

REVISIÓN DE LA INVESTIGACIÓN ACERCA DE LAS IDEAS DE LOS ESTUDIANTES SOBRE LA INTERPRETACIÓN DE LOS FENÓMENOS DE INDUCCIÓN ELECTRO-MAGNÉTICA

REVIEW OF RESEARCH ON STUDENTS IDEAS ON THE INTERPRETATION OF ELECTROMAGNETIC INDUCTION PHENOMENA

Kristina Zuza, José Manuel Almodí y Jenaro Guisasaola
Departamento de Física Aplicada de la Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea

RESUMEN: La teoría de la Inducción Electromagnética (IE) es fundamental en el programa de física de Secundaria (16-18 años) y cursos introductorios en la Universidad. No es de extrañar que esta teoría y la ley de Faraday constituyan un capítulo específico en los diferentes currículos españoles e internacionales. Sin embargo, aunque la Fuerza de Lorentz y la ley de Faraday son temas comunes en la enseñanza de la IE desde hace muchos años, son recientes los trabajos que se ocupan del aprendizaje logrado por los estudiantes en este tema. En este trabajo se examinan diferentes trabajos sobre concepciones alternativas de los estudiantes de últimos cursos de Secundaria y universidad respecto a la IE y la ley de Faraday. De acuerdo con nuestro análisis, la enseñanza habitual produce poco aprendizaje en las ideas claves de la teoría científica sobre la IE en la física clásica. En general, los diferentes estudios analizados muestran que la mayoría de los estudiantes no tienen una comprensión de un modelo de la IE, ni de la ley de Faraday. Un número significativo de estudiantes no explica los fenómenos sino que los describe o recurre a conocimientos memorísticos presentados de forma incoherente. Otra parte significativa de estudiantes desconoce las causas asociadas a la IE, atribuyéndolas al campo magnético estacionario o a la corriente eléctrica.

PALABRAS CLAVE: Inducción Electromagnética, Concepciones alternativas, Universidad y Secundaria (16-18 años)

ABSTRACT: Electromagnetic Induction (EI) theory is fundamental in the physics programme for Secondary school (16-18 years old) and introductory University courses. It is not surprising that this theory and Faraday's law have their own chapter in different Spanish and international curriculums. However, although Lorentz's Force and Faraday's Law have been common topics in EI teaching for many years, work done to look at the learning achieved by students on this topic is relatively recent. This article examines different projects on alternative conceptions for students in the top years of Secondary school and at University regarding EI and Faraday's law. In accordance with our analysis, usual teaching produces little learning on scientific theory's key ideas for EI in classic physics. In general, the different studies analysed show that most students do not understand a model for EI or Faraday's law. A significant number of students do not explain the phenomena but describe them or resort to memorised knowledge presented incoherently. Another significant number of students did not know the causes associated with EI, attributing them to the stationary magnetic field or electric current.

KEY WORDS:

Fecha de recepción: octubre 2010 • Aceptado: octubre 2011

Para citar: Zuza, K., Almodí, J. M. y Guisasaola, J. (2012). Revisión de la investigación acerca de las ideas de los estudiantes sobre la interpretación de los fenómenos de inducción electromagnética. *Enseñanza de las Ciencias*, 30 (2), pp. 175-196

1. INTRODUCCIÓN

El marco teórico general de investigación de las concepciones alternativas ha sido extensamente empleado en la literatura. Este enfoque de investigación se basa en el paradigma constructivista del aprendizaje que propone que el conocimiento previo y las concepciones de los estudiantes interfieren y afectan a su aprendizaje en nuevos contextos (Driver et al. 1996, Bliss 2008). Dentro del paradigma constructivista los diferentes enfoques teóricos ven el proceso de adquisición del conocimiento con algunas sutiles diferencias. Más recientemente, se ha reconocido que las creencias ontológicas y los presupuestos epistemológicos afectan y son afectados por el proceso de conocimiento (DiSessa 1993, Vosniadou 2002). En este trabajo, por una utilización consistente, llamaremos «concepciones alternativas» a aquellas concepciones de los estudiantes que no son congruentes con las concepciones estándar de la física. Las concepciones alternativas, en términos generales, se organizan en estructuras de conocimiento (esquemas) que frecuentemente surgen de las ideas espontáneas que los estudiantes adquieren en su normal desarrollo cognitivo al interactuar con el entorno. Estas concepciones también pueden surgir de (o ser modificadas por) la instrucción o por el conocimiento de temas previos. Algunas de las concepciones alternativas de los estudiantes se han encontrado universales y, por ejemplo, son resistentes a la instrucción y pueden incluso coexistir con concepciones estándar aprendidas en clase. Ejemplos comunes son las nociones de fuerza, calor, temperatura e ideas sobre la visión o el funcionamiento de circuitos eléctricos. Generalmente este tipo de investigaciones se centra más en aspectos conceptuales y modelos explicativos, que en aspectos que necesiten prerrequisitos matemáticos avanzados (McDermott y Redish 1999).

Hay numerosas investigaciones que han tenido como objeto de estudio las dificultades que tienen los estudiantes en el campo de la física (Duit 2007). Muchas de estas dificultades han sido denominadas como concepciones de 'sentido común', ya que, son comunes a los estudiantes de diferentes países y niveles. Estas ideas, están también relacionadas con las formas de razonamiento en situaciones relacionadas con la vida cotidiana, que se supone los estudiantes experimentan en su día a día. El origen del conocimiento de cualquier persona incluye por un lado la formación formal y por otro la experiencia de la vida cotidiana. No es apropiado intentar separar ambos aspectos del conocimiento de los estudiantes que se derivan de los dos tipos de experiencias (Driver, Leach, Scott & Wood-Robinson, 1994). Mientras que las experiencias de la vida cotidiana tienen un impacto importante en algunas de las concepciones alternativas, en algunos temas muy académicos, como es el caso de la inducción electromagnética, es razonable pensar que es necesario conocer en profundidad la epistemología y el marco teórico de la física actual del tema. Así pues, en los comentarios que se indicarán en las diferentes partes del artículo, se realizará un esfuerzo por clarificar y explicitar con detalle los aspectos del marco teórico de la física en relación a las posibles concepciones alternativas de los estudiantes.

La importancia de este tipo de investigaciones se justifica, entre otras razones, porque los estándares educativos de las últimas décadas resaltan que los estudiantes interpreten los fenómenos naturales de acuerdo con modelos progresivamente más cercanos a los de la comunidad científica (Science for All American 1990, National Research Council 1996). Como indican Meheut y Psillo (2004) tener en cuenta el marco teórico de los estudiantes es fundamental para realizar un retrato de su comprensión y permite tomar decisiones sobre el diseño del curriculum y las secuencias de enseñanza. Así mismo, Leach y Scott (2003) explican que a partir de las ideas y presupuestos epistemológicos de los estudiantes se pueden realizar hipótesis de progresión de su aprendizaje. Consecuentemente el conocimiento de las concepciones de los estudiantes es una componente básica en el diseño de los programas de enseñanza y en la evaluación de la progresión de la comprensión de los estudiantes en la utilización de modelos interpretativos próximos a los científicos.

La necesidad de información sobre las concepciones alternativas y formas de razonamiento de los estudiantes es particularmente necesaria en aquellas áreas del currículum que han sido poco investigadas por el tipo de contenidos que trata, o bien, por el nivel de enseñanza. Así, mientras partes iniciales del programa de física, como las ideas de los estudiantes sobre el funcionamiento de circuitos eléctricos elementales, han sido ampliamente analizadas, otros conceptos del área de electromagnetismo, como la inducción electromagnética para niveles de secundaria post-obligatoria (16-18 años) y universidad, han sido poco investigados (Duit 2009). Los trabajos que muestran dificultades en el proceso de enseñanza-aprendizaje de un modelo científico sobre los fenómenos de inducción electromagnética, constituyen un campo de investigación novedoso cuya bibliografía surge principalmente a partir de la última década. La relevancia de los fenómenos de Inducción Electromagnética (IE) en la enseñanza ha ido aumentando en los últimos años a medida que sus aplicaciones tecnológicas se han hecho más comunes en la vida cotidiana. La correcta interpretación de estos fenómenos permite a los ciudadanos la toma de decisiones de forma más racional, en relación a muchas aplicaciones de la IE. Por ejemplo, las cocinas de inducción no suponen un riesgo para la salud, información sobre los motores eléctricos, el funcionamiento del tren de alta velocidad etc.

La relevancia del tema de IE no se limita a sus aplicaciones tecnológicas y el interés para la ciudadanía y, en particular, para los futuros científicos e ingenieros, sino que el modelo explicativo de la IE, y la ley de Faraday que lo cuantifica, constituyen cuestiones básicas sin las que no se puede construir una teoría científica de los fenómenos electromagnéticos en el marco de la teoría clásica 'maxwelliana'. Esta parte del temario de física es interesante para la enseñanza por las siguientes razones: a) Es un tema donde diferentes leyes y conceptos del campo eléctrico y magnético se relacionan, encontrando los estudiantes dificultades a la hora de tratar esos conceptos de forma conjunta; b) La existencia de estudios previos que muestran los problemas de los estudiantes al analizar conceptos básicos como flujo magnético y las relaciones entre campos eléctricos y magnéticos, así como su creación; c) La gran importancia del concepto de IE para la construcción de un modelo basado en las ecuaciones de Maxwell de la física clásica, que asegura la interpretación científica de muchos fenómenos electromagnéticos.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, se plantean las siguientes preguntas de investigación: ¿Qué resultados muestra la investigación en enseñanza de la física sobre las dificultades de los estudiantes de 2º de bachillerato y primeros cursos de universidad en el aprendizaje de la inducción electromagnética? En concreto ¿hay resultados sobre dificultades de importantes leyes y/o conceptos relacionados con la inducción electromagnética como el flujo magnético o la ley de Faraday?

Para contestar a estas preguntas se realizó una búsqueda bibliográfica que, como punto de partida, mostró la existencia en la bibliografía de abundantes trabajos que proponen demostraciones y experimentos para mejorar la enseñanza de la inducción electromagnética, así como de trabajos que proponen secuencias de enseñanza para mejorar el aprendizaje de los estudiantes (Galili, Kaplan y Lehari 2006; Chabay y Sherwood 2006), muestran una preocupación en el profesorado sobre el proceso de enseñanza-aprendizaje de la teoría de IE. Sin embargo, el número de investigaciones sobre dificultades de los estudiantes en el aprendizaje de los diversos conceptos y leyes implicados en la teoría de la inducción electromagnética es escaso en comparación con otras áreas de la física (Albe, Venturini y Lascours 2001; Venturini y Albe 2002; Loftus 1996; Bagno y Eylon 1997; Mauk y Hingley 2005; Saarelainen, Laaksonen y Hirvonen 2007; Thong y Gunstone 2008; Sağlam y Millar 2006; Dori, Hult, Breslow y Belcher 2007; Guisasaola, Almuñí y Zuza 2011). Se trata de un problema didáctico no muy investigado y que necesita de mayor investigación tanto en dificultades de aprendizaje como sobre diseño de secuencias de enseñanza que mejoren el aprendizaje del alumnado.

Así mismo, la primera búsqueda bibliográfica mostró que el tema de Inducción Electromagnética incluye muchos conceptos y leyes en el currículo y por ello, suele ocupar uno o dos capítulos de los libros de texto. Así pues, ha sido necesaria limitar las preguntas de la investigación a dos aspectos de la

Inducción electromagnética, por un lado, aspectos que tratan de los prerequisites que deben conocer los estudiantes para interpretar adecuadamente los fenómenos de inducción electromagnética como campo magnético y flujo magnético. En segundo lugar, analizaremos las dificultades de los estudiantes al interpretar fenómenos electromagnéticos y en particular, en la interpretación de la ley de Faraday. Es necesario remarcar que ambos apartados tratan de aspectos relacionados, muy entrelazados, por lo que recomendamos al lector que valore especialmente la visión de conjunto. Nuestra intención es que el profesorado y la comunidad de investigadores en enseñanza de la física, puedan disponer de unos primeros datos sobre las ideas alternativas más problemáticas que poseen los estudiantes sobre IE. Entendemos que la selección de los aspectos elegidos deja conceptos o leyes importantes, como por ejemplo la ley de Lenz, sin revisar, pero la hemos realizado en función de las investigaciones sobre concepciones alternativas de los estudiantes disponibles en la bibliografía sobre IE y, la necesaria acotación del tema revisado.

Vamos, a continuación, a presentar un resumen de los diferentes trabajos analizados; para ello cada referencia se presentará con algunos ejemplos y se expondrán los comentarios y resultados obtenidos a la hora de aplicarlas a los grupos de estudiantes. Para evitar posibles errores interpretativos, la traducción de las cuestiones de trabajos en lengua inglesa ha sido revisada por un profesor nativo inglés pero con amplia experiencia en docencia de la física en castellano.

2. DIFICULTADES EN EL APRENDIZAJE DEL CONCEPTO DE FLUJO MAGNÉTICO

Albe, Venturini y Lascours (2001) hacen un estudio centrado en los conceptos campo magnético y flujo magnético. A pesar de que éste no sea un trabajo centrado en los fenómenos de inducción magnética nos aporta datos interesantes, ya que la comprensión del flujo es necesaria para la correcta interpretación de la ley de Faraday. Albe et al. hacen el estudio en dos grupos de estudiantes: Un grupo está formado por 50 estudiantes participantes en un programa de formación de profesorado y el otro por 64 estudiantes de física de primer curso de ciencias físicas que no habían estudiado electromagnetismo en ese curso. En esta revisión nos vamos a centrar en el cuestionario de respuestas múltiples para los estudiantes de física sobre los prerequisites necesarios para entender los fenómenos de inducción magnética y la ley de Faraday. Una de las cuestiones se muestra a continuación (figura 1).

Si estás de acuerdo con alguna de las siguientes afirmaciones, marca el cuadro correspondiente. Si prefieres otra definición diferente, por favor, escríbela.

- El flujo magnético es la cantidad de campo magnético que atraviesa una superficie.*
- El flujo magnético es la cantidad de campo magnético que atraviesa una superficie por unidad de tiempo.*
- El flujo magnético a través de una superficie está relacionado con el número de líneas que lo atraviesan.*
- El flujo magnético está relacionado con el movimiento del campo magnético a través de una superficie.*
- El flujo magnético...*

Fig. 1. Cuestión sobre la definición física del flujo. La respuesta correcta es la tercera

El 36% de los estudiantes eligió la primera respuesta (es la cantidad de campo magnético que atraviesa una superficie), el 50% la segunda (es la cantidad de campo magnético que atraviesa una superficie por unidad de tiempo), 20% relacionó el flujo con las líneas de campo magnético (respuesta correcta), el 22% optó por la cuarta respuesta y el 3% no respondió.

Otra de las cuestiones realizadas a los estudiantes se muestra en la figura 2:

¿Cuál de las siguientes formulas se debería utilizar para calcular el flujo? Puedes elegir más de una opción.

<input type="checkbox"/> $\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S}$	<input type="checkbox"/> $\Phi = B \cdot S \cdot \text{tg}\theta$	<input type="checkbox"/> $\Phi = \frac{dB}{dt} S$
<input type="checkbox"/> $\Phi = \oint \vec{B} \cdot \vec{n} \cdot ds$	<input type="checkbox"/> $\Phi = B \frac{dS}{dt}$	<input type="checkbox"/> $\Phi = B \cdot S \cdot \cos\theta$
<input type="checkbox"/> $\Phi = \frac{B}{S}$		

Fig. 2: Cuestión sobre la fórmula relativa al flujo magnético. Respuestas correctas: $\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S}$; $\Phi = \oint \vec{B} \cdot \vec{n} \cdot ds$; $\Phi = B \cdot S \cdot \cos\theta$

El 92% de los estudiantes eligió sólo una de las definiciones correctas de flujo indicadas, la definición tradicional del flujo ($\Phi = \int \vec{B} \cdot \vec{n} \, dS$). Sólo el 22% de los estudiantes eligió alguna de las otras respuestas correctas.

Un último ejemplo de cuestiones del estudio relacionado directamente con el concepto de flujo magnético es la siguiente (figura 3).

Tienes un imán y una espira a tu disposición

a) Si aumentas la superficie de la espira, el flujo				
disminuye	<input type="checkbox"/>	Si	<input type="checkbox"/>	No
aumenta	<input type="checkbox"/>	Si	<input type="checkbox"/>	No
se mantiene	<input type="checkbox"/>	Si	<input type="checkbox"/>	No
b) Si mueves el imán hacia la espira, el flujo				
disminuye	<input type="checkbox"/>	Si	<input type="checkbox"/>	No
aumenta	<input type="checkbox"/>	Si	<input type="checkbox"/>	No
se mantiene	<input type="checkbox"/>	Si	<input type="checkbox"/>	No
c) Si ladeas la espira, el flujo				
disminuye	<input type="checkbox"/>	Si	<input type="checkbox"/>	No
aumenta	<input type="checkbox"/>	Si	<input type="checkbox"/>	No
se mantiene	<input type="checkbox"/>	Si	<input type="checkbox"/>	No

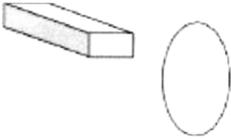


Fig. 3. Cuestión sobre los factores que afectan al flujo. Respuestas correctas: (a) el flujo aumenta, (b) el flujo aumenta, (c) el flujo disminuye

Los resultados obtenidos mostraron que el 64% dice que aumenta el flujo con el área. El 58% de los estudiantes dice que aumenta el flujo con el campo magnético y el 36% dice que se reduce el flujo con el ángulo entre la normal del área y el campo.

Como conclusión, los autores indican que las definiciones de flujo empleadas por los estudiantes son confusas. Según los autores, esta falta de concreción en las definiciones puede ser debida a la definición estrictamente matemática que se suele hacer de esta magnitud. Además, los autores indican que otro de los factores que influyen en esta falta de significado puede deberse al lenguaje que se utiliza en los libros de texto y en los cursos tradicionales al hablar de la palabra «flujo» como «fluir a través de una superficie dada», así como a las posibles asociaciones entre la representación vectorial del campo y la idea del movimiento.

En un trabajo posterior Venturini y Albe (2002) hacen un análisis sobre el conocimiento del electromagnetismo en estudiantes de 1º de Ciencias Físicas. Los resultados confirman los obtenidos en el estudio anterior. El 96% de los estudiantes conoce la fórmula matemática del flujo, pero para el 78% de los estudiantes que participaron en el estudio el concepto de flujo es confuso. Así, el 46% considera que el flujo es la cantidad de campo magnético que pasa a través de una superficie, y el 22% considera que el flujo es debido al desplazamiento del campo magnético a través de la superficie. Según los autores, esta confusión se debe en parte a la percepción que tienen los estudiantes del campo magnético, quienes relacionan este concepto con el vector campo magnético.

3. DIFICULTADES DE APRENDIZAJE DE LA TEORÍA DE INDUCCIÓN MAGNÉTICA

Un estudio realizado por Loftus (1996) describe las respuestas de 150 estudiantes de enseñanza secundaria (14-18 años) ante tres experimentos. En el primero de los experimentos se hizo levitar un anillo cerrado sobre un electroimán y se repitió el experimento con un anillo abierto. El electroimán crea un campo magnético variable en las cercanías de la espira y esto hace que se induzca corriente en la misma. Las fuerzas magnéticas contrapuestas debidas, por un lado, al electroimán y, por otro, a las corrientes inducidas en el anillo, son las que hacen levitar a dicho anillo. En el caso en el que el anillo esté abierto, a pesar de que se dé el fenómeno de la inducción magnética, no hay corriente inducida y por lo tanto, no hay fuerzas de repulsión entre el electroimán y el anillo. En el segundo experimento, se hizo pasar sobre un electroimán un circuito con una bombilla y un solenoide. En este caso, el movimiento del circuito hace que haya una variación de flujo en el circuito y esto a su vez, genera una fem inducida y una corriente en el circuito que hace que la bombilla se encienda. En el último de los experimentos que tenían que resolver los estudiantes se usó una cocina de inducción para hacer hervir agua en un puchero ferromagnético. La cocina genera un campo magnético variable y este campo genera corrientes inducidas en las cazuelas de gran resistencia eléctrica. Es por el efecto Joule (además del ciclo de histéresis del material ferromagnético) por lo que se calientan o cocinan los alimentos.

Se pidió a los estudiantes que explicaran cada uno de los experimentos en situación de examen, y las respuestas fueron clasificadas en las siguientes categorías: Fuerza, carga, flujo, fricción, calor y luz. En la explicación del primer experimento, algunos de los estudiantes utilizan el concepto de fuerza para explicar la levitación del anillo. Sin embargo, el caso del anillo abierto genera dificultades de explicación, la mayoría de las respuestas explica que la fuerza se 'filtra' por la abertura del anillo. En la categoría de respuesta que hace referencia a las cargas, todas las respuestas hacen referencia a conceptos del ámbito de la electrostática y hablan de repulsión entre cargas nunca de interacción electromagnética. Hay que resaltar que el anillo abierto también genera problemas en esta interpretación y aluden a que son las cargas las que se 'filtran por la abertura' o que 'saltan' a la bombilla en el caso del segundo experimento. En ambas categorías se está hablando de que 'algo' se escapa del anillo abierto, haciendo referencia a que hay un flujo (de carga, de fuerza). La generación de calor creada en el tercer experimento, es atri-

buida a la fricción. Esto resulta bastante sorprendente para Loftus, ya que no hay ningún movimiento visible en la demostración. Otros estudiantes creen que es el electroimán el que genera calor y es este calor el que viaja hasta el agua.

Sólo unos pocos estudiantes razonan de forma adecuada en cada cuestión. El autor agrupa las respuestas incorrectas en patrones de razonamiento comunes a varias cuestiones. Uno de los patrones de razonamiento consiste en explicar que ‘algo’ actúa sobre otro objeto mandando ‘algo’ (fuerza, carga, luz,...) por un camino determinado. Otro de los patrones de razonamiento utiliza el modelo de fluido para dar las explicaciones: ‘algo (fuerza, carga, fricción) fluye’ de un objeto al otro. El autor cree que el uso de las analogías con los fluidos para explicar la electricidad puede ser la razón por la cual tantos estudiantes recurren a este modelo para dar sus explicaciones. También se muestra que los estudiantes tienen un problema con la acción a distancia; en ese sentido, algunos creen que el electroimán y el anillo, espira o cazo, deben estar físicamente unidos para que los efectos se transmitan.

El citado trabajo de Venturini y Albe (2002) analizó dificultades de 39 estudiantes de primer curso de Ciencias Físicas sobre la utilización de diferentes conceptos del electromagnetismo. En el apartado del cuestionario sobre inducción electromagnética, una de las cuestiones trata de la definición y significado de la ley de Faraday de inducción electromagnética. Los resultados obtenidos muestran que el 29% respuestas conoce la definición matemática correcta, 27% de las respuestas son aproximadas y sólo el 10% hace una interpretación correcta de la ecuación de la ley. Otra de las cuestiones pregunta qué se necesita para crear corriente por inducción en un circuito cerrado. Los resultados indican que el 51% no cita ningún elemento, el 22% describe un experimento, sólo un 8 % habla de la variación de flujo y un único estudiante propone los elementos necesarios, además de describir e interpretar la fem inducida.

Mauk y Hingley (2005) relatan la experiencia de preparar tutorías para 43 de sus estudiantes de la Academia de las Fuerzas Aéreas de EEUU (Colorado). Veamos los resultados obtenidos en una cuestión (Figura 4) relacionada con un fenómeno de inducción magnética.

Problema 5. Una espira de cobre es colocada cerca de un hilo conductor largo. La espira y el hilo están en el plano de la página. La corriente tiene un valor constante y va de derecha a izquierda.

a) *La espira se mueve hacia la izquierda con velocidad v tal y como se muestra en el diagrama. Mientras la espira se está moviendo hacia la derecha ¿aparece corriente en la espira? Si tu respuesta es afirmativa, deduce cuál es el sentido de la corriente. Explica.*

b) *La espira se mueve hacia arriba con velocidad v tal y como se muestra en el diagrama.*

i) *Mientras la espira se está moviendo hacia arriba ¿aparece corriente en la espira? Si tu respuesta es afirmativa, deduce cuál es el sentido de la corriente. Explica.*

ii) *Mientras la espira se está moviendo hacia arriba ¿aparece alguna fuerza magnética que actúa sobre la espira? Si tu respuesta es afirmativa, deduce la dirección de la fuerza. Explica.*

Fig. 4. Problema sobre inducción electromagnética

En el apartado a) al tener un anillo conductor en movimiento dentro de un campo magnético, existe el fenómeno de inducción magnética. La explicación de lo que ocurre se puede dar tanto desde el punto de vista microscópico como desde el punto de vista macroscópico. Desde el punto de vista macro, se puede analizar el flujo magnético a través de la espira, y se observa que no existe variación de dicho flujo. Desde el punto de vista micro, se puede analizar la fuerza de Lorentz que actúa sobre los electrones, y ver que la fuerza es igual en ambos lados de la espira pero de sentido contrario. Desde ambos puntos de vista se concluye que la fem total es cero. En el apartado b) sin embargo, a pesar de que ocurre lo mismo que en el apartado a), las fems que se inducen no son iguales en módulo y sí hay una fem total. Se inducirá una corriente cuya dirección será de sentido horario.

Las respuestas de los estudiantes fueron las siguientes: En el apartado a) respondieron correctamente y con justificación correcta el 69% de los estudiantes que recibieron tutorías. En los dos grupos que no recibieron tutorías, uno con estudiantes de expediente muy bueno (grupo de honor) y otro con estudiantes de expediente normal (grupo normal), el 51 % de los estudiantes del grupo de honor y de alrededor del 40% del grupo normal contestaron correctamente. Las respuestas incorrectas argumentan que: 1) el campo magnético (y no la variación) crea corriente; 2) que por la ley de Lenz se crea una corriente que se opone al cambio; 3) no aplican correctamente el producto vectorial. Los tres tipos de respuestas son igual de frecuentes. Aproximadamente el 10% de los estudiantes eligieron una de estas categorías.

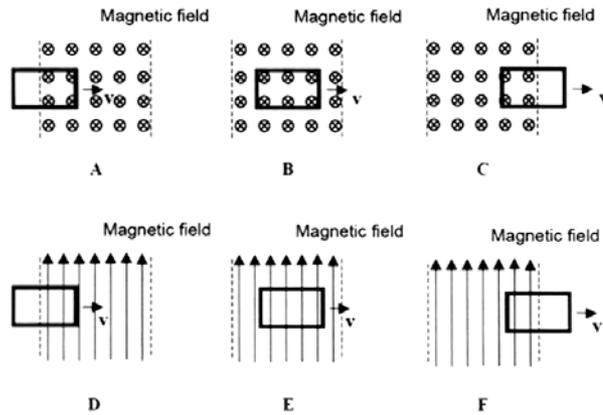
En el apartado b), las repuestas del grupo que recibió tutorías es mucho mejor que la de los grupos que no la recibieron, al igual que en la pregunta anterior (70% grupo con tutorías, 45% grupo de honor y 28% grupos regulares). Hay que mencionar que el 25-30% de los estudiantes que predicen que habrá corriente, indican una dirección incorrecta. En este caso la respuesta incorrecta más común fue la basada en una incorrecta interpretación del producto vectorial.

El objetivo principal de trabajo de Saglam y Millar (2006) es analizar el nivel comprensión de ideas básicas del electromagnetismo que tienen los estudiantes de física de la escuela secundaria superior (16-18 años) en Turquía e Inglaterra. Se pasaron cuestionarios de respuestas múltiples a 120 estudiantes turcos y 152 ingleses, todos ellos elegidos por sus buenos resultados académicos. Nuestra revisión se centra en las cuestiones relacionadas con la inducción electromagnética.

Estudiando los resultados de los cuestionarios, los autores llegan a la conclusión de que cuando a los estudiantes se les presentan cuestiones sobre el mismo concepto, las respuestas son más satisfactorias en los casos en los que la situación les resulta más conocida desde el punto de vista académico. Este resultado parece indicar que el aprendizaje es más memorístico que comprensivo. En la cuestión 8 (ver figura 5) se les pregunta a los estudiantes sobre la existencia de la fem en una espira rectangular que está moviéndose a velocidad constante en diferentes situaciones. Los estudiantes no tienen problemas para responder correctamente las cuestiones a) y c), y dicen claramente que sí habrá fem inducida y además recurren a la regla de la mano derecha para predecir la dirección de ésta. La cuestión b) resulta un poco más complicada para los estudiantes ya que a pesar de que la fem total sea cero hay que tener en cuenta que esto sucede porque realmente se inducen dos fems del mismo valor pero de sentido contrario. En el caso de los estudiantes turcos, responden correctamente a los apartados a) y c) el 79% y el 76% de los estudiantes respectivamente. Las respuestas correctas del apartado b) son del 63%. Los estudiantes ingleses obtienen mejores resultados para los apartados a) y b) (94% y 93%) pero peores para el caso b); únicamente el 51% de los estudiantes ingleses responden correctamente a este apartado de la pregunta. Los resultados de las cuestiones referentes a los diagramas D, E y F son muy similares a los expuestos para los diagramas A, B y C.

8

En el diagrama que se muestra a continuación se pueden ver seis espiras idénticas moviéndose con la misma velocidad v constante. El valor del campo magnético es el mismo en todos los casos. El campo está confinado en la región indicada.



Elige una de las opciones para cada una de las preguntas:

- a. Aparece alguna fem en la espira del diagrama A
- b. Aparece alguna fem en la espira del diagrama B
- c. Aparece alguna fem en la espira del diagrama C
- d. Aparece alguna fem en la espira del diagrama D
- e. Aparece alguna fem en la espira del diagrama E
- f. Aparece alguna fem en la espira del diagrama F

	SI	NO
a.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
b.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
c.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
d.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
e.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
f.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Fig. 5. Cuestión sobre los factores que generan inducción electromagnética

Las preguntas de la cuestión 8 resultan familiares a los estudiantes ya que son similares a las situaciones analizadas en clase. Sin embargo la pregunta 9 del mismo cuestionario, no parece que les resulte tan familiar, pues a pesar de que los conceptos son los mismos que se han planteado en la pregunta anterior, los resultados son mucho peores.

En la cuestión 9 se presenta el mismo fenómeno que en la cuestión 8 y se pide a los estudiantes que elijan entre 5 gráficas que representan la variación del flujo y otras 5 que representan la fem inducida. Sin embargo la cuestión 9, principalmente el apartado b), les resultó más difícil de responder a los estudiantes que la cuestión 8 y las respuestas fueron mucho peores. El 53% de los estudiantes turcos elige la gráfica adecuada que representa el flujo (la gráfica A) pero sólo el 13% de ellos elige la representación adecuada de la fem (la gráfica S). En el caso de los ingleses los resultados son un poco mejores, sobre todo para el caso del flujo hay 80% de respuestas correctas. Las respuestas correctas disminuyen notablemente en el caso de la elección de la gráfica correspondiente a la fem, sólo el 28% de los estudiantes ingleses eligen la opción correcta.

9

En el diagrama que se muestra a continuación se puede ver una espira a velocidad constante en un campo magnético uniforme. El campo está confinado en la región indicada.

(a) ¿Cuál de las gráficas que se muestran a continuación representa el flujo magnético Φ_B a través de la espira desde que entra en el campo magnético hasta que sale?

Responde escribiendo una letra en el cuadro (A, B, C, D o E)

(b) ¿Cuál de las gráficas que se muestran a continuación representa la fem inducida en la espira ϵ desde que entra en el campo magnético hasta que sale?

Responde escribiendo una letra en el cuadro (P, Q, R, S o T)

Fig. 6. Cuestión sobre los factores que generan inducción electromagnética. Respuestas correctas: (a) gráfica A, (b) gráfica S

En la Universidad de Kuopio (Finlandia), Saarelainen, Laaksonen y Hirvonen (2007) hicieron un estudio basado en el Conceptual Survey of Electricity and Magnetism (CSEM). El cuestionario CSEM fue desarrollado para evaluar el conocimiento de los estudiantes sobre temas de Electricidad y Magnetismo. El cuestionario tiene 32 cuestiones de opción múltiple y puede utilizarse como pre-test y/o post-test. Durante cuatro años los autores han ido aplicando y reformulando el cuestionario, las diferentes versiones del cuestionario han sido administradas a un total de unos 5.000 estudiantes de cursos introductorios de física en 30 diferentes universidades (Maloney, O’Kuma, Hieggelge, Van Heuvelen 2001). Saarelainen y colaboradores, pasaron el test a 144 estudiantes de primer curso de físicas justo al inicio de sus cursos de electromagnetismo con el objetivo de obtener una radiografía general sobre el conocimiento básico que tenían los estudiantes sobre la materia. El resultado obtenido en este estudio, llevo a los autores a realizar entrevistas a 5 de estos estudiantes con el objetivo de estudiar las concepciones y los modelos explicativos utilizados por los estudiantes. A continuación exponemos una de las cuestiones sobre inducción electromagnética del estudio de Saarelainen et al (2007) que coincide con la pregunta 29 del CSEM.

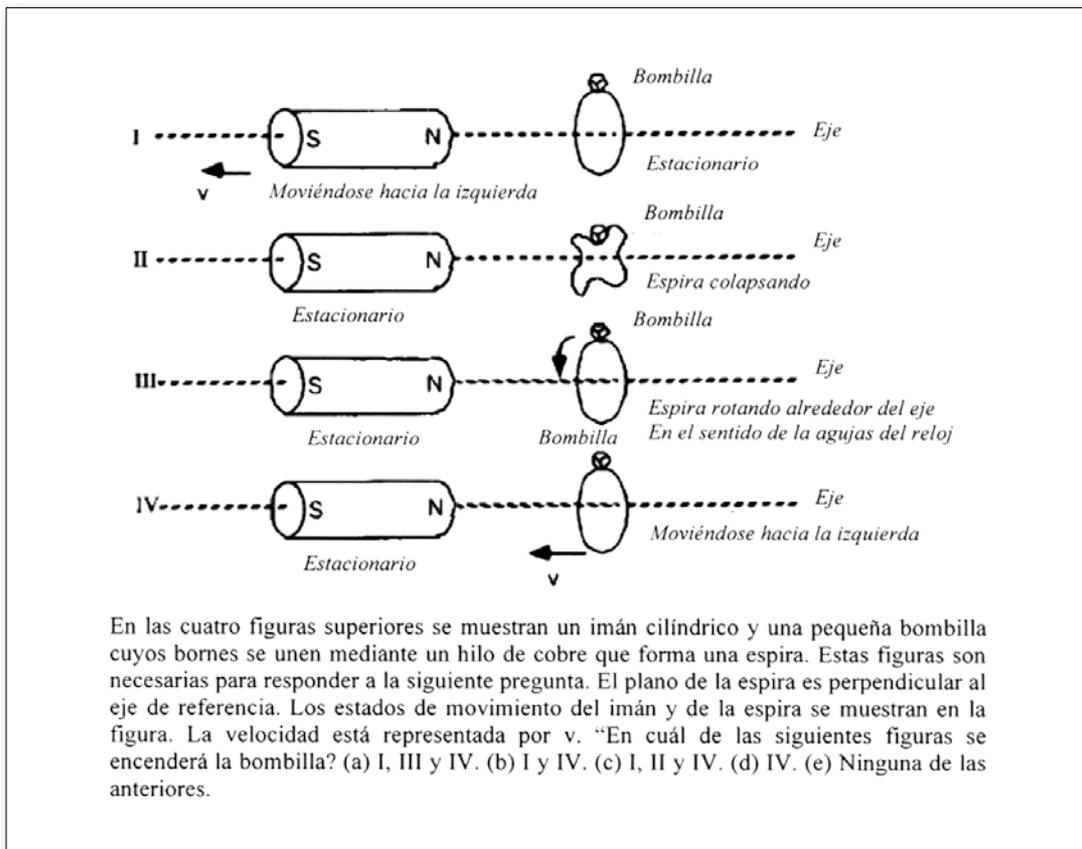


Fig. 7. Cuestión sobre los factores que generan inducción electromagnética. Respuesta correcta es la opción c)

La respuesta correcta a esta pregunta es la opción c), es decir, se encenderá la bombilla en los casos I, II y IV. En el caso I el movimiento del imán hace que el campo magnético sea variable en los alrededores de la espira y esto hará que el flujo varíe, generando una fem que a su vez generará una corriente inducida que encenderá la bombilla. En el caso II, el campo magnético es constante pero el circuito se está colapsando. Esto hace que el flujo a través del circuito varíe, se generará una fem y a su vez una corriente eléctrica inducida que encenderá la bombilla. En el caso III, el campo magnético es constante pero debemos estudiar cuál es el resultado de la rotación de la espira. En este caso observamos que el producto $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ es perpendicular al hilo de la espira, con lo cual la fuerza resultante de este producto no moverá las cargas en la dirección adecuada (la del cable conductor) para generar una corriente inducida. En el caso IV el movimiento de la espira produce una variación de flujo que generará una fem inducida y encenderá la bombilla.

En general los estudiantes no usaron modelos correctos ni del campo magnético ni del flujo magnético. Saarelainen et al. concluyen su trabajo diciendo que la variación del flujo respecto al tiempo no es comprendida como la base de la ley de Faraday y que los estudiantes no reconocen realmente ni la fuente del campo magnético ni las condiciones necesarias para que se dé la fem.

Thong y Gunstone (2008) presentan un trabajo como resultado del estudio realizado con 15 estudiantes universitarios de segundo año de física. Los estudiantes tuvieron un curso de electromagnetismo el primer año y mientras la investigación se llevaba a cabo estaban realizando prácticas de laboratorio en las cuales se trabajaron especialmente las explicaciones cualitativas de fenómenos del electromagnetismo. Los estudiantes fueron entrevistados individualmente durante 30 minutos en sus universidades.

La situación que se muestra en la figura 8 es la que se les propuso a los estudiantes sobre la inducción electromagnética. Una espira rectangular y un solenoide que pasa por el medio de la misma, quedando la espira más o menos en la mitad del solenoide. La intensidad en el solenoide va aumentando.

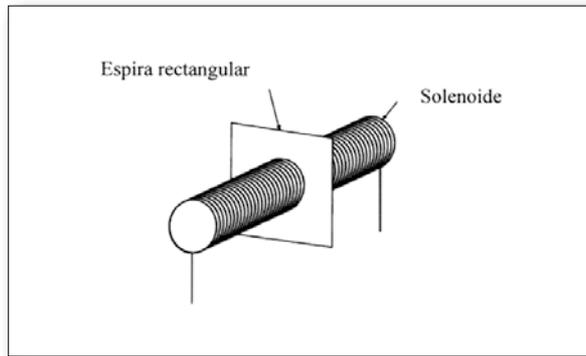


Fig. 8. Se presenta una espira rectangular que pasa por el medio de un solenoide con una intensidad de corriente en aumento.

Se propusieron 4 diseños (Figura 9) con bombillas para la espira situada alrededor del solenoide y se preguntó a los estudiantes cuáles de estas bombillas se iban a encender y con qué brillo relativo en cada una de las situaciones. A continuación se muestran los diseños de los circuitos y los resultados de los estudiantes.

<p>C1</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Resultados</th> <th>Número de estudiantes</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Ambas lámparas brillan</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>Sólo se enciende la lámpara L1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>No se enciende ninguna lámpara</td> <td>4</td> </tr> </tbody> </table>	Resultados	Número de estudiantes	Ambas lámparas brillan	10	Sólo se enciende la lámpara L1	1	No se enciende ninguna lámpara	4
Resultados	Número de estudiantes								
Ambas lámparas brillan	10								
Sólo se enciende la lámpara L1	1								
No se enciende ninguna lámpara	4								
<p>C2</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Resultados</th> <th>Número de estudiantes</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Todas las lámparas brillan pero menos que en el caso anterior</td> <td>14</td> </tr> <tr> <td>La lámpara L1 brilla más que las lámpara L1 y L2 que brillan igual</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	Resultados	Número de estudiantes	Todas las lámparas brillan pero menos que en el caso anterior	14	La lámpara L1 brilla más que las lámpara L1 y L2 que brillan igual	1		
Resultados	Número de estudiantes								
Todas las lámparas brillan pero menos que en el caso anterior	14								
La lámpara L1 brilla más que las lámpara L1 y L2 que brillan igual	1								
<p>C3</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Resultados</th> <th>Número de estudiantes</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Lámpara L4 ON y Lámpara L5 OFF</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>Lámpara L4 brilla más que Lámpara L5</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>Lámpara L4 y L5 brillan igual</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	Resultados	Número de estudiantes	Lámpara L4 ON y Lámpara L5 OFF	6	Lámpara L4 brilla más que Lámpara L5	8	Lámpara L4 y L5 brillan igual	1
Resultados	Número de estudiantes								
Lámpara L4 ON y Lámpara L5 OFF	6								
Lámpara L4 brilla más que Lámpara L5	8								
Lámpara L4 y L5 brillan igual	1								
<p>C4</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Resultados</th> <th>Número de estudiantes</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>La lámpara L4 es la más brillante, las lámparas L5 y L6 brillan igual</td> <td>12</td> </tr> <tr> <td>Todas las lámparas brillan igual</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>La lámpara L4 es la más brillante, seguida por la L6 y L5 es la que menos brilla</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	Resultados	Número de estudiantes	La lámpara L4 es la más brillante, las lámparas L5 y L6 brillan igual	12	Todas las lámparas brillan igual	2	La lámpara L4 es la más brillante, seguida por la L6 y L5 es la que menos brilla	1
Resultados	Número de estudiantes								
La lámpara L4 es la más brillante, las lámparas L5 y L6 brillan igual	12								
Todas las lámparas brillan igual	2								
La lámpara L4 es la más brillante, seguida por la L6 y L5 es la que menos brilla	1								

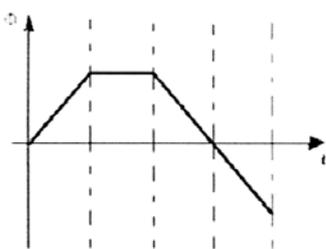
Fig. 9. Cuestión sobre los factores que generan corriente inducida en un circuito y valoración de la fem y corriente en el circuito

Debemos tener en cuenta que tanto en la cuestión C1 como en la cuestión C2 la fem inducida para hacer fluir corriente es la misma y por todas las bombillas pasa corriente. Como el circuito de la cuestión 2 (L_1 , L_2 y L_3) presenta mayor resistencia, éstas brillan menos que las de la cuestión 1 (L_1 y L_2). En cuanto a la cuestión C3 (lámparas L_4 y L_5) hacemos un cortocircuito entre el solenoide y L_5 . Sabemos que la inducción electromagnética ocurre únicamente en el circuito que rodea el solenoide por lo que sólo se encenderá L_4 y el brillo de ésta será mayor que en la cuestión C1. En la cuestión C4 se coloca una bombilla L_6 en el lugar del cortocircuito anterior. Ahora se encenderán las tres bombillas de forma que L_6 y L_5 brillan igual (están en paralelo) pero menos que L_4 .

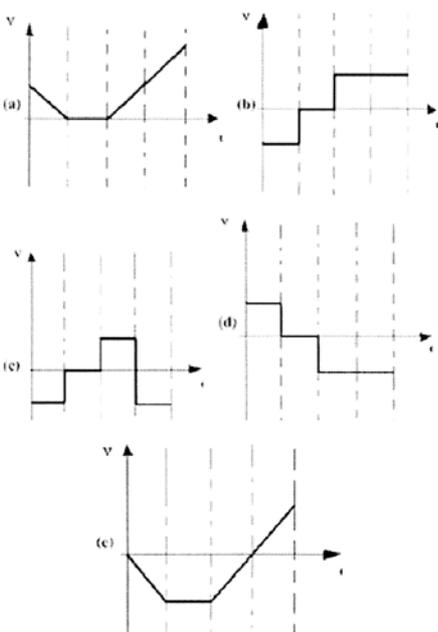
Los autores identifican tres concepciones alternativas en los estudiantes: 1) La corriente inducida varía de forma proporcional a la corriente del solenoide. 2) Tiene que haber contacto entre las líneas de campo magnético y la espira externa para que haya fem inducida (las líneas de campo son entendidas como líneas reales que contactan con la espira). 3) La diferencia de potencial electrostático es igual que la fem inducida.

Dori, Hult, Breslow y Belcher (2007) presentan en su trabajo los resultados obtenidos en unos cuestionarios sobre electromagnetismo en general, pasados a 500 estudiantes de primer curso del MIT divididos en grupos de 120. Todos los grupos de estudiantes pasaron un pre-test antes de la instrucción y después de la instrucción un post-test y otro test después de 18 meses. En esta revisión nos vamos a centrar en los resultados obtenidos en el pre-test, ya que los estudiantes que ingresan en primer curso de MIT tienen un expediente académico brillante y han cursado cursos complementarios de física de nivel parecido a los cursos habituales de física de primero de universidad. En el artículo no se presentan las puntuaciones obtenidas en cada una de las preguntas, únicamente se reflejan las puntuaciones totales que en este caso son igual de pobres para todos los grupos alrededor de 33 puntos sobre 100. Así pues, más de la mitad de los estudiantes no contesta adecuadamente a cuestiones como las que aparecen en la figura 10. Se muestran dos de las preguntas relacionadas con la inducción electromagnética.

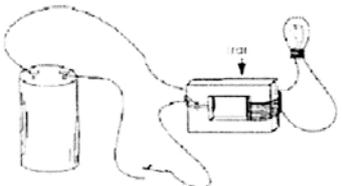
(17) A continuación se muestra una gráfica del flujo magnético Φ a través de una espira en función del tiempo t .



¿Cuál de las gráficas que se muestran a continuación representa mejor el voltaje V inducido en la espira? El voltaje inducido es el negativo de la variación del flujo magnético respecto del tiempo.



(18) Un hilo aislado es enroscado en un lado de una pieza de hierro y los bornes del hilo son conectados a los terminales de una batería. Un segundo hilo es enroscado en el otro lado de la pieza de hierro y sus bornes están conectados a una bombilla. Un interruptor, que se puede abrir o cerrar se introduce en el hilo de la batería. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones sobre este montaje son verdad?



- La bombilla se encenderá mientras el interruptor esté cerrado.
- La bombilla no se enciende nunca porque ambos hilos no están conectados pues son hilos aislados.
- La bombilla se enciende momentáneamente sólo cuando el interruptor se cierra no cuando se abre.
- La bombilla se enciende momentáneamente tanto cuando se cierra o se abre el interruptor.
- La bombilla no se enciende nunca pues no hay corriente en la pieza de hierro.

Fig. 10. Cuestiones sobre inducción electromagnética. La respuesta correcta a la cuestión (17) es la b y en la cuestión (18) la respuesta correcta es la d

Guisasola et al., realizaron dos estudios, acerca de las concepciones de los estudiantes sobre la teoría de la inducción electromagnética. En el primero de ellos (2008), los estudiantes pertenecían al primer curso de Ingeniería; en el segundo (2011), se evaluó, además, a alumnos del tercer curso de Ciencias Físicas. En el primer estudio, 85 estudiantes de primer curso de ingeniería en el País Vasco cumplimentaron un cuestionario en situación de examen después un mes de haber recibido la docencia. El cuestionario constaba de 8 cuestiones, las cuatro primeras trataban de indagar sobre el conocimiento de los estudiantes de los fenómenos de inducción electromagnética y las cuatro últimas intentaban averiguar el tipo de explicaciones que los estudiantes emplean al explicar estos fenómenos. Una de las cuestiones de la primera parte, y otra de la segunda, se muestra en la figura 11.

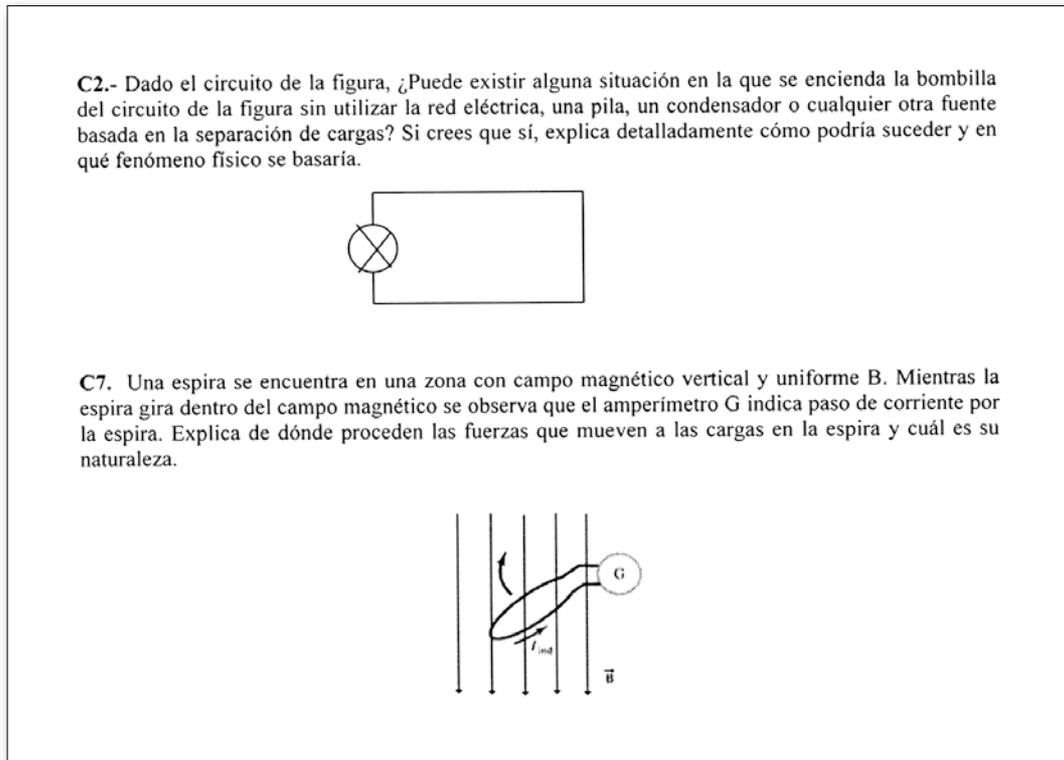


Fig. 11. Cuestiones sobre el conocimiento declarativo (cuestión C2) e interpretativo (cuestión C7) de la inducción electromagnética..

La mayoría de los estudiantes tienen un conocimiento declarativo adecuado cuando se trata de fenómenos en un contexto académico (50% de respuestas correcta a la cuestión C2). Otra parte significativa de estudiantes desconoce las causas que producen la IE, atribuyéndolas al campo magnético estacionario o la corriente eléctrica. Además, cuando tienen que contestar cuestiones relacionadas con aplicaciones tecnológicas cotidianas alrededor del 80% de los estudiantes no sabe reconocer el fundamento de la inducción electromagnética en la aplicación. Estos resultados en el contexto de enseñanza español son convergentes con las conclusiones del estudio de Sağlam y Millar (2006) en un contexto de enseñanza anglosajón y turco.

En la segunda parte del cuestionario, un número significativo de estudiantes no fue capaz, entre otras cosas, de abordar el análisis de la IE, a través de una aproximación ‘microscópica’, (es decir, mediante la utilización de fuerzas eléctricas y/o magnéticas que aparecen y actúan en dicho fenómeno), aunque así se les pida, explícitamente, en el enunciado de algunas de las cuestiones.

Por ejemplo, en la cuestión C7 de la figura 11, el objetivo, según los autores, era el de averiguar si los estudiantes conocen que la fuerza que inicialmente mueve las cargas, mientras la espira está en movimiento en la región donde existe un campo B constante, es una fuerza magnética no conservativa que, finalmente, provocará la aparición de una corriente inducida.

Pues bien, analizados los resultados, muy pocos estudiantes, (4% en 1º de Ingeniería y 13% en 3º de Físicas), explican la naturaleza magnética de la fuerza que, inicialmente, será la que desencadene el movimiento de los portadores de carga y, en consecuencia, la existencia de una corriente eléctrica en la espira. Sin embargo, la mayoría eludieron la pregunta y contestaron afirmando que hay una corriente eléctrica inducida, debido a que existe una variación de flujo, y, mediante la ley de Faraday, se calcularía la fem inducida, (66% en 1º de Ingeniería y 64% en 3º de Físicas).

En el segundo estudio (2011) los estudiantes respondieron a cuatro cuestiones de carácter ‘abierto’. La muestra consistió en 102 estudiantes de primero de ingeniería, que contestaron a las cuestiones en el examen final; además, 36 estudiantes de tercero de físicas respondieron al cuestionario en forma de pre-test, dichos estudiantes ya habían cursado dos semestres de electromagnetismo en el segundo curso de su carrera. Mostramos en la figura 12 un ejemplo de dichas cuestiones.

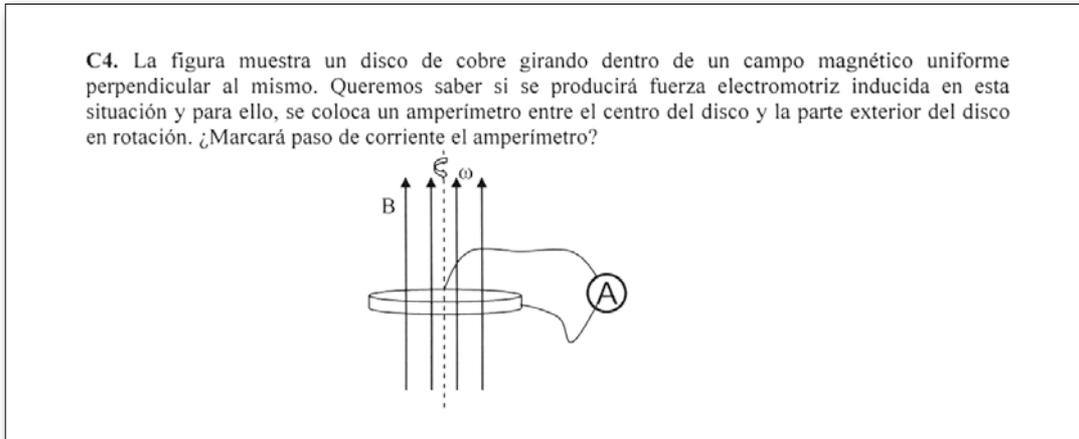


Fig. 12. Cuestión sobre el motor unipolar de Faraday

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 (para una explicación más detallada ver Munley, 2004). Sin embargo, alrededor de la mitad de las respuestas (41% en primer curso y 56% en tercero) explican que no hay corriente inducida debido a que no hay variación de flujo magnético. Sólo alrededor del 20% en ambos cursos plantean la cuestión utilizando la fuerza de Lorentz y concluyen correctamente que existe corriente eléctrica inducida.

Los autores obtienen cinco conclusiones que describimos a continuación. Como primera conclusión, indican que los resultados muestran que un porcentaje significativo de los estudiantes no es capaz de interpretar simples fenómenos de inducción electromagnética correctamente a pesar de que en cuestiones que sólo exigen aplicar directamente la fórmula no tienen problemas a la hora de aplicar la ley de Faraday. La segunda conclusión indica que la mayoría de los estudiantes usan con mayor frecuencia las explicaciones del modelo macroscópico incluso en cuestiones en las que se les pide explícitamente que hagan un análisis basado en las fuerzas. La tercera de las conclusiones dice que un número significativo de estudiantes atribuye la inducción electromagnética al campo magnético o a una corriente eléctrica sea variable con el tiempo o no. La cuarta conclusión está relacionada directamente con la cuestión C7 que hemos presentado. En esta cuestión y en otras donde la inducción electromagnética es debida al movimiento, la gran mayoría de los estudiantes no aplican la ley de Faraday de forma correcta. Finalmente, los autores concluyen que unos pocos estudiantes saben explicar correctamente los fenómenos de inducción electromagnética desde los puntos de vista macroscópicos y microscópicos.

4. IMPLICACIONES PARA LA ENSEÑANZA DE LA INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

A modo de resumen de la revisión realizada vamos a presentar en la tabla 1 los artículos revisados, sus objetivos y sus conclusiones.

Tabla 1.
Resumen revisión de artículos relacionados con ideas de los estudiantes sobre inducción electromagnética.

<i>AUTOR</i>	<i>OBJETIVO DEL TRABAJO</i>	<i>NIVEL DE ENSEÑANZA Y MUESTRA</i>	<i>RESULTADOS</i>
Albe et al. (2001) Venturini y Albe (2002)	Conocer cómo aprenden los estudiantes el concepto de Flujo magnético	50 profesores y 64 estudiantes de 1º de ciencias físicas 39 estudiantes de 1º de ciencias físicas	– Flujo como «fluir» del campo magnético <i>no</i> asociado a líneas de campo. – El concepto de flujo magnético asociado a «fluir» del campo magnético.
Venturini y Albe (2002)	1. Ley de Faraday. 2. Cómo se produce inducción magnética en circuito. 3. Cómo ven los estudiantes el aprendizaje del electromagnetismo.	39 estudiantes de 1º de ciencias físicas	– La gran mayoría de estudiantes, no encuentran significado físico a la ley de Faraday – El 22% no definen la inducción electromagnética sino que describen un experimento. – El 51% no es capaz de poner un ejemplo de inducción electromagnética – El aprendizaje es memorístico e inconexo, basado en la memorización de fórmulas
Loftus (1996)	1. Levitar un anillo. 2. Corriente por inducción. 3. Cocina de inducción.	150 estudiantes de secundaria (14–18 años)	– Muy pocas respuestas correctas. – Tendencia a razonar la IE con un modelo de fuerza: «algo» actúa sobre «algo». – Tendencia a razonar la IE como repulsión entre cargas. – Dificultad en razonar con un modelo acción a distancia. Se atribuye al contacto y al «flujo de algo» (cargas, fuerza, ...) la IE
Mauk y Hingley (2005)	Inducción electromagnética.	43 estudiantes con tutoría 40 estudiantes de excelencia 143 estudiantes grupo estándar.	– Menos de la mitad aplican correctamente la ley de Faraday en contextos académico – Tendencia a asociar la IE con el campo magnético y no con la variación del flujo magnético
Saaralainen et al. (2007)	Explicación de fenómenos de inducción electromagnética en un conductor en movimiento en B estacionario.	144 estudiantes de primer curso de físicas.	– La mayoría de los estudiantes no comprende la variación del flujo magnético con el tiempo $d\Phi/dt$, ni el significado físico de la ley de Faraday. – Problemas en identificar los factores asociados a generar fem inducida.

Tabla 1. (cont.)
Resumen revisión de artículos relacionados con ideas de los estudiantes sobre inducción electromagnética.

AUTOR	OBJETIVO DEL TRABAJO	NIVEL DE ENSEÑANZA Y MUESTRA	RESULTADOS
Thong y Gunstone (2008)	Explicación de fenómenos de inducción electromagnética.	15 estudiantes universitarios.	<ul style="list-style-type: none"> – Tendencia a relacionar incorrectamente una proporcionalidad entre la corriente inducida y la corriente que la genera. – Tendencia a atribuir la fem inducida en la espira se produce al contacto entre ésta y las líneas de campo B.
Saglam y Millar (2006)	Explicación de fenómenos de inducción electromagnética.	120 estudiantes turcos y 152 estudiantes ingleses de secundaria (16–18 años)	<ul style="list-style-type: none"> – La mayoría de los estudiantes no distingue entre $\Delta\Phi$ y $d\Phi/dt$. – Tendencia a atribuir a las variables de la fórmula la causa de la IE. – Generalizaciones acríticas de causa–efecto..
Dori et al. (2007)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Relación de ϵ y $d\Phi/dt$. 2. $\partial\vec{B}/\partial t$ crea \mathbf{E} inducida. 3. $\partial\vec{E}/\partial t$ crea \mathbf{B} inducida. 	500 estudiantes de primero de universidad	<ul style="list-style-type: none"> – La mayoría de los estudiantes no sabe explicar correctamente ninguno de los fenómenos mostrados. – La mayoría de los estudiantes no considera que un campo magnético variable genera IE
Guisasola et al. (2008 y 2011)	Explicación de fenómenos de inducción electromagnética.	85 estudiantes de 1º Ingeniería 103 estudiantes de 1º Ingeniería 36 estudiantes de 3º de Físicas	<ul style="list-style-type: none"> – La mayoría de los estudiantes no distingue entre los niveles interpretativos macroscópico (ley de Faraday) y microscópico (ley de Lorentz) – Un número significativo atribuye al campo magnético la causa de la IE – Un mayoría de estudiantes no tiene un aprendizaje comprensivo de la ley de Faraday

En relación con las preguntas de la investigación y a la vista del trabajo de recopilación y análisis que se ha realizado en este estudio, todo parece indicar que muchos estudiantes, tanto en el ámbito de la enseñanza de Bachillerato (16-18 años) como de la enseñanza universitaria, poseen un gran número de ‘ideas alternativas’ sobre inducción electromagnética. El alumnado de estos niveles de enseñanza encuentra serias dificultades en la comprensión de los conceptos fundamentales del modelo interpretativo de la IE, en particular los siguientes:

Para la adecuada comprensión de la ley de Faraday, los estudiantes deben comprender algunos prerrequisitos como los conceptos de flujo magnético, fuerza de Lotentz y fuerza electromotriz que de acuerdo con la revisión, son poco comprendidos (Albe et al 2001, Ventury y Albe 2002, Guisasola et al 2008).

Algunas de las dificultades que presentan los estudiantes, están relacionadas con los obstáculos que se debieron de superar para el descubrimiento de la inducción electromagnética. Como ejemplo podemos mencionar que André-Marie Ampère diseño un programa de investigación que tenía como objetivo detectar corrientes que suponía se iban a inducir en un circuito secundario a partir de una corriente estacionaria introducida en un circuito primario (Hofmann 1987). En las investigaciones descritas aparecen concepciones alternativas de los estudiantes en las que consideran erróneamente que

la presencia del campo magnético genera inducción electromagnética (Saaralainen et al. 2007, Thong y Gunstone 2008, Dori et al. 2007).

La mayoría de los estudiante no es capaz de entender adecuadamente el concepto de flujo magnético (Albe et al 2001, Venturi y Albe 2002, Sanglan y Millar 2006, Dori et al. 2007), que es condición previa para poder abordar con criterios fundamentados el fenómeno de inducción electromagnética.

Tienen un conocimiento declarativo del fenómeno aceptable (Guisasola et al. 2008), pero tienen grandes dificultades conceptuales cuando se trata de aplicar la ley de Faraday en diferentes contextos, siendo, a veces, esta última dificultad una consecuencia de una deficiente comprensión de los lenguajes matemático y/o gráfico (Saglam y Millar 2006, Dori et al. 2007, Lotfus 1996).

Por otro lado, poseen graves carencias a la hora de reconocer las 'fuentes' asociadas a la fuerza electromotriz inducida; así, son muchos los estudiantes que creen que el campo magnético y/o la corriente, (y no su variación con el tiempo), generan fenómenos de inducción. Una variante de lo anterior es la de aquellos estudiantes que entienden que la simple existencia de flujo magnético genera inducción; en unas ocasiones porque tienen una idea errónea de las líneas de campo, y otras porque no distinguen entre cambio de flujo con el tiempo y ritmo de variación de ese flujo (Mauk y Hingley 2005, Saaralainem et al. 2001).

Quizá una de las dificultades más extendidas entre los estudiantes sea la de no saber analizar la IE a través de una aproximación microscópica, (es decir, de las fuerzas que ejercen los campos eléctricos y/o magnéticos), lo que provoca que tengan muchos problemas a la hora de relacionar un mismo fenómeno de inducción desde un punto de vista macroscópico (en función del flujo magnético) y desde otro microscópico (Saarelainem et al. 2001, Meng Thong y Gunstone 2008, Guisasola et al. 2008 y 2011).

En los diferentes estudios se ha mostrado que además de las dificultades conceptuales, los estudiantes presentaban una serie de carencias procedimentales que sería necesario abordar desde un modelo de enseñanza acorde con los recientes informes sobre educación científica y tecnológica (Etkina et al 2008). Los estudiantes no sólo deben aprender el conocimiento cualitativo y cuantitativo de los principios físicos sino también deben adquirir habilidades para construir modelos explicativos mediante el razonamiento a partir de los datos y observaciones, el diseño de experimentos para contrastar hipótesis, la resolución de problemas complejos y el trabajo en grupo con otros compañeros. Esto implica que las tareas que deben realizar los estudiantes en la clase de física deben proporcionarles ocasiones para tomar decisiones basadas en evidencias, utilizar evidencias para contrastar explicaciones alternativas, tratar problemas complejos que no tienen una única solución y trabajar de forma colaborativa con otros compañeros.

Para finalizar pues, entendemos que es el conjunto de todos estos aspectos los que deberíamos de tener en cuenta a la hora de plasmar en una secuencia de enseñanza esta parte del currículo de física. Dicha secuencia, es el reto que tenemos por delante, siendo, en consecuencia, un objetivo de nuestros próximos trabajos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBE, V., VENTURINI, P., & LASCOURS, J. (2001). Electromagnetic Concepts in Mathematical Representation of Physics. *Journal of Science Education and Technology*, 10 (2), 197-203.
- BAGNO, E. y EYLON, B. S. (1997). From problem solving to a knowledge structure: An example from the domain of electromagnetism. *American Journal of Physics*, 65 (8), 726-736.
- BLISS, J. (2008). Commonsense reasoning about the physical world. *Studies in Science Education*, 44 (2), 123-155
- DISESSA, A. (1993). toward an epistemology of physics. *Cognitive Instruction*. 10, 105-112

- DORI, Y. J., HULT, E., BRESLOW, L. y BELCHER J. W. (2007). How Much Have They Retained? Making Unseen Concepts Seen in a Freshman Electromagnetism Course at MIT. *Journal of Science Education and Technology*, 16(4), 299-323.
- DRIVER, R., LEACH, J., MILLAR, R. y SCOTT, P. (1996). *Young People's image of science*. Buckingham: Oxford University Press.
- DUIT, R. (2009). *Bibliography: Students' and Teachers' Conceptions and Science Education* en <http://www.ipn.uni-kiel.de/aktuell/stcse/stcse.html>
- ETKINA, E., KARELINA, A., y RUBIAL-VILLASENOR, M., (2008). How long does it take? A study of student acquisition of scientific abilities. *Physical Review Special Topics: Physics Education Research*, 4, 020108.
- EYLON, B. y GANIEL, U. (1990). Macro-micro relationships: the missing link between electrostatics and electrodynamics in student's reasoning. *International Journal of Science Education*, 12, 79.
- GALILI, I., KAPLAN, D. y LEHAVY, Y. (2006). Teaching Faraday's law of electromagnetic induction in an introductory physics course. *American Journal of Physics*, 74 (4) ,337-343.
- GUISASOLA, J., ALMUDÍ, J.M. y ZUZA, K. (2008). Explicaciones de los estudiantes de primer curso de ingeniería sobre los fenómenos de inducción electromagnética. *Revista de Enseñanza de la Física*, 21, 33-47.
- GUISASOLA, J., ALMUDÍ, J.M. y ZUZA, K. (2011). University Students' Understanding of Electromagnetic Induction, *International Journal of Science Education*, DOI: 10.1080/09500693.2011.624134
- HOFMANN, R., (1987). Ampère, Electrodynamics, and Experimental Evidence. *OSIRIS*, 2ns series, 3, 45-76.
- LEACH, J. y SCOTT, P., (2003). Individual and sociocultural views of learning in science education . *Science and Education*, 12(1), 91-113.
- LOFTUS, M. (1996). Studentes' ideas about electromagnetism. *SSR*, 77, 280.
- MALONEY, D.P., O'KUMA, T.L., HIEGGELKE, C.L. y VAN HEUVELEN, A. (2001). Surveying student's conceptual knowledge of electricity and magnetism. *American Journal of Physics*, 69(7), S12-S23.
- MAUK, H. V. & HINGLEY, D. (2005). Student understanding of induced current: Using tutorials in introductory physics to teach electricity and magnetism. *American Journal of Physics*, 73(12), 1164-1171.
- MCDERMOTT, L. y REDISH, E. (1999). Resource Letter: PER-1: Physics Education Research. *American Journal of Physics*, 67, 755-757.
- MEHEUT, M. y PSILLOS, D. (2004). Teaching-learning sequences: aims and tools for science education research. *International Journal of Science Education*, 26(5), 515-535.
- MULHALL, P., MCKITTRICK, B. y GUNSTONE, R. (2001). A perspective on the resolution of confusions in the teaching of electricity. *Research in Science Education*, 31, 575.
- MUNLEY, F., (2004) *American Journal of Physics* 72, 1478
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1996) *National Science education standards*. Washington DC: National Academic Press.
- SAARELAINEN, M., LAAKSONEN, A. & HIRVONEN, P.E. (2007). Students' initial knowledge of electric and magnetic fields –more profound explanations and reasoning models for undesired conceptions. *European Journal of Physics*, 28, 51-60.
- SAGLAM, M. y MILLAR, R. (2005). Diagnostic Test of Students' Ideas in Electromagnetism. *Research Paper Series. University of York (UK)*.
- THONG, W. M. & GUNSTONE R. (2008). Some Students Conceptions of Electromagnetic Induction. *Research in Science Education*, 38, 31-44.

- VENTURINI, P. Y ALBE, V. (2002). Interpretation des similitudes et differences dans la maîtrise conceptuelle d'étudiants en electromagnetisme a partir de leur(s) rapport(s) au(x) savoir(s). *ASTER*, 25, 165-188.
- VOSNIADOU, S. (2002) On the Nature of Naïve Physics, in *Reconsidering the Processes of Conceptual Change*, edited by M. Limon and L. Mason, Kluwer Academic Publishers, 61–76.

REVIEW OF RESEARCH ON STUDENTS IDEAS ON THE INTERPRETATION OF ELECTROMAGNETIC INDUCTION PHENOMENA

Kristina Zuza, José Manuel Almudí y Jenaro Guisasola
Departamento de Física Aplicada
Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea

The fundamental aim of this work is to review different research projects tackling students' ideas regarding interpreting electromagnetic induction phenomena and we refer to "alternative conceptions" meaning conceptions held by students that are not consistent with standard physics conceptions. Alternative conceptions, in general terms, are organised into knowledge structures (schemas) that occasionally spring from spontaneous ideas picked up by students during normal cognitive development as they interact with the environment. However, in other circumstances, they can also emerge from (or be modified by) instruction or knowledge from previous topics. Whilst everyday life experiences have an important impact on some alternative conceptions, in some very academic topics, such as the case of electromagnetic induction, it is reasonable to think that in-depth knowledge of the epistemology and theoretical framework of current physics for the topic is necessary to investigate students' alternative conceptions. So then, the comments throughout this article will endeavour to clarify and provide a detailed explanation of the physics theory encompassing students' possible alternative conceptions.

Different studies show difficulties in the teaching-learning process for a scientific model on electromagnetic induction phenomena (EMI) constitute a new research field whose bibliography has mainly appeared over the past decade. In this respect, the relevance of the EMI topic is not limited to its technological applications and citizen interest, future scientists and engineers in particular, but the EMI explanatory model and Faraday's law quantifying it raise basic questions without which it is not possible to construct a scientific theory for the electromagnetic phenomena within the framework of classic Maxwell theory.

Taking into account all the above, the research questions for this work are: What results are shown by research into teaching physics regarding difficulties experienced by students in their final year of high school and first years of university when learning about electromagnetic induction? Specifically, are there any results regarding difficulties with important laws and/or concepts related to electromagnetic induction such as magnetic flow or Faraday's law?

The starting point to answer these questions involved a bibliographic search which showed that there were a very low number of research projects on students' difficulties when learning about different concepts and laws involved in electromagnetic induction theory compared to other areas of physics. This is therefore a didactic problem that has not been greatly analysed and that requires greater research, both into the learning difficulties and designing teaching sequences that improve student learning.

Given the large number of aspects that this field of knowledge tackles, it was necessary to limit the research questions to two aspects of electromagnetic induction. On the one hand, there are aspects that look at student prerequisites to be able to successfully interpret electromagnetic induction phenomena such as magnetic field and magnetic flux. On the other hand, student difficulties have been analysed in terms of interpreting electromagnetic phenomena and particularly interpreting Faraday's law.

The central body of this work shows a summary of the different research works analysed by presenting each reference with some examples. Comments are presented along with the results obtained when applying them to student groups. As a conclusion, and in the light of the compilation and analysis work completed in this study, everything seems to indicate that many students have difficulties learning prerequisites such as the concept of magnetic flux and its variation over time. In addition, a significant percentage of students wrongly identify the origin of EMI as a stationary magnetic field. Regarding Faraday's law, students present difficulties understanding terms that appear in its mathematical expression, particularly interpreting the surface area bounding the flow integral, or interpreting the electromotive force induced by variable or moving magnetic field phenomena. On the other hand, the different studies have shown that in addition to conceptual difficulties, students demonstrated a series of procedure-based knowledge gaps that should be tackled from a teaching model in accordance with recent reports on scientific and technological education.