

# Análisis y profundización de conceptuaciones científicas en el contexto de una investigación educativa. Procesos energéticos en circuitos resistivos puros de corriente continua

REVISTA  
DE  
ENSEÑANZA  
DE LA  
FÍSICA

Sandra Velazco <sup>1</sup>, Julia Salinas <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Bioquímica, Química y Farmacia, Universidad Nacional de Tucumán CP 4000, Tucumán, Argentina.

<sup>2</sup>Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán CP 4000, Tucumán, Argentina.

E-mail: svelazco@herrera.unt.edu.ar

## Resumen

El trabajo forma parte de una investigación más amplia referida al aprendizaje de procesos energéticos en circuitos eléctricos simples de corriente continua. El estudio de antecedentes muestra la relevancia de una profundización, desde un punto de vista científico, en el tema abordado. Se destaca que este análisis constituye un aspecto central para la investigación, favoreciendo la identificación de núcleos de dificultad, contribuyendo a la definición del problema y a la enunciación de hipótesis y sirviendo como marco de referencia para interpretar y evaluar las respuestas de los estudiantes.

Se presenta una caracterización cualitativa del concepto de energía y algunos procesos vinculados a ella. Se distingue entre una interpretación energética macroscópica y microscópica. Se particulariza al caso de un circuito resistivo puro de corriente continua.

**Palabras clave:** Energía, Interpretación, Circuitos resistivos de corriente continua.

## Abstract

The work is part of a wider research which refers to the learning of energy processes in simple DC circuits. The background study shows the relevance of a deepening, from a scientific point of view, in the topic addressed. It is emphasized the fact that this analysis is a central aspect for the research since it favors the identification of difficulties, it contributes to the definition of the problem and the statement of hypotheses and it also serves as a framework for interpreting and evaluating the students' responses. A qualitative characterization of the concept of energy and some processes related to it are presented. A distinction is made between macroscopic and microscopic interpretation of energy. The case of a pure resistive DC circuit is highlighted.

**Keywords:** Energy, Interpretation, Resistive DC circuits.

## I. INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Este trabajo forma parte de una investigación más amplia referida a la problemática educativa planteada por el aprendizaje de una interpretación energética de fenómenos eléctricos, a nivel universitario básico. Específicamente, se consideró una perspectiva energética del comportamiento de circuitos eléctricos simples de corriente continua.

La metodología utilizada durante la investigación incluyó, como un aspecto central, la profundización, desde un punto de vista científico, en el análisis del funcionamiento de los sistemas físicos involucrados. Este análisis jugó un papel sumamente relevante en todo el proceso de indagación.

El estudio de la bibliografía, que comentamos en el próximo apartado, mostró que existe un debate bastante actual sobre la interpretación de la noción de energía y algunos procesos vinculados a ella. Por otra parte, se han detectado algunos errores conceptuales en libros de texto y la escasez de tratamientos cualitativos detallados y rigurosos, sobre una interpretación energética de los fenómenos físicos en general y eléctricos en particular.

Este panorama sugirió la relevancia de realizar una profundización en las concepciones y procesos vinculados a una interpretación energética de fenómenos eléctricos. Se esperaba que, entre otros aspectos, este proceso favoreciera la identificación de núcleos de dificultad en el aprendizaje del tema.

Por otra parte, en una primera etapa exploratoria de la investigación, las actividades realizadas se caracterizaron por una fuerte interacción y realimentación entre distintos aspectos: la observación cualitativa y no estructurada de las ideas expresadas por los estudiantes, el marco teórico (en particular el relacionado con la interpretación energética científica de los fenómenos intervinientes) y la elaboración de experiencias piloto y análisis de los primeros resultados obtenidos en ellas. Este proceso “en espiral” posibilitó una inmersión gradual en el problema investigado y la progresiva definición del mismo, redundando en una enunciación, cada vez más precisa, de un conjunto de hipótesis tentativas (Villani y Pacca, 2001), así como en la elaboración de un primer conjunto de situaciones problemáticas que formarían parte del cuestionario definitivo administrado a los estudiantes.

En el apéndice 1 se muestran las hipótesis generales enunciadas. Cabe señalar que la formulación de las distintas hipótesis de trabajo no fue simultánea: los resultados obtenidos a partir de los primeros enunciados definitivos administrados a los alumnos, además de contrastar las hipótesis I y II, revelaron algunos aspectos aun no considerados y sugirieron la enunciación de la tercera hipótesis general de trabajo, así como la pertinencia de una mayor profundización, desde un punto de vista científico, sobre una interpretación energética macroscópica y microscópica de fenómenos electro-cinéticos.

En este trabajo presentamos parte de los resultados obtenidos a partir del análisis, desde una perspectiva científica, de ciertos fenómenos pertinentes a la investigación.

En primer lugar, mencionamos algunos antecedentes referidos a la interpretación y a la enseñanza y aprendizaje del concepto de energía. Luego presentamos una síntesis de algunos aspectos analizados por otros autores, sobre una caracterización del concepto general de energía. Destacamos la conveniencia de distinguir entre interpretaciones energéticas macroscópicas y microscópicas. Finalmente particularizamos el análisis realizado al caso de un circuito resistivo puro de corriente continua.

## II. EL CONCEPTO DE ENERGÍA. ALGUNOS ANTECEDENTES

En la actualidad, algunas consideraciones cualitativas referidas a un enfoque energético de los fenómenos suscitan controversias y discusiones, tanto en el ámbito de la física como de la enseñanza de la física y de la epistemología (Feynman, Leighton y Sands, 1987; Sexl, 1981; Duit, 1981; Bunge, 1999; Lijnse, 1990; Chisholm, 1992). Diversos autores acuerdan tanto en la importancia como en las especiales dificultades que reviste la noción de energía en lo que se refiere a su interpretación científica y a su enseñanza y aprendizaje.

Sin embargo, la física integra el concepto de energía dentro de un cuerpo de conocimiento racional y objetivo aceptado por la comunidad científica, y la educación científica debe favorecer que los estudiantes adquieran adecuadas comprensiones de ese saber.

Algunos trabajos que profundizan, desde una perspectiva educativa, en la comprensión científica del concepto de energía y de los procesos en que ésta interviene consideran relevante para la enseñanza, realizar una caracterización cualitativa de la noción de energía. De este modo, identifican aspectos distintivos del concepto así como su relación con otras nociones como calor y trabajo (por ejemplo Doménech y otros, 2003).

En lo que se refiere al análisis de la enseñanza y el aprendizaje de la idea de energía, se ha detectado que, en general, los libros de texto no utilizan este concepto como un vínculo unificador entre diferentes ramas de la física, sino que, por el contrario, muchas veces se lo introduce en cada área de conocimiento de manera parcial e incompleta (Cokelez y Yoromezoglu, 2009). Además, los textos emplean comúnmente explicaciones energéticas para abordar fenómenos mecánicos o termodinámicos, mientras que son poco usuales las interpretaciones de otros tipos de comportamientos naturales, entre ellos los eléctricos (Sandoval y Mora, 2009). Por otra parte, se han identificado confusiones o errores conceptuales tanto en textos de física de nivel básico como en la enseñanza superior (Bañas, Mellado y Ruiz, 2004; Bunge, 1999; Chisholm, 1992; Duit, 1981; Sexl, 1981; Warren, 1982). Incluso se ha detectado que los mismos profesores usan, en ocasiones, un lenguaje impreciso o inadecuado (Solbes y Tarín, 2004).

Se destaca también que cuando se interpretan energéticamente fenómenos físicos, la enseñanza considera principalmente procesos de conservación y transformación, mientras que no se desarrollan con el mismo énfasis o incluso llegan a ignorarse procesos de transferencia y degradación de la energía (Solbes y Tarín, 1998).

## III. EL CONCEPTO DE ENERGÍA EN EL MARCO DE LA FÍSICA CLÁSICA

Desde una perspectiva educativa muchos autores coinciden en que, además de las imprescindibles y rigurosas definiciones operacionales vinculadas a un enfoque energético cuantitativo, es también conveniente introducir en la enseñanza caracterizaciones cualitativas (Hierrezuelo y Molina, 1990; Pintó, 1991), las cuales pueden ser profundizadas, ampliadas e incluso modificadas durante la instrucción (Doménech y otros, 2003).

Algunos autores han realizado un análisis cualitativo de la idea de energía en general, así como de otros conceptos y procesos relacionados con ella. Algunos de los aspectos que se señalan en esos trabajos son los siguientes:

- Cuando hablamos de la energía de un sistema nos referimos a una *propiedad* del mismo. La energía no es una cosa ni un estado ni un proceso (Bunge, 1999). Se trata de una entidad teórica abstracta (Vila y Gómez Olea, 2009) que aparece como una herramienta útil cuando se estudia cuantitativamente la evolución temporal de un determinado sistema de interés. Siendo una propiedad puede representarse matemáticamente a través de una función.

- La energía es de carácter *sistémico*. Está relacionada con el estado global del sistema bajo estudio y da cuenta de su configuración con respecto a una cierta configuración de referencia (Pacca y Henrique, 2004). La energía del sistema se vincula con la situación de cada componente del mismo en relación con el resto de los componentes y en algunos casos, también con respecto al entorno.

- La energía *no es una propiedad absoluta*. El atribuir cierto valor numérico a la energía de un sistema presupone la elección arbitraria de un determinado estado de referencia al que se le asigna una energía nula (Michinel y D'Alessandro, 1992).

- Íntimamente relacionados con la idea de energía se encuentran los conceptos de *trabajo* y *calor*. Mientras la energía puede caracterizarse como una propiedad de un sistema cuyo valor (medido respecto de la referencia adoptada) depende de su estado en cada instante, tanto el calor como el trabajo constituyen procesos mediante los cuales se producen intercambios de energía entre partes del sistema o entre el sistema y su entorno. No son propiedades, en el sentido de que no se puede definir el trabajo o el calor "poseído" por un sistema dado (Michinel y D'Alessandro, 1994).

En la elaboración de estrategias de enseñanza, algunos autores mencionan que, en una primera aproximación, se podría caracterizar el trabajo como un modo de modificar el estado de un sistema físico mediante la aplicación de fuerzas (Doménech y otros, 2003).

Con respecto al concepto de calor, se lo considera como el proceso macroscópico mediante el cual un cuerpo intercambia energía con otro debido a una diferencia de temperatura entre ellos. Desde un punto de vista microscópico, el calor se vincula a los intercambios individuales de energía que pueden ocurrir como consecuencia de los choques entre las partículas del sistema y las de su entorno. A cada una de estas interacciones individuales corresponde una fuerza pequeña y se produce un desplazamiento pequeño de las partículas del medio. Por consiguiente, el calor está compuesto de muchos trabajos mecánicos individuales pequeñísimos, tales que no pueden expresarse colectivamente como una fuerza multiplicada por una distancia media (Alonso y Finn, 1976).

- Otro mecanismo de transferencia de energía es la *radiación electromagnética*, aunque muchos autores no lo mencionan explícitamente. El análisis que desarrollaremos luego contemplará únicamente procesos de calor y trabajo como mecanismos de intercambio de energía, ya que consideraremos circuitos eléctricos simples de corriente continua en estado estacionario, en los que se puede desprestigiar la radiación electromagnética.

- Mencionemos también que en un sistema físico la energía puede *transformarse* de unas formas en otras (Quintela, Redondo y Redondo, 2006). La evolución del sistema puede describirse a partir del "interjuego" entre las distintas formas de energía (Alonso y Finn, 1997). Los diferentes calificativos con que se designan las formas de energía se refieren a las diferentes maneras de interactuar de la materia. Por ejemplo gravitatoria, eléctrica, nuclear, etc. (Bunge, 1999). Sin embargo, esas diferentes formas de energía podrían englobarse en dos tipos generales: energía cinética, vinculada a la velocidad de cada partícula respecto a un cierto referencial y energía de configuración, vinculada a la distribución o situación de las partículas del sistema considerado. Esta energía de configuración será potencial si está asociada a campos conservativos (Alonso y Finn, 1997; Solbes y Tarín, 1998).

La causa de los cambios que se producen en un sistema físico puede asociarse siempre a la interacción entre sus partes o con su entorno. Desde un punto de vista energético, estas interacciones aparecen representadas por procesos como trabajo, calor o radiación.

- Para muchos autores la equivalencia entre los diferentes tipos y formas de energía y la introducción del concepto general de energía se justifica por su *conservación* (Warren 1982, Feynman y otros; 1987). En un sistema aislado, es decir, que no interactúa con su entorno, la energía total se conserva. Este enunciado implica una restricción para las posibles transformaciones internas que el sistema puede

experimentar y permite predecir su comportamiento aunque no se conozcan en detalle los cambios involucrados ni la solución explícita de las ecuaciones de movimiento (Sexl, 1981).

- Otro aspecto relevante de un análisis energético es la consideración de que la energía puede *degradarse* (Ingard y Kraushaar, 1966). Tradicionalmente, en la enseñanza, se define la energía de un sistema como su “capacidad para realizar trabajo”. Sin embargo, esta definición no tiene en cuenta que distintas formas de energía no tienen la misma “capacidad” para transformarse en otras y por lo tanto no son igualmente aprovechables para realizar trabajo. La transferencia de energía entre partes de un sistema aislado que se realiza en virtud de un trabajo de una fuerza conservativa no modifica la “disponibilidad” de la energía del sistema, en cambio el intercambio de energía como calor o a través de procesos irreversibles, con estados de no equilibrio y/o acción de fuerzas de roce, degrada la energía, la hace menos útil para realizar trabajo (Tarsitani y Vicentini, 1991). Por ejemplo, la energía mecánica y la interna no presentan la misma “calidad”. Mientras que en un sistema aislado es posible transformar íntegramente la energía mecánica en interna, no será posible realizar el proceso inverso con el mismo rendimiento, de acuerdo al segundo principio de la termodinámica. La Física da una medida cuantitativa de esta “cualidad” de la energía, más o menos degradada, a través de la función entropía. Desde un punto de vista microscópico la degradación de la energía se explica a través de un aumento del “desorden” del sistema, vinculado a la ocupación, por parte de sus componentes, de un número mayor de distribuciones de niveles energéticos microscópicos compatibles con una dada energía total (Callen, 1985).

- Señalemos también que, cuando se estudia la evolución de un sistema utilizando un enfoque energético es necesario realizar una clara *distinción entre abordajes “macroscópico” y “microscópico”* de los fenómenos involucrados. Ambos tipos de desarrollo pueden complementarse y favorecer una mejor comprensión de esos comportamientos naturales. Un tratamiento macroscópico describe globalmente el comportamiento del sistema, teniendo en cuenta causas netas y efectos netos. Por otra parte, un análisis microscópico requiere la introducción de modelos representacionales que expliquen el funcionamiento interno del sistema y puede proveer una interpretación más profunda del problema considerado.

A continuación analizamos, desde un punto de vista energético, el comportamiento de un circuito resistivo puro de corriente continua. Nos circunscribimos al marco de la Física clásica.

#### **IV. ANÁLISIS ENERGÉTICO DE UN CIRCUITO RESISTIVO PURO DE CORRIENTE CONTINUA**

Consideremos un sistema formado por un resistor y cables de conexión. Este sistema puede interactuar, por una parte, con una fuente de fuerza electromotriz a la que se encuentra conectado; por otra parte, puede también intercambiar energía por calor con un entorno con el que se encuentra en contacto térmico.

Para estudiar el balance energético del circuito debemos tener en cuenta, de acuerdo al tipo de interacciones que se presentan con el medio exterior o entre partes del sistema, energías de naturaleza térmica y electromagnética, ya que, como veremos, ambas podrían modificarse en el transcurso de esas interacciones.

##### **A. La energía como propiedad global del sistema**

- Energía térmica

Es posible atribuir a nuestro sistema de interés (resistencia y cables de conexión) cierta energía interna térmica. Dicha energía puede interpretarse, como sabemos, como suma de componentes cinética y potencial. La componente cinética está asociada al movimiento aleatorio de las partículas constituyentes (iones de la red cristalina y electrones de conducción) y se mide desde un referencial anclado en el centro de masa. La componente potencial, por su parte, se vincula a la interacción entre esas partículas (Alonso y Finn, 1997). Señalemos que las continuas acciones mutuas que tienen lugar a nivel microscópico hacen que las energías cinéticas y potenciales de las partículas estén modificándose en forma continua e indisoluble, obligándonos a una consideración global de la energía térmica del conjunto de partículas que componen el sistema (Doménech y otros, 2003).

- Energía electromagnética

Si nuestro sistema de interés se encuentra conectado a la fuente y el circuito está cerrado, como resultado de acciones no conservativas ejercidas por la batería sobre portadores de carga, se establecen distribuciones de carga superficial y de corriente en los conductores. A la presencia de estas distribuciones se puede asociar una cierta energía electromagnética.

En estado estacionario, es decir, cuando las distribuciones de corriente y de carga no cambian con el tiempo, se admiten dos interpretaciones posibles equivalentes e igualmente válidas:

► Energía electromagnética vinculada a las fuentes de campo

De acuerdo a una primera interpretación, la energía electromagnética se puede expresar matemáticamente en función de las fuentes de campo, es decir, en función de las distribuciones de corriente y de carga (Chabay y Sherwood, 1995):

La corriente estacionaria que se establece en el circuito supone que portadores de carga han adquirido una cierta energía cinética no aleatoria (además de las energías cinéticas asociadas al movimiento térmico), en virtud de la cual experimentan un desplazamiento neto a lo largo del circuito. A esta energía que depende de la corriente en el circuito se le llama energía magnética. En la superficie de los conductores se deposita una distribución estacionaria de cargas responsable de producir el campo y potencial eléctricos necesarios para la circulación de corriente. A la interacción eléctrica entre los elementos de carga que forman esta distribución así como entre ellos y las cargas circulantes puede asociarse una cierta energía potencial eléctrica. Esta energía potencial está vinculada a la configuración del sistema de cargas, es decir, a la situación de cada elemento de carga respecto del resto de las cargas presentes.

► Energía electromagnética asociada al campo

Una segunda interpretación está basada en el hecho de que es posible expresar matemáticamente la energía magnética y potencial eléctrica como integrales de volumen sobre todo el espacio, de funciones que dependen de los campos magnético y eléctrico respectivamente. Es notable que en ese formalismo no aparecen explícitamente las distribuciones de corriente y carga que originan los campos. Además, se expresan mediante una integral que abarca todo el espacio (que es la zona ocupada por los campos) y no sólo la región ocupada por las fuentes. Esto lleva a la interpretación de que la energía está distribuida en el campo (Grosse, 1990).

Para campos estacionarios, ambos enfoques son alternativos y equivalentes. Nótese que cuando los campos varían con el tiempo, ya no son válidas las expresiones para la energía electromagnética como función de las fuentes de campo. Para situaciones dependientes del tiempo, sólo el formalismo que asocia la energía a los campos es coherente con las ecuaciones de Maxwell (Feynmann y otros, 1987).

## B. Carácter relativo de la energía

Al definir las energías eléctrica y magnética del circuito, se adopta una cierta configuración de referencia a la que se asigna el valor de energía cero. Por ejemplo, puede definirse la energía electromagnética del circuito como la que adquiere en virtud del trabajo desarrollado por la fuente para establecer la distribución de cargas y corrientes a partir de un estado de referencia donde cada porción del circuito es eléctricamente neutra y donde la corriente es nula, es decir donde no hay desplazamiento neto de carga a lo largo del circuito.

Por su parte, al definir la energía interna térmica del sistema se adopta, como ya hemos mencionado, un referencial anclado en el centro de masa y una determinada configuración de las partículas con respecto a la que se mide la energía potencial.

Nótese que, como veremos luego, son los cambios de energía los que dan cuenta de las posibles transformaciones en el circuito, de modo que la elección del estado de referencia es arbitraria, aunque el criterio usual consiste en escoger aquel referencial que simplifique la descripción matemática del problema.

## C. Las transformaciones que se producen en el sistema pueden atribuirse a procesos de calor y trabajo

A fin de analizar los intercambios entre el sistema y el medio exterior y de acuerdo al tipo de interacciones predominantes, definiremos la energía interna total  $U$  del sistema como la suma de la energía interna térmica  $U_T$  más la energía electromagnética  $E_{EM}$ .

$$U = U_T + E_{EM} \quad (1)$$

Si consideramos el primer principio de la termodinámica tendremos:

$$W + Q = \Delta E_{EM} + \Delta U_T \quad (2)$$

Cuando circula corriente en el circuito, la fuente realiza trabajo sobre las cargas que la atraviesan, ejerciendo fuerzas no conservativas sobre ellas. En régimen estacionario, la energía electromagnética no se modifica, ya que la distribución de cargas y corrientes no varía con el tiempo. Señalemos que cuando nos referimos a un "régimen estacionario", consideramos sólo variables electromagnéticas: las distribuciones de carga superficial y corriente y por lo tanto los campos son constantes. Sin embargo, el

sistema puede no encontrarse en un estado termodinámicamente estacionario, ya que podría modificar su temperatura.

Si la resistencia se encuentra térmicamente aislada no habrá intercambio de calor con el medio. En este caso tendremos:

$$\Delta E_{EM} = 0, Q = 0 \quad (3)$$

$$W = \Delta U_T \quad (4)$$

De modo que el trabajo efectuado por la fuente se invertiría solamente en aumentar la energía térmica del sistema, con el consecuente aumento de temperatura en la resistencia.

En el caso en que la resistencia se encuentre en contacto térmico con su entorno, se producirá también un intercambio de energía por calor desde la resistencia hacia el medio, si éste se encuentra a menor temperatura. En este caso tendríamos:

$$W + Q = \Delta U_T \quad (5)$$

El trabajo realizado por la fuente produciría un aumento de la energía térmica y una transferencia de energía por calor desde la resistencia hacia el medio.

En particular, si el sistema evoluciona hacia un estado de equilibrio en el que la temperatura alcance un cierto valor que se mantenga constante en el tiempo y suponiendo nuevamente que las distribuciones de corriente y carga son estacionarias, no se producen variaciones de energía térmica ni electromagnética, es decir, la energía total del sistema se conserva, con lo que:

$$W = -Q \quad (6)$$

El ingreso de energía al sistema en virtud del trabajo realizado por la fuente, se traduce en un egreso de energía por calor, hacia con el medio.

### C. Una nueva mirada a la explicación macroscópica

El análisis realizado en el apartado precedente aborda macroscópicamente el balance de energías en el circuito. Así, hemos usado el primer principio de la termodinámica, introduciendo los conceptos de calor y trabajo para dar cuenta de la variación o conservación de la energía total del sistema.

Amplieemos ahora este análisis macroscópico considerando el universo formado por el sistema de interés (resistencia y cables de conexión), la fuente, capaz de realizar trabajo sobre el sistema y el entorno con el que la resistencia puede intercambiar energía por calor.

Desde un punto de vista macroscópico, en ese universo se observa:

- transformación y transferencia de energía, de potencial eléctrica química en la batería a interna en el resistor y su entorno.
- conservación de la energía, dado que disminuye en la batería a la misma velocidad con que aumenta en la resistencia y el medio.
- degradación de la energía: cuando la energía potencial eléctrica de la fuente se transforma en energía interna, pierde capacidad para ser utilizada. En efecto, mientras el 100 % de la energía química de la fuente puede convertirse en energía interna en el resistor y su entorno, no es posible recargar la batería a expensas de la energía interna con ese rendimiento. De acuerdo al segundo principio de la Termodinámica el rendimiento será menor que la unidad debido a la necesidad de una “fuente fría” además de la “fuente caliente” provista por el resistor y su entorno.

Si bien los análisis realizados dan cuenta, a partir del primer principio de la termodinámica, de la transferencia de energía entre la fuente y el sistema a través de un trabajo o entre la resistencia y su entorno por calor, no se explicitan mecanismos que expliquen la transformación de la energía potencial química asociada a la batería a interna del resistor y su entorno.

Una comprensión más profunda de esos procesos requiere la introducción de modelos representacionales que den cuenta del funcionamiento microscópico del circuito (Thacker, Ganiel y Boys, 1999).

### D. Una profundización en la explicación microscópica

*El rol de la fuente*

Para comprender el comportamiento interno del circuito es necesario, entre otros aspectos, analizar la función que cumple la batería como fuente de fuerza electromotriz.

Históricamente, Volta detectó durante sus investigaciones, hacia 1797, 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 a través del cual las cargas podrían fluir para neutralizarse entre sí” (Guisasola, Montero y Fernández, 2005, p.2). Este tipo de proceso, que ocurre en una pila, suele consistir en una serie de reacciones químicas cuyo efecto neto es la aplicación, sobre los portadores de carga, de acciones no conservativas que producen la separación de cargas de diferente signo, oponiéndose a la repulsión electrostática ejercida por las cargas ya depositadas en los bornes de la pila. La fuerza electromotriz de la pila representa el trabajo, por unidad de carga, realizado por dichas acciones no conservativas sobre los portadores y es la causa de la separación de cargas de distinto signo entre sus electrodos (Resnick, Halliday y Krane, 2009).

Nótese que, a circuito abierto, la separación de cargas cesa cuando las acciones no conservativas sobre los portadores son equilibradas por las fuerzas electrostáticas ejercidas por las cargas ya depositadas en los electrodos.

Si los bornes de la pila se conectan mediante un conductor con una cierta resistencia, las acciones no conservativas dentro de la pila mantienen la separación de cargas y se establece, como veremos, un equilibrio dinámico con circulación de corriente en el circuito (Sears, 1976).

Cuando se cierra el circuito podemos distinguir una etapa transitoria en la que, como consecuencia de las acciones no conservativas ejercidas por la pila, se realiza trabajo sobre portadores a fin de establecer una distribución de cargas en los electrodos y en la superficie de los conductores que constituyen el circuito exterior a la fuente (Thacker y otros, 1999). Una vez establecida, esta distribución de cargas se mantiene durante el régimen estacionario. Es positiva cerca del extremo positivo de la batería y negativa cerca del extremo negativo y si los cables de conexión poseen resistencia, varía suavemente de positiva a negativa a lo largo del circuito, posiblemente con carga extra en los recodos del alambre (Chabay y Sherwood, 1995).

Notemos que si los cables de conexión no tuvieran resistencia, la distribución de carga en su superficie sería uniforme, su gradiente nulo y por lo tanto, el campo eléctrico en el interior de estos alambres perfectamente conductores también sería nulo (Welti, 2005). En consecuencia, la carga superficial variaría sólo en el resistor en cuyo interior sí se establecería un campo eléctrico.

Macroscópicamente, la distribución superficial de carga que se establece crea, en régimen estacionario, una diferencia de potencial entre los bornes de la fuente y un campo eléctrico conservativo en el espacio interior y exterior al circuito (Matar y Welti, 2009). En el interior del circuito el campo es paralelo a los conductores, su sentido es opuesto al de la corriente dentro de la batería e igual al de la corriente en los conductores resistivos conectados a ella. Adoptamos aquí la convención usual que asigna a la corriente el sentido en que se moverían portadores positivos de carga. Cada portador, cuyo movimiento está vinculado a la circulación de corriente, adquiere una energía potencial eléctrica dentro de este campo eléctrico, de valor “ $q \cdot V$ ”, donde “ $V$ ” designa el potencial eléctrico en un punto del circuito, medido desde algún punto arbitrario tomado como referencia.

Durante el período transitorio, las fuerzas no conservativas que actúan en la batería producen también otro efecto: realizan trabajo sobre portadores para modificar su velocidad media desde cero hasta el valor de régimen y originar la corriente eléctrica. En régimen estacionario las cargas se mueven a lo largo del circuito a una velocidad de arrastre constante, por lo tanto su energía cinética media permanece constante.

Como ya hemos mencionado, el trabajo invertido por la fuente para crear las distribuciones de corriente y carga confiere al sistema una cierta energía electromagnética. En régimen estacionario, y en presencia de resistencia eléctrica en el circuito, la circulación de corriente se mantiene mientras la pila continúa realizando trabajo sobre los portadores.

#### *Balance de energía de los portadores de carga en el circuito*

Cuando los portadores de carga atraviesan la fuente, las fuerzas no conservativas realizan trabajo sobre ellos. Esto permite que los portadores ganen energía potencial eléctrica en una cantidad “ $q \Delta V$ ” (donde  $\Delta V$  es la diferencia de potencial entre bornes), al desplazarse en contra de las fuerzas electrostáticas asociadas al campo eléctrico conservativo que actúa dentro de la pila. De este modo, en virtud del trabajo de las fuerzas no conservativas se produce una transferencia de energía de la fuente al portador.

Cuando los portadores se desplazan en el circuito externo a la fuente, lo hacen a favor de la fuerza electrostática conservativa y disminuyen su energía potencial eléctrica en la misma cantidad. En ausencia de resistencia se produciría una transformación de esa energía potencial a cinética del portador (macroscópicamente esto originaría un aumento de la corriente dando lugar a un corto circuito). En presencia de resistencia exterior a la fuente, los choques de los portadores contra los iones de la red

cristalina producen una transferencia de energía de los portadores a la red, una transformación de energía potencial eléctrica del portador a energía interna del resistor y una degradación de la energía del sistema.

Señalemos que en ausencia de resistencia, no se produciría degradación: la energía potencial eléctrica de los portadores se transformaría en energía cinética “ordenada” asociada al movimiento de traslación de las cargas. Cuando hay resistencia exterior a la fuente, la degradación de la energía se explica a través de un aumento del “desorden” del sistema. La energía potencial eléctrica se transforma, en este caso, en energía interna del resistor, asociada, en parte, al movimiento azaroso de las partículas que lo constituyen. El intercambio de calor entre la resistencia y su entorno puede explicarse a partir de una multitud de intercambios microscópicos de energía debidos a las colisiones elásticas e inelásticas de partículas del sistema y partículas externas.

La descripción microscópica realizada muestra que las cargas en circulación actúan como “intermediarias” para la transferencia, transformación y degradación de la energía. El aumento de energía potencial eléctrica de cada portador en la fuente y su consiguiente disminución en la resistencia en la misma cantidad explican la conservación de la energía del universo considerado.

Por otra parte, en un enfoque macroscópico del funcionamiento del circuito, se puede apreciar sólo el efecto neto, global, de los cambios de energía producidos en los portadores: tanto de aquéllos que aumentan su energía potencial eléctrica en la fuente como de los que la disminuyen simultáneamente en la resistencia. En esta perspectiva no se contempla la evolución temporal de cada portador.

## V. COMENTARIOS FINALES

En este trabajo hemos analizado, entre otros aspectos, cómo los intercambios de energía en circuitos resistivos puros de corriente continua pueden estudiarse a partir de perspectivas macroscópica y microscópica. Ellas constituyen posturas diferentes que pueden complementarse y contribuir a una mejor comprensión de los sistemas en estudio.

Como ya hemos mencionado, ambas perspectivas son válidas en situaciones estacionarias. Desde el punto de vista de la enseñanza, consideramos relevante favorecer la diferenciación entre distintos modelos capaces de explicar un mismo fenómeno, delimitando con claridad los límites de validez y alcance de los mismos.

Por otra parte, destacamos la importancia del análisis científico de los sistemas físicos involucrados como un aspecto fundamental de la investigación. En nuestro caso, favoreció la identificación y análisis de conceptualizaciones que podrían representar núcleos de dificultad para los estudiantes, contribuyó a la definición del problema y enunciación de hipótesis de trabajo así como a la elaboración de instrumentos de medición. Podemos agregar también que representó un marco de referencia para interpretar y evaluar las respuestas de los estudiantes. Estos aspectos se manifestaron, por ejemplo, en relación a la tercera hipótesis general de trabajo. En efecto, como ya hemos mencionado, algunas respuestas obtenidas durante la contrastación de las dos primeras hipótesis generales, sugirieron incomprendimientos de los estudiantes no contempladas hasta ese momento, vinculadas con interpretaciones macroscópica y microscópica de los fenómenos intervinientes. La profundización en la interpretación científica de los fenómenos contribuyó a la enunciación de la tercera hipótesis general y su operativización y favoreció el diseño de experiencias piloto tendientes a contrastarla.

Los resultados obtenidos al contrastar las distintas hipótesis de trabajo han sido presentados en otras reuniones científicas y serán publicados próximamente.

## REFERENCIAS

Alonso, M. y Finn, E. J. (1976). *Física*, Volumen III, Mexico: Fondo educativo Editorial.

Alonso, M. y Finn, E. (1997). On the notion of internal energy. *Physics Education*, 32, pp. 256-265.

Bañas, C.; Mellado, V. y Ruiz, C. (2004). Los libros de texto y las ideas alternativas sobre la energía del alumnado de primer ciclo de educación secundaria obligatoria. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 21(3), pp. 296-312.

Bunge, M. (1999). La energía entre la física y la metafísica. *Revista de Enseñanza de la Física*, 12(1), pp. 53-56.

Callen, H. B. (1985). *Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics*. New York: Wiley.

- Chabay, R. y Sherwood, B. (1995). *Electric and magnetic interacciones*. New York: Wiley.
- Chisholm, D. (1992). Some energetic thoughts. *Physics Education*, 27, pp. 215-220.
- Cokelez, A. y Yorumezoglu, K. (2009). Conceptualization of “electricity, electric current and electrical energy” by junior high school (aged 12-14) students. *Latin American Journal of Physics Education*, 3(3), pp. 496-504.
- Doménech, J. L.; Gil-Pérez, D.; Gras, A.; Guisasola, J.; Martínez Torregrosa, J.; Salinas, J.; Trumpeter, R.; Valdés, P. (2003). La Enseñanza de la Energía: una propuesta de debate para un replanteamiento global. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 20(3), pp. 285-311.
- Duit, R. (1981). Understanding energy as a conserved quantity - Remarks on the article by R. U. Sexl. *European Journal of Science Education*, 3(3), pp. 291-301.
- Feynman, R. P.; Leighton, R. B. y Sands, M. (1987). *Física, vol. II: Electromagnetismo y materia*. Wilmington: Addison-Wesley Iberoamericana.
- Grosse, C. (1990). *Apunte de electromagnetismo*. Tucumán: Asociación Cooperadora de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología.
- Guisasola, J.; Montero, A. y Fernández, M. (2005). Concepciones de futuros profesores de ciencias sobre un concepto olvidado en la enseñanza de la electricidad: la fuerza electromotriz. *Enseñanza de las Ciencias*, 23(1), pp. 47-60.
- Hierrezuelo Moreno, J. y Molina González, E. (1990). Una propuesta para la introducción del concepto de energía en el bachillerato. *Enseñanza de las Ciencias*, 8(1), pp. 23-30.
- Ingard, U. y Kraushaar, W. (1966). *Introducción al estudio de la mecánica, materia y ondas*. Barcelona: Editorial Reverté.
- Lijnse, P. (1990). Energy between the life-world of pupils and the world of physics. *Science Education*, 74(5), pp. 571-583.
- Matar, M. y Welti, R. (2009). Las cargas superficiales y los campos de circuitos simples. *Latin American Journal of Physics Education*, 3(3), pp. 631-637.
- Michinel Machado, J. y D’Alessandro Martínez, A. (1992). Energía y Sistemas: Conceptos Relevantes en un Programa para Aprender Física Dirigido a Estudiantes de Ciencias de la Salud. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 14(1), pp. 9-15.
- Michinel Machado, J. y D’Alessandro Martínez, A. (1994). El concepto de energía en los libros de texto. De las concepciones previas a la propuesta de un nuevo sublenguaje. *Enseñanza de las Ciencias*, 12(3), pp. 369-380.
- Pacca, J. y Henrique, K. (2004). Dificultades y estrategias para la enseñanza del concepto de energía. *Enseñanza de las Ciencias*, 22(1), pp. 159-166.
- Pintó, M. R. (1991). Algunos conceptos implícitos en la primera y la segunda leyes de la termodinámica: una aportación al estudio de las dificultades de su aprendizaje. *Tesis Doctoral*. Universidad Autónoma de Barcelona.
- Quintela, F. R.; Redondo Melchor, R. C. y Redondo M. M. (2006). Términos sobre energía eléctrica del Diccionario de la Real Academia Española. *Montajes e instalaciones: Revista técnica sobre la construcción e ingeniería de las instalaciones*, 36, 408, pp. 88-100.
- Resnick, R.; Halliday, D. y Krane, K. (2009). *Física, vol. 2*. México: Grupo Editorial Patria.

Sandoval, M. y Mora, C. (2009). Modelos erróneos sobre la comprensión del campo eléctrico en estudiantes universitarios. *Latin American Journal of Physics Education*, 3(3), pp. 647-655.

Sears, F. (1976). *Electricidad y magnetismo*. Madrid: Aguilar.

Sexl, R. (1981). Some observations concerning the teaching of the energy concept, *European Journal of Science Education*. 3(3), pp. 285-289.

Solbes, J. y Tarín, F. (1998). Algunas dificultades en torno a la conservación de la energía. *Enseñanza de las Ciencias*, 22(2), pp. 185-194.

Solbes, J. y Tarín, F. (2004). La conservación de la energía: un principio de toda la física. Una propuesta y unos resultados. *Enseñanza de las Ciencias*, 16(3), pp. 387-397.

Tarsitani, C. y Vicentini M. (1991). *Calore, energia, entropia*. Milano: Franco Angeli, s.r.l.

Thacker, B.; Ganiel, U. y Boys, D. (1999). Macroscopic phenomena and microscopic processes: student understanding of transients in direct current electric circuits. *American Journal Of Physics*, 67(7), pp. 25-31.

Vila, J. y Gómez Olea, M. (2009). Algunas imprecisiones que nos encontramos en la Física teórica actual. *Latin American Journal of Physics Education*, 3(2), pp. 421-425.

Villani, A. y Pacca, J.L.A. (2001). Como avaliar um projeto de pesquisa em educação em ciências. *Investigações em Ensino de Ciências*, 6(1). Site: <http://www.if.ufrgs.br/ensino/revista.htm>.

Warren, J. (1982). The nature of energy. *European Journal of Science Education*, 4(3), pp. 295-297.

Welti, R. (2005). Las cargas superficiales y el flujo de energía en un circuito simple. *Revista Brasileira e Ensino de Física*, 27(4), pp. 577-582.

## APÉNDICE: HIPÓTESIS GENERALES

Las hipótesis generales enunciadas afirman que:

- I) “Muchos estudiantes tienden a asimilar la energía eléctrica a otra magnitud física. La elección de esta otra magnitud depende del contexto de la situación problemática sobre la que se interroga”.
- II) “Muchos estudiantes tienen dificultades para caracterizar la energía eléctrica de un modo científicamente correcto”.
- III) “Muchos estudiantes tienen dificultades para interpretar y relacionar intercambios energéticos desde un punto de vista macroscópico y microscópico”.