

SECUENCIA DE ENSEÑANZA BASADA EN LA INVESTIGACIÓN, PARA MEJORAR LA COMPRENSIÓN DEL CONCEPTO DE CAPACIDAD ELÉCTRICA EN PRIMER CURSO DE UNIVERSIDAD

(Research based teaching sequence for enhancing electrical capacitance understanding at first fist year of university)

Jenaro Guisasola [jenaro.guisasola@ehu.es]

Departamento de Física Aplicada. Universidad del País Vasco

José Luis Zubimendi [jl.zubimendi@ehu.es]

Departamento de Física Aplicada. Universidad del País Vasco

Ángel Franco [angel.franco@ehu.es]

Departamento de Física Aplicada. Universidad del País Vasco

Mikel Ceberio [mikel.ceberio@ehu.es]

Departamento de Física Aplicada. Universidad del País Vasco

Resumen

En el currículo de electricidad para cursos introductorios de física en la universidad y últimos cursos de Secundaria, habitualmente no se suele contemplar una secuencia de enseñanza que analice la transición de cargas puntuales a cuerpos cargados, impidiendo la construcción de un modelo que sea capaz de explicar los aspectos relativos al proceso de carga de un cuerpo, la acumulación de carga y su relación con el potencial que adquiere. Esto constituyó un problema histórico relevante y exigió, para su resolución, la introducción de un nuevo concepto, el de capacidad eléctrica. El trabajo que aquí presentamos tiene como objetivo el diseño y evaluación de una secuencia de enseñanza que intente superar las dificultades de aprendizaje detectadas en la bibliografía. La estructura de la secuencia, se concretó en actividades siguiendo un diseño de ‘estructura problematizada’. Los problemas que definen la secuencia se manifestaron al realizar un análisis paso a paso de la transferencia de cargas de un cuerpo a otro, estableciendo relaciones entre el movimiento de las cargas (nivel microscópico) y el análisis energético del sistema (nivel macroscópico). Los resultados de la implementación de la secuencia indican que un considerable número de estudiantes han alcanzado una comprensión más satisfactoria sobre la capacidad eléctrica de los cuerpos y los procesos de carga. Esto parece confirmar que los aspectos resaltados en la secuencia son relevantes para los objetivos definidos.

Palabras clave: Condensador; Capacidad eléctrica; Enseñanza como desarrollo de investigaciones guiadas.

Abstract

In the electricity curriculum for introductory university physics courses and final secondary school courses, no provision is normally made for a teaching sequence which analyses the transition of specific charges to charged bodies, thus preventing the construction of a model able to explain the aspects connected with the process of charging a body, accumulating the charge and its relation to the potential acquired. This constituted a relevant historical problem and demanded the introduction of a new concept, that of electrical capacitance, to solve it. The aim of the work presented here is to design and assess a teaching sequence which endeavours to overcome the difficulties in learning found in the bibliography. The structure of the sequence was established in activities following a “problematized structure” design. The problems defining the sequence appeared when a step-by-step analysis of the transfer of charges from one body to another was made, by establishing connections between the movement of charges (microscopic level). The results of implementing the sequence indicate that a considerable number of students have achieved a more satisfactory understanding of the electrical capacitance of bodies and charging processes.

This seems to confirm that the aspects highlighted in the sequence are relevant to the objectives specified.

Key words: Capacitor; Electrical capacitance; Teaching as a development of guided research.

Introducción

Una de las características de la investigación en Enseñanza de las Ciencias de las dos últimas décadas, ha sido la gran cantidad de investigaciones sobre las concepciones alternativas de los estudiantes (Wandersee et al., 1994). La fundamentación teórica de estos trabajos se ha basado, en general, en las teorías constructivistas del aprendizaje. Estas, reconocen la necesidad de entender la naturaleza de las ideas, creencias y formas de razonamiento de los estudiantes en todos los niveles de enseñanza y proponen utilizar este conocimiento para mejorar las estrategias de enseñanza de las ciencias.

Una de las áreas de la física que cuenta con un mayor número de estudios sobre concepciones alternativas, para un amplio intervalo de edades, es la electricidad (Duit, 2006). Existen dos razones principales para tan elevado número de trabajos. La primera, es que la electricidad es un tema central del currículo de física en cualquier nivel de enseñanza, ya sea primaria, secundaria o universidad. La segunda razón es que los conceptos de electricidad son particularmente abstractos, y se necesitan analogías y metáforas para explicarlos desde un punto de vista microscópico (Mulhall et al., 2001). Además, los conceptos de electricidad, frecuentemente se encuentran relacionados con otros conceptos previos del área de mecánica (Galili, 1995).

Tradicionalmente el currículo de electricidad para cursos introductorios de física comienza por el estudio de cargas puntuales y cuerpos cargados en reposo (electrostática) para, a continuación, analizar el movimiento de cargas en circuitos eléctricos de corriente continua. Sin embargo, no se suele contemplar una secuencia de enseñanza que analice la transición de cargas puntuales a cuerpos cargados y que construya un modelo capaz de explicar los procesos de carga de un cuerpo. Estos procesos son fundamentales en el estudio de la electricidad, principalmente, por dos razones. En primer lugar, suponen una primera transición de la electrostática a la electrocinética, aunque el contexto no sea un circuito eléctrico convencional. En este caso es necesario analizar cómo se mueven las cargas desde la 'fuente' hasta el cuerpo cargado. El modelo explicativo exige: a) un conocimiento significativo de la naturaleza eléctrica de la materia; b) saber integrar los conceptos de carga y potencial eléctrico. Así mismo, es preciso hacer notar que la obtención de cuerpos capaces de acumular mucha carga, a un bajo coste, es una necesidad en las aplicaciones tecnológicas más frecuentes de los procesos eléctricos. Esto constituyó un problema histórico relevante cuya resolución no fue sencilla y exigió la introducción de un nuevo concepto, el de capacidad eléctrica (Guisasola et al., 2002).

Los resultados de la investigación señalan que los estudiantes presentan serias dificultades en el aprendizaje de un modelo de la naturaleza eléctrica de la materia que explique los fenómenos electrostáticos básicos como la inducción eléctrica (Guruswamy et al., 1997; Furió y Guisasola, 1999; Park et al., 2001). La falta de conocimiento sobre la naturaleza eléctrica de la materia ha sido señalada como una de las razones de los problemas de los estudiantes para explicar fenómenos que se encuentran en la frontera entre la electrostática y la electrocinética. Park et al. (2001), muestran que el 50% de los estudiantes universitarios de primer curso creen que las cargas eléctricas no pueden moverse en aislantes. Como resultado, los fenómenos de polarización en aislantes no son correctamente interpretados (Viennot, 1996; Galili, 1995; Furió et al., 2004).

Diferentes investigaciones indican que la mayoría de los estudiantes de bachillerato y universidad, muestran falta de conocimientos acerca del potencial y de la diferencia de potencial,

conceptos que frecuentemente son utilizados de forma aislada e indefinida (Thacker et al., 1999; Psillos, 1998). Los estudiantes e inclusive algunos profesores (Mulhall et al., 2001), evitan utilizar estos términos en las explicaciones de fenómenos eléctricos, incluso cuando se les pregunta específicamente por ellos. En su lugar, utilizan términos como carga o electricidad (Stockmayer & Treagust, 1996). Benseghir y Closset (1996), muestran que los estudiantes confunden el concepto de diferencia de potencial con el de carga eléctrica, perdiendo el primero su significado.

Respecto a los procesos de carga eléctrica de cuerpos y el concepto de capacidad eléctrica, en trabajos anteriores (Guisasola et al., 2007a; Guisasola et al., 2008a), hemos encontrado que la mayoría de los estudiantes de Bachillerato (16-18 años) y de primeros cursos de universidad explican el proceso basándose en el paso de carga desde donde hay una mayor cantidad hacia donde hay una menor cantidad de carga. Explican, que el movimiento de cargas es debido a la diferencia de la cantidad de cargas existente entre dos cuerpos unidos por un cable o, entre la batería y el cuerpo. De acuerdo con estas explicaciones no es necesario utilizar el concepto de diferencia de potencial para el justificar el proceso. Por tanto, el concepto de capacidad eléctrica se restringe al de la cantidad de carga que un cuerpo puede acumular, asociándolo al tamaño y despreciando su forma (geometría). Esto implica, omitir los fenómenos de polarización de la materia y, excluir, el concepto de capacidad eléctrica en los cuerpos neutros (Guisasola et al., 2007a). Además, un número significativo de estudiantes utilizan las fórmulas de potencial eléctrico y de capacidad eléctrica sin dotarlas de significado. Parece ser, que cuando los estudiantes no atribuyen significado a estos conceptos se refugian en sus definiciones operativas y razonan en base a estas fórmulas (Viennot, 1996).

Para terminar, la investigación muestra que centrar la discusión de las dificultades de los estudiantes en los conceptos no es suficiente (Bransford et al., 2000). Es más efectivo señalar explícitamente los problemas que probablemente vayan a encontrarse los estudiantes en su aprendizaje. Este enfoque es importante cuando se trata de la enseñanza de la capacidad eléctrica y del modelo explicativo de los procesos de carga eléctrica de cuerpos a nivel universitario. Los estudiantes han estudiado las propiedades de los cuerpos cargados en la enseñanza secundaria y en la cultura cotidiana y, por tanto, comienzan sus estudios universitarios de física con concepciones sobre estos temas.

El trabajo que aquí presentamos tiene como objetivo el diseño y evaluación de una secuencia de enseñanza centrada en el modelo explicativo de los procesos de carga de un cuerpo, que intente superar las dificultades de aprendizaje detectadas. El objetivo es que los estudiantes aprendan con comprensión el concepto de capacidad eléctrica de un cuerpo en situaciones de carga. En este trabajo no se abordan situaciones de circuitos RC de corriente continua, que se han dejado intencionadamente para la lección de corriente continua. Las preguntas que tratamos de responder en esta investigación son las siguientes:

- ¿Cómo diseñar una secuencia de tareas que ayude a los estudiantes en la comprensión de los procesos de carga de cuerpos y, por tanto, a utilizar la capacidad eléctrica?
- ¿Cuánto aprenden los estudiantes después de implementar la secuencia en clase? Después de la instrucción, ¿cómo explican los estudiantes la capacidad eléctrica de los cuerpos y los condensadores? En concreto, ¿explican los estudiantes el proceso de carga de cuerpos mediante el concepto de diferencia de potencial? Además, ¿son capaces de explicar científicamente el concepto de capacidad eléctrica de un cuerpo y de un condensador?

En primer lugar, presentamos el enfoque educativo desde el que hemos diseñado la secuencia de enseñanza y el contexto de aprendizaje. En segundo lugar, discutimos el universo de conceptos y procedimientos implicado en un aprendizaje comprensivo del concepto de capacidad

eléctrica, a nivel de cursos introductorios de física y especificamos la secuencia de enseñanza. En tercer lugar, describimos el estudio empírico de la enseñanza desarrollada, en el que se evalúa la efectividad de la secuencia para mejorar el aprendizaje. Se han utilizado diversos cuestionarios y entrevistas para evaluar el aprendizaje de los estudiantes (Watts, Gould & Alsop, 1997; White & Gunstone, 1992).

El contexto de aprendizaje: la enseñanza/aprendizaje de la física basada en el desarrollo de investigaciones guiadas

La secuencia de enseñanza diseñada se encuentra enmarcada dentro de un nuevo enfoque para la Enseñanza de la Física basada en el Desarrollo de Investigaciones Guiadas (EFDIG), para un primer curso de universidad. Este proyecto ha sido desarrollado para cursos de Ingeniería en la Universidad del País Vasco (Guisasola et al., 2007b; Guisasola et al., 2008b). El objetivo de EFDIG es reformar las clases magistrales aumentando la implicación de los estudiantes con la intención de mejorar su aprendizaje y disminuir el índice de fracaso. El enfoque EFDIG recomienda una metodología de aprendizaje activo y el diseño de la secuencia de enseñanza se basa en el análisis de los contenidos, las ideas alternativas de los estudiantes y la historia del desarrollo del pensamiento en la evolución conceptual de la física.

El principal enfoque de nuestras estrategias de enseñanza se basa en un punto de vista socio-constructivista, para el diseño y evaluación de secuencias de enseñanza (Leach & Scott, 2002; Guisasola et al. 2008b). De acuerdo con Leach y Scott (2002) este enfoque asume la perspectiva de Vygotsky sobre el desarrollo del aprendizaje como una función mental derivada de la interacción social (Vygotsky, 1978). Vygotsky al analizar los contenidos del lenguaje y el pensamiento, distingue entre conceptos ‘espontáneos’ o ‘cotidianos’ y conceptos ‘científicos’. Los conceptos ‘espontáneos’ son aquellos que se aprenden sin una atención consciente, mediante las interacciones de la vida cotidiana, mientras que los conceptos ‘científicos’ son conceptos formales que se originan en las disciplinas concretas y que sólo se aprenden mediante la instrucción. El análisis de las relaciones entre contenidos del lenguaje y pensamiento han sido desarrolladas por Bakhtin (1986) y Wertsch (1991) al referirse al concepto de “lenguaje social” utilizado por diferentes sectores de población al referirse a una misma temática. Por ejemplo, no es el mismo lenguaje el utilizado por los físicos al referirse a las cerámicas que el utilizado por los propios artesanos. En esta perspectiva el diferente ‘lenguaje social’ y formas de hablar que son introducidas y ensayadas en el plano social de la clase, ofrecen los significados para que los estudiantes desarrollen una variedad de formas de hablar, pensar y entender el mundo de la ciencia. Basados en esta perspectiva Leach y Scott (2002) resaltan dos características principales de la orientación socio-constructivista en la enseñanza (p. 121): a) el lenguaje utilizado por los científicos para describir el mundo no es meramente descriptivo. Al contrario, cada comunidad específica crea con objetivos bien definidos, entidades de lenguaje específicas para describir, explicar y predecir el comportamiento del mundo; b) La comunidad científica realiza elecciones sobre el conocimiento científico apropiado para cada situación.

De acuerdo con lo anterior, la enseñanza de las ciencias puede ser conceptualizada en orden a saber como introducir al aprendiz en una forma de “lenguaje social” de la ciencia. Desde esta perspectiva, una primera característica clave de la secuencia de enseñanza y su implementación es la forma en que el conocimiento científico es presentado en el plano social de la clase. De acuerdo con este enfoque socio-constructivista, nosotros proponemos el proceso de enseñanza como la introducción por parte del profesor de una o varios “situaciones problemáticas” que se desarrollan gradualmente durante la secuencia de enseñanza. Una primera característica clave de la secuencia de enseñanza surge en relación con la presentación de estas “situaciones problemáticas”. Para su presentación hemos seguido la estructura propuesta por Osuna et al. (2007), quienes indican que “las actividades deben ofrecer a los estudiantes oportunidades genuinas para formular y poner a

prueba ideas, analizar datos y, realizar experimentos para someter a prueba las ideas” (p. 283). La secuencia, ‘estructura’ estas tareas en consonancia con dos objetivos principales. En primer lugar, hacer que en todo momento la puesta en escena de la situación problemática sea inteligible, interesante y plausible para los estudiantes. La secuencia de actividades y las propias actividades deben tener sentido para los estudiantes. En segundo lugar, guiar a los estudiantes en la utilización de los procedimientos científicos para familiarizarlos con los métodos del trabajo científico (Gil, 2003; Guisasola et al., 2009; Verdú et al., 2002). El planteamiento y resolución de situaciones problemáticas es por naturaleza interactiva entre el profesor y los estudiantes, así como entre los propios estudiantes. Este enfoque asume que el aprendizaje de las ciencias es un proceso, en el que los propios estudiantes se sitúan en un proceso de resolución de problemas de interés, que les permita construir soluciones a partir de sus propios conocimientos, sus experiencias y su sistema de valores (favoreciendo un cambio o evolución en sus significados). Como señala Lijnse (2004), “knowledge is (guidedly) constructed for a certain purpose. And it is accepted by those who construct it to the extent that it functions productively for that purpose” (p. 540).

De acuerdo con el enfoque descrito, hay una clara diferencia entre plantear a los estudiantes una situación problemática en el plano social de la clase y hacer que los estudiantes construyan un significado para esa situación. Dar sentido a una situación problemática requiere del estudiante la utilización de acciones intelectuales y procedimentales que pertenecen a lo que Vygotsky (1989) llama un proceso de “internalisation”, aquel por el que las personas construimos significados y que hace referencia al papel del profesor como ayuda en el progreso del estudiante en la denominada zona de desarrollo potencial. Vygotsky define el nivel evolutivo potencial como el resultado de procesos evolutivos cognitivos que se encuentran en procesos de maduración, y que se manifiestan a través de acciones intelectuales y operativas que un individuo puede desarrollar bajo la guía de un experto o en colaboración con otro compañero más capaz. Este nivel define una “zona de desarrollo potencial próxima” a la que el aprendiz puede acceder si es convenientemente guiado. La segunda característica clave de la secuencia que emerge aquí es la intervención del profesor para apoyar la “internalisation”, de los estudiantes sobre la situación problemática y su resolución. Esta segunda característica implicará, guiará y apoyará a los estudiantes en el análisis funcional de las variables que pueden intervenir en la solución del problema así como en el diseño de experimentos que permitan establecer evidencias empíricas de la funcionalidad de la teoría explicativa. Así mismo, las actividades orientadas al análisis de resultados darán pie a la posibilidad de conflictos entre posiciones explicativas diferentes (Gil, 2003).

La tercera característica clave de la secuencia de enseñanza es el diseño de actividades que apoyen la ‘internalisation’ a niveles de conclusión y consolidación. Diseñar actividades que permitan poner en práctica las nuevas ideas, ponerlas en común con otros grupos y explicarlas en informes individuales o de grupos. La secuencia de actividades debe guiar a los estudiantes a que decidan el marco explicativo adecuado y si es necesario, a que se generen expectativas en ellos para que el profesor pueda mediar induciendo a la introducción de nuevos conceptos, que se precisan. Al finalizar esta fase del trabajo se espera que exista un marco explicativo, consensuado en el aula, cuyos elementos esenciales coincidan con los objetivos curriculares. Por otra parte, es razonable suponer que la teoría explicativa consensuada en el aula, contenga elementos de explicaciones anteriores que han sido reformulados y adaptados a la nueva teoría (Guisasola et al., 2008b).

De acuerdo con el enfoque descrito, la implementación de la secuencia tiene varias implicaciones en el contexto de aprendizaje. No todas ellas se concretan obligatoriamente en cada parte de la secuencia como ‘una receta’ a seguir; depende del problema que se plantee (Guisasola et al., 2007b):

- *Aspectos sociales del problema.* Se trata de hacer ver el interés que tiene el problema para los estudiantes de forma que se impliquen en su resolución y a la vez, sean conscientes de los objetivos de su estudio. El profesor guía a los estudiantes para que tengan una primera

aproximación cualitativa al problema, tomen decisiones para concretar el problema y después, definan los objetivos específicos a lograr. En esta primera fase del trabajo, es necesario resaltar que el comienzo de la resolución del problema no empieza desde el marco teórico, como usualmente sucede en los libros de texto, sino que lo hace situándolo en sus implicaciones tecnológicas y sociales.

- *Análisis y trabajo en grupo*, esta es una fase compleja que implica la emisión de hipótesis con criterios fundamentados, lo que supone utilizar la imaginación y la creatividad, y diseñar posibles estrategias de resolución de problemas. Los estudiantes trabajan en pequeños grupos (3 estudiantes), evalúan sus ideas personales, añaden otras nuevas y llegan a un consenso o bien se manifiestan en desacuerdo.
- *Guía del profesor y puesta en común en la clase*, El profesor se mueve entre los grupos, discute las ideas con los estudiantes y, si es necesario, reconduce la discusión proponiendo preguntas relevantes para el proceso de resolución del problema. La guía del profesor se basa en proponer ‘preguntas relevantes’. Estas ‘preguntas relevantes’ ayudan a los estudiantes a situarse en una posición que orienta su conocimiento y sus habilidades en una dirección que les permita avanzar en la resolución del problema. El representante de cada grupo de alumnos presenta en la puesta en común el acuerdo logrado por el grupo; todos los caminos de resolución de la tarea son discutidos bajo la dirección del profesor y se formula un consenso en clase.
- *Informe individual*, en el que cada estudiante explica la resolución realizada de la tarea concretando los pasos realizados y el modelo explicativo construido. Informa sobre lo que ha aprendido, así como sus dudas y problemas pendientes. En la siguiente clase, el profesor suele comentar las dudas y cuestiones que los estudiantes plantean en sus informes.

A continuación explicamos la secuencia de aprendizaje, algunas tareas de la misma y ejemplos de su desarrollo en la clase. Debido a la necesaria brevedad de un artículo, sólo mencionaremos algunas de las actividades realizadas en la secuencia de enseñanza. Sin embargo, para aquellos profesores interesados en replicar la experiencia o conocer con mayor detalle la implementación realizada, tienen todas las actividades de la secuencia, con los comentarios para su implementación en clase, en el libro “Actividades para el Aprendizaje del Electromagnetismo en Primer Curso de Física para Ciencias e Ingeniería” (capítulo 2) que está publicado en el *Open Course Ware de la Universidad del País Vasco* en el sitio web: http://ocw.ehu.es/enseñanzas-tecnicas/actividades-para-el-aprendizaje-del-electromagnetismo-en-primer-curso-de-fisica-para-ciencias-e-ingenieria/Course_listing

Descripción de la secuencia de enseñanza y su implementación en la clase

Un aprendizaje con comprensión del concepto de capacidad eléctrica implica conocer lo que sucede en el proceso de carga del cuerpo; no es suficiente con saber calcular la magnitud a partir de su fórmula. Para relacionar un razonamiento basado en una regla o fórmula, por ejemplo $C=Q/V$ y un razonamiento basado en lo que ocurre y cambia durante el proceso de carga del cuerpo, es necesario activar un razonamiento sistémico. El razonamiento basado en una fórmula consiste en una fijación a una estrategia en forma de algoritmo tipo que hace que los estudiantes no se planteen la necesidad de justificar el tipo de modelo que adoptan para analizar una situación problemática (Zohar, 1995; Closset, 1992) Por el contrario, en un razonamiento sistémico se consideran las interacciones entre las diferentes partes (pila-entorno-cuerpo a cargar) y los cambios que suceden (el paso de corriente y la distribución de carga en la materia), de modo que pueden explicar los ‘mecanismos’ que hacen posible establecer un nuevo equilibrio. Además, se tiene que explicitar que la energía potencial eléctrica adquirida por el cuerpo al cargarse, es debida al trabajo realizado por el entorno en el proceso. Hablar de energía potencial del cuerpo cargado y del entorno, nos permite

establecer los procesos necesarios para explicar el nuevo equilibrio alcanzado (Chabay & Sherwood, 2002).

El cuadro 1 representa un esquema de la secuencia de enseñanza con una “estructura problematizada” (Verdu y Martínez-Torregrosa, 2005) que plantea problemas cuya resolución implica el aprendizaje de conocimientos y habilidades del tema de capacidad eléctrica.

Cuadro 1. Estructura ‘problematizada’ de la secuencia del tema: “¿Cómo se cargan los cuerpos?, ¿cómo podemos cargarlos de forma más eficaz?”

Secuencia de problemas	Forma en que la ciencia trabaja y que debe de aprenderse	Explicaciones científicas que deben ser comprendidas
A. ¿Qué interés puede tener acumular cargas en los cuerpos?	A. La ciencia está interesada en los fenómenos naturales y sus implicaciones sociales.	
B. ¿Cómo se almacena carga en un cuerpo? ¿Qué es preciso para que se almacene carga en un cuerpo? ¿El proceso de carga de un cuerpo tiene un límite?	B. Cuando planteamos problemas, la ciencia concreta el problema para poder encontrar una solución. Familiarizarse con observaciones empíricas o informarnos sobre los fenómenos estudiados. Trabajar la organización de la información experimental, la emisión hipótesis y la selección de estrategias correctas, para obtener un modelo explicativo inicial.	B. Estudio descriptivo de la carga en materiales conductores y dieléctricos. Adquirir una concepción preliminar de la tarea: ¿Cual es la relación entre la carga acumulada y el potencial adquirido por el cuerpo? Geometría del conductor: su incidencia en la carga. Diferenciación entre los conceptos de carga y potencial. Rigidez dieléctrica Construir un ‘modelo sistémico de diferencia de potencial’ (cuerpo, generador, medio) que explique el proceso de carga en base al trabajo realizado para cargarlo.
C. ¿De qué depende la mayor o menor facilidad de cargar un cuerpo? ¿Qué sucede cuando cargamos cuerpos de diferente tamaño y forma?	C. Completar el modelo explicativo y definir nuevos conceptos Contrastar el modelo propuesto	C. Establecer el concepto de capacidad eléctrica de un cuerpo como la mayor o menor facilidad para almacenar una determinada carga realizando un trabajo determinado. Definición operativa de capacidad eléctrica. La capacidad eléctrica es una propiedad del cuerpo que depende de su geometría (tamaño y forma) y del medio en que se encuentra.
D. ¿Cómo podemos aumentar el rendimiento del proceso de carga? ¿Qué sucede al colocar un conductor en la proximidad de otro que se quiere cargar? ¿Qué ocurre al introducir diferentes materiales entre las placas de un condensador?	D. Trabajar la organización de la información por medio de simulaciones por ordenador, emitir hipótesis y seleccionar estrategias correctas, construir un modelo explicativo. Contrastar el modelo propuesto. Diseñar y desarrollar contrastaciones experimentales o utilizar simulaciones. Evaluar la validez del modelo y sus limitaciones.	D. Ampliar el modelo explicativo para el caso de condensadores. Utilizar el modelo explicativo de capacidad eléctrica para optimizar el almacenamiento de carga en un condensador al introducir un dieléctrico entre sus placas y modificar su geometría

La secuencia comienza con la parte A (30 minutos de clase interactiva), con una cuestión acerca del interés que puede tener la acumulación de carga en los cuerpos. Se les pregunta sobre aplicaciones tecnológicas en las que una parte básica de un dispositivo lo constituya un condensador. Se trata de estimular el interés y la curiosidad de los estudiantes por la tarea a realizar. Un ejemplo de este tipo de actividades, es el siguiente:

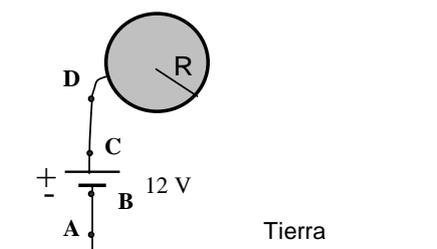
Actividad ¿Qué interés tiene la acumulación de carga en los cuerpos? Describe, hasta donde puedas, algún aparato en el que sepas que una parte básica del dispositivo eléctrico, lo constituye un condensador. Si no se te ocurre ninguno, busca en Internet información sobre:

- El funcionamiento del flash en un máquina de fotos
- Micrófono de condensador
- Teclado de ordenador
- Alarmas por caídas de tensión

En la parte B (1 hora de clase interactiva) de la secuencia se aborda el problema de explicar cómo se carga un cuerpo (mirar cuadro 1, sección B), donde proponemos a los estudiantes que este proceso puede interpretarse desde la idea, estudiada en el capítulo de electrostática, de que las cargas eléctricas se mueven a través de un conductor cuando existe una diferencia de potencial. Por ejemplo, una de las actividades de esta parte es la siguiente:

Actividad. Describe el proceso de carga de una esfera conductora de radio R , que es conectada al polo positivo de una batería de 12 V, estando el polo negativo conectado a tierra.

Calcula el trabajo necesario para cargar con carga Q , la esfera conductora ¿Qué representa dicho trabajo?



A continuación indicamos algunas de las aportaciones realizadas por los grupos de estudiantes, en la puesta en común, al discutir diferentes soluciones explicativas de la actividad:

Representante del Grupo 2: Pasarán electrones de la pila a la esfera hasta que ya no se puedan acumular más o se agote la pila. No sabemos cómo calcular el trabajo, tendríamos que saber la fuerza con que se empuja a los electrones y el espacio recorrido.

Representante del Grupo 6: No estamos de acuerdo, ya hemos visto que los electrones se mueven hacia potenciales crecientes. Al comienzo del proceso, hay una diferencia de potencial entre el polo positivo de la pila (+12 V) y la esfera (0 V), por tanto pasan electrones hasta que el potencial de la esfera sea de +12 V. cuando se igualan los potenciales ya no pasan más electrones.

Representante del Grupo 8: Estamos de acuerdo con la explicación del grupo 6 ya que permite calcular el trabajo realizado, mientras la del grupo 2, no. Si consideramos que el potencial es el trabajo realizado por unidad de carga, el trabajo realizado habrá sido de $12Q$ julios.

Al final de la puesta en común el profesor resume y reformula el consenso, de acuerdo con la explicación científica. Las cargas negativas se mueven, en el alambre, desde potenciales más bajos hacia potenciales mayores. El ‘modelo sistémico de energía (diferencia de potencial)’ elaborado para el movimiento de electrones proporciona una interpretación coherente a nivel microscópico del mecanismo de carga de cuerpos. Utilizar este modelo supone diferenciar las nociones de carga y potencial eléctrico (energía), en la explicación del proceso de carga. El aprendizaje de este “modelo sistémico de energía”, no es sencillo tal y como lo señalan los trabajos indicados en la introducción.

Otro ejemplo de actividad de esta parte de la secuencia que guía a los estudiantes a analizar diferentes factores involucrados en el proceso de carga, se muestra a continuación:

Actividad. Es conocido que el aire se ioniza cuando está sometido a un campo eléctrico igual o mayor a $3 \cdot 10^6$ V/m. ¿Cuál sería el potencial máximo al que se puede cargar una esfera hueca conductora, de radio $R = 40$ cm., para que no se descargue a través del aire? ¿Cuál sería, en ese caso, la máxima carga admitida?

Utiliza la simulación “Applet_Generador de Van de Graaff” para comprobar y justificar tus resultados.

La actividad trata de hacer pensar a los estudiantes no sólo sobre las relaciones entre el campo y el potencial eléctrico de un cuerpo cargado, sino también a realizar un análisis sistémico, teniendo en consideración la fuente, el cuerpo cargado y el medio donde se produce el proceso de carga.

En esta actividad, los estudiantes también trabajan con una simulación cuya dirección es:

(http://www.sc.edu/es/sbweb/fisica/electromagnet/campo_electrico/graaf/graaf.htm), que representa un generador de Van de Graaff

cuya esfera metálica puede variar su radio y, también el medio en el que se realiza la carga. Los estudiantes pueden visualizar la carga que admite la esfera en función del radio (y alternativamente al variar el medio) y la energía potencial que se acumula debido al trabajo mecánico de fricción realizado por la correa del Van de Graaff. La figura 1 muestra el generador y la producción de cargas mediante el trabajo mecánico de rozamiento y su acumulación en forma de energía potencial en la esfera, hasta que se produce la ruptura dieléctrica. De esta forma, las evidencias experimentales contribuyen a justificar el ‘estatus’ de teoría del modelo explicativo elaborado.

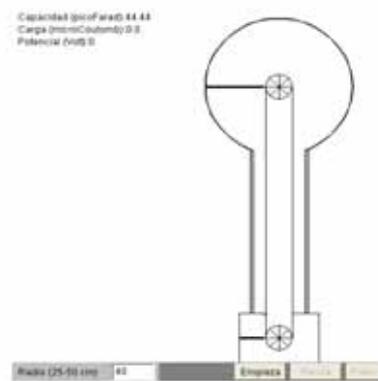
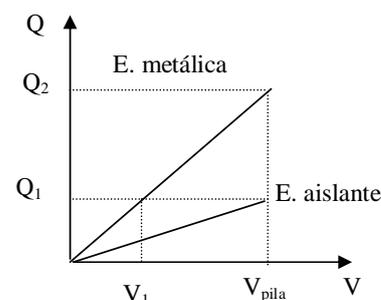


Figura 1. Generador Van de Graaff

El modelo nos permite introducir en la parte C (1,5 horas de clase interactiva) de la secuencia, el concepto de capacidad eléctrica de un cuerpo como la facilidad que tiene para acumular carga realizando un trabajo determinado. Las actividades, para hacer de fuera de clase, incluyen los diferentes factores del modelo (diferencia de potencial, carga del cuerpo, entorno, campo eléctrico del cuerpo cargado,...), que deben ser justificados por los estudiantes en el marco del proceso de carga. Como ejemplo, veamos la siguiente actividad:

Actividad. La figura representa gráficamente la carga Q frente al potencial V durante el proceso de carga de una esfera conductora y de una esfera aislante, del mismo radio, mediante una pila de potencial V_{pila} . a) ¿Qué diferencias observas entre las esferas durante la carga?, b) ¿Qué significado tiene que las pendientes de ambas rectas sean diferentes? En concreto, que sea mayor la de la esfera metálica. c) ¿Cómo representarías mediante una ecuación, este hecho?



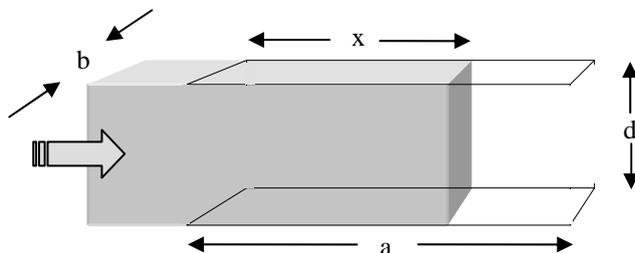
La parte D (2 horas de clase interactiva), tiene como objetivo ayudar a los estudiantes a desarrollar el modelo explicativo ya construido para que sea capaz de predecir una mejoría en el rendimiento del proceso de carga. En este aspecto la introducción de un dieléctrico, ya sea parcialmente o en su totalidad, contribuye a la mejora, idea que constituye el eje central del diseño de la secuencia. En la actividad que sigue modelamos situaciones, analizamos variables, contrastamos resultados mediante casos límite, planeamos las mejores condiciones para optimizar la capacidad,... según una metodología cualitativa que ahonda en lo procedimental.

Actividad. Consideremos un condensador de placas planas y paralelas con carga Q y ya desconectado de la batería. Se introduce, levemente entre placas una lámina dieléctrica de constante dieléctrica ϵ_r que va ocupando paulatinamente todo el espacio vacío entre las placas.

a) Explica la razón por la que el condensador “empuja” al dieléctrico hacia su interior (en actividades anteriores se ha analizado el efecto de los bordes en los condensadores).

b₁) Determina la capacidad eléctrica de este condensador para una posición genérica como la que nos indica la figura. *Sugerencia: considera si el condensador propuesto puede ser considerado como la asociación de dos condensadores diferentes.* Justifica tu razonamiento.

b₂) Comprueba la coherencia de la fórmula obtenida con algún caso límite de fácil interpretación física (por ejemplo, puedes considerar $x=0$ o $x=a$ así como considerar el vacío, $\epsilon_r = 1$). Compara la capacidad del condensador problema y la capacidad del condensador en vacío, para diseñar las mejores condiciones (con sus ventajas e inconvenientes) bajo las que aumente su capacidad.



c) ¿Qué sucede con la energía eléctrica almacenada en el condensador durante la introducción de la lámina? ¿Cómo se podría calcular dicha variación?

d) Haz una estimación cualitativa acerca del tipo de dieléctrico a introducir para que la variación de energía eléctrica sea mínima.

Utiliza la simulación “Applet_Fuerzas sobre un dieléctrico (II)” en:

http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/elecmagnet/campo_electrico/dielectrico2/dielectrico2.htm#Un%20oscilador%20el%C3%A9ctrico para comprobar y justificar los resultados a los apartados c) y d).

El applet muestra la variación en la energía potencial del condensador en función de la posición que va ocupando el dieléctrico. La función *paso a paso* (en la simulación), permite recoger datos numéricos y confrontarlos con los obtenidos, según el modelo teórico, por los alumnos. Asimismo la simulación hace posible cambiar de dieléctrico y poder comparar la variación de energía potencial del condensador en función del valor de la constante dieléctrica relativa de algunos dieléctricos como parafina, plástico, baquelita,...La simulación posterior (en la misma página web), nos permite abordar la misma actividad pero con la batería conectada al condensador (proceso ahora a potencial constante), estableciendo relaciones entre el trabajo que realiza la batería en el proceso, el aumento de energía potencial eléctrica en el condensador y el trabajo realizado por el campo eléctrico en el exterior para introducir el dieléctrico.

La utilización de actividades anteriores (efecto borde, experiencias de Faraday sobre la introducción de dieléctricos en condensadores, las relaciones entre trabajo y energía, análisis cualitativo de variables para optimizar los condensadores) supone atender la necesaria función autorreguladora que en alumnos de este nivel universitario es preciso considerar.

Para finalizar esta breve exposición de la secuenciación queremos resaltar que a lo largo de toda ella se realizan actividades que analizan aplicaciones tecnológicas relacionadas con Ciencia-Tecnología-Sociedad, de forma que los estudiantes puedan apreciar el interés del estudio que se está realizando.

Evaluación de la Secuencia de enseñanza

Contexto y muestra

La ubicación de la secuencia descrita, dentro del programa de física general de primer curso de Ingeniería, se encuentra al final de la lección de electrostática y antes de la lección de circuitos

de corriente continua. La secuencia de enseñanza fue implementada y evaluada durante dos años con estudiantes de ingeniería en su primer año universitario, en la Universidad del País Vasco. En el segundo año de puesta en práctica participaron dos grupos experimentales (Grupo 1, N=42; Grupo 2, N=45) de estudiantes y otro grupo (Grupo C, N=40) del mismo nivel, como grupo de control. En todos los grupos la enseñanza de la asignatura de física general duraba cuatro horas por semana, durante dos semestres. La secuencia objeto de estudio se desarrolló durante 2 semanas. Los cuatro profesores que tomaron parte en la experiencia se reunían, para comentar el desarrollo de la secuencia, durante dos horas por semana. Esto permitió elaborar un protocolo minucioso para analizar las actividades y tener en cuenta las habilidades cognitivas de los estudiantes.

Todos los estudiantes habían seguido previamente, como mínimo, dos cursos de Física que comprendían temas de electromagnetismo durante la enseñanza secundaria post-obligatoria (16-18 años) en el sistema educativo español; habiendo superado un examen para acceder a una escuela de Ingeniería. Dentro del programa de física general, antes de comenzar la parte de electromagnetismo, todos los estudiantes de la muestra realizaron como pre-test el cuestionario elaborado por Maloney et al. (2001) para evaluar el conocimiento de los estudiantes en electricidad y magnetismo. Los resultados obtenidos mostraron que el conocimiento de los estudiantes en el área, puede describirse en términos de un aprendizaje memorístico de conceptos, leyes, reglas y procedimientos, que pueden ser útiles para resolver problemas estándar y ejercicios de examen, pero no proporcionan la suficiente comprensión para que puedan ser aplicados esos conceptos en diferentes contextos y a fenómenos diversos. No se encontraron diferencias significativas en las respuestas correctas entre los tres grupos de la muestra. Concluimos que, inicialmente, los tres grupos tenían aproximadamente el mismo nivel de competencia académica.

Los grupos experimentales y de control siguieron el mismo programa de contenidos y se dedica el mismo tiempo al tema. Los grupos experimentales siguieron estrategias de enseñanza enfocadas a la discusión de las actividades, de la forma en que se ha descrito en la sección anterior. Sin embargo, estudiantes de control no tenían la oportunidad de participar activamente en el desarrollo de la clase, limitándose a tomar apuntes de las explicaciones del profesor. En las clases de control, el profesor comienza explicando las definiciones y leyes, seguidos de ejemplos estándar de los libros de texto para el cálculo de la capacidad eléctrica, el condensador y la energía en un condensador. Los profesores de los grupos de control tienen más de diez años de experiencia docente en el Departamento de Física Aplicada de nuestra universidad y son investigadores reconocidos en el área de Materiales. Los estudiantes del grupo de control tienen el mismo horario de clases que los experimentales y disponen de dos horas a la semana para consultar con el profesor en tutoría. Estas tutorías se limitan a las explicaciones del profesor sobre las dificultades de los estudiantes al resolver los problemas del libro de texto que se han mandado como trabajo para fuera del aula.

Evaluación de la secuencia

Diseñamos ‘actividades de recapitulación’ a lo largo de la secuenciación, con el propósito de obtener información durante las clases. El objetivo era describir, con tanta precisión como fuera posible, los caminos cognitivos de los estudiantes a través de las situaciones propuestas de aprendizaje, para comprender cómo y en que medida la secuencia propuesta de enseñanza-aprendizaje, afectaba al razonamiento de los estudiantes. Se obtuvo información, en grabación magnetofónica, de las discusiones de algunos grupos de estudiantes para cada ‘actividad de recapitulación’. Las sesiones de observación tenían lugar dentro del desarrollo de la clase experimental y durante el trabajo en grupo. Los estudiantes tenían que discutir la resolución de la actividad y debían justificar su respuesta. A los grupos, formados por 3 o 4 estudiantes, se les grabó la discusión sobre la actividad con su consentimiento. Cuando la discusión finalizó, los estudiantes debían también presentar un informe escrito explicando sus conclusiones y justificándolas. El

análisis concierne a los registros en cinta de 11 grupos seleccionados al azar, en cada actividad. Para completarlos, también se analizaron los informes (registros escritos) de los demás grupos.

Después de finalizar la secuencia evaluamos, a través de tres cuestionarios escritos, varios aspectos de la construcción del modelo. Fueron pasados tres cuestionarios a los grupos experimentales y al de control, cuatro semanas después de dar la secuencia de actividades. Analizando las respuestas de los estudiantes sobre los cuestionarios, tratamos de mostrar la eficacia pedagógica de la secuenciación respecto a los objetivos de aprendizaje propuestos (ver cuadro 1). Se compararon las medias de respuestas consideradas correctas en ambos grupos.

Algunos resultados y discusión

Los estudiantes trabajaron en la construcción de un modelo explicativo sobre cómo se cargan los cuerpos. Al principio, se construyó un ‘modelo sistémico de energía’ bastante simple pero que permitía predecir los resultados en los procesos de carga y mejorar su eficacia. Los estudiantes tuvieron la oportunidad de discutir en sucesivas partes de la secuencia las diferentes etapas del modelo para ir completándolo: diferencia entre carga y potencial eléctrico, capacidad de un cuerpo, influencia de otros cuerpos próximos, condensadores.

Diferencia entre carga y potencial

La mayoría de los estudiantes, al comienzo de la secuencia, analizan el proceso de carga en función de la cantidad de carga que tienen los cuerpos en contacto y no mencionan la diferencia de potencial. Estos razonamientos están de acuerdo con las investigaciones previas mencionadas. Las actividades de la secuencia se han diseñado para que los estudiantes construyan el significado de trabajo y energía para estos procesos.

¿En qué medida la secuencia ha ayudado a discriminar entre los conceptos de carga y potencial eléctrico? Podemos comparar las respuestas de los grupos experimentales y de control en cuestiones sobre procesos de carga en las que es necesario diferenciar entre ambos conceptos (ver C1, C2 y C3 del anexo). Los resultados muestran (ver tabla 1) los efectos positivos de la secuencia al hacer uso del concepto de diferencia de potencial para analizar el proceso de carga de un cuerpo.

Tabla 1. Resultados sobre la diferenciación entre carga y potencial

* Media de los grupos experimentales

Item	Porcentaje de respuestas correctas (%)				χ^2 (p<0,001)
	Grupo 1 N=42	Grupo 2 N=45	Grupo M* N=40	Grupo C N=40	
C1	78,6	73,3	75,8	22,5	32,3
C2	57,1	62,2	59,8	5,0	33,7
C3	76,2	77,8	77,0	12,5	48,3

Algunas justificaciones dadas por los estudiantes nos indican que la secuencia seguida tiene una influencia decisiva. Una mayoría de estudiantes, de los grupos experimentales, hace referencia al concepto de diferencia de potencial y razonan en base a él. Se muestran algunos ejemplos:

“La canica se cargará hasta que los dos cuerpos tengan el mismo potencial, momento en que dejará de pasar carga por el hilo. Además existirá un límite para la carga de la canica en función de su radio y de su constante dieléctrica” (cuestión C1)

“Si variaría, porque la madera es peor conductor que el metal y por tanto se cargaría en la propia zona de contacto de distinta manera, además que la carga que aceptaría sería menor porque el trabajo para llevarla será mayor y se igualará con menor carga la diferencia de potencia entre los dos cuerpos” (cuestión C2)

“La mayor carga en la esfera metálica es la consecuencia de que en ella las cargas se distribuyen uniformemente por toda la superficie, mientras que la de plástico se concentran en el punto de contacto, pero al repelerse no pueden distribuirse por la superficie lo que implica realizar un mayor trabajo al soportar las cargas una mayor repulsión” (cuestión C3)

La gran mayoría de los estudiantes de control razona en términos de cantidad de carga, proponiendo que tiende a igualarse dicha magnitud en los dos cuerpos en contacto. Para el caso de un cuerpo aislante, los estudiantes dicen que no está permitido el paso de cargas y que por tanto no se carga. No es el objetivo de este artículo analizar los razonamientos erróneos de los estudiantes, pues ya se ha realizado en otros trabajos (Guisasola et al., 2007a; Guisasola et al., 2008a).

Acerca de la capacidad eléctrica

Nosotros esperábamos que los estudiantes instruidos según la secuencia consideraran la necesidad de introducir una nueva magnitud para medir la facilidad o dificultad que presenta un cuerpo para cargarse eléctricamente. Esto suponía que los estudiantes tenían un significado adecuado del concepto de capacidad eléctrica en base a una diferenciación significativa entre los conceptos de carga, potencial y capacidad eléctrica. Algunas de las cuestiones utilizadas para la evaluación de este punto se muestran en el anexo (ver C4, C5 y C6). Los resultados obtenidos a estas cuestiones se encuentran en la tabla 2.

Tabla 2. Resultados sobre el significado de la capacidad eléctrica

* Media de los grupos experimentales

Item	Porcentaje de respuestas correctas (%)				χ^2 (p<0,001)
	Grupo 1 N=42	Grupo 2 N=45	Grupo M*	Grupo C N=40	
C4	88,1	86,7	87,4	12,5	66,5
C5	61,9	64,4	63,2	2,5	41,0
C6	54,8	62,2	58,6	7,5	29,3

Una mayoría de estudiantes de los grupos experimentales, entienden la capacidad como una medida del grado de facilidad de un cuerpo para almacenar carga. Utilizan, por tanto, un significado de tipo cualitativo del concepto de capacidad eléctrica, aunque aún hay un porcentaje apreciable de ellos que realizan sólo una descripción de la fórmula. Una explicación estándar es la siguiente:

“La capacidad eléctrica de un conductor, es la mayor o menor facilidad que tiene de almacenar carga eléctrica y energía eléctrica” (cuestión C5)

Si se razona de esta forma al considerar el concepto de capacidad no hay dificultad en admitir que cualquier cuerpo, esté cargado o no, tiene capacidad eléctrica. Efectivamente, la gran mayoría de los estudiantes experimentales (grupo M en C4), contesta correctamente a esta cuestión (87,4%), mientras que la gran mayoría de los estudiantes del grupo de control razonan incorrectamente. Estos últimos estudiantes se basan en la fórmula y razonan que si la carga es cero, el cociente entre carga y potencial es cero también y por tanto no hay capacidad eléctrica. Por el contrario, la mayoría de los estudiantes experimentales razonan de acuerdo con los siguientes ejemplos:

“En las dos situaciones tiene capacidad eléctrica, ya que la capacidad no depende de la carga sino únicamente del material y de la geometría” (cuestión C4)

“La capacidad eléctrica de un cuerpo se relaciona con su facilidad para cargarse. Por tanto, siempre tiene capacidad eléctrica, esté cargado o no” (cuestión C4).

Los resultados a las cuestiones C4, C5 y C6 son convergentes y muestran que la secuencia ha tenido influencia en que los estudiantes distingan entre la expresión operativa de la capacidad eléctrica y su significado.

Sin embargo, existe una disminución de razonamientos correctos cuando los estudiantes analizan los fenómenos de interacción eléctrica en dieléctricos (cuestiones C2 y C6 en las Tablas 1 y 2). Será por tanto necesario, prestar mayor atención a este punto en posteriores implementaciones de la secuencia.

Influencia eléctrica entre cuerpos próximos. Condensadores

Con ayuda de la secuencia esperamos que los estudiantes argumenten en el sentido de considerar que el proceso de carga se establezca dentro de un sistema, que estaría formado por los cuerpos y el medio (modelo sistémico de energía) y, consecuentemente, no razonen en base a cada cuerpo aislado. Esto supone entender la utilidad de los condensadores como dispositivos idóneos para aumentar la eficacia del proceso de carga y, por tanto, de la capacidad del sistema. Las respuestas de los estudiantes a algunas de las cuestiones sobre los aspectos anteriores (ver C7, C8, C9 en anexo) se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Resultados sobre influencia eléctrica y condensadores

* Media de los grupos experimentales

Item	Porcentaje de respuestas correctas (%)				χ^2 ($p < 0,001$)
	Grupo 1 N=42	Grupo 2 N=45	Grupo M* N=40	Grupo C N=40	
C7	88,1	86,7	87,4	22,5	52,1
C8	73,8	77,8	75,9	20	35,7
C9	73,8	73,3	73,6	15	38,0

La influencia eléctrica entre cuerpos próximos es reconocida por la gran mayoría de los estudiantes que siguen la secuencia propuesta, al establecer una graduación en la facilidad de cargar el cuerpo dependiendo de la inducción eléctrica con otros cuerpos y, en consecuencia, su influencia en la carga o en el potencial eléctrico de los cuerpos que forman el sistema. Veamos algún ejemplo de este tipo de respuestas:

“Esto se debe a que si la esfera R tiene carga positiva y R’ se carga por inducción con una carga negativa igual (el alumno dibuja correctamente un esquema), se produce una influencia entre las dos esferas lo que hace que el potencial del sistema disminuya. Si ahora conectamos la esfera exterior a un generador podremos cargarla más. Así, la capacidad aumenta ya que aumenta la carga para un determinado potencial. Cuanto menor distancia haya entre R y R’, habrá más aumento de capacidad debido a una interacción mayor (cuestión C9).

“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” (cuestión C7).

Discusiones grabadas e informe final

El análisis de la información recogida durante las discusiones nos ha permitido trazar el camino seguido por los estudiantes en su aprendizaje, a través de las llamadas ‘actividades de recapitulación’. Nos ha proporcionado información sobre la forma en que los estudiantes explican

las diferentes variables del modelo, desarrollando explicaciones y predicciones para los diferentes fenómenos y problemas suscitados. Se muestra aquí una de las ‘actividades de recapitulación’ denominada ‘condensador variable’ (ver anexo), que fue discutida por los estudiantes después de introducir, en la secuencia, el concepto de condensador. Se han encontrado tres tipos principales de razonamiento:

1. La atracción entre las cargas de diferente signo de las barras hace que la barra A pueda aceptar más carga, ya que la mayor proximidad de las cargas positivas en B atrae una mayor carga negativa en A
2. En el sistema, las fuerzas eléctricas de atracción entre ambas barras realizan el trabajo de acercar la B a la A. Se produce inducción eléctrica entre ambas barras que produce una fuerte atracción entre sus cargas. Esta fuerza de atracción hace que queden ‘huecos libres’ en la barra A para que ‘quepan’ más cargas en ella y se produzca un paso de electrones del generador a la barra A.
3. En el sistema se realiza un trabajo al acercar la placa B a la A. Este trabajo es realizado por las propias fuerzas eléctricas del sistema ya que tenemos dos placas con cargas de signos opuestos que se atraen. El sistema pierde inicialmente energía potencial eléctrica. Microscópicamente es consecuencia de la disminución del potencial de B (debido a su mayor cercanía a cargas negativas) y del aumento del potencial eléctrico de A (debido a su mayor cercanía a cargas positivas), con lo que la diferencia de potencial entre B y A disminuye.

Así, el aumento de potencial en A permite el transporte de electrones hacia la barra A, aumentando su cantidad de carga. Esto posibilita que la introducción de carga negativa disminuya ahora su potencial volviendo a equilibrarlo, ya que la presencia del generador indica un proceso a potencial constante.

La mayoría de los grupos utilizaron la forma de razonamiento 3 en las discusiones y en el informe final escrito. La forma de razonamiento 1 es empleada por algunos estudiantes de diversos grupos, pero pronto fue rechazada por sus compañeros, en los debates de grupo, como una explicación insuficiente o incompleta. Este tipo de razonamiento no aparece en ninguno de los informes finales. La forma de razonamiento 2, aparece en 6 informes finales de un total de 23 grupos de las dos clases experimentales.

Si nos centramos en el razonamiento 3, que es el mayoritario, hemos constatado en las grabaciones e informes escritos que es utilizado frecuentemente por los estudiantes para establecer la relación entre el acercamiento de las barras y la variación de potencial del sistema. La transcripción de la grabación corresponde a la fase final de la discusión cuando los estudiantes tienen que concretar su explicación para escribir el informe.

- S₂ ...al acercarse la barra cargada positivamente a la otra barra se hace un trabajo
S₃ ¿Quién hace el trabajo?
S₂ No entiendo, ¿Qué quieres decir?
S₃ Sí, el trabajo lo realizan fuerzas, ¿Son fuerzas del sistema o interviene una fuerza exterior? ...yo creo que el trabajo de acercamiento lo hace la fuerza de atracción eléctrica entre las barras cargadas con diferente signo.
S₁ Lo que quiere decir es quien hace el gasto de energía para ver si el sistema ha ganado o perdido energía.
S₄ Pero... ¿para qué vamos a analizar los cambios de energía? Lo que nos pregunta es si pasa carga a la barra de abajo o no
S₁ En clase hemos visto que el paso de cargas es debido a que hay una diferencia de potencial entre dos puntos. Yo pienso que habrá paso de cargas si hay diferencia de potencial entre la barra y la batería ...
S₄ Vale, pero ¿cómo sabemos si ha cambiado el potencial de la barra cargada negativamente?

- S₂ Pues, por el trabajo. Si el sistema realiza un trabajo pierde energía potencial.
- S₃ Sí, al acercar las barras disminuye la diferencia de potencial entre ellas. Luego la barra cargada negativamente tiene más potencial y se produce un paso de cargas de la batería a la barra.
- S₄ O sea, que antes la barra cargada negativamente y la batería estaban al mismo potencial. Por ejemplo, 12 voltios. Después, la barra ha aumentado su potencial, por ejemplo a 16 voltios,...entonces pasará carga de la batería a la barra.
- S₁ Eso es. Además, debido a que la barra adquiere más carga llegará un momento en que vuelva a tener 12 v. Y ya no pasará más carga.
- S₂ En este proceso de acercamiento lo que hemos hecho ha sido aumentar la capacidad del sistema. Cuando las barras se acercan es más fácil cargar.

Al final del proceso se pone de manifiesto que el concepto de fuerza eléctrica (razonamiento tipo 2) no es suficiente para explicar ni el paso de corriente a la barra A, ni el aumento de la capacidad del sistema. El papel que juega la fuerza eléctrica en el proceso es reconocido por todos los grupos, pero también es completada con los conceptos de trabajo y energía potencial porque no es aceptable un análisis del fenómeno sólo en términos de fuerza eléctrica.

En este sentido, el ‘modelo sistémico de energía’ propuesto en la secuencia parece ser una herramienta útil, que puede ser eficazmente utilizada por los estudiantes. Frecuentemente, el recuerdo de algunos elementos de la secuencia hace que los estudiantes superen sus dificultades en la discusión y no se bloqueen en el proceso de resolución. El modelo explicativo de la secuencia resulta efectivo sólo cuando se adopta un punto de vista energético y sistémico en el análisis de los procesos. Han quedado excluidas de la secuenciación consideraciones sobre el campo eléctrico y el potencial eléctrico en el movimiento de cargas, en circuitos dc y circuitos RC, que se analizarán en capítulos posteriores.

Conclusiones y perspectivas

El objetivo de este artículo ha sido diseñar e implementar una secuencia de enseñanza sobre el concepto de capacidad eléctrica en el contexto de procesos de carga de cuerpos y de condensadores. Una comprensión del modelo que explica estos fenómenos y la utilización comprensiva de los conceptos de capacidad y potencial eléctrico, resulta problemática para una proporción significativa de estudiantes. Los principios físicos y definiciones incluidas en ellos son considerados básicos para un modelo explicativo del movimiento de cargas en un conductor. Sin embargo, se ha observado que los estudiantes presentan dificultades para explicar estos fenómenos y sus procesos subyacentes. En particular, utilizan razonamientos causales basándose en la fórmula de la capacidad y sus aspectos más operativos y no utilizan el concepto de potencial de forma comprensiva.

Hemos diseñado una secuencia basada en un marco general de enseñanza-aprendizaje como desarrollo de investigaciones guiadas y con estrategias de enseñanza de carácter socio-constructivista. La estructura de la secuencia se concretó en actividades siguiendo un diseño de ‘estructura problematizada,’ resumida en el cuadro 1. Los problemas que definen la secuencia se han concretado al realizar un análisis paso a paso de la transferencia de cargas de un cuerpo a otro, estableciendo relaciones entre el movimiento de las cargas (nivel microscópico) y el análisis energético del sistema (nivel macroscópico).

Después de implementar la secuencia, un considerable número de estudiantes han alcanzado una comprensión más satisfactoria sobre la capacidad eléctrica de los cuerpos y los procesos de carga. Esto parece confirmar que los aspectos resaltados en la secuencia son relevantes para los objetivos definidos. En particular, resulta esencial incidir en los aspectos explicativos sobre procesos de carga de un cuerpo que incluyan relaciones comprensivas entre carga, potencial eléctrico y capacidad eléctrica, así como en la realización de un análisis sistémico basado en la

variación de energía potencial que tenga en cuenta, no sólo el cuerpo a cargar, sino también su entorno. Desde este punto de partida, el modelo explicativo proporciona a los estudiantes una visión ‘no acumulativa de carga’ permitiéndoles realizar predicciones correctas sobre la evolución de la capacidad eléctrica de un sistema. El carácter cualitativo del modelo proporciona a los estudiantes un conjunto de ideas que les permite argumentar eficazmente sobre los procesos de carga y la capacidad eléctrica de los cuerpos. Después de la implementación de la secuencia el número de respuestas correctas obtenidas en el cuestionario es significativamente alto, comparado con el grupo de control y con los resultados de investigaciones previas obtenidas con poblaciones similares.

El análisis retrospectivo de la secuencia también muestra puntos débiles en nuestra metodología de diseño. Los resultados de los cuestionarios y grabaciones muestran que la comprensión de los estudiantes en situaciones donde se trabaja con cuerpos aislantes es notablemente menor que en situaciones donde se trabaja con conductores (ver resultados C2 y C6). Tenemos que considerar que las actividades para este tipo de situaciones deben ser mejor analizadas y rediseñadas. Así mismo, a lo largo de la secuencia hemos encontrado que los estudiantes no desarrollan sus habilidades sobre manejar y construir modelos en el grado que nosotros esperábamos. La gran mayoría de los estudiantes podían describir el modelo y utilizarlo, pero tenían problemas para hacer modificaciones del modelo y desarrollarlo de acuerdo con las nuevas observaciones empíricas. Etkina et al. (2006), sugieren que las habilidades de razonamiento científico son difíciles de desarrollar sin un currículo específicamente diseñado para que los estudiantes practiquen y se involucren en la construcción y desarrollo de modelos. Mientras que para la enseñanza secundaria española sí hay programas de ciencias específicamente dirigidos a este objetivo, en la enseñanza universitaria, y en concreto en electromagnetismo, hay muy pocos materiales didácticos en esta dirección.

Es necesario comentar que los resultados de aprendizaje obtenidos son de evaluaciones realizadas a lo largo de la implementación de la secuencia y cuatro semanas después de haberla finalizado. Debido a que el tema se impartió en la segunda parte del cuatrimestre, resultó imposible volver a juntar a los estudiantes con el objetivo de pasar una prueba de ‘recuerdo’ seis meses después de finalizada la enseñanza del tema. Por tanto, los resultados obtenidos muestran evidencias del aprendizaje logrado, pero no se pueden extrapolar al aprendizaje a largo plazo.

Por otra parte, los resultados que se muestran corresponden al segundo año de puesta en práctica de la secuencia. Debido a que, después del primer año de implementación, las actividades de la secuencia y la propia secuencia sufrieron importantes modificaciones, no es posible hacer comparaciones entre los dos años de implementación, así como establecer relaciones en el aprendizaje. Los resultados del primer año sirvieron fundamentalmente para valorar la estructura de la secuencia y las actividades como soporte de ayuda al profesor en guiar el aprendizaje de los estudiantes. Por otra parte, el posible “efecto novedad” en relación al profesor queda disminuido en su segundo año de aplicación y, en relación a los estudiantes experimentales queda muy diluido, porque a lo largo del cuatrimestre suelen trabajar en el aula con la dinámica que se ha descrito.

Desde un punto de vista más general, hemos podido ver que los problemas de validación de la secuencia no pueden desligarse de los problemas de su diseño. El desarrollo de un análisis previo detallado en diferentes dimensiones, diseñar sucesivos problemas que definan las situaciones concretas de aprendizaje y anticipar posibles caminos de aprendizaje hacen posible el evaluar objetivos de enseñanza específicos. Por tanto, la descripción de posibles caminos de aprendizaje, diseño concreto de la secuencia y validación de los objetivos del proceso de enseñanza-aprendizaje, deben ser atendidos simultáneamente.

Bibliografia

Bakhtin, M.M. (1986). *Speech genres and other late essays*. Ed. C. Emerson and M. Holquist, trans. V.W. McGee. Austin: University of Texas Press.

Benseghir, A. & Closset, J.L. (1996). The electrostatics-electrokinetics transition: historical and educational difficulties. *International Journal of Science Education*, 18(2), 179-191.

Bransford, J., Brown, A. & Cocking, R. (2000). *How people learn: Brain, mind, experience and school*. Washington, D.C.: National Academy Press.

Chabay, R.W. & Sherwood, B.A. (2002). *Electric & Magnetic Interactions vol 2*. New York: John Wiley & Sons.

Closset J.L. (1992). Raisonnements en électricité et en hydrodynamique. *Aster*, 14, 143-155.

Duit R. (2006). *Bibliography-Students' and teachers' conceptions and science education in* http://www.ipn.uni-kiel.de/aktuell/stcse/download_stcse.html (consultado Junio 2008). Kiel, Germany: IPN.

Etkina, E., Van Heuvelen, A., White-Brahmia, S., Brookes, D.T., Gentile, M., Murthy, S., Rosengrant, D. & Warren, A. (2006). Scientific abilities and their assessment. *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.* 2, 20-103.

Furió C. & Guisasola, 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), 441-452.

Furió C., Guisasola J. & Almudí J.M. (2004). Elementary electrostatic phenomena: Historical hindrances and students' difficulties. *Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education*, 4(3), 291-313.

Galili I. (1995). Mechanics background influences students' conceptions in electromagnetism. *International Journal of Science Education*, 17(3), 371-387.

Gil, D. (2003). Constructivism in science education: the need for a clear line of demarcation. In D. Psillos, P. Kariotoglou, V. Tselfes, E. Hatzikraniotis, G. Fassouloupoulos & M. Kallery (eds.) *Science Education in the knowledge-based society*. Dordrecht: Kluwe Academic Publisher.

Guisasola, J., Almudi, J.M., Ceberio M Y Zubimendi, J.L. (2009). Designing and evaluating research-based instructional sequences for introducing magnetic field. *International Journal of Science Education and Mathematics*, 7(4), 699-722.

Guisasola, J., Zubimendi, J.L., Almudí, J.M. Y Ceberio, M. (2008a). Dificultades persistentes en el aprendizaje de la Electricidad: Estrategias de razonamiento de los estudiantes al explicar fenómenos de carga eléctrica. *Enseñanza de las Ciencias*, 26(2), 177-191.

Guisasola, J., Furió, C. & Ceberio, M. (2008b). Science Education based on developing guided research, in M.V. Thomase (Ed.). *Science Education in Focus*, 55-85. Nova Science Publisher.

Guisasola, J., Zubimendi, J.L., Almudí, M. & Ceberio, M. (2007a). Using the processes of electrical charge of bodies as a tool in the assessment of university students' learning in Electricity, in R.

Pintó & D. Couso (Eds.). *Contribution from Science Education Research*, pp. 225-236. Dordrecht, Netherland: Springer.

Guisasola J., Zubimendi J.L., Almudi J.M. & Ceberio M. (2007b). Propuesta de enseñanza de cursos introductorios de Física en la Universidad, basada en la investigación didáctica: siete años de experiencia y resultados. *Enseñanza de las Ciencias* 25(1), 91-106.

Guisasola, J., Zubimendi, J.L., Almudi, J.M. & 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, 247-261.

Guruswamy, Ch., Somers, M.D. & Hussey, R.G. (1997). Students' understanding of the transfer of charge between conductors. *Physics Education*, 32 (2), 91-96.

Leach, J. & Scott, P. (2002). Designing and evaluating science teaching sequences: an approach based upon the concept of learning demands and a social constructivist perspective on learning. *Studies in Science Education* 38(1), 115-142.

Lijnse, P. (2004). Didactical structures as an outcome of research on teaching-learning sequences? *International Journal of Science Education*, 26(5), 537-554.

Maloney, D.P., O'kuma, T.L., Hieggelke, C.J. & Van Heuvelen, A. (2001). Surveying students' conceptual knowledge of electricity and magnetism. *Phys. Educ. Res., American Journal of Physics Suppl.*, 69(7), 12-23.

Meheut, M. (2004). Designing and validation two teaching-learning sequences about particle models. *International Journal of Science Education*, 26(5), 605-618.

Mulhall P., Mckittrick B. & Gunstone R. (2001). A perspective on the resolution of confusions in the teaching of electricity. *Research in Science Education*, 31, 575-587.

Osuna, L., Martínez-Torregrosa, J., Carrascosa, J. & Verdú, R. (2007). Planificando la enseñanza problematizada: El ejemplo de la óptica geométrica en educación secundaria. *Enseñanza de las Ciencias*, 25(2), 277-294.

Park, J., Kim, I., Kim, M. & Lee, M. (2001). Analysis of students' processes of confirmation and falsification of their prior ideas about electrostatics. *International Journal of Science Education*, 23(12), 1219-1236.

Psillos, D. (1998). Teaching introductory electricity. In A. Tiberghien, E.L. Jossem & J. Barojas (Eds.) *Conecting Reseach in Teaching in physics education with teacher education*. International Commission on Physics Education. Published electronically at [URL http://www.physics.ohio-state.edu/jossem/ICPE/ BOOKS .html](http://www.physics.ohio-state.edu/jossem/ICPE/BOOKS.html)

Stocklmayer, S. M.; Treagust, D. F. (1996). Images of electricity: how do novices and experts model electric current? *International Journal of Science Education*, 18(2), 163-178.

Thacker, B.A. Ganiel, U. & 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), S25-S31.

- Verdú, R. & Martínez-Torregrosa, J. (2005). *La estructura problematizada de los temas y cursos de física y química como instrumento de mejora de su enseñanza*. Alicante (Spain): CEE Limencop S.L.
- Verdú, R., Martínez-Torregrosa, J. & Osuna, L. (2002). Enseñar y aprender en una estructura problematizada. *Alambique* 34, 47-55.
- Viennot, L. (1996). *Raisonnement en physique, la part du sens commun* (Bruxelles: De Boeck) (Trans. Reasoning in Physics, the Part of Common Sense, Dordrecht: Kluwer, 2001).
- Vygotsky, L.S. (1978) *Mind in society: the development of higher psychological processes*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Vygotsky, L.S. (1989). *El desarrollo de los procesos psicológicos superiores*. Barcelona: Crítica.
- Wandersee J.H., Mintzes J.J. & Novak J.D. (1994). Research on alternative conceptions in Science. *Handbook of research on Science teaching and learning*. New York: McMillan Publishing Company.
- Watts, M, Gould, G. & Alsop, S. (1997). Questions of understanding: Categorising pupils' questions in Science. *School Science Review*, 79, 57-63.
- Wertsch, J.V. (1991). *Voices of the mind: A sociocultural approach to mediated action*. London: Harvester Wheatsheaf.
- White, R. T. & Gunstone, R.F. (1992). *Probing understanding*. London: Palmer Press.
- Zohar, A. (1995) Reasoning about interaction between variables. *Journal of Research in Science Teaching* 32(10) 1039-1063.

Recebido em: 04.12.08

Aceito em 23.03.11

Anexo 1

Cuestionario 1: Carga y potencial

C1. Una canica metálica se conecta con otro cuerpo cargado mediante un hilo metálico. Entonces:

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

Explicación:

C2. Si la canica de la cuestión anterior, fuera de madera, ¿variaría en algo el proceso de carga?

Explicación:

C3. 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?



Cuestionario 2: Capacidad eléctrica de un cuerpo

C4. Considera un mismo conductor en dos situaciones diferentes:

- su carga neta es nula. ¿Dicho conductor tiene capacidad eléctrica?
- su carga neta es positiva $+Q$. ¿Dicho conductor tiene capacidad eléctrica?

C5. Explica lo que significa para ti la capacidad eléctrica de un conductor. ¿Tiene sentido hablar de la capacidad de un aislante?

Razona.

C6. Considera un mismo conductor en dos situaciones diferentes:

- se encuentra rodeado de aire
- se encuentra sumergido en aceite

Razona acerca de si la capacidad eléctrica del conductor en aire es mayor menor o igual que la capacidad del conductor en aceite

Cuestionario 3: Condensador

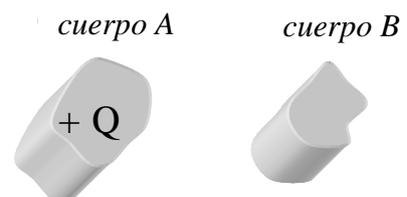
C7. Consideremos un conductor A con carga $+Q$. ¿Cuándo resultará más fácil seguir cargándolo y aumentar su carga?

- Cuando está aislado
- Cuando se le acerca otro conductor A' cargado con $+Q'$
- Cuando se le acerca otro conductor A' neutro
- Cuando se le acerca otro conductor A' cargado con $-Q'$

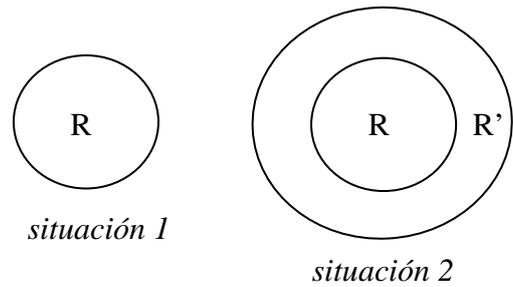
C8. Un cuerpo A tiene una carga neta Q positiva y se le acerca otro cuerpo B. La capacidad de A, debido a la presencia de B, ¿aumentará, disminuirá o se mantendrá igual?, cuando:

- B tenga una carga neta q positiva.
- B tenga una carga neta q negativa.
- B tenga una carga neta nula.

Justifica tus respuestas, en cada uno de los casos

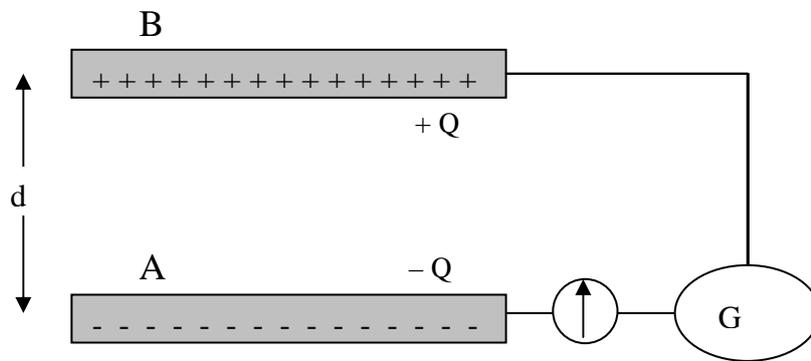


C9. Es conocido que una corteza esférica de radio R (ver situación 1), tiene una capacidad eléctrica menor, que el sistema formado por esa misma corteza rodeada de otra esfera hueca de radio $R' > R$ (ver situación 2).
 ¿A qué crees que pueda deberse?

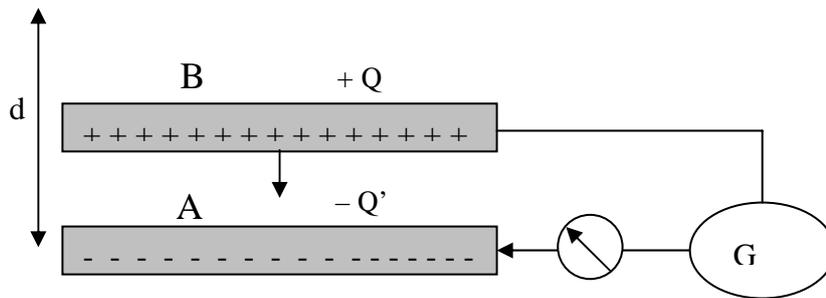


“Condensador variable” (Ejemplo de una actividad para la discusión en grupo)

Sean dos placas A y B situadas a una distancia d y cargadas con carga igual y de signo contrario. Las placas están conectadas a un generador G que proporciona un voltaje V . En las condiciones indicadas, no hay paso de corriente (ver figura).



Al acercar la placa B positiva a la negativa, se observa que hay paso de carga del generador a la placa A. De forma que la placa A negativa queda cargada con una carga $-Q'$, mayor que la inicial $-Q$.



- ¿Por qué se carga más la placa negativa?
- ¿Cuándo tiene el sistema mayor capacidad eléctrica?
- Establecer una relación cuantitativa entre el trabajo realizado, el campo eléctrico entre las barras (considerarlo uniforme) y la diferencia de potencial.