnética sobre la espira equilibra exactamente el peso de la misma.

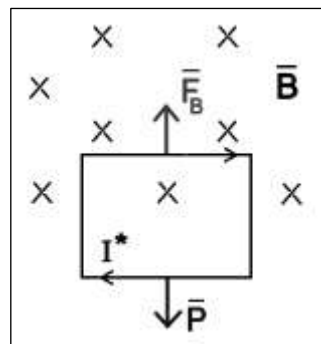


FIGURA 2. Espira rectangular de corriente en equilibrio suspendida verticalmente e inmersa de forma parcial en un campo magnético uniforme.

Para un valor de I mayor que I^* la fuerza magnética será mayor a la fuerza peso y, por lo tanto, la espira se desplazará hacia arriba. En esta situación podría pensarse, de forma errónea que, si la espira se desplaza una distancia h verticalmente, la fuerza magnética realiza un trabajo no nulo $W_{mag} = F_{mag} \cdot h$

Nuevamente se omite tener en cuenta una de las componentes de la velocidad de las cargas. Cuando la espira comienza a subir, las cargas ya no se mueven solo horizontalmente, su velocidad adquiere una componente vertical que es la velocidad de la espira. Al tener en cuenta ambas componentes, puede verse que el trabajo de la fuerza magnética es nulo.

Habitualmente, en los casos citados, no se realiza un análisis microscópico completo de las fuerzas que actúan sobre las cargas, ni de cuáles son las responsables de realizar trabajo y cómo son los procesos de transferencia de energía. En la siguiente sección se analiza la aparente paradoja que se plantea en estos ejemplos, estudiada por diversos autores considerando modelos alternativos respecto a quién atribuir el trabajo realizado sobre las cargas.

II. LAS ADVERTENCIAS DE LOS INVESTIGADORES EN DIDÁCTICA DE LAS CIENCIAS

Varios autores (Mosca, 1974; Aranda y Oliveras, 1984; Dietz, 1992; Papachristou y Magoulas, 2015, 2017; Gates, 2014; Redinz, 2011) vienen llamando la atención sobre las contradicciones que aparecen no solo en el discurso de los docentes, sino también en los libros de uso generalizado, con relación a la nulidad del trabajo de la fuerza magnética.

En el caso típico de un conductor que se desliza a velocidad constante sobre guías conductoras (figura 1), todos coinciden en afirmar que:

- La fuerza magnética no es quien transfiere la energía para generar una corriente o una diferencia de potencial;
- La única fuerza que realiza trabajo positivo es la fuerza externa responsable de mover el conductor con velocidad constante;
- La fem no es el trabajo por unidad de carga de la fuerza magnética;
- La velocidad de deriva no determina el valor de la fem, pero es indispensable considerarla en una explicación adecuada;
- deben tenerse en cuenta otras fuerzas además de la magnética.

Sin embargo, los análisis microscópicos a los que recurren se corresponden con distintos modelos. Mientras que Mosca (1974) y Aranda y Oliveras (1984) acuerdan en que la fuerza responsable de suministrar energía a las cargas (F_r) es una fuerza ejercida por el campo eléctrico de Hall que se establece en la barra conductora (figura 3), Dietz (1992) concluye que el único agente que hace trabajo positivo para movilizar las cargas dentro del conductor es una fuerza ejercida por la red de carácter cuasiestático y no conservativo. Nótese que ninguna de estas fuerzas mueve las cargas en la dirección de la corriente, pero son quienes proporcionan la energía necesaria para tal movimiento.

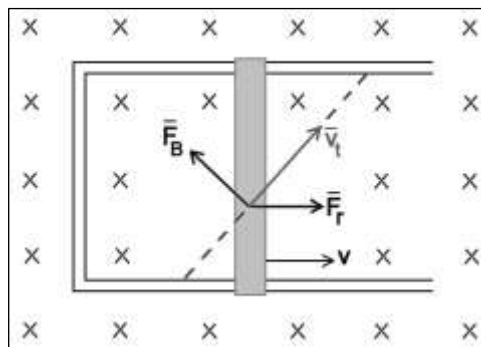


FIGURA 3. Diagrama de fuerzas sobre una carga positiva, donde v_t es la velocidad total de la misma. La línea a trazos representa el trayecto realizado por las cargas al atravesar la barra móvil (Mosca, 1974). Al tener en cuenta la velocidad de deriva, la dirección de la velocidad de la carga ya no coincide con la dirección del desplazamiento de la barra conductora y, por lo tanto, la fuerza magnética tampoco es enteramente vertical

Dietz (1992), a su vez, afirma que la fem es el trabajo de una fuerza no electrostática y no disipativa por unidad de carga diferente a la fuerza magnética, mientras que Papachristou y Magoulas (2015) niegan que pueda aplicarse a la fem la definición de trabajo por ser conceptualmente magnitudes diferentes, ya que el trabajo está asociado a un intervalo espacial y temporal y la fem se calcula para un instante de tiempo.

Por otro lado, Papachristou y Magoulas (2017), acuerdan con Dietz en que la discusión microscópica no es aplicable a casos en que coexistan campos magnéticos dependientes del tiempo y campos eléctricos no conservativos, por lo que en el caso del generador lineal la igualdad entre el trabajo por unidad de carga de la fuerza aplicada sobre la barra y la fem es accidental y no refleja una relación general. Dietz (1992) también advierte sobre las confusiones que se introducen si no se establecen convenientemente los sistemas de referencias desde dónde se observa el problema.

Con la intención de acercar un ejemplo donde la dinámica del sistema sea más sencilla, Gates (2014) propone estudiar el caso de una esfera con carga que se encuentra dentro de un tubo que se mueve con velocidad perpendicular a un campo magnético (figura 4). En este caso se atribuye el aumento de energía cinética de la esfera cargada, al desplazarse por el interior del tubo, al trabajo realizado por la fuerza normal producto de la interacción entre esta y las paredes del tubo.

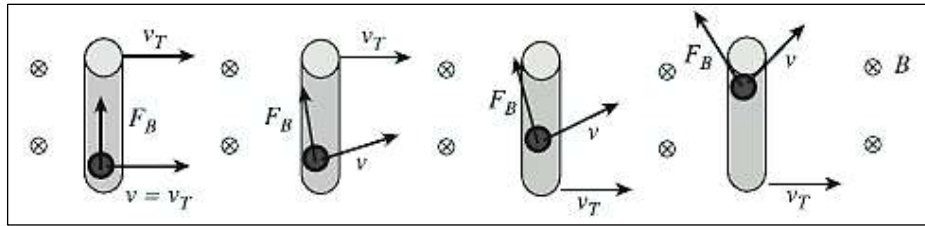


FIGURA 4. Evolución de la velocidad de una esfera con carga que se encuentra dentro de un tubo que avanza a través de un campo magnético perpendicular al mismo. Mientras que la componente horizontal de la velocidad permanece constante, la velocidad total de la esfera con carga aumenta. (Gates, 2014, p. 300)

Retomando el caso presentado en la figura 2, Redinz (2011) estudia este problema analizando el caso en que la espira se desplaza verticalmente con una aceleración constante. En su modelización, realiza un estudio energético y obtiene matemáticamente que la potencia que entrega la fuente para mantener la corriente constante, parte se disipa por efecto Joule y parte se convierte en energía mecánica de la espira (cinética más potencial gravitatoria). El rol de la fuerza magnética en este sistema es entonces “redireccionar la fuerza horizontal de la fuente de corriente en el movimiento vertical de la espira” (Redinz, 2011).

III. CÓMO SE TRATA EL TEMA EN LOS LIBROS DE TEXTOS

Para dar cuenta de las dificultades que se generan en la enseñanza de estos temas se analizaron algunos textos que suelen recomendarse o adoptarse como material de referencia en los cursos actuales.

En primer lugar se analizó la presentación del concepto de trabajo de la fuerza magnética, si se desarrolla con claridad el hecho de que no hace trabajo y cómo impacta en la energía del sistema.

En este punto la mayoría de los autores explicitan el hecho de que, cómo la fuerza magnética es perpendicular a la velocidad, esta no desarrolla trabajo ni tampoco puede modificar la energía cinética de la partícula cargada (Giancoli, 2009; Tipler y Mosca, 2003 y 2010; Young y Freedman, 2009 y 2013; Serway y Jewett, 2009 y 2015; Ulaby, 2007; Roederer, 2015; Kip, 1974). A esto se le suma una aclaración que notamos en Alonso y Finn (1987) donde señala el hecho de que la fuerza magnética es del tipo no conservativa. Por otra parte Resnick, Halliday, Krane (2008), aclaran que, lo descrito anteriormente, es válido para campos estacionarios y que los campos variables en el tiempo sí pueden modificar la energía cinética de la partícula. Quizás el libro que da más claridad conceptual al abordar este tema, es Griffiths (2013) que expresa:

Las fuerzas magnéticas pueden alterar la dirección en la cual la partícula se está moviendo, pero no acelerarla ni disminuir su velocidad. El hecho de que las fuerzas magnéticas no realicen trabajo es una consecuencia directa de la fuerza de Lorentz, pero hay muchas situaciones en las cuales este hecho aparenta ser falso y se lo pone en duda. Si bien puede, o no, parecer perverso, debemos negar el hecho de que la fuerza magnética pueda hacer trabajo e investigar quién verdaderamente lo hace. (Griffiths, 2013, p. 215) (traducción propia).

Pero, si bien es cierto que en la mayoría de los libros de textos se deja claro que la fuerza magnética no hace trabajo, no es menos cierto que en los temas posteriores aparecen diversas inconsistencias que dificultan la comprensión del fenómeno magnético y el abordaje energético de las situaciones-problema, no pudiendo lograrse consolidar un eje estructurante a partir de la energía. (Fernández, Tabares y Jardon, 2017).

La primera situación que da cuenta de lo descrito anteriormente es al introducir la fuerza magnética resultante de la interacción entre una corriente y un campo magnético. La mayoría de los autores omiten hacer un análisis de la relación de esta con la fuerza de Lorentz, si realiza o no trabajo y de cómo son los intercambios de energía del sistema cuando actúa.

Al considerar torque y dipolo magnético Young y Freedman (2013) expresan: “Cuando un dipolo magnético cambia de orientación en un campo magnético, éste realiza trabajo sobre aquél” (p.903), dejando entrever que es el campo magnético quién realiza trabajo. Luego definen inmediatamente el concepto de energía potencial de un dipolo magnético, por simple comparación con el dipolo eléctrico. Otros autores aprovechan esta última analogía para definir la energía potencial asociada a un momento magnético (Serway y Jewett, 2009 Y 2015; y Tipler y Mosca, 2003 Y 2010). Así, entonces, resulta difícil encontrar textos que hagan un análisis explícito y minucioso de cuál es el agente que realiza el trabajo durante el torque magnético, por qué se genera una variación en la energía potencial y a qué tipo de energía potencial se refiere, ya que una fuerza no conservativa como la magnética no tiene asociada ningún potencial en este nivel de enseñanza.

Sobre este mismo tema, en la sección *preguntas para análisis*, Young y Freedman (2013) se le propone al estudiante que reflexione sobre la siguiente frase:

La fuerza magnética que actúa sobre una partícula cargada nunca realiza trabajo porque, en cada instante, la fuerza es perpendicular a la velocidad. La torca ejercida por un campo magnético puede efectuar trabajo sobre una espira de corriente cuando la espira gira. Explique cómo se concilian estos enunciados contradictorios en apariencia. (Young y Freedman, 2013, p.913)

El análisis solicitado presenta una dificultad para el lector, ya que no existen discusiones previas que permitan hacer una interpretación acorde a un modelo coherente que explique la transferencia y conservación de la energía en este tipo de procesos. En el capítulo siguiente, y a la hora de abordar el clásico problema del generador lineal, se hace un comentario falto de imágenes, donde se expresa “...tal vez usted piense que la fuerza magnética $\vec{F} = i\vec{L} \times \vec{B}$ efectúa trabajo (negativo)...” (p.966), y afirma que esto no es correcto. Entendemos que la situación merece una explicación más detallada y amplia, con esquemas y expresiones que permitan al alumno entender mejor el fenómeno físico.

Tipler y Mosca (2003 Y 2010) presentan la definición de energía potencial de un dipolo magnético no quedando nada claro a qué tipo de energía potencial se están refiriendo, ni mucho menos, quién es el agente que hace trabajo para poder modificarla. En particular, al analizar el generador lineal en la quinta edición dedica un espacio al análisis microscópico en el que expresa claramente que “no se puede atribuir la fem al trabajo realizado por la fuerza magnética”, separándola en sus dos componentes y dando cuenta de la existencia de un campo eléctrico de polarización horizontal como protagonista de la conversión de energía no eléctrica en eléctrica, similar al propuesto por Aranda y Oliveras (1984). Sin embargo, lo llamativo es que en la sexta edición estos comentarios fueron suprimidos.

Resnick et al. (2008) presentan un tratamiento más extenso y detallado del generador lineal haciendo un análisis microscópico del problema. Estos autores plantean sistemas de referencias diferentes y modelizan a la fuerza normal ejecutada por la pared de la barra móvil, como el agente que suministra la energía mecánica que finalmente se transforma en energía interna. En capítulos posteriores se desarrolla el tema *Almacenamiento de energía de un campo magnético* donde expresa “el trabajo realizado para separar dos alambres circulares por corriente se guarda en la energía de su campo magnético. Podríamos recobrar esta energía dejando que los alambres vuelvan a atraerse” (p.828), induciendo al lector a pensar que no solo la fuerza magnética hace trabajo sino que, además, es conservativa. Esto último es expresado de manera similar en Serway y Jewett (2015), cuando denota que “Un inductor almacena energía en lo que se podría llamar energía potencial magnética, cuando transporta corriente” (p. 903).

Por otro lado, de los textos relevados es de destacar el tratamiento que le da Griffiths (2013) a ejemplos como el generador lineal (figura 1) y una espira circular por corriente que se eleva en una zona de campo magnético (figura 2). Si bien no es un texto usualmente utilizado en la enseñanza básica de electromagnetismo, es el único que presenta, en ambos casos, un desarrollo completo y detallado acompañado por esquemas y expresiones, que facilitan la comprensión de por qué la fuerza magnética no hace trabajo y discute, además, quién es el agente responsable de transferir energía. Asimismo, es el único texto relevado, que dedica una sección extra para reforzar el hecho de que “la fuerza magnética no hace trabajo”. Mediante una modelización original estudia el ejemplo de una grúa magnética que levanta un auto por acción de la fuerza magnética. Así, se ocupa de elaborar durante todo el libro, explicaciones que permiten entender que, si bien el agente magnético modifica la dinámica del sistema, este nunca realiza trabajo.

V. ANÁLISIS EN FORMATOS MULTIMEDIA

Para extender el análisis a medios multimediales del tipo CEMA (curso en línea masivo y abierto) que suelen ser de utilidad para los alumnos, nos enfocamos solo en aquellos que provienen de Instituciones Universitarias.

Walter Lewin (2015), en la clase 17 del curso 8.02x del MIT, aborda el problema del generador lineal desde un análisis macroscópico, partiendo del cálculo de flujo, su variación; y luego haciendo un análisis de energía entendiendo que “el agente externo siempre debe hacer trabajo positivo (independientemente del sentido de la velocidad) y esa energía es la que se convierte en calor en el circuito, a través de la fuerza de Lorentz”. Si bien analiza que el agente externo es quien realiza un trabajo positivo, no aclara que es solo la componente eléctrica de la fuerza de Lorentz quien produce la conversión de energía eléctrica.

En el Curso Interactivo de Física en Internet, de Angel Franco García (2010 y 2016), aparece la siguiente contradicción: mientras que en la edición del año 2010 se encuentra un análisis detallado del trabajo de la fuerza magnética basado en el artículo de Mosca (1974) demostrando que su trabajo es nulo; la edición del año 2016 no da cuenta de estas cuestiones y en las simulaciones se esquematiza a la fuerza magnética y al movimiento de las cargas de tal forma que podría conducir al usuario a la errónea conclusión de que la fuerza magnética hace trabajo.

VI. DISCUSIÓN FINAL

Del análisis de los diferentes libros de textos surge que los autores modelizan de manera distinta los temas en discusión y, muchos de ellos son confusos en el análisis argumental. Las razones de esta enseñanza contradictoria son:

- La intención de dotar a los alumnos de un modelo simplificado de los fenómenos electromagnéticos que, bajo determinadas circunstancias, presenta dificultades a la hora de observar, explicar o predecir dicha fenomenología;
- La falta de identificación del alcance y los límites del modelo que se está trabajando, no diferenciando el análisis microscópico del macroscópico y omitiendo la dependencia del sistema de referencia adoptado;
- La falta de análisis de todas las fuerzas presentes a través de diagramas de cuerpo libre;
- La utilización en el lenguaje de términos confusos, que inducen al alumno a pensar cuestiones tales como que la fuerza magnética hace trabajo, que existe una energía magnética del tipo potencial, que el campo magnético hace trabajo durante el torque, etc.

A pesar de las numerosas publicaciones de investigadores en didáctica de las ciencias, el problema subsiste y parece no ser advertido por quienes tienen a su cargo la enseñanza de estos temas. Es sabido que los resultados en investigación en enseñanza de las ciencias tienen poco impacto en la actividad diaria del aula. La investigación sobre las causas de este hecho muestra que estas son múltiples y algunas muy importantes, pero no son motivo de este trabajo. No obstante, una de ellas, es que mientras los investigadores buscan generar y publicar nuevos conocimientos, los docentes inmersos en las escuelas, buscan soluciones a sus dificultades inmediatas (Bell, Cordingley, Holdich y Saunders, 2004; Hodkinson, 2004; Perines, 2018). En este sentido, un hecho importante a tener en cuenta es que suelen ser las editoriales las que marcan las tendencias curriculares y las orientaciones y secuencias didácticas adoptadas por los profesores. Alumnos y docentes hacen uso de la bibliografía disponible, de forma a veces acrítica, confiando en la autoridad del libro.

Para intentar subsanar estas inconsistencias que representan solo algunas de las que pueden aparecer en los libros de textos, sería necesario:

- Incorporar en los departamentos docentes de enseñanza de las ciencias, mayores instancias de discusiones conceptuales, que incentiven la lectura de artículos de didáctica sobre temas de específicos;
- Generar una lectura crítica de los libros de textos que permita fundamentar la selección de la bibliografía a utilizar y dar cuentas de las posibles inconsistencias argumentales o conceptuales presentes;
- Promover la generación de material bibliográfico complementario y el diseño de alternativas propias de secuencias didácticas de presentación;
- Advertir a las editoriales pertinentes de la falta de claridad señalada en relación con estos temas.

Por último y siguiendo con el análisis del trabajo de Fernández et al (2017) la adopción del concepto de energía y su conservación como eje estructurante colaboraría para comprender los intercambios energéticos de una manera unificada. Resulta, entonces, que la caracterización energética asociada a las fuerzas magnéticas siguiendo el enfoque tradicional es fragmentada, incompleta y a veces incorrecta, al menos desde el punto de vista discursivo. Este grupo de trabajo se encuentra realizando una investigación basada en el diseño de una propuesta que reúna los puntos enumerados anteriormente y que pueda plasmarse en un modelo de energía, de los campos electromagnéticos, plausible y evolutivo, capaz de ser desarrollado durante todo el transcurso del curso de física.

AGRADECIMIENTO

Los autores de este artículo agradecen las contribuciones realizadas por Alberto Jardón, integrante del Grupo TIDCyT desde muchísimos años y su motivación y participación constante para con este equipo de trabajo.

REFERENCIAS

Alonso, M., Finn, E. (1987). *Física Volumen II: Campos y Ondas*. (1ra ed). Wilmington, Delaware: Addison Wesley Iberomaericana.

Aranda, I y Oliveras, J. (1984). Sobre el movimiento de un conductor en un campo magnético. *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, 2(1), 43-48.

- Bell, M., Cordingley, D., Holdich, K. y Saunders, L. (2004). What do teachers want from research and does the research address those needs? Comunicación presentada en el *Annual British Educational Research Association Conference*.
- Dietz, E. R. (1992). Some pedagogical aspects of motional EMF. *Physics Education*, 27(2), 109-111.
- Fernández, P., Tabares, I., y Jardon, A. (2017). La energía y su conservación como eje estructurante para la comprensión de fenómenos electromagnéticos. *Revista de Enseñanza de la Física*, 29(extra), 441-450.
- Franco, A. G. (2010). *Física con ordenador. Curso interactivo de física en Internet*. Recuperado en <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/induccin/varilla/varilla.htm>
- Franco, A. G. (2016). *Física con ordenador. Curso interactivo de física en Internet*. Recuperado en http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/fem/varilla/varilla_1.html
- Gates, J. (2014). Magnetic force and work: an accessible example. *Physics Education*, 49(3), 299-302.
- Giancoli, D. C. (2009). *Física para Ciencias e Ingenierías con física moderna Vol. II (4ta ed.)*. México: Pearson Education.
- Griffiths, D. J. (2013). *Introduction to electrodynamics (4ta ed.)*. EE. UU.: Pearson Education.
- Hodkinson, P. (2004). Research as a form of work: expertise, community and methodological objectivity. *British Educational Research Journal*, 30(1), 9-26.
- Kip A. (1974). *Fundamentos de electricidad y magnetismo*. Madrid: Ediciones del castillo.
- Lewin, W. (2015). *8.02x Lecture 17: Motional EMF, Dynamos, Eddy Currents, Magnetic Braking*. Recuperado en https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=MzAPu_p2wl4&t=1594s
- Mosca, E. P. (1974). Magnetic forces doing work? *American Journal of Physics*, 42(4), 295-297.
- Papachristou C J., Magoulas A. N. (2015). Does the electromotive force (always) represent work? *Advanced Electromagnetics*, 4(1), 10-15.
- Papachristou C: J., Magoulas A. N. (2017) Some aspects of the electromotive force: Educational review article. Recuperado de <https://metapublishing.org/index.php/MP/catalog/book/56>
- Perines, H. (2018). ¿Por qué la investigación educativa no impacta en la práctica docente? *Estudios sobre educación*, 38, 9-27.
- Redinz, J. A. (2011). Forces and work on a wire in a magnetic field. *American Journal of Physics*, 79(7), 774-776.
- Resnick, R., Halliday, D., Krane, K. (2008) *Física. Vol.2 (5ta ed.)*. México: Grupo Editorial Patria.
- Roederer, J. G. (2015). *Electromagnetismo Elemental*. Buenos Aires: Eudeba.
- Serway, R., Jewett, J. Jr. (2009). *Física para Ciencias e Ingeniería con física moderna. Vol II (7ma ed.)*. México, D. F.: Cengage Learning.
- Serway, R., Jewett, J. Jr. (2015). *Física para Ciencias e Ingeniería con física moderna. Vol II (9ma ed.)*. México, D. F.: Cengage Learning.
- Tipler, P., Mosca, G. (2003). *Física para la ciencia y la tecnología. Vol. 2A (5ta ed.)*. Barcelona: Reverté.
- Tipler, P., Mosca, G. (2010). *Física para la ciencia y la tecnología Vol. II (6ta ed.)*. Barcelona: Reverté.
- Ulaby, F. (2007). *Fundamentos de aplicaciones en electromagnetismo (5ta ed.)*. México: Pearson Education.
- Young, H., Freedman, R. (2009) *Sears y Zemansky Física Universitaria con física moderna. Vol. 2 (12da ed.)*. México: Pearson Educación.
- Young, H., Freedman, R. (2013) *Sears y Zemansky Física Universitaria con física moderna. Vol. 2 (13ra ed.)*. México: Pearson Educación.