

# La historia del concepto de fuerza electromotriz en circuitos eléctricos y la elección de indicadores de aprendizaje comprensivo

(The history of the concept of electromotive force in electrical circuits and the choice of the learning indicators)

Jenaro Guisasola<sup>1</sup>, Antonio Montero<sup>2</sup> y Manuel Fernández<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Física, Universidad del País Vasco

<sup>2</sup>IES Sierra Almirante de Nerja

<sup>3</sup>Departamento de Didáctica de las Ciencias, Universidad de Granada

Recibido em 31/7/2007; Revisado em 16/10/2007; Aceito em 18/12/2007

En este trabajo consideramos la historia de la ciencia en la enseñanza de las ciencias como un instrumento útil para identificar dónde estuvieron los problemas en la construcción de los conceptos y teorías, indicando qué barreras epistemológicas hubieron de superarse y las ideas que permitieron avanzar. Desde este punto de vista hemos elaborado un marco conceptual para el concepto de fuerza electromotriz. Posteriormente hemos formulado ‘indicadores de aprendizaje’ que indican los diferentes estadios que se deben trabajar en una secuencia de enseñanza y que establecen los principales conceptos y formas de razonamiento que deben aprender los estudiantes. Mostramos que, en el caso del concepto de fuerza electromotriz, el conocimiento de las dificultades históricas y de las ideas que contribuyeron a superarlas nos proporcionan una información útil para diseñar secuencias de enseñanza y objetivos de aprendizaje bien fundamentados.

**Palabras-clave:** historia, fuerza electromotriz, indicadores de aprendizaje, diseño de secuencias de enseñanza.

In this paper we shall consider the history of science as a useful instrument for identifying where the problems lay in the construction of concepts and theories; indicating epistemological barriers that had to be overcome and the ideas that permitted advancement. From this point of view, we have developed a conceptual framework for the topic of the electromotive force. We have subsequently formulated ‘learning indicators’ that indicate the different stages that must be worked through in a learning sequence, and that establish the major concepts and ways of reasoning that students should learn. We shall show that in the case of electromotive force, knowledge of the historical difficulties, and of the ideas that contributed to overcoming these difficulties, furnished us with useful information for designing solidly based teaching sequences and learning objectives.

**Keywords:** history of electricity, electromotive force, learning indicators, teaching sequence design.

## 1. Introducción

Actualmente existe un consenso en que la comprensión de conceptos y teorías exige conocer no sólo las definiciones actuales sino también el contexto de indagación donde se construyeron y desarrollaron [1-7]. La estructura de la ciencia, la naturaleza de la metodología científica y la validación de los juicios de los científicos, son algunas de las áreas en las que la historia y filosofía de la ciencia puede representar un componente de enriquecimiento de la Enseñanza de las Ciencias. Los conceptos y teorías científicas no emergen milagrosamente sino que son el resultado de un proceso arduo de resolución de problemas y de contrastación rigurosa de hipótesis iniciales [8]. En consecuencia conocer el desarrollo de las ideas explicativas que dieron lugar al modelo

científico actual puede aportar información importante a la hora de diseñar secuencias de enseñanza [9].

Existen múltiples argumentos que defienden la inclusión de la historia de la ciencia en el curriculum y especialmente en las estrategias de aprendizaje [10-14], pero muy pocos estudios que exploran esta perspectiva en la selección de conocimientos que ayuden a realizar secuencias de enseñanza de la Física han sido publicados. En este trabajo consideramos la historia de la ciencia en la enseñanza de las ciencias como un instrumento útil para identificar dónde estuvieron los problemas en la construcción de los conceptos y teorías, indicando qué barreras epistemológicas hubieron de superarse y las ideas que permitieron avanzar, el contexto social y las repercusiones tecnológicas que tuvieron y tienen los conocimientos adquiridos. A partir de esta

<sup>1</sup>E-mail: jenaro.guisasola@ehu.es.

información es posible elaborar secuencias de enseñanza que puedan ayudar a mejorar de forma significativa el aprendizaje de conceptos y teorías. Sin embargo, para que esta información sea útil en la tarea de diseñar la secuencia didáctica, se requiere un estudio histórico y epistemológico realizado con ‘intencionalidad didáctica’ y conocer las dificultades de aprendizaje de los estudiantes.

En el trabajo que presentamos hemos elegido como campo de estudio el concepto de Fuerza Electromotriz. Un conjunto de razones interrelacionadas convergen en la elección de esta idea. En primer lugar la noción está incluida en los programas de Bachillerato (16-18 años) y primer curso de ciencias e ingeniería en la universidad. En segundo lugar, es un prerrequisito básico para explicar el funcionamiento de un circuito de corriente continua. Desde un punto de vista científico, en el contexto de circuitos eléctricos sencillos, la fuerza electromotriz es una magnitud que cuantifica la energía cedida a la unidad de carga por el generador eléctrico. En la pila tienen lugar una serie de ‘acciones eléctricas no electrostáticas’ a través de las cuales se suministra energía a la unidad de carga y esta energía se cuantifica mediante la magnitud ‘fuerza electromotriz’ [15] Así pues, en física el concepto de fuerza electromotriz se define de forma muy específica en relación con los conceptos de carga, potencial, campo eléctrico e intensidad de corriente y se utiliza para explicar el comportamiento de los generadores eléctricos en los circuitos.

Desde el punto de vista de la Epistemología de la ciencia el análisis de la controversia que llevó a una interpretación electrodinámica de los circuitos eléctricos, que empezó con la explicación de Volta y que continuó durante la primera mitad del siglo XIX con las aportaciones de Ohm y Kirchhof, no se puede subestimar. El concepto de fuerza electromotriz es relevante ya que corresponde al período de historia de la electricidad donde se produce la transición de la electrostática a la electrocinética, con las grandes repercusiones a nivel tecnológico y de investigación que este hecho produjo en el primer cuarto del siglo XIX [16-18]. Un ejemplo de esta innovación en lo tecnológico es el caso de la pila, el asunto es tan espectacular que difícilmente se podría concebir ahora una sociedad sin ellas; marcapasos, aparatos para sordos, telefonía móvil, un gran número de electrodomésticos...etc.

El trabajo que aquí presentamos pretende elaborar un marco conceptual basado en la historia y epistemología de la ciencia que nos permita responder a cuestiones como:

a) ¿Cuál es el problema que está en el origen del concepto de fuerza electromotriz que queremos enseñar a nuestros estudiantes?, ¿Qué obstáculos hubieron de superarse y qué ideas contribuyeron a la superación de los mismos?, ¿Qué dificultades pueden tener los estudiantes para aprender las ideas necesarias que constituyen el concepto de fuerza electromotriz?

b) Formular indicadores de aprendizaje del concepto de fuerza electromotriz basados en el marco conceptual anterior y que puedan ser útiles para diseñar una secuencia de enseñanza de este concepto. ¿Cuáles son los conocimientos que los estudiantes deberían conocer para entender el funcionamiento de la pila en un circuito sencillo de corriente continua? ¿qué problemas podrían ser adecuados para la organización de la enseñanza?

A continuación se esbozan las principales dificultades que se produjeron en el desarrollo del concepto de fuerza electromotriz a lo largo de la historia. Posteriormente estableceremos los indicadores de aprendizaje del concepto de fuerza electromotriz que serán de utilidad en el diseño de una secuencia de enseñanza de este concepto.

## 2. La transición de la electrostática a la electrocinética durante la primera mitad del siglo XIX

Entre finales del siglo XVIII y principios del siglo XIX el trabajo de relevantes científicos como Coulomb, Lagrange y Poisson, entre otros, permite establecer de manera definitiva los fundamentos matemáticos de la electrostática definiendo magnitudes, a la vez que se utilizan las herramientas del cálculo analítico [16, 19-23].

En este sentido Coulomb cuantifica la teoría de ‘acción a distancia’ para los efectos eléctricos definiendo la carga de forma operativa en base a sus efectos dinámicos. El avance en la construcción conceptual se hace evidente si se tienen en cuenta que ya Franklin había introducido el concepto de “cantidad de sustancia eléctrica”, pero ni él ni sus sucesores fueron capaces de medirla. Coulomb se vale de su balanza de torsión eléctrica para deducir y enunciar su famosa ley, que más tarde amplía a las atracciones eléctricas usando un péndulo eléctrico [23].

### 2.1. Los trabajos de Volta y el concepto de fuerza electromotriz

En los años siguientes a los experimentos de Galvani (1789), Volta trataba de establecer que el “fluido galvánico”, de origen animal, era de la misma naturaleza que la electricidad ordinaria, es decir, estática [24]. En el seno de la polémica acerca de la naturaleza de la electricidad, Volta descubre que cuando dos piezas descargadas de metales diferentes se ponen en contacto, ya sea directamente o con la intervención de un electrolito, los dos metales llegan a cargarse y permanecen cargados a pesar del hecho de que hay un excelente camino conductor, un circuito cerrado, a través del cual las cargas podían fluir para neutralizarse entre sí [16, 19, 21, 25]. Hay una clara violación de la electrostática en este hecho, ya que según lo que se conocía de electrostática, cargas opuestas no se pueden separar o si lo

hacen vuelven a recombinarse.

Volta declara que una nueva clase de “fuerza” o capacidad actuaba sobre las cargas separándolas y manteniéndolas separadas y nombró la acción como fuerza electromotriz, nombre con el que se la conoce desde entonces [17, 25, 26]. Estas explicaciones para describir el funcionamiento de la pila no encajaban con el marco teórico de la Física de la época. En el paradigma coulombiano dominante en el primer tercio del siglo XIX la fuerza electromotriz definida por Volta se reducía a la capacidad que tenían algunos cuerpos para generar electricidad en otros [19].

### 3. El desarrollo de la electrodinámica y el concepto actual de fuerza electromotriz

Ohm realiza una aportación trascendente en las explicaciones acerca de los circuitos eléctricos al obtener una serie de resultados experimentales que permitieron la construcción de la primera teoría coherente de la conducción eléctrica. En su libro “El circuito galvánico investigado matemáticamente” [27] Ohm definió su noción de “fuerza electroscópica” antecedente inmediato del potencial eléctrico para el caso de los circuitos eléctricos. Posteriormente, definió la magnitud ‘tensión’ (en sus escritos en alemán utilizó la palabra ‘spannung’) en una porción del circuito como la diferencia entre las “fuerzas electroscópicas” en sus extremos.

Del mismo modo que Fourier en su teoría distingue entre calor y temperatura, suponiendo que el flujo de calor entre dos partes adyacentes de un sistema es proporcional a sus temperaturas, la teoría de Ohm hace de la *cantidad de electricidad* la variable crítica, haciendo descansar sobre la *densidad superficial de carga (fuerza electroscópica)* el mismo papel que matemáticamente jugaba la temperatura en la teoría de Fourier. La fuerza electroscópica se medía con un ‘instrumento electrostático’ como un termómetro mide la temperatura [27]. El modelo de Ohm se encontraba situado en el paradigma electrostático.

Cuando alrededor de 1847 Kirchhoff aborda el estudio de las leyes de Ohm, el electromagnetismo está mucho más elaborado y las distancias entre electricidad y galvanismo se han reducido, existen suficientes semejanzas y el paradigma electrostático, en Alemania más aun, no es el que prevalece [27]. El físico alemán, tras el análisis de los trabajos de Ohm sobre la conducción y de Kohlrausch acerca de la medida de tensiones en condensadores, identifica la fuerza electroscópica de Ohm con la diferencia de potencial [27-28]. Esta identificación sólo fue posible desde el cambio que supuso la introducción del concepto de energía, esta nueva perspectiva permite la interpretación global macroscópica de los circuitos eléctricos. El propio Helmholtz utilizó

los trabajos de Kirchhoff en sus elaboraciones últimas acerca del principio de conservación de la energía publicado en 1847.

Los modelos explicativos sobre la corriente eléctrica recibieron nuevos impulsos con la teoría de campo iniciada por Faraday y fundamentada posteriormente por Maxwell en 1865. Este marco conceptual permite desarrollar el concepto de energía asociada al campo, ya sea éste conservativo (energía potencial) o no conservativo (fuerza electromotriz en el caso de la pila en circuitos de corriente continua y en fenómenos de inducción electromagnética). Es en este paradigma energético y de campo donde actualmente definimos los conceptos de potencial eléctrico y fuerza electromotriz [15]. Dos conceptos epistemológicamente relacionados pero distintos, al igual que ocurre con otros conceptos como, por ejemplo, fuerza y aceleración en dinámica.

#### 3.1. Definición actual de fuerza electromotriz para circuitos de corriente continua

Vamos a limitar nuestras definiciones al caso de circuitos eléctricos de corriente continua estacionaria, es decir, constituidos por una pila, cables de conducción y resistencias. Para estas configuraciones la fem mide la energía que la pila suministra a la unidad de carga que atraviesa cualquier sección del circuito. Este tipo de proceso realizado en la pila suele consistir en una serie de reacciones químicas que de manera general podemos llamar “acciones no conservativas” [29]. La fuerza electromotriz, en el caso de la pila, es la causa de una separación de cargas de distinto signo entre sus electrodos y por tanto, la causa de una diferencia de potencial constante entre sus electrodos.

Si aplicamos la definición de fem como el trabajo necesario sobre la unidad de carga para describir una línea cerrada (circuito) obtenemos la definición operativa de fuerza electromotriz [30-31].

$$fem = \oint (\mathbf{E} + \mathbf{E}') d\ell.$$

Como el campo  $\mathbf{E}$  es conservativo su integral a lo largo de una línea cerrada es cero y como el campo  $\mathbf{E}'$  corresponde sólo a las acciones no conservativas dentro de la pila se definirá entre los extremos  $a$  y  $b$ . Así pues

$$fem_{ab} = \int_a^b \mathbf{E}' d\ell. \quad (1)$$

En conclusión, la fuerza electromotriz es una magnitud que cuantifica una transferencia de energía (de la pila a las cargas del circuito) asociada a un campo no conservativo.

A modo de resumen de este desarrollo explicativo, en el Cuadro 1 recogemos las principales ideas de los diferentes modelos implícitos en la descripción realizada.

Cuadro 1 - Diferentes modelos explicativos de la pila en un circuito sencillo de corriente continua.

Hechos experimentales en relación con la función de la pila en un circuito	Modelo de Volta	Modelo coulombiano	Modelo de Ohm	Modelo de Kirchoff
- Pila de Volta Al poner en contacto dos metales diferentes a través de un “conductor húmedo” se encuentra que cada uno de ellos adquiere una carga neta y opuesta en signo	La ‘fuerza electromotriz’ de la pila es la capacidad para separar cargas y mantenerlas separadas	La fuerza electromotriz de la pila no es otra cosa que la capacidad que tienen algunos cuerpos de generar electricidad en otros	Noción de ‘fuerza electroscópica’, relacionada con la densidad superficial de carga	La fuerza electromotriz que separa las cargas en la pila mide la energía que se da a la unidad de carga que circula por el circuito. La pila genera diferencia de ‘fuerza electroscópica’ que es identificada como la magnitud diferencia de potencial definida por Poisson
- Electricidad y cuerpos cargados	Magnitud cualitativa. Fluido eléctrico	Magnitud cuantitativa. Fluido eléctrico	Magnitud cuantitativa. Fluido eléctrico	Magnitud cuantitativa La noción de fluido eléctrico empieza a cuestionarse
- Corriente eléctrica en un circuito	No se sabe medir	No se sabe medir	La corriente se debe a diferencia entre dos puntos de valores de ‘fuerza electroscópica’	Magnitud cuantitativa, puede medirse con el galvanómetro
- Circuitos eléctricos rudimentarios de corriente continua	Noción de circuito cerrado	Cuerpos cargados con electricidad de distinto signo se atraen a través de un conductor que los une	Analogía con la teoría del calor de Fourier. La corriente eléctrica circula por el circuito debido a la diferencia entre los valores de ‘fuerza electroscópica’ (densidad superficial de carga) entre dos puntos del mismo	La corriente circula debido a la diferencia de potencial entre dos puntos del circuito. Considera el movimiento de corriente como un balance entre la energía generada por la pila y la consumida en el circuito

El término ‘modelo’ es polisémico y por tanto puede ser utilizado para expresar diferentes significados. Nosotros lo utilizamos aquí como un esquema abstracto de la realidad, entendiendo que esta realidad puede pertenecer al mundo de los fenómenos o de los conceptos [32], el papel del modelo es relacional o de intermedio y, juega un importante papel en la comprensión del hecho analizado, en este caso nosotros lo hemos utilizado para comprender mejor un proceso de captura conceptual.

#### 4. Indicadores de aprendizaje comprensivo del concepto de fuerza electromotriz en circuitos sencillos de corriente continua

En cualquier campo de las ciencias nos encontramos con una gradación de teorías y modelos capaces de explicar y predecir un cada vez mayor número de fenómenos [33]. Cuanto mayor sea la variedad y precisión de fenómenos a explicar, más compleja será la teoría explicativa capaz de explicarlos. En el caso que nos ocupa, nos parece que el *modelo de Kirchoff (ampliado con los conceptos*

*actuales de carga, trabajo y energía)* explica racionalmente por qué la pila separa cargas de diferente signo, qué sucede cuando se conecta la pila a un conductor con resistencias y, por qué se mueve la corriente a lo largo de todo el circuito. Este modelo no entra en contradicción con el modelo actualmente aceptado, al contrario el modelo actual viene a complementarlo y a explicar con mayor precisión y predicción los fenómenos que suceden en el circuito. El modelo nos parece adecuado para enseñar circuitos sencillos de corriente continua a estudiantes de Bachillerato (16 años) que se están iniciando en el estudio de la electricidad. Es decir, el modelo de Kirchoff (con los conceptos actuales de carga, trabajo y energía) nos parece un modelo intermedio pero que es suficientemente coherente y predictivo como para que los estudiantes puedan construir una explicación satisfactoria del funcionamiento de la pila en un circuito de corriente continua desde el punto de vista científico. De hecho, el modelo contiene todos los conocimientos que se contemplan en el currículum español de electricidad para Bachillerato (16-18 años) y que se intentan enseñar aunque con escaso éxito (como muestra la investigación en enseñanza de las ciencias). En el currículum español de Bachillerato, los estudiantes se introducen en el estu-

dio de los circuitos eléctricos después de un análisis muy elemental de campo y potencial eléctricos en electrostática. Frecuentemente la enseñanza no relaciona el estudio de los circuitos eléctricos con los conceptos de electrostática.

De acuerdo con todo lo anterior, hemos considerado que la pregunta-problema en torno a la que organizar la secuencia de enseñanza para una formación básica, es *¿cómo y por qué se genera corriente eléctrica de forma continua en un circuito sencillo?* El objetivo a conseguir con los estudiantes sería que fueran capaces de explicar qué propiedad tiene la pila para generar corriente eléctrica en un circuito y cómo se mide esa propiedad, construyendo el concepto de fuerza electromotriz dentro de un modelo funcional (el modelo de Kirchhof).

No basta con escoger el problema que nos guíe en la selección de conocimientos que queremos que aprendan nuestros estudiantes. Es necesario concretar más la secuencia de ideas potencialmente relevantes para llegar a comprender el concepto de fuerza electromotriz dentro del modelo y superar los posibles obstáculos de comprensión. Estas concreciones no son otra cosa que los indicadores de aprendizaje. El concepto de ‘indicadores de aprendizaje’ nos permite secuenciar los principales estadios que deben trabajar los profesores al diseñar el programa de enseñanza. Nosotros utilizamos este concepto para especificar los conceptos más significativos y las formas de razonamiento que constituyen los objetivos de aprendizaje para los estudiantes [34]. A continuación presentamos los indicadores de aprendizaje elaborados para una comprensión adecuada del concepto de fuerza electromotriz en el modelo de Kirchhof (ampliados con los conceptos actuales de carga, trabajo y energía).

1) Es bien conocido que las cargas se desplazan a través de un conductor cuando existe una diferencia de potencial entre sus extremos. Así pues, a la hora de construir un modelo explicativo del movimiento de las cargas en un circuito sencillo de corriente continua como el de la Fig. 1 es necesario conocer que *para que las cargas se desplacen a través de un hilo conductor es necesaria la existencia de diferencia de potencial entre los puntos a y b del hilo.*

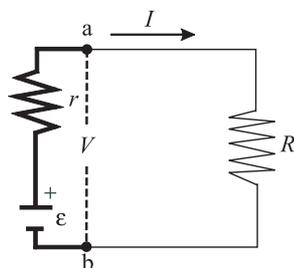


Figura 1 - La parte en trazo más grueso representa la parte del circuito constituido por la pila. La parte dibujada en trazo más fino representa el resto del circuito.

2) Una de las formas de generar diferencia de poten-

cial consiste en separar cargas de distinto signo en una zona del espacio y, en el caso de un circuito de corriente continua, esta función la realiza la pila. Por tanto, será necesario conocer que *la necesidad de definir el concepto de fuerza electromotriz procede del hecho de que la pila separa cargas y crea una diferencia de potencial.* En el interior de la pila sobre las cargas actúan fuerzas de naturaleza distinta: fuerzas no electrostáticas (acciones no conservativas) y fuerzas de repulsión electrostáticas (acciones conservativas).

3) La medida cuantitativa de la energía puesta en juego en la pila para separar las cargas (y mantenerlas separadas) viene dada de forma operativa por el trabajo realizado por las fuerzas no conservativas  $fem_{ab} = \int_a^b \frac{\mathbf{F}_{no-conservativa}}{q} d\ell$  (nivel interpretativo) y, por la diferencia de potencial y la intensidad de corriente  $\varepsilon = \Delta V + Ir$  (nivel empírico). Así pues, es necesario conocer que *la fuerza electromotriz es la magnitud que mide el trabajo realizado por fuerzas no conservativas para separar las cargas y desplazarlas hasta los electrodos.*

4) La diferencia de potencial que medimos entre los puntos a y b, pertenece a la parte exterior del circuito (en trazo fino en la Fig. 1) y se corresponde con el trabajo realizado al mover la unidad de carga dentro de un campo eléctrico conservativo. En este sentido la definición operativa de la diferencia de potencial viene dada a nivel interpretativo como  $V_{ab} = - \int_a^b \frac{\mathbf{F}_{coulombiana}}{q} d\ell$  y a nivel empírico como  $V_{ab} = IR$ . *La diferencia entre la fuerza electromotriz y la diferencia de potencial viene dada por medir diferentes tipos de acciones producidas por causas radicalmente diferentes.* La primera debida a fuerzas no conservativas y la segunda a fuerzas conservativas. Lo anterior implica conocer que *la fuerza electromotriz es una magnitud que cuantifica una transferencia de energía (de la pila a las cargas del circuito) asociada a una acción no conservativa.*

5) De los comentarios anteriores se deduce que *la ‘fuerza electromotriz’ (fem) es una propiedad de los generadores de energía eléctrica y no es una propiedad ni del circuito ni de las cargas.*

6) Utilizar reiteradamente las estrategias del trabajo científico. Por ejemplo, analizar cualitativamente situaciones problemáticas, concebir hipótesis de trabajo, diseñar y realizar experimentos, obtener modelos con las limitaciones adecuadas, interpretar físicamente datos numéricos, análisis crítico de proposiciones ...en el contexto de un circuito de corriente continua compuesto por pilas y resistencias.

7) Saber analizar aplicaciones CTS que permitan contextualizar la teoría aprendida y que les permita en un futuro, como ciudadanos que son, adoptar actitudes responsables hacia el desarrollo tecnológico y las implicaciones de carácter social que ello conlleva.

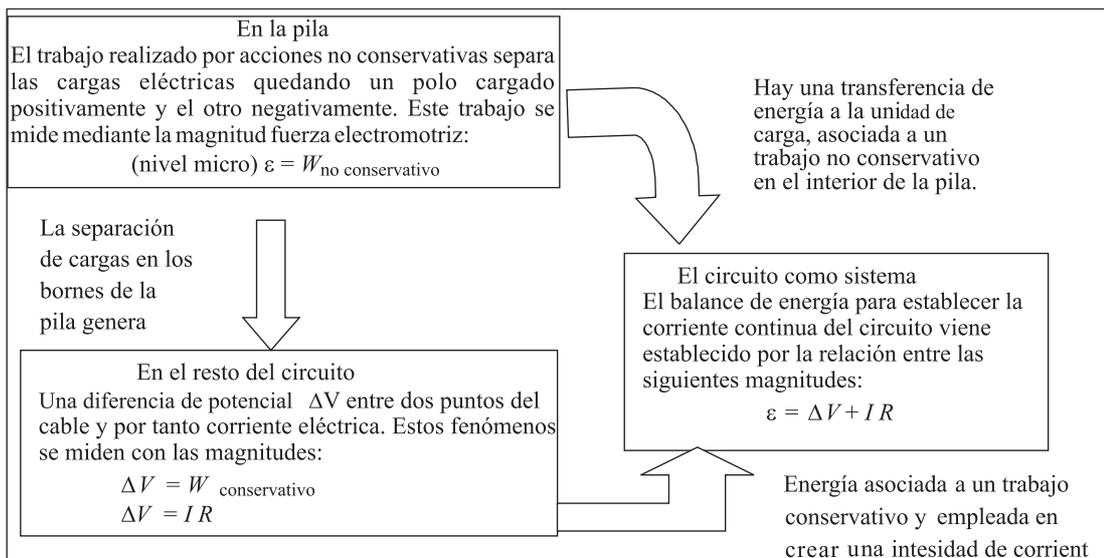
Estos indicadores de enseñanza configuran un universo de conceptos donde adquiere significado la noción de fuerza electromotriz en relación con otros conceptos

que forman el modelo explicativo de cómo y por qué se genera corriente eléctrica de forma continua en un circuito sencillo. El Cuadro 2 muestra estas relaciones.

El análisis histórico y epistemológico no sólo nos permite tomar decisiones sobre los contenidos de la secuencia de aprendizaje, sino que también nos permite identificar los obstáculos que hubo que superar hasta llegar a la explicación dada por Kirchof que per-

mitió una solución compatible con la teoría científica actual. Diferentes trabajos en la enseñanza de las ciencias muestran la conveniencia de tener en cuenta dichos obstáculos históricos a la hora de diseñar estrategias de enseñanza [13, 35-36]; otras investigaciones han señalado reiteradamente dificultades de aprendizaje que están relacionadas con los indicadores señalados [37-44] y que mostramos de forma resumida en el Cuadro 3.

Cuadro 2 - Mapa del universo de conceptos utilizados en el modelo explicativo del funcionamiento de un circuito de corriente continua.



Cuadro 3 - Relación de indicadores y dificultades de aprendizaje.

Indicadores de aprendizaje	Dificultades
<ul style="list-style-type: none"> <li>- La diferencia de potencial provoca el movimiento de las cargas a lo largo de un conductor.</li> <li>- Una forma de generar diferencia de potencial es mediante la separación de cargas. En el caso de una pila esta separación es un trabajo realizado por fuerzas no conservativas.</li> <li>- La magnitud que mide el trabajo realizado por las fuerzas no conservativas al separar las cargas en la pila se denomina fuerza electromotriz. Como consecuencia, la fuerza electromotriz es una propiedad de la pila del circuito.</li> <li>- Los estudiantes utilizarán argumentos acompañados de justificaciones racionales basados en el cuerpo teórico de la ciencia y en estrategias propias del trabajo científico.</li> <li>- Saber analizar aplicaciones ciencia-tecnología-sociedad que permitan contextualizar la teoría aprendida.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Los estudiantes tienen dificultades en distinguir el nivel empírico (corriente eléctrica) con el nivel interpretativo (diferencia de potencial). Suelen identificar la diferencia de potencial con una propiedad de las cargas y no del circuito.</li> <li>- La mayoría de los estudiantes no conciben la fuerza electromotriz como una acción no electrostática y no conservativa que da lugar a la separación de cargas de distinto signo en la pila. Como consecuencia, no distinguen entre fuerza electromotriz y diferencia de potencial.</li> <li>- No está claro para los estudiantes lo que mide la magnitud fuerza electromotriz y la asocian con una propiedad de las cargas eléctricas.</li> <li>- La mayoría de los estudiantes no distinguen entre nivel empírico y nivel interpretativo al analizar la pila en un circuito eléctrico, mostrando razonamiento propio del pensamiento de sentido común.</li> <li>- La confusión conceptual y el poco aprendizaje del modelo explicativo impiden que los estudiantes sepan valorar la importancia del estudio en las aplicaciones tecnológicas de la vida diaria.</li> </ul>

Una vez elegidos los indicadores de aprendizaje será necesario concretar la secuencia de enseñanza que se trabajará con los estudiantes, que se concretará en actividades de aula que hagan que existan oportunidades reiteradas de aplicar las características del trabajo científico para ir resolviendo los problemas. Estas actividades también enfrentarán directamente los posibles obstáculos que puedan tener los estudiantes para avanzar en el modelo explicativo. Estas concreciones serán objeto de posteriores trabajos.

## 5. Implicaciones para la enseñanza

El interés desde el punto de vista didáctico de las nociones de fuerza electromotriz y diferencia de potencial, así como su distinción, no era un problema para los físicos del siglo XIX, ambos conceptos se fueron concretando en el curso de investigaciones que querían explicar coherentemente los fenómenos eléctricos tanto los electrostáticos como los que no lo son, así como sus usos y aplicaciones. Por tanto y como consecuencia de lo que fueron las prioridades del trabajo de los científicos de la época, los hitos en el establecimiento del concepto que nos ocupa no se pueden señalar con nitidez sino en relación con los resultados de otros trabajos, en el seno de los cuales los conceptos de fuerza electromotriz y diferencia de potencial electrostático se fueron clarificando. Una clara implicación para la enseñanza es la necesidad de introducir los conceptos de fuerza electromotriz y de diferencia de potencial contextualizados en el problema de buscar una explicación a la forma en que funciona una pila en un circuito de corriente continua formado por cables y resistencias.

El estudio realizado apunta las grandes dificultades teóricas que hubo para unificar la electricidad estática y la corriente eléctrica, así como para la generalización de los conceptos utilizados en electrostática a la electrocinética. Una consecuencia para la enseñanza es la necesidad de introducir el concepto de diferencia de potencial de un circuito como una magnitud que explica el movimiento de cargas entre dos puntos de un conductor. Será necesario ofrecer a los estudiantes actividades que les permitan contrastar la potencia explicativa y predictiva del concepto de diferencia de potencial frente al concepto de diferencia de 'cantidad de carga eléctrica' en los fenómenos de movimiento de cargas en un conductor o en un circuito.

La historia de la ciencia nos muestra que sólo a partir de la explicación de los circuitos de corriente continua en términos de energía, es decir, en términos de diferencia de potencial (trabajo de fuerzas conservativas) y de fuerza electromotriz (trabajo de fuerzas no conservativas), es posible una comprensión científica de los mismos. Esto nos ha permitido realizar una elección justificada de indicadores de aprendizaje que clarifique los objetivos de aprendizaje para enseñar los circuitos de corriente continua. Pensamos que esta apor-

tación es relevante ya que uno de los problemas que resalta la investigación en enseñanza de las ciencias en el área del electromagnetismo es la falta de consenso en la elección de objetivos de enseñanza para las secuencias enseñanza-aprendizaje. Como indican Mulhall *et al.* [45] "Simplifications are necessarily in physics teaching... The essential issue being illustrated by the above quotes is that these simplifications (in the area of electricity) are idiosyncratic (to the textbook, and also then to the teacher), confused and therefore confusing to students" (p. 582). Así mismo, diferentes estudios empíricos sobre las ideas y tipo de razonamientos utilizados por los estudiantes en esta temática (ver Cuadro 3 y Refs. [37-44]) coinciden en confirmar la relevancia didáctica de los indicadores elegidos.

Por último señalar, que si bien establecer una reciprocidad entre las dificultades que históricamente hubieron de superarse y las dificultades de los estudiantes es una ingenuidad, entre otras cosas porque los contextos culturales son bien diferentes, no cabe duda de que la historia de la ciencia a través de la resolución de los problemas a lo largo del tiempo, nos da una buena oportunidad para no subestimar las dificultades de nuestros estudiantes y seleccionar conocimientos, problemas y actividades que traten de superarlas.

## Referencias

- [1] J.A. Acevedo-Díaz, A. Vázquez-Alonso, M<sup>a</sup>.A. Manassero-Mas y P. Acevedo-Romero, *Revista EUREKA sobre Enseñanza y Divulgación Científica* **4**, 202 (2007).
- [2] A. Cleminson, *Journal in Science Teaching* **27**, 429 (1990).
- [3] R.A. Duschl, in *Improving Science Education- The contribution of Research*, edited by R. Millar, J. Leach and J. Osborne (Open University Press, Buckingham, 2000), p. 187-206.
- [4] M.R. Matthews, *Science Teaching: The Role of History and Philosophy of Science* (Routledge, Nueva York, 1994).
- [5] W.F. McComas, M.P. Clough and H. Almazora, in *The Nature of Science in Science Education*, edited by W.F. McComas (Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 2000), p. 3-39.
- [6] D. Rudge and E. Home, *The Science Teacher* **71**, 52 (2004).
- [7] J.H. Wandersee, *Journal of Research in Science Teaching* **29**, 423 (1992).
- [8] N.J. Nersiseian, *Science Education* **4**, 203 (1995).
- [9] R.A. Duschl, in *Handbook of Research on Science Teaching and Learning*, edited by D.L. Gabels (McMillan Pub.Co. Nueva York, 1994), p. 443-465.
- [10] M. Clough and J. Olson, *The Science Teacher* **71**, 28 (2004).
- [11] D. Gil, *Enseñanza de las Ciencias* **11**, 197 (1993).

- [12] M. Izquierdo and A. Aduriz-Bravo, *Science & Education* **12**, 27 (2003).
- [13] F. Seroglou, K. Panagiotis and T. Vassilis, *Science and Education* **7**, 261 (1998).
- [14] J. Solomon, *Studies in Science Education* **37**, 85 (2002).
- [15] R. Chabay and B. Sherwood, *Matter and Interactions* (Jhon Wiley & Sons, Nova Iorque, 2002), v. 2.
- [16] G. Sutton, *Historical Studies in the Physical Sciences* **11**, 329 (1981).
- [17] P.L. Willians, *History of Science* **1**, 1 (1962).
- [18] N.M. Wise, *Electromagnetic Theory in the Ninetenth Century, Companion to the History of Modern Science* (Routledge, London/Nova Iorque, 1990).
- [19] T.M. Brown, *Historical Studies in the Physical Sciences* **1**, 61 (1969).
- [20] J.Z. Buchwald, *Historical Studies in the Physical Sciences* **8**, 101 (1977).
- [21] R. Fox, *Laplacian Physics, Companion to the History of Modern Science* (Routledge, London/Nova Iorque, 1990).
- [22] E. Frankel, *Historical Studies in the Physical Sciences* **8**, 33 (1977).
- [23] H Guerlac, *Historical Studies in the Physical Sciences* **7**, 193 (1976).
- [24] D.L. Hurd and J.J. Kipling, *The Origins and Growth of Physical Science* (Penguin Books, Baltimore, 1958).
- [25] J. Aguilar, *Revista Española de Física* **15**, 50 (2001).
- [26] G. Pancaldi, *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* **21**, 123 (1990).
- [27] R.N. Varney and L.H. Fisher, *American Journal of Physics* **48**, 405 (1980).
- [28] T. Archibald, *Centaurus* **31**, 141 (1988).
- [29] E. Whittaker, *A History of the Theories of Aether and Electricity* (Tomash Publishers, London, 1951).
- [30] F.W. Sears and M.W. Zemansky, *Física* (Aguilar Ediciones, Madrid, 1966).
- [31] L.G. Chambers, *An introduction to the Mathematics of Electricity and Magnetism* (Chapman and Hall, London, 1973).
- [32] R. Wangsness, *Campos Electromagnéticos* (Limusa, México, 1999).
- [33] R. Justi and J. Gilbert, *International Journal of Science Education* **22**, 993 (2000).
- [34] U. Besson, L. Viennot and J. Lega, en *Science Education Research in the Knowledge-Based Society*, editado por D. Psillos, P. Kariotoglou, V. Tselfes, E. Hatzikraniotis, G. Fassouloupoulos y M. Kallery (Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, 2003), p. 221-229.
- [35] J. Leach and P. Scott *Studies in Science Education* **38**, 115 (2002).
- [36] A. Benseghir and J.L. Closset, *International Journal of Science Education* **18**, 179 (1996).
- [37] C. Furió, J. Guisasola and J.M. Almudí, *Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education* **4**, 291 (2004).
- [38] R. Duit and W. Jung, *Aspects of Understanding Electricity* (Christoph von Rhöneck, Kiel, 1985).
- [39] J. Guisasola, A. Montero y M. Fernández, *Enseñanza de las Ciencias* **23**, 47 (2005).
- [40] J. Guisasola, J.L. Zubimendi, J.M. Almudi and M. Ceborio, in *Contributions from Science Education Research*, edited by R. Pintó and D. Couso (Springer Editorial, The Netherlands, 2007).
- [41] C.H. Guruswamy, M.D. Somers and R.G. Hussey, *Physics Education* **32**, 91 (1997).
- [42] D.P. Maloney, T.L. O'Kuma, C.J. Hieggelke and A. Van Heuvelen, *Physics Education Research* **69**, 12 (2001).
- [43] A. Metioui, C. Brassard, J. Lévassieur and M. Lavoie, *International Journal of Science Education* **18**, 193 (1996).
- [44] B.A. Thacker, U. Ganiel and D. Boys, *Physics Education Research* **67**, S25 (1999).
- [45] P. Mulhall, B. McKittrick and R. Gunstone, *Research in Science Education* **31**, 575 (2001).