

Dificultades de los estudiantes universitarios en el aprendizaje de la inducción electromagnética

(University students' difficulties in learning electromagnetic phenomena)

Jenaro Guisasola¹, José M. Almudí y Kristina Zuza

Departamento de Física Aplicada I, Universidad del País Vasco, Spain

Recibido em 23/6/2009; Aceito em 2/8/2009; Publicado em 14/5/2010

Este trabajo trata de las concepciones de los estudiantes de primer y tercer curso de universidad sobre la teoría de inducción electromagnética. En esta investigación analizamos la parte de la física correspondiente a la ley de Faraday de la inducción electromagnética dentro de la física clásica. La pregunta de investigación que ha orientado el trabajo es: ¿cuáles son las concepciones y formas de razonamiento de los estudiantes universitarios de ciencias e ingeniería sobre la inducción electromagnética? Hemos encontrado que muy pocos estudiantes son capaces de explicar dichos fenómenos de acuerdo con el modelo de la física clásica tanto en términos de campo (nivel macroscópico), como en términos de las acciones ejercidas por el campo (nivel microscópico).

Palavras-clave: inducción electromagnética, dificultades de aprendizaje, educación universitaria.

The work presented deals with the ideas of first-year Engineering students and third year Physics students about the theory of electromagnetic induction (EI). In this investigation we analyse that part of the theory of EI relating to Faraday's law which comes within the basic analysis of induction phenomena for introductory physics courses within classical physics. In this work, the following research question arise: what conceptions and forms of reasoning do university science and engineering students use in explanations of electromagnetic induction phenomena? We found that very few students are able to distinguish between macroscopic levels described in terms of fields and microscopic levels described in terms of the actions of fields.

Keywords: electromagnetic induction, students learning difficulties, university education.

1. Introducción

El análisis de las dificultades de los estudiantes en el área de física ha sido objeto de numerosos trabajos en la investigación en enseñanza de la física [1]. Muchas de estas ideas alternativas se han llamado de ‘sentido común’ porque están muy extendidas entre estudiantes de diferentes países y niveles y, porque están ligadas a formas de razonamiento usuales en la vida cotidiana y anteriores a la instrucción recibida.

Sin embargo, en ciertas áreas de la física, como por ejemplo los fenómenos de inducción electromagnética, es particularmente difícil mantener la idea de que las dificultades observadas tienen un origen no escolar y previo a la instrucción, ya que se necesita de un conocimiento elaborado lejano de la vida diaria. Esto no significa que determinados razonamientos propios de la vida cotidiana no se manifiestan como frecuentemente ha mostrado la investigación [2, 3]. Así pues, es razonable pensar que sobre estos temas extremadamente académicos es particularmente necesario, para

comprender las respuestas de los estudiantes, el análisis del contenido de la física presentado en los programas de la enseñanza habitual, así como el presentado en los libros de texto.

En cursos introductorios de física para grados de ciencia e ingeniería, los estudiantes aprenden que los fenómenos de inducción electromagnética son debidos a la presencia de campo magnéticos variables en el tiempo o/y al movimiento de un conductor o circuito en un campo magnético. En particular, se enseña la ley de Faraday para calcular la fuerza electromotriz inducida. Los estudiantes aplican esta ley al analizar casos sencillos, por ejemplo, calcular el valor de la fuerza electromotriz inducida en un circuito que está en un campo magnético variable en el tiempo. Sin embargo, Chabay y Sherwood [4] indican que “Faraday’ law is usually difficult for students. Moreover, the integral form involves the concept of flux, which is traditionally introduced of the start of the course in the context of Gauss’ law and not mentioned again until the introduction of the Faraday’s law” (p. 333). Así mismo, Bagno y Eylon [5]

¹E-mail: jenaro.guisasola@ehu.es.

muestran que “In the students’ knowledge of representation there is an overemphasis of subsidiary information at the expense of more central relationships. For instance, many students consider Ohm’s law to be of central importance and completely disregard electromagnetic induction” (p. 330). Estas aportaciones de la investigación, entre otras, parecen indicar que existe un problema de enseñanza de la inducción electromagnética y en particular, de la ley de Faraday.

Este estudio tiene como finalidad conocer si los estudiantes de primer curso universitario han comprendido las ideas básicas sobre la inducción electromagnética y en particular, sobre el análisis y cálculo de la fuerza electromotriz inducida. Con este fin, pasamos a nuestros estudiantes de la Universidad del País Vasco (España), después de que estudiaran el tema en clase, un cuestionario. Para una mejor comprensión de cómo piensan los estudiantes sobre los fenómenos de inducción electromagnética y como utilizan la ley de Faraday, seis estudiantes fueron entrevistados sobre sus respuestas en el cuestionario. Nuestro interés era determinar el razonamiento cualitativo de los estudiantes cuando analizan la fuerza electromotriz inducida en un circuito o en un conductor. Nos hemos centrado en situaciones sencillas de circuitos en reposo o en movimiento, porque estas situaciones no presentan complejidad matemática que pueda enmascarar las dificultades conceptuales. Esta investigación sobre el conocimiento de las ideas de los estudiantes y su descripción se entiende como una fuente de información necesaria para el diseño y desarrollo del currículo.

2. Contexto de la investigación y el currículo del curso

La investigación que se describe en este artículo se realizó en la Universidad del País Vasco durante varios años. La totalidad de los estudiantes de primer curso realizaron dos años de estudios de física en el Bachillerato (High School) y realizaban su primer curso de física para ingenieros. Los estudiantes de tercer año del grado en física, habían superado los créditos de los dos primeros años y en particular, la asignatura de electromagnetismo de segundo año.

Los estudiantes de primer curso de Ingeniería recibieron 3,5 horas de clase magistral y 2 horas de laboratorio por semana durante 14 semanas (segundo semestre) en el área de electromagnetismo. Las clases magistrales las impartían profesores del departamento de física con amplia experiencia. En este curso, la inducción electromagnética y la ley de Faraday se enseñan durante 2 o 3 semanas. En las clases magistrales y en la resolución de problemas se imparten fenómenos de inducción electromagnética, flujo magnético, fuerza electromotriz inducida y ley de Faraday, ley de Lenz, fuerza electromotriz de movimiento, inductancia y circuitos RL. En la enseñanza se analiza con detalle cómo

utilizar la ley de Faraday para calcular la fem inducida mediante la variación del flujo magnético en situaciones donde hay un campo magnético variable en el tiempo o bien, cuando hay una variación de la superficie implicada en la integral del flujo debido al movimiento de un circuito o parte de él. Alrededor de dos clases magistrales se dedicaron a explicar la ley de Faraday y se pusieron ejemplos como los que aparecen en los libros de texto [6]. Se analizaron situaciones en las que se mostraba la utilidad de tener en cuenta el flujo magnético.

Durante el tiempo que duró la investigación los estudiantes de tercero de física habían superado en el primer curso un programa de física que incluye las especificaciones descritas en el párrafo anterior. Se utilizó una muestra de estudiantes de tercer curso de físicas con la intención de ver si las dificultades detectadas en los estudiantes de primer curso eran resistentes a las estrategias de la enseñanza habitual. Se trataba de ver en qué medida determinadas dificultades y formas de razonamiento alternativas al modelo científico constituyen verdaderos problemas de enseñanza-aprendizaje.

3. Cuestiones para analizar la comprensión de los estudiantes

En este apartado describiremos cuatro de las cuestiones que realizaron los estudiantes, resumiendo los resultados. Indicaremos brevemente algunas respuestas que aparecen frecuentemente.

Las cuestiones se incluyeron en el examen final de los estudiantes de primer curso y en forma de pre-test a los estudiantes de tercero de física que ya habían cursado dos semestres de electromagnetismo en el segundo año. Las cuestiones se pasaron en tres grupos de primer curso ($N = 102$), como los resultados no difieren significativamente se han agrupado. Las cuestiones se pasaron también a todos los estudiantes de tercero de física ($N = 36$).

Las dos primeras cuestiones tratan de situaciones de inducción electromagnética causada por un campo magnético variable en el tiempo. Estas cuestiones requieren que los estudiantes reconozcan que la variación del campo magnético produce variación del flujo magnético a través de la superficie elegida y además, que conozcan que la variación del campo magnético induce un campo eléctrico no coulombiano responsable de la corriente inducida si hay un circuito. Las otras dos cuestiones son fenómenos de inducción electromagnética causados por el movimiento de un circuito o parte de él en un campo magnético constante en el tiempo. Las cuestiones son familiares a los estudiantes en el contexto académico y suelen ser comentadas por los libros de texto como ejemplos de fenómenos de inducción electromagnética.

A. Conectar un circuito en presencia de otro

La cuestión de la Fig. 1 trata de un circuito que se conecta y está situado al lado de otro circuito sin batería. Es un problema similar al ejemplo de corriente inducida en un circuito de libros de texto.

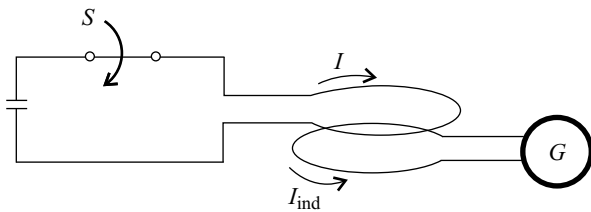


Figura 1 - Se cierra el circuito. Cuando se cierra el interruptor del circuito superior de la figura, se comprueba experimentalmente que el amperímetro *G* del circuito de la parte inferior indica paso de corriente. Explica detalladamente por qué aparece corriente en el circuito de la parte inferior.

Los estudiantes tienen que explicar por qué el amperímetro *G* marca paso de corriente. La siguiente es una respuesta correcta de uno de los estudiantes:

Cuando tenemos un circuito por el que circula una corriente *I*, sabemos que se creará un campo magnético. Como el circuito pasa de no tener corriente a tener cierta corriente *I*, ese campo magnético *B* será variable. Este campo magnético (*B*) variable producirá en el circuito inferior una fem y una corriente inducida. Aparece corriente inducida en el circuito de abajo mientras hay campo magnético variable, es decir mientras en el circuito superior hay variación de la intensidad *I*.

Esta respuesta corresponde a la mitad de los estudiantes de primer curso. En la siguiente sección analizaremos los tipos de respuestas alternativas y sus correspondientes porcentajes.

B. Espira en un campo magnético variable con el tiempo

Esta cuestión se pone como ejemplo de corriente inducida en un circuito dentro de un campo magnético variable en muchos libros de texto para cursos introductorios de física [6, 7]. En la cuestión (ver Fig. 2) se les indica a los estudiantes que la espira tiene una corriente eléctrica inducida y se les pide que expliquen cuál es el origen de dicha corriente.

Para responder correctamente los estudiantes tienen que conocer que un campo magnético variable produce un campo eléctrico no coulombiano y que éste es el responsable de la fuerza eléctrica que actúa sobre los electrones produciendo la fem inducida y el movimiento de las cargas en la espira. En contraste con la cuestión anterior muy pocos estudiantes de primer curso contestan correctamente. Esta discrepancia será analizada en la siguiente sección.

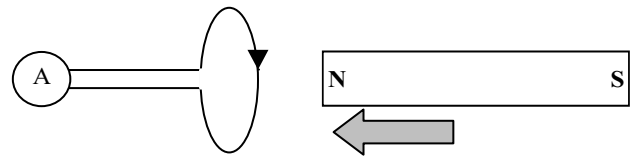


Figura 2 - Corriente inducida en una espira dentro de un campo magnético variable. Tenemos un imán que se mueve hacia una espira conductora que está en reposo respecto de nuestra observación; en un instante cualquiera del proceso de acercamiento, el amperímetro registra el paso de corriente por la espira conductora. Como has estudiado la corriente eléctrica en la espira es debida a una fuerza eléctrica asociada a un campo eléctrico inducido, explica cómo aparece este campo eléctrico en la espira y cuál es su naturaleza.

C. Espira en movimiento en un campo magnético uniforme

En esta cuestión y en la siguiente se presentan fenómenos de fem inducida por el movimiento de un conductor en un campo magnético constante en el tiempo (fem de movimiento). En la cuestión de la Fig. 3, los estudiantes deben conocer que cuando un conductor se mueve dentro de un campo magnético, éste ejerce una fuerza magnética sobre las cargas del conductor. Esta fuerza magnética producirá una fem inducida y una corriente eléctrica en la espira.

La respuesta correcta se puede explicar utilizando la ley de Lorentz que los estudiantes han practicado repetidamente en el capítulo anterior de campo magnético. Sin embargo la mayoría de los estudiantes eluden la pregunta y contestan que existe corriente eléctrica inducida debido a que hay una variación de flujo y mediante la ley de Faraday calculan la fem de movimiento inducida.

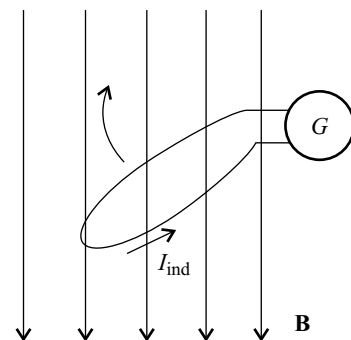


Figura 3 - La espira cambia de orientación dentro de un campo magnético uniforme. Al cambiar la orientación de la espira se comprueba experimentalmente que el amperímetro *G* de la espira marca paso de corriente. Explica de donde proceden las fuerzas que mueven las cargas en la espira y cuál es su naturaleza.

D. El generador unipolar de Faraday

El rotor eléctrico propuesto por Faraday es uno de los ejemplos que los libros de texto suelen mostrar para re-

saltar la importancia tecnológica que tiene la inducción electromagnética. En esta cuestión (ver Fig. 4) se les pide a los estudiantes que indiquen si hay corriente eléctrica inducida y que justifiquen su respuesta.

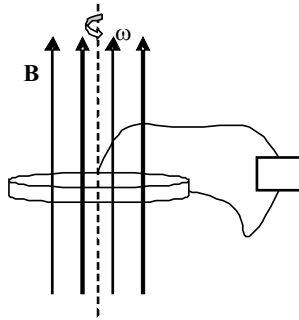


Figura 4 - El generador unipolar de Faraday. La figura muestra un disco de cobre girando dentro de un campo magnético uniforme perpendicular al mismo. Queremos saber si se producirá fuerza electromotriz inducida en esta situación y para ello, se coloca un amperímetro entre el centro del disco y la parte exterior del disco en rotación. ¿Marcará paso de corriente el amperímetro?

Para explicar correctamente la corriente eléctrica inducida, los estudiantes pueden utilizar la ley de Lorentz que explica el movimiento de las cargas en el disco de cobre debido a la fuerza magnética que ejerce sobre los electrones el campo magnético uniforme. Este sería el camino más usual de acuerdo con las explicaciones estándar en los libros de texto.

Los estudiantes también pueden explicar la cuestión utilizando la ley de Faraday y que la fem inducida es debida a la variación del flujo magnético al variar la superficie. Son bastantes los trabajos que han mostrado la explicación del ‘generador unipolar de Faraday’ mediante la ley de Faraday y que la corriente que se produce puede ser explicada tanto por la ley de Faraday como por la ley de Lorentz [8, 9, 10,11]. Un mayor tratamiento matemático de estas ideas se encuentra en Cheng [12] que muestra que la fem inducida en el circuito es debida al área barrida por un elemento del circuito. Consideremos en la Fig. 5 el circuito 122’341’1 con el elemento 34 en movimiento, que ‘corta’ el flujo del campo magnético uniforme B . La ley de Faraday indica que la variación de flujo debida al movimiento de la parte 34 es

$$\varepsilon_{mov} = B \frac{dS_m}{dt} = B \frac{d(R^2 \frac{\omega t}{2})}{dt} = \frac{BR^2 \omega}{2}. \quad (1)$$

Este resultado nos representa la variación de flujo en el área 2’34. Donde el área S_m es $R^2 \frac{\theta}{2}$ y $\theta = \omega t$, siendo ω es la velocidad angular y R el radio del disco.

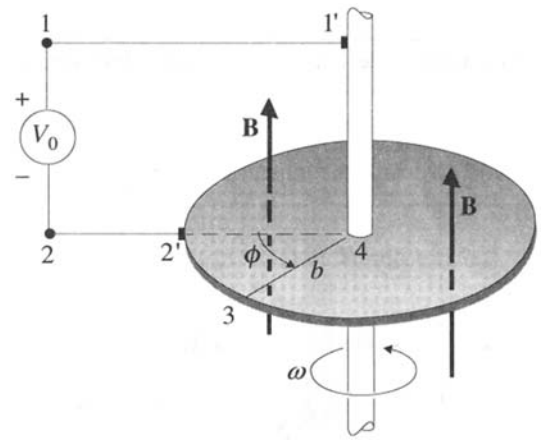


Figura 5 - Generador unipolar de Faraday.

El resultado obtenido es el mismo que si se aplica la ley de Lorentz (ver Ref. [8])

$$\varepsilon = \oint (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l} = \int_0^R \omega \cdot r \cdot B \cdot dr = \frac{R^2 \omega \cdot B}{2}. \quad (2)$$

Por tanto, los estudiantes pueden justificar la existencia de corriente inducida en el disco de cobre en términos de las fuerzas que actúan sobre los electrones (ley de Lorentz) en un nivel microscópico o bien, en términos del campo y la variación de flujo (ley de Faraday).

Esta doble descripción en términos de campo o bien, de las acciones que ejerce el campo sobre la materia es frecuente en física y los estudiantes la han estudiado tanto en mecánica (campo gravitatorio) como en electricidad y magnetismo. Desafortunadamente, como veremos en la próxima sección, la gran mayoría de los estudiantes no utilizan la ley de Lorentz para explicar la corriente inducida y además, aplican mal la ley de Faraday llegando a conclusiones erróneas.

4. Dificultades de los estudiantes

En esta sección presentamos los resultados obtenidos en ambos grupos de estudiantes para las cuatro cuestiones. En la discusión identificamos algunas dificultades conceptuales que parecen comunes a muchos de los estudiantes. Esta descripción de las ideas de los estudiantes se centrará en la persistencia de algunas dificultades específicas y su interpretación.

Los resultados de las respuestas de los estudiantes (N = 102 en primero de Ingeniería y N = 36 en tercero de físicas) a las cuatro cuestiones se indican en porcentajes en las Tabla 1.

Tabla 1. Porcentaje de respuestas para las cuestiones C1 y C2.

Categoría	Porcentajes de respuestas							
	Cuestión C1		Cuestión C2		Cuestión C3		Cuestión C4	
	1° Ing	3° Fis	1° Ing	3° Fis	1° Ing	3° Fis	1° Ing	3° Fis
A.1. Inducción debida a la variación de flujo magnético	49*	73*	67	53	66	67	6,5*	0*
A.2. Inducción debida a la fuerza magnética que actúa sobre el conductor en movimiento o, debida a la fuerza eléctrica producida por el campo eléctrico no-coulombiano inducido	-	-	9*	27*	4*	10*	19,5*	20*
B.1. Inducción producida por la presencia de un campo magnético sea variable o no, o bien, por la presencia de corriente eléctrica	37,5	37	18	17	-	-	11	6
B.2. No/Sí hay inducción debido a un análisis incorrecto de la variación de flujo	-	-	-	-	-	-	41	56
C. Inclasificable	10	10	0	0	19	20	17	20
D. No contesta	4	0	6	3	12	3	4	0

Respuestas correctas*.

Ideas de los estudiantes sobre la fuerza electromotriz inducida y el papel jugado por el campo magnético o la corriente eléctrica

Un porcentaje significativo de las respuestas de 1° de Ingeniería y 3° de físicas a las cuestiones C1, C2 y C4 revelan confusión acerca del papel que juega el campo magnético en la producción de la fuerza electromotriz inducida. Más del 35% de las respuestas a la cuestión C1 y alrededor del 20% de las respuestas en las cuestión C2, explican que la fem inducida es debida al campo magnético que hay en esa zona del espacio. Ejemplos de este tipo de respuesta son los siguientes:

Al circular corriente por la espira superior, esta creará un campo magnético que atraviesa la espira inferior y genera corriente inducida. (1° ingeniería)

Como sabemos, un imán tiene un campo que se mueve de norte a sur. Al acercarse el imán a la espira el amperímetro marcará una intensidad que dependerá del campo creado por el imán. Si el imán está muy alejado apenas pasará corriente por la espira, llegando ésta a ser máxima cuando el imán alcance su máximo acercamiento a ella. (3° físicas)

El tipo de respuesta estándar en la categoría B.1 razona como si las líneas de campo que atraviesan la espira son la causa de que se produzca la fem inducida. Los estudiantes han analizado en clase la causa de la fem inducida, sin embargo, un porcentaje significativo de los estudiantes insiste en que lo principal es que lleguen las líneas de campo magnético a la espira. Por ejemplo un estudiante escribe: “Al cerrar el interruptor se crea en la bobina un campo magnético. Las líneas de campo magnético atraviesan la bobina inferior induciendo una corriente”.

Este razonamiento se repite en la cuestión C4 en alrededor del 10% de las respuestas. Por ejemplo:

El amperímetro marcará paso de corriente, ya que hay un campo magnético perpendicular a un disco girando, debido a ello hay líneas de campo que lo atraviesa

En el caso de que en la cuestión exista corriente eléctrica, la cuestión C1, hay alrededor de un 15% de respuestas que atribuyen la fem inducida al paso de corriente. Por ejemplo un estudiante de 3° de físicas explica que “La corriente que sale de la pila viaja por el circuito llegando a la espira en la cual dicha corriente induce a la de abajo una corriente que circula por la misma haciendo que el amperímetro indique la existencia de corriente en el circuito al que está conectado”. En este caso los estudiantes atribuyen la causa de la inducción electromagnética a la proximidad de corriente eléctrica.

Este tipo de razonamiento que atribuye la inducción electromagnética a la presencia de un campo magnético (líneas de campo) o bien, a la presencia de corriente eléctrica, nos recuerda a algunos resultados encontrados por la investigación. Así et al. [13] en una experiencia con estudiantes de la Academia de las Fuerzas Aéreas de EEUU (Colorado), encuentran que alrededor del 60% de los estudiantes atribuye la generación de corriente inducida en una espira que se aleja de un hilo rectilíneo de corriente I, al campo magnético generado por la corriente I y no a la variación del flujo magnético a través de la espira. Laftus [14] en un estudio con estudiantes de secundaria, encuentra que la mayoría de los estudiantes atribuye la inducción magnética generada por un electroimán a que éste hace ‘fluir’ el campo magnético a través de los conductores o espiras próximos al electroimán. Teniendo en cuenta estos resultados, interpretamos que un porcentaje significativo de los estudiantes tienen una tendencia a atribuir la causa de la fem inducida al campo magnético y a confundir las líneas de campo que atraviesa la espira con la variación del flujo magnético a través de la espira. Estas dificultades nos recuerdan a la documentada tendencia de los estudiantes de primer curso de universidad de confundir el flujo magnético con la cantidad de campo magnético que ‘fluye’ a través de una superficie y su falta de comprensión de la variación del flujo magnético con el tiempo [15-17].

En las cuestiones C1, C2 y C3, más de la mitad de los estudiantes universitarios explican correctamente que la fem inducida es debido a la variación del flujo magnético a través de la espira. Este resultado es significativamente mejor que el mostrado por Bagno y Eylon [5] que en una investigación sobre el conocimiento del electromagnetismo con estudiantes israelíes de último curso de secundaria encontraron que sólo el 10% mencionaban la variación del campo magnético como causa de la fem inducida. Atribuimos esta discrepancia al nivel educativo en que realizamos nuestro estudio, el universitario y por tanto, a la mayor formación en física de estos estudiantes. Sin embargo, es preciso indicar que más de las tres cuartas parte de los estudiantes universitarios en las cuestiones C2 y C3 no saben explicar la naturaleza de las fuerzas que mueven las cargas de la corriente inducida. Analizamos esta dificultad en el siguiente apartado.

Dificultades en razonar en términos de las fuerzas que actúan en la inducción electromagnética

Muchos de los estudiantes que responden a las cuestiones C2 y C3 revelan una falta de comprensión de las fuerzas que actúan sobre los electrones de la espira para producir la corriente eléctrica inducida. Menos del 10% de los estudiantes de primer curso explican correctamente las fuerzas que actúan sobre las cargas en ambas cuestiones (ver Tabla 1). De forma similar, entre el 10% y el 27%, responden los estudiantes de 3^o de físicas.

La cuestión de la “espira en un campo magnético variable” (C2) requiere que los estudiantes expliquen que el campo magnético variable induce un campo eléctrico no-coulombiano que ejerce fuerza eléctrica sobre los electrones de la espira. Sin embargo, la mayoría de los estudiantes eluden contestar en términos de las fuerzas que intervienen sobre los electrones (nivel microscópico) y hablan de variación de flujo magnético (nivel macroscópico). Esto no puede ser debido a la formulación de la pregunta, ya que solicita explícitamente contestar en términos de las fuerzas que actúan. Por ejemplo, un estudiante de primer curso escribió:

El imán genera un campo magnético, según se va moviendo el imán hacia la espira, entran un mayor número de líneas de fuerza en la espira, ello conlleva a un aumento del flujo en la espira. Por lo tanto la espira genera una corriente inducida para mantener el flujo constante.

Muchas respuestas (67% en primer curso; 53% en tercer curso) son consistentes con este razonamiento en términos de campo. Sin embargo, sólo una minoría (9% en primer curso; 27% en tercer curso) razona en términos de las fuerzas que actúan sobre los electrones a nivel microscópico. Esto se puede atribuir a que la gran mayoría de los estudiantes ignoran o no aplican en esta

situación la relación establecida por una de las leyes de Maxwell entre campo magnético variable y generación de campo eléctrico no-coulombiano. Por ejemplo, uno de los estudiantes de tercer curso que responde correctamente en términos de las fuerzas que actúan explica:

Al acercarse el imán se produce una variación del campo magnético en los puntos de la espira y, como hemos estudiado en las ecuaciones de Maxwell, ésta variación del campo magnético produce campo eléctrico no coulombiano.

Parecidos resultados se obtienen en la cuestión “espira en movimiento en un campo magnético uniforme” (ver en tabla 2 resultados de C3). En concreto, 66% de respuesta en primer curso y el 67% en tercer curso explican el fenómeno en términos de la variación del flujo magnético en la espira durante un intervalo de tiempo. La frecuencia con que aparece este tipo de razonamiento en ambas cuestiones sugiere que la mayoría de los estudiantes universitarios no han adquirido un modelo de la inducción electromagnética que les permita explicarla en términos de las fuerzas que actúan sobre las cargas a nivel microscópico. Este resultado es bastante sorprendente teniendo en cuenta que los estudiantes han estudiado la ley de Lorentz y las ecuaciones de Maxwell que establecen las relaciones entre los campo eléctricos y magnéticos en la física clásica.

Comprensión de los estudiantes de la ley de Faraday en fenómenos de fuerza electromotriz inducida de movimiento

Al responder la cuestión del “generador unipolar de Faraday” (C4) alrededor de la mitad de los estudiantes razonan sobre la variación del flujo a través del disco de forma incorrecta. Por ejemplo, muchos de ellos escribieron:

El amperímetro no marcará corriente, debido a que el disco está girando alrededor de su eje. Para que el amperímetro marcara algún valor debería de existir una velocidad v que moviera ese disco y así haber una variación de flujo. (1^o Ingeniería)

Al ser B constante, a pesar de que el disco gire, no habrá cambio de flujo porque no varía la superficie del disco dentro del campo magnético. Por lo tanto no hay inducción. (3^o físicas)

Muchas respuestas explican que al no haber ni variación de campo magnético, ni variación de la superficie que atraviesan las líneas de campo, no hay fem inducida y por tanto, no hay corriente inducida. Esta forma incorrecta de razonar sobre la variación de la superficie del flujo magnético coincide con los resultados de otros trabajos de investigación. Así, diversos trabajos analizan el generador unipolar de Faraday utilizando la ley de Faraday. Una explicación cualitativa y rigurosa puede encontrarse en el artículo de Layton y Simon [18] que muestra la necesidad de considerar la superficie de integración como la superficie barrida

por el circuito móvil en un intervalo de tiempo. Esta dificultad en el análisis de la variación de la superficie que atraviesa el flujo magnético en la ley de Faraday también ha sido analizada en otros trabajos de investigación, mostrando que en aquellas situaciones donde una parte del circuito es móvil es necesario considerar la variación del área barrida por este movimiento al aplicar la ley de Faraday [19, 20].

Teniendo en cuenta estos resultados de la investigación, interpretamos que los estudiantes tienen una tendencia a considerar el área que aparece en la variación del flujo, como el área del circuito y no el área barrida por el movimiento del circuito o de la parte móvil del circuito. Es decir, los estudiantes tienden a confundir el área del circuito con el área de integración en la ley de Faraday. Esto les lleva, como se muestra en la cuestión C4, a conclusiones erróneas en la predicción de los fenómenos de la inducción electromagnética.

5. Persistencia de las dificultades de los estudiantes

Muchos de los errores de los estudiantes que hemos descrito fueron observados con similares respuestas en los dos niveles de enseñanza. Sólo el 4% de los estudiantes de primer curso utiliza esta ley para explicar la fuerza que actúa sobre los electrones en la cuestión de la “espira en movimiento en un campo magnético uniforme” (C3). Porcentajes un poco mejores, (alrededor del 20%) encontramos en el caso de la cuestión del “generador unipolar de Faraday” (C4) pero alejados de los que cabría esperar en estudiantes universitarios. Así mismo, las diferencias entre los estudiantes de primero y de tercero no son lo grandes que cabría esperar, confirmando que existe una dificultad persistente en aprendizaje de un modelo interpretativo de los fenómenos electromagnéticos que los describa en términos de los efectos del campo. Aunque la ley de Lorentz se explica de forma explícita en el tema anterior de campos y fuerzas magnéticas, no se obtiene el aprendizaje que cabría esperar.

La persistencia de la dificultad de identificar las fuerzas que intervienen en la inducción se muestra en las entrevistas que se realizaron a 6 estudiantes de 3° de físicas en las que se preguntó sobre la cuestión de la “espira en movimiento en un campo magnético uniforme” (C3). Como ilustran los párrafos 7 y 8 del siguiente diálogo entre el estudiante (S) y la entrevistadora (E), la explicación en términos de flujo magnético no implica necesariamente que se conozca la naturaleza de las fuerzas que actúan sobre los electrones.

1. E: ¿Existe paso de corriente en este experimento (cuestión C3)?
2. S: Sí
3. E: ¿Podrías justificar tu respuesta?
4. S: Porque el flujo que atraviesa la espira es diferente

5. E: ¿Qué es lo que hace que varíe el flujo?

6. S: varía el ángulo de la superficie de la espira con respecto a las líneas de campo. Sabiendo como varía el flujo, derivándolo respecto del tiempo, se obtendría el valor de la fuerza electromotriz inducida.

7. E: Explica de donde proceden las fuerzas que actúan sobre las cargas que se mueven en la espira, ¿De que tipo de fuerzas estamos hablando? ¿Son fuerzas asociadas a un campo magnético o eléctrico o...?

8. S: es una fuerza electromotriz de movimiento. Supongo que si hay corriente eléctrica está asociada a un campo eléctrico, como en un circuito eléctrico.

Otra de las dificultades persistentes a lo largo de la instrucción es mostrada por un porcentaje constante de explicaciones que consideran que la fuerza electromotriz inducida es debido a la presencia de un campo magnético uniforme. Aquí también los resultados no son todo lo buenos que cabría esperar. Por ejemplo, en la cuestión de la “espira en un campo magnético variable” (C2) el porcentaje de respuestas que atribuye al campo magnético la inducción de la espira se mantiene constante en primer y tercer curso.

Por otra parte, es de resaltar el razonamiento incorrecto de la mayoría de los estudiantes al confundir el área del circuito con el área barrida por él mismo al aplicar la ley de Faraday en el caso del “generador unipolar de Faraday”. Para esta confusión no hay una progresión positiva a lo largo de la instrucción. Como ilustra el siguiente diálogo de un extracto de la entrevista realizada un estudiante de 3° de física sobre esta cuestión

1. E: ¿En este experimentos (cuestión 4) se produce corriente eléctrica?
2. S: A mi me parece que no. Porque el flujo magnético a través del disco no varía. Entonces la derivada del flujo con respecto al tiempo, al ser el flujo constante, es cero. No hay fuerza electromotriz, a no ser que el el campo magnético varíe con el tiempo. Aquí hemos dicho que es constante, así que la fuerza electromotriz inducida es cero.

3. E: Veo que no te quedas muy convencido

4. S: Es que nos pusieron un video en clase con una dinamo parecida al experimento de la cuestión 4 y se veía que había paso de corriente, pero yo no se explicarlo. En realidad pasan el mismo número de líneas de campo porque no estás moviendo el disco. Luego no hay variación de flujo, pero ..no sé ...

Los resultados obtenidos indican que muchas respuestas aplican de forma mecánica la ecuación de la ley de Faraday evidenciando la falta de significado de la ecuación para los estudiantes.

6. Implicaciones para la enseñanza de la física

En este trabajo hemos identificado dificultades sugeridas por las respuestas más comunes de los estudiantes

al explicar fenómenos de inducción electromagnética similares a los estudiados en clase. Estas dificultades han sido presentadas en términos de categorías alternativas e ideas correctas que los estudiantes expresan.

Los resultados discutidos anteriormente apoyan que los estudiantes muestran tres dificultades persistentes a lo largo de los primeros cursos de universidad:

- Un porcentaje significativo de respuestas que razona como si las líneas de campo magnético que atraviesan el circuito son la causa de que se produzca fuerza electromotriz inducida y confunden las líneas de campo que atraviesa el circuito con la variación del flujo magnético a través del circuito.

- La gran mayoría de los estudiantes elude explicar los fenómenos de inducción electromagnética en términos de las fuerzas que actúan sobre los electrones (nivel microscópico) y hablan de variación del flujo magnético (nivel macroscópico). La alta frecuencia con que aparece esta tendencia en todas las cuestiones y en los dos cursos universitarios, sugiere que la mayoría de los estudiantes no ha comprendido un modelo de la inducción electromagnética que permite explicarla en términos de campo (nivel macroscópico) y en términos de las acciones que ejerce el campo sobre los electrones (nivel microscópico).

- Cuando los estudiantes analizan experimentos de inducción electromagnética de movimiento, la gran mayoría tiende a confundir el área del circuito con el área de integración en la ley de Faraday.

A la hora de realizar conclusiones e implicaciones para la enseñanza es necesario tener en cuenta que el cuestionario y las entrevistas han sido implementados con un número reducido de estudiantes de una sola universidad. Así pues, no podemos aportar evidencias para contextos más generales. Nuestro estudio no está diseñado para aportar evidencias concluyentes sobre todas las dificultades de los estudiantes universitarios en el aprendizaje de la inducción electromagnética y, de hecho, puede haber dificultades debido a otros factores no tenidos explícitamente en cuenta en este estudio. Sin embargo, hemos contrastado que los resultados obtenidos en este estudio coinciden con otros estudios realizados con muestras de estudiantes de otros países. Además, los resultados obtenidos aportan novedades que coinciden con las intuiciones derivadas de la práctica docente.

Como hemos indicado anteriormente, la enseñanza habitual de la inducción electromagnética se centra en proporcionar conceptos y leyes que expliquen los fenómenos de inducción. Si la enseñanza se basa en una pura transmisión de los conceptos y leyes con ilustraciones de ejemplos 'ad hoc', puede ser que no se entiendan claramente los aspectos más característicos del modelo explicativo de la inducción electromagnética. En este sentido, es necesario realizar un esfuerzo que vaya más allá de detectar los fallos de los estudiantes y permita identificar los puntos clave del modelo sobre el

que los estudiantes deben reflexionar y ser guiados para su comprensión.

Llegados a este punto, emergen dos cuestiones. Primero, ¿son claves todos los detalles de las explicaciones de la inducción electromagnética? Obviamente no, pero es menos obvio decidir qué aspectos son claves para entender el modelo explicativo de la inducción electromagnética en la física clásica. De acuerdo con los resultados de este estudio, sugerimos que es necesario poner énfasis en explicar los aspectos macroscópicos (en términos de campo) y microscópicos (en términos de las acciones del campo) del modelo y, justificar que se puede utilizar indistintamente uno u otro para explicar la inducción electromagnética. Es claro que cuando se trata de un conductor moviéndose en un campo magnético constante en el tiempo la explicación en términos de las fuerzas del campo que actúan es sencilla y útil, mientras que en otros fenómenos la utilización de la variación del flujo magnético a través de una superficie (en términos de campo), es más sencilla. Sin embargo, el aspecto clave a reflexionar con los estudiantes es por qué se elige una explicación u otra y, en cualquier caso, dejar claro que ambas son válidas para cualquier situación.

La segunda cuestión que emerge es ¿Cómo enseñar a los estudiantes los aspectos clave de la teoría? Los estudiantes no pueden ser considerados receptores pasivos. Un enfoque basado en plantear problemas y desarrollar investigaciones tutorizadas para resolverlos [21, 22] parece a priori apropiado para diseñar materiales didácticos que hagan reflexionar a los estudiantes sobre los aspectos claves mencionados. Otras investigaciones han mostrado beneficios de tener en cuenta los aspectos claves del modelo físico con este enfoque de enseñanza [23]. El entrenamiento de los estudiantes en reflexionar sobre los aspectos claves del modelo es decisivo para que lo entiendan y lo apliquen. Sugerimos que investigaciones con este enfoque que diseñen materiales didácticos y los implementen con sus estudiantes, son necesarias para disminuir la brecha entre la enseñanza de la inducción electromagnética y la comprensión de la misma por los estudiantes.

Referencias

- [1] R. Duit, Bibliography-STCSE (IPN-Libniz Institute of Science Education, Kiel, 2007), available in <http://www.ipn.uni-kiel.de/aktuell/stcse/stcse.html>.
- [2] L. Viennot, Reasoning in Physics. The part of common sense (Kluwer Academic, Dordrecht, 2001).
- [3] J. Guisasola, J. Salinas, J.M. Almudi, y S. Velazco, Revista Brasileira de Ensino de Física **25**, 195 (2003).
- [4] R. Chabay and B. Sherwood, Am. J. Phys. **74**, 329 (2006).
- [5] E. Bagno and B. Eylon, Am. J. Phys. **65**, 726 (1997).

- [6] P.A. Tipler y G. Mosca, *Physics for Scientists and Engineers* (W.H. Freeman and Company, New York, 2004), 5th ed.
- [7] R.D. Knight, B. Jones and S. Field, *Physics, A Strategic Approach* (Pearson Addison Wesley, New York, 2008), 2nd ed.
- [8] D.L. Corson, Am. J. Phys. **73**, 284 (1956).
- [9] D.R. Corson and P. Lorrain, *Introduction to Electromagnetic Fields and Waves* (W.H. Freeman and Company, San Francisco, 1962), p. 526, Appendix E.
- [10] F. Munley, American Journal of Physics **72**, 1478 (2004).
- [11] A. Nussbaum, Physics Education **7**, 231 (1972).
- [12] D.K. Cheng, *Fundamentals of Engineering Electromagnetism* (Addison-Wesley Publishing Co, New York, 1993).
- [13] H.V. Mauk and D. Hingley, Am. J. Phys. **73**, 1164 (2005).
- [14] M. Loftus, SSR **77**, 280 (1996).
- [15] M. Saarelainen, A. Laaksonen and P.E. Hirvonen, European Journal of Physics **28**, 51 (2007).
- [16] M. Saglam and R. Millar, *Diagnostic Test of Students' Ideas in Electromagnetism* (Research Paper Series, University of York, 2005).
- [17] W. Meng Thong and R. Gunstone, Research in Science Education **38**, 31 (2008).
- [18] B. Layton and M. Simon, The Physics Teacher **36**, 474 (1998).
- [19] I. Galili, D. Kaplan and Y. Lehav, Am. J. Phys. **74**, 337 (2006).
- [20] P.J. Scanlon, R.N. Henriksen and J.R. Allen, Am. J. Phys. **37**, 698 (1969).
- [21] J. Guisasola, C. Furió and M. Ceberio, in *Science Education in Focus*, edited by M.V. Thomase (Nova Science Publisher, New York, 2008), p. 55-85.
- [22] P. Lijnse and K. Klaassen, International Journal of Science Education **26**, 537 (2004).
- [23] J. Guisasola, J.M. Almudí, M. Ceberio and J.L. Zubimendi, International Journal of Science and Mathematics Education, accepted for publishing in June 2008, on line en http://www.springerlink.com/content/111141/?Content+Status=Accepted&sort=p_OnlineDate&sortorder=desc&v=condensed&k=Guisasola.