



La prueba conceptual de electricidad y magnetismo: análisis de confiabilidad y estudio de las dificultades más frecuentes

The Conceptual Survey of Electricity and Magnetism: Reliability analysis and study of most frequent difficulties

Pablo Barniol

Tecnológico de Monterrey, Escuela de Humanidades y Educación,
Monterrey, México
pablo.barniol@itesm.mx

Genaro Zavala

Tecnológico de Monterrey, Escuela de Ingeniería y Ciencias,
Monterrey, México
Universidad Andres Bello, Facultad de Ingeniería, Santiago, Chile
genaro.zavala@itesm.mx

Esmeralda Campos

Tecnológico de Monterrey, Escuela de Ingeniería y Ciencias,
Monterrey, México
esme.cam@gmail.com

RESUMEN • La prueba *The Conceptual Survey of Electricity and Magnetism* (CSEM) ha sido ampliamente utilizada en el área de la educación de la física. Sin embargo, hasta la fecha no existe un estudio que presente el test en su versión en español. Este artículo tiene tres objetivos generales: 1) presentar el CSEM en su versión en español y analizar la confiabilidad y poder discriminatorio de este, 2) realizar un análisis detallado de las dificultades más frecuentes de los estudiantes en los conceptos evaluados en el test y 3) establecer recomendaciones para la investigación e instrucción de estos conceptos. El test fue implementado a 310 estudiantes que terminaban el curso Electricidad y Magnetismo de una universidad mexicana. El test en su versión en español, que presentamos en el proyecto Physport (physport.org), los análisis y las recomendaciones para la instrucción pueden ser utilizados por investigadores o por profesores de física de países hispanohablantes.

PALABRAS CLAVE: electricidad; magnetismo; entendimiento conceptual; instrumento de opciones múltiples; análisis de confiabilidad.

ABSTRACT • *The Conceptual Survey of Electricity and Magnetism* (CSEM) has been widely used in the field of physics education. However, to date, no study presents a version of the test in Spanish. This article has three general objectives: 1) to present the CSEM in Spanish and analyze its reliability and discriminatory power, 2) to perform a detailed analysis of the most frequent difficulties of the students in the concepts evaluated in the test, and 3) to establish recommendations for research and instruction of these concepts. The test was implemented to 310 students who finished an Electricity and Magnetism course in a Mexican university. Researchers or physics professors from Spanish-speaking countries may use the test in Spanish that we present in the PhysPort project (physport.org); and the analysis and recommendations for instruction in this study.

KEYWORDS: electricity, magnetism conceptual understanding, multiple-choice instrument, reliability analysis.

Recepción: diciembre 2017 • Aceptación: febrero 2018 • Publicación: junio 2018

Barniol, P., Campos, E., & Zavala, G. (2018). La prueba conceptual de electricidad y magnetismo: análisis de confiabilidad y estudio de las dificultades más frecuentes. *Enseñanza de las ciencias*, 36(2), 167-192.

INTRODUCCIÓN

Es necesario hacer hincapié en que, para realmente valorar el entendimiento conceptual de los estudiantes, es importante realizar evaluaciones cualitativas con preguntas abiertas donde el estudiante escriba su razonamiento. Esto no se debe soslayar; sin embargo, además de exámenes cualitativos de preguntas abiertas, los exámenes con opciones múltiples son muy valorados en el área de la educación de la física, ya que también son útiles para evaluar el aprendizaje conceptual de poblaciones grandes de estudiantes y la eficacia de la instrucción (Redish, 1999; Guisasola *et al.*, 2012). Estos exámenes deben cumplir con pruebas estadísticas de confiabilidad y poder discriminatorio (Ding *et al.*, 2006). En el área de la educación de la física se han diseñado varios exámenes de este tipo para evaluar el entendimiento conceptual en diversos temas (Hestenes *et al.*, 1992; Maloney *et al.*, 2001; Wattanakasiwich *et al.*, 2013; Barniol y Zavala, 2014a; 2014b; Zavala *et al.*, 2017). El test *The Conceptual Survey of Electricity and Magnetism* (CSEM), diseñado por Maloney *et al.* (2001), evalúa el entendimiento conceptual en electricidad y magnetismo y ha sido utilizado en diferentes partes del mundo (Planinic, 2006).

Este test ha sido utilizado también en español en diversas investigaciones en países hispanohablantes (Tecpan *et al.*, 2012). Sin embargo, hasta la fecha no existe un estudio que presente el test en su versión en español y realice también un análisis de confiabilidad de este. Sobre esto hay que notar que varios investigadores, como Lindell y Ding (2012), han señalado la importancia que tiene realizar este tipo de análisis al modificar el idioma de los instrumentos. El primer objetivo de este estudio intenta cubrir esta primera necesidad. Además, al realizar una revisión de la literatura sobre el artículo original (Maloney *et al.*, 2001) y de los artículos que han estudiado las dificultades que tienen los estudiantes al utilizar el test como instrumento de medición (como, por ejemplo, Leppävirta [2012]), se puede constatar que en ninguno de estos se presenta un análisis detallado de las dificultades más frecuentes que tienen los estudiantes en los conceptos evaluados. El segundo objetivo del presente estudio está relacionado con esta necesidad.

Observando las necesidades expuestas anteriormente se establecieron los tres objetivos de este estudio: 1) presentar el CSEM en su versión en español y analizar la confiabilidad y poder discriminatorio de este, 2) realizar un análisis detallado de las dificultades más frecuentes de los estudiantes en los conceptos evaluados en el test y 3) establecer recomendaciones para la instrucción de estos conceptos. El artículo tiene dos implicaciones principales. El test en su versión en español puede ser utilizado como recurso por investigadores o profesores de países hispanohablantes. Por otra parte, los análisis y las recomendaciones para la instrucción pueden ser considerados por investigadores o profesores y pueden guiar el diseño de nuevo material instruccional. Sobre esto último, considérese como ejemplo el diseño de la secuencia de enseñanza sobre inducción electromagnética de Almudí *et al.* (2016) que tiene en cuenta los análisis realizados por Saarelainen *et al.* (2007) utilizando el ítem 29 del CSEM.

REVISIÓN DE LA LITERATURA

Maloney *et al.* (2001) realizan en su estudio diferentes análisis. Primeramente, analizan la confiabilidad y la validación del test. Posteriormente estudian las calificaciones en el test en diversos grupos antes y después de la instrucción. Por último, analizan los resultados obtenidos en la mayoría de los ítems, centrándose en el cambio en el porcentaje de la respuesta correcta antes y después de la instrucción y en algunos casos analizan los errores más frecuentes.

Seis estudios se han centrado en el análisis de las dificultades que tienen los estudiantes al utilizar el test como instrumento de medición. Dos de estos estudios (Planinic, 2006; Mioković *et al.*, 2012) presentaron un análisis de carácter general de las dificultades que tienen los estudiantes universitarios de Croacia al realizar todo el test. Los otros cuatro estudios presentaron análisis de las dificultades que

tienen los estudiantes al realizar solo algunos ítems del test (Meltzer, 2007; Saarelainen *et al.*, 2007; Narjaikaew *et al.*, 2010; Leppävirta, 2012).

Dado que solamente dos estudios analizan el test en su totalidad, esta revisión de la literatura presenta los principales hallazgos de dichos estudios (Planinic, 2006; Mioković *et al.*, 2012). Planinic (2006) modificó las once áreas conceptuales establecidas en el artículo original por seis nuevas áreas intentando que cada una de ellas tuviera un número similar de ítems y realizó un análisis de las áreas conceptuales del test que son más difíciles para los estudiantes. Por otra parte, Mioković *et al.* (2012) analizaron la confiabilidad del CSEM realizando un estudio similar al presentado en el artículo original. Además, analizaron el desempeño de los estudiantes en cada una de las áreas definidas por Planinic (2006) e identificaron algunas dificultades específicas en un número reducido de ítems.

Considerando el estudio donde se presenta y analiza el test (Maloney *et al.*, 2001) y los dos estudios que presentan un análisis general de las dificultades que tienen los estudiantes al realizarlo (Planinic, 2006; Mioković *et al.*, 2012), se observa que no se ha realizado un análisis detallado de las dificultades más frecuentes de los estudiantes, ni tampoco se han establecido recomendaciones específicas para la instrucción. Este hecho justifica el segundo y tercer objetivos del presente estudio.

METODOLOGÍA

El estudio se llevó a cabo en una universidad privada mexicana. La universidad cuenta con alrededor de quince mil estudiantes, de los cuales aproximadamente la mitad cursan una carrera de ingeniería. El CSEM cuenta con 32 ítems: veinte evalúan el tema de electricidad (1-20) y doce evalúan el tema de magnetismo (20-32). Maloney *et al.* (2001) clasificaron los ítems en once áreas conceptuales (tabla 1), teniendo en cuenta que cada ítem puede pertenecer a una o más áreas.

Tabla 1.
Once áreas conceptuales del test

| Área conceptual | Ítems |
|--|------------------------|
| 1. Distribución de carga en conductores y aislantes | 1, 2, 13 |
| 2. Ley de Coulomb | 3, 4, 5 |
| 3. Superposición de fuerza eléctrica y campo eléctrico | 6, 8, 9 |
| 4. Fuerza causada por campo eléctrico | 10, 11, 12, 15, 19, 20 |
| 5. Trabajo, potencial eléctrico, campo y fuerza | 11, 16, 17, 18, 19, 20 |
| 6. Carga inducida y campo eléctrico | 13, 14 |
| 7. Fuerza magnética | 21, 22, 25, 27, 31 |
| 8. Campo magnético causado por una corriente | 23, 24, 26, 28 |
| 9. Superposición de campo magnético | 23, 28 |
| 10. Ley de Faraday | 29, 30, 31, 32 |
| 11. Tercera ley de Newton | 4, 5, 7, 24 |

El CSEM fue traducido al español por tres profesores de física cuya lengua materna es el español y poseen conocimientos avanzados del idioma inglés. Estos profesores son además investigadores en el área de la educación de la física. En la traducción, de manera similar a otros estudios (Wattanakasiwich *et al.*, 2013), cualquier diferencia que surgía era discutida y resuelta en conjunto.

Los participantes de este estudio fueron estudiantes que llevaron a cabo el curso Electricidad y Magnetismo para ciencias e ingeniería. El libro de texto utilizado fue *Física Universitaria con Física Moderna* (Young y Freedman, 2013). El test se implementó a 310 estudiantes durante la última sesión del semestre.

ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD Y PODER DISCRIMINATORIO DEL TEST

La confiabilidad y el poder discriminatorio son dos características, entre otras, que debe cumplir un test como el utilizado en el presente estudio (Kline, 1986). La confiabilidad, según Kline, supone la consistencia interna (autoconsistencia) y la consistencia en el tiempo (consistencia «test-retest»). La consistencia interna es un término utilizado para la medida en que los ítems de una prueba miden el atributo consistentemente, en particular teniendo correlaciones positivas y altas (McDonald, 2013). Por otra parte, un test consistente en el tiempo arroja el mismo puntaje para cada sujeto al volverlo a implementar, ya que los sujetos no han cambiado, y el poder discriminatorio se relaciona con una buena distribución de las calificaciones obtenidas por diferentes sujetos en el test (Kline, 1986).

Para medir la confiabilidad y el poder discriminatorio del test se realizaron cinco pruebas estadísticas: el índice de dificultad (P), el índice de discriminación (D), el coeficiente de punto biserial (r), la confiabilidad del test y la delta de Ferguson. Ding *et al.* (2006) señalan que si el examen cumple con los valores recomendados para estas cinco pruebas se puede concluir que es un test confiable con un poder discriminatorio satisfactorio. Los índices P , D y r son medidas que se realizan sobre cada ítem de manera individual.

Tabla 2.
Valores de las pruebas individuales de los ítems.

| | | | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----------|
| Ítem | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| P | 0,72 | 0,37 | 0,79 | 0,46 | 0,38 | 0,65 | 0,28 | 0,63 | 0,60 | 0,55 | 0,22 |
| D | 0,43 | 0,43 | 0,28 | 0,40 | 0,55 | 0,58 | 0,61 | 0,54 | 0,56 | 0,55 | 0,21 |
| r | 0,34 | 0,36 | 0,26 | 0,33 | 0,44 | 0,44 | 0,56 | 0,40 | 0,42 | 0,40 | 0,31 |
| Ítem | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 |
| P | 0,67 | 0,45 | 0,21 | 0,23 | 0,22 | 0,33 | 0,40 | 0,34 | 0,19 | 0,12 | 0,35 |
| D | 0,35 | 0,50 | 0,18 | 0,27 | 0,37 | 0,41 | 0,31 | 0,40 | 0,00 | 0,13 | 0,27 |
| r | 0,31 | 0,36 | 0,19 | 0,33 | 0,37 | 0,37 | 0,25 | 0,38 | 0,11 | 0,22 | 0,21 |
| Ítem | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | Promedio |
| P | 0,61 | 0,20 | 0,37 | 0,63 | 0,19 | 0,43 | 0,16 | 0,43 | 0,11 | 0,27 | 0,39 |
| D | 0,61 | 0,21 | 0,44 | 0,57 | 0,21 | 0,45 | 0,12 | 0,46 | 0,24 | 0,22 | 0,37 |
| r | 0,46 | 0,27 | 0,36 | 0,42 | 0,29 | 0,34 | 0,12 | 0,34 | 0,40 | 0,16 | 0,32 |

Pruebas de análisis individual por ítem

El índice de dificultad (P) es el cociente de respuestas correctas obtenidas por ítem entre la cantidad de estudiantes que realizaron el ítem. El rango recomendado por Ding *et al.* (2006) es [0,3, 0,9]. Doce ítems en la versión en español tienen un índice menor al recomendado (ítems 7, 11, 14, 15, 16, 20, 21, 24, 27, 29, 31 y 32). Maloney *et al.* (2001) reportaron siete de estos ítems con P menor que 0,3 (ítems 14, 16, 20, 21, 24, 29, 31), con una población comparable por ser un curso para ciencias e ingeniería. Para el CSEM en español se detectó que el índice de dificultad promedio es de 0,39, que se encuentra en el rango recomendado.

El índice de discriminación (D) es una medida del poder de discriminación que tiene cada ítem del test. Se utilizó el método 25-25 %, el cual cuenta el número de estudiantes que respondieron correctamente en el 25 % más alto y más bajo. Ding *et al.* (2006) recomiendan que el índice de discriminación sea mayor o igual a 0,3. Once ítems en la versión en español tienen un índice menor al recomendado (ítems 3, 11, 14, 15, 20, 21, 24, 27, 29, 31 y 32). Maloney *et al.* (2001) no reportaron en su estudio los valores individuales de los índices de discriminación, pero identificaron que cuatro ítems son menores que 0,2. En este estudio también detectamos cuatro ítems con D menor que 0,2 (ítems 14, 20, 21 y 29). Maloney *et al.* no mencionan cuáles son estos ítems, sin embargo, por las similitudes detectadas al comparar los índices de dificultad en el apartado anterior, parece probable que se trate de los mismos cuatro ítems. Para el test en español se detectó que el índice de discriminación promedio es de 0,37, que satisface el criterio recomendado.

El coeficiente de punto biserial (r) es una medida de la consistencia de un ítem con todo el test. Ding *et al.* (2006) recomiendan que el valor promedio de los coeficientes de punto biserial sea mayor o igual que 0,2. Cuatro ítems en la versión tienen un coeficiente menor al recomendado (ítems 14, 20, 29 y 32). No es posible comparar estos resultados con lo reportado por Maloney *et al.* (2001), ya que no efectuaron este análisis. Para el CSEM en español se detectó que el coeficiente promedio es de 0,32, que se encuentra dentro del rango recomendado.

Pruebas de confiabilidad del test

El índice Kuder-Richardson es una medida de la consistencia de todo el test. El criterio ampliamente aceptado para este índice de confiabilidad es mayor a 0,7, lo que es muy utilizado en la educación de la física. El valor obtenido en este índice para el test es de 0,73, que cumple con este criterio. Es interesante notar que este valor es cercano al valor reportado por Maloney *et al.* (2001) de 0,75. La delta de Ferguson es una medida del poder discriminatorio de un test que investiga cuán ampliamente están distribuidas las calificaciones. El criterio recomendado para este valor es mayor a 0,9. La delta de Ferguson del test en español es 0,96, lo que cumple con el criterio recomendado. Maloney *et al.* no presentan este análisis por lo que no es posible realizar una comparación.

En la tabla 3 se muestra el resumen de las cinco pruebas estadísticas realizadas para evaluar la confiabilidad y poder discriminatorio del test. Todos los valores promedio cumplen con lo recomendado por Ding *et al.* (2006). A partir de esto es posible afirmar que el examen CSEM en español es un instrumento confiable con poder discriminatorio adecuado. Además, es importante señalar que los valores encontrados en el presente análisis para los índices de los ítems muestran gran semejanza con los reportados por Maloney *et al.* (2001) y que en un estudio nuestro previo (Barniol, Campos y Zavala, 2016) se analizaron los aspectos problemáticos de los ítems con índices críticos.

Tabla 3.
Pruebas realizadas para el test

| Prueba | Valores deseados | Test |
|---|------------------|----------------|
| Índice de dificultad | [0,3 y 0,9] | Promedio: 0,39 |
| Índice de discriminación | $\geq 0,3$ | Promedio: 0,37 |
| Coficiente de punto biserial | $\geq 0,2$ | Promedio: 0,32 |
| Índice de confiabilidad de Kuder-Richardson | $\geq 0,7$ | 0,73 |
| Delta de Ferguson | $> 0,9$ | 0,96 |

ANÁLISIS DEL ENTENDIMIENTO CONCEPTUAL DE LOS ESTUDIANTES

En esta sección se realiza un estudio detallado de las dificultades más frecuentes. Primero se analiza el desempeño general de los estudiantes. Luego se compara el desempeño en cada una de las áreas conceptuales y se analiza el grado de dificultad de los ítems. Por último, se realiza un análisis de las dificultades generales en los conceptos evaluados en el test a partir de un estudio del error o los errores más frecuentes en cada uno de los ítems.

Desempeño general de los estudiantes en el test

El promedio de las calificaciones es 12,48 de 32 puntos posibles. La distribución de las calificaciones del examen es una distribución positivamente asimétrica lo cual indica un examen difícil para los estudiantes. La mediana es 12 y el rango intercuartil es 6. Es interesante notar que los estudiantes que se encuentran en la mediana tienen dificultades para contestar correctamente 20 ítems de los 32 del test.

Comparación del desempeño en cada una de las áreas conceptuales

Para esta comparación se analizan los porcentajes promedio de cada área. En la tabla 4 se muestran estos porcentajes promedio.

Tabla 4.
Porcentajes promedio de cada área conceptual

| <i>Área conceptual</i> | <i>% Promedio</i> |
|--|-------------------|
| 1. Distribución de carga en conductores y aislantes | 51 % |
| 2. Ley de Coulomb | 41 % |
| 3. Superposición de fuerza eléctrica y campo eléctrico | 62 % |
| 4. Fuerza causada por campo eléctrico | 44 % |
| 5. Trabajo, potencial eléctrico, campo y fuerza | 29 % |
| 6. Carga inducida y campo eléctrico | 33 % |
| 7. Fuerza magnética | 23 % |
| 8. Campo magnético causado por una corriente | 47 % |
| 9. Superposición de campo magnético | 52 % |
| 10. Ley de Faraday | 24 % |
| 11. Tercera ley de Newton | 33 % |

Se observa que cinco de las once áreas conceptuales son difíciles para los estudiantes ya que tienen un porcentaje promedio menor a 35 %, estas son: fuerza magnética, ley de Faraday, trabajo, potencial eléctrico, campo y fuerza, carga inducida y campo eléctrico y tercera ley de Newton. Además se observa que cinco de las áreas conceptuales tienen un nivel medio de dificultad ya que tienen un porcentaje promedio entre el 35 y el 60 %. Estas áreas son: ley de Coulomb, fuerza causada por campo eléctrico, campo magnético causado por una corriente, distribución de carga en conductores y aislantes y superposición de campo magnético. Por último, se observa que una de las áreas conceptuales (superposición de fuerza eléctrica y campo eléctrico) tiene un porcentaje promedio mayor al 60 % y por lo tanto tiene un nivel de dificultad relativamente bajo.

En las seis áreas del test que están relacionadas con electricidad (áreas 1-6) se observa que dos áreas son difíciles para los estudiantes (5 y 6), tres tienen un nivel medio (1, 2 y 4) y una tiene un nivel bajo (3). Por otra parte, en las áreas que están relacionados con magnetismo (áreas 7-9) se observa que una es difícil (7) y dos tienen un nivel medio (8 y 9). Por último, las áreas de ley de Faraday y tercera ley de Newton son difíciles para los estudiantes (áreas 10 y 11).

Análisis del grado de dificultad de los ítems

Se decidió agrupar los ítems en cuatro grados diferentes de dificultad. Se estableció un grado de dificultad *muy alto* si el porcentaje de respuesta correcta era menor o igual al 20 %, un grado *alto* si se encontraba entre el 20 y 30 %, un grado *medio* si se encontraba entre el 30 y 50 % y un grado *bajo* si era mayor al 50 %. En la tabla 5 se muestra esta división de los ítems.

Tabla 5.
División de ítems según su grado de dificultad.

| Nivel de dificultad | Rango de respuesta correcta | Ítems |
|---------------------|-----------------------------|---|
| Muy alto | ≤20 % | 20, 21, 24, 27, 29, 31 |
| Alto | (20 %, 30 %] | 7, 11, 14, 15, 16, 32 |
| Medio | (30 %, 50 %] | 2, 4, 5, 13, 17, 18, 19, 22, 25, 28, 30 |
| Bajo | >50 % | 1, 3, 6, 8, 9, 10, 12, 23, 26 |

Al analizar los seis ítems que se encuentran en el nivel de dificultad *muy alto*, se observa que dos ítems (21 y 27) se encuentran en la séptima área conceptual (fuerza magnética), un ítem (29) en la décima área conceptual (ley de Faraday) y cada uno de los otros tres ítems (20, 24 y 31), respectivamente, en dos áreas conceptuales (20 en áreas 4 y 5; 24 en áreas 8 y 11; 31 en áreas 7 y 10). Nótese que estos seis ítems se encuentran en una de las áreas conceptuales identificadas como más difíciles para los estudiantes.

Análisis de las dificultades generales de los estudiantes en el test

Se realiza un análisis de las dificultades generales que tienen los estudiantes a partir de un estudio global de el o los errores más frecuentes, según sea el caso, en cada uno de los ítems. La tabla 6 presenta los porcentajes de las respuestas para cada uno de los ítems.

Tabla 6.
Resultados obtenidos con el test. La respuesta correcta se encuentra en gris y N es para los estudiantes que no contestaron

| Ítem | Descripción del ítem | Opciones (%) | | | | | |
|------|--|--------------|----|----|----|----|---|
| | | A | B | C | D | E | N |
| 1 | Distribución de exceso de carga en un cascarón esférico conductor | 6 | 71 | 13 | 7 | 2 | 1 |
| 2 | Distribución de exceso de carga en un cascarón esférico aislante | 36 | 8 | 15 | 14 | 26 | 1 |
| 3 | Arreglo de dos cargas: cambio de magnitud de fuerza eléctrica sobre una carga al aumentar cuatro veces la carga cercana a ella | 2 | 79 | 13 | 7 | 0 | 0 |
| 4 | Arreglo de dos cargas: cambio de magnitud de fuerza eléctrica sobre una carga al aumentar cuatro veces su carga | 3 | 46 | 33 | 17 | 1 | 0 |

| Ítem | Descripción del ítem | Opciones (%) | | | | | |
|------|---|--------------|----|----|----|----|---|
| | | A | B | C | D | E | N |
| 5 | Arreglo de dos cargas: cambio de magnitud de fuerza eléctrica sobre una carga al aumentar cuatro veces su carga y separar tres veces más las cargas | 11 | 22 | 38 | 23 | 6 | 0 |
| 6 | Determinación de dirección de fuerza eléctrica sobre una carga que tiene una carga a la izquierda y otra carga abajo | 8 | 15 | 9 | 5 | 65 | 0 |
| 7 | Arreglo de dos cargas diferentes: determinación de magnitud y dirección de las fuerzas eléctricas sobre las dos cargas | 22 | 28 | 39 | 6 | 5 | 1 |
| 8 | Arreglo de tres cargas: cambio en la magnitud y dirección de la fuerza sobre una carga al poner otra carga | 4 | 63 | 10 | 21 | 2 | 0 |
| 9 | Arreglo de dos cargas y un punto: cambio en la magnitud y dirección del campo eléctrico en el punto al poner otra carga | 6 | 59 | 13 | 17 | 4 | 1 |
| 10 | Determinación del tipo de movimiento que tiene una carga al ser puesta en el reposo en un campo eléctrico uniforme | 5 | 24 | 55 | 7 | 8 | 0 |
| 11 | Cambio en energía potencial eléctrica de una carga al ser puesta en el reposo en un campo eléctrico uniforme | 42 | 7 | 19 | 10 | 22 | 1 |
| 12 | Determinación de la fuerza eléctrica sobre una carga en dos posiciones que se encuentran en una región en donde existe un campo eléctrico uniforme | 7 | 14 | 9 | 67 | 2 | 0 |
| 13 | Un cascarón conductor cargado y una carga puntual afuera: dirección del campo eléctrico en el centro del cascarón | 33 | 18 | 3 | 1 | 45 | 0 |
| 14 | Un cascarón conductor sin carga, una carga puntual en el centro y una carga puntual afuera: fuerza neta sobre cada carga puntual | 43 | 10 | 10 | 21 | 16 | 0 |
| 15 | Determinación de la dirección de la fuerza eléctrica sobre una carga al ubicarla en un punto que se encuentra en un diagrama de líneas de campo eléctrico | 23 | 31 | 26 | 12 | 7 | 0 |
| 16 | Movimiento de un electrón al ubicarlo en un punto con potencial definido | 18 | 16 | 21 | 22 | 22 | 1 |
| 17 | Tres diagramas de líneas equipotenciales: comparación del trabajo necesario para mover una misma carga de un punto a otro | 3 | 16 | 35 | 13 | 33 | 0 |
| 18 | Tres diagramas de líneas equipotenciales: comparación del campo eléctrico en un punto con mismo potencial en las tres situaciones | 3 | 7 | 16 | 40 | 34 | 1 |
| 19 | Diagrama de líneas equipotenciales y equidistantes: determinación de la dirección de la fuerza sobre una carga positiva en dos posiciones | 34 | 29 | 17 | 11 | 8 | 1 |
| 20 | Diagrama de líneas equipotenciales no equidistantes: determinación de la dirección de la fuerza sobre una carga positiva en dos posiciones | 24 | 24 | 26 | 19 | 6 | 2 |
| 21 | Determinación del tipo de movimiento que tiene una carga al ser puesta en el reposo en un campo magnético uniforme | 20 | 43 | 15 | 10 | 12 | 0 |
| 22 | Electrón que se mueve horizontalmente y se desvía verticalmente por un campo magnético: determinación de la dirección del campo magnético | 17 | 11 | 31 | 35 | 6 | 0 |
| 23 | Dos corrientes iguales en magnitud y dirección opuesta: determinación de la dirección del campo magnético en un punto entre ellas | 61 | 13 | 10 | 11 | 6 | 0 |
| 24 | Dos alambres con corrientes iguales en dirección pero una tres veces más que la otra: determinación de las fuerzas sobre los alambres | 5 | 49 | 20 | 18 | 8 | 0 |
| 25 | Tres situaciones con carga eléctrica con diferentes velocidades en el mismo campo magnético: comparación de la fuerza magnética sobre las cargas | 11 | 20 | 19 | 36 | 14 | 1 |
| 26 | Alambre con corriente que sale de la página: determinación de la dirección del campo magnético en dos posiciones | 63 | 10 | 8 | 15 | 4 | 0 |

| Ítem | Descripción del ítem | Opciones (%) | | | | | |
|------|---|--------------|----|----|----|----|---|
| | | A | B | C | D | E | N |
| 27 | Dos imanes separados (uno tres veces más fuerte que el otro) y una carga en reposo entre los imanes: determinación de la fuerza magnética sobre la carga | 23 | 18 | 13 | 28 | 19 | 0 |
| 28 | Dos alambres circulares en un mismo eje con corriente idéntica en magnitud y dirección: determinación de la dirección del campo magnético en un punto central del eje | 6 | 10 | 43 | 4 | 37 | 0 |
| 29 | Situaciones con un imán y un foco conectado a los extremos de un alambre formando un lazo: determinación de los focos que se prenden | 23 | 26 | 15 | 28 | 4 | 4 |
| 30 | Situaciones con una corriente constante y un alambre rectangular que se mueve: determinación de los alambres en los que existe una corriente | 42 | 12 | 23 | 16 | 5 | 2 |
| 31 | Barra metálica neutra que se mueve en una región con campo magnético: determinación de la distribución de carga en la superficie de la barra | 13 | 25 | 30 | 19 | 11 | 3 |
| 32 | Determinación de gráfica de fem inducida en una bobina que está enfrente de otra bobina a la que se le conecta una fuente y se conoce su gráfica de corriente | 27 | 22 | 10 | 27 | 11 | 2 |

Dificultades en la distribución de cargas en conductores y aislantes: ítems 1 y 2

En el ítem 1 (figura 1) se pide describir la distribución del exceso de carga en un cascarón esférico conductor. El error más frecuente es considerar que el exceso de carga se distribuirá uniformemente en la superficie interna y externa del cascarón (opción C, 13 %), sin tener en cuenta que, para que el conductor quede en equilibrio electrostático, el campo eléctrico en el interior del material conductor debe ser cero, y la única manera de que esto suceda es que la carga en exceso se distribuya uniformemente en la superficie externa de la esfera.

Por otra parte, en el ítem 2 (figura 1) se pide describir la distribución de exceso de carga en un cascarón esférico aislante. En este caso (E, 26 %), la concepción alternativa común es considerar que después de un tiempo no queda exceso de carga en el cascarón, ignorando el principio de conservación de la carga.

1. Se tiene una esfera metálica hueca eléctricamente neutra (sin exceso de carga). Se coloca repentinamente una pequeña cantidad de carga negativa en un punto P sobre esta esfera metálica. Si observamos este exceso de carga negativa unos cuantos segundos después, encontraremos una de las siguientes posibilidades:

- a) Todo el exceso de carga permanece justo alrededor del punto P.
- b) El exceso de carga se ha distribuido uniformemente sobre la superficie externa de la esfera.
- c) El exceso de carga se ha distribuido uniformemente sobre las superficies interna y externa de la esfera.
- d) La mayor parte de la carga se encuentra todavía en el punto P, pero algo de ésta se ha esparcido sobre la esfera.
- e) No queda exceso de carga.

2. Se tiene una esfera hueca hecha de material aislante que es eléctricamente neutra (sin exceso de carga). Se coloca repentinamente una pequeña cantidad de carga negativa en un punto P sobre el exterior de esta esfera. Si observamos este exceso de carga negativa unos cuantos segundos después, encontraremos una de las siguientes posibilidades:


- a) Todo el exceso de carga permanece justo alrededor del punto P.
- b) El exceso de carga se ha distribuido uniformemente sobre la superficie externa de la esfera.
- c) El exceso de carga se ha distribuido uniformemente sobre las superficies interna y externa de la esfera.
- d) La mayor parte de la carga se encuentra todavía en el punto P, pero algo de ésta se ha esparcido sobre la esfera.
- e) No queda exceso de carga.

Fig. 1. Ítems 1 y 2 del test en español.


Dificultades al aplicar la ley de Coulomb: ítems 3, 4 y 5

En los ítems 3, 4 y 5 (figura 2) se observa que los estudiantes tienen dificultades para encontrar la magnitud de una fuerza eléctrica aplicando la ley de Coulomb. Estos ítems están relacionados, ya que comparten el mismo enunciado general en el que se presenta un arreglo de dos cargas Q sobre las que se ejerce una fuerza de repulsión F . En los ítems 3 y 4 el error más común se relaciona con la proporcionalidad entre la fuerza eléctrica y las cargas que la generan. En el ítem 3 se pregunta por el cambio en la fuerza sobre una de las cargas Q al aumentar la otra carga a $4Q$. El error más común en este ítem es considerar que la fuerza ejercida sobre la carga Q sigue siendo F (C, 13 %), sin considerar que la fuerza eléctrica es proporcional al valor de las cargas que interactúan. En el ítem 4 se pregunta por la fuerza ejercida sobre la nueva carga $4Q$. El error más común en este ítem es que la fuerza ejercida sobre la carga $4Q$ sigue siendo F (C, 33 %), lo cual se puede deber también a una dificultad con la proporcionalidad de las cargas, o a no aplicar la tercera ley de Newton sobre fuerzas eléctricas. En estos dos ítems, la diferencia en la selección de respuesta correcta es significativa (79 % vs. 46 %). Maloney *et al.* (2001) notaron una diferencia similar y señalaron que los estudiantes parecen creer que los objetos con mayor carga ejercen mayor fuerza que los objetos con menor carga. Por último, en el ítem 5 se pregunta por el cambio de fuerza sobre la carga $4Q$ al aumentar la distancia entre las cargas tres veces. En este ítem, los dos errores más comunes (D, 23 % y B, 22 %) implican la concepción alternativa de que la fuerza eléctrica ejercida por cargas es inversamente proporcional a la distancia, en lugar de la distancia al cuadrado.

Para las preguntas de 3 a 5
 Dos objetos pequeños tienen una carga neta $+Q$. Cada objeto ejerce una fuerza de magnitud F sobre el otro.



Reemplazamos uno de los objetos con otro cuya carga neta es $+4Q$:




3. La magnitud original de la fuerza sobre la carga $+Q$ era F . ¿Cuál es ahora la magnitud de la fuerza sobre la carga $+Q$?

a) $16F$ b) $4F$ c) F d) $F/4$ e) Otra

4. ¿Cuál es ahora la magnitud de la fuerza sobre la carga $+4Q$?

a) $16F$ b) $4F$ c) F d) $F/4$ e) Otra

Después movemos las cargas $+Q$ y $+4Q$ de tal manera que estén 3 veces más alejadas de lo que estaban:



5. ¿Cuál es ahora la magnitud de la fuerza sobre la carga $+4Q$?

a) $F/9$ b) $F/3$ c) $4F/9$ d) $4F/3$ e) Otra

Fig. 2. Ítems 3, 4 y 5.

Dificultades en la superposición de fuerza eléctrica y campo eléctrico: ítems 6, 8 y 9

En el ítem 6 (figura 3) se muestra un conjunto de tres cargas: una carga unitaria negativa denominada A, una carga unitaria positiva a la derecha de A, denominada B, y otra carga unitaria positiva denominada C colocada debajo de B. Se pide determinar la dirección de una fuerza eléctrica sobre la carga B. El error más frecuente es considerar adecuadamente que la fuerza ejercida por la carga C es de repul-

sión pero considerar inadecuadamente que la fuerza ejercida por la carga A también es de repulsión (B, 15 %), ignorando el efecto del tipo de carga.

Una dificultad común en estos ítems es la aplicación del principio de superposición de fuerzas y campos eléctricos: los alumnos no analizan la fuerza o el campo que ejerce cada una de las cargas de un sistema como si estuviera sola. Este error se observa en los ítems 8 y 9 (figura 3; ítem 8: D, 21 %; ítem 9: D, 17 %) donde los alumnos responden que la interacción de tres cargas que ejercen una fuerza eléctrica neta sobre otra carga, o que generan un campo eléctrico en una posición, afecta a la dirección de la fuerza o del campo respectivamente.

6. ¿Cuál de estas flechas está en la dirección de la fuerza neta sobre la carga B?

a) b) c) d) e) Ninguna de las anteriores

8. En la figura de abajo, las cargas positivas q_2 y q_3 ejercen sobre la carga q_1 una fuerza eléctrica neta que apunta a lo largo del eje $+x$. Si una carga positiva Q se coloca en $(b,0)$, ¿qué pasará ahora con la fuerza sobre la carga q_1 ? (Nota que todas las cargas están fijas en su posición).

Antes

Después

a) No hay cambio en la magnitud de la fuerza neta ya que Q está en el eje x .
 b) La magnitud de la fuerza neta cambiará pero no la dirección.
 c) La fuerza neta disminuirá y la dirección podría cambiar por la interacción entre Q y las cargas positivas q_2 y q_3 .
 d) La fuerza neta aumentará y la dirección podría cambiar por la interacción entre Q y las cargas positivas q_2 y q_3 .
 e) No se puede determinar sin saber la magnitud de q_1 y/o Q .

9. En la figura de abajo el campo eléctrico en el punto P apunta hacia arriba a lo largo del eje y . Si una carga negativa $-Q$ se coloca en un punto sobre el eje $+y$, ¿qué pasa con el campo en P ? (Nota que todas las cargas están fijas en su posición).

Antes

Después

a) Nada, ya que $-Q$ está en el eje y .
 b) La magnitud aumentará, porque $-Q$ es negativa.
 c) La magnitud disminuirá y la dirección podría cambiar por la interacción entre $-Q$ y las dos cargas negativas $(-q)$.
 d) La magnitud aumentará y la dirección podría cambiar por la interacción entre $-Q$ y las dos cargas negativas $(-q)$.
 e) No podemos determinarlo sin conocer las fuerzas que $-Q$ ejerce sobre las dos cargas negativas $(-q)$.

Fig. 3. Ítems 6, 8 y 9.

Dificultades en la fuerza causada por un campo eléctrico: ítems 10, 12 y 15

En el ítem 10 (figura 4) se pide determinar el movimiento que tendrá una carga al ser puesta en reposo en un campo eléctrico uniforme. El error más frecuente es considerar que «la carga se moverá a velocidad constante» (B, 24 %). Al parecer estos estudiantes tienen dificultades con la segunda ley de Newton, ya que consideran que una carga que es movida con fuerza eléctrica constante se mueve a velocidad constante (Maloney *et al.*, 2001). Esta concepción es ampliamente conocida en el contexto de mecánica (Halloun y Hestenes, 1985).

En el ítem 12 (figura 4) se pide determinar la fuerza eléctrica sobre una carga positiva en dos posiciones distintas en una región en donde existe un campo eléctrico uniforme representado vectorialmente. El error más frecuente (B, 14 %) es considerar que la fuerza será mayor en la posición más a la derecha: la posición 2. Esta respuesta es la más común pues los estudiantes piensan que al tener los vectores de campo dirigidos a la izquierda, la fuente de ese campo es una carga positiva que se encuentra en la derecha. De acuerdo con ellos, la posición 2 estaría entonces más cerca de la carga.

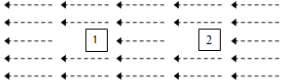
En el ítem 15 (figura 4) se pide determinar la dirección de la fuerza eléctrica sobre una carga al ubicarla en una posición en un diagrama de líneas de campo eléctrico no uniforme. En este caso la mayoría de los estudiantes eligen incorrectamente una opción en la que se muestra una dirección inadecuada (B, 31 %). Este error se puede deber a una incorrecta interpretación del diagrama de líneas de campo, al no considerar que la dirección sería tangente a la línea de campo que atravesaría el punto P. En cambio, los estudiantes muestran una dirección en la que el vector fuerza se dirige a lo que los estudiantes interpretarían como la fuente del campo.

Los ítems 12 y 15 tienen en común que evalúan la fuerza causada por un campo eléctrico sobre una carga, y de hecho es interesante notar el contraste en el porcentaje de respuesta correcta (67 % *vs.* 23 %). Al parecer este contraste se debe a las diferencias entre los dos ítems: en el tipo de representación (representación vectorial o líneas de campo), en el tipo de campo eléctrico representado (uniforme o no uniforme) y en la variable que se pide (la magnitud o dirección de la fuerza).

10. Se coloca en reposo una carga positiva en el centro de una región del espacio donde hay un campo eléctrico tridimensional uniforme. (Un campo uniforme es aquel cuya magnitud y dirección son las mismas en todos los puntos de la *región*). Cuando la carga positiva se libera desde el reposo en el campo eléctrico uniforme, ¿cuál será su siguiente movimiento?

- Se moverá a rapidez constante.
- Se moverá a velocidad constante.
- Se moverá a una aceleración constante.
- Se moverá con una aceleración que cambia linealmente.
- Permanecerá en reposo en su posición inicial.

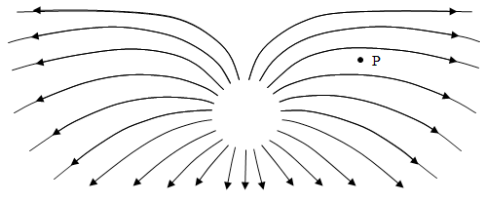
12. Una carga positiva puede colocarse en dos diferentes posiciones en una región donde hay un campo eléctrico uniforme como se muestra en la figura de abajo:



¿Cómo se comparan las fuerzas eléctricas sobre la carga en las posiciones 1 y 2?

- La fuerza sobre la carga es mayor en 1.
- La fuerza sobre la carga es mayor en 2.
- La fuerza en ambas posiciones es cero.
- La fuerza en ambas posiciones es la misma pero no es cero.
- La fuerza en ambas posiciones tiene la misma magnitud pero en direcciones opuestas.

Usa el siguiente diagrama de campo eléctrico para la pregunta 15.



Pregunta 15. ¿Cuál es la dirección de la fuerza eléctrica sobre una carga negativa colocada en el punto P en el diagrama de arriba?

a) ←
b) ↙
c) →
d) ↗
e) La fuerza es cero

Fig. 4. Ítems 10, 12 y 15.

Dificultades en los conceptos de energía potencial eléctrica y trabajo eléctrico: ítems 11 y 17

En el test hay un solo ítem que evalúa el concepto de energía potencial eléctrica (ítem 11) y un solo ítem que evalúa el concepto de trabajo eléctrico (ítem 17, figura 5). El ítem 11 pide determinar el cambio en energía potencial eléctrica de una carga positiva en un campo eléctrico uniforme en el momento que la carga es liberada del reposo. La fuerza constante sobre la carga hace que su aceleración sea constante y se empiece a mover incrementando su energía cinética de tal manera que la energía potencial de la carga-campo disminuye. El error más frecuente es pensar que «la energía potencial permanece constante porque el campo es uniforme» (A, 42 %).

En el ítem 17 se muestran tres diagramas de líneas equipotenciales distintos y se pide comparar el trabajo necesario para mover una misma carga de un punto a otro en las tres situaciones con la misma diferencia de potencial. La diferencia de potencial es el trabajo por unidad de carga, por lo que la respuesta es que en todos los casos es el mismo trabajo. Gran parte de los estudiantes consideran incorrectamente que el trabajo es mayor en el diagrama en el que los puntos están más alejados (C, 35 %). Al parecer estos estudiantes relacionan el trabajo eléctrico con la ecuación para calcular el trabajo realizado por una fuerza ($W = Fd\cos\theta$) y consideran que es necesario un mayor trabajo en la situación con una mayor distancia asumiendo que la fuerza es la misma en los tres casos.

Se coloca en reposo una carga positiva en el centro de una región del espacio donde hay un campo eléctrico tridimensional uniforme. (Un campo uniforme es aquel cuya magnitud y dirección son las mismas en todos los puntos de la *región*).

11. ¿Qué pasa con la energía potencial eléctrica de la carga positiva, después de que la carga se libera desde el reposo en el campo eléctrico uniforme?

- Permanecerá constante, porque el campo eléctrico es uniforme.
- Permanecerá constante, porque la carga permanece en reposo.
- Aumentará, porque la carga se moverá en la dirección del campo eléctrico.
- Disminuirá, porque la carga se moverá en la dirección opuesta al campo eléctrico.
- Disminuirá, porque la carga se moverá en la dirección del campo eléctrico.

En las figuras de abajo, las líneas punteadas representan las líneas equipotenciales de campos eléctricos. (Una carga moviéndose a lo largo de una línea del mismo potencial tendrá una energía potencial eléctrica constante). Un objeto cargado es movido directamente del punto A al punto B. La carga en el objeto es $+1 \mu\text{C}$.

17. ¿Cómo se compara la cantidad de trabajo necesaria para mover esta carga en estos tres casos?

- Se requiere más trabajo en I.
- Se requiere más trabajo en II.
- Se requiere más trabajo en III.
- I y II requieren la misma cantidad de trabajo pero menos que en III.
- Los tres van a requerir la misma cantidad de trabajo.

Fig. 5. Ítems 11 y 17.

Dificultades en los conceptos de potencial, campo y fuerza eléctrica: ítems 16, 18, 19 y 20

Los errores más frecuentes de los ítems 16 y 18 (figura 6) tienen en común que los estudiantes relacionan incorrectamente el campo eléctrico en un punto con el valor del potencial en ese punto, en vez de relacionarlo con la variación del potencial en función de la distancia en una dirección dada. Bagno y Eylon (1997) encontraron que este error se debe a la indistinción entre potencial y diferencia de potencial, o a una confusión entre las ecuaciones de campo eléctrico ejercido por una carga y potencial eléctrico ejercido por una carga con referencia en el infinito.

En el ítem 16 se pide definir el movimiento de un electrón al ubicarlo en un punto con potencial positivo definido (sin presentar ningún otro detalle). Como se sabe, no es posible definir el movimiento con esta información. El primer error más frecuente (D, 22 %) es considerar que el movimiento es hacia la derecha ya que el potencial es positivo, en este caso quizá confundiendo potencial eléctrico con campo eléctrico y, además, pensando que al ser potencial positivo, el campo se dirige a la derecha. El segundo error (C, 21 %) es considerar que el movimiento es hacia la izquierda. La razón en este caso es similar a la anterior, solo que estos estudiantes podrían estar teniendo en cuenta que la carga es negativa, por lo que se mueve en dirección opuesta.

En el ítem 18 se presentan tres diagramas de líneas equipotenciales distintos y se pide comparar el campo eléctrico en un punto con el mismo potencial en las tres situaciones. En el error más frecuente (D, 34 %), los estudiantes relacionan directamente el campo eléctrico en el punto con el valor de potencial eléctrico en el punto y consideran que el campo eléctrico es el mismo en las tres situaciones sin tener en cuenta que las líneas equipotenciales cercanas al punto se encuentran a diferentes distancias. En ambos ítems se puede interpretar que los alumnos tienen una confusión entre potencial eléctrico y campo eléctrico, similar a lo que proponen Bagno y Eylon (1997) en el sentido de que no hacen diferencia entre potencial eléctrico y diferencia de potencial eléctrico.

Los ítems 19 y 20 (figura 6) implican un proceso de razonamiento similar y preguntan por la fuerza sobre la carga. En el ítem 19 se presenta un diagrama de líneas equipotenciales y equidistantes que aumentan de potencial de izquierda a derecha y se pide determinar la dirección de la fuerza sobre una carga positiva colocada en dos puntos. Recuérdese que el campo eléctrico tiene dirección opuesta al incremento de potencial por lo que en ambos casos tiene dirección hacia la izquierda y, al ser una carga positiva, la dirección de la fuerza en ambos casos es hacia la izquierda. La mayoría de estudiantes que responden mal a esta pregunta eligen una dirección a la derecha (B, 29 %), que coincide con la dirección de aumento de potencial de las líneas equipotenciales.

En el ítem 20 se muestra un diagrama de líneas equipotenciales que aumentan en potencial de izquierda a derecha y que aumentan en distancia de separación entre ellas también de izquierda a derecha, y se pide determinar la dirección de la fuerza sobre una carga positiva colocada en un punto a la izquierda y otro punto a la derecha. La respuesta debe ser la opción D, y solo un 19 % de los estudiantes la escogen. En el primer error más frecuente (C, 26 %) los estudiantes se equivocan en la relación entre las magnitudes de las fuerzas, y en los segundos errores más frecuentes se equivocan en la dirección de las fuerzas (B, 24 %) y en la relación entre las magnitudes de las fuerzas y la dirección de las fuerzas (A, 24 %).

16. Se coloca un electrón en una posición en el eje x donde el potencial eléctrico es de +10 V. ¿Cuál de las siguientes opciones describe mejor el movimiento futuro del electrón?

- El electrón se moverá a la izquierda (-x), ya que está cargado negativamente.
- El electrón se moverá a la derecha (+x), ya que está cargado negativamente.
- El electrón se moverá a la izquierda (-x), ya que el potencial es positivo.
- El electrón se moverá a la derecha (+x), ya que el potencial es positivo.
- El movimiento no puede predecirse con la información dada.

En las figuras de abajo, las líneas punteadas representan las líneas equipotenciales de campos eléctricos. (Una carga moviéndose a lo largo de una línea del mismo potencial tendrá una energía potencial eléctrica constante). Un objeto cargado es movido directamente del punto A al punto B. La carga en el objeto es +1 μC .

18. ¿Cómo se compara la magnitud del campo eléctrico en B en estos tres casos?

- $I > III > II$
- $I > II > III$
- $III > I > II$
- $II > I > III$
- $I = II = III$

19. Para el caso III, ¿cuál es la dirección de la fuerza eléctrica ejercida por el campo sobre el objeto de carga +1 μC cuando está en A y cuando está en B?

- A la izquierda en A y a la izquierda en B.
- A la derecha en A y a la derecha en B.
- A la izquierda en A y a la derecha en B.
- A la derecha en A y a la izquierda en B.
- No hay fuerza eléctrica en ninguno.

20. Un protón cargado positivamente es inicialmente colocado en reposo en la posición I y luego en la posición II en una región cuyo potencial eléctrico (voltaje) es descrito por las líneas equipotenciales. ¿Qué conjunto de flechas en la izquierda describe mejor las magnitudes y direcciones relativas de la fuerza eléctrica ejercida sobre el protón cuando está en la posición I o II?

| | Fuerza en I | Fuerza en II |
|----|-------------|--------------|
| a) | → | → |
| b) | → | → |
| c) | ← | ← |
| d) | ← | ← |
| e) | 0 | 0 |

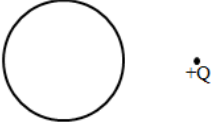
Fig. 6. Ítems 16, 18, 19 y 20.

Dificultades en el efecto de carga inducida: ítems 13 y 14

En el ítem 13 (figura 7) se presenta un cascarón conductor con carga distribuida uniformemente y una carga puntual positiva afuera y a la derecha del cascarón, y se pide determinar la dirección del campo eléctrico en el centro del cascarón. El error más frecuente (opción A, 33 %) es considerar que el campo eléctrico es hacia la izquierda, ignorando que la carga en un conductor se distribuye de tal manera que el campo eléctrico en su interior es cero. Además, en el ítem 14 (figura 7) se presenta un cascarón conductor sin carga, una carga puntual positiva en el centro y una carga puntual positiva afuera, y se pide describir la fuerza neta sobre cada una de las cargas. Solo el 21 % contestan correctamente que no existe fuerza neta sobre la carga dentro del cascarón y que sí existe una fuerza neta sobre la carga afuera del cascarón (considerando el efecto de la carga inducida). La mayoría de los estudiantes (43 %) seleccionan la opción A incorrecta: «Ambas cargas experimentan la misma fuerza neta en dirección

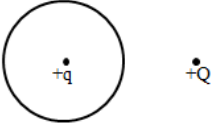
opuesta una de otra». En un análisis en conjunto de los errores más frecuentes en ambos ítems, se observa que los estudiantes no están considerando el efecto de carga inducida para que el conductor llegue al equilibrio electrostático.

13. La figura de abajo muestra una esfera hueca metálica conductora que inicialmente se le da carga positiva (+) distribuida uniformemente sobre su superficie. Después se coloca una carga positiva +Q cerca de la esfera como se muestra en la figura. ¿Cuál es la dirección del campo eléctrico en el centro de la esfera después de que se coloca la carga positiva +Q cerca de la esfera?



a) Izquierda
b) Derecha
c) Arriba
d) Abajo
e) El campo es cero

14. La figura de abajo muestra una carga eléctrica q localizada en el centro de una esfera hueca metálica conductora sin carga. Afuera de la esfera hay una segunda carga Q. Las dos cargas son positivas. Elige la descripción de abajo que describe la fuerza eléctrica neta sobre cada una de las cargas en esta situación.



a) Ambas cargas experimentan la misma fuerza neta en dirección opuesta una de otra.
b) No hay fuerza neta sobre ninguna de las dos cargas.
c) No hay fuerza sobre Q pero sí hay fuerza neta sobre q.
d) No hay fuerza sobre q pero sí hay fuerza neta sobre Q.
e) Ambas cargas experimentan una fuerza neta pero son diferentes una de la otra.

Fig. 7. Ítems 13 y 14.

Dificultades en la fuerza magnética al aplicar la ley de Lorentz: ítems 21, 22, 25, 27 y 31

En estos ítems se pueden ver tendencias interesantes de las dificultades al aplicar la ley de Lorentz $F = qv \times B$ (figuras 8 y 9). Una de las tendencias que se observa en los ítems 21 y 27 es considerar que en una carga que se encuentra en reposo sí existe fuerza magnética, mostrando dificultades para entender la condición de que exista velocidad para que exista fuerza magnética. Esta dificultad fue identificada por Maloney *et al.* (2001). En el ítem 21 el error más común (B, 43 %) es pensar que una carga eléctrica en reposo en un campo magnético se moverá con aceleración constante porque la fuerza tiene magnitud constante. Por otra parte, en el ítem 27 el error más frecuente es considerar que existe fuerza magnética sobre una carga en reposo en medio de dos imanes y que su dirección apunta hacia el polo sur del imán de la derecha (D, 28 %). En este ítem, en cuanto al error en la dirección, al parecer los estudiantes piensan en términos de las líneas de campo magnético que se dirigen del polo norte del imán de la izquierda al polo sur del imán de la derecha. Esta concepción alternativa se relaciona con que los alumnos consideran que los polos magnéticos están cargados, el polo sur con carga negativa y el polo norte con carga positiva; por lo tanto la carga prueba positiva sería atraída al polo sur (Maloney, 1985). El argumento de que los estudiantes tienen estas ideas de líneas de campo magnético y/o fuerzas entre *cargas magnéticas* sobre cargas eléctricas se refuerza observando que la segunda opción incorrecta más fuerte es la opción A, con un 23 % (aún mayor que el porcentaje de los alumnos que responden esta pregunta correctamente), en la cual la dirección mostrada tiene la dirección del campo magnético en ese punto. Sin embargo, no se puede distinguir en este ítem a los alumnos que piensan en términos de líneas de campo de aquellos que piensan en términos de repulsión o atracción de polos y cargas.

La siguiente tendencia se refiere a la dificultad al aplicar la regla de la mano derecha para encontrar la dirección del campo magnético y de la fuerza magnética. El ítem 22 muestra un electrón que se

mueve horizontalmente y se desvía verticalmente por un campo magnético, y pide determinar la dirección del campo magnético. El error más frecuente es considerar una dirección opuesta a la adecuada (C, 31 %), que se puede deber a no considerar la carga negativa del electrón, o a un error del producto vectorial. Maloney *et al.* (2001) también encuentran que los estudiantes confunden la dirección. Por otra parte, en el ítem 31 se muestra una barra metálica neutra que se mueve a velocidad constante hacia la derecha en una región donde hay campo magnético uniforme hacia afuera de la hoja, y se pide determinar la distribución de carga en la superficie de la barra. Como se sabe, la carga positiva se desplaza hacia abajo y la carga negativa hacia arriba hasta llegar a un equilibrio entre la fuerza eléctrica y magnética dentro de la barra. La mayoría de los estudiantes responden que la carga positiva se mueve a la derecha de la barra y que la carga negativa se mueve a la izquierda de la barra (C, 30 %). Esta distribución errónea parecería deberse a una incorrecta aplicación de la regla de la mano derecha, distribuyendo las cargas positivas en la misma dirección del movimiento de la barra.

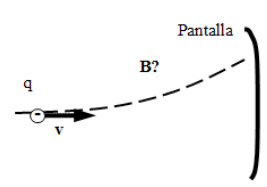
Por último, los estudiantes tienen dificultades para aplicar la ley de Lorentz cuando existe un ángulo entre la dirección de la velocidad de la carga y la dirección del campo magnético, es decir $F = qvB\sin\theta$. En los dos errores más comunes del ítem 25 (B, 20 % y C, 19 %) los alumnos no identifican que la fuerza tiene un valor máximo de magnitud al tener un ángulo perpendicular entre la velocidad y el campo magnético, y que la fuerza es nula cuando son paralelos.

21. ¿Qué le pasa a una carga positiva cuando es colocada en reposo en un campo magnético uniforme? (Un campo uniforme es aquel cuya magnitud y dirección son la misma en todos los puntos).

- Se mueve con velocidad constante, ya que la fuerza tiene magnitud constante.
- Se mueve con aceleración constante, ya que la fuerza tiene magnitud constante.
- Se mueve en un círculo con rapidez constante, ya que la fuerza siempre es perpendicular a la velocidad.
- Se acelera en un círculo, ya que la fuerza es siempre perpendicular a la velocidad.
- Permanece en reposo, ya que la fuerza y la velocidad inicial son cero.

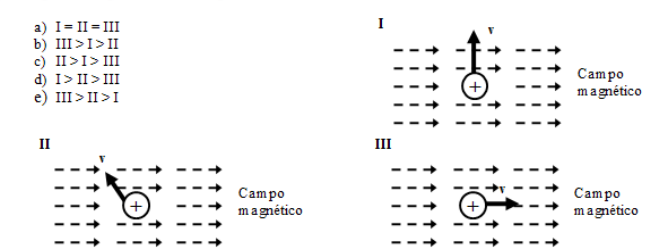
22. Un electrón se mueve horizontalmente hacia una pantalla. El electrón se mueve a lo largo de la trayectoria mostrada en la figura debido a una fuerza magnética causada por un campo magnético. ¿En qué dirección apunta el campo magnético?

- Hacia arriba de la página.
- Hacia abajo de la página.
- Hacia adentro de la página.
- Hacia afuera de la página.
- El campo magnético está en dirección de la trayectoria curva.

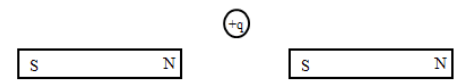


25. Las figuras de abajo representan partículas cargadas positivamente moviéndose en el mismo campo magnético uniforme. El campo apunta de izquierda a derecha. Todas las partículas tienen la misma carga y la misma rapidez v . Ordena de mayor a menor estas situaciones de acuerdo a las magnitudes de la fuerza ejercida por el campo sobre cada carga en movimiento.

- $I = II = III$
- $III > I > II$
- $II > I > III$
- $I > II > III$
- $III > II > I$



27. Una partícula cargada positivamente $+q$ está en reposo en el plano entre dos imanes fijos, como se muestra en la figura. El imán de la izquierda es tres veces más fuerte que el imán de la derecha. ¿Qué opción es la que mejor representa la fuerza MAGNÉTICA resultante ejercida por los imanes sobre la carga?



-
- ↙
- ←
- ↘
- Cero

Fig. 8. Ítems 21, 22, 25 y 27.

31. Una barra metálica neutra se mueve a velocidad constante v hacia la derecha a través de una región donde hay un campo magnético uniforme apuntando hacia afuera de la página. El campo magnético es producido por unas grandes bobinas que no se muestran en el diagrama.

Hacia afuera de la hoja

¿Cuál de los siguientes diagramas describe mejor la distribución de carga en la superficie de la barra metálica?

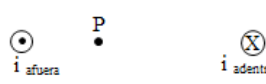
a) b) c) d) e)

Fig. 9. Ítem 31.

Dificultades en el campo magnético causado por una corriente: ítems 23, 26 y 28

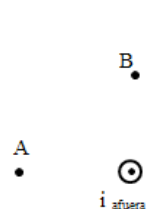
Maloney *et al.* (2001) señalan que los estudiantes confunden el campo eléctrico con el campo magnético. En los errores más frecuentes de los ítems 23, 26 y 28 (figura 10) los estudiantes parecen confundir el campo magnético causado por corrientes con el campo eléctrico causado por cargas puntuales. En el ítem 23, el error más frecuente es considerar que el campo magnético entre dos corrientes en sentido contrario apunta hacia la corriente más cercana (opción B, 13 %); es decir, como si la corriente más cercana fuera una carga puntual negativa y se preguntara por campo eléctrico. También en el ítem 26, al describir el campo magnético causado por un cable con corriente que «sale de la página», los alumnos eligen la dirección radial hacia afuera, como si se tratara del campo eléctrico ejercido por una carga puntual (D, 15 %). En el ítem 28, el error más común (E, 37 %) puede originarse en la idea de que si dos corrientes van en sentidos iguales, el campo magnético es cero en el eje a la mitad de la distancia entre ellas; esta noción es paralela a de que el campo eléctrico generado por dos cargas del mismo signo es cero en una posición a la mitad de la distancia entre ellas.

23. El alambre 1 lleva una gran corriente i fluyendo hacia afuera de la página (\odot) como se muestra en el diagrama. El alambre 2 lleva una gran corriente i fluyendo hacia adentro de la página (\otimes). ¿En qué dirección apunta el campo magnético en la posición P?



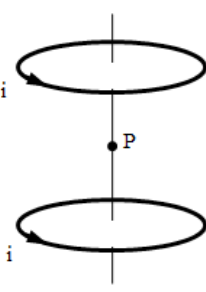
a) \uparrow b) \leftarrow c) \rightarrow d) \downarrow e) Ninguna de las anteriores

26. El diagrama muestra un cable con una gran corriente eléctrica i (\odot) saliendo de la página. ¿En qué dirección estaría el campo magnético en las posiciones A y B?



| | A | B |
|----|---------------------------|---------------|
| a) | \downarrow | \leftarrow |
| b) | \rightarrow | \downarrow |
| c) | \uparrow | \rightarrow |
| d) | \leftarrow | \uparrow |
| e) | Ninguna de las anteriores | |

28. Dos alambres circulares idénticos llevan corrientes idénticas i . Los alambres están localizados como se muestran en el diagrama. ¿Qué flecha es la que mejor representa la dirección del campo magnético en el punto P ubicado justo en medio de las corrientes?



a) \downarrow
 b) \rightarrow
 c) \uparrow
 d) \leftarrow
 e) Cero

Fig. 10. Ítems 23, 26 y 28.

Dificultades al aplicar la ley de Faraday: ítems 29, 30 y 32

Los ítems 29, 30 y 32 (figuras 11 y 12) evalúan la aplicación de esta ley en tres situaciones distintas: 1) cuando un lazo está cerca de un imán, 2) cuando un lazo está cerca de una corriente constante y 3) cuando un lazo (bobina) está cerca de una corriente variable.

En los dos errores más frecuentes del ítem 29 (opción D: 28 % y B: 26 %), cuando el lazo está cerca de un imán, los estudiantes tienen dificultades en reconocer que existe fem inducida cuando el imán se mueve (situación 1 del ítem, opción D) y cuando el lazo se colapsa disminuyendo el área transversal (situación 2 del ítem, opciones D y B). Por otra parte, en el error más frecuente del ítem 30 (opción C, 23 %), cuando el lazo está cerca de una corriente constante, los estudiantes tienen dificultades en reconocer que sí existe fem inducida cuando un lazo se aleja en dirección perpendicular al alambre recto con corriente

constante, y que no existe fem inducida cuando el lazo se mueve en dirección paralela al alambre recto con corriente constante. Por último, en el ítem 32, cuando el lazo (bobina) está cerca de una corriente variable, los estudiantes tienen dificultades en comprender que el cambio de flujo magnético depende del cambio en la corriente, por lo que la fem estará relacionada con el cambio de la corriente con respecto al tiempo. El error más frecuente de este ítem (opción A, 27 %) es considerar que la gráfica de fem inducida es igual a la gráfica de la corriente. En los dos primeros ítems se pregunta por la producción de fem, es decir, que el solo hecho de que exista un cambio en el flujo, producirá fem. En cambio, en el último ítem se pregunta por el tipo de cambio que ocurre cuando se tiene en cuenta tanto la variación lineal en el tiempo del flujo como el signo, es decir, el ser opuesto al cambio. En el ítem 29, al parecer, los estudiantes no logran reconocer que el hecho de que el lazo se colapse produce un cambio en el flujo a través. Al ser la única opción en la que el área del lazo cambia, no podemos distinguir a los estudiantes que en efecto no entienden que el flujo cambia cuando el área cambia de aquellos que no entienden que el colapsar significa que el área cambia. En el ítem 30, quizá lo que se esté involucrando es la solución al problema, no por medio de la ley de Faraday, sino por medio de fuerzas magnéticas sobre las cargas en los lazos, una manera que les daría la misma respuesta correcta. Sin embargo, si los alumnos combinan fuerzas magnéticas con la confusión de la dirección del campo magnético con campo eléctrico (como si fuera cargas puntuales, es decir, radial), entonces en la situación I no habría fuerza magnética y en las situaciones III y II sí habría fuerza magnética, algo consistente con la respuesta incorrecta con mayor porcentaje (opción C). Por último, en el ítem 32 es evidente que los estudiantes que escogen la opción A (además de los que escogen la opción B teniendo en cuenta el signo negativo) están confundiendo la producción de fem en términos del flujo y no en términos del cambio de flujo.

29. Las siguientes figuras involucran un imán cilíndrico y un pequeño foco conectado a los extremos de un alambre de cobre formando un lazo. El plano del lazo de alambre es perpendicular al eje de referencia. Los estados de movimiento del imán y del alambre están claramente indicados en el diagrama. La rapidez será representada por v y DCMR representa "dirección contraria a las manecillas del reloj"

I $v \leftarrow$ m oviéndose a la izquierda \leftarrow foco estático eje

II \leftarrow foco eje \leftarrow lazo de alambre colapsando

III \leftarrow foco eje \leftarrow lazo de alambre rotando en DCMR respecto al eje

IV \leftarrow foco eje \leftarrow m oviéndose a la izquierda \leftarrow v

¿En cuál de las figuras se encenderá el foco?
 a) I, III, IV
 b) I, IV
 c) I, II, IV
 d) IV
 e) Ninguna de las anteriores

30. Un alambre largo y recto lleva una gran corriente constante i . Un alambre cerrado con trayectoria rectangular en el mismo plano que el cable se mueve con velocidad v en las direcciones mostradas. ¿Qué alambre rectangular tendrá una corriente inducida?

I $i \rightarrow$ $v \rightarrow$

II $i \rightarrow$ $v \leftarrow$

III $i \rightarrow$ $v \rightarrow$

a) Sólo I y II b) Sólo I y III c) Sólo II y III d) Todos e) Ninguno de los anteriores

Fig. 11. Ítems 29 y 30.

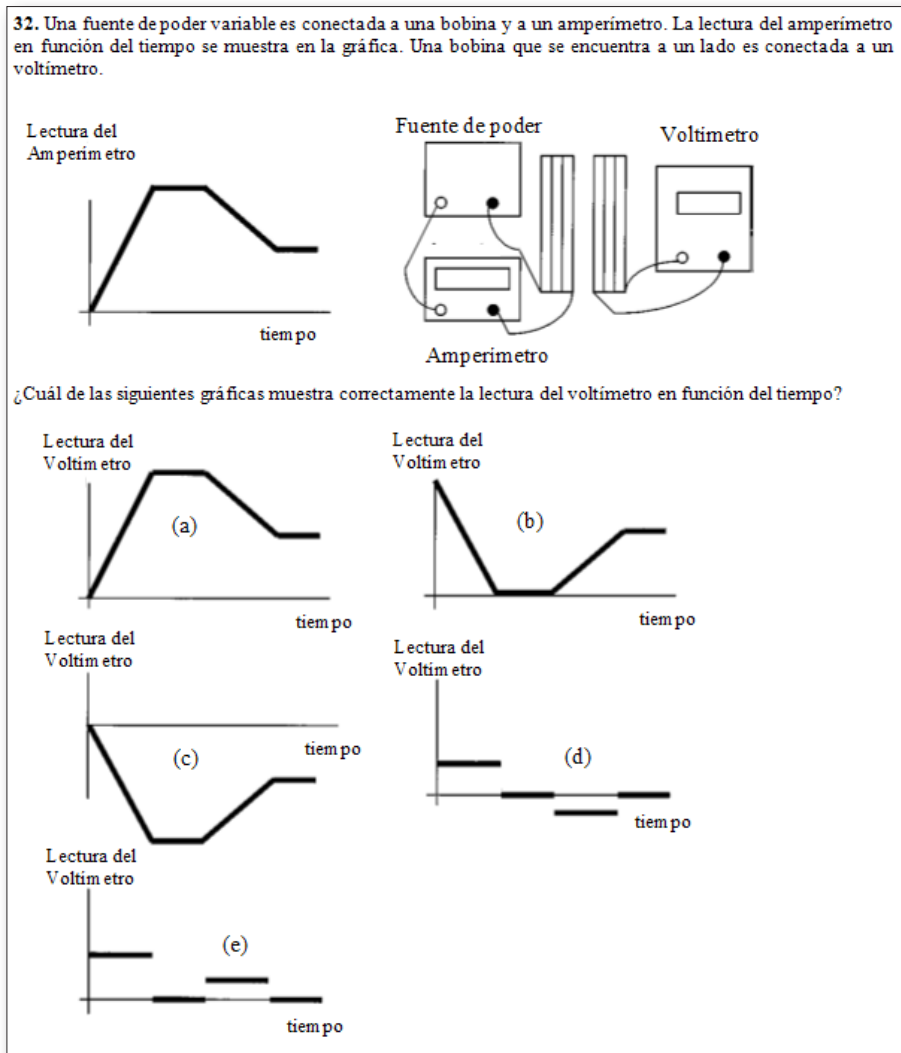


Fig. 12. Ítem 32.

Dificultades al aplicar la tercera ley de Newton: ítems 7 y 24

En estos ítems (figura 13) se identifica un error en la aplicación de la tercera ley de Newton en electromagnetismo, conocido como «p-prim de Ohm», el cual se caracteriza por la concepción de que a mayor esfuerzo habrá mayor resultado (Leppävirta, 2012). Los errores más comunes en los ítems 7 (C, 39 %) y 24 (B, 49 %) están directamente relacionados con la única diferencia que se trata de distintos contextos. En ambos casos, se tiene un arreglo de dos elementos, dos cargas eléctricas para el ítem 7 y dos corrientes eléctricas para el ítem 24, donde los valores de las cargas y las corrientes son distintos. El error más común en ambos casos es considerar que la fuerza ejercida por la carga o corriente mayor sobre la menor será mayor que la fuerza ejercida por la carga o corriente menor sobre la mayor.

7. La figura de abajo muestra una partícula (etiquetada como B) que tiene una carga eléctrica neta de +1 unidad. Varios centímetros a la izquierda está otra partícula (etiquetada como A) que tiene una carga neta de -2 unidades. Elige el par de vectores de fuerza (las flechas) que compara correctamente la fuerza eléctrica sobre A (causada por B) con la fuerza eléctrica sobre B (causada por A).

-2 unidades +1 unidad

• •

A B

| | Fuerza sobre A | Fuerza sobre B |
|----|----------------|----------------|
| a) | → | ← |
| b) | → | ← |
| c) | → | ← |
| d) | ← | → |
| e) | ← | ← |

24. Dos alambres paralelos I y II que están cerca el uno del otro llevan corrientes i y $3i$ en la misma dirección. Compara las fuerzas que ejercen los dos alambres entre sí.

- La fuerza que ejerce el alambre I sobre el alambre II es mayor que la fuerza que ejerce el alambre II sobre el alambre I.
- La fuerza que ejerce el alambre II sobre el alambre I es mayor que la fuerza que ejerce el alambre I sobre el alambre II.
- Los alambres ejercen fuerzas de atracción de igual magnitud entre sí.
- Los alambres ejercen fuerzas de repulsión de igual magnitud entre sí.
- Los alambres no ejercen fuerzas entre sí.

Fig. 13. Ítems 7 y 24.

RECOMENDACIONES PARA LA INSTRUCCIÓN DE LOS CONCEPTOS EVALUADOS EN EL TEST

En la literatura se señala que todo cambio curricular debe partir de una investigación del entendimiento de los estudiantes (Duit, Treagust y Mansfield, 1996; McDermott, 2001; Viennot, 2001). El análisis del entendimiento conceptual de los estudiantes en el test, realizado en la sección anterior para cubrir el segundo objetivo, cumple con este rol de investigación y permite establecer recomendaciones para la instrucción de los conceptos evaluados en el test en los cursos de física introductoria.

Al analizar las calificaciones se observó que la mediana de las calificaciones obtenidas por los estudiantes que terminaban el curso Electricidad y Magnetismo era de 12 sobre 32. Esto llama la atención, ya que los estudiantes que se encuentran en la mediana tienen dificultades para contestar correctamente 20 de los 32 ítems del test. Este hecho muestra la necesidad de modificar la instrucción en los temas de electricidad y magnetismo para intentar incrementar el entendimiento conceptual de los estudiantes. En el análisis también se detectaron las cinco áreas conceptuales que son más difíciles para los estudiantes: fuerza magnética; ley de Faraday; trabajo, potencial eléctrico, campo y fuerza; carga inducida y campo eléctrico, y tercera ley de Newton. La primera recomendación general es enfatizar la instrucción de los conceptos relacionados con estas cinco áreas. En el análisis también se agruparon los ítems del test según su grado de dificultad. Se observó que seis ítems tenían un nivel de dificultad muy alto. Los seis ítems eran el 20, 21, 24, 27, 29 y 31, y se notó que cada uno de ellos se encontraba en una de las áreas conceptuales identificadas como las más difíciles para los estudiantes. La segunda recomendación general es poner el acento en la instrucción de los conceptos específicos relacionados con estos seis ítems.

Además se realizó un análisis de las dificultades generales que tienen los estudiantes en los conceptos evaluados en el test a partir de un estudio global del error más frecuente en cada uno de los ítems. McDermott (2001) establece que algunos errores muy persistentes deben ser directamente abordados en la instrucción. La tercera recomendación es que los profesores de física utilicen el análisis realizado previamente como un catálogo de las dificultades generales que deben ser abordadas en la instrucción de los conceptos de electricidad y magnetismo. Por último, nuestra cuarta recomendación es que los profesores se enfoquen de manera principal al planear su instrucción en los diez errores más frecuentes que tienen los estudiantes al realizar el test, resumidos en la tabla 7.

Tabla 7.
Los diez ítems con sus errores más frecuentes en orden descendiente de izquierda a derecha

| | | | | | | | | | | |
|--------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Ítem | 24 | 14 | 21 | 11 | 7 | 28 | 17 | 18 | 13 | 4 |
| Opción | B | A | B | A | C | E | C | E | A | C |
| % | 49 | 43 | 43 | 42 | 39 | 37 | 35 | 34 | 33 | 33 |

CONCLUSIÓN

En este artículo se presentó el CSEM en su versión en español y se mostró la confiabilidad y el poder discriminatorio de este. También se realizó un análisis detallado de las dificultades más persistentes de los estudiantes en el test, y se establecieron recomendaciones específicas para la instrucción.

El artículo tiene dos implicaciones importantes. El test en su versión en español, que presentamos en el proyecto Physport (physport.org), puede ser utilizado como recurso por investigadores o por profesores de física universitaria de países hispanohablantes. Los investigadores pueden usar el test para analizar el entendimiento conceptual de estudiantes en diferentes instituciones o distintos niveles y para evaluar la efectividad de nuevo material instruccional (Redish, 1999). Asimismo, el análisis elaborado en este artículo puede ayudar a estos investigadores a diseñar nuevo material instruccional que tenga en cuenta las dificultades más importantes de los estudiantes.

En el caso de los profesores, el test puede ser usado para establecer un ciclo de mejora en la instrucción mediante la implementación de este test antes y después de la instrucción midiendo aprendizaje. El análisis puede ser usado como base para mejorar esta instrucción al tener en cuenta las dificultades principales de los estudiantes.

REFERENCIAS

- ALMUDÍ, J.; ZUZA, K. y GUIASOLA, J. (2016). Aprendizaje de la teoría de inducción electromagnética en cursos universitarios de física general. Una enseñanza por resolución guiada de problemas. *Enseñanza de las ciencias*, 34(2), pp. 7-24.
<http://dx.doi.org/10.5565/rev/ensciencias.1612>
- BAGNO, E. y EYLON, B. (1997). From problem solving to a knowledge structure: An example from the domain of electromagnetism. *American Journal of Physics*, 65(8), pp. 726-736.
<http://dx.doi.org/10.1119/1.18642>
- BARNIOL, P.; CAMPOS, E. y ZAVALA, G. (2016). Conceptual survey of electricity and magnetism: Analysis of the items and recommendations for improvement. *Physics Education Research Conference 2016*, pp. 44-47.
<http://dx.doi.org/10.1119/perc.2016.pr.006>

- BARNIOL, P. y ZAVALA, G. (2014a). Test of understanding of vectors: A reliable multiple-choice vector concept test. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 10(1).
<https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.10.010121>
- BARNIOL, P. y ZAVALA, G. (2014b). Force, velocity, and work: The effects of different contexts on students' understanding of vector concepts using isomorphic problems. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 10(2).
<https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.10.020115>
- DING, L.; CHABAY, R.; SHERWOOD, B. y BEICHNER R. (2006). Evaluating an electricity and magnetism assessment tool: Brief electricity and magnetism assessment. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 2(1).
<https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.2.010105>
- DUIT, R.; TREAGUST, D. y MANSFIELD, H. (1996). Investigating students understanding as prerequisite to improving teaching and learning in science and mathematics. En D. F. Treagust, R. Duit y B. J. Fraser (Eds.). *Improving teaching and learning in science and mathematics* (pp.17-31). New York, NY: Teachers Press College.
- GUISASOLA, J.; GARMENDIA, M.; MONTERO, A. y BARRAGUÉS, J.I. (2012). Una propuesta de utilización de los resultados de la investigación didáctica en la enseñanza de la física. *Enseñanza de las ciencias*, 30(1), pp. 61-72.
<https://doi.org/10.5565/rev/ec/v30n1.7>
- HALLOUN, I. A. y HESTENES, D. (1985). Common sense concepts about motion. *American Journal of Physics*, 53(11), pp. 1056-1065.
<http://dx.doi.org/10.1119/1.14031>
- HESTENES, D.; WELLS M. y SWACKHAMER, G. (1992). Force concept inventory. *Physics Teachers*, 30, pp. 141-158.
<https://doi.org/10.1119/1.2343497>
- KLINE, P. (1986). *A handbook of test construction*. London: Methuen & Co. Ltd.
- LEPPÄVIRTA, J. (2012). The effect of naïve ideas on students' reasoning about electricity and magnetism. *Research in Science Education*, 42(4), pp. 753-767.
<https://doi.org/10.1007/s11165-011-9224-7>
- LINDELL, R. y DING, L. (2013). Establishing reliability and validity: An ongoing process. *AIP Conference Proceedings*, 1513, 27-29.
<https://doi.org/10.1063/1.4789643>
- MALONEY, D. (1985). Charged poles. *Physics Education*, 20(6), pp. 310-316.
<https://doi.org/10.1088/0031-9120/20/6/009>
- MALONEY, D.; O'KUMA, T.; HIEGGELKE, C. y HEUVELEN, A. (2001). Surveying students' conceptual knowledge of electricity and magnetism. *American Journal of Physics*, 69 (7), S12-S23.
<http://dx.doi.org/10.1119/1.1371296>
- MCDERMOTT, L. C. (2001). Oersted medal lecture 2001: «Physics education research - The key to student learning». *American Journal of Physics*, 69(11), pp. 1127-1137.
<http://dx.doi.org/10.1119/1.1389280>
- MCDONALD, R. P. (2013). *Test Theory: A unified treatment*. New York: Routledge.
- MELTZER, D. (2007). Analysis of shifts in student's reasoning regarding electric field and potential concepts. *AIP Conference Proceedings*, 883, pp. 177-180.
<https://doi.org/10.1063/1.2508721>
- MIOKOVIĆ, Z.; GANZBERGER, S. y RADOLIĆ, V. (2012). Assessment of the university of osijek engineering students' conceptual understanding of electricity and magnetism. *Tehnicki Vjesnik*, 19(3), pp. 563-572.

- NARJAIKAEW, P.; EMARAT, N.; ARAYATHANITKUL, K. y COWIE, B. (2010). Magnetism teaching sequences based on an inductive approach for first-year Thai university science students. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 8(5), pp. 891-910.
<https://doi.org/10.1007/s10763-009-9191-x>
- PLANINIC, M. (2006). Assessment of difficulties of some conceptual areas from electricity and magnetism using the conceptual survey of electricity and magnetism. *American Journal of Physics*, 74(12), pp. 1143-1148.
<http://dx.doi.org/10.1119/1.2366733>
- REDISH, E. (1999). Millikan lecture 1998: Building a science of teaching physics. *American Journal of Physics*, 67(7), pp. 562-573.
<https://doi.org/10.1119/1.19326>
- SAARELAINEN, M.; LAAKSONEN, A. y HIRVONEN, P. (2007). Students' initial knowledge of electric and magnetic fields - more profound explanations and reasoning models for undesired conceptions. *European Journal of Physics*, 28(1), pp. 51-60.
<https://doi.org/10.1088/0143-0807/28/1/006>
- TECPAN, S.; ZAVALA, G. y BENEGAS, J. (2012). Attitudes of in-service physics teachers towards a constructivist professional development workshop. *Latin-American Journal of Physics Education*, 6, pp. 316-320.
- VIENNOT, L. (2001). *Reasoning in physics. The part of common sense*. Dordrecht: Kluwer Academic.
- YOUNG, H. y FREEDMAN, R. (2013). *Física Universitaria con Física Moderna*, vol. 2 (13.^a ed.). México: Pearson Educación.
- WATTANAKASIWICH, P.; TALEAB, P.; SHARMA, M. y JOHNSTON, I. (2013). Development and implementation of a conceptual survey in thermodynamics. *International Journal of Innovation in Science and Mathematics Education*, 21(1), pp. 29-53.
- ZAVALA, G.; TEJEDA, S.; BARNIOL, P. y BEICHNER, R. (2017). Modifying the Test of Understanding Graphs in Kinematics. *Physical Review Physics Education Research*, 13, 020111, pp. 1-16.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.13.020111>

The Conceptual Survey of Electricity and Magnetism: Reliability analysis and study of most frequent difficulties

Pablo Barniol
Tecnologico de Monterrey, Escuela de Humanidades
y Educación, Monterrey, México
pablo.barniol@itesm.mx

Esmeralda Campos
Tecnologico de Monterrey, Escuela de Ingeniería
y Ciencias, Monterrey, México"
esme.cam@gmail.com

Genaro Zavala
Tecnologico de Monterrey, Escuela de Ingeniería
y Ciencias, Monterrey, México
Universidad Andres Bello, Facultad de Ingeniería,
Santiago, Chile
genaro.zavala@itesm.mx

The Physics Education Research community often uses multiple-choice tests for large populations (Redish, 1999). In Electricity and Magnetism, the Conceptual Survey of Electricity and Magnetism (CSEM) designed by Maloney *et al.* (2001) is one of the most widely used multiple-choice tests for conceptual understanding. However, to date, no study presents the test in its Spanish version along with its reliability and discriminatory power. In addition, when conducting a literature review of the original report and articles that have studied students' difficulties using the test as a measuring instrument, we found that none of these presents a detailed analysis of the most frequent difficulties that students have in the evaluated concepts. This article has three general objectives: (1) to present the CSEM in Spanish and analyse its reliability and discriminatory power, (2) to perform a detailed analysis of the most frequent difficulties of the students in the concepts evaluated in the test, and (3) to establish recommendations for research and instruction of these concepts.

The participants in this study were students who took a course in Electricity and Magnetism for science and engineering in a private Mexican university. Three native Spanish-speakers, who have advanced English proficiency, translated the CSEM into Spanish. The test was implemented with 310 students during the last session of the semester.

As recommended by Ding *et al.* (2006), we measured its reliability and discriminatory power with five statistical tests: the difficulty index, the discriminatory index, the point-biserial coefficient, the reliability of the test and Ferguson's delta test. All the values obtained satisfied those recommended. From this analysis, it is possible to affirm that the Spanish version of the CSEM is a reliable instrument with adequate discriminatory power.

For the second objective, i.e., a detailed analysis of the students' most frequent difficulties in the concepts evaluated in the test, we carried out several studies. First, the analysis of the overall performance of students. Then, a comparison of the performance and the degree of difficulty of the items in the different conceptual areas. Finally, an analysis of the general difficulties in the concepts evaluated in the test.

The analysis of the conceptual understanding of the students in the test allows to establish recommendations for the instruction of the concepts evaluated in the test in introductory physics courses (McDermott, 2001; Viennot, 2001). The analysis detected the five conceptual areas that are most difficult for students: Magnetic force; Faraday's Law; Work, electric potential, field and force; Induced charge and electric field; and Newton's Third Law. We recommend to emphasize the instruction of the concepts related to these five areas. In the analysis, the items of the test were also grouped according to their degree of difficulty. We found that six items had a very high level of difficulty, items 20, 21, 24, 27, 29, 31. Interestingly, each of the items was in one of the conceptual areas identified as the most difficult for the students. Another recommendation we make is to emphasize the instruction of the specific concepts related to these six items. In addition, from a global study of the most frequent error in each of the items, we analysed the general difficulties that students have in the concepts evaluated in the CSEM. The final recommendation is that physics teachers use the analysis in this report as a catalogue of the general difficulties that must be addressed in the instruction of the concepts of electricity and magnetism.