

DIFICULTADES PERSISTENTES EN EL APRENDIZAJE DE LA ELECTRICIDAD: ESTRATEGIAS DE RAZONAMIENTO DE LOS ESTUDIANTES AL EXPLICAR FENÓMENOS DE CARGA ELÉCTRICA

GUISASOLA, JENARO; ZUBIMENDI, JOSÉ LUIS; ALMUDÍ, JOSÉ MANUEL y CEBERIO, MIKEL

Departamento de Física Aplicada I. Universidad del País Vasco (UPV/EHU)

jenaro.guisasola@ehu.es

jl.zubimendi@ehu.es

jose.almudi@ehu.es

mikel.ceberio@ehu.es

Resumen. Este trabajo analiza las formas de razonamiento de estudiantes universitarios en las explicaciones sobre procesos de carga eléctrica en cuerpos. Al indagar en las formas de razonamiento utilizadas por los estudiantes para explicar estos fenómenos, se ha utilizado una combinación de diseños cuantitativos y cualitativos, cuestionarios y entrevistas, con objeto de tener en cuenta los múltiples aspectos de las concepciones de los estudiantes. La investigación desarrollada muestra que los fenómenos de carga eléctrica de cuerpos, que se encuentran entre la electrostática y la electrocinética, presentan serias dificultades de aprendizaje. En particular, se muestra que conceptos importantes de la teoría eléctrica como *carga*, *diferencia de potencial* y *capacidad eléctrica* no son utilizados científicamente por una mayoría de estudiantes, incluso después de haber realizado cursos introductorios de física, al intentar explicar los procesos de carga eléctrica de un cuerpo.

Palabras clave. Concepciones alternativas, electricidad, capacidad eléctrica, razonamientos de los estudiantes, bachillerato y universidad.

Persistent Learning Problems in Electricity: Student's Forms of Reasoning When Tackling the Phenomena of the Electrical Charge of the Body

Summary. This research studies university students' reasoning when they explain electrical charge phenomena. Different designs were used for this research (quantitative and qualitative schemes, tests and surveys) in order to try to get an idea of the students' knowledge. It showed that students do not use potential difference and electrical capacity in a scientific way to explain the phenomena of the electrical charge of the body, although they had taken elementary physics courses.

Keywords. Students' misconceptions, electricity, capacity, students' reasoning, secondary education and university.

INTRODUCCIÓN

La mayoría de los estudiantes continúa considerando la electricidad como un tema difícil y poco atractivo. La investigación ha mostrado, de manera reiterada, el escaso aprendizaje de los estudiantes después de la enseñanza en dicho campo (Psillos, 1998; Duit y von Rhöneck, 1998). En concreto, las relaciones entre electrostática y electrocinética en cursos de introducción de física, en bachillerato y primeros cursos de universidad, constituyen un problema didáctico que implica a conceptos como *carga eléctrica*, *campo eléctrico*, *diferencia de potencial*, *intensidad de corriente* y *capacidad eléctrica*, que

se encuentran relacionados y son utilizados en contextos tanto estáticos (electrostática) como dinámicos (corriente eléctrica) (Benseghir y Closset, 1996).

Vamos a exponer a continuación un resumen de las investigaciones realizadas que nos permita dibujar un panorama de su estado en la actualidad. Respecto a los fenómenos electrostáticos, diversos estudios (Guruswamy et al., 1997; Furió y Guisasola, 1999; Park et al., 2001; Furió et al., 2004) muestran que los alumnos presentan serias dificultades a la hora de analizar el comportamien-

to de la materia ante la interacción eléctrica. Se indica, como una de las razones, el desconocimiento acerca de la propia naturaleza eléctrica de los cuerpos. Park y otros (2001) muestran que un 50% de alumnos en primer ciclo de universidad opinan que la carga eléctrica no puede fluir a través de los aislantes. Como consecuencia, no se interpretan adecuadamente fenómenos de polarización eléctrica (Viennot y Rainson, 1992; Galili, 1995; Guisasaola et al., 2004).

Recientes investigaciones muestran que la mayoría de los estudiantes no relacionan conceptos estudiados en electrostática, en concreto la *diferencia de potencial* y el *campo eléctrico*, con los conceptos utilizados para explicar los fenómenos que suceden en los circuitos eléctricos (Rainson et al., 1994; Thacker et al., 1999; Parker, 2002). Benseghir y Closset (1996) muestran las dificultades históricas que surgieron al intentar explicar los circuitos eléctricos voltaicos, únicamente a través de los conceptos de electrostática de la época. Así, realizan una comparación con las dificultades de los estudiantes para interpretar circuitos eléctricos sencillos y utilizar conceptos clave, que son empleados tanto en electrostática como en electrocinética.

Por tanto, las dificultades de aprendizaje detectadas en electrostática se extienden a los circuitos eléctricos sencillos de corriente continua. Diversas investigaciones confirman la carencia de significado que tienen, para una gran mayoría de estudiantes, términos como potencial y diferencia de potencial, apareciendo, con frecuencia, como conceptos aislados e indefinidos (Dupin y Johsua, 1987; Manrique et al., 1989; Licht, 1991; Varela, 1996). Consecuentemente, los alumnos e incluso profesores (Mulhal, 2001) eluden expresarse en función de dichos términos, aunque se les fuerce expresamente a ello (Stocklmayer y Treagust, 1996; Guisasaola et al., 2002). Usan, en su lugar, términos como carga o electricidad (Shipstone, 1989; Jiménez y Fernández, 1998; Pontes y de Pro, 2001). Al hilo de ello, las investigaciones muestran que el concepto de *diferencia de potencial* aparece como un concepto cautivo del de carga y, por tanto, sin entidad propia (sin carga, no hay diferencia de potencial), aspecto que también muestran Benseghir y Closset (1996). Diferentes investigadores indican que estas confusiones son debidas a que los fenómenos de tipo eléctrico sólo se observan a través de sus efectos, y ello induce a los estudiantes a utilizar un razonamiento incorrecto cuando consideran que el voltaje es una consecuencia de que la corriente circule y no precisamente su causa (Cohen et al., 1983; Varela et al., 1988; Manrique et al., 1989; Eylon y Daniel, 1990; Steinberg, 1992; Duit y von Rhöneck, 1998). Para otros investigadores, los alumnos establecen una cierta jerarquización de las magnitudes físicas y utilizan únicamente aquellas que perciben como más sencillas, accesibles o intuitivas (Licht, 1991; Sebastia, 1993; Metioui et al., 1996; Salinas et al., 1996).

Evidentemente los estudios citados no son una revisión exhaustiva del área de la electricidad, pero sí son significativos y convergen en la descripción de un panorama representativo de la misma (Duit, 2006).

En definitiva, las relaciones entre los conceptos estudiados en contextos electrostáticos y electrocinéticos se revelan como particularmente difíciles para los estudiantes, y como un obstáculo importante en la construcción de un modelo científico que explique los circuitos sencillos de corriente continua (Millar y King, 1993; Millar y Beh, 1993; Thacker et al., 1999; Mulhall et al., 2001).

Por otro lado, es cierto que existen escasas investigaciones que analicen los fenómenos sobre la carga eléctrica de los cuerpos aspecto que constituyó, históricamente, el paso fundamental hacia el circuito cerrado de corriente. Tampoco existen investigaciones recientes que analicen el aprendizaje de la *capacidad eléctrica de los cuerpos*, concepto que tuvo un papel central en el pensamiento de los científicos pioneros durante el desarrollo histórico de la teoría eléctrica y su transición de la electrostática a la electrocinética (Heilbron, 1979; Guisasaola et al., 2002). Los intentos de Franklin, Volta y Cavendish, para explicar satisfactoriamente el funcionamiento de la botella de Leyden, supusieron un salto cualitativo importante en la teoría eléctrica del siglo XVIII. Así, a comienzos del siglo XIX, los científicos se enfrentaban a la explicación de fenómenos relacionados con el proceso de acumulación de carga en los cuerpos y sobre la naturaleza eléctrica de la materia (dicotomía conductores-aislantes). La resolución de estos problemas implicó, entonces, la necesidad de definir nuevas magnitudes como potencial eléctrico y capacidad eléctrica (Kipnis et al., 1996). Estos conceptos fueron evolucionando hasta ser empleados tanto en contextos electrostáticos como de corriente eléctrica y adquirir el significado que tienen en el marco teórico actual (Taton, 1988).

Así pues, pretendemos analizar cómo utilizan los estudiantes los conceptos de *potencial* y *capacidad eléctrica* cuando explican fenómenos de carga eléctrica en cuerpos. Hemos elegido este tipo de fenómenos porque su interpretación mediante los conceptos teóricos señalados no puede ser simplemente deducida de la evidencia. La interpretación científica de los procesos de carga de un cuerpo implica un aprendizaje con significado de los conceptos básicos de electrostática (carga eléctrica, potencial y capacidad eléctrica) aplicados en un contexto de corriente transitoria, y son necesarios para construir un modelo científico de los circuitos de corriente continua. La detección de estas dificultades de aprendizaje puede darnos pistas que complementen e iluminen los escasos resultados que existen sobre el tema.

De acuerdo con las consideraciones anteriores, en este trabajo intentaremos responder a los siguientes interrogantes:

¿Cuáles son las interpretaciones que los estudiantes realizan de los procesos de carga eléctrica de un cuerpo?

¿Utilizan los estudiantes los conceptos de *diferencia de potencial* y de *capacidad eléctrica*, para explicar la carga eléctrica de los cuerpos?

¿Pueden las concepciones de los estudiantes sobre estos fenómenos, ser agrupadas en categorías descriptivas?

¿Qué implicaciones tiene el conocimiento de las ideas de los estudiantes a la hora de secuenciar el currículo, en esta parte de la electricidad?

MARCO TEÓRICO

Este trabajo se sitúa dentro de un marco constructivista del aprendizaje que se caracteriza, en general, por la necesidad de entender las ideas y creencias que los estudiantes poseen cuando estudian física (ciencias), para utilizar posteriormente este conocimiento en el diseño de una programación y de las estrategias a aplicar en el aula (Duit et al., 1992; Treagust et al., 1996; Gil et al., 2002).

Se han utilizado diferentes técnicas para detectar las concepciones alternativas de los estudiantes. Es conocido que distintas técnicas producen diferentes resultados (Duit et al., 1996). Debido a que las concepciones de los estudiantes han sido detectadas en diferentes contextos, la consistencia de estas concepciones es un problema que debe tenerse en cuenta al investigar en este campo (Engel-Clough y Driver, 1986; Marton, 1981). La fenomenografía ha sido propuesta y utilizada para describir y explicar las variaciones que se dan en las concepciones de los estudiantes (Marton, 1981; Marton y Booth, 1997; Buck et al., 2003). Se pretende, bajo un enfoque empírico, identificar las diferentes formas en las que la gente percibe y entiende los fenómenos. De acuerdo con Marton y Booth (1997), «los individuos son contemplados como portadores de diferentes formas de experimentar un fenómeno y como portadores de fragmentos de las formas de experimentar este fenómeno» (p. 114). Las descripciones de los estudiantes corresponden a un nivel colectivo y, en este sentido, las voces individuales son apartadas. Otros trabajos de investigación, citados en Buck y otros (2003), también coinciden con estas ideas, al mostrar que las personas pueden tener diferentes formas para ver y representar una misma realidad.

La fenomenografía trata de cómo las diferentes formas en que puede ser percibida y comprendida la realidad (conceptos y formas de razonamiento incluidas) pueden llegar a ser consideradas como categorías de descripción de la realidad. Estas categorías se pueden observar en un gran número de individuos, de forma que el conjunto de estas representaciones denota un tipo de intelecto colectivo: «La misma categoría de descripción aparece en diferentes situaciones. El conjunto de categorías es

pues estable y generalizable entre situaciones, incluso si los individuos se ‘mueven’ de una categoría a otra, en diferentes situaciones» (Marton, 1981, p. 195). En este marco teórico, las concepciones de los estudiantes pueden considerarse como «categorías explicativas» o «categorías descriptivas», que no son vistas como cualidades individuales, más bien pueden utilizarse para facilitar las características de las interpretaciones que hacen las personas de su interacción con el entorno natural.

De acuerdo con Marton y Booth (1997), la definición de categorías debe cumplir una serie de criterios, como los siguientes: *a)* Cada categoría debe estar en clara relación con el fenómeno investigado, es decir, cada una nos debe indicar algo distinto sobre la forma particular de explicar el fenómeno; *b)* Las categorías deben estar en orden jerárquico, por tanto, deben progresar de relaciones simples a complejas; *c)* El sistema de categorización debe ser sencillo, es decir, se debe explicar con un número razonablemente pequeño de categorías. Si el sistema de categorías cumple los criterios anteriores, será teórica y pedagógicamente útil.

Investigaciones fenomenográficas previas (Lybeck et al., 1988; Renström et al., 1990) utilizan la entrevista como primera fuente de datos pero, en principio, no existen impedimentos para utilizar cuestionarios como fuente de datos u otro tipo de técnicas que sirvan, de alguna manera, como expresión de cómo la gente percibe y experimenta los hechos (Marton y Booth, 1997). De hecho, en un trabajo anterior con este mismo enfoque (Guisasola et al., 2004), hemos utilizado conjuntamente cuestionario y entrevista, como fuente de datos para realizar un sistema de categorías de las percepciones de los estudiantes sobre fuentes del campo magnético.

Así pues, intentaremos categorizar las concepciones de los estudiantes sobre los fenómenos de carga eléctrica de un cuerpo y analizar sus implicaciones para la enseñanza de la electricidad.

¿Qué conocimientos y habilidades cognitivas deben tener los estudiantes para interpretar los fenómenos de carga eléctrica de cuerpos?

Aunque no podemos detenernos ni siquiera en una mínima descripción de lo que podría ser un programa que incluyera estos fenómenos eléctricos en cursos de introducción a la física, es necesario indicar cuáles pueden ser los conocimientos y habilidades cognitivas que han de poseer y articular los estudiantes, para poder interpretar científicamente los fenómenos eléctricos de carga y descarga de cuerpos que se presentan, de ordinario, en el aula. Estos conocimientos se han definido en forma de indicadores, en el cuadro 1.

Cuadro 1

Indicadores de comprensión de los fenómenos de carga de un cuerpo.

Dentro de la teoría clásica del electromagnetismo, definida de acuerdo con las leyes de Maxwell, marco teórico en el que se explican los fenómenos eléctricos para un nivel de bachillerato y primeros cursos de universidad (Chabay y Sherwood, 2002), una clara comprensión de los procesos de carga y descarga de cuerpos implica, en primer lugar, *estar familiarizado con el comportamiento de la materia ante la interacción eléctrica*. Esto nos lleva a establecer, de un modo fundamentado, los primeros indicadores para una adecuada comprensión de estos fenómenos:

- 1.1. Conocer el comportamiento de los conductores y dieléctricos ante la interacción eléctrica.
- 1.2. Considerar la carga de un cuerpo como un proceso de interacción eléctrica entre el sistema formado por el cuerpo y su entorno.

Como consecuencia de lo anterior y en segundo lugar, se comprende que una interpretación adecuada de los procesos de carga de un cuerpo exige *un significado claro del concepto de potencial eléctrico de un cuerpo cargado o bien de la energía potencial eléctrica de un sistema* en el contexto de carga del cuerpo. Esto implica:

- 2.1. Comprender que *cargar un cuerpo supone realizar un trabajo en el sistema cuerpo-entorno*, que se asocia con el aumento de energía potencial eléctrica en el cuerpo cargado.
- 2.2. Explicar, con base al concepto de diferencia de potencial entre el cuerpo y su entorno, que la carga que puede almacenar un cuerpo conductor se ubica en él en función de su geometría y tiene un límite.

En tercer lugar, la explicación del proceso de carga de un cuerpo implica entender que *la capacidad eléctrica representa la mayor o menor facilidad para cargar un cuerpo con respecto al trabajo realizado para hacerlo* (aspecto cualitativo). Esta definición se puede expresar de forma operativa bajo dos puntos de vista diferentes, pero, sin embargo, complementarios:

- 3.1. La capacidad eléctrica como *relación entre la carga que tiene el cuerpo y la energía que ha adquirido al cargarse* ($C=Q/V$). Este aumento de energía se debe al trabajo realizado por el entorno del propio cuerpo.
- 3.2. La capacidad eléctrica representa la influencia de los *factores geométricos* (tamaño y forma) del cuerpo y las propiedades del *medio* (la constante dieléctrica relativa ϵ_r donde se sitúa el cuerpo) que, en último término, son las únicas variables que permiten modificar la capacidad eléctrica de un cuerpo.

DISEÑO EXPERIMENTAL

Los datos han sido recogidos mediante un cuestionario y una entrevista especialmente diseñados para este estudio. De acuerdo con Cook y Reinardt (1982), hemos utilizado una combinación de diseños cualitativos y cuantitativos, ya que la detección de las concepciones alternativas de los estudiantes incluye múltiples aspectos que sólo pueden tenerse en cuenta desde una multiplicidad de métodos.

Las preguntas del cuestionario y de la entrevista fueron analizadas por dos profesores, con objeto de validar los objetivos perseguidos desde el marco teórico de la asignatura. Tres profesores ajenos a la investigación y expertos en enseñanza de la física rellenaron el cuestionario y realizaron sugerencias sobre los objetivos didácticos de cada cuestión. Como consecuencia de este proceso fueron introducidas algunas modificaciones. Así mismo, se realizó un estudio previo con una pequeña muestra de estudiantes para ver si existían dificultades en la comprensión de los enunciados. El resultado de la prueba confirmó que, en general, los estudiantes no tuvieron problemas en los enunciados de las preguntas formuladas.

En total, fueron 161 los estudiantes que respondieron al cuestionario; de ellos 45 son estudiantes de bachillerato (Grupo G0), 53 son estudiantes de primer curso de ingeniería (Grupo G1) y 63 son estudiantes de tercer curso de ingeniería (Grupo G3). Todos ellos cumplimentaron el cuestionario que se presenta en el anexo final en situación de examen (sin poder comunicarse

entre ellos), durante un periodo de tiempo de entre 30 y 40 minutos.

Las preguntas del cuestionario y de la entrevista se centran en los fenómenos de carga en cuerpos. En las cuestiones 1 a 4, se interroga sobre el papel que ejerce el concepto de *diferencia de potencial* (d.d.p.) en la interpretación del proceso de carga, tanto en aislantes como en conductores. Las cuestiones 5 y 6, se refieren a fenómenos de influencia eléctrica en el entorno del cuerpo que se encuentra cargando y, por tanto, atañen al aspecto sistémico del cuerpo y su entorno. Las cuestiones 7, 8 y 9 atañen al papel explicativo del concepto de *capacidad eléctrica*.

La indagación sobre cada uno de los aspectos básicamente analizados (d.d.p., influencia entre cuerpos, aspecto sistémico y capacidad eléctrica) ha sido realizada diseñando más de una cuestión para cada parte, ya que contrastar el mismo problema en diferentes situaciones nos facilita el análisis de las características del conocimiento de los estudiantes (White y Gunstone, 1992; Viennot, 1996).

Los criterios de corrección del cuestionario han tenido en cuenta el marco teórico de la asignatura y una revisión bibliográfica realizada sobre aspectos electrostáticos. Uno de los autores de este trabajo trató de agrupar las respuestas a partir de diferentes esquemas que reflejaran las categorías explicativas utilizadas por los estudiantes. Con dicho criterio, se realizó una reunión de coordinación donde los investigadores analizaron el 10% de los

cuestionarios, lo que sirvió para redefinir y llegar a consenso en las categorías. Después, cada investigador analizó independientemente los cuestionarios. Por último, se celebró una reunión para clasificar las respuestas, y en aquellas que no existió coincidencia (menos de un 8% de todas ellas) se llegó finalmente a un acuerdo.

Por otra parte, se realizaron entrevistas individuales (Anexo) a 7 estudiantes de 1º de ingeniería industrial y a 4 de 3º de ingeniería industrial, para profundizar en las respuestas obtenidas en el cuestionario. Se les presentó una situación problemática. De acuerdo con White y Gunstone (1992), hemos utilizado las fases de Predicción-Observación-Explicación en la entrevista, para averiguar si las explicaciones de los estudiantes son convergentes o no con las respuestas del cuestionario. Se utilizó un vídeo del Pavia Project Physics (Bevilaqua, 1991) sobre el electróforo, cuya secuencia se ha descrito en la estructura de la entrevista. En primer lugar, los estudiantes tienen que predecir lo que sucederá en la experiencia. En segundo lugar, los estudiantes observan lo que sucede, en cuanto a fenómenos físicos, y lo describen en voz alta. Para acabar deben desarrollar una explicación final que haga converger sus predicciones y la experiencia observada. Las entrevistas duraron alrededor de 30 minutos y fueron grabadas en cinta.

RESULTADOS

La presentación de los resultados se ha organizado en tres secciones, que discurren de acuerdo con los tres tipos de cuestiones planteadas en el apartado anterior. En cada sección se presentarán resultados cuantitativos a cada cuestión, así como resultados cualitativos de la entrevista, que ayuden a interpretar las respuestas de los estudiantes.

¿Utilizan los estudiantes el concepto de *diferencia de potencial* para explicar el proceso de carga de un cuerpo?

Las cuatro primeras cuestiones son convergentes en el objetivo de indagar sobre el uso, por parte de los estudiantes, del concepto de *diferencia de potencial* en los

procesos de carga. Así pues, se presentan los resultados de estas cuestiones en una sola tabla (Tabla 1).

Las respuestas de los estudiantes se pueden clasificar en dos/tres grupos, dependiendo del tipo de ítem planteado. En el grupo A, las *Explicaciones que sólo consideran la carga eléctrica* son mayoritarias y se incluyen en él aquellas respuestas que razonan basándose en la cantidad de carga que puede 'contener' el cuerpo. La mayoría de las respuestas explican que el proceso se terminará cuando la '*cantidad de carga*' en ambos cuerpos sea la misma. Esta forma de razonar se ilustra a través de la siguiente respuesta:

«Se cargará, hasta que la carga en ambos cuerpos sea la misma. Habrá un trasvase de electrones del más cargado negativamente al otro, hasta que se equilibren» (1º ingenieros, cuestión 1).

Este tipo de respuestas parecen expresar una identificación entre la carga y el potencial que adquiere el cuerpo (Benseghir y Closset, 1996; Psillos, 1998; Duit y Von Rhöneck, 1998; Zubimendi, 2004). Este aspecto se pone de manifiesto explícitamente en más de un tercio del conjunto de estudiantes preguntados en la cuestión 3. Los resultados a las cuestiones convergen con los obtenidos en las entrevistas realizadas sobre el electróforo. Veamos un ejemplo, ubicado en la fase 4 de la entrevista.

132 Entrevistador: ¿Crees que, al alejar el cuerpo B respecto al A, se modifica el potencial de B?

133 Jon: *Lo primero que se me ocurre es que, debido a que el cuerpo B ya no está en contacto con A, las cargas negativas con las que antes estaba en contacto dejan de tener efecto sobre el cuerpo. Entonces, eso me hace pensar que el potencial no varía. El potencial de B no varía porque tiene la misma carga.*

Cuando en el proceso de carga se varía la naturaleza del material (conductor-dieléctrico), como sucede en la cuestión 2, una mayoría de explicaciones persiste en la idea de considerar el cuerpo como un recipiente de carga, que se llena en función del paso de electricidad. En este sentido, es lógico que las respuestas se centren en el paso o no de corriente, según que la esfera sea conductora o aislante. Por ejemplo:

«La de metal, porque la esfera de plástico es aislante y al no admitir carga eléctrica, al no conducir la electricidad, no se carga» (1º bachillerato, cuestión 2).

Tabla 1
Porcentaje de respuestas obtenidas en las cuestiones C.1, C.2, C.3 y C.4 por las tres muestras de estudiantes preuniversitarios (G0) y universitarios (G1 y G3).

	A- Explicaciones basadas en la cantidad de carga				B- Explicaciones basadas en la diferencia de potencial*				C- Explicaciones basadas en la fórmula			
	C.1	C.2	C.3	C.4	C.1	C.2	C.3	C.4	C.1	C.2	C.3	C.4
G0	78	82	36,5	50	11	11	20	18	-	-	26,5	14,5
G1	73,5	82,5	37,5	41	22,5	13,5	24,5	20,5	-	-	26,5	20,5
G3	51	77,5	35,5	38	38	15,5	20	15,5	-	-	31	29

* Correcta desde el punto de vista académico

De acuerdo con este punto de vista, no es necesario tener en cuenta la polarización de la materia ni la magnitud potencial eléctrico. En las entrevistas se observa esta forma de razonar. Veamos un ejemplo, situado en la fase 2 de la entrevista:

445 Entrevistador (E): Hemos visto en el vídeo que al frotar la resina ha quedado cargada de manera negativa. Al apoyar la parte metálica que hemos designado B, sobre la resina, ¿qué le sucede al cuerpo B? ¿Hay alguna modificación de su cantidad de carga, en su distribución...?

448 Rubén (R): Yo creo que se carga con carga negativa también, como el cuerpo A, y se carga por el contacto, por conducción supongo.

450 E: ¿Hasta cuándo pasa carga de A hacia B?

451 R: Pues hasta que las cargas de ambos se hagan iguales, en ese momento estarán en equilibrio y cesa la carga del cuerpo B.

453 E: Pero la resina es un aislante, ¿esto no influye en el paso de cargas a la placa B?

454 R: No sé. Pero la placa B se carga, lo hemos visto en el vídeo. Creo que la única forma que tiene la placa B de cargarse es al pasar cargas de la resina.

El grupo de respuestas que hemos incluido en la categoría 'Explicaciones en base al potencial eléctrico', grupo B, está formado por aquellas donde se utiliza correctamente la magnitud diferencia de potencial para analizar el proceso de carga, y se hace uso del conocimiento de la estructura de la materia de los cuerpos (aislante-conductor). Sin embargo, sólo una minoría de estudiantes (Tabla 1) señalan una respuesta en conformidad con ello. La siguiente explicación ilustra este grupo:

«Adquiere más carga la esfera de metal, ya que la de plástico se carga debido a una distribución irregular que concentra la carga, con menos voltaje, y por tanto, con menos energía eléctrica» (1º ingenieros, cuestión 2).

«El conductor se cargará muy fácil al principio porque no hay carga que la repela y al ir acumulándose en su superficie de manera ordenada aumentará el potencial. Tan pronto el potencial del cuerpo alcance el de la batería, finalizará la carga» (3º ingenieros, cuestión 4).

En el grupo C, «Razonamiento en base a fórmula», se incluyen aquellas contestaciones que utilizan como única argumentación la fórmula de la capacidad eléctrica $C=Q/V$, pero sin llegar a proporcionar significado físico al potencial eléctrico. Existe un porcentaje importante de este tipo de respuestas, que aumenta con la instrucción recibida por los estudiantes, tal y como se confirma desde otras investigaciones (Steinberg, 1992; Stocklmayer y Treagust, 1994). Veamos algunos ejemplos de respuesta en las cuestiones:

«Es lineal, ya que la relación es $C=Q/V$; y cuando Q crece también lo hace la tensión entre sus bornes» (1º ingenieros, cuestión 3).

«El potencial de un conductor mientras se carga es inversamente proporcional a la capacidad del conductor: $V = Q \cdot 1/C$ » (1º ingenieros, cuestión 4).

y en las entrevistas (Fase 4):

206 Entrevistador: Qué crees que le sucede al potencial del cuerpo B según se va separando del cuerpo A, ¿aumenta, disminuye o no varía?

208 Teresa: El potencial depende del campo y de la distancia; es campo por distancia, entonces cuanto mayor distancia mayor potencial habrá, porque el campo es constante.

¿Tienen en cuenta, los estudiantes, la influencia del entorno en los procesos de carga de un cuerpo?

Las cuestiones 5 y 6 tienen como objetivo indagar acerca de la opinión de los estudiantes sobre la influencia que otros cuerpos próximos ejercen sobre el cuerpo que se carga. El análisis de las situaciones planteadas requiere el estudio de la carga y del potencial de un cuerpo desde el punto de vista de la interacción entre los cuerpos que forman el sistema, apoyándose en el concepto de *energía potencial eléctrica*.

Las explicaciones de los estudiantes a las cuestiones 5 y 6 se han agrupado como se indican en la tabla 2, que se expone a continuación:

Tabla 2
Porcentaje de respuestas obtenidas a las cuestiones 5 y 6.

	A- Explicaciones basadas en la carga (básicamente a través de contacto)		B- Explicaciones a partir del trabajo, o potencial *		D- Explica el proceso en términos de fuerza		No contesta/ Inclasificable	
	C. 5	C. 6	C. 5	C. 6	C. 5	C. 6	C. 5	C. 6
G0	51,5	62	6,5	-	29	34,5	12,5	3
G1	37,5	41,5	5	7,5	42,5	41,5	15	10
G3	47	72	8,5	-	34	22	10,5	5,5

* Correcta desde el punto de vista académico.

Para la cuestión 5, las explicaciones recogidas en el grupo A utilizan la carga eléctrica como la magnitud que condiciona el proceso. Esto conduce a afirmar que sólo se concibe la posibilidad de mejorar el proceso de carga por contacto con otros cuerpos. Además en el apartado c), en ambas cuestiones, no se considera la polarización eléctrica. Veamos algún ejemplo:

«La carga será más fácil cuando se le acerque otro conductor A', siempre claro está que el conductor que se acerca tenga una carga mayor, tendiendo a igualarse; entonces el conductor A' tenderá a cargar el conductor A» (3º ingenieros, cuestión 5).

Una minoría de respuestas que hemos situado en el grupo B explican la situación planteada en función de ΔV, al advertir que una mayor o menor dificultad en el proceso de carga depende del potencial eléctrico del cuerpo cargado que, además, se ve afectado por otros cuerpos cargados situados en su proximidad. Por ejemplo:

«Será más fácil el proceso de carga cuando en su proximidad haya un cuerpo A' con carga -Q', ya que aparece una diferencia de potencial menor que hace más fácil que se acerquen las cargas positivas'» (1º ingenieros, cuestión 5).

En el grupo de respuestas catalogadas como D, se incluyen explicaciones de los estudiantes que se caracterizan por considerar las fuerzas a distancia de tipo coulombiano como la magnitud que condiciona el proceso de carga. Estas fuerzas actúan sobre el cuerpo a cargar y pueden facilitar o no su carga. Algunos ejemplos:

«La d), ya que al tener carga de signo opuesto, se van a atraer y así será más fácil que le traspase su carga» (1º ingenieros, cuestión 5).
«La d), pues no se repelen los conductores. Con carga +Q no podríamos acercarlo» (bachillerato, cuestión 5).

La cuestión 6 nos ha permitido obtener resultados convergentes con la cuestión anterior. En el grupo A se encuentra la mayoría de las respuestas obtenidas, que expresan la variación de potencial en términos de carga y, además, sin considerar fenómenos de inducción eléctrica, en el apartado c. Un ejemplo de esta forma de razonar:

«Si B posee carga neta positiva le va a ceder parte de su carga a A, luego el potencial inicial será más pequeño que el potencial final» (bachillerato, cuestión 6a).

Las respuestas del grupo D a esta cuestión son aquellas

que identifican la variación de potencial con la fuerza coulombiana que soporta el cuerpo A.

«El potencial de A debido a la de carga + en B disminuye, porque las cargas en los dos cuerpos son + y entonces se repelen, por lo tanto habrá mayor distancia entre los dos cuerpos y como consecuencia menor potencial» (3º ingenieros, cuestión 6a).

Una minoría de respuestas se sitúan en la categoría B y utilizan en sus razonamientos la función ΔV, expresando además que el cuerpo B se polariza por la presencia del cuerpo A y, por tanto, afecta al potencial de A. Veamos un ejemplo:

«El cuerpo B separa sus cargas, yendo los electrones hacia la izquierda y eso hace que el potencial se haga menor» (1º ingenieros, cuestión 6c).

¿Utilizan los estudiantes el concepto de capacidad eléctrica para explicar los procesos de carga eléctrica de un cuerpo?

En las cuestiones 7, 8 y 9 tratamos de indagar sobre las concepciones de los estudiantes respecto al concepto de capacidad eléctrica.

Las diferentes categorías de respuestas obtenidas para las cuestiones 7, 8 y 9 se indican en la tabla 3. El grupo G0, constituido por alumnos de bachillerato, no ha realizado esta parte del cuestionario pues los contenidos sobre los que versaba no estaban incluidos en el programa de su asignatura.

El tipo de respuesta A agrupa aquellas explicaciones que consideran básicamente la magnitud carga eléctrica. En este tipo de respuestas los alumnos identifican la capacidad eléctrica con la carga, como si el cuerpo fuera un contenedor de cargas y, por tanto, el proceso de carga fuera independiente del potencial que adquiere el cuerpo. Este tipo de respuestas son muy mayoritarias en las cuestiones 7 y 8. Veamos algunos ejemplos en esta categoría:

«La capacidad es la misma, porque las dos esferas tienen igual volumen, lo que me lleva a pensar que tienen igual capacidad» (1º ingenieros, cuestión 8).

«La capacidad eléctrica es la cantidad de carga que puede admitir un cuerpo» (1º ingenieros, cuestión 7).

Tabla 3
Porcentaje de respuestas obtenidas a las cuestiones 7, 8 y 9.

	A- Explicaciones basadas en la magnitud carga eléctrica			B- Explicaciones que utilizan correctamente la capacidad eléctrica			C- Explicaciones basadas en fórmula			No contesta/ Inclasificable		
	C. 7	C.8	C.9	C.7	C.8	C.9	C.7	C.8	C.9	C.7	C.8	C.9
G1	41,5	70,5	22	3,5	15	12	51,5	-	53,5	3,5	14,5	12,5
G2	59,5	71	37	2	19	18,5	30	-	33,5	8,5	10	11

En la cuestión 9, alrededor de un 30% del total de respuestas se sitúan en esta categoría A. En ella, los estudiantes entienden la capacidad eléctrica como la facilidad para conducir carga eléctrica (no para almacenarla) y, por tanto, se establece una identidad entre carga y corriente eléctrica. De esta manera, asocian situaciones electrostáticas con situaciones electrodinámicas, confundiendo la causa de que los cuerpos tengan capacidad con el efecto que puede producir un cuerpo cargado en situación de descarga. Algunos ejemplos son los siguientes:

«No tiene capacidad, porque al no estar cargado no puede haber transporte de carga y tampoco corriente eléctrica» (1º ingenieros, cuestión 9a).

«No tiene capacidad, porque la capacidad está directamente relacionada con la presencia de cargas en movimiento» (3º ingenieros, cuestión 9a).

En el tipo de respuesta B, se han agrupado aquellas respuestas que utilizan el concepto de *capacidad* en relación con la geometría del cuerpo, el tipo de material, la cantidad de carga y la energía almacenada en el propio cuerpo. Además, se utiliza el concepto de *potencial* para aplicarlo de forma cualitativa a materiales conductores y dieléctricos, lo que permite establecer la posición relativa de las cargas en el cuerpo. Este tipo de respuesta es minoritario y preocupa que en ninguna de las cuestiones supere el 20% del total. Un ejemplo:

«La capacidad de un cuerpo conductor es la energía que puede almacenar ese cuerpo, dependiendo de su tamaño y forma y, también, del material dieléctrico que pudiera rodearlo» (1º ingenieros, cuestión 7).

Las respuestas agrupadas en el grupo C, «Explicaciones basadas en fórmula», justifican sus afirmaciones con descripciones, a través de la ecuación $C = Q/V$, sin establecer una relación significativa entre las magnitudes implicadas. Estas explicaciones realizan una interpretación restrictiva de una fórmula, en términos de causa-efecto. Una mayoría de estas respuestas a la cuestión 9 emplea un razonamiento lineal causal del tipo siguiente:

«Si $Q = 0 \Rightarrow C = Q/V = 0/V = 0$ y si $Q \neq 0 \Rightarrow C = Q/V \neq 0$ »

Se produce una identificación entre carga y capacidad (y se excluye la energía necesaria que se debe suministrar para la carga) y, bajo este punto de vista, el razonamiento también podía haber sido incluido en el grupo A. Además, en las entrevistas (aquí para la Fase 2), también aparecen este tipo de razonamientos:

075 Entrevistador: Al alejar la placa B de la placa A ¿qué le sucede al electróforo? Es decir, ¿las placas A y B varían su capacidad eléctrica o su potencial eléctrico? Cuándo es más fácil almacenar cargas, ¿cuando las placas A y B están juntas o bien cuando se encuentran alejadas?

078 Elena: Pues la diferencia de potencial no se modifica y sin embargo el electróforo es como un condensador. Por tanto, la capacidad debería de disminuir, por la fórmula. O sea, cuanto más distancia haya entre A y B, más difícil es meter un poco más de carga. Lo que es claro es que la fórmula nos indica que si la diferencia de potencial es constante y la distancia aumenta, la capacidad eléctrica disminuye.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Una vez identificados los niveles explicativos de los estudiantes, vamos a interpretarlos para establecer las categorías fenomenográficas de acuerdo con los criterios de Marton y Booth (1997), ya mencionados en la sección titulada Marco Teórico.

En la tabla 4 se representan los resultados obtenidos agrupados en «categorías descriptivas». Esto no significa que cada estudiante se sitúe exclusivamente en una de las categorías establecidas, cuando trata de explicar cada una de las cuestiones planteadas, puesto que la misma persona puede utilizar una categoría en un contexto y otra diferente en otro contexto. Este enfoque se centra en las diferentes categorías descriptivas que se pueden encontrar en el colectivo de estudiantes. Este aspecto colectivo de las explicaciones de los estudiantes es lo que nos interesa, como profesores, a la hora de implementar una programación en el aula.

De acuerdo con los resultados obtenidos, una mayoría de las respuestas de los estudiantes se pueden agrupar en una categoría descriptiva que hemos denominado '*Fluido eléctrico*'. Esta categoría se caracteriza por explicar los procesos de carga de un cuerpo, a través del paso de carga que va desde el generador hasta el cuerpo a cargar. Esta transferencia de carga se debe a la diferencia en la cantidad de carga entre ambos cuerpos (alrededor del 70% de respuestas en las cuestiones 1 y 2). Coherentemente con esta visión centrada en la magnitud carga eléctrica, las explicaciones sólo consideran el cuerpo a cargar despreciando el papel del entorno, es decir, del otro cuerpo cargado o de la pila (alrededor de un 50% de las respuestas a las cuestiones 5 y 6). Cuando en el proceso de carga se varía la naturaleza del material del cuerpo a cargar (aislante-dieléctrico), la gran mayoría de las explicaciones consideran que únicamente pasará carga a los cuerpos conductores, no pudiéndose cargar los dieléctricos (alrededor del 80% en la cuestión 2 y un 70% en la cuestión 8). En esta categoría, no parece necesario hablar de diferencia de potencial entre los cuerpos para explicar el proceso de carga (más de la mitad de los estudiantes en las cuestiones 3 y 4), ni se consideran fenómenos de polarización en los dieléctricos, para explicar por qué se cargan de forma diferente que los conductores. Así mismo, la magnitud capacidad eléctrica se entiende como la cantidad de carga que puede almacenar un cuerpo y, por tanto, esta magnitud carece de significado para los cuerpos que se encuentren sin carga.

Cuando se menciona explícitamente el entorno que rodea al cuerpo a cargar, aparece un tipo de explicaciones que hemos agrupado en la categoría descriptiva '*Fuerza coulombiana*'. Se caracterizan por analizar el proceso de carga, teniendo en cuenta la magnitud carga eléctrica del cuerpo y la acción a distancia con otros cuerpos cargados de su entorno. En esta categoría, a diferencia de la anterior, no es necesario el contacto entre los cuerpos para que exista influencia entre ellos. Esta influencia depende de si la interacción es atractiva o repulsiva; en el primer caso se facilitaría el proceso de carga y en el segundo, se dificultaría. Esta visión conduce a identificar el potencial del sistema con la fuerza coulombiana que se ejercen los

cuerpos del sistema (alrededor del 30% en la cuestión C5 y en la cuestión C6). Las fuerzas atractivas aumentan el potencial del sistema y las repulsivas lo disminuyen. En este modelo explicativo, no tiene cabida el análisis de la influencia de un cuerpo neutro en el proceso de carga, ya que no habría fuerza neta resultante entre el cuerpo cargado y el neutro (más del 30% en las cuestiones 5c y 6c). Tampoco se tienen en cuenta, en la categoría, fenómenos de polarización del medio.

Las explicaciones de los estudiantes, que se basan en la descripción literal de una fórmula o en el análisis causal incorrecto de una fórmula, las hemos agrupado en la categoría «Operativos». Este tipo de explicaciones aumenta en cuestiones relacionadas con el significado de conceptos como *potencial eléctrico* (alrededor de un 25% en las cuestiones 3 y 4) y *capacidad eléctrica* (entre el 30% y el 50% en las cuestiones 7 y 9). Al no encontrar significado en los conceptos, los estudiantes se «refugian» en las definiciones operativas y razonan a partir de ellas. Estos resultados son convergentes con otros estudios en diferentes áreas de la física y niveles educativos (Viennot y Rainson, 1992; Furió et al., 2000).

Finalmente, hemos agrupado las explicaciones que analizan el proceso de carga teniendo en cuenta la fuente,

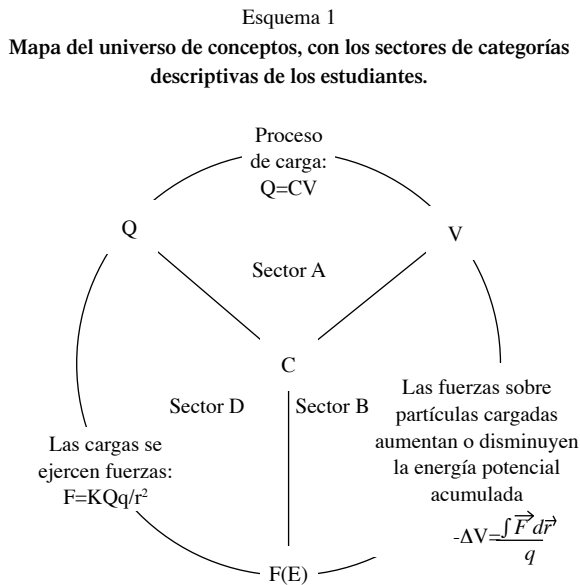
el cuerpo a cargar y otros posibles cuerpos. En función de ello, se relacionan significativamente los conceptos de *carga*, *diferencia de potencial* y *capacidad eléctrica*. Esta categoría la hemos denominado «Sistémica». Los resultados indican que sólo una minoría de explicaciones menciona la diferencia de potencial como la magnitud sustantiva que nos permite analizar el proceso de carga de un cuerpo (alrededor del 20% en las cuestiones 1 y 2). Incluso, cuando se pregunta explícitamente por la diferencia de potencial, las respuestas siguen siendo minoritarias (igualmente un 20% en las cuestiones 3 y 4). Coherentemente con estos resultados, sólo una minoría de respuestas realiza un análisis energético del sistema (menos del 10% en las cuestiones 5 y 6). Como consecuencia, muy pocas explicaciones relacionan los conceptos de *carga eléctrica* y *diferencia de potencial* a través de la capacidad eléctrica (menos del 20% en las cuestiones 7, 8 y 9).

En resumen, una mayoría de estudiantes no usan el concepto de *diferencia de potencial* para analizar los fenómenos relacionados con la carga de los cuerpos. En este contexto explicativo, el concepto de *capacidad eléctrica* pierde su significado científico y se asocia únicamente con las dimensiones (contenedor de cargas) y tipo de material (conductor contra aislante), del objeto a cargar.

Tabla 4
Categorías descriptivas y sus características.

CATEGORÍA DESCRIPTIVA	FRECUENCIA DE UTILIZACIÓN	CARACTERÍSTICAS
Fluido eléctrico	Mayoría de estudiantes (más del 60%)	<ul style="list-style-type: none"> – Los procesos de carga se explican como trasvase de cargas, de cuerpos con mayor «cantidad de carga» a cuerpos con menor cantidad de carga. – No se considera la influencia de cuerpos en el entorno del cuerpo a cargar. Únicamente se tienen en cuenta los fenómenos de contacto eléctrico. – No se utiliza el concepto de <i>diferencia de potencial</i>, centrándose el análisis sólo en el cuerpo a cargar. En consecuencia: <ul style="list-style-type: none"> – la capacidad eléctrica de un cuerpo se asocia exclusivamente con la «cantidad de carga que puede almacenar el cuerpo.
Fuerza coulombiana	Alrededor del 30%	<ul style="list-style-type: none"> – Se analiza el proceso de carga, en función de la ‘cantidad de carga’ del cuerpo y de las fuerzas eléctricas que se ejercen con otros cuerpos cargados de su entorno. – No se considera ni la polarización del medio ni la producida en cuerpos neutros. – En el sistema pila-cuerpo, la pila realiza «la fuerza» necesaria para llevar las cargas al cuerpo. – Se produce un cierto grado de identificación entre fuerza eléctrica y potencial eléctrico.
Operativos	Más del 30%	<ul style="list-style-type: none"> – Se interpreta el proceso de carga mediante la descripción de una fórmula, sin atribuir significado a las magnitudes que aparecen en ella. – Se realiza una inversión causa-efecto, a partir de una utilización errónea de una definición operativa.
Sistémicos	Alrededor del 20%	<ul style="list-style-type: none"> – Analizan el proceso de carga teniendo en cuenta el sistema pila-cuerpo-entorno, utilizando la magnitud diferencia de potencial como criterio del trasvase de cargas. – Utilizan de forma significativa las relaciones entre carga eléctrica, diferencia de potencial y capacidad eléctrica para explicar la carga de los cuerpos.

Las categorías de descripción explicitadas nos permiten establecer una relación entre ellas, que reproducimos en el esquema 1.



La mayoría de estudiantes explican los procesos de carga de acuerdo con las magnitudes comprendidas en el sector A, a través de la categoría de fluido eléctrico. Así mismo, existe una tendencia importante a utilizar las definiciones operativas que relacionan Q, V y C sin profundizar en el significado de las mismas. Esto conduce a respuestas erróneas, en aquellas cuestiones en que los estudiantes tienen que utilizar necesariamente el significado de los conceptos de *diferencia de potencial* y *capacidad eléctrica*.

Un porcentaje minoritario de explicaciones se encuentran en el sector D del esquema. Utilizan, como concepto fundamental, la fuerza coulombiana para explicar las interacciones a distancia del sistema pila-cuerpo-entorno y prescinden de las magnitudes diferencia de potencial y capacidad eléctrica.

Muy pocos estudiantes mencionan en sus explicaciones conceptos como *diferencia de potencial*, *campo/fuerza eléctricos* y *capacidad eléctrica*, que forman parte del esquema explicativo de la categoría «sistémicos» situada en el sector B. Solamente una minoría de estudiantes se muestra capaz de utilizar estos conceptos que constituyen parte esencial en un análisis de la interacción eléctrica, tanto en electrostática como en corriente eléctrica.

CONCLUSIONES E IMPLICACIONES PARA LA ENSEÑANZA

Los resultados de nuestro estudio muestran que conceptos importantes de la teoría eléctrica como *carga*, *diferencia de potencial* y *capacidad eléctrica* no son utilizados científicamente por la mayoría de estudiantes (que han cursado dos o más años de física), para interpretar los procesos elementales de carga de un cuerpo. Estos resultados son convergentes con estudios previos mencionados en la introducción y nos indican un problema persistente en el aprendizaje de la electricidad (Mulhall, McKittrick y Gunstone, 2001). En consecuencia, es lógico que la mayoría de los estudiantes no llegue a construir un modelo científico que explique los procesos eléctricos en circuitos simples de corriente continua.

Por otro lado, la mayoría de los libros de texto no dedican casi espacio a la problemática que se suscita, y posterior explicación, sobre los procesos de carga en cuerpos (¿por qué se mueven las cargas entre la batería y el cuerpo?, ¿qué magnitudes permiten analizar el paso de corriente entre dos cuerpos?, ¿cómo y por qué discurre la carga en circuitos RC con varios condensadores?, etc.), y en algunos textos ni son mencionados. Estamos de acuerdo en que es necesario, en un área como la electricidad rica en fenómenos, seleccionar los contenidos a estudiar en clase y recordar que las simplificaciones son necesarias en la enseñanza de la física. Sin embargo, no analizar fenómenos cuya explicación contribuyó en su momento a dar un salto cualitativo importante en el desarrollo histórico de la teoría eléctrica (Guisasola et al., 2002), y que constituyen prerequisites necesarios para comprender el marco teórico de la electricidad, sólo se puede explicar desde una selección de contenidos marcadamente idiosincrásica (respecto al libro de texto y, también, al profesor) y, por tanto, ambigua para los estudiantes.

El posible origen de una selección de contenidos con estos rasgos, podría deberse a la escasa atención prestada a los resultados de la investigación didáctica y, consecuentemente, a una confusa comprensión del propio marco teórico de la electricidad, en el contexto de su enseñanza. Es necesario, por tanto, un acuerdo acerca de un programa de electricidad que considere los problemas que constituyeron el puente entre el contexto electrostático y la corriente eléctrica y que establezca significados para conceptos que se utilizan en ambos marcos como son el potencial y la capacidad eléctrica. Serán necesarios trabajos de investigación centrados en el diseño de programas, que busquen un consenso en los contenidos y modelos explicativos a utilizar en la enseñanza de la electricidad y, en concreto, en la conexión electrostática-electrocínética.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BENSEGHIR, A. y CLOSSET, J.L. (1996). The electrostatics-electrokinetics transition: historical and educational difficulties. *International Journal of Science Education*, 18(2), pp. 179-191.
- BEVILACQUA, F. (1991). *Pavia Project Physics (Volta)*, Università degli studi di Pavia. Italia.
- BUCK, P., GOEDHART, M.J., GRÄBER, W., KAPER, W.H., KOBALLA, T., LINDER, C., MARTON, F., SCHWEDES, H., SPILIOTOPOULOU, V., TSAGLIOTIS, N.L. y VOGELEZANG, M. (2003). On the methodology of 'phenomenography' as a science education research tool, en Psillos, D., Kariotoglou, P., Tselfes, V., Hatzikraniotis, E., Fassouloupoulos, G. y Kallery, M. (eds.). *Science Education Research in the Knowledge-based Society*, pp. 31-41. Kluwer Academic Publishers.
- COHEN, R., EYLON, B. y GANIEL, U. (1983). Potential difference and current in simple electric circuits: A study of student's concepts. *American Journal of Physics*, 51(5), pp. 407-412.
- COOK, T.D. y REICHARDT, C.H.S. (1982). *Qualitative and quantitative methods in evaluation research*. Sage Publications, Inc.
- CHABAY, R.W. y SHERWOOD, B.A. (2002). *Matter & Interactions, vol II*. Nueva York: Jhon Wiley & Sons, Inc.
- DUIT, R., GOLDBERG, F. y NIEDDERER, H. (1992). *Research in physics learning: Theoretical issues and classroom studies*. Kiel. Alemania: IPN.
- DUIT, R., TREAGUST, D. y MANSFIELD, H. (1996). Investigating students understanding as prerequisite to improving teaching and learning in science and mathematics, en Treagust, D., Duit, R. y Fraser, B.J. (eds). *Improving teaching and learning in science and mathematics*, pp. 17-31. Nueva York: Teachers Press College.
- DUIT, R. y VON RHÖNECK, C. (1998). Learning and understanding key concepts of electricity. *Research in Physics Education*, C2.
- DUIT, R. (2006). *Students' and Teachers' Conceptions and Science Education*, <<http://www.ipn.uni-kiel.de/aktuell/stcse/stcse.html>>.
- DUPIN, J.J. y JOSHUA, S. (1987). Conceptions on French pupils concerning electric circuits: structure and evolution. *Journal of Research in Science Teaching*, 24, pp. 791-806.
- ENGEL-CLOUGH, E. y DRIVER, R. (1986). A study of consistency in the use of students' conceptual framework across different task contexts, *Science Education*, 70(4), pp. 473-496.
- 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(1), pp. 79-94.
- FURIÓ, C. y GUIASOLA, J. (1999). Concepciones alternativas y dificultades de aprendizaje en electrostática. Selección de cuestiones elaboradas para su detección y tratamiento. *Enseñanza de las Ciencias*, 17(3), pp. 441-452.
- FURIÓ, C., CALATAYUD, M.L., BARCENAS, L. y PADI-LLA, O.M. (2000). Functional fixedness and functional reduction as common sense reasoning in chemical equilibrium and geometry and polarity of molecules. *Science Education*, 84(5), pp. 545-565.
- FURIÓ, C., GUIASOLA, J. y ALMUDÍ, J.M. (2004). Elementary electrostatic phenomena: Historical hindrances and students' difficulties, *Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education* 4(3), pp. 291-313.
- GALILI, I. (1995). Mechanics background influences students' conceptions in electromagnetism. *International Journal of Science Education*, 17(3), pp. 371-387.
- GIL, D., GUIASOLA, J., MORENO, A., CACHAPUZ, A., PESSOA DE CARVALHO, A.M., MARTINEZ-TORREGROSA, J., SALINAS, J., VALDÉS, P., GONZÁLEZ, E., GENÉ, A., DUMÁS-CARRÉ, A., TRICÁRICO, H. y GALLEGU, R. (2002). Defending Constructivism in Science Education, *Science & Education* 11, pp. 557-571.
- GUIASOLA, J., ALMUDÍ, J.M. y ZUBIMENDI, J.L. (2004). Difficulties in learning the introductory magnetic field theory in the first years of university, *Science Education* 88, pp. 443-464.
- GUIASOLA, J., ZUBIMENDI, J.L., ALMUDÍ, J.M. y CEBERIO, M. (2002). The evolution of the concept of capacitance throughout the development of the electric theory and the understanding of its meaning by University students. *Science & Education*, 11, pp. 247-261.
- GURUSWAMY, CH., SOMERS, M.D. y HUSSEY, R.G. (1997). Students' understanding of the transfer of charge between conductors. *Physics Education*, 32(2), pp. 91-96.
- JIMENEZ, E. y FERNÁNDEZ, E. (1998). Didactic problems in the concept of electric potential difference and an analysis of its philogenesis. *Science and Education*, 7, pp. 129-141.
- HEILBRON, J.L. (1979). *Electricity in the 17th and 18th centuries. A study of early modern Physics*. Berkeley: University of California Press.
- KIPNIS, N., KUHFIELD, E. y SCHROEDER, A. (1996). *Sparks and Shocks*, The Bakken Library and Museum. Iowa: Kendall / Hunt Publishing Company.
- LICHT, P. (1991). Teaching electrical energy, voltage and current: an alternative approach. *Physics Education*, 26, pp. 272-277.
- LYBECK, L., MARTON, F., STRÖMDAHL, H. y TULLBERG, A. (1988). The phenomenography of «the mole concept» en Chemistry, en Ramsden, P. (ed.). *Improving learning: new perspectives*. Londres: Kegan Paul.
- MANRIQUE, M.J., VARELA, P. y FAVIERES, A. (1989). Selección bibliográfica sobre esquemas alternativos de los estudiantes en electricidad. *Enseñanza de las Ciencias* 7(3), pp. 292-295.
- MARTON, F. (1981). Phenomenography-Describing conceptions of the world around us, *Instructional Science*, 10, pp. 177-200.
- MARTON, F. y BOOTH, S. (1997). *Learning and awareness*, Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates Publishers.

- METIOUI, A., BRASSARD, C., LEVASSEUR, J. y LAVOIE, M. (1996). The persistence of students unfounded beliefs about electrical circuits: the case of Ohm's law. *International Journal of Science Education*, 18(2), pp. 193-212.
- MILLAR, R. y KING, T. (1993). Students' understanding of voltage in simples series circuits. *International Journal Science Education*, 15(3), pp. 339-349.
- MILLAR, R. y BEH, K.L. (1993). Students' understanding of voltage in simple parallel electric circuits. *International Journal Science Education*, 15(4), pp. 351-361.
- 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, pp. 575-587.
- PARK, J., KIM, I., KIM, M. y LEE, M. (2001). Analysis of students' processes of confirmation and falsification of their prior ideas about electrostatics. *International Journal of Science Education*, 23(12), pp. 1219-1236.
- PARKER, G.W. (2002). Electric field outside a parallel plate capacitor. *American Journal of Physics*, 70(5), pp. 502-507.
- PONTES, A. y DE PRO, A. (2001). Concepciones y razonamientos de expertos y aprendices sobre electrocinética: consecuencias para la enseñanza y la formación de profesores. *Enseñanza de las Ciencias*, 19(1), pp. 103-121.
- PSILLOS, D. (1998). Teaching introductory electricity. *Research in Physics Education*, E3.
- RAINSON, S., TRANSTRÖMER, G. y VIENNOT, L. (1994). Students' understanding of superposition of electric fields. *American Journal of Physics*, 62(11), pp. 1026-1032.
- RENSTRÖM, L., ANDERSSON, B. y MARTON, F. (1990). Students' conception of matter, *Journal of Educational Psychology*, 82, pp. 555-569.
- SALINAS, J., CUDMANI, L.C. y PESA, M. (1996). Modos espontáneos de razonar: un análisis de su incidencia sobre el aprendizaje del conocimiento físico a nivel universitario básico. *Enseñanza de las Ciencias*, 14(2), pp. 209-220.
- SEBASTIÁ, J.M. (1993). ¿Cuál brilla más?: predicciones y reflexiones acerca del brillo de las bombillas. *Enseñanza de las Ciencias*, 11(1), pp. 45-50.
- SHIPSTONE, D. (1989). Electricidad en circuitos sencillos. *Ideas científicas en la infancia y la adolescencia*, pp. 62-88. Madrid: Morata.
- STEINBERG, M.S. (1992). What is electric potential? Connecting Alessandro Volta and contemporary students. *Proceedings of the second International Conference on the History and Philosophy and Science and Science Teaching*. Kingston, Ontario. Vol II, pp. 473-480.
- STOCKLMAYER, S. y TREGUST, D.F. (1994). A Historical analysis of electric currents in textbooks: a century of influence on physics education. *Science & Education*, 3, pp. 131-154.
- STOCKLMAYER, S. y TREGUST, D.F. (1996). Images of electricity: how do novices and experts model electric current? *International Journal of Science Education*, 18, pp. 163-178.
- TATON, R. (1988). *Historia general de las Ciencias. Siglos XVIII-XIX*. Madrid: Orbis.
- THACKER, B.A., GANIEL, U. y BOYS, D. (1999). Macroscopic phenomena and microscopic processes: Student understanding of transients in direct current electric circuits. *Physics Education Research (A supplement to the American Journal of Physics)*, 67(7), pp. S25-S31.
- TREGUST, D.F., DUIT, R. y FRASER, B. (1996). *Improving teaching and learning in science and mathematics*. Nueva York: Teachers College Press.
- VARELA, M.P. (1996). Las ideas del alumnado en física. *Alambique*, 7, pp. 45-52.
- VARELA, P., MANRIQUE, M.J. y FAVIERES, A. (1988). Circuitos eléctricos: una aplicación de un modelo de enseñanza-aprendizaje basado en las ideas previas de los alumnos. *Enseñanza de las Ciencias*, 6(3), pp. 285-290.
- VIENNOT, L. (1996). *Raisonnement en Physique élémentaire*. París: De Boeck y Larcier.
- VIENNOT, L. y RAINSON, S. (1992). Students' reasoning about the superposition of electric fields. *International Journal of Science Education*, 14(4), pp. 475-487.
- WHITE, T.R. y GUNSTONE, F.R. (1992). *Probing Understanding*. Londres: The Palmer Press.
- ZUBIMENDI, J.L. (2004). «La enseñanza de la capacidad eléctrica en primer ciclo de universidad. Análisis de dificultades y propuesta alternativa». Tesis doctoral. Universidad del País Vasco.

[Artículo recibido en mayo de 2006 y aceptado en julio de 2007]

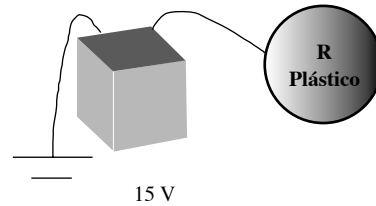
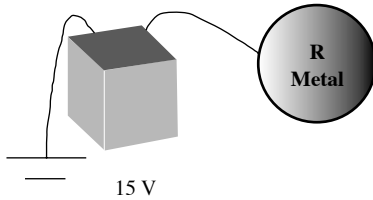
ANEXO

Cuestionario

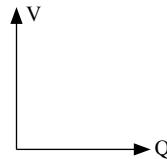
Cuestión 1. Se carga una canica metálica al ponerla en contacto con otro cuerpo cargado mediante un hilo metálico. Entonces:

- a) La canica aceptará carga de forma indefinida hasta que se agote la carga del otro cuerpo.
- b) Llegará un momento en que la canica no aceptará más carga, aunque el otro cuerpo siga cargado.
- c) Otra posibilidad.

Cuestión 2. Dos esferas de igual radio R , una de metal y otra de plástico, se conectan por separado (ver figuras) a un generador de 15 voltios. ¿Cuál de ellas adquirirá más carga? ¿Por qué?



Cuestión 3. Representa, gráficamente, cómo varía el potencial eléctrico (V) de un conductor en el proceso de carga del mismo.



Cuestión 4. Explica con palabras, no con fórmulas, cómo varía el potencial de un conductor mientras se está cargando.

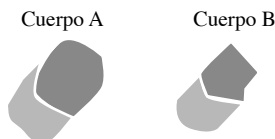
Cuestión 5. Consideremos un conductor A con carga $+Q$. ¿Cuándo resultará más fácil aumentar su carga aún más?

- a) Cuando está aislado
- b) Cuando se le acerca otro conductor A' cargado con $+Q'$
- c) Cuando se le acerca otro conductor A' neutro
- d) Cuando se le acerca otro conductor A' cargado con $-Q'$

Justifica tus respuestas en cada caso.

Cuestión 6. Un cuerpo A tiene una carga neta Q positiva y se encuentra próximo a otro cuerpo B . El potencial de A , debido a la presencia de B , ¿aumentará, disminuirá o se mantendrá igual?, cuando:

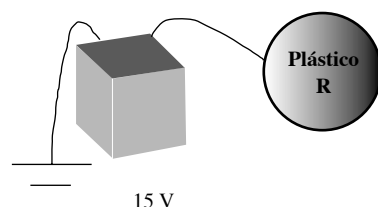
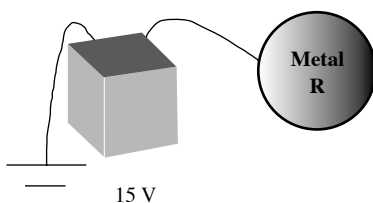
- a) B tenga una carga neta q positiva.
- b) B tenga una carga neta q negativa.
- c) B tenga una carga neta nula.



Justifica tus respuestas, en cada uno de los casos.

Cuestión 7. Explica lo que significa para ti la capacidad eléctrica de un conductor. ¿Tiene sentido hablar de la capacidad eléctrica de un aislante?

Cuestión 8. Dos esferas de igual radio R , una de metal y otra de plástico, se conectan por separado (ver figuras) a un generador de 15 voltios. ¿Cuál de ellas tendrá mayor capacidad eléctrica? ¿Por qué?



Cuestión 9. Considera un mismo conductor en dos situaciones diferentes (ver figuras):
 a) su carga neta es nula. ¿Dicho conductor tiene capacidad eléctrica?
 b) su carga neta es positiva +Q. ¿Dicho conductor tiene capacidad eléctrica?

situación a)



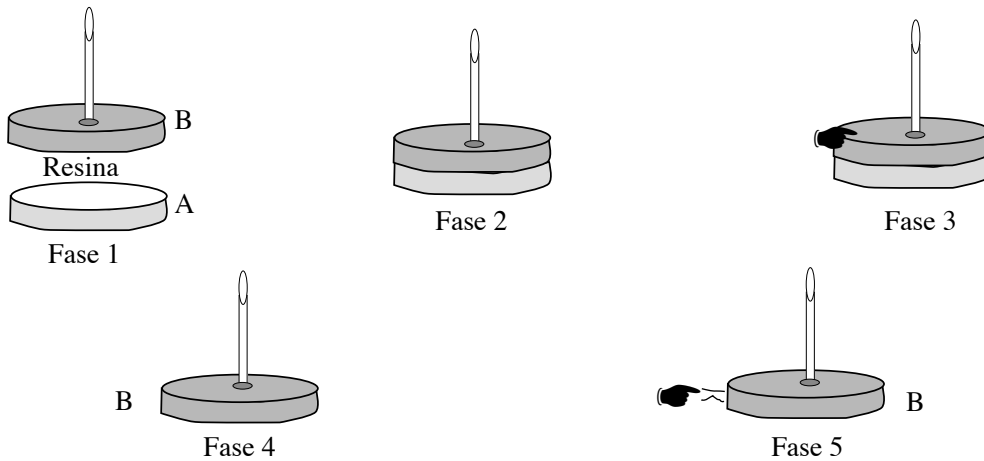
situación b)



Entrevista

a) Se describen las partes de que consta un electróforo, como el de la figura, apoyándose las explicaciones en la visualización del CD: «Le invenzioni di Volta» (Bevilacqua, 1991, archivo Volta- Avides- Elettrof.avi).
 b) A continuación, se observa el archivo anterior donde aparece la secuencia tal y como se ve en las distintas etapas de la siguiente figura, mientras se relatan las diferentes fases:

1. Frotamos la resina con gamuza, quedando cargada la resina negativamente.
2. Se acerca la parte superior (B) posándose sobre la resina en (A).
3. Tocamos (B) con un dedo. Lo retiramos.
4. Levantamos la parte superior (B).
5. Acercamos de nuevo un dedo del experimentador a (B), sin llegar a tocarlo. Se observan chispazos entre B y el dedo.
6. Descargado B se repite de nuevo la experiencia a partir de la fase 2. Se observan de nuevo más chispazos.



c) Se repite el vídeo varias veces y posteriormente, el estudiante dispone de unos 10 minutos para escribir una primera explicación de lo que sucede.

A continuación se le realizan las siguientes preguntas (y también otras que surgen condicionadas por las respuestas proporcionadas por los estudiantes):

- a) Hemos visto en el vídeo que al frotar la resina ha quedado cargada de manera negativa. Al apoyar la parte metálica que hemos designado B, sobre la resina, ¿qué le sucede al cuerpo B? ¿Hay alguna modificación de su cantidad de carga y/o su distribución? (Fase 2)
- b) ¿Para qué se toca con el dedo la parte superior B del electróforo? (Fase 3)
- c) ¿Cuándo crees que se puede almacenar más carga positiva en B con mayor facilidad, cuando B está próximo a A o cuando se encuentra más alejado de A?
- d) ¿Se realiza trabajo al separar la parte superior B respecto de A? (Fase 4)
- e) ¿Qué le sucede al potencial de B, según se separa de A? (Fase 4)
- f) ¿Por qué se observan chispas al aproximar el dedo? (Fase 5)

Persistent Learning Problems in Electricity: Student's Forms of Reasoning When Tackling the Phenomena of the Electrical Charge of the Body

GUISASOLA, JENARO, ZUBIMENDI, JOSÉ LUIS, ALMUDÍ, JOSÉ MANUEL y CEBERIO, MIKEL

Departamento de Física Aplicada I. Universidad del País Vasco (UPV/EHU)

jenaro.guisasola@ehu.es

jl.zubimendi@ehu.es

jose.almudi@ehu.es

mikel.ceberio@ehu.es

Abstract

Research into teaching physics has repeatedly shown how little learning students retain after the teaching of Electricity. The teaching/learning of the relationships between electrostatics and electrokinetics in introductory physics course at A' level (16-18 year olds) and during first year courses at University represents a didactic problem implicating a large number of concepts such as electrical charge, electrical field, power difference, current intensity and electrical capacity, which are related and are used in both static (electrostatics) and dynamic (electrical current) contexts. In this work, we start by presenting a summary of the results obtained in research carried out in this field, which helps us to create a panorama of the current situation.

The research questions are as follows: *a)* How do students interpret processes involved in electrically charging a body? *b)* Do students use the power difference and electrical capacity concepts to explain bodies' electrical charge? *c)* Can students' conceptions on these phenomena be grouped into descriptive categories? *d)* What implications arise from knowledge of students' ideas when sequencing the curriculum for this part of electricity?

The theoretical framework of the research is socio-constructivist and a phenomenon-graph focus is used to draw up the design and analyse it. The designs used were both quantitative (pencil and paper questionnaires) and qualitative (interviews with groups of students).

The results obtained indicate that the majority of students' answers can be grouped into a descriptive category that is characterised by explaining that the transfer of charge between bodies is due to the difference in the quantity of charge between them. Their explanations consistently only consider the body to be charged whilst not appreciating the role of the environment, and they do not need to talk about the difference in power between the bodies to explain the charge process. Also, the electrical capacity magnitude is understood to be the quantity of charge that a body can store and therefore, this magnitude has no meaning for bodies with no charge or for insulators.

Students' explanations are frequently based on a literal description of a formula or the incorrect causal analysis of a formula. This type of explanation increases in questions related to the meaning of concepts such as electrical power. Only a minority of answers mentions power difference as the magnitude that allows us to analyse the process of charging a body. Even when we explicitly ask about the role of power difference in the charging process, there are still very few correct answers.

It would be necessary to design teaching-learning sequences which take into account the aforementioned difficulties (psycho-cognitive dimension) as well as the electrical theory (epistemological dimension) to cover the issue of moving charges as one body passes another, or in other words, the first step from electrostatics to electrokinetics, before teaching alternate current electrical circuits.