

ENSEÑAR LA ELECTRICIDAD ELEMENTAL

Dimitris Psillos, School of Education, Aristotle University of Thessaloniki, Grecia

La enseñanza y el aprendizaje de la electricidad, tema frecuente incluido en los programas de primaria y secundaria, ha sido objeto de numerosas investigaciones, libros y conferencias (Duit et al., 1985 ; Caillot, 1992). La imagen mundial emergente no es prometedora, dado que un saber adecuado concerniente, por ejemplo, a los circuitos eléctricos ha sido raramente adquirido por los alumnos al final de la enseñanza secundaria. Los resultados de investigaciones proveen una vía clara de la variedad de ideas alternativas de los alumnos específicos del tema (una revisión es presentada en el capítulo C2). Ellos muestran también que los alumnos encuentran profundas dificultades a nivel de los conceptos y del razonamiento al momento de la comprensión de la electricidad elemental. Esas dificultades tienden a ser más ignoradas que tomadas en cuenta en la enseñanza habitual o innovadora.

Brevemente, los alumnos tienen dificultades de aprendizaje relativas:

i) al desarrollo de razonamiento sistémico

El razonamiento causal lineal es utilizado por los alumnos para explicar el funcionamiento de los circuitos eléctricos. En los circuitos simples, los modelos causales son del tipo fuente-consumidor, parecen, desde un punto de vista científico, a una visión energética del funcionamiento de un circuito simple. Es frecuente, después de la enseñanza de la resistencia, que los modelos secuenciales se desarrollen, según los cuales toda perturbación de los trayectos en una dirección afecta los componentes del circuito más abajo. El razonamiento causal lineal es fundamentalmente diferente del razonamiento sistémico el cual es necesario para comprender el circuito eléctrico como un sistema cerrado en el cual todos los componentes interactúan entre ellos y toda perturbación se extiende en todas direcciones.

ii) a la diferenciación conceptual

Los alumnos confunden las características de la corriente y de la energía, la tensión considerada como una propiedad de “corriente” indicando su “fuerza” Todos esos conceptos científicos se reducen a la noción global no diferenciada de “corriente/energía.

iii) al establecimiento de relaciones fenomenológicas

Los alumnos no relacionan los diferentes dominios fenomenológicos de la electrocinética y de la electrostática (Frederiksen & White, 1992). Para los alumnos, no hay características comunes evidentes entre la atracción y la repulsión de cuerpos electrificados y la iluminación de un bombillo.

iv) a relacionar diferentes modelos

El establecimiento de relaciones entre varios modelos – los modelos cualitativos y cuantitativos, los modelos macroscópicos con mecanismos subyacentes microscópicos – es otra fuente de dificultad para los alumnos (Eylon & Gniel, 1990).

Es necesario destacar que las dificultades de los alumnos tales como aquellas descritas no están especialmente limitadas a la electricidad, sino que ellas aparecen en otros dominios que implican procesos físicos (Driver et al., 1994 ; Viennot, 1993).

Caminos para enseñar la electricidad

Pareciera que en el seno de la comunidad de los investigadores concernientes a las dificultades de aprendizaje de los alumnos no se ha generado un consenso sobre la pedagogía apropiada. Así, para encontrar una solución, todos los caminos que han emergido de investigaciones siguen una perspectiva constructivista de la enseñanza y del aprendizaje, según el cual el alumno es un agente activo de la construcción de sus propios conocimientos y consideran que los conocimientos previos, específicos del dominio, son un factor crucial para adquirir nuevos conocimientos.

En un primer camino, las propuestas cuestionan la factibilidad y el valor educativo de la comprensión de los alumnos del mecanismo del circuito eléctrico. Una comprensión adecuada de los circuitos eléctricos es difícil, el argumento es que se hace necesario que la enseñanza se concentre sobre aplicaciones importantes, por ejemplo la electricidad en la casa y/o la economía de la energía eléctrica (Berg & Grosheide, 1993). En otro camino, varias proposiciones, sin embargo, se concentran en las estrategias eficaces para hacer más enseñable las características esenciales de temas más tradicionales tales como la función de los circuitos eléctricos.

En el segundo camino, las propuestas se apoyan en las analogías y el razonamiento analógico como medio para inducir el cambio conceptual en los alumnos. Por ejemplo, las analogías hidráulicas son sugeridas de manera de facilitar la comprensión de los circuitos eléctricos como un sistema cerrado (Shwedes, 1995). Sin embargo, otros enfoques utilizan estrategias de confrontación (Scott et al., 1993) como un medio de facilitar el cambio conceptual en los alumnos (Shipstone et al., 1988 ; Licht, 1991).

La caracterización presentada anteriormente no conlleva la mutua exclusión de estrategias y medios empleados en varios caminos. Por ejemplo, la utilización de ciertos tipos de analogías parece inevitable para hacer comprensible la conservación de la corriente. Las diferencias reposan en la insistencia relativa dada a las estrategias así como a los objetivos que ellas persiguen.

Dentro de este concepto, este artículo presenta, en grandes líneas, los aspectos claves de un enfoque para enseñar la electricidad de base en la enseñanza secundaria general, utilizando estrategias de confrontación. Se trata de una de las secuencias de enseñanza desarrollada en el marco de un programa de investigación y de innovación. Estas secuencias conciernen los diferentes aspectos de la enseñanza de la electricidad, la cual fue realizada varios años después por el grupo de enseñanza científica¹ de la "School of Education" de l'université de Thessalonique (Psillos et al., 1987; Koumaras, 1989).

El Saber Científico

Todo enfoque de la enseñanza y del aprendizaje de la ciencia está influenciado por consideraciones concernientes a la estructura y el objeto del saber científico a enseñar. Aceptamos aquí que la modelización del mundo real es la principal función del saber científico (Hestenes, 1992). El núcleo del saber científico comprende los modelos de objetos reales y los procesos que son elaborados y compartidos por la comunidad científica de manera

¹ Science Education Group, School of Education

de interpretar la naturaleza. Los modelos son integrados en las teorías y pueden ser probados en un campo experimental (Bunge, 1973). El proceso de creación de las teorías y modelos no consiste en una extracción de factores comunes de una serie de observaciones, como los empiristas lo proclamarían (y como ello fue admitido en varios programas de física y en la práctica de enseñanza) Según la epistemología constructivista, hay estrecha relación entre las preguntas planteadas en la naturaleza, las observaciones y el marco teórico.

Las cuestiones que son pertinentes en un contexto teórico, no tienen sentido en otro. En electricidad, una investigación sobre la naturaleza del fluido eléctrico (Stoelmayer & Treagust, 1994) no es pertinente en el contexto del modelo de Drude. Todo enfoque teórico refiere a un campo experimental y es instrumental en la estructuración de ese campo. Por ejemplo, la unificación de los fenómenos electrostáticos y electrocinéticos ha sido solamente posible después de los trabajos de Ohm y Kirchoff y la utilización de cargas de superficies en los circuitos eléctricos. Las explicaciones están integradas en un marco teórico donde la evolución implica un cambio del tipo de explicación y de causalidad aceptada por la comunidad científica. Según Faraday y Maxwell, el campo electromagnético genera una base para explicar los fenómenos electromagnéticos unificados en la electrodinámica clásica.

En el desarrollo del saber científico, hay una interacción continua entre el campo experimental, los modelos y la teoría lo que muestra la necesidad de validar y de establecer relaciones entre esos diferentes niveles (Hestenes, 1995 ; Tiberghien et al., 1995). Tal proceso creativo requiere de un esfuerzo intelectual considerable y es habitualmente el resultado de una actividad de colaboración que produce modelos objetivos en ese sentido que han sido validados y aceptados públicamente. Así, los modelos y teorías científicas trascienden las ideas personales idiosincráticas que tienen los alumnos y que son producidas de la interacción cotidiana con los fenómenos y las ideas. Estos devienen parte de una cultura compartida que implica una manera particular de “ver” la naturaleza.

Hipótesis sobre la enseñanza de la ciencia

Presentamos brevemente las siguientes hipótesis, que han sido tomadas en cuenta para el desarrollo de secuencias de enseñanza sobre la electricidad descritas en este capítulo. Estas hipótesis no permiten construir un modelo completo de la enseñanza y del aprendizaje de la ciencia, sino que tratan de temas importantes para hacer corresponder las dificultades de aprendizaje de los alumnos con nuestras perspectivas epistemológicas.

En primer lugar, se considerará que enseñar la ciencia debería implicar todos los niveles del saber científico, es decir, la teoría, los modelos, el campo experimental (Tiberghien et al., 1995). Sin embargo, los modelos científicos son diferentes, desde el punto de vista de sus objetivos y de su estructura, de las ideas personales de los alumnos sobre el mundo. Por un lado, esto significa que la comprensión de los modelos científicos y la implicación en las actividades de modelización puede generar un cambio conceptual en los alumnos. Por otro lado, los modelos científicos no deben ser demasiados alejados del razonamiento de los alumnos de manera de ser comprensibles. Esto implica la necesidad, en numerosos casos, de una transformación del saber científico a fin de adaptarlo a la causalidad de los alumnos.

En segundo lugar, en la enseñanza científica, debería haber una coherencia entre los modelos a enseñar y el campo experimental correspondiente que genera la base experimental para la construcción del sentido. Un corolario de esta tesis es que la ampliación del campo

experimental a enseñar debería implicar la presentación sucesiva de modelos conceptuales más potentes.

En tercer lugar, en la enseñanza científica, los modelos deberían ser tratados como construcciones hipotéticas. Esto necesita así un proceso de validación como ingrediente esencial para el desarrollo del saber científico.

El desarrollo de modelos

Nosotros describimos los aspectos principales de una secuencia de enseñanza para el tema de la electricidad elemental, demostrando la ampliación progresiva del campo experimental, así como los desarrollos sucesivos de los modelos correspondientes. Versiones diferentes de esta secuencia han sido instrumentadas con varios grupos de alumnos (sirviendo de muestras) del último año de la escuela secundaria obligatoria en Grecia (15 años). En este nivel, la física es enseñada por dos años como una asignatura obligatoria. La electricidad es igualmente enseñada en la escuela primaria, dentro del contexto del curso de ciencias de la naturaleza el cual también dura dos años.

Los objetivos conceptuales de esta secuencia comportan la descripción y la interpretación del comportamiento de un circuito y de los fenómenos electrostáticos en términos de magnitudes físicas V , I , R , E , Q y t . Los objetivos cognitivos comportan la diferenciación de los conceptos V , I , y E , el desarrollo y la utilización de modelos apropiados para rendir cuenta de fenómenos eléctricos, la relación de los fenómenos electrostáticos y electrocinéticos y el desarrollo de una idea sistemática de los circuitos eléctricos.

La secuencia ha sido estructurada en cuatro partes. Las partes forman una jerarquía de desarrollo, en términos de las preguntas emergentes, de los modelos enseñados y del campo experimental correspondiente. Los modelos consecutivos siguen una lógica interna pero son relacionadas los unos a los otros y conducen a niveles más profundos de comprensión de la electricidad. Por ejemplo, el concepto de resistencia no es introducido en la parte fenomenológica la cual es la primera parte de la secuencia. Es introducido cualitativamente en la parte conceptual macroscópica, y seguidamente relacionado al mecanismo microscópico en la tercera parte, la microscópica, y finalmente es estudiado cuantitativamente en la cuarta parte, la cuantitativa.

La parte fenomenológica

La parte fenomenológica trata de las preguntas que tienen sentido para los alumnos. Estas son formuladas a nivel de los fenómenos que se refieren a los objetos y eventos familiares y están en la línea del modelo de los alumnos de una fuente que consume que llamaremos “fuente consumidora” por ejemplo: “¿cómo un bombillo brilla o cuánto pagamos a la empresa que provee la energía?”

Las pilas, los bombillos y las aplicaciones familiares, tales como una linterna o las luces del árbol de navidad, constituyen el campo experimental. Nuestros resultados de investigación (Koumaras et al., 1994) nos conducen a una decisión importante concerniente al campo experimental, a saber, el incluir eventos no solamente ligados a la intensidad de la luz sino también a su duración. Esta selección amplía el campo experimental, que comprende habitualmente, en los programas tradicionales y constructivistas, solamente situaciones que corresponden a estados estacionarios. Eventos tales como la duración de la iluminación o la

“vida” de la pila, que son familiares a los alumnos, son abundantemente tratados en la secuencia. Estas situaciones son llamadas situaciones evolutivas.

En nuestro caso, en este estado de la secuencia, los conceptos científicos no son producidos. Al final de la parte fenomenológica, está previsto que los alumnos sean familiarizados con los fenómenos eléctricos y las experiencias, que comprendan el circuito cerrado, que construyan relaciones de causalidad relativas a los eventos “instantáneos” como el brillo del bombillo y a los eventos que se prolongan en el tiempo como la duración de la iluminación, por ejemplo: “más pilas en paralelo implica una iluminación de mayor duración”.

Desde el inicio de la secuencia, los alumnos tienen la oportunidad de realizar experiencias con pilas, bombillos y diversos materiales de manera de comprender el circuito cerrado y clasificar los materiales en conductores o aislantes. El saber adquirido sobre la continuidad del circuito es validado por los alumnos cuando intentan interpretar situaciones familiares más no evidentes. Así por ejemplo, una verdadera motocicleta es llevada a la clase y se le solicita a los alumnos predecir e interpretar el circuito de su dinamo.

En la etapa siguiente, los alumnos son implicados en experiencias en las cuales ellos pueden hacer variar el número de pilas y de bombillos así como el tipo de conexiones entre esos elementos. La enseñanza en esta etapa es limitada al establecimiento de relaciones entre magnitudes observables, tales como el número de pilas y bombillos, la configuración del circuito y las variaciones de iluminación. La intensidad y la duración de la iluminación son consideradas ambas como efectos importantes. Esto facilita la comprensión del nuevo saber y la construcción de modelos causales para el funcionamiento del circuito, como lo muestra el extracto siguiente de una de las clases.

La actividad 1 (figura 1) fue presentada a los alumnos durante la enseñanza de conexiones en paralelo de pilas y bombillos después que los circuitos cerrados y las conexiones en serie de pilas y bombillos fueron tratados.

<p>Q1</p> <p style="text-align: center;">Bombillo 1 Bombillo 2</p>	<p>Los bombillos, pilas y cables son similares para las dos figuras.</p> <p>¿El bombillo 2 brilla más, menos o igual que el bombillo 1?</p> <p>Justificar</p>
--	---

Figura 1 : La actividad de pilas en paralelo

Al inicio, se solicita a los alumnos hacer sus predicciones. La mayoría de ellos responden que el bombillo 2 brillará más que el bombillo 1: “porque en el segundo circuito hay dos pilas mientras que en el primero no hay más que una”.

Después de haber realizado la experiencia, los alumnos de una clase debían interpretar el hecho de que la iluminación era idéntica. Al momento de la discusión con el docente, varios de ellos introdujeron la duración de la iluminación de la manera siguiente:

« ..Con ese tipo de conexión, no tenemos más iluminación sino que ello (iluminación/pila) durará más tiempo »

« ..Con esa conexión de las pilas, se gana tiempo, es decir que el bombillo permanecerá encendido dos veces más que si estuviera conectado con una sola pila ».

Respuestas similares fueron observadas en otras clases, sugiriendo que cuando las observaciones experimentales son diferentes de sus predicciones, algunos alumnos utilizan la evolución en el tiempo para el funcionamiento del circuito cuando interpretan los datos. Cuando se razona en términos de tiempo/duración, esos alumnos llegan a proporcionar explicaciones plausibles, para ellos, sobre las actividades correspondientes a estados estacionarios. Nuestra investigación sugiere que se trata de una estrategia ingeniosa de razonamiento que los alumnos utilizan efectivamente para reducir el conflicto entre sus predicciones y los resultados experimentales (Koumaras y al.).

Finalmente, notemos que se puede anticipar que los alumnos persistirán en su modelo “fuente consumidora” al final de la parte fenomenológica. Por ejemplo, el bombillo permanecerá como consumidor para los alumnos; éste no adquirió el estatus de resistor.

La parte conceptual

Una vez que los alumnos hayan adquirido una comprensión de los circuitos eléctricos a nivel fenomenológico, nuestros resultados sugieren que se puede esperar a que ellos planteen preguntas conceptuales del tipo “¿qué varía (qué magnitud) cuando se cambia la conexión de dos bombillos?”

Modelos más potentes, correspondientes a la ampliación del campo experimental y capaces de proporcionar respuestas a preguntas conceptuales, son desarrollados en esta etapa. Nuestra selección es, por una parte, poner en evidencia un conjunto de fenómenos encontrados en la parte fenomenológica tales como las conexiones en serie y paralelo de pilas y bombillos. Por otra parte, ampliar el campo experimental de manera de incluir medidas con el voltímetro, el amperímetro y resistores. Nuevos aparatos domésticos eléctricos tales como los secadores de cabellos forman parte de algunas aplicaciones que los alumnos deberán utilizar.

En nuestro caso, la parte conceptual está fundada sobre la modelización de fenómenos eléctricos a nivel macroscópico, incluyendo los conceptos de tensión (V), intensidad (I), energía (E), resistencia (R), tiempo (t). La utilización simple de entidades microscópicas (partículas cargadas, electrones) tiene lugar únicamente en respuesta a las preguntas de los alumnos concerniente a “lo que circula”. En relación a las estructuras conceptuales, se puede destacar que, en ese nivel, el dominio de conocimiento debe ser adaptado al razonamiento de los alumnos de manera de hacerlo comprensible. Tomando en cuenta la causalidad de los alumnos, el dominio de conocimiento es descompuesto en dos modelos causales parciales de manera de dar cuenta del brillo y de la duración de la intensidad. El primero es el modelo del flujo, que pone en juego las magnitudes físicas V, I, y R así como sus relaciones. El segundo es el modelo energético, que pone en juego las magnitudes físicas E y t.

El punto de inicio para la modelización conceptual de los circuitos eléctricos es un tema sobre el cual no hay acuerdo entre los investigadores. En el presente caso, la tensión y la energía son las primeras del grupo de conceptos V, I, E a ser presentadas y esto por dos razones: En primer lugar, consideramos que la reconceptualización de la “intensidad” hacia un concepto científicamente aceptable implica una diferenciación conceptual principalmente ente los conceptos I y E el cual tiene un costo cognitivo considerable para los alumnos. Tal cambio conceptual exige una preparación sustancial para producirse y puede ser ayudado por la adquisición de conocimientos preliminares concernientes a la tensión y la energía (ver igualmente Episodio 1). Luego, el primer desarrollo del concepto de tensión puede ayudar a una explicación causal de los circuitos eléctricos, pone a los alumnos más “atentos” a la tensión que a la “corriente” y facilita el establecimiento de relaciones entre los fenómenos electrocinéticos y electrostáticos a nivel macroscópico y a nivel microscópico (Psillos et al., 1988). Después de la tensión, la etapa siguiente consiste en introducir inicialmente la intensidad y después la resistencia. Nuestros datos sugieren que facilitar la construcción del concepto de resistencia juega un rol preponderante en el desarrollo de un modelo de flujo macroscópico y proporciona un punto hacia el modelo microscópico. Es por ello que el énfasis es puesto en la enseñanza de la resistencia.

A partir de una primera etapa hacia el desarrollo de modelos conceptuales, los alumnos realizan variadas actividades, presentadas en el Episodio 1. Después de la siguiente etapa, estos son implicados en una experimentación con bombillos y amperímetros donde toman datos cualitativos y semi-cuantitativos. Además de los bombillos, los amperímetros son utilizados como indicadores de intensidad, estas indicaciones sugieren que la intensidad permanece igual en todo el circuito. La conservación de la intensidad en todo el circuito es discutida con los alumnos extrayendo así la diferenciación entre I y E. La experiencia conocida con bombillos y amperímetros en serie, es utilizada para mostrar que los valores son iguales en todo el circuito. Sin embargo, nuestros resultados nos conducen a pensar que ciertos alumnos consideran el amperímetro como un consumidor de energía al igual que el bombillo y así ellos pueden integrar los valores idénticos dados por el amperímetro en su modelo de “fuente consumidora” (Psillos et al., 1987). Una analogía hidráulica, incluyendo una bomba, un circuito de agua y un molino, proporciona una visualización útil de un sistema cerrado en el cual una magnitud (agua) circula y es conservada mientras que la energía es transferida de la bomba y es utilizada en el molino. En este punto, el modelo del flujo de corriente comienza progresivamente a desarrollarse. Los amperímetros, aún con un punto cero¹ no son utilizados para mostrar cómo la corriente circula en una sola dirección, no es convincente para los alumnos. Lo mismo se aplica a las agujas magnéticas. Hemos discutido en otras publicaciones que los efectos magnéticos son interpretados en términos del modelo “fuente consumidora” y que deberían ser utilizados solamente después del desarrollo del concepto de intensidad (Psillos et al., 1987). Las metáforas son utilizadas para inducir la unidireccionalidad en casos tales como “en los ríos, la corriente circula solamente en una dirección”. Además, los alumnos hacen igualmente experiencia con pilas indicando tensiones diferentes lo que les muestra que para un mismo circuito, la intensidad de la corriente depende de la tensión.

En la etapa siguiente, los alumnos son involucrados en actividades y experiencias relativas a los resistores. Son confrontados en una tarea difícil, como lo es el relacionar los resistores con los bombillos y asignar a estos dos objetos dos funciones en lugar de una: utilizador de energía y regulador de corriente. Esto es una etapa crucial donde el modelo del flujo de corriente puede adquirir una significación para los alumnos, es decir que el flujo de “alguna

cosa” puede convertirse en el flujo de partículas “materiales” invisibles. Los alumnos desarrollan frecuentemente un modelo secuencial lo que indica su progreso conceptual. En el Episodio 2, los aspectos de una estrategia de confrontación concerniente a la enseñanza de la resistencia son presentados.

Al final de la parte conceptual, los alumnos desarrollan una nueva relación entre E y I. Ellos son implicados en una serie de experiencias que sugieren que la tasa de energía transferida depende no solamente de la cantidad de corriente en un circuito, sino también de la tensión. Por ejemplo, en una experiencia, una linterna es conectada a una pila de 4,5 volts y un bombillo de la casa está conectado a una toma de corriente. Los amperímetros en los dos circuitos tienen los mismos valores, pero los bombillos iluminan difentemente.

La parte microscópica

Las preguntas relativas a las entidades y mecanismos microscópicos emergen cuando los alumnos comienzan a desarrollar el concepto de conservación de la intensidad de corriente y en particular la doble función de los resistores: utilizadores de energía y reguladores de corriente. Por ejemplo, el siguiente diálogo ha sido grabado en una discusión en clase:

Es : Señor, si se mide la intensidad justa en un bombillo (en un circuito pila-bombillo), el amperímetro debería indicar más.

P:¿ Por qué?

Es : Porque los electrones se acumulan cuando pasan a través del resistor. Después el resistor, la intensidad es más débil porque menos electrones pasan a través..

Este modelo ha sido llamado el modelo « acoplado » para la intensidad y está en la línea del tratamiento secuencial de los cambios en un circuito eléctrico. Lo que importa en nuestra discusión es que los alumnos buscan una explicación a nivel del mecanismo microscópico de manera de explicar la función de un resistor y la de la circulación de la corriente. En la parte microscópica, los modelos causales cualitativos son desarrollados y proporcionan respuestas a tales preguntas, ellos refuerzan la relación micro-macro y desarrollan una comprensión del circuito eléctrico en tanto que sistema.

El campo experimental es considerablemente ampliado, éste incluye la interacción entre los cuerpos cargados eléctricamente, las máquinas electrostáticas y la conductividad en los líquidos. Demostraciones experimentales y discusiones conducidas por el docente son guiadas por la carga, la atracción y la repulsión de cuerpos cargados, las máquinas electrostáticas así como por la función de una pila prototípica.

Una cuestión crucial en esta etapa es: Cómo relacionar los campos electrostáticos y electrocinéticos, aparentemente separados por los alumnos? Experiencias, analogías, metáforas, conceptos y estructuras conceptuales son utilizadas para establecer relaciones entre los niveles de los fenómenos y del modelo.

Por ejemplo, en una experiencia, la medida de la tensión entre los brazos de la máquina de Whimshurst está ligada a la medida de la tensión entre los bornes de la pila. Otra experiencia (Figura 2) es utilizada para facilitar las relaciones entre la carga, el movimiento de cuerpos cargados, la iluminación y la indicación del amperímetro. La explicación dada es que una máquina electrostática puede acumular cargas diferentes en sus polos y así establecer un valor

de tensión entre ellos. Una corriente eléctrica puede ser creada en condiciones apropiadas, es decir, en un circuito cerrado compuesto de un bombillo, una máquina y un cuerpo ligero pudiéndose desplazar entre los polos.

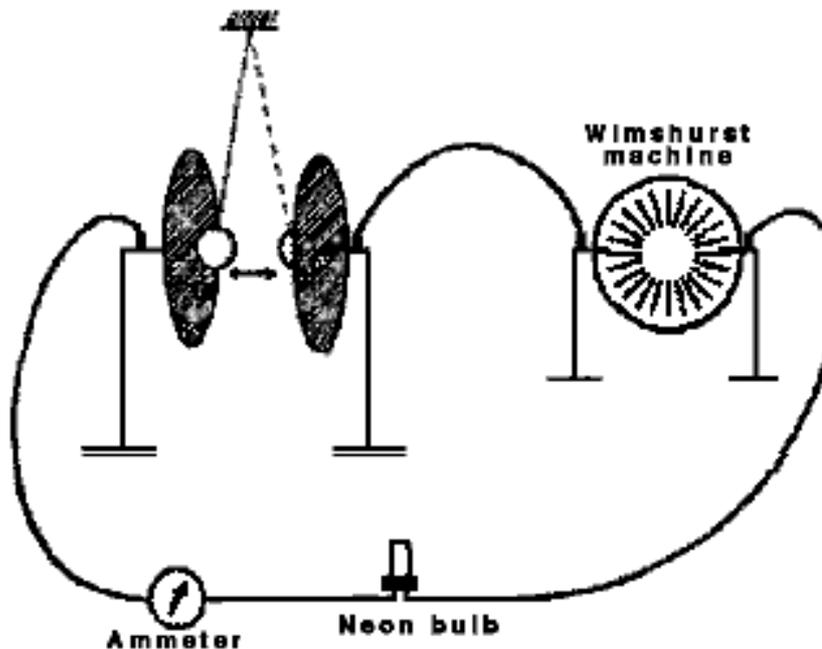


Figura 2 : Una actividad para relacionar los fenómenos electrostáticos y electrocinéticos

Los aspectos cruciales de los mecanismos microscópicos del funcionamiento de la pila están ilustrados por analogías; por ejemplo, la separación y la acumulación de cargas en los brazos de la máquina de Wimshurst están relacionadas con la separación y la acumulación de cargas en los bornes de la pila. La tensión y la carga son presentadas como conceptos unificando a la vez los fenómenos electrostáticos y electrocinéticos con los niveles microscópico y macroscópico. La tensión está relacionada con la acumulación diferencial de cargas tanto con los dos bornes de la pila como con aquellos de la máquina de Wimshurst. Explicaciones causales son proporcionadas a los alumnos de manera de hacer comprensible los procesos. Por ejemplo, cuando alguien le da vuelta a la manivela de la máquina de Wimshurst, se puede observar la desviación de la aguja del voltímetro, en la medida de que esta gire más rápido, en esa medida aumenta el número de voltios indicados.

Un modelo causal simplificado es utilizado para proporcionar un mecanismo explicativo del funcionamiento de un circuito eléctrico. Este modelo está centrado en la pila y la tensión correspondiente y además a la falta de electrones, creados por las reacciones químicas, en los bornes de la pila. En consecuencia, las fuerzas de atracción y de repulsión son ejercidas sobre los electrones libres, poniéndolos en movimiento estableciéndose así la corriente. El espacio limitado de este capítulo no permite dar una descripción detallada de este modelo. Sin embargo, es importante destacar que el mismo es atractivo para los alumnos ya que éste proporciona un mecanismo explicativo causal de lo que pasa en el circuito. Las variables macroscópicas I , V , R adquieren una representación microscópica que facilita las relaciones micro-macro.

La parte cuantitativa

Con la enseñanza de las partes precedentes, los alumnos han adquirido una fuerte base cualitativa, obtenido medidas semi-cuantitativas y explorado covariaciones de magnitudes físicas tales como V , I y R . En la parte cuantitativa, las relaciones cuantitativas entre V , I , R son enseñadas de manera de responder a preguntas tales como: “Si se dobla el valor de la resistencia, cuánto disminuye la corriente en un circuito que comprende un amperímetro, resistores en serie y una pila de 4,5 V?”.

El campo experimental es ampliado en su parte cuantitativa de manera de incluir conexiones en serie y paralelo de resistores, medidas con el ohmiómetro y una resistencia específica. Un modelo macroscópico cuantitativo es introducido, comprendiendo la ley de Ohm y la relación $R = \rho l/s$. Es igualmente presentada la variación de la resistencia con los cambios de temperatura.

Los alumnos son involucrados en actividades donde utilizan medidas para estudiar de manera cuantitativa los diferentes aspectos de la relación funcional $V=IR$. Por ejemplo, una vez que los alumnos hayan adquirido el concepto cualitativo de resistencia y la representación microscópica de este concepto, son implicados en medidas directas de la resistencia con un ohmiómetro. Seguidamente comparan estos datos con los valores de la misma resistencia calculados a partir de medidas dadas por el voltímetro y el amperímetro en un circuito que comporta una pila y dos resistores en serie. Se toman igualmente unas medidas de manera de construir una representación gráfica de la relación $I=V/R$.

Una característica específica de esta parte es que los alumnos son involucrados en experiencias concebidas para facilitar el darse cuenta de que un cambio local, tal como un aumento del valor de la resistencia, implica un cambio global en el circuito, por ejemplo el valor de la corriente; esto refuerza la visión sistémica del circuito. Por ejemplo, se le solicita a los alumnos realizar experiencias para predecir e interpretar la variación de indicaciones de un amperímetro cuando se agrega un resistor en paralelo en un circuito que comprende una pila unida a un resistor:

Cuando se agrega la resistencia, el amperímetro indica más porque hay una conexión en paralelo... Se tiene dos circuitos, la pila debe proporcionar más (corriente).

Estrategias de enseñanza

Diversas estrategias y técnicas de enseñanza han sido aplicadas para facilitar las actividades constructivas de los alumnos teniendo por objetivo la comprensión de los modelos descritos anteriormente. Habitualmente, los alumnos son involucrados en una experimentación y discusiones colaborativas guiadas de manera de explicitar sus ideas, para predecir e interpretar los fenómenos. En la siguiente sección se describen ciertos aspectos de dos estrategias de confrontación ejecutadas.

Episodio 1 : facilitar la diferenciación conceptual

En la electricidad elemental, el desarrollo de conceptos científicos implica que los alumnos diferencien los aspectos debidos a la corriente, a la tensión y a la energía, a partir de la noción global de “corriente-energía”. Las etapas esenciales para facilitar esta diferenciación conceptual pueden estar orientadas a reforzar las características conceptuales que son poco desarrolladas en los conocimientos iniciales de los alumnos: la diferenciación entre las características de diferentes conceptos, el establecimiento de nuevas relaciones entre los conceptos (Kariotoglou y al. 1995). Esta estrategia ha sido aplicada en el caso de la tensión que es, para los alumnos, un concepto poco desarrollado y subordinado a la intensidad. Ha sido incluida en la parte conceptual una unidad de enseñanza sobre la tensión y la energía, dirigida a reforzar el concepto de tensión comenzando por diferenciar la intensidad de la tensión y la intensidad de la energía. Los aspectos de esta unidad de enseñanza son precisados seguidamente.

Cambiar el nivel de cuestionamiento

Al final de la parte fenomenológica, los alumnos formulan preguntas potencialmente conceptuales tales como: “¿qué cambio se produce en un circuito cuando se conectan dos pilas en serie o en paralelo?” El nivel de tal pregunta es diferente de aquellas fenomenológicas tales como: “¿cambia el brillo de un bombillo cuando se conecta a dos pilas en serie en lugar de una?” La introducción de los conceptos de tensión y energía tiende a facilitar la utilización por los alumnos de características de estos conceptos para proporcionar respuestas a tales preguntas.

Ampliar el campo experimental

El campo experimental comprende pilas y bombillos, como se mencionó precedentemente. Además de ello, el campo es ampliado de manera de comprender los voltímetros y sus lecturas.

Validar los nuevos conocimientos

En esta unidad, los alumnos toman y utilizan datos cualitativos y semi-cuantitativos para validar los modelos conceptuales. Así, ellos tienen la oportunidad de utilizar y de relacionar las indicaciones del voltímetro hasta ahora desconocidos, con objetos o eventos familiares. Por ejemplo, los alumnos leen 4,5 V en una pila y verifican que el voltímetro indique 4,5V, o destacan que dos pilas conectadas en serie deberían dar 9 V y lo verifican con el voltímetro. Las medidas no están ligadas a una definición formal de las magnitudes físicas de tensión y energía, pero son utilizadas como un medio para describir los atributos de estos conceptos.

Introducir modelos significativos

Como se mencionó en la sección 4.2, los dos modelos parciales de la energía y del flujo son poco a poco ejecutados a nivel conceptual. El nivel de relaciones causales cambia; los alumnos trabajaban hasta entonces en términos de objetos y eventos, se les solicita en esta etapa describir e interpretar fenómenos similares en términos de magnitudes físicas. En el modelo del flujo, la tensión es introducida como un concepto primario con una referencia directa en la pila, lo que significa que es su potencial el que establece la “corriente” en un circuito. La tensión es relacionada de manera causal con la generación de corriente. En el modelo energético, la energía es relacionada con el volumen de la pila (para pilas del mismo tipo), en el sentido de que una pila es una reserva de energía. En términos de este modelo, la

energía almacenada en la pila es relacionada de manera causal con la duración de la iluminación. Este enfoque es radicalmente diferente de numerosos otros enfoques tradicionales en los cuales la tensión y la energía son introducidos mediante relaciones funcionales. Esto está en la línea de aquellas investigaciones que sugieren que los alumnos comprenden mejor las propiedades de los objetos que las relaciones entre conceptos.

Elaborar los modelos

Los nuevos conocimientos sobre la tensión son introducidos utilizando lo que es familiar para los alumnos, tal como la indicación de los voltios en una pila. Al inicio de la unidad, los alumnos comparan el brillo de bombillos similares, conectados a pilas en las cuales el número de voltios indicado es diferente. En esta etapa, los alumnos son informados de que los voltios miden una nueva magnitud, la tensión. Seguidamente, ellos comparan las variaciones de brillo utilizando pilas conectadas en serie y en paralelo y vuelven a repetir las mismas experiencias utilizando el voltímetro. A continuación se presentan las etapas esenciales de la evolución de su razonamiento.

Los resultados en clase muestran que inicialmente, para algunos alumnos, el número de voltios indica la cantidad de “corriente” almacenada en la pila, que funcione o no en un circuito.

T :Después de haber visto esta lección, qué piensan ustedes que los voltios indican?

S3: Es la cantidad que la pila tiene

T: qué cantidad?

S3: Corriente

T: Están ustedes de acuerdo?

Ss: sí

Pareciera que los alumnos conceptualizan solamente « la cantidad almacenada » en la pila, cuyo monto determina cuánta “corriente” es “dada” a la pila. Un esquema posible de aplicar a los alumnos es “más yo tengo, más yo doy”. Así, dos pilas en serie tienen más “corriente” lo que permite “dar” más “corriente” al circuito, y de allí, el brillo aumenta. De esta manera, los resultados experimentales son interpretados en términos del modelo de los alumnos de fuente consumidora.

En una segunda etapa son utilizadas dos demostraciones conducidas por el docente, para facilitar la diferenciación entre tensión y energía por una parte y tensión e intensidad por la otra. La primera implica dos pilas con la misma tensión pero de tamaños diferentes. Estas son conectadas a unos bombillos similares. En esta experiencia, se solicita a los alumnos predecir e interpretar el brillo de cada bombillo y la duración de sus intensidades. Los datos en clase muestran que en esta segunda etapa, algunos alumnos (ver S3) relacionan el volumen de la pila con la “cantidad almacenada”, lo cual distinguen de la tensión.

T :¿Si se conectan esas dos pilas (igual V, Tamaños diferentes) a dos bombillos similares, estos brillarán igual?

S3: Sí

T: ¿Estás seguro, esta es bien grande?

S3: Eso no es importante ya que los voltios son los mismos, las pilas tienen la misma fuerza. Esta (la pequeña) se acabará más rápido, la más grande tardará más tiempo.

S2: Las dos (pilas) terminarán al mismo tiempo.

S3: La grande tiene más energía, ella es más grande

S2: Si ella tuviera más energía, el bombillo brillaría más

S3: la cantidad, no la fuerza.

Aquí, los alumnos conceptualizan la tensión como determinante de la “potencia/fuerza” de la “corriente dada” por la pila al bombillo. Esas concepciones son más elaboradas que el primer esquema y son parcialmente correctas. Sin embargo, los alumnos no distinguen realmente la utilización de estas concepciones como una segunda variable que condiciona la interacción entre la pila y el bombillo, cuando funcionan en un circuito. Los alumnos relacionan siempre la tensión a la “corriente” y probablemente para ellos, el voltio es una unidad para medir la “corriente”.

En la segunda experiencia, un voltímetro es conectado en serie a una pila y un bombillo. Los datos en clase muestran que los alumnos atribuyen la tensión a la pila cuando intentan interpretar la indicación de un voltímetro conectado en serie a una pila y un bombillo que, en este caso, no brilla.

T : ¿Hay corriente en el circuito ?

S3: No

T: ¿Cómo sabes eso?

S3: El bombillo no brilla

T: ¿Los voltios miden la corriente?

S2: No

T: ¿Por qué?

S2: Si los voltios midieran la corriente, el bombillo brillaría

La tensión indica ahora la “potencia/fuerza” de la pila. Parece que, en una tercera etapa, la tensión es conceptualizada como una característica permanente de la pila la cual es validada, funcione o no en un circuito. Con la ayuda de metáforas (utilizando el término griego para la tensión “tassi” que significa igualmente tendencia, disposición para hacer), los alumnos relacionan la tensión con la disposición de la batería para “dar corriente” al bombillo y no la corriente que ésta “tiene” o que esta “da”, según los objetivos de la unidad:

T : De acuerdo, Puede decirnos alguien que aprendió hoy ?

S1: Aprendimos que la tensión está primero y después la corriente, el voltímetro no mide la fuerza de la corriente, ni tampoco la cantidad, mide los voltios.

S3: La tensión

S2: Euh... tensión

T: ¿ Qué significa esta tensión? ¿ De quién es la característica?

S3: la pila, que da la energía al bombillo

S4: La disposición de la pila va a dar corriente al bombillo

Esta etapa es difícil y toma tiempo para que sea significativa. Las intervenciones de las concepciones de los alumnos entre las etapas, durante y después de la unidad de enseñanza fueron anotadas. En las unidades siguientes, la discriminación conceptual fue reforzada mientras que nuevas relaciones entre la tensión, la energía y la intensidad fueron construidas, de manera de ayudar a los alumnos a diferenciar esos conceptos y adquirir poco a poco sus significados científicos.

Episodio 2 : Inducir un conflicto cognitivo significativo

Presentamos aquí los aspectos de una estrategia de conflicto cognitivo orientado a facilitar la construcción por los alumnos de un modelo para los resistores y el concepto de resistencia. Tal como se discutió en otras publicaciones (Koumaras et al., 1995), esta estrategia está fundamentada en la adquisición de conocimientos previos por los alumnos: la confrontación con contra-evidencias reconocidas, la presentación concomitante de una mejor explicación alternativa; la aplicación de nuevos conocimientos. Un aspecto crucial para la eficacia de esta estrategia concierne lo que es reconocido como contra – evidencia por los alumnos.

Una parte esencial de esta estrategia trata sobre la adquisición progresiva de conocimientos iniciales relativos a la resistencia. Por ejemplo, los alumnos están involucrados en experiencias sobre la covariación de la longitud de un resistor con las indicaciones del amperímetro y el brillo del bombillo conectado en serie con una pila. Es decir, ellos tocan y sienten que la temperatura de un resistor, tal como un cable de aleación níquel cromo (nichrome) , aumenta cuando pasa la corriente, pero que este no es el caso para un conductor como un cable de cobre. Este enfoque es diferente de la enseñanza habitual, que trata frecuentemente los efectos térmicos de la corriente separadamente de los resistores. Los alumnos toman conciencia que un bombillo es un resistor experimentando, resolviendo problemas, discutiendo e intercambiando sus puntos de vista trabajando en grupo. Nuestros resultados sugieren sin embargo, que tales conocimientos son siempre interpretables en términos del modelo fuente consumidora. Por ejemplo, en la experiencia siguiente, para los alumnos, el resistor no calienta no porque constituye un obstáculo, sino porque consume más energía. De allí que el brillo del bombillo y la lectura del amperímetro decrecen a la vez:

« En la experiencia con el cable de aleación níquel cromo (nichrome), la corriente se hace más pequeña porque es consumida de manera de poner el cable caliente, mientras que hay menos corriente que llega al bombillo, éste deviene más pálido. Para la experiencia con el cable de cobre, el brillo del bombillo y la lectura del amperímetro permanecen igual porque el cable de cobre no deviene más caliente. El cable (de cobre) no consume en absoluto corriente y toda la corriente va en el bombillo que brilla bastante” (respuesta típica de varios alumnos durante al enseñanza).

"Dans l'expérience avec le fil de nichrome, le courant devient plus petit parce qu'il est consommé de manière à rendre le fil chaud, alors il y a moins de courant qui arrive dans l'ampoule, qui devient plus pâle. Pour l'expérience avec le fil de cuivre, la brillance de l'ampoule et la lecture de l'ampèremètre restent les mêmes, parce que le fil de cuivre ne devient pas plus chaud. Le fil (de cuivre) ne consomme pas de courant du tout et tout le courant va dans l'ampoule qui brille beaucoup" (réponse typique de plusieurs élèves pendant l'enseignement).

Una vez adquiridos los conocimientos requeridos, los alumnos son involucrados en una situación de conflicto, durante la cual se les solicita predecir la duración de la iluminación en dos circuitos. Uno está conformado por una pila y un bombillo y el otro por una pila conectada en serie con dos bombillos. Esta experiencia va al encuentro de la intuición de los alumnos por el hecho de que los resultados no pueden ser predichos ni interpretados a partir de su tipo de causalidad. Si se les solicitara comparar el brillo de los bombillos, ellos podrían fácilmente predecir los resultados. En lo que respecta a la duración, un bombillo tiene una capacidad constante para recibir corriente, dos bombillos se supone que deben tener una doble capacidad y entonces se apagarían antes. Tomando en cuenta el brillo menos importante, las predicciones de los alumnos pueden ir hasta la duración de la iluminación igual en los dos circuitos, como lo mostraron los datos de clase.

S: (ese resultado) no puede ser explicado. Normalmente, la otra pila debería acabarse más rápido (la pila conectada a los dos bombillos). O al menos, deberían acabarse al mismo tiempo”.

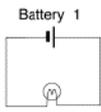
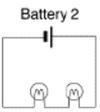
<p>Q3</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-bottom: 10px;"> <div style="text-align: center;"> <p>Pila 1</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>Pila 2</p>  </div> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> <p>Q3</p> <p>Battery 1 Battery 2</p> <p>All bulbs, batteries and wires in both figures are similar.</p> <p>Battery 2 will wear out together, earlier or later than Battery 1?</p> <p>Justify.</p> </div>	<p>Todos los bombillos, pilas y cables de las dos figuras son similares.</p> <p>Se agotará la pila 2 al mismo tiempo, más rápido o más tarde que la pila 1 ?</p> <p>Justificar.</p>
--	---

Figura 3 : Ejemplo de una experiencia que va al encuentro de la intuición

La experiencia presentada anteriormente satisface los siguientes criterios. En primer lugar, tiene sentido para los alumnos ya que está fundamentada en preguntas emergentes del modelo fuente consumidora. En segundo lugar, los resultados experimentales son reconocidos como estimulantes, ya que no están de acuerdo con el razonamiento causal de los alumnos, según el cual dos bombillos deberían consumir más, y entonces su iluminación debería ser por menos tiempo. Consideramos que la extensión del campo experimental hacia la duración de la iluminación, que corresponde a la introducción de actividades evolucionistas, permite cambiar una experiencia convencional en una experiencia que es reconocida por los alumnos como que va al encuentro de la intuición. (Koumaras et al.).

Una parte integrante de la estrategia es la presentación, simultánea con la insatisfacción creada en los alumnos, de una solución que proporciona una mejor explicación alternativa de dos funciones del resistor: ser un camino para la corriente y ser un utilizador de energía, en términos del mecanismo microscópico unificador. (El mecanismo a ese nivel es simple; los electrones son presentados como partículas que remueven y que calientan los cables por fricción) (Posner et al., 1982). La construcción del conocimiento deseado concerniente a la resistencia es facilitado por la interpretación de los resultados precedentes y por un gran número de nuevas aplicaciones en términos de nuevos conocimientos.

Algunos resultados

Fueron utilizadas un abanico de técnicas, tales como las entrevistas semi-directivas, las grabaciones en clase y los cuestionarios escritos con la finalidad de controlar la evolución conceptual de los alumnos durante y después de la enseñanza. En esta sección, se presentan brevemente algunos comentarios fundamentados en los resultados obtenidos por la administración de post tests a 156 alumnos a quien se les enseñó la secuencia durante varios años. Se hicieron ciertas comparaciones con resultados obtenidos utilizándose una muestra de referencia importante de 313 alumnos que siguieron el programa oficial (Koumaras et al., 1991).

La gran mayoría de los alumnos respondieron correctamente en las actividades sobre el circuito cerrado. Se les presentaron actividades centradas en el valor de la intensidad en circuitos constituidos por pilas y bombillos. Casi la mitad de los alumnos utilizaron el modelo científico de la corriente, distinguiéndola de la energía y reconociendo su conservación. Sin embargo, cerca de un quinto de los sujetos en numerosas actividades continuaron su razonamiento en términos del modelo de fuente consumidora, y no diferenciaron la energía de la corriente. La mayoría de los alumnos respondieron correctamente a las preguntas relativas a qué es un voltio, a lo que indica la magnitud de la tensión y cómo ella es medida. En relación con la relación tensión e intensidad, entre la mitad y las dos terceras partes de los alumnos dieron respuestas correctas.

En lo que respecta a los razonamientos, se puede destacar que cerca de la mitad de los alumnos reconocieron que un cambio en un circuito implica modificaciones de todos los parámetros del circuito en el caso donde los cambios portan sobre los valores de la resistencia. Es útil remarcar que varios alumnos desarrollaron una visión local del circuito eléctrico cuando se les enseñó la resistencia. Más tarde durante la enseñanza, abandonaron esta visión local en favor de una visión sistémica, pero cerca de un tercio conservaron la visión local generada por la enseñanza. Logros similares fueron obtenidos en las actividades relacionadas con los circuitos en serie y en paralelo de pilas y bombillos, en los cuales los sujetos experimentales utilizaron el saber enseñado en lugar de reglas causales basadas en el modelo de fuente consumidora que fue utilizado antes de la enseñanza. Todos estos resultados fueron significativamente mejores que aquellos obtenidos en la muestra de referencia de alumnos de la escuela secundaria Greca inferior y superior. Por ejemplo, la mayoría de los alumnos de la escuela secundaria superior mostraron la utilización de modelos secuenciales después de la enseñanza, pero no mostraron razonamiento sistémico.

Los resultados experimentales permiten dos puntos de vista. El punto de vista pesimista mira las concepciones alternativas que se manifiestan en un cierto número de alumnos a pesar de su implicación dentro de una importante secuencia de enseñanza constructivista

especialmente concebida. Por otra parte, ciertas concepciones alternativas han sido creadas probablemente, por la interacción entre la enseñanza y los conocimientos de los alumnos. El punto de vista optimista prudente considera dos resultados: primero, los progresos considerables que fueron realizados durante y después de la enseñanza; segundo, los resultados que fueron significativamente mejores en comparación de las prácticas existentes, al menos en Grecia, e igual con los alumnos de la escuela secundaria superior.

Observaciones y Conclusión

Los docentes e investigadores están involucrados con la enseñanza de la electricidad por el hecho de que este tema aparece en los programas del mundo entero, de la primaria y de la secundaria. La investigación de tipo diagnóstico ha sido fructuosa para identificar las dificultades de aprendizaje de los alumnos. La investigación en la enseñanza está fundamentada en enfoques constructivistas y está centrado en vías alternativas que pueden facilitar la construcción de conocimientos científicos por los alumnos. Un cambio notable es el hecho de que la enseñanza de la electricidad toma en cuenta las dificultades de los alumnos y no pretende solamente presentar contenidos de manera apropiadas.

En este caso, se decidió extender el campo experimental de manera de incluir no solamente los estados estacionarios, sino igualmente las situaciones evolutivas, de ligar los fenómenos electrocinéticos y electrostáticos, de desarrollar modelos adaptados al razonamiento causal de los alumnos, de iniciar la modelización conceptual por la tensión y la energía introduciendo esos conceptos como primarios y no como conceptos relacionales, de presentar una jerarquización de modelos permitiendo responder progresivamente a preguntas sofisticadas y conduciendo a niveles crecientes de comprensión. Los resultados de investigación permiten tener un punto de vista razonablemente optimista en relación con la eficacia de esta secuencia.

Se sugiere que, para la enseñanza de la electricidad elemental, se modifique la representación tradicional de conocimientos que son válidos pedagógicamente. Para que esta modificación se realice, un cambio conceptual debe producirse en la mente de los que conciben los programas, de los formadores de docentes y de los docentes.

REFERENCIAS

Bunge, M.(1973).*Method and Matter*. Dodrech, Holland: D.Reidel.

Van de Berg, Ed & Grosheid, W. (1993). Electricity at home: Remediating alternative conceptions through redefining goals and concept sequences and using auxiliary concepts and analogies in 9th grade electricity education. In Novak, J. (ed.): *Proceedings of the Third Intern. Seminar on Misconceptions and Educational Strategies in Science and Maths*, Ithaca, N.Y.: Cornell Univ.

Chinn, C. & Brewer W.(1993). The role of anomalous data in knowledge acquisition: A theoretical framework and implications for science instruction. *Review in Educational Research*. Vol **61**(1), pp.1-49.

Driver, R., Rushworth, P., Wood-Robinson, V., Squires, A. (Eds.) (1994). Making sense of secondary science (Research into children's ideas).

Duit R., Jung W. & Rhoneck C. (Eds) (1985). Aspects of Understanding Electricity: The proceedings of an International Workshop (I.P.N., Kiel)

Eylon, B.S., Ganiel, U., (1990). Macro-micro relationships: the missing link between electrostatics and electrodynamics in students' reasoning. *International Journal of Science Education*, Vol.12(1), pp.79-94

Frederiksen, J. & White, B. (1992). Mental models and understanding: A problem for science education. In E. Scanlon and T.O'Shea (Eds.), *New directions in educational technology*. NATO ASI series F, vol 96, 211-225. (Berlin: Springer-Verlag)

Hestenes, D., (1992). Modelling games in the Newtonian World. *American Journal of Physics*. Vol 60(8), pp.732-748.

Koumaras, P. (1989). *A study on a constructivist approach to the experimental teaching of electricity*. Unpublished Ph.D. thesis Physics Dept., Univ. of Thessaloniki (in Greek).

Koumaras, P. Psillos, D., Valassiades, O. Evagelinos D. (1991). A survey of secondary education students' ideas in the area of electricity. *Pedagogical Review* 13, 125-154. (In Greek)

Koumaras, P., Kariotoglou, P. & Psillos, D. (1994). Devons-nous utiliser des activités évolutives en introduction à l'étude de l'électricité? Le cas de la résistance. *Didaskalia*. Vol.1 (4), pp. 107-20.

Koumaras, P., Psillos, D., Kariotoglou, P., (to be published) Causal structures and counter-intuitive experiments in electricity *International Journal of Science Education*.

Licht, P. (1991). Teaching electrical energy, voltage and current: an alternative approach. *Physics Education*. Vol.26 (5), pp. 272-77.

Posner, GJ, Strike KA, Hewson PW & Gertzog, WA (1982) 'Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change', *Science Education*, 66, 211-27.

Psillos, D., Koumaras, P. & Valassiades, O. (1987). Students' representations of electric current before, during and after instruction on DC circuits. *Journal of Research in Science and Technological Education*. Vol. 5 (2), pp. 185-189.

Psillos, D., Koumaras, P. & Tiberghien, A. (1988). Voltage presented as a primary concept in an introductory teaching on D.C. circuits. *International Journal of Science Education*. Vol.10 (1), pp. 29-43.

Psillos, D. & Koumaras, P. (1993). Multiple causal modelling of electrical circuits for enhancing knowledge intelligibility in Caillot, M. (Ed.) *Learning Electricity and Electronics with Advanced Educational Technology*, ASI series Vol. F115, Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, pp. 57-75.

Lijnse, P., (1995) Trends in European Research? In Psillos D. (Ed) *Proceedings of the second PhD Summerschool on European Research in Science Education*, (15-25)Thessaloniki, Art and Text.

Scott, P.,H., Asoko H. M.& Driver, R. H. (1993). Teaching for conceptual change: A review of strategies. In Duit, R, F. Goldberg and H. Niedderer (eds) *Research in Physics Learning: Theoretical Issues and Empirical Studies*, *Proceedings of an International Workshop* (pp. 310-329). Kiel, IPN.

Schwedes, H.(1995). Teaching with Analogies. In Psillos D. (Ed.) *Proceedings of the second PhD Summerschool on European Research in Science Education* (p. 37-56), Thessaloniki : Art of Text

Shipstone, D.M. (1988). Students' understanding of simple electrical circuits. *Physics Education*. Vol.23 (2), pp.92-96.

Shipstone, D. M, Von Rhöneck, C., Jung, W., Kärrqvist, C., Dupin, J. J., Joshua, S. and Licht, P. (1988). A study of students' understanding of electricity in five European countries, *International Journal of Science Education*. Vol 10(3), pp.303-316.

Stocklmayer S., Treagust D., (1994). A Historical Analysis of Electric Currents in Textbooks: A Century of Influence on Physics Education. *Science & Education* 3, 131-154.

Tiberghien, A., Psillos,D., Koumaras,P. (1995). Physics Instruction from Epistemological and Didactical Bases. *Instructional Science* pp.1-22.

Viennot, L. (1993). Fundamental patterns in common reasoning: Examples in Physics. In P. L. Lijnse (ed.), *European Research in Science Education: Proceedings of the First PhD Summerschool*. (pp. 33-47). Utrecht, C dß Press, Centrum voor ß-Didactiek.

ⁱ Se trata de amperímetros que permiten una lectura algebraíca.