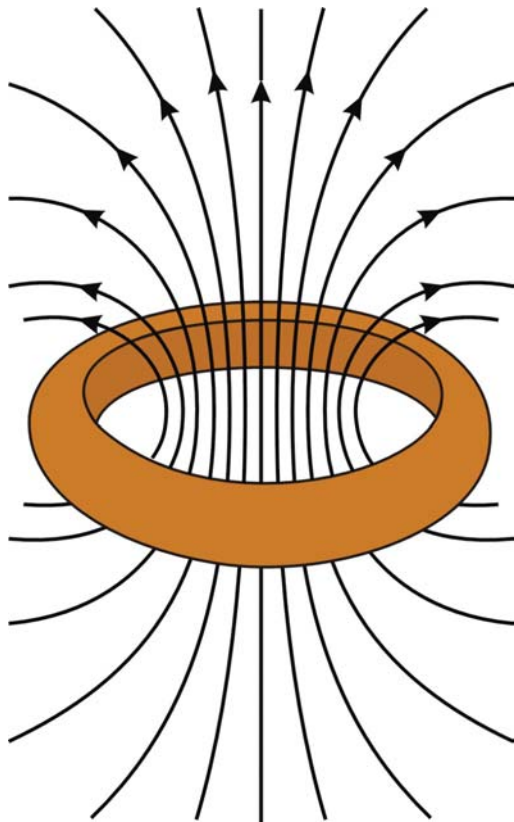


UNIVERSIDAD DE GRANADA

Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales
Facultad de Ciencias de la Educación

**EL CONCEPTO DE FUERZA ELECTROMOTRIZ EN LA
INTERPRETACIÓN DE CIRCUITOS DE CORRIENTE
ESTACIONARIA. ANÁLISIS CRÍTICO DE SU ENSEÑANZA Y
PROPUESTA DIDÁCTICA ALTERNATIVA**



**Entre dos puntos del anillo
la fuerza electromotriz da
lugar a una corriente
eléctrica, pero no se puede
medir una diferencia de
potencial electrostático**

MEMORIA

Presentada para optar al Grado de Doctor por

Antonio Montero Moreno
UNIVERSIDAD DE GRANADA

**Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales
Facultad de Ciencias de la Educación**

**EL CONCEPTO DE FUERZA ELECTROMOTRIZ EN LA
INTERPRETACIÓN DE CIRCUITOS DE CORRIENTE
ESTACIONARIA. ANÁLISIS CRÍTICO DE SU ENSEÑANZA Y
PROPUESTA DIDÁCTICA ALTERNATIVA**

MEMORIA DE TESIS DOCTORAL PRESENTADA POR

Antonio Montero Moreno

PARA OPTAR AL GRADO DE:

Doctor por la Universidad de Granada

PROGRAMA DE:

Doctorado en Didáctica de las Ciencias Experimentales

DIRIGIDA POR LOS PROFESORES:

**Dr. D. Jenaro Guisasola Aranzabal. Universidad del País Vasco
Dr. D. Manuel Fernández González. Universidad de Granada**

GRANADA 2007

A la memoria de mi padre.

AGRADECIMIENTOS:

Durante años el profesor Manuel Fernández me animó a realizar este trabajo, sin su intervención nunca habría iniciado esta aventura. Más tarde se incorporó Jenaro Guisasola, su experiencia y saber han sido definitivas para llegar a buen puerto, además he ganado un amigo.

Un trabajo de investigación es una labor de equipo, un plantel de profesores, algunos de reconocido prestigio dentro y fuera de Andalucía, ha participado en esta: José Hierrezuelo, Eduardo Molina, Víctor del Valle, Tomás Mozas, Gabriel Ruiz, Rafael López Gay, Carlos Sanpedro, Francisco López, Santi Santamaría, Antonio Pérez, Francisco Martín, Ángel Blanco. A todos ellos debo una colaboración importante, pero en la puesta a punto de la unidad didáctica, la participación de los compañeros del Seminario Permanente de Física y Química de la Axarquía (amigos, después de más de 25 años de trabajo en común) ha sido especialmente destacada. Las orientaciones para el formato general de José Luis Zubimendi han sido de gran valor.

Debo reconocer que, gracias a la licencia por estudios que me concedió la Consejería de Educación de la Junta de Andalucía, durante el curso 2004/05, este trabajo ha visto la luz en un tiempo menor, lo que, en investigación, tiene su importancia.

Por último señalar que, tres personas han colaborado con una generosidad sin límites, Marina, Antonio y Víctor, de estos me he perdido una buena parte de su niñez.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA E ÍNDICE GENERAL

En el estudio de los circuitos eléctricos de corriente continua en estado estacionario la noción de energía por unidad de carga juega un papel fundamental. En el modelo de la materia que se utiliza para explicar, a nivel microscópico, las transformaciones de energía que tienen lugar en los distintos elementos del circuito, el concepto de carga explica el transporte de energía de unos puntos a otros del circuito, de forma que decimos que en una bombilla parte de la energía que las cargas (como partes de un sistema) poseen en forma de energía potencial electrostática, se transforma en luz y calor. Vemos cómo en la situación descrita, los conceptos de carga y energía están estrechamente vinculados y, si se ha de cuantificar, la noción de energía por unidad de carga es la que nos permite realizar las precisiones ineludibles.

¿Por qué se trasladan las cargas de un punto a otro de un circuito eléctrico cerrado? La respuesta a esta pregunta la expresamos diciendo que las cargas se desplazan hacia posiciones en las que su energía potencial electrostática disminuye, es decir, la energía del sistema disminuye. Y si debemos realizar la precisión que permita cuantificar el proceso, la noción de energía por unidad de carga está de nuevo implicada.

¿Cómo se consigue, en el sistema que llamamos circuito, dotar a las cargas de la energía potencial electrostática suficiente como para que se desplacen de un punto a otro de forma estacionaria?, ¿cómo conseguimos que en una bombilla se pueda mantener constantemente un proceso de transformación de energía mediante el cual obtenemos luz y calor? De nuevo la relación entre los conceptos de energía y unidad de carga están implicados a la hora de explicar y cuantificar las respuestas.

Las magnitudes físicas diferencia de potencial, fuerza electromotriz y voltaje se definen como energía por unidad de carga y se miden las tres en voltios, están por tanto detrás de los mecanismos de cuantificación a los que se ha aludido más arriba. Este trabajo se ha limitado al estudio de los circuitos en los que los campos eléctricos son coulombianos y por tanto conservativos, por lo que no se ha empleado el concepto de voltaje. Por tanto, nos referiremos a la diferencia de potencial y a la fuerza electromotriz, ¿podemos utilizar una u otra de modo indiferente? La respuesta

evidentemente es que no, pero delimitar cuándo utilizamos una u otra exige tener clara la respuesta a la cuestión:

¿Cuál es la diferencia entre fuerza electromotriz y diferencia de potencial?

Si se trata de responder a una pregunta semejante en el caso de otras magnitudes físicas, como podría ser el caso de la diferencia entre masa y peso, basta recurrir a la definición de una y otra magnitud y a sus unidades de medida para tener una primera respuesta bastante clarificadora. Pero si procedemos de esta manera en el caso de la fuerza electromotriz y la diferencia de potencial el conflicto está servido. La definición de ambas se realiza en términos de energía por unidad de carga y una y otra se miden en voltios.

Es por tanto necesario profundizar algo más para encontrar diferencias conceptualmente significativas entre ambas magnitudes. Pero debemos advertir que, los resultados de una reflexión profunda en torno a la diferencia entre estas magnitudes deben superar concepciones “espontáneas” o “de sentido común” sobre el aprendizaje y la enseñanza de estas magnitudes, y esto por varias razones. La primera de ellas está relacionada con los estilos de enseñanza-aprendizaje en los que prima, como se mostrará en el curso de la investigación, el operativismo sobre la descripción cualitativa de los hechos y fenómenos, cuestión esta que ha sido señalada también por otros autores (Steinberg, 1992; Millar y King 1993; Velazco, 1998). La segunda está relacionada con el hecho de que la enseñanza tradicional no suele distinguir entre hechos experimentales y las explicaciones de tales hechos, ambas descripciones se mezclan con frecuencia en los materiales para estudiantes, como consecuencia, entre otras razones, de una organización escolar para la enseñanza de las ciencias en la que no está previsto un tiempo para el trabajo experimental y en el que por lo tanto han de destacarse los resultados más que los procesos. Fruto de las dificultades anteriores hay una tercera y es que, la necesaria profundización en el significado de los conceptos implicados, para poder diferenciarlos, se contempla como una especie de “adorno” ya que a la postre las diferencias ni se pueden plasmar en nuevos tipos de ejercicios numéricos, ni explican ningún trabajo experimental que se considere especialmente ilustrativo. Estas cuestiones actúan como una especie de barrera epistemológica para la mejora del conocimiento acerca de las magnitudes implicadas.

La historia de la ciencia muestra cómo el concepto de fuerza electromotriz ha sufrido una serie de avatares que lo han relegado al “olvido” (Guisasola, Montero y Fernández 2005). El concepto de Potencial eléctrico fue establecido con gran elegancia y competencia en el ámbito de los fenómenos electrostáticos y magnetostáticos por Green en 1828 y Gauss entre 1839 y 1841 (Archibald 1988, 1986, Whittaker 1951). Se trataba de cuantificar interacciones electrostáticas en aquellos casos, la mayoría, en los que la ley de Coulomb resultaba insuficiente. El concepto de Fuerza electromotriz (fem) fue establecido y acuñado por Volta unos treinta años antes (1798) para describir acciones no electrostáticas sobre las cargas. En esta época, el ámbito experiencial para el que se propone el concepto de fuerza electromotriz, el de la electroquímica y circuitos eléctricos, lo que entonces se denominaba galvanismo, no se consideraba una disciplina que se ajustara a los patrones que, en aquel momento, se consideraban como ciencia, lo que terminó por condenarlo a un ostracismo que han señalado distintos autores y que podemos decir sigue perdurando (Brown 1969, Varney y Fisher, 1980). Hacia mitad del siglo XIX cuando, tras las aportaciones de Ampère, Faraday, Ohm, Kirchhoff, etc., la electricidad y galvanismo se consideran ámbitos experimentales de la misma disciplina y el concepto de energía demuestra sus potencialidades, el problema entra en vías de solución; pero el concepto de fuerza electromotriz sufre un nuevo revés pues, en la enseñanza, se asocia de manera casi exclusiva con las explicaciones en relación con las experiencias de inducción de Faraday.

No obstante el problema de enseñar la diferencia entre fuerza electromotriz, voltaje y diferencia de potencial ha venido señalándose desde hace casi cuarenta años (Ericson 1968, Page 1977, Rose-Innes 1985, Jiménez y Fernández 1998). Para distinguir entre fuerza electromotriz (fem) y diferencia de potencial (d.d.p.) se hace necesario penetrar en la noción de transferencia de energía y distinguir entre las fuerzas implicadas en la realización del trabajo que cuantifica la energía transferida. **De forma que el trabajo que es necesario efectuar para separar las cargas en los electrodos de una pila, para generar una diferencia de potencial, no lo desarrollan fuerzas de naturaleza eléctrica conservativa, mientras la fuerza que desplaza una carga que se traslada hacia donde la energía potencial electrostática del sistema es menor, es decir, entre dos puntos entre los que hay una diferencia de potencial, es una fuerza eléctrica conservativa de carácter culombiano.**

En la enseñanza habitual en los cursos de Física de Bachillerato y primer curso de universidad, en las experiencias en las que fuerzas conservativas y no conservativas actúan sobre las cargas, sólo se han venido destacando algunas conclusiones que ilustran los resultados y no los procesos. Por ejemplo, después de unos minutos de funcionamiento, se destaca que la esfera del Van der Graaf se ha “cargado”, pero no se describe el proceso de carga ni el carácter de las fuerzas implicadas en dicho proceso. Se han realizado trabajos y se ha transferido energía entre sistemas, pero la descripción de lo que sucede, a nivel microscópico, no forma parte de las explicaciones habituales que se ofrecen a los estudiantes (ver Halliday y Resnick 1974, Tipler-Mosca vol.2).

Frecuentemente, textos y profesores, se refieren a la existencia de una diferencia de potencial entre dos puntos de un campo eléctrico o entre dos puntos de un circuito, pero nada se dice en relación con la manera de crear una diferencia de potencial entre dos partes de un sistema. Se habla de la fricción necesaria para electrizar un cuerpo, pero no se indica que, las fuerzas de rozamiento implicadas, no se rigen por la misma ley que gobierna las interacciones entre dos cargas del mismo o distinto signo que permanecen en reposo. Se han explicado en el tema correspondiente, las nociones de trabajo conservativo y no conservativo y sin embargo, cuando se tiene la oportunidad de aplicar tales ideas en un tema diferente, lo que reforzaría el aprendizaje y la utilidad de la introducción de dichas ideas para explicar procesos familiares, esto no se hace, lo que con frecuencia se traduce en una falta de coherencia y claridad y en la necesidad de complicar y ampliar el léxico con términos como los de “fuerza contraelectromotriz”.

Ante la problemática mencionada, la mayor parte de los libros de texto que hemos analizado optan por no aclarar la diferencia entre ambas magnitudes. Parte del profesorado apoya esta opción argumentando que no es rentable explicar con detenimiento esta diferencia, a tenor del tiempo necesario para ello. Surgen entonces problemas, a la hora de explicar una serie de cuestiones, algunas de las cuales han venido preocupando a los investigadores desde hace décadas:

- 1) Si optamos por no referirnos al concepto de fuerza electromotriz **¿cómo explicamos la diferencia entre la ley de Ohm y la ecuación del circuito?** Es este un error generalizado: confundir la ley de Ohm con la ecuación que representa el principio

de conservación de la energía en los circuitos de corriente continua (Chabay y Sherwood 1999), que los textos suelen denominar ley de Ohm generalizada.

- 2) **¿Cómo se establecen las oportunas relaciones con la electrostática?** Han venido señalando algunos autores (Benseghir y Closset 1993, 1996, Bagno y Eylon 1997, Chabay y Sherwood 1999) que, la ausencia de estas relaciones dificulta la construcción del concepto de circuito eléctrico, se mostrará cómo algunos profesores en formación y estudiantes de tercer ciclo piensan que la diferencia de potencial en electrostática y en circuitos eléctricos de corriente continua son nociones diferentes.
- 3) **¿Cómo explicamos las relaciones entre lo macroscópico y lo microscópico, para el conjunto del circuito?** Esta cuestión se ha venido formulando desde hace décadas (Helad 1983; Eylon y Ganiel 1994, Chabay y Sherwood 1999), al señalar cómo las relaciones macro-micro son un vínculo ausente en los razonamientos de los estudiantes en relación con la electrostática y la electrodinámica.

Una respuesta coherente a las tres cuestiones anteriores difícilmente puede elaborarse sin el concurso de la noción fuerza electromotriz.

El objetivo principal de este trabajo, más allá de mostrar que los estudiantes presentan graves deficiencias en la comprensión o bien que los profesores no realizan una enseñanza adecuada, es realizar un análisis detallado del proceso de enseñanza-aprendizaje, a partir del cual sea posible elaborar una propuesta alternativa, cuya puesta en práctica mejore de manera significativa los resultados de la situación de partida. Esto plantea un importante reto para la enseñanza del concepto de fem: ¿cómo fomentar una enseñanza que favorezca un cambio conceptual, epistemológico y ontológico en los estudiantes? Las teorías constructivistas intentan describir diferentes caminos de aprendizaje desde las concepciones alternativas de los estudiantes a las concepciones que deben aprender (Leach y Scott 2002; Gil et al 2002). Sin embargo, los resultados de la investigación educativa frecuentemente se expresan en un nivel alto de abstracción, con pocos lazos con la práctica educativa. Por tanto, suele ser difícil el diseñar y desarrollar una secuencia de actividades que permita a los estudiantes adquirir las destrezas necesarias para reestructurar sus concepciones. Esta tarea está muy lejos de ser trivial y constituye uno de los objetivos principales de este trabajo de tesis doctoral. Es necesario un planteamiento “metacognitivo” de la enseñanza que ayude al

aprendizaje de los estudiantes mediante la definición de objetivos y la monitorización de su progreso (Bransfor et al. 2000; .Driver et al. 1994; Andersson y Bach 2005).

De acuerdo con todo lo anterior se plantean los siguientes interrogantes:

1. ¿Qué dificultades tienen los estudiantes en relación con la comprensión-aplicación del concepto de fuerza electromotriz?
2. La enseñanza habitual de este concepto, ¿da lugar a un aprendizaje comprensivo, o bien, posee deficiencias que hacen previsible un escaso aprendizaje?
3. ¿Es posible diseñar una enseñanza que sea coherente con los resultados de la investigación didáctica y que proporcione una mejora significativa, tanto en el aprendizaje de los conceptos, como en los procedimientos utilizados y, por demás, de las actitudes hacia la asignatura?

En la epistemología actual existe consenso en torno a que, los conceptos científicos dentro de una teoría no surgen ni fortuita ni imprevisiblemente, sino que se esbozan a modo de hipótesis para resolver un problema y se confirman con rigor (Nersessian 1989). De acuerdo con todo lo anterior, es posible que un estudio crítico de la historia y epistemología de la Ciencia (la historia vista como fuente de problemas resueltos que han supuesto avances en el conocimiento científico) nos pueda ilustrar a los profesores e investigadores sobre la presencia de saltos cualitativos en la evolución de un concepto. En este sentido, la consideración por parte del profesorado de estas “discontinuidades” entre significados para un mismo concepto, puede llevar a entender mejor las dificultades de los estudiantes en el aprendizaje del mismo y a saber orientar adecuadamente la enseñanza (Saltiel y Viennot 1985, Hodson 1992, Wandersee 1992, Duschl 1994, Seroglou et al. 1998).

En consecuencia, en la primera parte de este trabajo, capítulo 1, se establecen las principales dificultades epistemológicas que subyacen a la introducción y posterior evolución del concepto de fuerza electromotriz. Para ello, se ha realizado una revisión histórica acerca del concepto tratado, describiendo las dificultades en el establecimiento de las explicaciones acerca de los circuitos eléctricos. Al concluir el capítulo, se mostrará de modo fundamentado cómo un análisis sistemático de las principales dificultades que tuvieron lugar en el proceso de construcción de los conocimientos

científicos puede indicar un camino para resolver problemas al ayudarnos a fundamentar mejor la organización y secuenciación de su enseñanza, y a comprender los posibles obstáculos que puedan encontrar los estudiantes en el aprendizaje.

En el capítulo 2, se abordará desde la experiencia docente, lo que significa un aprendizaje significativo del concepto fuerza electromotriz. Se establecerá con detalle lo que los estudiantes deberían saber (punto de vista conceptual) y saber hacer (aspectos procedimentales y axiológicos), al finalizar el tema de circuitos eléctricos, centrándonos en aquellos aspectos y nociones que entendemos estrechamente vinculadas con el estudio del concepto de fuerza electromotriz.

Los siguientes capítulos se estructuran en torno a una primera hipótesis, que sostiene la escasa comprensión por parte de los estudiantes del concepto de fuerza electromotriz, debido a las carencias epistemológicas y didácticas detectadas en la enseñanza habitual. Se establecerán, por tanto, deficiencias estructurales en la enseñanza habitual, causas de los resultados obtenidos. Por ello en el capítulo 3, al iniciar la segunda parte, se justificará y fundamentará la verosimilitud de la hipótesis hecha para, a continuación, en el capítulo 4, operativizarla y presentar los diseños correspondientes para contrastarla. Se ha optado por un diseño que busca validar la hipótesis, a través de una multiplicidad de perspectivas que, a su vez, permitan establecer la convergencia global del conjunto de resultados obtenidos. En el siguiente capítulo, se presentan pormenorizados los resultados obtenidos al ser aplicados al aprendizaje, concepciones alternativas y dificultades de los estudiantes y a la enseñanza, libros de texto y profesorado. En particular se analizará cómo libros de texto y profesores, presentan la organización de contenidos y cómo introducen los conceptos tratados.

Una vez establecidas las deficiencias de la enseñanza habitual y, comprobando que ésta no contribuye a un aprendizaje significativo de los conceptos relacionados con el de fuerza electromotriz, en la tercera y última parte del trabajo, se establecerá una segunda hipótesis, que mantiene que es posible encontrar una solución curricular didácticamente fundamentada que supere las graves deficiencias encontradas en la enseñanza-aprendizaje de los circuitos de corriente continua estacionaria. El enunciado y la fundamentación se encuentran en el capítulo 6. A continuación, capítulo 7, se

establecen las virtualidades del currículo innovador en forma de consecuencias contrastables. Estas consecuencias vienen a indicar que es posible el diseño, desarrollo y evaluación del programa de actividades propuesto y lograr que sea evaluado positivamente. En este sentido, no sólo debe mejorarse el aprendizaje de los conceptos, sino que deberá llevar consigo una mejoría en las actitudes de los estudiantes a los que va dirigido. Se mostrará aquí la organización y secuenciación de los contenidos realizada.

En el capítulo 8 se expondrán los resultados correspondientes a la contrastación experimental de la segunda hipótesis, a partir de los resultados de la evaluación del aprendizaje logrado por los estudiantes.

En el capítulo 9, se recogerán a modo de síntesis las conclusiones fundamentales obtenidas y se formularán nuevos interrogantes, que podrían abordarse tras ese estudio.

Para terminar mencionar que la propuesta curricular que se hace, aparece sólidamente ligada a modelos de intervención didáctica que tienen como denominador común el uso de estrategias de aprendizaje basadas en el “cambio conceptual”. “Se trata en la medida de lo posible, de colocar a los estudiantes en situación de *producir conocimientos*, de explorar alternativas, *superando la mera asimilación de conocimientos ya elaborados*” (Gil et al. 1999). En todo momento se ha tratado de realizar un trabajo colectivo de investigación orientada, tan alejado del descubrimiento autónomo como de la transmisión de conocimientos ya elaborados.

Así mismo, se han tenido en cuenta todos aquellos aspectos del proceso de enseñanza-aprendizaje que la investigación didáctica conviene en señalar. La propuesta de innovación curricular que aquí se presenta se fundamenta en los procedimientos y resultados de exploraciones precedentes, realizados en la misma línea de investigación que la que aquí hemos seguido.

Se ha prestado especial interés en aspectos tales como la *concepción del currículo y la manera de estructurar las actividades en el aula* (Furió y Gil 1978; Driver y Oldham 1986; Duschl 1998; Verdú et al. 2002), *la introducción de conceptos* (Guisasola 1996, Azcona 1997; Tarín 2000; López Gay 2001; Almudí 2002), *la*

resolución de problemas (Martinez-Torregrosa 1987; Ramírez 1990; Perales 1993; Goffard y Dumas-Carré 1996; Guisasola et al. 1997; Perales 2000; Leonard et al 2002; Guisasola y Barragués 2002) y *la evaluación entendida como instrumento de aprendizaje* (Alonso et al. 1992, Alonso 1994).

ÍNDICE

Planteamiento del problema e índice general	1
Capítulo 1. Análisis histórico y epistemológico del desarrollo del concepto de fuerza electromotriz	
1.1 Papel que puede desempeñar la Historia y la Epistemología de la Ciencia en el Desarrollo de la Enseñanza y Aprendizaje de las Ciencias.....	14
1.2 Principales aportaciones epistemológicas a la construcción del concepto Fuerza Electromotriz en los siglos XVIII y XIX.....	18
1.2.1 Historia de la génesis del concepto de fuerza electromotriz.....	19
1.2.2 La situación problemática de Volta.....	20
1.2.3 El esquema conceptual dominante en la Francia de 1800.....	21
1.2.4 La interpretación electrostática de la pila.....	25
1.2.5 Cómo el concepto de potencial fue llegando a los circuitos de corriente continua.....	30
1.2.6 La reformulación de Kirchhoff de las leyes de Ohm: La diferencia de potencial se establece en los circuitos de corriente continua.....	35
1.2.7 La génesis del concepto de campo: de Faraday a Maxwell.....	38
1.3 Conclusiones obtenidas del análisis histórico.....	42
1.4 Dificultades previsibles de aprendizaje del concepto de Fuerza electromotriz, a la luz del análisis histórico.....	48
Capítulo 2. El concepto de Fuerza electromotriz. Indicadores de su comprensión	
2.1 Significado e interés del concepto de Fuerza electromotriz.....	52
2.1.1 La Fuerza electromotriz: acción no electrostática sobre las cargas.....	53
2.1.2 Definición de Fuerza electromotriz.....	56
2.1.3 Fuerza electromotriz y diferencia de potencial.....	57
2.1.4 Consideraciones finales.....	58
2.2 Indicadores de aprendizaje comprensivo del concepto de fuerza electromotriz para circuitos sencillos de corriente continua.....	61
Capítulo 3. Fundamentación y enunciado de la primera hipótesis	
3.1 La enseñanza del concepto de Fuerza electromotriz y los conceptos fronterizos, parece tener deficiencias.....	66
3.2 El aprendizaje de los estudiantes sobre el concepto de fuerza electromotriz, parece tener deficiencias.....	73
3.3 Formulación de la primera hipótesis.....	77
Capítulo 4. Operativización de la primera hipótesis y sus diseños experimentales	
4.1 Operativización de la primera hipótesis y visión general del diseño.....	82
4.2 Consecuencias contrastables relativas a la enseñanza habitual.....	84

4.3	Diseños centrados en un análisis crítico de la enseñanza habitual.....	88
4.3.1	Diseños para contrastar deficiencias relativas a la introducción del concepto de fuerza electromotriz, observadas en los libros de texto.....	89
4.3.2	Diseños para contrastar deficiencias relativas a la enseñanza del concepto de fuerza electromotriz, observada en profesores.....	100
4.4	Diseños centrados en el aprendizaje logrado en la enseñanza habitual.....	122
4.4.1	Diseño para contrastar se distingue entre fuerza electromotriz y diferencia de potencial.....	124
4.4.2	Diseño para analizar si se distingue entre la ley de Ohm y la ecuación del circuito.....	125
4.4.3	Diseño para analizar el aprendizaje acerca de las descripciones macroscópicas y microscópica y las relaciones entre electrostática y los circuitos eléctricos.....	126

Capítulo 5. Presentación y análisis de los resultados obtenidos en la contrastación experimental de la primera hipótesis

5.1	Resultados obtenidos, en los libros de texto, al analizar cómo se introduce y utiliza el concepto de fuerza electromotriz en el estudio de los circuitos de corriente continua.....	127
5.1.1	Resultados que muestran deficiencias epistemológicas en la introducción de los contenidos.....	127
5.1.2	Resultados que muestran deficiencias didácticas en la introducción de contenidos.....	143
5.1.3	Resumen de los resultados obtenidos en el análisis de los libros de texto.....	162
5.2	Resultados obtenidos al analizar las carencias relativas a la enseñanza	166
5.2.1	Resultados relativos a las carencias epistemológicas detectadas en la introducción de los contenidos.....	166
5.2.2	Resultados relativos a deficiencias didácticas detectadas en las estrategias utilizadas para la introducción de los contenidos.....	171
5.2.3	Resultados relativos al análisis de las ideas del profesorado acerca del concepto de fuerza electromotriz.....	180
5.2.4	Resultados relativos al análisis de las ideas del profesorado acerca del concepto de fuerza electromotriz, obtenidos a través de las entrevistas a los mismos.....	215
5.3	Resultados obtenidos al analizar el aprendizaje logrado en la enseñanza habitual del concepto de Fuerza electromotriz.....	232
5.3.1	Resultados que demuestran que los estudiantes no distinguen entre fuerza electromotriz y diferencia de potencial.....	233
5.3.2	Resultados que demuestran que los estudiantes no distinguen entre la ecuación del circuito y la ley de Ohm.....	241
5.3.3	Resultados que demuestran que los estudiantes no diferencian entre las descripciones macroscópica y microscópica y no relacionan los conceptos estudiados en la electrostática con las explicaciones de los circuitos.....	243
5.3.4	Resultados que muestran, a través de entrevistas estructuradas, que los estudiantes han recibido una enseñanza siguiendo el modelo habitual, presentan escaso aprendizaje acerca del concepto de fuerza electromotriz.....	245

Capítulo 6. Enunciado y fundamentación de la segunda hipótesis

6.1 Enunciado de la segunda hipótesis.....	256
6.2 Fundamentación de la segunda hipótesis.....	257

Capítulo 7. Operativización de la segunda hipótesis y sus diseños experimentales

7.1 Operativización de la segunda hipótesis, consecuencias contrastables y visión general del diseño...	266
7.2 Diseños centrados en la enseñanza impartida.....	268
7.2.1 Elaboración de un hilo conductor que tenga en cuenta las dificultades de aprendizaje de los estudiantes y del que se obtenga un programa de actividades, para la enseñanza del concepto de fuerza electromotriz, en coherencia con el modelo de aprendizaje por investigación orientada.....	269
7.2.2 Diseño del programa-guía de actividades.....	278
7.3 Diseños centrados en el aprendizaje logrado con la alternativa didáctica propuesta.....	326
7.3.1 Diseños de los grupos experimentales.....	327
7.3.1.1 Diseños para evaluar el aprendizaje a corto-medio plazo de las nociones implicadas en el concepto de fuerza electromotriz	336
7.3.2 Diseños para medir las actitudes hacia el aprendizaje de la noción de fuerza electromotriz, en los grupos experimentales.....	338

Capítulo 8. Presentación y análisis de los resultados obtenidos en la contrastación experimental de la segunda hipótesis

8.1 Resultados que muestran que los estudiantes de los grupos experimentales obtienen una mejoría en aspectos conceptuales básicos y metodológicos en relación al concepto de fuerza electromotriz, respecto a los estudiantes de los grupos de control.....	340
8.1.1 Resultados del análisis de las pruebas efectuadas para comparar el aprendizaje conceptual logrado en la unidad didáctica por los grupos experimentales y de control.....	341
8.1.2 Resultados del análisis de las pruebas escritas y de las entrevistas a estudiantes de grupos experimentales, al enfrentarse a la interpretación y montaje de algunos circuitos.....	349
8.1.3 Resultados obtenidos en los grupos A y B al pasar las pruebas tres meses después. Valoración del aprendizaje a medio plazo.....	358
8.1.4 Resultados obtenidos al pasar la prueba al principio del curso siguiente, entre seis-siete meses después de estudiar la unidad didáctica	363
8.2 Resultados obtenidos en la contrastación experimental de la segunda hipótesis, desde el punto de vista de los indicadores de un aprendizaje comprensivo.....	367
8.3 Resultados que muestran que la propuesta alternativa contribuye a generar actitudes positivas de los estudiantes hacia el aprendizaje del concepto de fuerza electromotriz.....	375

Capítulo 9. Conclusiones y perspectivas

9.1 Conclusiones.....	379
9.2 Perspectivas abiertas.....	388

Relación de referencias bibliográficas.....	392
Anexo: Relación de libros de texto analizados.....	407

CAPÍTULO 1. ANALISIS HISTÓRICO Y EPISTEMOLÓGICO DEL DESARROLLO DEL CONCEPTO DE FUERZA ELECTROMOTRIZ

Vamos a comenzar refiriéndonos al papel que pueden jugar la Historia y la Epistemología de la Ciencia, con la idea de establecer con precisión qué aportaciones pueden realizar en relación con la enseñanza y aprendizaje de las ciencias. Luego nos referiremos con detalle al desarrollo del concepto de Fuerza electromotriz, desde los primeros trabajos de Volta a finales del siglo XVIII, a su evolución durante el siglo XIX, señalando aquellos aspectos que fueron conformando los atributos del concepto que hoy lo caracterizan. Todo esto, nos va a permitir explicitar aquello que consideramos más significativo para establecer en qué medida, una propuesta educativa puede favorecer la formación científica de los estudiantes.

1.1 Papel que pueden desempeñar la Historia y la Epistemología de la Ciencia en el desarrollo de la enseñanza y aprendizaje de las Ciencias

Hace más de una década que se vienen publicando trabajos sobre el papel de la Historia y la Filosofía de la Ciencia en la enseñanza de las Ciencias (Wandersee 1992, Matthews 1994-a, Bevilacqua y Giannetto 1998, McComas 2000, Seroglou y Koumaras 2001).

La utilización con carácter didáctico de la historia de la Ciencia ha sido valorada como un instrumento de enorme potencialidad (Arons 1990, Alvarez 1996, Solbes y Traver 1996), para ayudar en la construcción de los conceptos: semejanzas entre concepciones científicas e históricas y algunas preconcepciones del alumnado (Saltiel y Viennot 1985, Furió y Guisasola 1998-b, Guisasola 1999-a, 1999-b), cierto paralelismo entre la construcción histórica de conceptos científicos y la construcción psicológica de los mismos por el alumnado (Wandersee 1986), percepción de obstáculos epistemológicos (Gagliardi 1988, Pedrinaci 1993, Furió et al. 2000), comprensión de conceptos complejos, su significado y utilidad (Sebastiá 1993), en la formación de conocimientos procedimentales: necesidad del cambio metodológico (Gil et al. 1999) y actitudinales: construcción de una imagen más

ajustada de la ciencia, los científicos y los aspectos éticos de su trabajo (Fernández 2000, Gallego 2002, Solomon 2002), evidencia de las relaciones ciencia-sociedad (Solbes y Vilches 1997, Membiela 2001, Valdés et al. 2002), comprensión del proceso de construcción de la ciencia (Hodson, 1985).

La historia, filosofía y sociología de la ciencia no tienen todas las soluciones para superar aspectos todavía pendientes de desarrollo educativo. Sin embargo, si ofrecen algunas respuestas parciales a los problemas pendientes. Por ejemplo, acercar las ciencias a los intereses personales, éticos, culturales y políticos; pueden hacer las clases más estimulantes y reflexivas, incrementando de esta forma las capacidades del pensamiento crítico; pueden contribuir a una mayor comprensión de los contenidos científicos; pueden contribuir a superar el “callejón sin salida” en el que a veces se convierten las clases de ciencias, donde se recitan fórmulas y ecuaciones, pero donde pocos conocen su significado; pueden ayudar en la mejora de la formación del profesorado contribuyendo al desarrollo de una epistemología de la ciencia más rica y más auténtica, esto es, a un mejor conocimiento de la estructura de la ciencia y su lugar en el marco intelectual de las cosas (Matthews 1994-b, Cross y Fensham 2000).

El punto de vista que nosotros sustentamos va un poco más lejos de lo habitual en los últimos años, es decir, no se trata sólo de la mera recolección de datos que permitan realizar un estudio cronológico en torno a determinados descubrimientos de carácter científico, ni presentar biografías de hombres de ciencia o citar anecdóticamente hechos relevantes, sino que se trata de elaborar un relato coherente y significativo que permita explicar acontecimientos del pasado (Hegel 1985).

De acuerdo con lo anterior, es posible que un estudio crítico de la Historia y Epistemología de la Ciencia, nos pueda ilustrar a profesores e investigadores sobre la presencia de saltos cualitativos entre perfiles conceptuales que se han presentado en la construcción de los conocimientos científicos (Nersessian 1989, Duschl 1994, Seroglou et al. 1998). En este sentido, la no consideración por parte de la enseñanza de estas “discontinuidades” epistemológicas, puede llevar a que los estudiantes utilicen sólo aquellas

que son más significativas para ellos, no alcanzándose el perfil epistemológico que se quiere enseñar (Furió et al. 1998-a)

Partiendo de estas consideraciones, pensamos que la enseñanza de las ciencias debe tener en cuenta las aportaciones de la Historia de la Ciencia, fundamentalmente en dos aspectos:

1. La contextualización histórica de las teorías científicas muestra que éstas son productos socio-históricos cuestionados, reelaborados y sometidos siempre a la crítica del pensamiento y de la experiencia (Khun 1987, Lakatos 1983, Lombardi 1997). Esto implica resaltar el papel del debate, de la controversia, y el conflicto en la producción de las teorías científicas, en contraposición con la enseñanza tradicional que realiza una presentación de los conceptos “acabados” (en el sentido en que no pueden ser sometidos a discusión debido a su aceptación por la comunidad científica); y que se apoya, en el mejor de los casos, en un dispositivo experimental de ilustración.

Esta consideración no lineal del desarrollo científico sugiere que entre las teorías que han estado vigentes a lo largo de la historia, existen diferencias epistemológicas y ontológicas que han dado lugar a la controversia y, a fin de cuentas, a la superación de las mismas (Duschl 1997). Un elemento sustancial en el seguimiento del desarrollo histórico de la ciencia, es aquél que permite considerar las diferencias ontológicas que puedan existir en la evolución de las teorías científicas, o bien, al pasar de una teoría a otra. Más que proporcionar ideas acabadas, a la ciencia hay que pedirle que muestre la dificultad esencial del pensamiento consistente. Característica que goza de singular importancia en las dificultades de aprendizaje de algunos conceptos científicos (Chi 1991).

2. La Historia de la Ciencia puede contribuir en mayor medida a la enseñanza si nos fijamos más en la historia de los problemas surgidos durante su evolución, que en la de los propios resultados. En este sentido una hipótesis plausible de trabajo enunciada ya con sumo cuidado por Piaget y García (1977, 1979, 1982), indica que las similitudes entre la construcción del conocimiento científico en la historia de la humanidad y en la mente del

estudiante, no se refieren sólo al contenido de estas construcciones, sino también a los métodos seguidos en las mismas. En esta dirección hay trabajos de investigación (Wandersee et al. 1994), que sugieren que el desarrollo de los conceptos de una teoría a lo largo de un periodo histórico y el desarrollo de los mismos a nivel individual pueden tener ciertas similitudes funcionales. Es decir, que las dificultades que tienen los estudiantes en el aprendizaje de los conocimientos científicos, pueden considerarse semejantes a las dificultades que se presentaron en el desarrollo de las teorías científicas a través de la historia.

La comparación anterior no justificaría establecer un estricto paralelismo entre las dificultades cognitivas de los estudiantes y las que existieron en una determinada época histórica del desarrollo científico, ya que ni los contextos culturales son iguales, ni el pensamiento humano puede estar históricamente determinado (Saltiel y Viennot 1985).

En relación con todo esto hay una idea a la que es preciso atender ante la situación de emergencia planetaria (Vilches y Gil 2003), en lo que se refiere al estado agresión y deterioro medioambiental, hay que reivindicar, como señala Lévy –Leblond (1996) el estatuto de *aficionado*. Sobre éste recae la responsabilidad de llegar a ser un *conocedor* y no dejarse impresionar por una argumentación que, tras su apariencia científica, esconde intereses que la mayor parte de las veces corresponden a una minoría que se mueve en un sistema de pensamiento único.

Estas orientaciones permiten, por tanto, una mayor y mejor contribución de la Historia de la Ciencia a la Enseñanza, pues posibilitan la anticipación de problemas epistemológicos y ontológicos que dificultan el proceso de enseñanza-aprendizaje, así como la elaboración de estrategias de enseñanza, ofreciendo entonces, un mayor número de alternativas a los estudiantes. Así pues, establecer claramente obstáculos epistemológicos y ontológicos permite encarar la enseñanza desde el ángulo de la construcción de conocimientos y, no de la memorización de informaciones, lo que significa centrar la actividad en el desarrollo de la capacidad de aprender (Gagliardi y Giordan 1986, Gil 1993) y de integrar diversas perspectivas sobre un mismo fenómeno en un proceso de *integración del conocimiento* (Linn 2002). Esto permite que el alumnado tome conciencia de su propia forma de construcción del

saber y estimula el enriquecimiento de sus concepciones al formar parte de un proceso de investigación científica. Ello facilita la metacognición del estudiante, al mismo tiempo que centra su atención en el problema obstáculo que está trabajando y potencia su espíritu crítico sobre las formas de razonamiento de sentido común.

En definitiva, un análisis sistemático de las principales dificultades que tuvieron lugar en el proceso de construcción de los conocimientos científicos puede indicar un camino para resolver problemas al ayudarnos a fundamentar mejor su enseñanza, y a comprender los posibles obstáculos que puedan encontrar los estudiantes en el aprendizaje, para establecer un currículo de forma problematizada a través de las preguntas que se plantearon en el pasado y cuya respuesta permitió el desarrollo de la Ciencia, para comprender las modificaciones efectuadas en las teorías imperantes hasta llegar a las concepciones actuales (Solbes y Traver 1996, Martínez Torregrosa et al. 2002), todo ello, en el caso que nos ocupa, en relación con el concepto de Fuerza electromotriz.

De esta forma, realizaremos un análisis en relación con la génesis y evolución de dicho concepto, deteniéndonos especialmente en aquellas dificultades y problemas cuya superación suponía el desarrollo del conocimiento científico. Además, este conocimiento histórico debe contribuir a caracterizar de un modo claro qué nociones, en relación con el concepto de fuerza electromotriz, deberían enseñarse, para aprovechar todo el potencial que aporta su utilización. En el siguiente apartado se presentan las preguntas y los problemas en los que el concepto de Fuerza surge y se debate entre finales del siglo XVIII y el siglo XIX.

1.2 Principales aportaciones epistemológicas a la construcción del concepto de Fuerza electromotriz en los siglos XVIII y XIX

Cuando las concepciones alternativas de los estudiantes constituyen un obstáculo epistemológico (y ontológico) para desarrollar un proceso explicativo de nivel complejo, se hace necesario determinar las diferentes categorías epistemológicas que han tenido lugar en el proceso de evolución y desarrollo de una teoría o un concepto. Es por esto que, a

continuación, trataremos de sintetizarlas realizando una exposición de los principales hitos que tuvieron lugar en el proceso de construcción del concepto de Fuerza electromotriz, así como de su aportación al desarrollo de la parte de la Ciencia que llamamos Electricidad. Hay que señalar que nuestro mundo actual no sería posible sin las pilas y el futuro no se presentaría halagüeño sin ellas.

1.2.1 Historia de la génesis del concepto de fuerza electromotriz

Volta fue uno de los científicos más prestigiosos en su tiempo. Durante casi cincuenta años mantuvo correspondencia y colaboración con la élite científica de la Europa, es decir, antes y después de la invención de su pila eléctrica. Por cierto que el nombre de pila que dio Volta al primer elemento generador que construyó, deriva de la forma del elemento de apoyo intermedio de los puentes. De hecho describe Guerlac (1976) como llega a París en Septiembre de 1781 con ocasión de un viaje científico que realizaba por Suiza, Alemania y Bélgica y allí ante grupos privados y ante la prestigiosa Académie des Sciences mostró su nuevo electroscopio capaz de detectar la presencia de carga eléctrica débiles. Volta hace una demostración de sus experiencias nada menos que a Lavoisier y a Laplace, los tres discutieron sobre la posibilidad de detectar las débiles cargas eléctricas que se producen con la evaporación. Los experimentos son descritos en una corta memoria por Laplace y Lavoisier, prologada el 7 de abril por Condorcet y publicada en las *Mémoires* de la Academia en 1781. En las Obras de Lavoisier 2, pp 374-376 puede leerse: “M. De Volta a bien voulu assister à nos dernières expériences, et nous y être utile, la présence et le témoignage de cet excellent physicien ne peuvent qu’inspirer de la confiance dans nos résultats.

Volta era un experimentador habilísimo y muy documentado en los trabajos que se realizaban en toda Europa sobre la “ciencia eléctrica”, esto le había llevado no sólo a la construcción de aparatos para medir la presencia de lo que hoy denominaríamos carga eléctrica, sino también a medio construir los conceptos de electricidad y potencial, diferente este último al de cantidad de electricidad como señala Pancaldi en su artículo de 1990. Pero además ya en el año 1776, como aspectos secundarios de su trabajo principal sobre la

electricidad metálica (que Volta contraponía a la electricidad animal de Galvani) describió perfectamente el fenómeno conocido como electroestricción, que se ocupa de la deformación elástica de los cuerpos y que atribuyó a la fuerza de atracción entre cargas eléctricas de distinto signo. Trabajos realizados casi un siglo más tarde por Wien y otros demostraron que las deformaciones son proporcionales al cuadrado de la intensidad del campo eléctrico.

1.2.2 La situación problemática de Volta.

Señala Pancaldi (1990) que las notas del cuaderno de laboratorio de Volta entre diciembre de 1797 y marzo de 1799 demuestran que estaba ocupado en extender la escala de “capacidades electromotrices de conductores” a una variedad de sustancias químicas. También buscaba una ley capaz de combinar “capacidades electromotrices” (La expresión “*capacidad electromotriz*” era más una descripción cualitativa sobre la capacidad de un material para producir electricidad en movimiento. En este tiempo los conceptos de diferencia de potencial o densidad eléctrica no se aplicaban a lo que se denominaba “galvanismo”, ámbito en el que trabajaba Volta) y diferentes clases de interacción mecánica que los conductores podrían ejercerse unos a otros, hay que recordar que Volta había estudiado el fenómeno conocido como electroestricción. El cuaderno contiene notas entre diciembre de 1797 a abril de 1798 en las que se registran medidas de la electricidad producidas por el simple contacto o debidas a la presión, calentamiento o por el rozamiento de discos de diferentes metales contra discos de lana húmeda o seca, papel, tela y contra su propio cuerpo y en todos los casos están registrados los datos en relación con las condiciones atmosféricas, especialmente de calor y humedad. Cuando la electricidad era débil utilizaba una botella de Leyden o un condensador para detectarla.

En notas de marzo de 1799 se encuentran medidas de electricidad procedentes del contacto entre discos no metálicos humedecidos con sustancias ácidas, sosa o potasa y otros discos humedecidos con el rocío atmosférico. En marzo de 1799 Volta resumió los resultados de sus medidas en una serie de leyes empíricas que, clasificaban los diferentes “motores” de la electricidad en cuatro clases de acuerdo con su poder decreciente. “Los mejores dos metales, segundo un metal y un conductor húmedo,

tercero dos conductores diferentes húmedos y cuarto dos conductores iguales húmedos”.

En las cartas de esa época (marzo de 1799) se refiere a que espera que para el verano pueda tener un informe sobre el galvanismo y su propia teoría de la electricidad. Nunca escribió este ensayo. Durante el verano de 1799 o más probablemente durante el otoño, algo cambió sus planes. Este algo reorientó sus investigaciones y sus planes de publicación y le sugirió una nueva meta, un nuevo modelo de la electricidad de los peces para trabajar con ella y nuevas ideas que le llevaron en pocas semanas o meses a la construcción de la batería.

De vez en cuando Volta encargaba libros y revistas a un librero de Leipzig. El 10 de abril de 1798 había encargado una larga lista de trabajos incluyendo el “Journal of Natural Philosophy, Chemistry and the Arts” de William Nicholson. Dado que Nicholson era, como Volta, miembro del pequeño grupo internacional de electricistas ocupados de la búsqueda de la electricidad débil, el interés de Volta en el informe de Nicholson se comprende. No se sabe exactamente cuando Volta recibió la revista. El 20 de septiembre de 1799 Barth envió a Volta la cuenta por los libros y probablemente dicha cuenta la mandó por la misma fecha o un poco antes. Volta tenía el número de la revista hacia noviembre de 1799, cuando escribió el primer borrador de su carta de 20 de Marzo de 1800 a Joseph Banks, presidente de la Royal Society de Londres en ese año, anunciando el descubrimiento de la pila eléctrica. Parece que un artículo del propio Nicholson en este número de la revista reorientó significativamente la propia investigación de Volta, el artículo en cuestión (durante mucho tiempo ignorado por los historiadores) trata de la mejor forma de imitar las sacudidas y la anatomía de los peces eléctricos, especialmente el pez torpedo. En el curso de su controversia con Galvani y sus seguidores acerca de la electricidad animal Volta defendía que los animales no poseen una clase especial de electricidad.

1.2.3. El esquema conceptual dominante en la Francia de 1800

En la primera década del siglo XIX la física experimental sufrió una transformación. Los esfuerzos de Laplace, Berthollet y sus discípulos en la “Société d’Arcueil” transformaron una exposición cualitativa de la ciencia en una disciplina rigurosamente matematizada (Brown 1969, Fox 1974, Frankel 1977). Esta

transformación tiene sus raíces en los años 1780 y su culminación en los años 1810, pero el periodo crucial es entre 1800-1810 cuando el círculo de Arcueil se impone de manera consciente la tarea de interpretar matemáticamente la “física general y experimental”. Laplace y Berthollet que habían sido amigos desde principios de los años 1785, eran activos propagandistas del movimiento para una nueva física y una nueva química. Berthollet escribió la introducción a las primeras memorias sobre la Société d’Arcueil en 1807, allí se podía leer: “Para el progreso en la Física y en la Química es necesario alcanzar gran precisión en los hechos, se deben perfeccionar todos los significados de los hechos establecidos y comparar los resultados de los diferentes físicos, ...solamente a través de esta labor es posible llegar al establecimiento de teorías firmes...”

Las reformas eran la primera meta de la famosa Société d’Arcueil, un seminario de investigación avanzada en ciencias físicas, se reunían cada dos semanas en la casa de verano de Berthollet y en el laboratorio de Arcueil. Dirigidos por Berthollet y Laplace, entre los miembros de la sociedad cabe citar a: Biot (33 años, era el más viejo de los jóvenes en torno a la Sociedad y el primero de los protegidos de Laplace), Thénard (30 años), Gay-Lussac(29 años), Malus (32 años), Poisson (26 años), Dulong (22 años), Arago (21 años), entre otros. En los encuentros se daban a conocer nuevas experiencias, o se reproducían aquellas que realizadas por alguno de los miembros era necesario revisar; cada uno de ellos daba a conocer las lecturas que habían llegado a sus manos de las revistas de su especialidad, etc.

De manera resumida el esquema de trabajo era el siguiente:

*** La cuantificación o la utilización de los nuevos instrumentos de medida o técnicas para llegar a alcanzar datos numéricos de las magnitudes y entidades físicas que eran previamente conocidas sólo de forma cualitativa.**

*** La mejora de la exactitud y precisión, mediante la introducción de nuevos procedimientos, controles y aparataje que permitiera reducir los errores.**

*** La expresión de los datos en la forma de relaciones algebraicas entre las variables físicas. Un ejemplo de esto eran las leyes de Gay-Lussac**

*** La asimilación de los datos cuantitativos o de las relaciones algebraicas a los paradigmas dominantes de las fuerzas de acción a distancia entre moléculas de**

materia o de los llamados fluidos imponderables luz, calórico, electricidad y magnetismo.

A lo largo de una buena parte del siglo XVIII se puede decir que habían venido existiendo dos tradiciones científicas separadas, por una parte los temas de la mecánica racional, estática, dinámica, hidrostática, hidrodinámica y mecánica celeste, a los que se dedicaban los grandes geómetras de la época como problemas de matemáticas aplicadas. Por otra parte, la referente a las ciencias del calor, el magnetismo, la electricidad y la luz eran estudiados empíricamente por hombres que bien pueden ser descritos como “filósofos experimentales” en cuyo grupo estaban incluidos físicos, clérigos, filósofos, químicos y aficionados. Durante las dos últimas décadas del siglo XVIII, hombres entrenados en las ciencias exactas, astronomía, matemáticas e ingeniería se dedican al estudio de lo que conocemos como el cuerpo de la física experimental. Y si bien antes había habido casos como por ejemplo el de Euler dedicado al estudio de la óptica, nunca antes se había dado el caso de tantos matemáticos dedicados a resolver problemas de la física.

Dos acontecimientos particularmente simbolizaron la era de la matematización y la cuantificación de las ciencias físicas (Frankel 1977, Fox 1974) , el primero en 1783 cuando Laplace y Lavoisier escribieron sus famosas “Mémoires sur la chaleur” como un símbolo del caminar juntos matemáticos y físicos y el punto de partida para el desarrollo de una cuantificación en la ciencia del calor en el siglo XIX. Poco después en 1785, Coulomb comenzó sus famosas investigaciones con la balanza de torsión aplicada a la electricidad y el magnetismo, lo cual llevó a incorporar a estas dos ciencias al esquema del mundo Newtoniano de la acción a distancia. Estas dos investigaciones representan aspectos complementarios de la matematización de la física experimental en los años 1780. La colaboración entre Laplace y Lavoisier se expandió debido directamente a los cambios que tuvieron lugar en la química del siglo XVIII y que hoy conocemos con el nombre de “Revolución química”. En los años 1770 Lavoisier había puesto el énfasis sobre las técnicas cuantitativas que habían llegado a ser la base de una nueva ciencia química. Laplace era el miembro más insigne de un grupo de matemáticos que habían llegado a interesarse por las ciencias físicas a través de la Revolución Química.

Mucho más importante que sus resultados era su metodología, Laplace y Lavoisier inventaban un nuevo instrumento para conseguir medidas cuantitativas donde esta antes no habían podido conseguirse. En este sentido su trabajo se parecía de forma notable al segundo logro más importante de esta época: los estudios de Coulomb sobre magnetismo y electricidad. Coulomb había llegado a este trabajo desde la tradición de la ingeniería mecánica, la cual había estado durante mucho tiempo relacionada con las medidas de las magnitudes físicas. Fue el primero de una larga serie de ingenieros-físicos franceses que realizaron importantes contribuciones a la matematización de la física en el medio siglo que va desde 1780 a 1830. Las siete memorias sobre electricidad y magnetismo fueron las más famosas investigaciones físicas que se realizaron durante muchos años.

Los estudios de Coulomb ejemplificaban tres de los principales aspectos de la matematización de la física experimental en Francia: 1) el desarrollo de los instrumentos y técnicas para conseguir resultados cuantitativos en la experimentación; 2) El aumento del uso de las matemáticas en la interpretación de los datos y 3) La investigación en la búsqueda de leyes de fuerza comparables a la ley de Newton de la gravitación universal.

Pero además de los trabajos de Laplace y Lavoisier sobre el calor y Coulomb sobre la electricidad y el magnetismo, habría que señalar los trabajos de Haüy sobre cristalografía y la doble refracción y los de Monge sobre los fenómenos de tensión superficial, todos ellos eran el síntoma de una nueva actitud hacia la física en Francia, que se reflejaba en las medidas que tomaba la Academia y en la creación de una cátedra de "Física experimental y general" por el College Royal en 1785 (Brown 1969, Archibald 1988, Home 1983).

En los años 1790 el movimiento hacia la cuantificación en física experimental encontró su mejor expresión en el desarrollo de un racional, preciso y uniforme conjunto de pesos y medidas: el sistema métrico. La comisión para la elaboración estaba formada por matemáticos de prestigio como Lagrange, ingenieros y físicos.

Es en este ambiente en el que una vez que se estableció la ley de Coulomb y se comprobó la relación inversa entre la fuerza y el cuadrado de las distancias, lo que a su vez implicaba que era posible establecer la relación correspondiente entre la "masa

eléctrica" (magnitud activa) y la distancia, como exigía la condición para definir el potencial, Laplace y posteriormente su discípulo Poisson, abordaron la elaboración de una teoría completa sobre las interacciones eléctricas, que no olvidemos a finales del siglo XVIII y principios del XIX era sólo electrostáticas (Brown, 1969; Frankel, 1977; Humphreys, 1937; Sutton, 1981).

1.2.4 La interpretación electrostática de la pila

Antes de seguir hay que llamar la atención sobre el hecho de que en la ley de Coulomb: "las masas eléctricas se atraen o se repelen en razón inversa del cuadrado de sus distancias", la "distancia entre cuerpos" sólo tiene significado cuando las dimensiones de estos son muy pequeñas comparada con las distancias entre los puntos que los constituyen. En este sentido señalar brevemente que, la relación fuerza inversa de los cuadrados de la distancia, había sido sospechada antes de que fuese establecida por Coulomb, pero los dispositivos experimentales, colocar un cuerpo cargado, a una distancia medible, debajo de los platillos de una balanza, para luego medir el peso que había que colocar en el otro platillo a fin de vencer la atracción, no permitía confirmar la hipótesis ya que con el arreglo anterior, la atracción varía con la distancia de una manera no simple; además la forma compleja en que lo hace depende del tamaño y del material del platillo atraído. Por lo que se puede comprender que las interacciones entre cuerpos de distintas formas, tamaños (no despreciables frente a las distancias entre ellos) y materiales, estaban por estudiar (Kellogg 1953).

Las elaboraciones teóricas y su concordancia con los resultados experimentales (tanto Laplace como Poisson eran hábiles experimentadores además de matemáticos de gran talla) hicieron que en los primeros años del XIX la teoría eléctrica hubiera alcanzado un alto grado de madurez, que la había puesto en el umbral de la unificación con la Mecánica Celeste (Buchwald 1977); (Frankel 1977). Poco después en su influyente "Traité de physique expérimentale et mathématique" (1816), Biot presentó como paradigma de la física un método matemático y experimental; la cuantificación había de ser el propósito de la teoría física, lo que junto con la postulación de modelos de la realidad física susceptibles de contraste experimental y de formulación matemática, llegaron a configurar el desarrollo de la física del siglo XIX. Esta enorme tarea se comprende mejor si no se pierde de vista que a principios del XIX los trabajos

de otros autores estaban aún preñados de "efluvios", ácidos "sui generis", etc. Por ejemplo en 1801 se publica en los Annales un informe de M. Robertson titulado "Experiencias nuevas sobre el fluido Galvánico", en el que trata de demostrar que las sensaciones causadas al tocar los terminales de la pila eran considerablemente diferentes de los causados por la ordinaria "conmoción eléctrica", El autor concluía su vigoroso rechazo de las explicaciones de Volta en el sentido que el fluido eléctrico era la causa del galvanismo: "Yo rechazo el fluido eléctrico como principio del galvanismo, para atribuirlo a un *ácido sui generis*" (Fox 1990).

En el campo de la electricidad las explicaciones electrostáticas constituyeron el **esquema conceptual dominante y casi único** durante el primer tercio del siglo XIX, hasta tal punto que **durante casi cuarenta años la pila fue explicada como un instrumento electrostático**, mereciendo el rechazo por parte de los miembros de la Academia de las Ciencias de París, las explicaciones alternativas en términos de corrientes en movimiento, incluyendo trabajos como el de Ampère (Brown 1969; Buchwald, 1977; Sutton 1981). Es en este marco en el que hay que situar los primeros estudios acerca de la pila de Volta y las explicaciones de este.

Al principio los físicos hicieron de la pila, no del circuito (cuya noción en el sentido que hoy la conocemos no existía) el centro de sus investigaciones, tomando prestado de la electrostática técnicas instrumentales para estudiar la configuración electrostática de la pila. Más aún, los datos procedentes de las investigaciones de los fenómenos químicos realizadas por Humphry Davy y otros fueron explicadas mediante detalladas analogías electrostáticas (Brown, 1969; Cardot 1985).

En esta época Coulomb gozaba de un enorme prestigio debido a su habilidad experimental y a su precisión matemática (Hurd y Kipling 1964)). Había ideado un mecanismo mediante el cual podía medir la carga de cualquier cuerpo, lo que suponía, antes de la entrada en escena de Volta, poder cuantificar sobre cualquier aspecto experimental relacionado con la electricidad. Como consecuencia de este trabajo los físicos franceses poseían desde finales del siglo XVIII y a principios del XIX una refinada ciencia de la electrostática fundamentada en los recientes resultados experimentales y matemáticos de Coulomb y en unas técnicas adecuadas para los fenómenos eléctricos conocidos. El invento de Volta ponía en escena una serie de

resultados que parecían hacer olvidar entre los físicos franceses a Coulomb. “Solamente cuando Volta llegó al *Institut* y se nombró un comité especial para estudiar sus resultados, entre cuyos miembros figuraba Coulomb, pudo este recuperar el control de la ciencia eléctrica francesa” (Brown, 1969).

Los resultados de la comisión fueron, después de un riguroso examen de la distribución de la electricidad estática en la pila, incluir a ésta en el dominio de las explicaciones culombianas. (Brown, 1969; Frankel. 1977; Sutton1981).

Sin embargo, inicialmente Volta veía el fluido eléctrico estático, de algún modo libre y forzado a moverse en cada superficie de contacto cinc/cobre. Este fluido eléctrico era empujado desde el primer par Cu/Zn, atravesaba libremente la capa de cartón húmedo recibía un impulso adicional en la interfase Cu/Zn del par superior y así sucesivamente. Volta no explicaba la naturaleza de la desconocida "fuerza electromotriz" de contacto o cómo operaba más allá de acción no electrostática sobre las cargas. Él afirmó que su acción propulsiva podría conjeturarse desde la fuerte y continua "corriente" de electricidad que uno sentía cuando tocaba los terminales de la pila, para terminar atribuyendo a los efectos fisiológicos de la corriente sobre el tejido muscular los llamados "efectos galvánicos" (Brown 1969; Cardot 1985). Los oponentes decían que los efectos fisiológicos se debían a un "fluido animal especial" más que a la pila. Incluso se publican y se presentan algunos informes sobre ello. Los contenidos esenciales de dichos informes eran:

* El shock galvánico es fuerte y continuo, los de la electricidad ordinaria son instantáneos.

* Durante la conmoción galvánica no pueden detectarse signos de electricidad ordinaria con un electrómetro.

Hacia el primer tercio del siglo los datos que se obtenían del estudio de la química de la pila así como de las experiencias que se iban conociendo en el campo de la electricidad y el magnetismo, eran interpretados con ideas acerca de la estructura de la materia sin demasiada unanimidad. En el año 1828 George Green generalizó y extendió las investigaciones realizadas por Poisson, mediante un tratamiento de las propiedades de la materia basado en las propiedades de la función utilizada ya por

Lagrange, Laplace y Poisson, la cual representaba la suma de todas las cargas eléctricas o magnéticas en el campo, divididas por sus respectivas distancias a algún punto dado. A esta función Green dio el nombre de **Potencial**, por el cual se la conoce desde entonces. Este tratamiento de las interacciones electrostáticas y magnéticas tenía la ventaja de explicar dichas interacciones sin entrar en consideraciones acerca de la estructura de la materia.

Del trabajo de Green sobre "las aplicaciones del análisis matemático a las teorías de la electricidad y el magnetismo" (publicado en Nottingham en 1828), merece la pena destacar dos cuestiones, una la obra permaneció desconocida hasta que cerca de 30 años después William Thomson la redescubrió cuando se ocupaba de la matematización de la electrostática de Faraday y de la naturaleza del fluido eléctrico. La otra es que, en el año 1841 cuando Thomson comienza a ocuparse de estos asuntos, la explicación imperante acerca del funcionamiento de la pila es todavía electrostático. En torno a este tema existían también algunas discrepancias procedentes del campo de la química de la pila.

Después de 1820, a partir de las experiencias de Oersted y Ampère se desarrollaron otras posibilidades instrumentales y teóricas que hicieron del circuito en su conjunto el principal objeto de investigación y la corriente eléctrica llegó a parecerse a la corriente por primera vez (Humphreys 1937; Archibald. 1988).

Volta no sólo inventó la pila, entre una larga serie de descubrimientos, además acuñó el término fuerza electromotriz así como el concepto subyacente de acción no electrostática sobre las cargas (Fisher 1976, Varney y Fisher 1980). Llama, no obstante, la atención que no se reconozcan a Volta ninguna de las dos aportaciones y no creemos sea sólo por el estilo oscuro de escribir que muchos autores le atribuyen. Creemos que el término y el concepto asociado se relegaron al olvido por motivos relacionados con el desarrollo de la Ciencia en general y de la Electricidad en particular en la Francia de principios de siglo XIX.

Las explicaciones que Volta elaboró para explicar el funcionamiento de la pila no encajaban con el marco teórico de la Física de la época. De acuerdo con Brown (1969), dichas explicaciones diferían en dos aspectos cruciales, en la naturaleza de la

fuerza electromotriz y en el significado de la circulación eléctrica. Para Biot la hipótesis de Volta primero y posteriormente las de Davy, Nicholson, Ritter, Pfaff, Van Marun y Wollaston carecía de rigor experimental tanto en lo referente a la corriente continuamente producida en la pila, como achacar a las reacciones químicas que tenían lugar la razón última de la fuerza electromotriz. Para el físico francés solamente la balanza eléctrica de Coulomb daba un grado suficiente de exactitud a las experiencias medidas en la pila, en la cual era capaz de medir la cantidad de electricidad producida.

En realidad nos encontramos con dos teorías diferentes para explicar el fenómeno revolucionario de la pila que cambió la forma de trabajar en electricidad y su posterior desarrollo. Para el paradigma culombiano dominante en el primer tercio del siglo XIX, la fuerza electromotriz definida por Volta era la capacidad que tenían algunos cuerpos para generar electricidad en otros. Vemos que esta interpretación es radicalmente diferente de la original de Volta, donde la fuerza electromotriz se entiende como la capacidad para separar cargas y mantenerlas separadas, relacionándola con medidas de diferencia de potencial. Las explicaciones de Volta que no se ajustaban al paradigma electrostático vigente no encuentran por tanto ningún eco y caen en el olvido. Posteriormente el “Tratado sobre Electricidad y Magnetismo” de Maxwell tampoco relaciona a Volta con el concepto de Fuerza electromotriz lo que definitivamente arrincona las aportaciones notorias del físico italiano.

Desde una visión de la Naturaleza de la Ciencia que concibe las teorías como procesos de argumentación donde los científicos relacionan conjeturas imaginativas con rigurosos procesos de contrastación (Goodning, 1980, Giere 1991, Toulmin 1977), no resulta difícil comprender el largo y tortuoso camino que hubo de recorrerse hasta que se unificaron las explicaciones para los distintos experimentos de lo que terminaría por ser el Electromagnetismo. Piénsese que hacia el primer tercio del siglo XIX estaban por resolver algunas cuestiones, necesarias para poder realizar estudios cuantitativos acerca de los circuitos eléctricos de manera satisfactoria (Humphreys 1937) entre las que cabe destacar:

- a) La consecución de una corriente constante a lo largo de todo el circuito.
- b) La invención de los galvanómetros y la aplicación de la teoría magnética para relacionar convenientemente corrientes y efectos magnéticos.

- c) Acuerdos sobre las cuestiones que podría deducirse de la medida de tales efectos magnéticos.
- d) La medida en una unidad común para la resistencia de cada parte del circuito.

1.2.5 Cómo el concepto de potencial fue llegando a los circuitos de corriente continua

Lo primero que es necesario no perder de vista es que en la época en la que Ohm inicia sus investigaciones (1825), lo que hoy denominaríamos el "paradigma dominante", para las acciones y fenómenos eléctricos es electrostático, incluso la pila se interpreta desde estas ideas dominantes, es decir, como un instrumento electrostático. Más aún la electrostática se consideraba una cosa y el galvanismo otra. El galvanismo estaba asociado con el desprendimiento de calor, algunas reacciones químicas, el movimiento de algunos músculos, algunas relaciones con los imanes (para los que estaban muy al día y conocían los experimentos de Oersted) y todo lo anterior no tenía nada que ver con la electrostática una parte de la "ciencia" que después de los trabajos de Laplace y Poisson se consideraba casi "acabada" (Archibald. 1988; Brown 1969; Sutton 1981).

Conviene señalar un par de detalles; el primero es que antes de iniciar sus investigaciones en electricidad Ohm había estudiado la obra de Lagrange, Laplace, Biot y Poisson. La segunda es que en su época su obra no fue valorada y mucho menos en su país, precisamente porque las teorías de la conducción del galvanismo no sólo no existían es que no habían merecido consideración, él en realidad fue un pionero. Cabe señalar que la obra de Ohm fue publicada en 1837 en Francia por Pouillet (este autor creía que él era el descubridor de la ley, ya que había publicado en 1831 un trabajo similar al de Ohm), sólo a partir de entonces empezó a tener cierta consideración en su propio país. Sólo cuando los "reformistas" franceses (es decir, los que empezaron a cuestionar el paradigma electrostático vigente) comenzaron a abrirse paso, su obra comenzó a ser tenida en cuenta.

El área de investigación en la que Ohm se inició, era la relación entre la fuerza magnética ejercida por una corriente y la naturaleza del conductor que transportaba la corriente. A principios de la década de 1820 Poggendorff y Schweigger habían

inventado los multiplicadores, aparatos que amplificaban el efecto electromagnético debido a la colocación de una bobina en el circuito. (Un multiplicador era una especie de electrómetro de torsión, que sería el embrión de los galvanómetros) Ohm pensó explicar la razón para el hecho de que el efecto multiplicador del "multiplicador" cayera cuando se alcanzaba un determinado número de vueltas en la bobina.

La utilización del multiplicador no estaba extendida en este tiempo como un instrumento para medir la corriente, ya que el uso de aparatos de diferentes diseños y por diferentes experimentadores, no había llevado a una interpretación definida de la influencia sobre el efecto multiplicador de la configuración del instrumento o de los materiales utilizados. Para clarificar ésta y las cuestiones relacionadas con la misma, las primeras investigaciones de Ohm en 1825 pretendían investigar las conductividades de varias clases de hilos.

Conviene dejar lo anterior bien claro porque, ni remotamente, Ohm había pretendido establecer una relación entre la intensidad de un circuito y la diferencia de potencial entre sus extremos y las razones son bien sencillas: No existía la noción de corriente eléctrica, la idea de corriente fue recibida con mucha cautela debido a que en aquel momento resultaba muy difícil descubrir cualquier cosa precisa en relación con el tema, la naturaleza de la carga era la de un fluido y no existían teorías sobre la conducción, más aun la noción de corriente no había llegado digamos a la comunidad científica. Se trataba más de un “desconocido sustrato” para justificar las propiedades del conductor que unía los polos de una célula. Al respecto Faraday escribió: “Hay muchos argumentos a favor de la materialidad de la electricidad y pocos en contra, pero todavía es sólo una suposición y será bueno recordar... que no tenemos pruebas ni de su materialidad ni de su existencia a través del hilo ... la existencia de corriente y su dirección se suponen por la conveniencia de tener algo sobre lo que la dirección de los movimientos electromagnéticos pueda referirse con facilidad”. Algunos autores reducían estrictamente la descripción de la electricidad a los fenómenos observados hablando de “conducción de la influencia magnética”.

O esta otra cita recogida por A.W. Humphreys en 1833: “he adoptado la palabra “corriente” como un modo de expresión conveniente y por ello... Yo supongo que el conductor está en un estado peculiar, manifestándose por ciertos efectos

producidos sobre una aguja magnética, pero esto no significa que esté adoptando ningún punto de vista teórico sobre el tema, si este estado consiste en el movimiento de un fluido peculiar en el conductor o en el reordenamiento de uno previamente existente, o la excitación de un poder latente esto no lo he averiguado por el momento”.

En estos años Ampère por ejemplo, no tiene claro si era más conveniente pensar en dos corrientes que salen de cada uno de los polos de la pila y se reúnen en un punto o dos corrientes opuestas continuamente circulando cada una hacia el polo opuesto. Weber mantuvo en Alemania nociones de corriente similares.

Tampoco existía la noción de potencial aplicada al caso de los circuitos galvánicos que, una vez más hay que recordar, no eran en este tiempo explicados como ingenios en los que se trataba con la misma propiedad que en las máquinas eléctricas. Ni que decir tiene que tampoco existía la noción de resistencia. Si bien es cierto que Cavendish había investigado sobre las conductividades de algunas sustancias en el año 1781, utilizando una cascada de botellas de Leyden, no es menos cierto que su "galvanómetro" era su propio cuerpo. Ohm en su trabajo se refirió a la "longitud reducida" que era una noción muy emparentada con la de resistencia.

Uno de los problemas de Ohm en esta investigación fue que las pilas de entonces se polarizaban rápidamente y no mantenían una corriente constante, por lo que a sugerencia de Poggendorff utilizó la nueva fuente de electricidad descubierta por Seebeck.

Merece la pena detenerse en algunos de los supuestos teóricos de Ohm, que recogió posteriormente en un libro que se llamó: "El circuito galvánico investigado matemáticamente". El libro es un intento de explicar las leyes de la conducción, esto permitirá que se comprenda mejor su noción de "fuerza electroscópica", que inicialmente había denominado "fuerza excitatriz" (exciting force, en su trabajo en inglés, como señala Archibald en su artículo de 1988), antecedente inmediato del potencial para el caso de los circuitos eléctricos.

La fuerza electroscópica era una cantidad medida utilizando un instrumento electrostático, de hecho, la fuerza electroscópica **de un conductor** era definida por Ohm como la cantidad que podía medirse con un electroscopio; para medir esta fuerza el circuito se abría. Ohm posteriormente definió la tensión (en sus escritos utiliza el vocablo *Spannung*. Op. Cit.) en una porción del circuito como la diferencia entre las fuerzas electroscópicas en los extremos. No sólo por la forma de definir la fuerza electroscópica, sino por la concepción como propiedad de conductor, era un concepto electrostático. La electricidad en esta época era una propiedad que los cuerpos exhibían en determinadas circunstancias, lo que se transmitía era el galvanismo. Si bien las teorías sobre la conducción acabaron socavando la concepción primitiva de electricidad.

El punto de vista de Ampère, por ejemplo, sobre la tensión era que ésta desaparecía cuando el circuito se cerraba, ya que no podía detectarse ninguna acción electrostática. Para Ohm, por el contrario, la tensión era una propiedad que existía en el circuito cerrado también, incluso cuando no se podían detectar efectos electrostáticos en la superficie del conductor bajo estas circunstancias.

Según el punto de vista de Ohm, si una diferencia en la fuerza electroscópica (esto es una tensión o una diferencia de potencial como más tarde propuso Kirchhoff) se da entre porciones de un conductor esta fuerza tenderá a cambiar hasta que la diferencia es cero y se establece el equilibrio. Ohm caracterizaba este proceso como un cambio de fuerza entre los elementos de un cuerpo. Mientras la diferencia persiste, hay una tensión entre las partes del conductor (Wangness1999). Quizá esto se comprenda mejor si se tiene en cuenta cuál es el supuesto teórico de Ohm que subyace tras estas ideas.

Ohm basaba su interpretación sobre una serie de hipótesis, dos de las cuales eran experimentales en su origen, mientras que la otra, era una hipótesis teórica:

La comunicación de electricidad entre los elementos de un cuerpo tiene lugar solamente con los elementos contiguos a él (es decir, la electricidad pasaba de una partícula a otra directamente) y de forma directa, y no se produce desde un elemento a cualquier otro situado a una distancia donde no existe transmisión directa. Yo he supuesto la magnitud de la transmisión entre dos partículas

adyacentes como proporcional a las fuerzas eléctricas entre ambas partículas; exactamente igual que en la teoría del calor el flujo de calor entre dos elementos de un cuerpo se toma como proporcional a la diferencia de sus temperaturas. (Fragmento de texto recogido por Archibald en el artículo citado).

Ohm se refiere explícitamente a la teoría de la conducción del calor ya que el modelo matemático empleado por él estaba en una buena medida basado en el método utilizado por Joseph Fourier, en 1822, en su "*Teoría Analítica del Calor*", para describir la conducción del calor en los sólidos. Ohm reconoció la similitud de su tratamiento con el propuesto por Fourier y también señaló el parecido general entre la conducción del calor y la conducción eléctrica:

La forma y el tratamiento de las ecuaciones diferenciales así obtenidas (para la conducción de la electricidad) son similares a las propuestas por Fourier y Poisson para el calor... incluso si no hay razones adicionales la conclusión puede expresarse contemplando una conexión interna entre los dos fenómenos naturales... (Esta idea de la unidad de la naturaleza estaba generalizada entre los "físicos" alemanes de la época).

Del mismo modo que Fourier distingue entre calor y temperatura como piedra angular de su propuesta, 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 de carga 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.

En la época de Ohm se suponía que cuando dos metales se ponían en contacto "ambos mantenían constante, en el punto de contacto, la diferencia entre sus fuerzas electroscópicas" (entre sus densidades de carga). Esta suposición identificaba la fuerza electroscópica con el potencial electrostático. Pero Ohm y sus contemporáneos no comprendieron correctamente la relación de las concepciones galvánicas con las funciones electrostáticas de Poisson. La fuerza electroscópica de la pila se identificaba con lo que en el lenguaje de la época se denominaba "el grosor de la capa eléctrica del lugar en el que se realizaba la medición". En estos años una serie de matemáticos entre

los que estaban Liapounoff y Dirichlet habían resuelto una serie de teoremas matemáticos que en relación con la electricidad permiten calcular el valor de la atracción de una superficie abierta (un electrodo) cargada con electricidad. Se llamaba primer problema del potencial, al que se planteaba al hallar esta función conociendo los valores que adoptaba en determinadas superficies; y segundo problema del potencial el de hallar la función potencial sabiendo los valores que adoptan sus derivadas en las superficies límite. Posteriormente se llamó problema de Neumann.

Llama la atención el hecho de que Ohm llegase a partir de un concepto erróneo, el de fuerza electroscópica, en vez del concepto de potencial, a unas conclusiones válidas. Desde el momento en que la fuerza electroscópica de Ohm satisface la ecuación de continuidad, condición que él había demostrado en el tratamiento teórico que había dado a su trabajo, su medida técnica sería considerada suficiente para determinar lo que posteriormente fue el potencial. De hecho una medida de este tipo con un electroscopio parece que permite calcular densidad de carga o potenciales, las dos cantidades difieren sólo en una constante.

En resumen una serie de resultados experimentales que permitieron una construcción teórica coherente que terminaron por configurar una teoría de la conducción que perduró. De hecho, el reconocimiento a Ohm fue por ser la suya la primera teoría sobre la conducción de corriente y no por lo que hoy conocemos como ley de Ohm, noción que exigiría aún identificar fuerza electroscópica y potencial.

1.2.6 La reformulación de Kirchhoff de las leyes de Ohm: La diferencia de potencial se establece en los circuitos de corriente continua.

Las conclusiones de Ohm fueron aceptadas bastante lentamente por sus contemporáneos; sin embargo a mediados de la década de los años 1830 una serie de físicos se convierten en prominentes defensores de la ley, por ejemplo Gauss, W. Weber, G.T. Fechner, E. Lenz y M. Jacobi, al menos como una regla experimental válida (Archibald 1988). El esquema conceptual empleado por Ohm permaneció problemático, particularmente la idea de la fuerza electroscópica y su distribución por todo el conductor. En las décadas de 1830 y 1840, desarrollos teóricos debidos a Franz Neumann y Wilhelm Weber (entre otros) dejaron de lado los puntos de vista de Ohm. El

problema de reconciliar la teoría de la conducción con otros aspectos de la teoría electromagnética fue soberano alrededor de 1847 cuando las teorías de Weber y Neumann se habían publicado (Archibald 1986). El paso más importante en la integración de la teoría de Ohm con los puntos de vista prevalecientes entre los físicos alemanes fue dado por G.R. Kirchhoff en 1849.

Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887) fue discípulo de Franz Neumann en Königsberg entre 1843 y 1847. Entre sus primeras lecturas estuvieron los escritos de Neumann sobre magnetismo y electrodinámica en 1843-44. También estudió la teoría del potencial de Neumann, que empleaba la teoría de los potenciales como una herramienta esencial en sus trabajos de 1845 y 1847 sobre la inducción electromagnética. Durante este período Kirchhoff estuvo dos semestres en Berlín en 1846, subvencionado por una beca del gobierno prusiano a sugerencia de Neumann. Antes de ir a Berlín apareció su primer artículo en los "Anales de Física". El artículo contiene la bien conocida ley de Kirchhoff que gobierna la relación entre fuerza electromotriz y corriente en circuitos ramificados. Para Kirchhoff y otros escritores de su tiempo, la "*fuera electromotriz*" era la "fuerza electroscópica" de Ohm o la "fuerza excitatriz" (todas estas acepciones aparecen dependiendo del autor y del país a que pertenece). Entre 1845 y 1857, Kirchhoff trabajó en Berlín, Königsberg y Breslau centrándose en problemas sobre teoría de la electricidad. Durante este período, sus esfuerzos estuvieron influidos por Neumann y Weber (Archibald 1986).

En su artículo de 1849, Kirchhoff abordó el problema de fundamentar las leyes de Ohm sobre las nociones entonces prevalecientes en electrostática. La principal dificultad residía en la definición de Ohm de "fuerza electroscópica" como una densidad de carga. Ohm había supuesto que la corriente podría fluir debido a diferencias en la "fuerza electroscópica" entre porciones adyacentes del conductor y que un estado de equilibrio estático tendría lugar cuando tal diferencia no existiera. Desde el punto de vista de Kirchhoff esto contradecía la electrostática de Poisson:

"En contradicción con la hipótesis utilizada para explicar los fenómenos electrostáticos, Ohm supone que la electricidad en un conductor está en un estado de reposo cuando llena el volumen del conductor con una densidad uniforme".

Si la "fuerza electroscópica" de Ohm, como densidad superficial de carga, es uniforme por todo el conductor la corriente no fluye. El problema crítico para Kirchhoff era conservar lo que se consideraba un "atractivo" esquema de formulación (el de Ohm) mientras resolvía esta contradicción. Su herramienta esencial en este esfuerzo era la noción de potencial.

La inspiración inmediata de Kirchhoff era un conjunto de experimentos descritos por Rudolf Kohlrausch que empleaba circuitos conteniendo condensadores. El artículo de Kohlrausch trataba sobre la solución de este tema, que hasta ese momento se había dado por asentado sobre una base experimental firme. Para plantear un análisis matemático de tales circuitos Kirchhoff necesitaba de un análisis de los fenómenos de conducción que eran susceptibles de abordarse desde un punto de vista estático o cinético de la corriente.

En conclusión, del análisis del caso de dos metales diferentes puestos en contacto, Kirchhoff redefinió la tensión resultante del contacto entre dos conductores diferentes como la diferencia entre el potencial electrostático de los dos. De esta forma el potencial toma el papel que tenía la fuerza electroscópica de Ohm y que este había identificado con la densidad de carga. Esta tensión Kirchhoff la escribía como $U_{12} = u_1 - u_2$, donde u_1 y u_2 son los potenciales de los dos metales cuando están en contacto. En tal caso la electricidad libre debería distribuirse sobre las superficies de los dos metales del par.

Como resultado de un trabajo extenso que tenía en cuenta los resultados matemáticos de las teorías del potencial junto con los resultados experimentales obtenidos que replicaron y respaldaron las conclusiones de Ohm, así como los resultados de Helmholtz que mostraban que la energía por unidad de carga en cualquier lugar era proporcional al valor del potencial electrostático del lugar y los resultados de Joule que mostraban que la energía liberada por una unidad de carga que pasa de un lugar del circuito a otro es proporcional a la diferencia de tensiones entre los dos lugares, permitieron identificar la fuerza electroscópica con el potencial electrostático y que este y la tensión son la misma cosa.

El trabajo de Kirchhoff fue seguido de varios otros que pertenecían a la frontera entre la electrostática y la electrodinámica. Uno de los primeros de estos trabajos fue el

estudio de la descarga de las botellas de Leyden, lo cual citamos a pesar de ser anecdótico, para señalar que el artilugio que se denomina botella de Leyden no era algo remoto y perteneciente a la prehistoria de la Electricidad, sino una herramienta de la que se seguían ocupando los físicos a mediados del siglo XIX, podríamos decir que cuando el horizonte del Electromagnetismo podía divisarse.

Por último señalar que la reinterpretación del trabajo de Ohm por Kirchhoff, supuso una transición de considerable importancia para la posterior dirección de las investigaciones físicas y matemáticas. Por ejemplo el trabajo de Kirchhoff permitió una clarificación del significado de "fuerzas de tensión" en la memoria de Helmholtz de 1847 sobre la conservación de la energía. También contribuye a la posterior clarificación de la relación entre potencial y trabajo mecánico que tiene lugar en el curso del debate entre Helmholtz y Clausius en los primeros años de la década de 1850.

A nuestro entender hay dos aportaciones fundamentales de Kirchhoff. Una la que le lleva a identificar "fuerza electroscópica" con potencial y a partir de aquí, como consecuencia de la diferencia de potencial entre los puntos del conductor, la corriente eléctrica que circula por el mismo. Se relacionan de esta forma conceptos de la Electroestática con la corriente eléctrica que se puede medir en los circuitos. Y la segunda relacionar cuantitativamente las transformaciones que tienen lugar en la pila con las que tienen lugar en el resto del circuito, de aquí que su trabajo contribuyera en la formulación del Principio de Conservación de la Energía y que sintetizaba su conocida segunda ley en la forma: $\varepsilon = I \cdot R$

1.2.7 La génesis del concepto de campo: de Faraday a Maxwell

¿Por qué se inventa el concepto de campo? ¿qué problema o problemas de orden teórico o experimental trataban de resolver los científicos del XIX? Antes de responder a la pregunta anterior, puede resultar ilustrativo saber que algunos investigadores sostienen que W. Thomson inventó el concepto de campo y que guió a Faraday hacia la teoría de campos. Según Agassi hubo una importante colaboración entre ambos en la que uno aporta sus experiencias y otro su teoría matemática, esta posición es la más generalmente aceptada.

No fue un hecho o un resultado experimental concreto el que llevó a Faraday a la noción de campo. No podemos olvidar que en tiempos de Faraday las explicaciones teóricas de los hechos conocidos no estaban elaboradas, o no estaban elaboradas en la forma que hoy se aceptan. Más aun, una serie importante de hechos estaban por descubrir. Por ejemplo las viejas teorías de los fluidos para la electricidad y el magnetismo habían sido concebidas para explicar los fenómenos estáticos. Pero para Faraday, al contrario que sus contemporáneos, no estaba nada claro que las concepciones sobre los fluidos pudiesen explicar los fenómenos dinámicos de la electricidad. Faraday pensaba que era improbable el supuesto de que, un algo material (fluido eléctrico) pudiese adquirir nuevas “capacidades”, es decir, efectos magnéticos y térmicos, por el hecho de estar en movimiento. Los nuevos fenómenos electrodinámicos señalaban por el contrario un cambio en la condición de una cantidad de acción **ya** disponible en la región de un conductor. La noción de campo evitaba adoptar explicaciones en términos de cargas y átomos, que eran hipótesis no justificables experimentalmente y por tanto de las que Faraday evitaba utilizar. Merece la pena señalar al respecto que, incluso en la Inglaterra liberal de Faraday, las explicaciones en términos de átomos eran vistas por muchos científicos como un recurso a las cualidades ocultas que se había rechazado contundentemente desde la revolución de Lavoiser.

Pero más importante aun era el hecho de que Faraday tenía evidencias experimentales que le llevaban a buscar explicaciones comunes para fenómenos. Las líneas de fuerza permitían explicar mecanismos generales de propagación de distintos efectos, nombrados en su tiempo como eléctricos, voltaicos, magnéticos, luminosos y térmicos. Desde su punto de vista, las líneas de fuerza constituían una cantidad definida de acción, existente en la región en la que actúa un imán o una corriente. La tal acción existían independientemente tanto de la fuente como del “sensor”, al menos durante un tiempo.

Como hemos visto en otro lugar, la teoría matemática del calor de Fourier, había sido una guía para muchos investigadores, ya que la electricidad o el magnetismo estaban por estos años impregnados de la noción de fluido, como el calor. De los trabajos de Faraday se desprende que éste había utilizado la analogía entre el calor y la electricidad durante la década de los años 30, negando cualquier distinción física real entre conducción por una parte y radiación e inducción por otra. Había criticado a los

teóricos matemáticos por no caer en la consideración de este punto y había llegado a la conclusión de que una teoría general podría estar basada en la idea de conductividades para las líneas de inducción electrostática (en 1837) e inducción magnética (en 1845). Así no es de sorprender encontrar a Thomson utilizando estas ideas. De hecho la correspondencia científica de Thomson demuestra que en 1845 estaba en la tarea de proporcionar el tratamiento matemático de las líneas de campo de Faraday, tras la lectura de los escritos de este sobre la electrostática. El enfoque de Faraday animó a Thomson a extender la analogía para la conducción del calor y la electricidad al magnetismo como una interpretación física de las analogías formales que había extraído de las teorías matemáticas de la electricidad, calor y magnetismo. Así Thomson podría expresar de forma general y sucinta las ideas que Faraday había utilizado en 1837, 1845 y 1848, pero las cuales Faraday había estado poco dispuesto a presentar como hipótesis físicas hasta después de la intervención de Thomson en Junio de 1849.

Hay que destacar que ambos científicos contemplaban la unidad natural de la ciencia y creían que esta podría conseguirse mediante el descubrimiento de leyes que gobernarán las fuerzas y sus transformaciones (más que mediante hipótesis estructurales y complejas ontologías), es decir, compartían similares puntos de vista acerca de la base fenomenológica para las leyes de la naturaleza. Una vez más hay que señalar que aquí el sentido de fuerzas no se refiere a las cuatro interacciones fundamentales, sino a lo que hoy denominaríamos como los distintos campos de la física. Señalar también que gracias a esta idea acerca de la unidad de la ciencia los trabajos de Faraday constituyeron la base experimental sobre la que se sustentó el tratamiento teórico de la electricidad, el magnetismo y la luz, cuyas bases experimentales en la actualidad son del todo desconocidas para la mayoría de los estudiantes y profesores de ciencias ya que, sorprendentemente, estas justificaciones no forman parte de la información que ofrecen los libros de texto.

Se podría concluir que Faraday había aceptado la posibilidad de que las líneas eléctricas y magnéticas atravesaran el espacio libre (**y que tomaran tiempo en hacerlo**) y había pensado explicar el magnetismo mediante una interacción de la materia con una propiedad de su inmediata vecindad (Gooding 1980-a). Thomson no inventó la idea de campo magnético pero ayudó a Faraday a sacar esta idea fuera de sus propias representaciones de los fenómenos. En este sentido persuadió a Faraday de que adoptase

y defendiera una posición que estaba implícita tanto en su práctica como en sus observaciones: que las líneas no simplemente sugieren una teoría del campo, son una teoría física del campo. No está de más señalar la idea que, para Thomson una teoría era una teoría matemática, una estructura de ecuaciones en derivadas parciales. Esta especie de agnosticismo lo había aprendido de Fourier, que representaba la influencia más importante sobre Thomson entre 1840 y 1845.

En definitiva la noción de campo surge de la necesidad de elaborar un marco teórico desde el que explicar los resultados de la experimentación en parcelas como el calor, la electrostática, magnetismo, la luz, etc (Popper, 1985). Conviene tener esto en cuenta porque desde este punto de vista, el concepto de campo tiene un lugar epistemológicamente diferente al que se aprende en los libros de texto, en el que este carácter unificador queda bastante desdibujado.

Antes de recoger algunas de las contribuciones más relevantes de Maxwell a la idea de campo, entresacadas de su trabajo “Una teoría dinámica del campo Electromagnético”, publicado en 1865, conviene señalar que unos años antes, en el 1860, ha tenido lugar el congreso de Karlsruhe en el que la comunidad científica internacional admite, por decirlo en una forma muy simple, que a partir de ese momento la idea de átomo es una noción válida, que se puede utilizar en las explicaciones e interpretaciones de los hechos experimentales conocidos (Jo Nye 1986). Lo que va a dar lugar a que las nociones de átomo y molécula aparezcan con un carácter ontológico bien diferente al que puede encontrarse en los escritos de Faraday. De la noción de campo puede leerse textualmente en los escritos de Maxwell (recopilación de Sánchez Ron 1997):

“(3) La teoría que propongo puede por tanto denominarse una teoría del *Campo Electromagnético*, porque tiene que ver con el espacio en el entorno de los cuerpos eléctricos y magnéticos, y puede denominarse una Teoría *Dinámica* (Las expresiones en cursiva aparecen así en el original en inglés), porque supone que en ese espacio existe materia en movimiento, mediante la cual se producen los fenómenos electromagnéticos observados.”

(4) “El campo magnético es esa parte del espacio que contiene y rodea a cuerpos en condiciones eléctricas o magnéticas.” Esta idea ya está bastante elaborada por Faraday.

Los párrafos son suficientemente elocuentes; al final del trabajo Maxwell propone las ecuaciones de las que, de nuevo textualmente, dice: “A fin de poder llevar estos resultados al ámbito del poder del cálculo simbólico, los expreso entonces en la forma de Ecuaciones Generales del campo electromagnético”. Se trataba de veinte ecuaciones en las que se establecían las relaciones entre el valor de las magnitudes involucradas, vectores **B** y **E** fundamentalmente, o el valor de alguna de ellas en función de otras. La noción de campo que puede leerse en los trabajos de Maxwell, puede identificarse sin demasiada dificultad con la idea de campo que se encuentra en los libros de texto. Sin embargo se elabora antes que las nociones de carga o corriente eléctrica, entre otras.

Puede sorprender leer cómo Maxwell llegó, como mucho, a imaginar las moléculas de electricidad pero nunca el electrón, y es que en esto también los libros de texto inducen errores por omisión: el mundo electromagnético no se reduce al campo electromagnético. El campo electromagnético es descrito por las ecuaciones de Maxwell, pero no el Electromagnetismo. En las famosas ecuaciones no está contenido el principio de conservación de la carga, uno de los pilares básicos del Electromagnetismo. Más aun sorprende que ni Maxwell ni en su tiempo otros tuviesen clara la noción de carga eléctrica, ni la idea de corriente eléctrica. Mucho menos el concepto de electrón que fue construido de manera gradual y plural a lo largo de la última década del siglo XIX, en la que de manera general se produce la integración de los iones en la electrodinámica maxweliana.

1.3 Conclusiones obtenidas del análisis histórico

En conclusión y a modo de síntesis de las páginas anteriores habría que señalar que, la comprensión y explicación del funcionamiento de la pila como generador de electricidad continuo no fue fácil, ya que chocó con los esquemas electrostáticos de la época. El proceso en el que el concepto de Fuerza electromotriz de Volta, se inserta en la teoría electromagnética, es un asunto en el que de nuevo las dificultades son importantes, puesto que, las ecuaciones que utilizaron Ohm y Kirchoff, como principales artífices de este trabajo, incluyen magnitudes tanto experimentales como teóricas precursoras de las que hoy conocemos como resistencia, resistividad,

conductividad, diferencia de potencial, intensidad de corriente, etc. que en esta época no estaban definidas, ni algunos de los conceptos se concebían. No estaba definida la intensidad de corriente, pero es que el concepto de intensidad de corriente no sólo no se concebía sino que tenía detractores. No olvidemos que en esta época la electricidad era una cosa y el galvanismo otra y que por tanto estaba por demostrar que los conceptos y ecuaciones válidos para describir las interacciones eléctricas pudiesen aplicarse al galvanismo o al efecto Seebeck. Por si todo esto fuera poco no es posible perder de vista el hecho de que no era posible mantener una “corriente” constante en el circuito ya que las pilas se polarizaban rápidamente y aún cuando se construyeron los primeros galvanómetros no había acuerdos sobre lo que cabía deducir de la medida de lo que hoy denominaríamos campos magnéticos.

Como la única manera de hacer inteligible la construcción de Ohm es hacerlo en los términos hoy aceptados y con una carga conceptual definida, se soslayan las verdaderas dificultades y se oscurece el proceso de construcción conceptual: medir y definir qué es lo que se ha medido y a partir de esas “premaginitudes” (desde nuestra perspectiva) que se han medido, proponer ecuaciones entre ellas, ecuaciones que expresan la relación entre “premaginitudes”. En este proceso, otros investigadores, posteriormente, vuelven sobre estas ecuaciones, que encuentran análogas a las establecidas por otros científicos y en las que las magnitudes están conceptualmente más maduras, es decir, más cercanas a los conceptos que nos han llegado. Cabe en este momento, aplicando un instrumento de medida más depurado, replicar la experiencia. Pero ahora las relaciones experimentales (la ecuación) se establecen entre magnitudes cuyo significado es otro, y así sucesivamente. En esto consistió la construcción de Ohm y Kirchhoff, que se fundamentó en sus propias aportaciones y la toma en consideración de las aportaciones de otros tanto del terreno experimental como teórico.

Como ya hemos dicho, el esquema conceptual dominante era el de la Electroestática y las magnitudes y aparatos de medida eran electrostáticos. En los años en los que Ohm comienza sus investigaciones de una forma u otra el concepto de potencial (si bien no con este nombre ni en algunos casos con los mismos atributos que hoy lo conocemos) se aplicaba en el estudio de las interacciones eléctricas. La electricidad contenida en un cuerpo se medía con los electroscopios y la balanza de torsión perfeccionada por Coulomb permitía medidas de interacciones de cuerpos cargados.

Este era en esencia el bagaje conceptual y experimental disponible junto con las teorías de los fluidos que se habían elaborado años antes, pues no podemos olvidar que electricidad y galvanismo eran considerados fluidos.

Ohm introduce el concepto de fuerza electroscópica cuyo pariente conceptual más cercano es la densidad volumétrica de carga. A partir de él es posible establecer la ecuación de continuidad para el flujo del fluido galvánico (eléctrico). Esto era un logro importante ya que la ecuación de continuidad en los fluidos, por ejemplo en el agua, expresaba un principio de conservación de la masa, lo que era un aval de su validez como ecuación matemática para representar el fenómeno en cuestión (Feynman et al 1987).

Lo que hoy denominamos corriente circularía entre dos puntos del conductor que tuviesen dos valores diferentes de sus fuerzas electroscópicas. Dos metales en contacto tienen, en el punto de contacto, una diferencia entre sus fuerzas electroscópicas. Este concepto guardaba una similitud enorme con el concepto de potencial electrostático, pero la analogía no es comprendida porque entre otras razones las investigaciones de Ohm en su tiempo no se realizan en el terreno de lo que se entendía como electricidad.

Los trabajos de Ohm acabaron tomándose en consideración porque explicaban razonablemente bien los resultados experimentales que se obtenían cuando se estudiaba la conducción del galvanismo y desde el punto de vista teórico el flujo de su fluido se ajustaba a las ecuaciones teóricas como tal fluido. Era bastante. Pero no olvidemos, el mérito de la obra de Ohm va en aumento a medida que la naturaleza de lo que hoy conocemos como “electricidad” se va conociendo y se valora el hecho de que, experimentalmente se estableciera una conexión que relacionaba una serie de conceptos mucho antes de que estos formaran parte del acervo de la Ciencia.

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. Las teorías para explicar el comportamiento de la materia en experimentos cada vez más sofisticados, van apuntando inexorablemente en una dirección que obtiene su espaldarazo sólo unos diez años más tarde en Karlsruhe. Es decir, en el caso de la electricidad y el galvanismo se vislumbra que la razón última de ambos fenómenos debe ser la misma. Existen suficientes semejanzas y el esquema

conceptual electrostático, y en Alemania más aún, no es el que prevalece. Así es que, teniendo en cuenta los resultados experimentales de Kohlrausch y lo aprendido sobre los potenciales con Neumann, Kirchhoff identifica la fuerza electroscópica con los potenciales electrostáticos. Paralelamente, se construyen pilas más eficaces para mantener una corriente constante. El concepto de corriente está más claro. Se han debido aclarar cuestiones sobre la distribución de la electricidad en los conductores, pero estos problemas en una buena parte se han resuelto matemáticamente y se ha tenido que establecer y demostrar experimentalmente que una vez cerrado el circuito, la distribución de electricidad permite llegar al establecimiento de la ecuación de Laplace, lo que permite para el caso, desde el punto de vista teórico, la utilización del mismo concepto de potencial para distribuciones electrostáticas de carga y para circuitos de corriente continua (Reitz y otros 1996; Wangsness (1999)).

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. La noción de campo permite elaborar un marco teórico desde el que explicar los resultados de la experimentación en parcelas como el calor, la electrostática, magnetismo, luz, etc. 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 (Rodríguez et al 1999). Dos conceptos epistemológicamente relacionados pero distintos, al igual que ocurre con otros conceptos como, por ejemplo, fuerza y aceleración en dinámica.

El análisis que hemos realizado acerca de la construcción histórica de la noción de Fuerza electromotriz, permite distinguir una serie de construcciones conceptuales que tuvieron lugar a lo largo de su desarrollo, hasta insertarse en la teoría general del Electromagnetismo. De ellas, las cuatro siguientes nos parecen las más destacables:

a) La comprensión del funcionamiento de la pila. La pila no es entendida inicialmente como un generador de electricidad. Y en este sentido, las mayores dificultades no procedían de su competencia con las teorías de Galvani, ya que desde 1789 Benet ha descrito las primeras observaciones acerca de la electrificación por

contacto, esto es aceptado y conocido y los excelentes trabajos de Volta en ese sentido no dan mucho lugar a la duda. Pero la pila sigue sin ser un “generador continuo de electricidad”. El galvanismo, como ámbito experiencial y fenomenológico todavía estaría vigente algunas décadas, si bien las fronteras con la electricidad van haciéndose cada vez más difusas.

b) La pila en la teoría de circuitos. Como hemos descrito, la pila inicialmente no se estudia como parte del circuito al que debe estar conectada para funcionar. La pila no se inserta en la teoría de circuitos hasta Kirchhoff (1847), en el camino se han debido establecer los conceptos de corriente eléctrica y su medida, el de resistencia y sobre todo integrar el concepto de potencial de la electrostática en el estudio de lo que hoy conocemos como circuitos. Es el final del galvanismo.

c) La interpretación del circuito en términos energéticos. Esto sucede en el tiempo sólo unos pocos años más tarde. Los resultados experimentales de Kirchhoff forman parte del elenco de experiencias que lleva a Helmholtz al establecimiento del Principio de Conservación de la Energía.

d) Las interpretaciones en términos de campo y cargas. La primera contribución en términos matemáticos a la teoría de campos es de W. Thomson que, en 1845 formula una teoría matemática acerca de las nociones cualitativas de campo magnético de Faraday. Maxwell entre los años 1855 y 1865 elabora y publica un informe en el que intenta la síntesis entre las ideas intuitivas de líneas de campo de Faraday con las analogías matemáticas de Thomson. En esta memoria la importancia para la física de los operadores matemáticos divergencia y rotacional se hacen por primera vez evidentes. En 1865 establece la ecuación $\nabla \times \mathbf{E} = - \partial \mathbf{B} / \partial t$, que en su forma integral no es otra cosa que el valor de la fuerza electromotriz inducida (Chambers 1973).

En el año 1881 en Londres, Helmholtz en el curso de una conferencia señala por primera vez que la idea de partículas o átomos cargados puede ser consistente con las ideas de Maxwell y Faraday. Se abre de esta forma el camino para nuestras ideas actuales sobre partículas y campos. En la tabla siguiente se sintetizan las principales aportaciones en la construcción del concepto de fuerza electromotriz.

Tabla 1

Síntesis de las principales aportaciones históricas a la construcción del concepto de Fuerza Electromotriz en el contexto de un modelo explicativo de los circuitos de corriente continua		
1.1 Investigadores y fechas	2 Ideas y aportaciones	Hechos experimentales explicados
A. Benet (1789)	Describe las primeras observaciones acerca de la electrificación por contacto.	- Si dos metales distintos descargados se ponen en contacto, se encuentra que cada uno de ellos tiene una carga neta que siendo iguales en magnitud y signo opuesto.
Alessandro Volta (1792-1801)	Define la magnitud ‘fuerza electromotriz eléctrica’ para medir la capacidad de un par de metales para separar cargas y establece que depende solamente de la naturaleza de los metales y no de su geometría o la naturaleza del contacto.	- Al poner en contacto dos metales diferentes se encuentra que cada uno de ellos adquiere una carga neta igual en magnitud y opuesta en signo. - Se construye la pila ‘Volta’.
Teoría electrostática vigente en el primer tercio del siglo XIX	Define la magnitud ‘fuerza electromotriz’ para medir la capacidad de un cuerpo para generar electricidad en otro.	- Medidas de la ‘tensión eléctrica’ o ‘fuerza electro-motriz’ con el electroscopio - Primeros circuitos de corriente continua
Ampère, Fourier y Oersted (1820-1825)	Se define la magnitud intensidad de corriente para medir la cantidad de carga que circula por los cables del circuito.	- La pila produce una corriente constante a lo largo de todo el circuito. - Medidas con el galvanómetro de la intensidad de corriente.
Ohm (1826)	Define la conductividad eléctrica para diferentes tipos de materiales Construye el primer modelo explicativo para circuitos de corriente continua haciendo una analogía con la teoría del calor de Fourier	- Corriente eléctrica a través de diferentes tipos de hilos
Kirchhof (1846-1849)	Identifica la ‘la fuerza electroscópica’ de Ohm con la diferencia de potencial. Establece el principio de conservación de la energía para circuitos eléctricos.	- Circuitos de corriente continua ramificados
Maxwell, Helmholtz, Thomson (1865-1897)	Unificación conceptual del electromagnetismo Modelo de la conducción eléctrica en circuitos de corriente continua en términos de diferencia de potencial (campo eléctrico) y de fuerza electromotriz.	- Las reacciones químicas de la pila suministran la energía eléctrica que puede proporcionar la pila; esta energía puede calcularse midiendo la fuerza electromotriz de la fuente. - La acción a distancia se explica desde el concepto de campo en un esquema general energético. - Se explican las relaciones entre electricidad y magnetismo.

1.4 Dificultades previsibles de aprendizaje del concepto de Fuerza electromotriz, a la luz del análisis histórico

Hoy se acepta que la Historia de la Ciencia muestra ciertos paralelismos entre la construcción del conocimiento científico y el proceso de captura conceptual por parte de los estudiantes, similitudes que se establecen entre las categorías epistemológicas que se produjeron en el desarrollo de los conceptos y teorías científicas y las diferentes categorías explicativas que presentan los estudiantes, (innegablemente dependiendo del contexto) para comprender tales conceptos y teorías.

De forma que, de acuerdo con el desarrollo histórico del concepto de fuerza electromotriz que acabamos de realizar (ver 1.2), podemos suponer que se van a presentar dificultades en el aprendizaje de la noción de fuerza electromotriz, que pasamos a examinar a continuación:

A) Hemos visto que las explicaciones del funcionamiento de la pila fueron problemáticas, las dificultades surgieron a la hora de integrar el nuevo generador de corriente en el esquema conceptual de la época y, posteriormente, a la hora de interpretar su papel en lo que hoy denominamos circuito eléctrico. Es previsible que se manifiesten dificultades a la hora de interpretar el papel de la pila, en particular en su papel de crear y mantener el valor de la diferencia de potencial entre sus electrodos y aquellas cuestiones relacionadas con la medida de los valores de la diferencia de potencial entre los electrodos de la pila y su fuerza electromotriz.

B) La integración de lo que hoy denominamos electrostática con los fenómenos en los que, la propiedad que denominamos electricidad se transfiere o se induce entre distintos cuerpos (galvanismo, inducción electromagnética, etc) fue particularmente compleja hasta tal punto que, en la síntesis de Maxwell el problema aun no estaba resuelto, sólo después de Maxwell, mediante los experimentos de Rowland (1878), la identidad entre galvanismo y electricidad se consideró experimentalmente demostrada.. Es de prever que, la comprensión del papel que juegan las magnitudes de la electrostática en el estudio de los circuitos resulte problemática. De hecho algunos autores (Benseghir y Closset 1996) se han ocupado de algunas de estas dificultades. Señalando la similar tendencia entre los estudiantes y los primeros estudios sobre la pila

a centrarse en la consideración exclusiva de los polos de la pila y describir lo que sucede en ellos, sin reparar en las causas de que las cargas se sitúen en dichos terminales.

C) Un problema que no se resolvió hasta Kirchhoff, fue el de establecer las relaciones entre la pila y el resto del circuito, en este proceso la cuestión de la interpretación de la ley de Ohm jugó un papel destacado. Esta cuestión está relacionada con el papel que juegan las magnitudes de la electrostática en la interpretación del funcionamiento del circuito eléctrico. La correcta interpretación del papel de la pila supone además comprender los balances energéticos entre la pila y el circuito, lo que también resultó problemático. Cabría esperar por tanto problemas a la hora de aprender las relaciones entre la pila y el resto del circuito. Dificultades en relación con la comprensión de las relaciones entre la electrostática y los circuitos, por una parte y dificultades a la hora de comprender los balances energéticos entre la pila y el resto del circuito por otra. Habrá que atender los conflictos que puedan surgir a la hora de interpretar correctamente el papel de las ecuaciones que expresan la ley de Ohm ($V_{ab} = I \cdot R$) y la segunda ley de Kirchhoff ($\varepsilon = I \cdot R$), que no es otra cosa que la expresión del Principio de Conservación de la energía entre el circuito y la pila.

D) Los conceptos de carga y campo, que permiten una descripción-explicación de los fenómenos eléctricos unificador y a nivel microscópico, supusieron un proceso de captura conceptual largo, en concreto el de carga, tal como hoy lo entendemos, todavía ocupó un par de décadas del siglo XX. El concepto de campo fue también de larga elaboración. Empieza hacia los años cuarenta del siglo XIX con Faraday y no terminó con Maxwell, ya que posteriormente Heaviside y otros perfilaron las propuestas de Maxwell, en la tarea se llega hasta bien entrado el siglo XX (Scott 1963). Es de esperar que el aprendizaje de estos conceptos, para la correcta interpretación-explicación de lo que sucede en un circuito en funcionamiento, resulte problemático. Las explicaciones acerca de cómo se produce la diferencia de potencial entre los electrodos de la pila, lo que implica al concepto de Fuerza electromotriz, qué tipo de fuerzas actúan sobre las cargas en el interior de la misma y fuera de ella, etc. necesitan de los conceptos de carga, campo y energía para su correcta interpretación.

El concepto de campo también resulta problemático en la enseñanza-aprendizaje como ha demostrado la investigación didáctica. Los alumnos no llegan a comprender,

no sólo el concepto de campo, sino tampoco su necesidad. No deja de ser un mero artificio para calcular fuerzas y no adquiere un significado físico al igual por ejemplo que las partículas, produciéndose errores conceptuales. La enorme potencia explicativa de dicho concepto, incluso a niveles meramente cualitativos no forma parte del bagaje de los alumnos ni de una buena parte del profesorado de ciencias.

Hemos visto como la noción de campo para Faraday era un recurso para explicar relaciones mucho más generales que los mecanismos mediante los cuales una carga en reposo interactúa con otra. Y sin embargo esta enorme potencialidad del concepto de campo, en la práctica docente actual, como ha señalado Martín Quero (1999) es deficiente y confusa, no tiene en cuenta ni las características del trabajo científico ni los resultados de la investigación didáctica y mucho menos es práctica docente habitual referirse a los problemas que resolvía la noción de campo históricamente ni los que resuelve su estudio en la actualidad. Más aún, obvia las ventajas que representa la teoría de campos al permitir un mayor poder explicativo ya que permite aclarar fenómenos no estáticos como la inducción, producción y propagación de ondas electromagnéticas o en el caso de esta investigación, la noción de Fuerza electromotriz y su diferencia con la de diferencia de potencial electrostático.

Si bien de lo anterior no cabe hacer paralelismos epistemológicos fáciles, entre las dificultades que históricamente presentaron la elaboración de algunos conceptos y las dificultades de aprendizaje de los estudiantes, no cabe duda que una vez más se pueden apuntar coincidencias desde la forja de los conceptos al aprendizaje de los mismos. Por lo que la Historia de la Ciencia una vez más se revela como una herramienta útil para la enseñanza, al señalar no sólo conceptos y construcciones problemáticas, sino cómo las explicaciones pueden hacerse a través de sucesivas aproximaciones en las que se va ganando en rigor y profundidad.

También ilustra cómo a veces no se producen aprendizajes (la construcción conceptual se detiene) bien porque se colisiona con las ideas preexistentes y la nueva no encuentra su lugar, bien porque la nueva aportación no se toma en consideración por el resto de la comunidad científica. Estas tres situaciones de hecho, en el proceso de construcción del conocimiento, proporcionan pautas pedagógicas y didácticas que pueden ser muy útiles para la enseñanza de las ciencias. Si bien dichas pautas cuando la

enseñanza se limita a la mera transmisión de los conocimientos ya elaborados tienen, difícil ensamble con la práctica.

CAPÍTULO 2: EL CONCEPTO DE FUERZA ELECTROMOTRIZ. INDICADORES DE SU COMPRENSIÓN

En el análisis histórico que hemos venido realizando, se ha puesto de manifiesto la evolución conceptual en la que se ha visto involucrada el concepto de Fuerza electromotriz, hasta llegar a relacionarse con la energía puesta en juego para, en el interior del generador, separar y mantener las cargas separadas para crear con ello la diferencia de potencial entre sus terminales o electrodos. Las dificultades que se han ido superando hasta llegar a la noción actual, nos permiten afrontar tanto su significado como la utilidad del concepto desde diferentes ángulos.

En este sentido, si nuestro objetivo principal es mejorar el aprendizaje de los estudiantes, por tanto se hace necesario poner en evidencia los indicadores más importantes que caracterizan un aprendizaje de los conceptos y procedimientos de mayor interés en relación con el concepto de Fuerza electromotriz, centrándonos en su papel a la hora de realizar el análisis de los circuitos de corriente continua sencillos. En este sentido hay que procurar que comprendan el alcance y el ámbito al que restringimos el uso del concepto, cuya utilidad va más allá del estudio de los circuitos de corriente continua estacionaria. También debemos hacer lo posible por conseguir que los estudiantes tomen conciencia de aspectos relacionados con el empleo generalizado de las pilas, su utilidad, sus perspectivas de futuro, su contribución importante a los problemas medioambientales.

2.1 Significado e interés del concepto de Fuerza electromotriz

El término "fuerza electromotriz" fue acuñado por Volta. El científico italiano descubrió el hecho de 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 llega a cargarse y permanecen cargados a pesar del hecho de que hay un excelente camino conductor a través del cual, las cargas pueden fluir para neutralizarse entre si. Volta decía que una nueva clase de "fuerza" actuaba sobre las cargas separándolas y manteniéndolas separadas y nombró la acción como fuerza electromotriz, con el que se la conoce desde entonces.

En la actualidad decimos que en una batería en circuito abierto, la diferencia de potencial aumenta hasta que $fem_{ba} - V_{ba} = 0$. En un circuito cerrado $fem_{ba} - V_{ba}$ no es necesariamente cero.

2.1.1. La Fuerza electromotriz: acción no electrostática sobre las cargas

En la terminología actual la idea de Volta, podría expresarse de la siguiente forma: **"La fuerza electromotriz es una acción no electrostática sobre las cargas en los conductores que da lugar a una separación de cargas y que las hace permanecer separadas"** (Page 1977, Fisher y Varney 1980). Evidentemente la noción de carga a la que se refería Volta no era la entidad discreta actual. En el caso de la inducción electromagnética una acción no electrostática no necesariamente da lugar a cargas diferentes separadas.

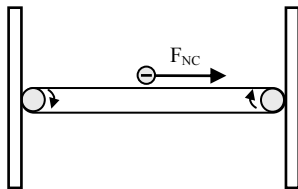
Las principales observaciones y medidas de Volta fueron sin embargo, no de corrientes si no de diferencias de potencial electrostático, que él llamaba entonces tensiones que se producían entre los metales (con o sin la intervención de electrolitos) y que Volta medía con sus electros copios. Estuvo claro para él que la diferencia de potencial observable en la ausencia de corrientes debería equilibrarse con la fuerza electromotriz que la causaba. De lo que concluyó que la diferencia de potencial observada, para el caso del circuito abierto, era una medida de la fuerza electromotriz. Lo anterior no implica que fuerza electromotriz y diferencia de potencial sean conceptos físicos idénticos.

Como ya hemos dicho, en tiempos de Volta el concepto de diferencia de potencial no estaba definido para ámbitos que no fuesen la Electroestática. En la actualidad se sigue hablando de "tensión" como sinónimo de diferencia de potencial; nosotros creemos que la utilización de voltaje, diferencia de potencial, tensión y fuerza electromotriz como sinónimos, pero en situaciones no idénticas que no se explicitan suficientemente da lugar a errores. Sería muy saludable, desde el punto de vista didáctico, que el profesorado rompa con sus inercias y hable con propiedad de diferencia de potencial cuando corresponda, de voltaje también cuando sea el caso y lo mismo con la fuerza electromotriz. Tensión es una expresión que se emplea, pero claramente obsoleta.

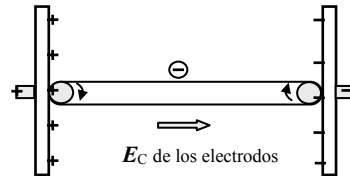
Esta noción de fuerza electromotriz como acción no electrostática sobre las cargas que las separa y las hace permanecer separadas, es aplicable a la piezoelectricidad, a un par bimetálico (Varney y Fisher 1980) o al caso de un generador de Vander Graaf (Rañada et al., 1997; Rodríguez Danta et al., 1999).

En el caso de un Generador de Van der Graff una banda de material aislante transporta la carga fijada a su superficie, hasta una cúpula metálica conductora. De esta forma se produce una separación de la carga. Si esta cúpula se uniera mediante un conductor a tierra, se produciría una corriente óhmica en sentido contrario al arrastre por la banda de goma. Incluso podríamos mantener una corriente estacionaria siempre que el ritmo de transporte de cargas en la cinta fuese igual a la intensidad de corriente eléctrica en el conductor.

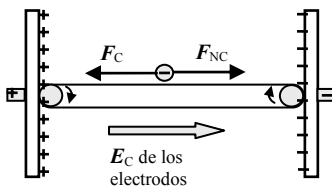
En el caso de la pila y como consecuencia de las reacciones químicas que tienen lugar en una delgada capa de contacto entre el electrodo y el electrolito, una serie de fuerzas actúan sobre las cargas que terminan separadas en los electrodos. La siguiente secuencia de dibujos ilustra cómo podemos concebir este proceso hasta el equilibrio, se trata de una analogía mecánica con lo que sucede en el generador de Van der Graff.



1. Primer electrón inicia su desplazamiento hasta uno de los electrodos.



2. El proceso continúa y los polos de la pila se van cargando.



3. Al cabo de un tiempo las fuerzas coulombianas (consecuencia de la acumulación de cargas en los polos) igualan el valor de las fuerzas no coulombianas (consecuencia de las reacciones de la pila).

- E_C representa en el dibujo un campo electrostático de naturaleza culombiana.
- F_{NC} representa en el dibujo la fuerza responsable del desplazamiento de las cargas como consecuencia de las reacciones químicas.
- F_C representa la fuerza electrostática que actúa sobre el electrón que se aproxima al polo negativo.

En nuestra secuencia sobre la primera carga actúan sólo fuerzas eléctricas de tipo no culombiano (F_{NC}), no conservativo. A medida que las cargas se van acumulando sobre los electrodos, actuarán también fuerzas eléctricas de tipo electrostático (F_C), que denominamos culombianas.

Sobre este mecanismo en el que representamos, a nivel microscópico, el proceso que tiene lugar en la pila, creemos que son inteligibles las respuestas a una serie de preguntas que podemos hacernos. La respuesta a tales preguntas suele ofrecerse a los lectores de los libros de forma errónea, en el mejor de los casos sin el mecanismo apropiado para sustentar dichas respuestas. La siguiente podría ser una secuencia de preguntas adecuada:

Si suponemos los polos de la pila uniformemente cargados y que la distancia de separación es d . a) ¿Qué trabajo realiza la fuerza no culombiana por cada electrón que desplaza desde el polo positivo hasta el polo negativo?

b) ¿Qué trabajo realizará la fuerza no culombiana sobre dos, tres, etc., electrones? ¿Y si quisiéramos calcular el trabajo sobre uno, dos, tres, etc. culombios?

c) Si queremos definir una magnitud que no tenga en cuenta la cantidad total de carga, podemos referirnos al trabajo que se realiza sobre cada unidad de carga. ¿En qué unidades se expresará el trabajo realizado sobre la unidad de carga?

Ahora la definición de Fuerza electromotriz de una pila que hace referencia al trabajo sobre la unidad de carga, adquiere significado, al quedar claro qué fuerza realiza el trabajo, a qué desplazamiento nos referimos y en definitiva sobre qué se realiza dicho trabajo.

2.1.2. Definición de Fuerza electromotriz

Hemos visto como 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). Así pues la fuerza total se puede indicar como:

$$\vec{F}_{total} = \vec{F}_{elec., conservativa} + \vec{F}_{no\ elec. no\ conservativa} = q\vec{E} + q\vec{E}'$$

Donde E es el campo eléctrico conservativo producido entre los extremos A y B del interior de la pila (o del generador de Van der Graaf) y E' es un campo no conservativo debido a las acciones no conservativas como, por ejemplo, reacciones químicas dentro de la pila.

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, como fue propuesta por primera vez por Abraham y Föppl (1904) y se puede encontrar posteriormente en el libro de Abraham y Becker *Classical Electricity and Magnetism*, de 1955 (citado por Varney y Fisher 1980):

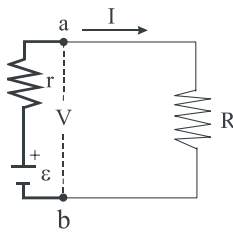
$$fem = \oint (\vec{E} + \vec{E}') d\vec{l}$$

Como el campo E es conservativo su integral a lo largo de todo el circuito (una línea cerrada) es cero y como el campo E' corresponde sólo a las acciones no conservativas dentro de la pila se definirá entre los extremos a y b; así pues:

$$fem_{ab} = \int_a^b \vec{E}' d\vec{l} \quad (1)$$

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. De la propia definición resulta que la fuerza electromotriz se mide en voltios.

2.1.3. Fuerza electromotriz y diferencia de potencial



Un dibujo como el de la figura representa un circuito con una pila de fuerza electromotriz ε y resistencia interna r , conectada a un circuito de resistencia equivalente R . Con frecuencia se confunde la fuerza electromotriz de una pila con la medida de la diferencia de potencial entre los electrodos de la misma. La confusión procede del hecho de que la pila separa cargas y crea una diferencia de potencial. El intercambio de energía que ambas magnitudes cuantifican y que se miden en voltios, junto con los parecidos formales ha llevado a una desafortunada y físicamente incorrecta práctica de utilizar los dos términos indistintamente. La fuerza electromotriz se define mediante la ecuación (1) anterior:

$$fem_{ab} = \int_a^b \vec{E}' \cdot d\vec{l} \quad (1)$$

y la diferencia de potencial:

$$V_{ab} = -\int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (2)$$

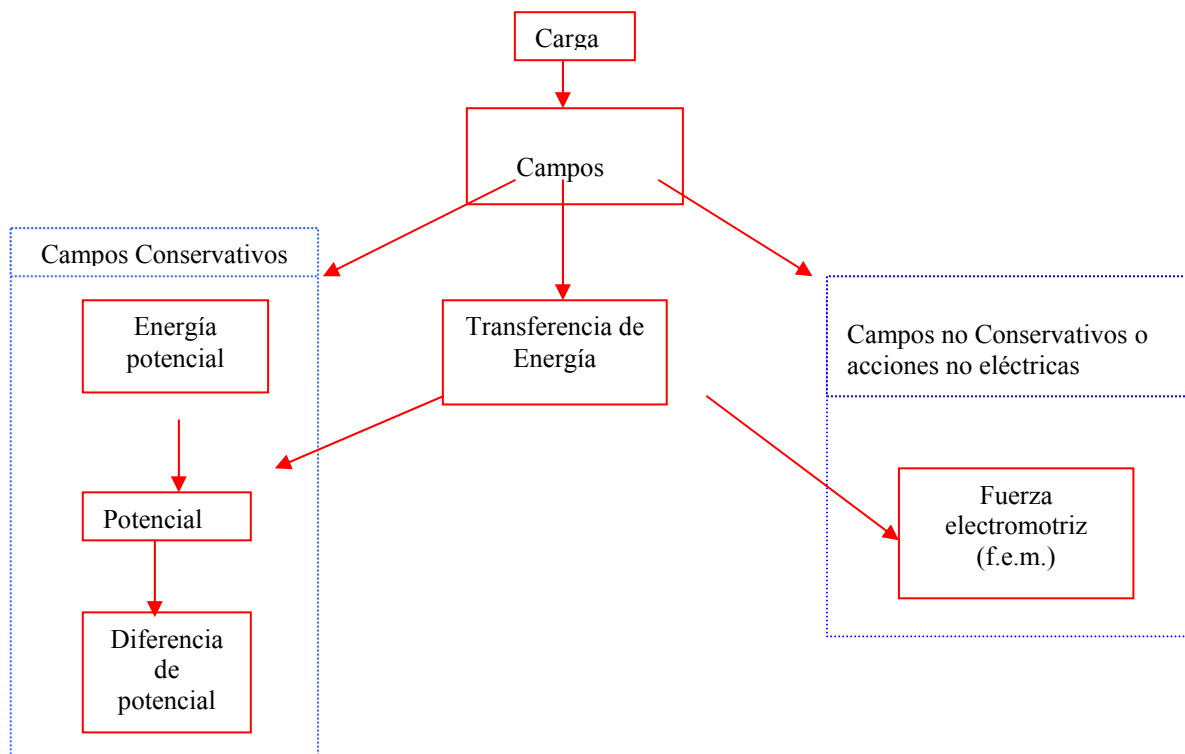
Pensamos que las definiciones en términos de las integrales combinadas, junto con las distinciones que Volta hacía entre acciones electrostáticas y no electrostáticas sobre las cargas, sirve para clarificar tanto las similitudes como las diferencias (que con frecuencia hay que buscar a tientas) tanto en los textos como en artículos. Las comparaciones entre los dos conceptos pueden resumirse en los siguientes apartados:

- 1) La fem es la integral de un campo no electrostático (E'), mientras la diferencia de potencial es la integral de un campo electrostático (E).
- 2) La integral de la fem es dependiente del camino de integración. La diferencia de potencial es independiente del camino de integración.

En el caso de las pilas, fenómenos de contacto o fenómenos sólido-líquido, este denominado campo E' es un concepto heurístico. Esta terminología significa que E' , como una fuerza sobre la unidad de carga de prueba, no puede ser medida u observada.

Los fenómenos considerados pueden sin embargo representarse como si tal campo existiese.

En el caso de un circuito como el representado en la figura anterior, el concepto de fuerza electromotriz tiene su ámbito de aplicación restringido a la pila. La diferencia de potencial se corresponde con el trabajo realizado al mover la unidad de carga dentro de un campo eléctrico conservativo situado dentro del cable (Arons 1970, Reitz et al. 1996, Chabay y Sherwood 2002). En resumen, la diferencia entre la fuerza electromotriz y la diferencia de potencial viene dada por la medida de dos tipos diferentes de acciones producidas por factores radicalmente diferentes. La primera debida a un campo no conservativo y la segunda a uno conservativo (ver esquema 1 siguiente).



2.1.4 Consideraciones finales

Hemos examinado varias decenas de referencias bibliográficas en la que se hacía mención a la fuerza electromotriz, incluyen tanto textos avanzados como para iniciados, diccionarios científicos, enciclopedias y artículos de revistas. Ninguno relaciona a Volta con el origen del término fuerza electromotriz y mucho menos con el concepto subyacente de acciones no electrostáticas sobre las cargas. Muy pocas emplean

específicamente el término no electrostático para caracterizar la fuerza electromotriz. Algunas más usan el término pero fallan al excluir adecuadamente los campos electrostáticos de la contribución a la fuerza electromotriz. Algunas publicaciones hacen afirmaciones correctas sobre la fuerza electromotriz, pero fallan al expresar el concepto subyacente. Muchas proponen definiciones que son válidas en un contexto experimental limitado, pero fallan en el conjunto de lo que podríamos llamar “limitaciones”. Otras muchas hacen afirmaciones erróneas. Incluso se podrían clasificar los textos por el tipo de definiciones erróneas que se proponen, los siguientes son un par de ejemplos:

1) Definiciones basadas en la idea de que es la fuerza electromotriz la causa de las diferencias de potencial terminales en los bornes de la batería. Estas referencias no dicen que la fuerza electromotriz son acciones no electrostáticas. Incluso estudiantes avanzados, cuando estudian los campos eléctricos producidos por la inducción magnética, suelen quedarse perplejos frente a unos campos que **no** se describen como **no electrostáticos**, ni los distinguen adecuadamente de los campos que podríamos llamar culombianos. Sin embargo hay una larga colección de acciones no electrostáticas que tienen muy diferentes propiedades y características. Así la fuerza electromotriz de origen químico de una célula electrolítica y la fuerza electromotriz de origen “físico” de la inducción electromagnética tienen poco en común fuera de sus orígenes no culombianos.

2) Muchos autores afirman que la diferencia de potencial terminal es la fuerza electromotriz. Estas afirmaciones son erróneas en el mismo sentido que si se dijese: "La masa de un objeto es su peso". Hay casos en los que la masa no tiene peso y hay casos en los que la fuerza electromotriz no da lugar a diferencia de potencial. Muchas publicaciones en esta categoría adaptan la definición con una visión de que la fuerza electromotriz es causa y mantiene una diferencia de potencial y, es la diferencia de potencial la que da lugar al movimiento de la carga a lo largo/alrededor del circuito. Esta idea en realidad puede ser errónea. En un anillo resistivo uniforme en el que se produce un cambio de flujo magnético a su través, según las experiencias de Faraday, hay una fuerza electromotriz a lo largo de la resistencia, pero la fuerza electromotriz que hace que la corriente se mueva alrededor del anillo, no da lugar a una diferencia de potencial entre dos puntos del anillo.

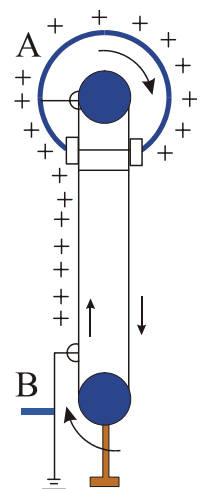
La distinción fundamental entre diferencia de potencial y fuerza electromotriz a menudo se ve oscurecida en la literatura de los ingenieros debido al uso del término voltaje para referirse a ambos conceptos.

Por último podríamos preguntarnos ¿Es la Fuerza electromotriz un concepto relevante e incluso útil que sirve a un objetivo? Se puede tener la tentación de que, dado su amplio mal uso, respondiésemos negativamente. El hecho es que, mientras las presentaciones de la electricidad normalmente comienzan con la electrostática y discuten extensamente la intensidad de la fuerza que una carga ejerce sobre otra, la existencia de acciones no electrostáticas es raramente mencionada e incluso más raramente tratada en detalle. Esta ausencia parece desconocer que las acciones no electrostáticas son indispensables para la observación de *todos* los fenómenos de la electricidad, incluyendo los electrostáticos. Así una varilla de goma o vidrio jamás podría cargarse sin la fuerza no electrostática que se ejerce al retirar el trapo de la varilla que se ha frotado. Una máquina de Wimshurst o un generador de van der Graff, no será útil sin la máquina o persona que da vueltas a la manivela. Si a los estudiantes que se inician, que aprenden los elementos de la electrostática, se les plantea la existencia de fuerzas no electrostáticas y como estas pueden actuar de formas diferentes a las fuerzas electrostáticas, el concepto de fuerza electromotriz llega a ser vivo, real y útil, como se ha ilustrado más arriba.

No querríamos terminar sin dedicar una última consideración a una coletilla que no falta en casi ninguno de los textos analizados: advertir al lector de lo inadecuado del término fuerza electromotriz, ya que no es fuerza sino más bien energía. En este sentido recoger lo que dice Page (1977): *“La palabra "fuerza" a menudo se utiliza en física en un sentido más general que el de la mecánica clásica, por ejemplo relacionando "fuerza" con cambios de energía, es el caso de la mecánica cuántica cuando allí se habla de "intercambio de fuerzas". La fuerza "mecánica" sobre una carga en un campo eléctrico es qE , pero sobre una carga en el seno de un campo pueden realizar trabajo "fuerzas electromotrices" no mecánicas, ya sean químicas o térmicas. Definir "fuerza electromotriz" en términos de fuerzas mecánicas exclusivamente es una fuente importante de confusión.”*

2) Una de las formas de generar diferencia de potencial 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*. Este proceso de separación de cargas lo podemos explicar mediante una analogía entre la pila y el generador de Van der Graaf que se explica en electrostática (ver figura 1). Al cabo de un cierto tiempo se ha establecido una diferencia de potencial entre los puntos A y B. Evidentemente la carga acumulada en la esfera A aumenta constantemente y cuanto mayor sea la cantidad mayor será la diferencia de potencial y más difícil será llevar las cargas de B a A, debido a la repulsión electrostática entre cargas del mismo signo. Así pues, sobre las cargas actúan dos tipos de fuerzas: las electrostáticas que tienden a repeler las cargas que llegan a la esfera A (fuerzas eléctricas y conservativas) y la fuerza de tipo mecánico (no conservativa) de la cinta transportadora que hace que las cargas lleguen a la esfera A. Pues bien, la fuerza electromotriz cuantifica la energía puesta en juego por unidad de carga, en el proceso en el que las cargas se desplazan hasta la esfera (Rañada et al., 1997, p.117; Rodríguez et al. 1999, p.313).

Figura 1. Esquema del generador de Van der Graaf. En este generador la fricción de una cinta de material aislante en movimiento, con una escobilla B situada en la parte inferior, hace que la escobilla B quede cargada negativamente y la cinta positivamente. Las cargas positivas son transportadas por la propia cinta y liberadas mediante una segunda escobilla, sobre una esfera metálica hueca situada en la parte superior.



Del mismo modo que en la analogía descrita, 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). Así pues la fuerza total se puede indicar como:

$$\vec{F}_{total} = \vec{F}_{elec.,conservativa} + \vec{F}_{no\ elec.no\ conservativa} = q\vec{E} + q\vec{E}'$$

Donde E es el campo eléctrico conservativo producido entre los extremos A y B del interior de la pila o, en el caso de la analogía, del generador de Van der Graaf. E' es un campo no conservativo debido a las acciones no conservativas como, por ejemplo, reacciones químicas dentro de la pila (ver Rodríguez et al. 1999, p.313; Sears y Zemansky 1966, p.600).

3) La medida cuantitativa de la energía puesta en juego en la pila para separar las cargas viene dada de forma operativa por $fem_{ab} = \int_a^b \vec{E}' \cdot d\vec{l}$ (donde E' es un campo no conservativo) a nivel microscópico y a nivel macroscópico se da en función del potencial y de la intensidad de corriente como: $\varepsilon = \Delta V + Ir$. 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.*

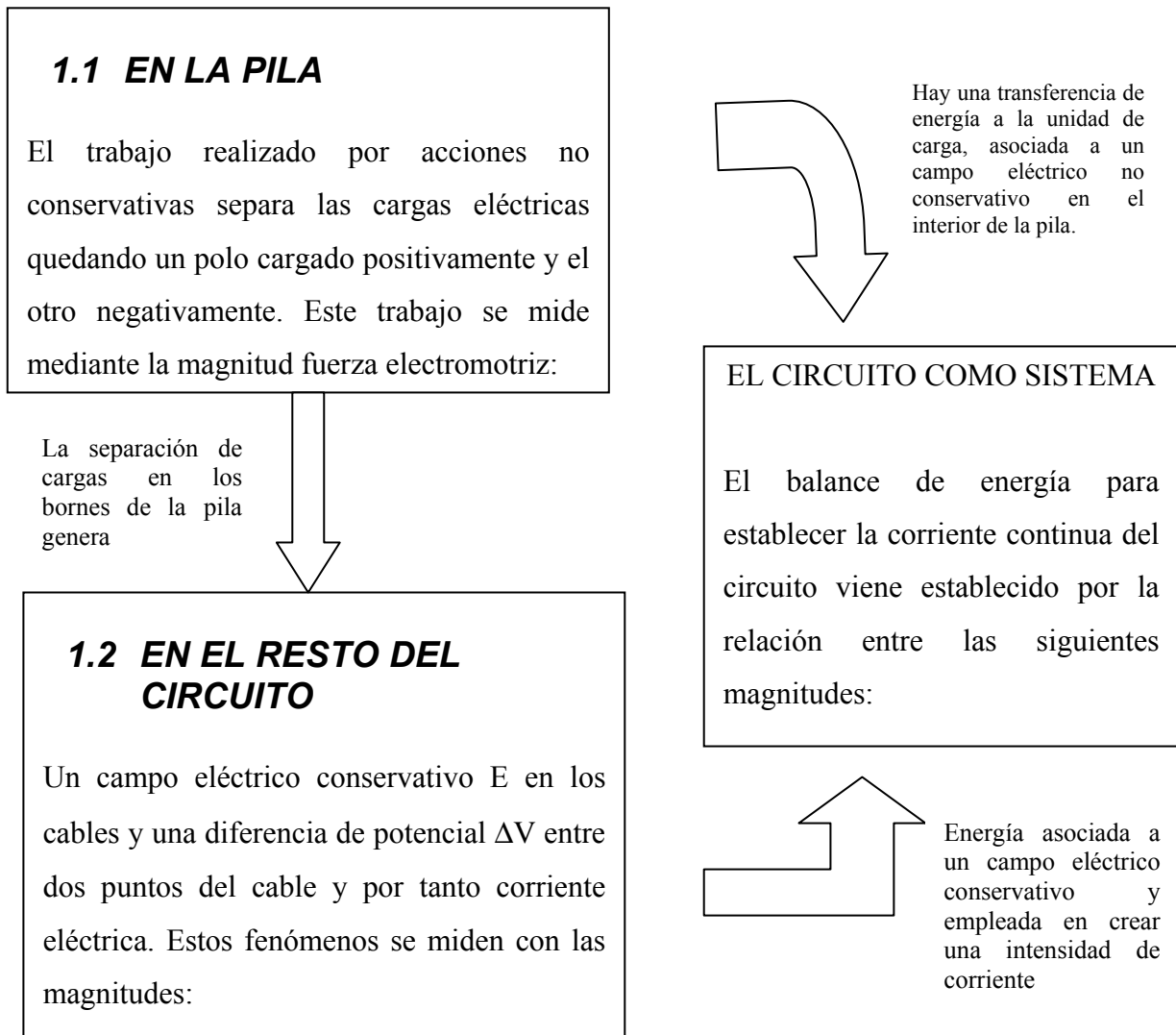
4) La diferencia de potencial que medimos entre los puntos a y b, pertenece a la parte exterior del circuito (en trazo fino en el esquema 2) y se corresponde con el trabajo realizado al mover la unidad de carga dentro de un campo eléctrico conservativo situado dentro del cable. En este sentido la definición operativa de la diferencia de potencial viene dada a nivel microscópico como $V_{ab} = -\int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{l}$ y a nivel macroscópico 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 un campo no conservativo y la segunda a uno conservativo. Conviene recordar que la diferencia entre un campo conservativo y uno no conservativo no es algo que se pueda ‘reducir’ a diferentes ecuaciones matemáticas; tal y como lo demuestra la historia del tortuoso y complicado camino que diferentes grupos de investigación dirigidos por eminentes científicos tuvieron que recorrer para establecer el concepto actual de ‘fuerza electromotriz’. Así pues, será necesario que los estudiantes conozcan también a nivel cualitativo el diferente origen de los trabajos realizados por la pila para separar cargas (no conservativo) y por el campo eléctrico en el circuito (conservativo). 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 un campo no conservativo.*

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.*

Hay que destacar que la investigación didáctica ha mostrado que todos los conceptos mencionados (potencial eléctrico, energía, trabajo, fuerza electromotriz) son conflictivos en su aprendizaje (Hierrezuelo y Montero, 1989 y 1991; Furió y Guisasola,

1998 y 1999; Martín Quero, 1999).

Ahora estamos en condiciones de resumir el significado del concepto de fuerza electromotriz y sus relaciones con los conceptos de carga, potencial, intensidad de corriente y resistencia en un circuito de corriente continua tal y como se indica en el esquema 3.



Esquema 3. Mapa del universo de conceptos utilizados en el modelo explicativo actual del funcionamiento de un circuito de corriente continua

B. Dimensión epistemológica

- 1) Conocer la problemática que dio origen a los modelos explicativos de los circuitos de corriente continua y en concreto, a la explicación de la función de la pila en un

circuito. Es decir, conocer que los conceptos no se introducen de manera arbitraria sino que su introducción tiene el propósito de resolver situaciones problemáticas de interés.

- 2) 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.

B. Dimensión actitudinal

- a) 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.

Cuadro 2.1 Síntesis indicadores aprendizaje

<p>Dimensión conceptual:</p> <p>i.1. La diferencia de potencial provoca el movimiento de las cargas a lo largo de un conductor.</p> <p>i.2. 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.</p> <p>i.3. La magnitud que mide el trabajo realizado por las fuerzas no conservativas al separar las cargas en la pila se denomina fuerza electromotriz.</p> <p>i.4. El trabajo de mover las cargas por el cable del circuito exterior lo realizan fuerzas coulombianas conservativas y lo mide la magnitud diferencia de potencial.</p> <p>i.5. La fuerza electromotriz es una propiedad de la pila del circuito.</p> <p>Dimensión epistemológica:</p> <p>i.6. Los estudiantes utilizarán argumentos acompañados de justificaciones racionales basados en el cuerpo teórico de la ciencia.</p> <p>i.7. Los estudiantes utilizarán en sus argumentaciones estrategias propias del trabajo científico.</p> <p>Dimensión actitudinal:</p> <p>i.8. Saber analizar aplicaciones CTS que permitan contextualizar la teoría aprendida</p>
--

CAPÍTULO 3. FUNDAMENTACIÓN Y ENUNCIADO DE LA PRIMERA HIPÓTESIS

La investigación acerca de las dificultades para que tenga lugar un aprendizaje significativo ha sido, en los últimos tiempos, una de las líneas básicas de trabajo en la didáctica de la física.

El aprendizaje significativo del concepto de fuerza electromotriz, es necesario para interpretar correctamente el funcionamiento de los circuitos eléctricos sencillos, pero también una serie de fenómenos bien conocidos como el efecto piezoeléctrico, efecto Seebeck, etc., en los que el concepto de fuerza electromotriz facilita su comprensión.

El análisis realizado en el capítulo anterior nos permitió establecer los indicadores más relevantes, que caracterizan un aprendizaje significativo del concepto de fuerza electromotriz. Se trata de estudiar ahora si la enseñanza que reciben los estudiantes es la más adecuada en relación con los criterios apuntados. Desde nuestra perspectiva, las posibles deficiencias en el aprendizaje, tendría su origen en la propia estructura actual de la enseñanza, que puede ser considerada un reflejo de aquello que los profesores y libros de texto saben y exponen.

3.1. La enseñanza del concepto de Fuerza electromotriz y los conceptos fronterizos parece tener deficiencias.

En los últimos años distintos trabajos han venido criticando la escasa calidad de la enseñanza que se imparte a los estudiantes de carreras del ámbito científico que, con frecuencia, se caracteriza por un reduccionismo centrado casi exclusivamente en aquellos aspectos más algorítmicos y repetitivos, en detrimento de aquellos otros en los que, la atención a conceptos y procedimientos se favorece de forma prioritaria. (Salinas et al. 1996, Velazco 1998, Millar 1998, Duschl 2000, Pontes y de Pro 2001).

Los resultados de las investigaciones ponen de manifiesto como en la enseñanza habitual las explicaciones no contemplan un proceso que debería caracterizarse por la

incertidumbre, la búsqueda y emisión de hipótesis, la validez del campo de aplicación de las ecuaciones y conceptos que se estudian, los errores que se han cometido...propio todo ello de la metodología científica (López-Gay 2001, Barragués 2003). Sucede también que, los escasos modelos de intervención elaborados por la investigación en didáctica no encuentran eco en la Universidad, dónde los métodos de enseñanza tienden a ser conservadores, los centros de interés investigadora no suelen situarse en la didáctica y generalmente se supone que la responsabilidad docente del profesor consiste fundamentalmente en presentar la información acerca de los contenidos de forma clara y asumir que *“los buenos estudiantes aprobarán y los malos estudiantes fracasarán”* (Holton 1998).

Los informes de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) (Prieto 2001) y del Instituto Nacional de Calidad y Evaluación (INCE), expresan su preocupación por la enseñanza de las Ciencias que se imparte en la actualidad (Prádanos 2001). Se resalta en los informes, que los profesores son y deben ser los agentes activos en el proceso educativo. Conviene tener en cuenta que, la mayoría de los profesores consideran el currículo como algo fijo, firmemente predeterminado y jerárquicamente estructurado y, desde esa perspectiva, organizan las actividades de acuerdo con la estructura de sus propias concepciones, lo que suele traducirse en la exclusión de opciones para la discusión conjunta profesor-estudiantes (Furió 1994). Bajo esas circunstancias, se piensa como algo esencial, el desarrollo de programas de formación permanente del profesorado. En estos programas deberían participar no sólo las Universidades y los diferentes organismos públicos de formación sino también, y de forma fundamental, las Sociedades Científicas (Furió et al. 2001).

Una de las líneas más fecundas en la investigación en la Enseñanza de la Física de las últimas décadas, se ha ocupado de las concepciones alternativas de los estudiantes. Los resultados de este importante corpus de investigación muestran claramente que, las concepciones de los estudiantes antes de la enseñanza influyen profundamente, hasta tal punto que pueden determinar el aprendizaje conseguido, entre otras cosas porque algunas de estas concepciones alternativas son muy resistentes al cambio y a la vez son contradictorias con los conceptos de la física que deben aprender. Estos trabajos se han realizado desde un marco basado en una teoría constructivista del aprendizaje. Desde la óptica constructivista se considera necesario conocer las nociones

e ideas previas de los estudiantes para, de esta forma diseñar una secuencia de enseñanza adecuada para que tenga lugar un aprendizaje significativo y no simplemente memorístico.

Muchos de los estudios sobre concepciones alternativas se han preocupado por las consecuencias que se derivan de las mismas sobre la teoría y práctica educativa, por ejemplo la naturaleza del cambio conceptual y cómo conseguirlo, propuestas de alternativas de enseñanza en distintos tópicos así como de la evaluación y sus consecuencias sobre el aprendizaje, nuevas concepciones sobre el currículo y su secuenciación (Duit et al 1992, Treagust et al. 1996, Milla et al. 2000, Hodson 2003)

Una de las áreas más investigadas en el campo de la física ha sido la electricidad tanto a nivel de enseñanza primaria como secundaria y, en menor medida, en la enseñanza universitaria y el profesorado (Duit et al.1984, Hierrezuelo y Montero 1991, Pontes 1999). En la edición de un trabajo recopilatorio de Pfundt y Duit de 1994 se recogen más de 370 artículos sobre dificultades de enseñanza y aprendizaje de los conceptos de la electricidad. En posteriores ediciones el número de trabajos se ha incrementado. Duit, Jung y von Rhöneck atribuyen la abundancia de estudios sobre el tópico a dos factores principalmente: a) la electricidad es un tema central para el área de la física en el currículo de todos los niveles y b) en electricidad los conceptos son particularmente problemáticos ya que son sumamente abstractos y complejos, lo que da lugar a un grado importante de preocupación por su investigación.

Los resultados de las investigaciones ofrecen resultados desiguales. Algunos estudios presentan avances concretos en los que algunas de las concepciones iniciales se han superado, en otros casos no es así o se da la circunstancia de que los buenos resultados alcanzados en una etapa disminuyen apreciablemente con el transcurso del tiempo. Todo esto podría suceder como consecuencia de: a) los conocimientos previos de los estudiantes interactúan fuertemente con las estrategias de enseñanza empleadas, produciendo diferentes logros de aprendizaje, b) las estrategias de aprendizaje y las actitudes de los estudiantes interactúan en el aprendizaje de la electricidad, y c) existe falta de consenso entre los investigadores en didáctica sobre los objetivos concretos en el aprendizaje de la electricidad (Mulhall et al. 2001).

En esta última cuestión, que afecta directamente a la enseñanza de la electricidad, es la que vamos a comentar más en profundidad en este apartado. Diversas investigaciones indican que la falta de consenso en cuanto a los objetivos de aprendizaje, se refleja en falta de acuerdo respecto a: 1) la naturaleza de los modelos y analogías que se consideran apropiados en la enseñanza de la electricidad (Shaffer y McDermott 1992, Psillos 1998), y 2) El tratamiento, acerca de la naturaleza de los conceptos, que se puede hacer en cada nivel (Désautels y Larochele, 1998). Estas dos cuestiones están relacionadas entre sí, ya que la naturaleza de los modelos y analogías que cada profesor o escritor de libros de texto elige, están íntimamente relacionadas con la comprensión que el profesor tiene.

Es preciso señalar que son escasas las aportaciones con relación al concepto de Fuerza electromotriz, si bien más adelante nos referiremos a algunos de los resultados, en relación con la enseñanza y, junto a ellos, analizaremos estudios que tratan sobre conceptos que se encuentran estrechamente relacionados con el de Fuerza electromotriz.

Como se ha indicado en el apartado 2.2. un aprendizaje comprensivo del concepto de fuerza electromotriz implica: a) Comprender el significado de nociones de la electrostática como las de carga, campo eléctrico, potencial y la diferencia de potencial, b) Comprender el papel que estas magnitudes juegan en la descripción y explicación de lo que sucede en la pila y c) Comprender el circuito como sistema. En cada uno de los ámbitos señalados es necesario distinguir y relacionar adecuadamente las descripciones tanto en términos macroscópicos como microscópicos.

En base a lo anterior, se han clasificado los estudios realizados en dos grandes grupos. El primero de ellos constituido por investigaciones que hacen referencia a las dificultades en la enseñanza de los fenómenos electrostáticos y de las magnitudes y conceptos que allí se estudian. En un segundo grupo se han incluido las investigaciones relacionadas con el tema de electrocinética en circuitos sencillos, en los que se estudia el papel de la pila en relación con el funcionamiento del sistema así como las descripciones/explicaciones de lo que sucede en el circuito en términos macro y microscópicos.

Se hace preciso señalar que, el concepto de Fuerza electromotriz es imprescindible para explicar el funcionamiento de una pila, para lo que debe diferenciarse sin ambigüedades de un concepto de la electrostática como el concepto de diferencia de potencial, es necesario también para comprender el circuito como sistema y tanto la diferenciación con la diferencia de potencial como su papel unificador en la comprensión del circuito como sistema, necesitan de las explicaciones en el ámbito de las relaciones macro-micro.

En relación con el primer grupo de investigaciones, en lo que a la enseñanza de los conceptos implicados se refiere, algunos de los resultados más destacados serían:

- Benseghir y Closset (1993, 1996) señalan como la transición entre la electrostática y la electrocinética presenta dificultades y como los conocimientos previos de la electrostática constituyen un cuadro de referencia deformado para la construcción del concepto de circuito eléctrico.
- Guisasola (1996) señala insuficiencias y carencias epistemológicas en la organización y secuenciación de los contenidos de la electrostática propuestos por profesores y libros de texto. Destacando problemas en lo relativo a la enseñanza de los conceptos de campo, potencial y diferencia de potencial y como a la mayor parte de los libros analizados no terminan de llegar los hallazgos de la investigación en lo que se refiere a las ideas alternativas de los estudiantes.
- Martín Quero (1999) en una investigación sobre la introducción al concepto de campo en física, concluye en relación con el profesorado que estos mantienen una serie de errores que pueden transmitir, inadvertidamente, a sus estudiantes. Y en relación con los libros de texto, entre otras deficiencias, el hecho de que no se destaca como el campo presenta un marco conceptual común para la interpretación de las interacciones y la explicación de diversos fenómenos.
- Otras dificultades en la enseñanza de los fenómenos electrostáticos han sido señaladas por Arons (1990) y Park et al (2001). En concreto Arons señala como *“muchos profesores y libros de texto, especialmente de niveles de postsecundaria, suponen que las ideas básicas han sido asimiladas y*

comprendidas. Desgraciadamente este no es el caso, ya que muchos estudiantes nunca han observado directamente las interacciones electrostáticas....comenzar los cursos suponiendo que los estudiantes deben conocer tanto los fenómenos como la terminología relativa, es la causa de la mayor parte de las dificultades que tendrán los estudiantes con estos temas ...”

Los resultados y recomendaciones que se apuntan en los párrafos anteriores, expresan una serie de problemas relacionados con la enseñanza de conceptos implicados en el aprendizaje significativo del concepto fuerza electromotriz, como son las relaciones entre la electrostática y la electrocinética, el concepto de potencial, el de diferencia de potencial y el de campo.

Entre los resultados más destacables en relación con el segundo grupo de investigaciones, las relacionadas con la enseñanza de la electrocinética, existe un consenso bastante generalizado entre los investigadores respecto a que la enseñanza recibida por los estudiantes de distintos niveles y profesores en formación, favorece un proceso de aprendizaje memorístico, poco reflexivo y escasamente comprensivo.

Las dificultades para enseñar adecuadamente la noción de diferencia de potencial, en el estudio de los circuitos eléctricos simples, aparecen en numerosos trabajos desde hace décadas (Cohen et al 1983), también las dificultades para enseñar las relaciones entre corriente y diferencia de potencial, así como la propia noción de corriente (Hierrezuelo y Montero 1991). En este sentido, la utilización de modelos/analogías/metáforas para la enseñanza de nociones problemáticas ilustra sobre los problemas en la enseñanza de esta parte de la física. A pesar de ser un asunto ampliamente investigado (Duit 1991, Stocklmayer y Treagust 1996) no se ha alcanzado un consenso al respecto, cuestiones básicas como ¿qué modelo/analogía/metáfora?, ¿cuándo?, ¿en qué niveles?, ¿por qué?, no se encuentran debidamente fundamentadas y a menudo se obvian por falta de rigor y criterio. Hasta ahora se ha tratado de tentativas en torno a las cuales han surgido discrepancias. Así por ejemplo, Steimberg (1992) por un lado, Schwedes y Dudeck (1996) por otro, y el proyecto Nuffield Science usan en sus propuestas la analogía del flujo de fluido, mientras que Shafer y McDermott (1992) y Dupin y Joshua (1987) mantienen que es inapropiada. También basándose en modelos/analogías/metáforas Shafer y McDermott (1992) argumentan que debe ser la

corriente y no la diferencia de potencial/energía lo que debe constituir el comienzo de un estudio sistemático de la electricidad, para niveles medios y superiores, mientras que Psillos (1998) se encuentra en la posición contraria. La discrepancia llega a los libros de texto donde los criterios acerca del uso de modelos/analogías/metáforas, ni se justifica ni se encuentran consensuados.

En un trabajo de Chabay y Sherwood (1999) señalan que el tratamiento tradicional de los circuitos se podría caracterizar por: la poca o ninguna conexión con la electrostática, un estudio en términos de corriente y potencial exclusivamente, desde una perspectiva macroscópica y un tratamiento muy superficial de los mecanismos que tienen lugar. Proponen un tratamiento unificado de la electrostática y los circuitos, una descripción en términos de carga y campos seguida posteriormente de un análisis en términos de potencial y corriente y un tratamiento tanto macroscópico como microscópico. En un trabajo clásico Eylon y Ganiel (1990) señalaban que era esencial relacionar cargas con fuerzas y campos y así aclarar los mecanismos que gobiernan el circuito como sistema, pero que este tratamiento no recibe la suficiente atención y como consecuencia los estudiantes no lo aprenden.

McDermot (1998) en un trabajo en relación con el aprendizaje de los conceptos claves de la electricidad, al referirse a las dificultades que reiteradamente se han identificado entre los estudiantes señalaba: "...Es necesario incluir entre estos estudiantes a los profesores de enseñanza elemental y de secundaria así como a los que enseñan durante la formación inicial. Puesto que la electricidad forma parte de la enseñanza preuniversitaria, es importante que los profesores superen sus dificultades en relación con estos contenidos y se familiaricen con estrategias eficaces de enseñanza que puedan utilizar para ayudar a sus estudiantes".

Un trabajo realizado por Mulhall, McKittrick y Gudstone (2001) concluye que: a) algunos profesores confiesan abiertamente que no poseen una idea de tipo cualitativo sobre la diferencia de potencial en un circuito, b) los profesores presentan ciertas dificultades al explicar las transformaciones energéticas en un circuito y relacionar magnitudes fundamentales como energía, voltaje y corriente, c) muchos profesores están desilusionados con la utilización de analogías y no intentan enseñarlas, d) los profesores tienden a confundir la analogía que explican, con lo que realmente sucede.

Por último y relación con el concepto de Fuerza electromotriz Page (1977) y Varney y Fisher (1980) señalan errores en los libros de texto, entre los que caben destacar:

- Los términos fuerza electromotriz, diferencia de potencial y voltaje se utilizan como sinónimos.
- No se hace referencia a la noción de acción no electrostática sobre las cargas que es esencial para la fuerza electromotriz.
- El concepto de fuerza electromotriz es pobremente definido o conceptualmente explicado, esta situación es casi única en contraste con la normal meticulosidad de la física al definir los términos y elucidar los conceptos.

En definitiva las dos fuentes principales, profesores y libros de texto, para la enseñanza del concepto objeto de nuestra investigación, la fuerza electromotriz, exhiben problemas y errores en aspectos importantes relacionados con el tratamiento de los conceptos implicados.

3.2 El aprendizaje de los estudiantes sobre el concepto de fuerza electromotriz, parece tener deficiencias

Las dificultades en torno a un aprendizaje adecuado de los conceptos, es un tema que ha sido analizado insistentemente, han sido muchos los resultados importantes obtenidos a través de dicha línea de investigación (Wandersee et al 1994, Pfund y Duit 1998), lo que ha permitido averiguar que:

- a) Existen factores psicológicos y sociológicos que influyen en la construcción de las concepciones de los estudiantes (Driver et al 1986). En este sentido en áreas como la electricidad, en las que el individuo no interacciona con el medio de la forma en la que lo hace en la mecánica, se desarrollan concepciones de carácter social o analógico (Pozo et al 1991, Jiménez y Marín 1996).

- b) Existen también factores de carácter pedagógico y epistemológico (la inadecuada selección de objetivos y contenidos, las metodologías habituales de enseñanza, los materiales didácticos, los criterios de evaluación, la formación del profesorado, que condicionan el aprendizaje (Del Carmen et al., 1997; Pontes y de Pro, 2001)

En la actualidad existe un acuerdo en relación con el papel determinante que, en el aprendizaje de las ciencias en general y de la electricidad en particular, tienen las concepciones alternativas de los estudiantes. El abanico de investigaciones es muy amplio y así, en relación con el aprendizaje acerca de los circuitos de corriente continua, las investigaciones ocupan varias décadas (Closset 1983, Dupin y Joshua 1987, Shipstone et al 1998, Duit y von Rhöneck 1998, Mulhall et al. 2001, Pontes y de Pro 2001) por sólo citar algunas. Algo más recientes son las investigaciones acerca de la electrostática (Galili 1995, Guisasola 1996, Furió et al. 1998, Velazco 1998, Furió y Guisasola 1999, Park et al 2001) o las que se refieren al nexo entre la electrostática y la electrocinética (Eylon y Ganiel 1990, Steimberg 1992, Benseghir y Closset 1993, Thacker et al 1999, Chabay y Sherwood 1999). Otras de tales investigaciones se han ocupado de analizar las características de las concepciones tanto espontáneas como alternativas presentes en ellos, y de qué manera influyen en el proceso de aprendizaje (Sebastiá 1993).

Otro resultado sumamente interesante, al que han llegado distintos investigadores (Viennot 1996, Pontes y de Pro 2001) es el que muestra como algunas de las ideas exhibidas por los estudiantes se muestran muy resistentes al cambio incluso en niveles de enseñanza superior, lo que parece indicar que no se trataría de ideas sueltas o deslavazadas, sino que se han mostrado dotadas de cierta coherencia interna, estructurándose en auténticos “marcos conceptuales alternativos” (Gianneto et al. 1992). Otros autores señalan que es perfectamente factible que en un mismo individuo coexistan concepciones aparentemente contradictorias (Licht 1987, Sebastiá 1993), lo que podría explicarse suponiendo que se utilizan según el contexto.

Veamos por último un resumen de los resultados de la investigación didáctica, en relación con el aprendizaje de los estudiantes de algunos de los conceptos claves de la electricidad, la mayor parte de los cuales son susceptibles de interferir en el

aprendizaje del concepto de fuerza electromotriz. Como en el apartado anterior comenzaremos por los resultados del aprendizaje sobre los conceptos de la electrostática.

Guisasola (1996) demuestra que los estudiantes presentan concepciones alternativas sobre la naturaleza eléctrica de la materia, que la mayoría de ellos tienen grandes dificultades en el manejo significativo de los conceptos de campo y potencial eléctricos. Manifestaciones de esta dificultad son los conflictos a la hora de relacionar diferencia de potencial con intensidad de corriente, llegando incluso a confundir potencial y corriente eléctrica en las explicaciones que los estudiantes daban al interpretar la diferencia de potencial entre los electrodos de una pila. Benseghir y Closset (1996) y Zubimendi (2003) señalan también señalan como el concepto de diferencia de potencial aparece como un concepto cautivo de la carga y por tanto sin entidad propia, la idea es: sin carga no hay diferencia de potencial.

Es preciso indicar que dificultades en el mismo sentido habían venido señalándose en años anteriores Steimberg (1992), Stocklmayer y Treagust (1994) y en años posteriores Velazco (1998), señalando estos autores como algunas de las causas, la introducción del concepto de forma puramente operativista o la incomprensión de la dependencia existente entre el potencial y el referencial elegido.

En relación con el aprendizaje del concepto de campo, Martín Quero (1999) señalaba, entre otros, los siguientes problemas: los estudiantes confunden fuerza con campo y no conocen la interpretación de los aspectos energéticos asociados a la interacción.

En síntesis se puede decir que, según investigaciones de los últimos años, el aprendizaje de los conceptos de carga, campo y potencial así como sus relaciones con el concepto de energía, resulta ser problemático.

Ya nos hemos referido a las investigaciones de Benseghir y Closset (1993, 1996) y de Chabay y Sherwood (1999) acerca de las dificultades en la integración de los conceptos de la electrostática en el estudio de los circuitos eléctricos. Parece lógico a la vista de los resultados obtenidos por Guisasola (1996), Furió y Guisasola (1998), Martín

Quero (1999) entre otros, que los conocimientos sobre electricidad estática acaben siendo un obstáculo en la formación de los conceptos de la electrocinética. De esta forma, ante la necesidad de interpretar, explicar o justificar un hecho determinado en un circuito, se recurre a lo familiar, a lo conocido, de forma que la electrocinética se reinterpreta a partir de ideas y nociones que pueden ser insuficientes o erróneas.

La investigación de las dificultades en el aprendizaje de los circuitos sencillos de corriente continua ha proporcionado un verdadero universo de resultados. Algunos de los conflictos detectados entre el alumnado presentan rasgos muy semejantes en distintos países. Por ejemplo, la investigación (Shipstone et al. 1988) ha mostrado que la noción de “consumo de la corriente eléctrica” no desaparece con la enseñanza formal. De todas las dificultades de aprendizaje reveladas en los numerosos estudios disponibles, tres merecen la consideración de claves:

- Los estudiantes confunden las nociones de corriente y energía (Tiberghien 1975, Rhöneck 1983, Duit y Rhöneck 1998, Pontes y De Pro 2001). Probablemente esta confusión explicaría la idea de los estudiantes muy resistente al cambio, a la que ya nos hemos referido, según la cual la corriente se consume a paso por el circuito.
- Los estudiantes confunden intensidad de corriente y diferencia de potencial, flujo y causa del flujo (Rhöneck 1985, Psillos 1988, Duit y Rhöneck 1998, Pontes y De Pro 2001). Según los estudiantes si no hay flujo no hay causa del flujo, cuando debería ser al revés: si no existe la causa del flujo, éste no existirá.
- El llamado “razonamiento secuencial” que preside las ideas de los estudiantes acerca del flujo de la corriente eléctrica y, según el cual los estudiantes poseen una visión muy localizada, ignorando el efecto que una variación en un punto de un circuito tiene sobre el conjunto del mismo (Härtel 1982, Duit y Rhöneck 1998, Pontes y De Pro 2001).

Como consecuencia de las dificultades anteriores y de la falta de mecanismos en términos microscópicos, los estudiantes exhiben una serie de deficiencias en su aprendizaje a la hora de interpretar el papel de la pila en el circuito, lo que se traduce en la idea bastante generalizada, al creer que la pila es una fuente de corriente o de cargas para el mismo y que tal suministro de corriente, es una propiedad de la pila al margen

del circuito al que la misma se conecta. En el caso de la pila es frecuente que se confundan la diferencia de potencial entre los electrodos de la misma con la fuerza electromotriz de dicha pila.

Junto a las importantes ideas anteriores, que no olvidemos, distintos investigadores han detectado a lo largo de los últimos veinte años, Benseghir y Closset (1996) y Chabay y Sherwood (1999) señalan también como se confunden la ley de Ohm con la segunda ley de Kirchhoff, lo que significa que se confunde la relación entre el valor de la intensidad entre dos puntos y la diferencia de potencial entre dichos puntos, con el balance energético entre la pila y el circuito.

Hay un aspecto de tipo procedimental que se pone también de manifiesto entre los estudiantes, de nuevo más allá de las fronteras y las lenguas, una especie de déficit de aprendizaje universal: la incapacidad para desarrollar conocimientos de tipo cualitativo, ya que la exigencia de resolver problemas y ejercicios de tipo cuantitativo les lleva a manipular ecuaciones, a utilizar algoritmos y fórmulas de forma mecánica y memorística (Thacker et al 1999).

Por último señalar que este aprendizaje deficitario acerca de conceptos clave de la electricidad alcanza no sólo a estudiantes de los distintos niveles, sino también a profesores en activo y en formación (Cohen et al.1983, Guisasola 1996, Duit y Rhöneck 1998, Martín Quero (1999), Pontes y De Pro 2001), pensamos por tanto que este apartado, con el que pretendíamos justificar las deficiencias en el aprendizaje del concepto de Fuerza electromotriz y conceptos fronterizos, es cumplidamente aclaratorio en relación con los principales problemas y con el alcance de los mismos.

3.3 Formulación de la primera hipótesis

En este mismo capítulo 3, nos hemos referido a las deficiencias relativas a la enseñanza habitual en relación con el concepto de Fuerza electromotriz y otros fronterizos con el mismo. A partir de los resultados ofrecidos hay que pensar que las carencias en el aprendizaje señaladas, no podrían justificarse como una responsabilidad de los estudiantes, sino a una serie de deficiencias que tienen lugar durante el proceso de

enseñanza-aprendizaje. Estas deficiencias abarcan tanto ámbitos epistemológicos como aspectos metodológicos, referidos a las estrategias de enseñanza puesta en juego. Por tanto, los problemas que se han venido señalando tienen su raíz en la comunidad educativa, en una vertiente que incluye a profesores y libros de texto (Cañal y Criado 2002, Gacía Rodeja 2002).

Como señalan las distintas investigaciones que hemos venido citando, ni unos ni otros, como esperamos demostrar nosotros mismos más adelante, en relación con el tema de nuestra investigación, toman en consideración los resultados de la investigación en didáctica de las ciencias, presentando además una visión deformada de la Ciencia, lo que sería una causa relevante, añadida a las anteriores, de la escasa comprensión por parte de los estudiantes de los conceptos objeto de este estudio. Todo ello nos ha llevado al enunciado de nuestra primera hipótesis en los términos:

HIPÓTESIS 1: La enseñanza habitual del concepto de fuerza electromotriz, dentro del modelo explicativo de corriente continua en circuitos sencillos, no tiene en cuenta los resultados de la investigación en didáctica de las ciencias y por ello, presenta deficiencias didácticas de tipo conceptual, epistemológico y actitudinal, que dificultan un aprendizaje basado en la comprensión por parte de los estudiantes.

Las deficiencias que se conjeturan en esta hipótesis, hacen referencia a la incapacidad del sistema educativo para ofrecer a los estudiantes los medios necesarios para alcanzar los indicadores de aprendizaje señalados en el capítulo 2 y que suponen lograr un aprendizaje significativo.

Demostrar esta primera hipótesis, debe significar exponer razonadamente las carencias epistemológicas y didácticas de una enseñanza que se basa en exposiciones, en las que predomina una visión aproblemática del cuerpo de conocimientos a tratar, en las que no se consideran los saltos cualitativos que se dieron en su momento en el proceso de construcción del marco teórico y el que los conceptos se presentan, fundamentalmente, de forma puramente operativa, siendo los estudiantes evaluados mediante criterios coherentes y en consonancia con todo ello, reforzando por tanto estas

ideas en lo que se refiere tanto a los conceptos y procedimientos como a la forma de operar en la Ciencia.

En este sentido conviene tener en cuenta que para que se produzca un aprendizaje apropiado se hace necesario desarrollar convenientemente no sólo los contenidos conceptuales, sino también los procedimentales (García de Cajén et al 2002, Zubimendi 2003), que deben estar acompañados de cambios en las actitudes y valores. La mayor parte del profesorado actúa como si los estudiantes de forma espontánea desarrollaran los procedimientos que facilitan el aprendizaje. En relación con esto, investigaciones como las de Duschl (1995) y Domínguez (2000) señalan que la utilización de estrategias de razonamiento contribuye de manera positiva al éxito en las tareas académicas.

Los datos de la investigación en didáctica de la ciencia que hemos venido aportando, señalan la incapacidad de la enseñanza que se produce en las aulas, para que tenga lugar el necesario cambio conceptual, ontológico, procedimental y actitudinal.

CAPITULO 4: OPERATIVIZACIÓN DE LA PRIMERA HIPÓTESIS Y SUS DISEÑOS EXPERIMENTALES

La presentación didáctica del modelo explicativo de corriente continua en un circuito sencillo que se realiza habitualmente, presenta visiones distorsionadas de cómo se construye y cómo se trabaja en la Ciencia.

En la enseñanza habitual del concepto de fuerza electromotriz los aspectos epistemológicos e históricos, es decir, la problemática conceptual en la que surge la noción de fem, no son tenidos en cuenta. El ostracismo general en el que se desenvuelve la enseñanza de la física, en relación con la historia y la filosofía, en este caso concreto se ve si cabe, más acentuado.

Sin embargo, la necesaria relación entre la filosofía de la ciencia y la enseñanza de las ciencias es señalada por diferentes autores que resaltan la importancia de fundamentar la enseñanza de las ciencias en las tendencias establecidas de la filosofía de la ciencia (Hodson 1985, Cleminson 1990, Martínez-Torregrosa et al. 1993, Duschl 1994, Gil-Pérez 1996, Alters 1997, Matthews 1998-a, 1998-b McComas 2000). 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 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 (Nersessian 1995). En otras palabras, la comprensión de conceptos y teorías exige conocer no sólo las definiciones actuales sino también el contexto de indagación donde se construyeron y desarrollaron (Duschl 1997).

Durante la década de los 80 y 90 surgió una imagen de la ciencia con importantes implicaciones para la enseñanza de las ciencias (Gil 1983, Osborne y Wittrock 1985, Driver y Oldham 1986, Gil 1991, 1994, Hodson 1988, Driver et al 1994, Solomon 1997, White 1998, Millar y Osborne 1998, Fernández et al. 2002; Guridi y Salinas, 2001; McComas, 2000; Izquierdo 2000; Sequeira, 1999, Matthews, 1994). Esta imagen está alejada de una secuencia de pasos a veces mal asociados con el llamado ‘método científico’ y nos indica que no existe un método universalmente aplicable.

En el nuevo dibujo de la ciencia la seguridad no es algo rotundo ni definitivo, las conclusiones absolutas de verdadero o falso son más un riesgo que un espacio de seguridad intelectual. Las cuestiones que son pertinentes en un contexto teórico pueden no tener sentido en otro. Se hace necesario introducir en la práctica cotidiana de la enseñanza de la ciencia la noción de **ámbito de validez**, no sólo como idea general que de alguna manera presida el quehacer docente en este campo sino como, incluso algo más concreto que impregne las actividades de enseñanza de conceptos y teorías. Sólo cuando se conocen sus límites se puede decir que se conoce y se puede manejar un concepto y en su caso que se ha asimilado una teoría (Lévy-Leblond 1996).

La falta de reflexión en los objetivos de enseñanza respecto a la comprensión de la naturaleza de la ciencia puede deberse a la confusión de las perspectivas filosóficas presentadas en el curriculum de ciencias, así como a la falta de una adecuación comprensiva de los aspectos básicos de la filosofía de la ciencia y su importancia en el diseño de las estrategias de enseñanza. En este sentido, la Historia de la Ciencia se muestra como un instrumento útil al señalar dónde estuvieron los problemas en la construcción de los conceptos y teorías, indicando qué barreras epistemológicas hubieron de superarse (Lakatos 1983, Viennot 1985, Wandersee 1992, Gil 1993). Por ejemplo, en la unificación de los fenómenos electrostáticos y electrocinéticos sólo fue posible tras los trabajos de Ohm y Kirchoff y la utilización de las cargas superficiales en los circuitos eléctricos. A partir de aquí es posible inspirar y elaborar estrategias de enseñanza que puedan ser una ayuda inestimable para mejorar de forma significativa el aprendizaje de conceptos y teorías.

En relación con la pregunta ¿Qué historia se necesita? No se puede perder de vista que el desarrollo del conocimiento científico es un proceso creativo que requiere un esfuerzo intelectual considerable y que suele ser el resultado de una actividad de colaboración y confrontación de pareceres. En este sentido Monk y Osborne (1997) sugieren “una historia de la creación de las ideas, de la gente que las inventó y de su impacto en la sociedad”. En otras palabras, la historia de la ciencia vista como fuente de problemas resueltos que han supuesto avances en el conocimiento científico. Existen, de hecho, múltiples argumentos que defiende la inclusión de la historia de la ciencia en el curriculum y especialmente en las estrategias de aprendizaje (Seroglou et al. 1998;

Solomon 2002) si bien hay que reconocer que todavía hay pocos estudios que exploren esta perspectiva en el diseño de programas de enseñanza de la Física.

4.1 Operativización de la primera hipótesis y visión general del diseño

Hacer operativa la primera hipótesis implica enumerar y analizar aquellos factores implicados en el proceso de enseñanza/aprendizaje habitual del concepto de fuerza electromotriz. El análisis, por tanto, se ha centrado por una parte sobre los libros de texto y el profesorado (factores de enseñanza) y por otra sobre el aprendizaje logrado por los estudiantes.

En relación con los libros de texto hemos examinado como se presenta el concepto de fuerza electromotriz a fin de descubrir deficiencias epistemológicas y didácticas que dificulten un aprendizaje significativo del concepto. Se ha prestado especial atención a las concepciones del profesorado ya que estas, de manera general, afectan a la realidad de las clases. El profesorado es el elemento esencial no sólo de información, sino también de procedimientos empleados y aún, de su propio punto de vista, a través del cual los estudiantes modularán su actitud en el proceso de aprendizaje.

A continuación se analiza el aprendizaje logrado por los estudiantes en relación con la noción de fuerza electromotriz. Hemos supuesto que la transmisión verbal de conocimientos ya elaborados ni facilitará la superación de ideas alternativas ni ayudará de manera eficaz a superar las dificultades propias del aprendizaje.

Para detectar las deficiencias epistemológicas y didácticas se ha realizado un diseño múltiple y convergente, ya que el proceso de enseñanza/aprendizaje es tan complejo, que trabajar con un solo tipo de diseño podría dar lugar a unos resultados limitados y ocasionalmente erróneos (Cohen y Manion 1990).

Es necesario señalar que en la mayoría de las investigaciones educativas (a diferencia de las sociológicas) no es necesario recurrir a grandes muestras. Según Larkin y Rainard (1984) el tamaño de la muestra, debido a su escasa incidencia en la desviación típica obtenida, no es relevante, es preferible lograr grandes diferencias estadísticas entre las muestras y a ser posible de maneras diferentes. De forma que, en la mayoría de las investigaciones en este campo se valora la riqueza del diseño en la

medida en que sea capaz de explorar una diversidad de facetas e implicaciones de las hipótesis.

Es por esto que, teniendo en cuenta las ideas expuestas y con el objetivo de contrastar la primera hipótesis hemos formulado varias predicciones derivadas, que pudiesen aportar criterios razonablemente objetivos sobre su validez ya que, como se ha dicho, la coherencia de los resultados obtenidos al aplicar una determinada variedad de estrategias, indicaría la validez interna de las mismas. En concreto de la primera hipótesis hemos desglosado las siguientes hipótesis derivadas:

- A.** La presentación didáctica del modelo explicativo de corriente continua en un circuito sencillo que se realiza habitualmente, presenta visiones distorsionadas de cómo se construye y cómo se trabaja en la Ciencia.

- B.** La enseñanza habitual acerca del concepto de fuerza electromotriz dentro de un modelo explicativo de corriente continua en circuitos simples, no tiene en consideración los resultados de la investigación didáctica en el aprendizaje de las Ciencias y, por consiguiente, presenta graves deficiencias de tipo didáctico.

- C.** Como consecuencia de lo anterior, los estudiantes de Bachillerato presentarán concepciones alternativas y dificultades de aprendizaje, alguna de las cuales se asemejarán a aquéllas que se presentaron en la construcción del concepto de fuerza electromotriz en el contexto explicativo de circuitos simples de corriente continua.

Para contrastarlas se han utilizado métodos semicuantitativos reflejados en estadillos utilizados para el análisis de respuestas escritas o de libros de texto y también técnicas cualitativas, como las entrevistas grabadas a estudiantes y profesores.

En la elaboración de cuestionarios y entrevistas se ha tenido en cuenta los requisitos necesarios en una investigación didáctica de rigor. Inicialmente se pasaron cuestionarios a grupos de estudiantes con el objetivo de analizar las posibles dificultades de tipo formal, es decir, en la comprensión de las preguntas, idoneidad entre el enunciado y el objetivo perseguido, etc. A continuación se validaron las

preguntas con respecto a su pertinencia o no, mediante el juicio de otros investigadores y profesores expertos, algunos de ellos incluso ajenos a la propia investigación.

Obviamente lo que aquí se presenta es el resultado final obtenido al llevar a cabo la investigación en el campo descrito. No se hacen referencia a resultados parciales, ni a las etapas por las que la recogida y selección de datos ha pasado. Por ejemplo, se seleccionaron sólo doce ítems, cuando se han empleado más de veinte a lo largo de toda la fase inicial de preparación de esta herramienta. Se soslayan pues, los sondeos realizados y las exploraciones primitivas tanto las realizadas con estudiantes como con el profesorado.

El análisis de los protocolos de entrevistas y cuestionarios relativos al profesorado, libros de texto y estudiantes los ha realizado el autor de este trabajo conjuntamente con otros dos investigadores y tres profesores expertos, hasta obtener plena coincidencia una vez que se pusieron en común los estadios de corrección.

4.2 Consecuencias contrastables

De acuerdo con el enunciado de la primera hipótesis, esperamos que la enseñanza habitual del concepto de fuerza electromotriz presente visiones distorsionadas de los procesos de construcción de la Ciencia y del trabajo científico. Lo que se considerará probado si la organización y secuenciación de los contenidos propuestos por los libros de texto y por el profesorado, presentan las carencias epistemológicas (recogidas desde A1 a A3) y que se concretan en el Cuadro 4.1 siguiente, que se ha elaborado desde los siguientes supuestos:

El análisis de la investigación científica permite señalar una serie de características comunes acerca de la Naturaleza de la Ciencia (Mellado y Carracedo 1993, Matthews 1994-a, Solves y Traver 1996), en base a las cuales se ha desglosado en detalle la hipótesis derivada A. De forma muy sintética hemos partido de:

- a) Una concepción de la actividad científica que considera que el conocimiento científico elabora teorías y conceptos, como respuestas tentativas a problemas planteados por los científicos y la sociedad (Cobern 2000; Glasson y Bentley 2000)
- b) De reconocer que el conocimiento científico está sujeto a cambios que suponen saltos cualitativos y esfuerzos de unificación de diferentes áreas, en

un cuerpo coherente de conocimientos que se insertan en estructuras globales y relacionadas, es decir, el saber que genera la investigación científica no puede presentarse mediante afirmaciones aisladas: un enunciado por muy elemental y compacto que sea, sólo adquiere sentido en su marco conceptual global (Levy-Leblond 1996 y Meitchtry 1999).

- c) La finalidad de la Ciencia no es producir verdades absolutas o universales, es decir, de una visión de las teorías científicas, que consideran que estas tienen carácter tentativo y, por tanto, las leyes y conceptos, tienen limitaciones y ámbitos de validez. En consecuencia no hay ningún enunciado “verdadero” por sencillo, directo, evidente y antiguo que sea, que no se pueda poner en entredicho algún día (Levy-Leblond 1996, Irwin 2000, Campanario 2001).

Además, el análisis realizado respecto al proceso que tuvo lugar en la génesis y posterior evolución del concepto de fuerza electromotriz, también nos ha permitido detectar carencias de tipo epistemológico, relacionadas con las reformulaciones conceptuales en el tránsito desde la electrostática a la electrocinética así como la irrupción del principio de conservación de la energía en las explicaciones de los circuitos eléctricos de corriente continua.

Veamos bajo esta doble perspectiva, las deficiencias detectadas:

Cuadro 4.1. Carencias epistemológicas detectadas en la organización y secuenciación de contenidos.

A1.- Visión problemática de la Ciencia. Transmisión de conocimientos ya elaborados, y por tanto caracterizados por la ausencia de cómo evolucionaron y las dificultades que surgieron. De esta manera, no existen preguntas o problemas iniciales, que puedan originar un proceso de construcción racional, hipotético-deductivo, de modelos que expliquen el significado físico de la magnitud fuerza electromotriz en un contexto de circuitos sencillos de corriente continua.

A2.- Presentación acumulativa lineal de los conocimientos. Exposición lineal del conocimiento relativo al modelo actual de corriente continua, de forma que no se tiene en cuenta las modificaciones conceptuales profundas que se realizaron al introducir los conceptos de mayor poder explicativo. Por ejemplo, la introducción del concepto de diferencia de potencial, de intensidad de corriente, de fuerza electromotriz o las relaciones de los contextos electrostático y electrocinética. Como consecuencia, la presentación de los conceptos se hace de manera inconexa, sin mostrar la tan necesaria relación entre ellos en una acción globalizadora.

A3.- Sin visión de cambios ontológicos. Falta de conocimiento del cambio ontológico que se produjo en el desarrollo de las explicaciones teóricas, al pasar de modelos mecánicos a modelos energéticos que incluyen el principio de conservación de la energía.

En consonancia con el enunciado de la primera hipótesis, y en concreto con la hipótesis derivada **B**, es previsible que la enseñanza habitual en lo que concierne al concepto de fuerza electromotriz no tenga en cuenta los resultados de la investigación didáctica en el aprendizaje de las Ciencias. Esto se considerará probado si las estrategias de enseñanza propuestas por los libros de texto y por los profesores presentan las carencias didácticas especificadas (desde **B₁** a **B₄**), que se concretan en el cuadro 4.2.

Para establecer las carencias a las que se hace referencia se han tenido en cuenta, por una parte la revisión bibliográfica acerca del tema (Gil 1994, Porlán y Martín 1996, Sherwood y Chabay 1999, Fernández et al 2002), junto con las tendencias observadas en los últimos años en la enseñanza formal y, de otro lado, de la similitud existente entre las categorías epistemológicas establecidas y algunas concepciones de los estudiantes. Veamos pues cuales son, en el aspecto didáctico:

Cuadro 4.2. Carencias didácticas detectadas en las estrategias de enseñanza

B1.- No tiene en consideración las posibles concepciones alternativas de los estudiantes. Ello da lugar a la ausencia de atención a las posibles ideas espontáneas que puedan tener los estudiantes, incluso, a la transmisión o fomento de ideas erróneas.

B2. No toma en consideración las dificultades procedimentales de los estudiantes. Derivadas de una escasa utilización de aspectos básicos de la metodología científica (planteamiento cualitativo del problema, emisión de hipótesis, diseño y realización de experimentos, análisis de los resultados...) que coadyuvan a un aprendizaje memorístico de los conceptos. En consecuencia, no hay explicaciones o actividades sobre los requisitos necesarios para analizar el modelo de corriente continua o para poder realizar predicciones con el modelo.

B3.- Presentación básicamente operativista de los conceptos. En consecuencia, no se explicita un tratamiento de tipo cualitativo, necesario para una mejor comprensión de los conceptos.

B4.- No presta atención a aspectos motivacionales (C/T/S). Lo que conlleva una presentación descontextualizada socialmente de la Ciencia, ocasionando desinterés hacia el tema.

De nuevo a partir del enunciado de la primera hipótesis y de la hipótesis derivada **C**, se detectarán dificultades de aprendizaje y concepciones alternativas de los estudiantes que han recibido una enseñanza del concepto de fuerza electromotriz, siguiendo el modelo de enseñanza habitual. Lo que se considerará probado, si se observa en los estudiantes serias dificultades en la comprensión de las nociones

fronterizas con el concepto de fuerza electromotriz. La definición de estas dificultades e ideas alternativas explicitadas desde C1 a C4, tal como se muestra en el cuadro 4.3, ha sido obtenida de nuestra revisión histórica de la construcción del concepto de fuerza electromotriz (ver apartados 1.3 y 1.4), de nuestra revisión bibliográfica acerca del tema (Varney y Fisher 1976, 1980, Page 1977, Heald 1984, Eylon y Ganiel 1990, Furió y Guisasola 1997, 2001, Psillos 1998, Serwood y Chabay 1999, Preyer 2000) y de nuestra caracterización de un aprendizaje comprensivo del concepto de fuerza electromotriz (ver apartado 2.2.).

Cuadro 4.3 Errores conceptuales en relación con el concepto de fuerza electromotriz

C1.- Relaciones entre la Electroestática y los Circuitos eléctricos. Los estudiantes no comprenden las relaciones entre la Electroestática y los circuitos eléctricos.

C1.1.- Algunos incluso llegan a creer que el concepto de diferencia de potencial en Electroestática y en Circuitos de corriente estacionaria es diferente.

C2.- Relaciones entre los niveles de descripción macroscópico y microscópico. Los estudiantes tienen dificultades para relacionar/distinguir el nivel empírico (macroscópico) del nivel interpretativo (microscópico). Como consecuencia, los estudiantes no diferencian entre propiedades de las cargas y propiedades del campo y del circuito. Llegando a identificar el potencial y la diferencia de potencial como propiedad de las cargas.

C3.- Distinción entre fuerza electromotriz y diferencia de potencial. La mayor parte de los estudiantes tienen dificultades para distinguir entre fuerza electromotriz y diferencia de potencial.

C3.1.- La fuerza electromotriz es una propiedad característica. La mayor parte de los estudiantes no entienden la fuerza electromotriz como una propiedad característica de la pila.

C3.1.1- Los estudiantes no conciben la fuerza electromotriz como una acción no

Vamos a presentar a continuación los instrumentos experimentales que hemos diseñado para contrastar cada una de las consecuencias recogidas en las tablas

anteriores. Con la idea de facilitar su localización y relaciones, en la Tabla 4.1 se presenta un índice de los diseños empleados.

Tabla 4.1: Índice de los diseños empleados para la contrastación de la primera hipótesis

CONSECUENCIAS CONTRASTABLES	INSTRUMENTOS DE ANÁLISIS
<p>A. La presentación didáctica del modelo explicativo de corriente continua en un circuito sencillo que se realiza habitualmente, presenta visiones distorsionadas de cómo se construye y cómo se trabaja en la Ciencia: carencias epistemológicas reseñadas desde A1 hasta A3 (ver cuadro 4.1)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Libros de texto: Red de análisis de libros de texto: 70 en total (37 de nivel no universitario y 33 de nivel universitario) (Cuadro 4.4). ● Cuestionarios escrito y oral para analizar las propuestas e ideas del profesorado [Cuadro 4.6, Cuadros 4.8 (I y II), Cuadro 4.9, Cuadro 4.10, Cuadro 4.11]
<p>B. La enseñanza habitual acerca del concepto de fuerza electromotriz dentro de un modelo explicativo de corriente continua en circuitos simples, no tiene en consideración los resultados de la investigación didáctica en el aprendizaje de las Ciencias y, por consiguiente, presenta graves deficiencias de tipo didáctico: carencias didácticas desglosadas de B1 a B4 (ver cuadro 4.2)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Libros de texto: Red de análisis de libros de texto (Cuadro 4.5) ● Profesorado: Cuestionarios escrito y oral para analizar las propuestas e ideas del profesorado. (Cuadro 4.7 y Cuadros 4.8 a 4.11)
<p>C. Como consecuencia de lo anterior, los estudiantes presentarán concepciones alternativas y dificultades de aprendizaje, alguna de las cuales se asemejarán a aquellas que se presentaron en la construcción del concepto de fuerza electromotriz en el contexto explicativo de circuitos simples de corriente continua. Concepciones e ideas desglosadas de C1 a C5 (recogidas en el cuadro 4.3)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Estudiantes: <ul style="list-style-type: none"> ● Bachillerato: Cuestionario escrito (71 estudiantes) (Cuadros 4.8 a 4-11) ● Nivel universitario: 2º ciclo de carreras de Física e Ingeniería Industrial Cuestionarios escrito y oral. (55 estudiantes) (Cuadros 4.8 a 4-11)

4.3 Diseños centrados en un análisis crítico de la enseñanza habitual

Vamos a mostrar a continuación los diseños realizados para el análisis de la enseñanza habitual y que se adelantaron en la tabla 4.1; constan de dos partes. En la primera se examinan el contenido de los libros de texto, en relación con el tema que investigamos, desde perspectivas epistemológica y didáctica. Se han analizado 37 libros

de texto, para estudiantes entre 15 y 17 años, utilizados en los distintos cambios curriculares que han tenido lugar en los últimos veinticinco años aproximadamente y 33 de nivel universitario. En la segunda parte se han indagado tanto estrategias de enseñanza como cuestiones relativas a los aspectos didácticos, o las propias ideas acerca de la materia a enseñar en correlación con la noción de fuerza electromotriz por parte del profesorado. Nos vamos a centrar en primer lugar en lo que se refiere a los libros de texto.

4.3.1 Diseños para contrastar deficiencias relativas a la introducción del concepto de fuerza electromotriz, observadas en libros de texto

Que el recurso por excelencia entre el profesorado de todo el mundo es sin lugar a dudas el libro de texto (Weis 1993, Del Carmen y Jiménez 1997, Sánchez y Valcárcel 2000), así como el reconocimiento del papel que desempeñan en la enseñanza de la Naturaleza de la Ciencia (Porlán, Rivero y Martín 1997, McComas y otros 1998, Campanario 2003), hace necesario el análisis de los textos, lo que nos va a informar del lugar que ocupa en las explicaciones acerca del funcionamiento de los circuitos de corriente continua sencillos, el concepto de fuerza electromotriz (ver hipótesis derivadas A y B). La investigación de estos aspectos se realizará a través de sus consecuencias contrastables, desde A1 hasta A3 y desde B1 a B4, que se explicitaron en los cuadros 4.1. y 4.2.

Para contrastar las predicciones a las que se hace mención se han elaborado redes de análisis de textos, en concreto dos, junto con sus correspondientes protocolos de evaluación. Veamos el primero de ellos, el relacionado con las insuficiencias y lagunas epistemológicas en la presentación de los contenidos.

Cuadro 4.4 Red de Análisis (I) de libros de texto

CARENCIAS EPISTEMOLÓGICAS EN LA PRESENTACIÓN DE LOS CONTENIDOS.

1. ¿Se justifica de algún modo por qué magnitudes como el potencial o la diferencia de potencial, definidas para configuraciones de cargas en reposo, se emplean en el estudio de los circuitos, configuraciones en las que las cargas se mueven?
2. En el capítulo correspondiente al potencial ¿Se explicita el ámbito de aplicación del concepto, indicándose claramente sus limitaciones así como la problemática que dio lugar a su definición?
3. ¿Se presenta alguna situación problemática que justifique introducir el concepto de fuerza electromotriz?
4. ¿Se justifica de algún modo por qué se emplean el término fuerza electromotriz y la letra ε en circuitos de corrientes estacionarias y en circuitos de corrientes variables?
5. ¿Se explican las semejanzas y diferencias entre los conceptos de fuerza electromotriz y diferencia de potencial?
6. ¿Se relaciona la noción de fem con algún concepto introducido en temas anteriores al de circuitos eléctricos?

PROTOCOLO PARA LA VALORACIÓN DE LOS ÍTEMS 1-6 DE LA RED DE ANÁLISIS (I):

Ítem 1. Es bien sabido que el tema de Potencial eléctrico en los libros de texto posee una carga importante de supuestos teóricos. Normalmente, las explicaciones se realizan en el ámbito de cargas puntuales estáticas para posteriormente utilizar el concepto de diferencia de potencial en circuitos de corriente continua. Sin embargo, como indica Psillos (1998) para los estudiantes no es nada obvio el esquema común de las explicaciones entre la atracción/repulsión de los cuerpos electrificados y el que una bombilla luzca.

Los aspectos relacionados con las medidas experimentales de la d.d.p. se tratan en capítulos siguientes, al estudiar los circuitos eléctricos. Claro que, en estos dispositivos las cargas no están en reposo sino en movimiento, por lo que surge una pregunta obvia: ¿La diferencia de potencial que se estudia y se mide entre dos puntos de un conductor por el que pasa una corriente, es la misma diferencia de potencial que se

estudia en el capítulo anterior dedicado al potencial, en el que las cargas permanecían en reposo?

De acuerdo con lo comentado la cuestión que surge es: ¿Hay en los textos preguntas o declaraciones al respecto que argumenten, de algún modo, la utilización del concepto de diferencia de potencial en el contexto electrostático y electrocinético?

Las razones de por qué el concepto de potencial que se emplea para evaluar interacciones entre configuraciones electrostáticas de carga y situaciones en las que las cargas se mueven en régimen estacionario, pertenecen al ámbito del consenso epistemológico. Estas razones no son diferentes de las que rigen la construcción de la Ciencia, a menudo conformada por valores y supuestos no escritos en los que, con frecuencia, son problemáticas las relaciones entre teoría y experimentos. En este sentido las razones que llevaron a Kirchhoff a identificar la fuerza electrostática de Ohm con la diferencia de potencial electrostático tienen su base experimental en los trabajos de Kohlrausch. Desde el punto de vista teórico-matemático Kirchhoff obtuvo a partir de los trabajos de Ohm la expresión cuantitativa del concepto de Energía mediante las funciones de Potencial de Laplace. En relación con esto, la valoración del ítem será positiva cuando aparezcan en el libro de texto experiencias, analogías, metáforas, conceptos o estructuras conceptuales con la intención expresa, de establecer las relaciones pertinentes entre los ámbitos electrostáticos y electrocinéticos. Si la valoración es negativa se clasificará el texto entre los que subyace una visión apromblemática de la ciencia.

Ítem 2. Se valorará positivamente que en los libros de texto se hagan explícitos el ámbito de aplicación de los conceptos junto a las limitaciones en el uso de los mismos. Una valoración positiva significaría que en el texto en cuestión se hacen explícitos tanto el ámbito de las aplicaciones como suficientes situaciones en las que no es aplicable el concepto junto con las justificaciones oportunas, por ejemplo la noción de diferencia de potencial no se puede utilizar cuando en las experiencias eléctricas intervienen fuerzas no coulombianas.

En relación con la problemática que dio lugar a su definición señalar que la ley de Coulomb no permite cuantificar el valor de las interacciones entre cuerpos cargados no puntuales. Para resolver el problema de calcular el valor de las interacciones

eléctricas entre cuerpos electrizados de tamaño y formas cualesquiera, el propio Laplace, que lo había empleado con éxito en el caso de las interacciones gravitatorias, contribuye a introducirlo para el caso de la electricidad estática.

Ítem 3. El concepto de fuerza electromotriz se presenta en los textos en el capítulo en el que se estudian los circuitos eléctricos y la corriente eléctrica. Para mantener una corriente eléctrica estacionaria en un circuito es necesario que la diferencia de potencial entre los extremos del mismo permanezca constante. ¿Cómo se puede mantener una diferencia de potencial constante entre dos puntos, entre los que se está produciendo una transformación y una degradación de la energía?

Se evaluará la diversidad de las situaciones problemáticas que se presenten. La información y comentarios que justifiquen la necesidad de estudiar el concepto. Este ítem es convergente con el anterior. Si la valoración es negativa indicaría que se procede de manera arbitraria en la introducción de los conceptos.

Ítem 4. Llama la atención el hecho de que en dos capítulos bien diferenciados fenomenológicamente se emplee el mismo término fuerza electromotriz, e incluso la misma letra \mathcal{E} , para describir una propiedad característica de la pila y la velocidad con la que varía el flujo magnético. Las fuerzas no electrostáticas que actúan para producir la separación de cargas en un generador pueden tener un origen muy diverso. En una pila seca o en una batería de acumuladores son de origen químico; en un generador electromagnético se deben a las fuerzas sobre cargas en movimiento en el seno de un campo magnético; la diferencia de temperatura entre dos soldaduras de dos conductores da lugar a fuerzas no electrostáticas en el circuito de un par termoeléctrico; las cargas sobre la correa móvil de un generador de Van der Graaf son impulsadas en sentido opuesto al de la fuerza electrostática por la fuerza mecánica ejercida sobre ellas por la correa.

En el caso de un generador electromagnético, en el que un conductor se mueve en el seno de un campo magnético se suele hablar de **fuerza electromotriz debida al movimiento**. Y el campo no electrostático que en esta situación hay que considerar es

un ejemplo de campo **no electrostático o no culombiano** a los que nos hemos venido refiriendo.

Los campos eléctricos inducidos involucrados en el proceso de inducción no están relacionados con cargas, sino con un flujo magnético variable. Aun cuando ambas clases de campos eléctricos ejercen fuerzas sobre las cargas, hay una diferencia entre ellos. La manifestación más simple de esa diferencia es que las líneas de campo eléctrico relacionadas con un flujo magnético variable pueden formar curvas cerradas; las líneas de campo eléctrico relacionadas con cargas no pueden formar curvas así, siempre se tienen que dibujar saliendo de una carga positiva y terminando en una negativa.

Será necesario analizar si los libros de texto argumentan, de forma explícita, la aparente contradicción al denominar de la misma forma a dos magnitudes que evalúan energía por unidad de carga en situaciones que, macroscópicamente, parecen tener poco en común. Sin embargo en un circuito hay un proceso de transferencia y transformación de energía. Dicha energía es transferida por un dispositivo (generalmente denominado fuente) que de algún modo la cede al circuito donde se transforma. La fuerza electromotriz cuantifica la energía transferida a la unidad de carga desde la fuente, por esta razón siempre que de una u otra forma esté involucrado un proceso de transferencia de energía desde una “fuente” al circuito se habla de fuerza electromotriz. El campo eléctrico en la “fuente” no es culombiano, lo que es otra característica común a las situaciones en las que se habla de fuerza electromotriz.

El lenguaje que se emplea en los textos para describir estos cambios y transformaciones, se podría decir que tiene una inercia, de manera que la descripción suele hacerse sin recurrir al concepto de energía, en una forma que se parece más a la que se empleaba cuando éste concepto no formaba parte del bagaje descriptivo de los fenómenos en los que se hallaba involucrado, lo que da lugar a problemas de aprendizaje. Una valoración negativa apoyaría la idea de arbitrariedad en la introducción de los conceptos. Y el escaso reconocimiento de los cambios ontológicos al pasar de modelos newtonianos a modelos energéticos

Ítem 5. Esta cuestión puede incluirse entre las epistemológicas o entre las didácticas. La epistemología y la didáctica son disciplinas complementarias como señalan algunos autores (Moreno et al. 1998; Millar et al. 2000). En el caso de los conceptos de fuerza electromotriz y diferencia de potencial esta complementariedad es palmaria. Nuestra respuesta a las preguntas siguientes nos ha llevado a incluirla entre las cuestiones epistemológicas. ¿Cómo enseñar bien los conceptos de fuerza electromotriz y diferencia de potencial sin justificar adecuadamente cómo se produce el conocimiento de ambos conceptos? ¿Cómo evitar las visiones deformadas de la Ciencia transmitidas por la enseñanza?

Normalmente se aborda el estudio del concepto de fuerza electromotriz en el capítulo acerca de los circuitos eléctricos, posterior a capítulos en los que se ha abordado el concepto de campo eléctrico. Una de las dificultades del concepto de fuerza electromotriz es distinguirlo convenientemente del concepto de diferencia de potencial electrostático, ya que ambas magnitudes se miden en voltios y permiten cuantificar energía de la unidad de carga. El problema de la diferenciación se hace mucho más asequible con el concurso del Principio de Conservación de la Energía y el concepto de campo eléctrico. En este sentido, señalar que el concepto de fuerza electromotriz opera en el ámbito de los campos no conservativos, mientras que el de potencial electrostático tiene su ámbito de aplicación exclusivamente cuando medimos diferencias de energía de la unidad de carga en configuraciones en las que las cargas permanecen en reposo o constituyen corrientes estacionarias, situaciones ambas que se relacionan con campos eléctricos conservativos. No se trata sólo de sistemas conservativos o no conservativos, sino la distinción entre sistemas en los que la configuración de los mismos es muy diferente, la distinción y las relaciones entre ambos deben establecerse con claridad. Recurrir al concepto de campo para distinguir entre sistemas también añadirá un “plus” de utilidad a dicho concepto, lo que contribuirá de paso a su mejor aprehensión por parte de los estudiantes. En conclusión se valorará positivamente si el texto incluye proposiciones o explicaciones que distingan entre el tipo de fuerzas que actúan sobre las cargas en el interior de la pila y en los cables conductores. Del mismo modo se valorará de manera positiva las proposiciones o explicaciones acerca de los cambios ontológicos necesarios para valorar la diferencia entre el trabajo o los intercambios de energía que tienen lugar en el interior de la pila y los conductores externos, entre los campos eléctricos en el interior de la pila y fuera de la misma, etc.

Ítem 6. Se valorará positivamente si se relaciona el concepto con otros estudiados en capítulos anteriores, ya sea mediante explicaciones y proposiciones que favorezcan en el lector establecer las oportunas relaciones conceptuales y epistemológicas. De lo dicho hasta ahora, el concepto de fuerza electromotriz está vinculado con fuerzas de naturaleza no conservativa (por ejemplo fuerzas de rozamiento); con trabajos no conservativos, en los que la energía intercambiada va a depender de la trayectoria; estará relacionado con la conservación de la energía. Está relacionado con el de diferencia de potencial, con el de campo, etc. Una valoración negativa del ítem anterior significaría que el texto ofrece una información en la que los conceptos se presentan de forma inconexa, compartimentalizada, lo que contribuye a que se adquiriera una idea excesivamente analítica del trabajo científico.

Los resultados del análisis se clasificarán en tres categorías:

Si (S): Hay referencias suficientes al contenido de la cuestión.

NO (N): No se contempla el contenido de la cuestión con el detalle suficiente.

MENCIONA (M): Se hace alguna reseña al contenido de la cuestión, pero se encuentra insuficientemente detallada o no suficientemente justificada.

Presentamos a continuación la segunda red de análisis para libros de texto, centrada más en las carencias de tipo didáctico.

Cuadro 4.5 Red de Análisis (II) de libros de texto

CARENCIAS DIDÁCTICAS EN LA PRESENTACIÓN Y ORGANIZACIÓN DE LOS CONTENIDOS

- 1) ¿Hay alguna proposición que tenga en cuenta los conocimientos previos y/o errores conceptuales de los estudiantes sobre los conceptos de potencial, diferencia de potencial y fuerza electromotriz?
- 2) ¿Se favorece la presentación del tema como una estrategia para resolver los problemas que plantea el análisis del movimiento de cargas? Para un contexto de circuitos sencillos de corriente continua
 - 2.1) ¿se intenta de algún modo, hacer conscientes a los estudiantes de la necesidad de emplear los conceptos de potencial eléctrico, diferencia de potencial y fuerza electromotriz?
- 3) ¿Se presta atención al análisis cualitativo de las situaciones planteadas antes de introducir las definiciones operativas? ¿Se favorece que los estudiantes adquieran significados de las magnitudes introducidas? En concreto:
 - 3.1) ¿Se incluyen actividades o comentarios explícitos que promuevan la diferenciación entre la fuerza electromotriz y diferencia de potencial de una pila?
 - 3.2) ¿Se presentan comentarios explícitos o actividades que hagan reflexionar a los estudiantes sobre que la fuerza electromotriz es una propiedad característica de la pila?
 - 3.3) ¿Se incluyen actividades o comentarios explícitos que ayuden a los estudiantes a diferenciar el ámbito de aplicación de las ecuaciones $V = I \cdot R$ y $\varepsilon = I \cdot R$?
- 4) ¿Se favorece la adquisición de conocimiento observacional y empírico de las magnitudes diferencia de potencial y fuerza electromotriz en circuitos sencillos de corriente continua? En concreto:
 - 4.1) ¿Se proponen actividades que favorezcan el diseño de experiencias en circuitos de corriente continua relacionadas con las medidas de fuerza electromotriz y diferencia de potencial?
 - 4.2) ¿Se presentan actividades o tablas de datos donde los estudiantes tengan que interpretar los conceptos de fuerza electromotriz y diferencia de potencial?
 - 4.3) ¿Se presentan comentarios explícitos o actividades que ayuden a los estudiantes a diferenciar el nivel empírico (macroscópico) del nivel interpretativo (modelos) al utilizar los conceptos de fuerza electromotriz, diferencia de potencial y campo eléctrico?
- 5) ¿Hay algún comentario o reflexión sobre las ventajas y consecuencias técnicas y sociales del empleo generalizado de las pilas?

PROTOCOLO PARA LA VALORACIÓN DE LOS ÍTENS 1-5 DE LA RED DE ANÁLISIS (II):

Ítem 1. Los conocimientos previos y/o errores conceptuales acerca de las nociones de potencial, diferencia de potencial y fuerza electromotriz, se han venido estudiando desde hace más de dos décadas (Page 1977; Varney et al. 1980; Cohen et al

1983; Härtel, 1985; Psillos et al 1988; Archibald. 1988; Pfundt y Duit 1997, Furió y Guisasola 1999) por lo que su carencia en los libros y materiales para alumnos permitiría afirmar que no se han tenido en cuenta los resultados de la investigación didáctica que, en el caso que nos ocupa, ha venido señalando que tanto profesores como alumnos mantienen deficiencias y errores en sus concepciones acerca de estos conceptos. Por el contrario se valoraría positivamente la inclusión en los libros de texto de actividades o declaraciones que tuviesen en cuenta las preconcepciones o dificultades de aprendizaje detectadas en relación con el tema que nos ocupa.

Ítem 2. La interpretación de los procesos y/o cambios que tienen lugar en un circuito simple, por ejemplo aumentar la diferencia de potencial entre los extremos del circuito, en términos de los conceptos de campo, corriente de velocidades de cargas, etc, es un problema complejo incluso para los expertos (Eylon y Ganiel 1990). Problema que de manera general aparece cuando se trata de asociar los fenómenos macroscópicos que tienen lugar en los circuitos eléctricos con los procesos microscópicos y los modelos empleados en dichas explicaciones.

No se trata de hacer hincapié en los aspectos empíricos que históricamente dan lugar al establecimiento de las ideas que se estudian, y no porque carezcan de interés, si no porque es frecuente que de las enseñanzas científicas de la escuela se recuerden los hechos olvidando las razones, que es una de las causas que dificultan una comprensión que lleve a la aprehensión de los conceptos. Se trata de que hay que hacer reflexionar a los estudiantes sobre el papel que juegan las magnitudes que se emplean y por qué son esas magnitudes y no otras; en aras a mantener la necesaria coherencia de los conceptos y también para contribuir a la comprensión de su alcance y limitaciones.

Se valorarán positivamente la inclusión de actividades, declaraciones o información que faciliten la comprensión entre las descripciones macroscópicas y microscópicas de los fenómenos que se estudian. Del mismo modo se valorara positivamente la inclusión de actividades o información que contribuya a hacer conscientes a los estudiantes de la necesidad de emplear los conceptos que se estudian.

Ítem 3.

3.1) Con frecuencia sucede que en los libros de texto aparecen expresiones que, expresamente, identifican fuerza electromotriz y diferencia de potencial. Por ejemplo la segunda edición del Tipler, publicada en el año 1987 en España, dice: “Por tanto la diferencia de potencial entre los puntos c y d también es ϵ y la corriente...”. En lugar de subrayarse las diferencias entre ambas magnitudes, parece como si los autores se esmerasen en señalar supuestas identidades con la intención de aclarar sus significados, lo que viene a contribuir a la postre al aumento de la confusión. Por tanto se valorarán positivamente enunciados y actividades que indiquen la diferencia entre ambas magnitudes y/o pongan a los estudiantes ante situaciones en las que tengan que justificar sus diferencias.

3.2) A veces los conceptos no se aprenden bien porque no se conocen de ellos atributos que permitan identificarlos y diferenciarlos, sobre todo en determinadas etapas del aprendizaje. Especificar de forma explícita que la fuerza electromotriz de la pila es una propiedad característica de la misma, es poner de manifiesto una cualidad de la pila y un atributo de la fuerza electromotriz que, contribuirá a que los estudiantes no confundan esta magnitud con una propiedad de puntos del campo como es el potencial. Una valoración positiva de esta pregunta significaría que el texto explica o ilustra de algún modo que el valor de la fem es una propiedad característica de la pila y por qué esto es así.

3.3) En los libros de texto aparecen las ecuaciones $V_a - V_b = I \cdot R$ (expresión de la ley de Ohm) y $\epsilon = I \cdot R$ (la ecuación del circuito completo), si no se diferencian los conceptos de fem y diferencia de potencial, no se diferenciarán las situaciones físicas que representan ambas ecuaciones. Más aún cabe pensar que la utilización de ambas ecuaciones, sin la comprensión adecuada de lo que representa cada una, sirva por el contrario para afianzar la no diferenciación de ambas magnitudes, lo que a su vez limitará la comprensión del funcionamiento de los circuitos eléctricos. La ausencia de este tipo de actividades o aclaraciones equivale en la práctica a una introducción de los conceptos excesivamente operativa en la que no se tienen en cuenta procedimientos científicos básicos.

Por tanto se valorará positivamente la inclusión de actividades de aprendizaje a partir de las cuales, los estudiantes puedan distinguir entre la ley de Ohm y la ecuación del circuito.

Ítem 4.- Las magnitudes físicas permiten la cuantificación de las propiedades que se observan. La cuantificación por vía experimental de dos propiedades es una manera de distinguir las propiedades que se están empleando en la observación del sistema en cuestión. La medida de la fem de una pila es una operación clásica que nada tiene que ver con la medida de la d.d.p. entre los bornes de una pila. Este aspecto se considerará correctamente tratado si se menciona la forma en la que se mide la fem de una pila. Así como una justificación clara del procedimiento que se sigue. En el terreno de las interpretaciones deben quedar claras las razones, por que si bien la d.d.p. de la pila y la fem de la misma son magnitudes (conceptos) diferentes, sin embargo se miden ambas en la misma unidad. Y del mismo modo por qué se puede estimar el valor de la fem de la pila con la medida de la diferencia de potencial entre sus electrodos.

4.1 y 4.2) Por tanto se valorará positivamente la inclusión de actividades y el diseño de experiencias para calcular valores empíricos de fuerza electromotriz y diferencia de potencial.

4.3) Se valorará positivamente la presentación de comentarios explícitos o actividades que ayuden a los estudiantes a diferenciar el nivel empírico (macroscópico) del nivel interpretativo (modelos) al utilizar los conceptos de fem, diferencia de potencial y campo eléctrico

Ítem 5.- El empleo generalizado de las pilas es sólo parangonable con el del petróleo. Sin petróleo de la noche a la mañana la vida cotidiana sufriría un cambio brusco. Sin pilas de la noche a la mañana, desde la telefonía móvil al funcionamiento de aparatos de música y sistemas informáticos, pasando por cantidad de prótesis para enfermos y deficientes de todo tipo, todo quedaría verdaderamente colapsado. Y como en el caso del petróleo, las consecuencias medioambientales derivadas de un empleo generalizado, que origina millones de toneladas en residuos anualmente, se pasan por alto.

Algunos piensan que la inclusión de este tipo de actividades en un programa guía dependerá del nivel de los estudiantes para los que esté destinado dicho programa. Nosotros creemos que en buena medida estas ideas se deben a la inercia que tenemos en seguir los “viejos programas” de contenidos de la asignatura. En una situación de “emergencia planetaria” en lo referente a las relaciones ecológicas y medioambientales, es muy amplio el rango de niveles en los que hay que incluir actividades que hagan reflexionar al estudiante de ciencias sobre este tipo de implicaciones. Está claro que el tipo de problemas que pueden plantearse es diferente en función del nivel, pero separar el estudio del funcionamiento de las pilas de su empleo y las consecuencias del mismo equivale a mantener las puertas cerradas a un conocimiento muy amplio que se ha generado en los últimos años, para seguir dando cabida exclusivamente a los contenidos tradicionales, que recogen conocimientos de hace más de siglo y medio y que, en este caso si que a determinados niveles pueden carecer de interés.

Por tanto, la inclusión de alguna reflexión en la que se incluyan cuestiones relacionadas con los aspectos Ciencia-Técnica-Sociedad se valorará positivamente.

De nuevo esta vez los resultados del análisis se clasificaran en tres categorías:

Si (S): Hay referencias suficientes al contenido de la cuestión.

NO (N): No se contempla el contenido de la cuestión con el detalle suficiente.

MENCIONA (M): Se hace alguna reseña al contenido de la cuestión, pero se encuentra insuficientemente detallada o no suficientemente justificada.

4.3.2 Diseños para contrastar deficiencias relativas a la enseñanza del concepto de fuerza electromotriz, observadas en profesores

Profesorado y libros de texto constituyen los sustentos principales de la enseñanza habitual, de la que la transmisión de conocimientos ya elaborados es la característica principal. Por tanto, del mismo modo en que se han analizado los aspectos epistemológicos y didácticos en el caso de los libros de texto, se van a analizar ahora los mismos aspectos en el caso del profesorado. Los diseños tratan de poner de manifiesto las visiones erróneas en relación con la manera en que el profesorado construye y trabaja en relación con la Ciencia (hipótesis derivada A), extremo que se pone de

manifiesto, a través de las consecuencias contrastables A1 hasta A3 (Brickhouse 1990, Lederman 1999, Fernández 2000, Campanario 2002).

Analizaremos después si se toma en consideración, por parte de los profesionales de la enseñanza, los resultados de la investigación en relación con el aprendizaje de las Ciencias y a partir de aquí analizaremos si se observan deficiencias didácticas, con las consecuencias negativas que se derivarían de ello en el proceso de enseñanza-aprendizaje (hipótesis derivada B). El análisis se concreta en forma de consecuencias contrastables, que ya hemos descrito como B1 a B4.

Por último se han analizado las ideas que el profesorado tiene del concepto de fuerza electromotriz y sus relaciones con algunos de los conceptos fronterizos como la diferencia de potencial. Para lo cual se diseñaron los correspondientes cuestionarios en correspondencia con la hipótesis derivada C y sus consecuencias contrastables.

Para verificar las predicciones se elaboraron una serie de cuestionarios, con sus correspondientes protocolos de análisis, que tras el proceso de depuración que seguía a las sucesivas implementaciones se ha reducido a dos tipos diferentes de pruebas:

La primera de ellas consiste en dos cuestionarios escritos (uno para detectar las posibles carencias epistemológicas y el otro para mostrar las carencias didácticas). Se han pasado a varios profesores de las universidades de Granada y Málaga, seis en total. Todos ellos Doctores y profesores en ejercicio de Facultades de Ciencias y en la Escuela de Ingeniería Industrial de Málaga. Todos ellos con amplia experiencia docente en asignaturas en relación con la enseñanza del Electromagnetismo o la Electroquímica. A estos profesores se les pasaban los cuestionarios y luego se les entrevistaba en relación con los mismos. Las respuestas se grababan o se tomaba nota de las mismas. El mismo procedimiento se siguió con ocho profesores en ejercicio de niveles de Secundaria.

El segundo tipo de pruebas consistía en un cuestionario en el que se preguntaba al profesorado sobre aspectos estrictamente conceptuales en relación con el concepto de fuerza electromotriz. Los profesores anteriores también contestaron a este cuestionario, y en algunos casos fueron entrevistados acerca de sus respuestas y además se paso a licenciados en Física, Química e Ingeniería que cursaban el CAP tanto en Granada

como en Málaga, hasta un total de 124 futuros profesores y 15 profesores en ejercicio. En función de las contestaciones se invitó a unos y a otros a posteriores encuentros con la idea de entrevistarles y tener la oportunidad de profundizar en sus respuestas. Daremos cumplida cuenta de esto más adelante. Veamos a continuación el primero de los diseños para profesores.

Cuadro 4.6 Análisis de las posiciones epistemológicas del profesorado

CUESTIONARIO PARA ANALIZAR LAS POSIBLES DEFICIENCIAS EPISTEMOLÓGICAS RELATIVAS A LA INTRODUCCIÓN DE LOS CONTENIDOS.

- 1) ¿Crees que el estudio de la historia del desarrollo del concepto de fuerza electromotriz puede aportar algo a tus clases?
- 2) Si es así ¿la tienes en cuenta de forma explícita en tu programación?
- 3) ¿Haces alguna introducción para referirte a la problemática que se va a tratar a lo largo del capítulo?
- 4) ¿Qué importancia concedes a los conceptos de fuerza electromotriz y diferencia de potencial electrostático en este nivel?

PROTOCOLO PARA EL ANÁLISIS DE LAS RESPUESTAS DEL PROFESORADO

Cuestión nº 1. En una breve charla con el profesorado previa al comienzo de iniciar la serie de respuestas, se resaltaba que nos referimos sobre todo a una historia en la que se traten las dificultades, los problemas sobre los que se trabajaba, la evolución de las nociones y atributos del concepto, etc., por encima de datos biográficos o anecdóticos acerca de científicos. De forma que se valoraría positivamente una respuesta que confirmara que los profesores se había referido en algún momento a esta problemática, bien al principio del tema para establecer una primera contextualización en relación con al gestación de los conceptos e ideas de la Electricidad. O que se utilizara en otro momento para establecer determinados paralelismos en la construcción conceptual de la idea de fuerza electromotriz. En caso negativo el enfoque sería más en consonancia con una visión de la Ciencia acumulativa lineal de los contenidos conceptuales.

Cuestión n° 2. Se pedía al profesorado en cuestión que nos hiciera saber en qué momento de sus explicaciones tenía lugar el recurso a la historia desde el enfoque que habíamos aclarado. De esta forma se brinda a los estudiantes la posibilidad de adquirir una perspectiva más próxima a la Ciencia real, como una construcción fiable, y sujeta a revisión permanente y con poco en común con dogmatismos.

Cuestión n° 3 Se pide al profesorado que concrete el tipo de introducción que realiza para que los estudiantes conozcan la importancia de lo que se va a tratar. Se valorará de manera positiva si se mencionan problemas en relación con la cuantificación de las transformaciones energéticas que tienen en los procesos de producción de electricidad, y en concreto en el caso de los circuitos eléctricos con una pila. Las dificultades con que se enfrentará el alumnado, confusión entre los conceptos de diferencia de potencial y fuerza electromotriz, la relación entre el concepto de fuerza electromotriz y otros como los de fuerzas conservativas y no conservativas, etc.

Cuestión n° 4. No es frecuente que entre los criterios de que se dota el profesorado a la hora de abordar el estudio de un tema, se incluya de manera explícita lo que podríamos denominar la “potencia” explicativa de los conceptos implicados. En este sentido el concepto de fuerza electromotriz ha venido ocupando un lugar de escasa relevancia al ser, supuestamente, sustituido por el de diferencia de potencial. La jerarquía conceptual debería ser un criterio importante a la hora de decidir, por ejemplo, el tiempo que se debe dedicar a los conceptos que se estudian, en lugar de la cantidad de ejercicios numéricos que se pueden realizar a partir de las ecuaciones en las que el concepto se vea implicado. En este sentido el concepto de fuerza electromotriz es imprescindible para explicar por qué se establece una corriente en el circuito y el principio de conservación de la energía en el mismo. Por tanto, se valorará positivamente que en las explicaciones acerca del funcionamiento de un circuito el profesorado comparta la secuencia conceptual: Fuerza electromotriz \rightarrow diferencia de potencial \rightarrow intensidad de corriente. Es decir, la secuencia conceptual para exponer de forma coherente el funcionamiento de un circuito de corriente sencillo, no es cualesquiera. Ambos conceptos están implicados en la explicación energética del funcionamiento de un circuito, de forma que el Principio de Conservación de la Energía exige del concurso de ambos conceptos. En caso negativo, el profesorado trabajaría de

acuerdo con una visión acumulativa lineal de los contenidos conceptuales en relación con el tema que investigamos.

Cuadro 4.7 Análisis de las posiciones didácticas del profesorado.

CUESTIONARIO PARA ANALIZAR LAS POSIBLES DEFICIENCIAS DIDÁCTICAS RELATIVAS A LA INTRODUCCIÓN DE LOS CONTENIDOS

- 1) ¿Tienes en cuenta las dificultades y concepciones alternativas de los estudiantes en tu programación?
- 2) ¿Suelen aprender los alumnos los conceptos mencionados, fuerza electromotriz y diferencia de potencial?
- 3) En su caso ¿te aseguras de algún modo de que los alumnos distinguen tales conceptos?
 - 3.1) Si no fuera así ¿A qué crees que es debido el bajo aprendizaje de los estudiantes?
- 4) ¿Qué dificultades suelen plantearse?
- 5) ¿Cómo abor das la solución a tales dificultades?
- 6) ¿Puedes facilitarme exámenes de esta parte de la asignatura?
- 7) ¿Justificas de algún modo la utilización para el caso de circuitos eléctricos de magnitudes definidas para el caso de agrupaciones electrostáticas de carga, como es el caso de la diferencia de potencial?
- 8) ¿Por qué crees que no suele hacerse esta justificación en los libros de texto?
- 9) ¿Dedicas tiempo para explicar o realizas algún tipo de actividad para enseñar a los alumnos las diferencias entre los términos fuerza electromotriz, diferencia de potencial, voltaje y tensión?
- 10) ¿Propones a tus alumnos actividades y ejercicios para que entiendan las diferencias entre tales conceptos?

PROTOCOLO PARA EL ANÁLISIS DE LAS RESPUESTAS DEL PROFESORADO

Cuestión nº 1. Hoy se sabe que los conceptos implicados, potencial, campo, relaciones entre la Electrostática y circuitos, confusiones entre la ley de Ohm y la segunda ley de Kirchoff tienen dificultades en los procesos de captura conceptual. Se valora positivamente que el profesorado conozca y sea consciente de tales dificultades, a la hora de abordar la enseñanza de esta parte de la Electricidad. Del mismo modo se evaluará positivamente que el profesorado utilice alguna prueba o describa algún proceso, o cite documentación que le permita tener a su disposición un repertorio de las dificultades de los estudiantes, cuando se inician en el aprendizaje de esta parte de la materia. En este sentido se valorará de forma positiva la inclusión entre las tareas de clase, la realización de actividades que salgan al paso de las dificultades de los estudiantes en relación con los conceptos implicados en el estudio de los circuitos.

Por último señalar que, nos pareció a lo largo de la investigación que se podía distinguir, a la hora de valorar las respuestas a esta cuestión, entre el profesorado de Secundaria y el profesorado de niveles universitarios. Ya que si bien en los niveles de Secundaria podría aceptarse que los estudiantes posean unos recursos, que no difieran mucho de unos cursos a otros, en el caso de los niveles universitarios, nos parece que la evaluación inicial, mediante una prueba específica, acerca de la solvencia conceptual de los estudiantes en relación con estos conceptos es más necesaria, precisamente porque es de prever que tras varios cursos de aprendizaje de los conceptos la variedad de situaciones de aprendizaje requiera un conocimiento preciso.

Cuestión nº 2. El aprendizaje de los conceptos citados suele hacerse cuando al evaluar el tema o los temas de electricidad se proponen una serie de actividades en las que los estudiantes deben emplear una serie de ecuaciones en las que tales conceptos aparecen. Se valorará positivamente que el profesorado haya diseñado alguna estrategia mediante la cual asegurarse de que los estudiantes han aprendido dichos conceptos al terminar las explicaciones acerca de los mismos.

Cuestión nº 3. Normalmente libros de texto y profesores declaran en sus exposiciones que ambos conceptos son diferentes, pero es necesario asegurarse de que los estudiantes lo han aprendido así. Esta cuestión es convergente con la anterior y se valorarán positivamente la inclusión de actividades que permitan valorar la distinción que los estudiantes hacen de los conceptos, al margen una utilización exclusivamente operativista de los mismos.

Cuestión nº 3.1. Cuando los conceptos no se aprenden se deberían poner en marcha una serie de estrategias de reflexión que permitieran al profesorado identificar dificultades de aprendizaje, para de esta forma mejorar el aprendizaje en sucesivas ocasiones. Se valorará positivamente que el profesorado haya reflexionado sobre el tema que le hayan permitido explicar las dificultades en el aprendizaje y diferenciación de los conceptos de fuerza electromotriz y diferencia de potencial.

Cuestión nº 4. Seguimos acotando en relación con la evaluación que el profesorado realiza de aprendizaje de estos conceptos. Se valorara positivamente que el

profesorado maneje, a título al menos de conjeturas, las dificultades que suelen tener los estudiantes a la hora de aprender estas nociones.

Cuestión nº 5. Si el profesorado conoce las dificultades nos preguntamos si ha desarrollado alguna herramienta ya conceptual o procedimental para provocar soluciones siquiera parciales de las mismas. Se valorará positivamente que el profesorado nos proporcione o describa de forma explícita cómo se enfrenta al problema que representan tales dificultades.

Cuestión nº 6. Los exámenes utilizados son una herramienta de primer orden para el proceso de análisis que nos va a permitir valorar la propia evaluación, cuando como ahora nos estamos tratando de averiguar cómo ha sido la evaluación de los conceptos que estamos estudiando. Se valorará positivamente que el profesorado facilite exámenes y pruebas de las suele utilizar para evaluar a sus estudiantes.

Cuestión nº 7. Ya nos hemos referido en los capítulos 1 y 2 a las dificultades que se derivan de una presentación inconexa de la Electroestática y el estudio de los Circuitos eléctricos. Se valorará positivamente que el profesorado utilice actividades o información para presentar a los estudiantes la conexión existente entre la Electroestática y la teoría de circuitos eléctricos, y que vaya más allá de la utilización de las magnitudes que se introdujeron en aquella parte de la materia.

Cuestión nº 8. Esta es una ausencia notable en los libros de texto, la conexión entre la Electroestática y el estudio de los circuitos de corriente. ¿Es consciente de ello el profesorado? ¿Cómo lo justifica? Se valorará positivamente que el profesorado haya elaborado algún tipo de respuesta a estas preguntas o aborde de alguna manera esta conexión entre ambas partes de la materia. En caso contrario se pone de manifiesto un empleo del libro de texto de forma acrítica que favorece una presentación poco clarificadora de la materia.

Cuestión nº 9. Venimos refiriéndonos en los capítulos 1 y 2 a las dificultades que se derivan del empleo, como si de sinónimos se tratara, de los términos fuerza electromotriz, diferencia de potencial y voltaje. Se valorará positivamente que el

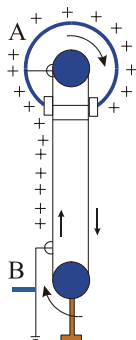
profesorado aborde de forma explícita la distinción de los términos, ya sea mediante actividades o declaraciones explícitas.

Cuestión nº 10. Se valorará positivamente el empleo de actividades mediante las cuales se clarifiquen las diferencias entre los conceptos fuerza electromotriz y diferencia de potencial. De no ser así se valorará como una deficiencia didáctica en la presentación de los conceptos implicados.

Cuadro 4.8 (I) Análisis de las ideas del profesorado acerca del concepto de fuerza electromotriz y sus relaciones con la diferencia de potencial

CUESTIONARIO PARA CONTRASTAR EL APRENDIZAJE ACERCA DE LAS DIFERENCIAS ENTRE FUERZA ELECTROMOTRIZ Y DIFERENCIA DE POTENCIAL

Ítem nº 1. Razona si son correctas o no las siguientes afirmaciones, respecto al generador electrostático de la figura:



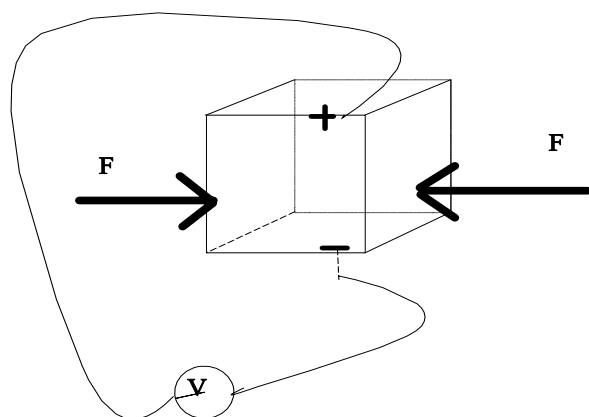
En este generador la fricción de una cinta de material aislante en movimiento da lugar a que se pongan de manifiesto las cargas, que es posible separarlas en la esfera y la parte señalada como B en el dibujo.

- a) Entre los puntos de A y B del generador se crea una diferencia de potencial.
- b) Si unimos dos puntos de A y B mediante un conductor externo, podríamos tener una corriente.
- c) En un generador de Van der Graaf no hay fuerza electromotriz y por tanto no se podrá generar una corriente.

Cuadro 4.8 (II) Análisis de las ideas del profesorado acerca del concepto de fuerza electromotriz y sus relaciones con la diferencia de potencial

Ítem nº 2. Cuando sobre un cristal de cuarzo se ejercen fuerzas como se representa en la figura, en las otras caras se produce una redistribución de los iones que da lugar a una diferencia de potencial. En base a lo anterior, los mecheros de cocina producen chispas eléctricas para iniciar la combustión del gas.

Para la situación descrita **comenta si son correctas o no** las siguientes afirmaciones:



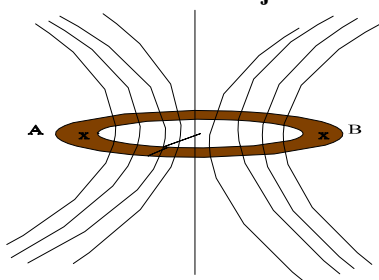
- a) A estos fenómenos no es aplicable el concepto de fuerza electromotriz, ya que no existe generador de corriente.
- b) En este caso la fuerza electromotriz está relacionada con la energía mecánica transferida a las caras del cristal de cuarzo.
- c) En este caso no se puede distinguir entre fem y d.d.p. electrostático ya que el voltímetro mide una cantidad de voltios, que pueden ser de una u otra magnitud.
- d) En este caso la f.e.m. está generada por la d.d.p. electrostático entre las caras opuestas del cristal de cuarzo.

Ítem nº 3. Si la misma pila se conecta a distintos circuitos, permanece constante:

- a) La diferencia de potencial entre sus bornes.
- b) La fuerza electromotriz de la pila.
- c) La intensidad de la corriente que pasa por la pila.
- d) Ninguna de las anteriores.

Justifica tu elección

Ítem nº 4. La figura representa un anillo de un material conductor en el seno de un campo magnético variable. En relación a esta situación **justifica si son correctas o no** las siguientes frases:



- a) Hay fem responsable de una corriente en el anillo, pero no produce una diferencia de potencial electrostático entre dos puntos, como A y B de éste.
- b) No existe una diferencia de potencial electrostático y por tanto no puede haber corriente en el anillo.
- c) Si hay fem debe haber una diferencia de potencial electrostático asociada a la misma que dará lugar a una corriente eléctrica.
- d) Un voltímetro convenientemente situado entre A y B no indicaría nada, un amperímetro intercalado en A indicaría paso de corriente.

Ítem nº 5. Señala, si las hubiera, las diferencias entre Fuerza electromotriz y diferencia de potencial.

PROTOCOLO PARA EL ANÁLISIS DE LAS RESPUESTAS EN RELACIÓN CON LAS DIFERENCIAS ENTRE FUERZA ELECTROMOTRIZ Y DIFERENCIA DE POTENCIAL

Una de las dificultades en el aprendizaje del concepto de fuerza electromotriz es su diferenciación con el concepto de diferencia de potencial. Crear una diferencia de potencial en dos cuerpos puede conseguirse cargando de forma diferente dos cuerpos y para evitar otros problemas, cargarlos con carga diferente, ya que es frecuente la confusión entre diferencias de potencial y diferencias en la densidad de carga. La energía necesaria para separar las cargas se cuantifica mediante la fuerza electromotriz; una vez separadas las cargas tenemos dos cuerpos o dos puntos a diferente potencial. Si dos cuerpos a diferente potencial se ponen en contacto mediante un hilo conductor, tendremos una corriente eléctrica. La secuencia podría resumirse en Fuerza electromotriz → Diferencia de potencial → Intensidad de corriente.

El primero de los ítems de esta serie es convergente con otros que permiten valorar el nivel de relaciones entre la Electrostática y la teoría de circuitos. Un generador de Van der Graaf es una máquina electrostática, de forma que relacionarla correctamente con la corriente eléctrica es, al menos a priori, un indicador de un buen aprendizaje. Del mismo modo, relacionar la separación de cargas (que da lugar a una diferencia de potencial) con el concepto de fuerza electromotriz, también en un montaje experimental poco habitual, apuntaría hacia un conocimiento/diferenciación adecuada de los conceptos.

De forma que los objetivos de este primer ítem pueden sintetizarse: 1) comprobar si los encuestados conocen el ámbito de aplicación del concepto de diferencia de potencial electrostático y en este sentido si asocian intensidad de corriente a diferencia de potencial o a fuerza electromotriz correctamente, en una situación experimental poco familiar, que no facilite respuestas más o menos mecánicas. 2) indagar si los encuestados relacionan correctamente las magnitudes de la electrostática que se emplean en la interpretación de circuitos eléctricos simples, también en una situación experimental poco familiar. Y aun esperábamos que fuera posible extraer alguna conclusión acerca de si los encuestados consideran la fuerza electromotriz como una magnitud característica de los generadores.

Ítem nº 1. En relación con el enunciado a): La afirmación es correcta porque: Entre los puntos A y B hay una diferencia de potencial ya que: 1) la carga eléctrica de ambos puntos es diferente, para lo que se ha tenido que invertir cierta cantidad de energía, que a nivel macroscópico diremos que estará almacenada en la esfera como energía eléctrica y a nivel microscópico diremos que las cargas eléctricas situadas en estos puntos van aumentando su energía potencial eléctrica. Esto significa que, 2) una carga (positiva o negativa) al pasar de uno a otro de los puntos de A y B cambia su energía potencial eléctrica y lo hará en un sentido de forma espontánea y en otro con un aporte de energía desde el exterior.

En relación con el enunciado b): Como consecuencia de la definición de diferencia de potencial, cuando dos puntos a diferente potencial, como los A y B del generador, se unen mediante un conductor las cargas eléctricas se moverán hacia los puntos en los que su energía potencial sea menor. Moverse en un sentido u otro dependerá de lo que denominamos signo de la carga.

En relación con c): 1) La noción de fuerza electromotriz está relacionada con la energía necesaria para separar cargas y mantenerlas separadas en dos puntos del espacio o dos sistemas y en este caso tiene lugar una separación de cargas que exige la puesta en juego de una cantidad de energía para conseguir dicha separación, en este sentido la afirmación no es correcta. 2) una vez que se tiene una separación de cargas tendremos dos puntos o dos sistemas a diferente potencial de forma que al unirlos con un cable conductor tendremos una corriente.

No se aceptarán como válidas respuestas que afirmen/nieguen la corrección/incorrección de los enunciados, pero los justifiquen con los términos del propio enunciado o versiones del mismo.

Ítem nº 2. Queremos analizar si se diferencia entre la acción de separar cargas y la diferencia de potencial. Esta es un ítem convergente con el anterior en este aspecto. En la situación que se presenta en esta cuestión no hay corriente eléctrica entre dos puntos. Sólo hay separación de cargas como consecuencia de una acción sobre las caras del cuarzo que da lugar a una separación de cargas. Evidentemente se ha puesto una cantidad de energía en juego para esta reordenación de las cargas y justamente la

energía puesta en juego por unidad de carga, nos permitiría cuantificar la fuerza electromotriz para esta situación. Es frecuente que la fuerza electromotriz cuantifique energía no eléctrica, puesta en juego para separar cargas y dar lugar a una diferencia de potencial o energía no eléctrica que producirá variaciones de un campo magnético.

No es una situación nada familiar y la justificación de las opciones sólo puede hacerse desde el conocimiento del concepto de fuerza electromotriz y su relación con la diferencia de potencial electrostático. No es previsible en este caso, como en el del generador de Van der Graaf, que la potencial existencia de corriente de alguna manera proporcione pistas falsas que den lugar a errores en sus respuestas.

Se considerarán correctas aquellas respuestas que relacionen la fem con la separación de cargas y la diferencia de potencial como una consecuencia de dicha separación. De forma que las respuestas se consideraran correctas si hacen referencia explícita a la agrupación de cargas de distintos signos y a la energía puesta en juego en el proceso. En concreto:

Enunciado a): Se valorarán positivamente aquellas que relacionen el concepto de fuerza electromotriz con la energía puesta en juego en acciones no electrostáticas sobre las cargas que puedan originar separación de las mismas, como es el caso. Y no exclusivamente con corrientes o generadores.

Enunciado b): Se consideraran aceptables aquellas respuestas que señalen la necesidad de poner en juego una cantidad de energía para que la separación de cargas se produzca. Esta energía no tiene que ser necesariamente de naturaleza eléctrica, como es el caso que nos ocupa. La fuerza electromotriz en este caso da cuenta de la energía puesta en juego para separar una unidad de carga

Enunciado c): Se considerarán respuestas aceptables aquellas que explícitamente hagan referencia a que dos magnitudes no son iguales porque se expresen sus medidas en la misma unidad y se ilustre tal referencia con algún ejemplo. También aquellas que señalaran que la Fuerza electromotriz no se puede medir con un voltímetro, con un voltímetro se pueden medir diferencias de potencial y lo justificaran indicando por

ejemplo que con un voltímetro, en el mejor de los casos, podemos estimar el valor de la fuerza electromotriz para una configuración determinada.

Enunciado d): Se consideraran aceptables las respuestas que señalen, en la relación entre fuerza electromotriz y diferencia de potencial, a la primera como causa de la segunda al producirse una separación de cargas. La situación contraria o una relación ambigua entre ambas no se aceptarán como válidas.

Ítem nº 3. Mediante éste ítem se pretende indagar si la noción de fuerza electromotriz, para el caso de una pila, era para los encuestados una propiedad de los generadores de energía eléctrica y no es una propiedad ni del circuito ni de las cargas. Es decir, la fuerza electromotriz de una pila no depende de la configuración del circuito al que se conecta, sino que es una propiedad que depende de los materiales de los que está construida. Nos permitirá tener más datos acerca de si los encuestados distinguen entre fuerza electromotriz de una pila y diferencia de potencial entre sus electrodos. Y a partir de lo anterior, obtener más datos acerca de si los encuestados diferencian (y relacionan al mismo tiempo) el ámbito de aplicación de conceptos implicados en la interpretación del funcionamiento de una pila y de un circuito simple.

Se valorarán positivamente aquellas respuestas que señalen la opción correcta la b) y la justifiquen indicando por qué ni la intensidad ni la diferencia de potencial entre los bornes permanecen constantes, o bien aquellos que justifiquen la elección explicando la fuerza electromotriz de una pila como una propiedad característica de la misma, como consecuencia derivada del material del que está constituida.

Ítem nº 4. Mediante éste ítem, analizaremos el ámbito de aplicación del concepto de diferencia de potencial. A partir de conocer si:

- 1) los encuestados asocian intensidad de corriente a diferencia de potencial o a fuerza electromotriz correctamente.
- 2) los encuestados asocian fuerza electromotriz y diferencia de potencial electrostático en situaciones en las que la interacción eléctrica no está relacionada con cargas.

- 3) Los encuestados relacionan diferencia de potencial electrostático con campos eléctricos debidos a inducción electromagnética, en los que la diferencia de potencial no está definida.

La diferencia de potencial es una magnitud asociada a la existencia de un campo eléctrico conservativo. El contexto en el que se plantean las opciones en este ítem no está relacionado con campos conservativos, por tanto no existe diferencia de potencial, pero sí corriente eléctrica, que no será constante en cualquier instante.

La opción a es una afirmación correcta. El seno de un campo magnético variable no es un campo eléctrico electrostático, por tanto no está definida en aquel la diferencia de potencial electrostático. Por tanto se valorarán positivamente las justificaciones en este sentido.

La opción b es errónea. La corriente eléctrica no está asociada en exclusiva a la existencia de una diferencia de potencial electrostático. Más aun, cuando existen campos magnéticos la diferencia de potencial electrostática no está de finida y sí hay corriente eléctrica. De nuevo se considerarán respuestas positivas las que se pronuncien en este sentido.

La opción c) es incorrecta. En el caso de campos magnéticos variables la magnitud diferencia de potencial electrostático no está definida. El concepto de diferencia de potencial es válido únicamente en la situación estática en la que no existe ninguna fuente de energía que permita variar la energía de una carga en un circuito cerrado, lo que no es el caso. Es una opción convergente con las anteriores y las respuestas que se valoren positivamente deberán hacer explícitos argumentos en esta dirección.

En todos los casos la fuerza electromotriz es la característica de una fuente de energía y en todos los casos existe una relación entre ε del generador y la intensidad I del circuito, pero no entre ε y diferencia de potencial electrostático.

La opción d) es correcta. Puede comprobarse experimentalmente que la lectura del voltímetro dependerá de cómo esté intercalado. Lo que puede razonarse en la forma:

Si suponemos que la corriente se debe a una diferencia de potencial electrostático, al circular por el anillo, se desprenderá calor por efecto Joule. Calor que vendrá dada por la expresión: $\Delta Q = I^2 \cdot R \cdot \Delta t$; la cantidad de calor dependerá pues de de la longitud del hilo, lo que nos llevaría a que la diferencia de potencial electrostático dependería de la trayectoria, lo que por otra parte no puede ser, por definición de potencial electrostático.

Se valorarán positivamente justificaciones que utilicen una argumentación en línea con la expresada para cada una de las afirmaciones que hay que justificar.

Ítem nº 5. En el caso de circuitos eléctricos de corriente continua estacionaria, las diferencias entre la fuerza electromotriz y la diferencia de potencial esencialmente se recogen en la tabla siguiente:

Tabla 4.2 Diferencias entre fuerza electromotriz y diferencia de potencial

Fuerza electromotriz	Diferencia de potencial
Cuantifica transferencias de energía asociadas con campos eléctricos no conservativos .	Cuantifica transferencias de energía asociadas con campos eléctricos conservativos .
Es una propiedad característica de la pila. No cambia con la configuración del circuito. Depende sólo de los materiales de que está construida la pila.	La diferencia de potencial en un circuito depende de la configuración del mismo, incluso con la misma pila.
Se mide comparando el valor de la fem de la pila problema con el valor de la fem de una pila patrón.	Se mide con un voltímetro convenientemente conectado entre los dos puntos para los que se quiere calcular la d.d.p.

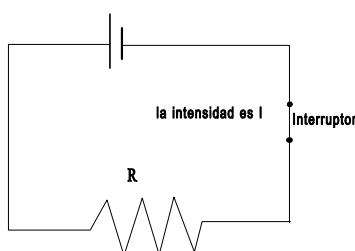
Se valorará positivamente que las diferencias entre ambas magnitudes se expliciten mediante líneas argumentales en consonancia con las expresadas en la tabla anterior. Sólo en el marco de los contrastes a los que se hace referencia en la **Tabla 4.2**, las diferencias en términos de: “La fuerza electromotriz es el valor de la diferencia de potencial en circuito abierto” se tendrán en consideración. Ya que la coincidencia o no en el valor de determinadas magnitudes no es lo que las hace semejantes o distintas. Por ejemplo el trabajo realizado sobre un cuerpo de un kilogramo, para ponerlo a 5 metros sobre el origen de potenciales, coincide con el valor de la energía potencial gravitatoria del cuerpo en cuestión en ese punto, pero inferir a partir de aquí semejanzas o diferencias entre las magnitudes trabajo y energía potencial no se aceptaría como correcto.

Cuadro 4.9 Análisis de las ideas del profesorado acerca de la diferencia entre la ecuación del circuito y la ley de Ohm

CUESTIONARIO PARA CONTRASTAR LAS IDEAS DEL PROFESORADO ACERCA DE LAS DIFERENCIAS ENTRE LA ECUACIÓN DEL CIRCUITO Y LA LEY DE OHM

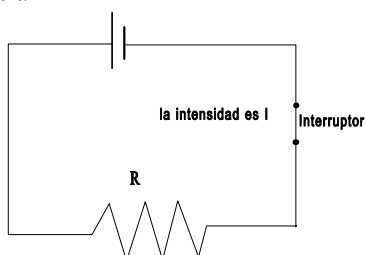
Ítem n° 1. Un circuito **cerrado**, como el de la figura, en el que se supone despreciable la resistencia interna de la pila, se describe mediante la ecuación:

- a) $V = IR$
- b) $\varepsilon = IR$
- c) Las dos anteriores
- d) Ninguna de las dos anteriores



Ítem n° 2. En relación con las explicaciones acerca del funcionamiento del sistema que denominamos circuito eléctrico, como el representado en la figura, **razona acerca de la corrección o no de las afirmaciones siguientes:**

- a) La ley de Ohm representa y permite cuantificar el Principio de Conservación de la Energía en el circuito.
- b) El Principio de Conservación de la Energía en este sistema se cuantifica mediante los conceptos de fuerza electromotriz y diferencia de potencial



PROTOCOLO PARA EL ANÁLISIS DE LAS RESPUESTAS EN RELACIÓN CON LAS DIFERENCIAS ENTRE LA LEY DE OHM Y LA ECUACIÓN DEL CIRCUITO

La ley de Ohm se emplea como equivalente a la ley de las mallas de Kirchhoff, que es una relación entre magnitudes mucho más general. La ecuación del circuito expresa el Principio de Conservación de la Energía en un circuito sencillo con pilas y resistencias. La ley de Ohm tiene una aplicación restringida a un tipo de conductores, los llamados óhmicos. Pero se da el caso de que una buena parte de los libros de texto hablan de ley de Ohm generalizada para referirse a la cuantificación de la energía puesta en juego en el circuito, con lo que los errores anteriores de algún modo se subrayan.

Con los ítems anteriores se pretende analizar la diferenciación que hace el profesorado acerca de las implicaciones a las que se refieren ambas ecuaciones.

Ítem nº 1. En algún momento en el estudio de la Electroestática se explica que a lo largo de una trayectoria cerrada la diferencia de potencial es cero, por tratarse de un campo eléctrico conservativo. Este argumento se plasma en ecuaciones matemáticas que se utilizan, en los niveles universitarios reiteradamente.

Se valorarán positivamente aquellas respuestas que seleccionen $\mathcal{E} = \mathbf{IR}$, y lo justifiquen señalando que para un circuito cerrado la ecuación $\mathbf{V} = \mathbf{IR}$ es cero, es decir, el cambio de potencial electrostático en cualquier trayectoria cerrada es cero. Por tanto la ecuación que relaciona la pila (la energía que esta suministra a la unidad de carga) con la que se transforma en el resto del circuito no puede ser otra que la ecuación 2). También aquellas respuestas que señalen el carácter limitado de la validez de la ley de Ohm para el caso de conductores óhmicos y la pila no lo es.

Ítem nº 2 Se valorará positivamente que el profesorado señale en relación con la opción a) que es falsa; la ley de Ohm no expresa el principio de conservación de la energía, sino la relación entre la intensidad y la diferencia de potencial que se establece entre los extremos de un conductor determinado.

Del mismo modo que la opción b) es verdadera. La fuerza electromotriz cuantifica la cantidad de energía que la pila cede a la unidad de carga. La diferencia de potencial cuantifica la energía que la unidad de carga transforma en la parte del circuito externo a la pila.

Cuadro 4.10 Análisis de las ideas del profesorado acerca de la diferencia entre la las descripciones macroscópica y microscópica. Relaciones con la Electrostática.

CUESTIONARIO PARA CONTRASTAR EL APRENDIZAJE ACERCA DE LAS DESCRIPCIONES MACROSCÓPICA Y MICROSCÓPICA Y LAS RELACIONES ENTRE LA ELECTROSTÁTICA Y LOS CIRCUITOS ELÉCTRICOS.

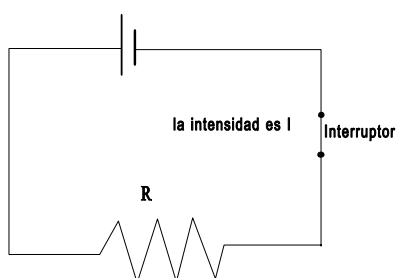
Ítem n° 1. Cuando una carga eléctrica se desplaza entre los dos electrodos de una pila, varía:

- a) Su fuerza electromotriz.
- b) Su diferencia de potencial.
- c) Su potencial.
- d) Ninguna de las magnitudes anteriores.

Justifica tu elección.

Ítem n° 2 En relación con las explicaciones acerca del funcionamiento del sistema que denominamos circuito eléctrico, como el representado en la figura, **razona acerca de la corrección o no de las afirmaciones siguientes:**

- a) A nivel microscópico la noción de **fuerza electromotriz** está relacionada con las explicaciones acerca del movimiento de las cargas en el interior de la pila.
- b) A nivel microscópico el concepto de **diferencia de potencial** está relacionada con las explicaciones acerca del movimiento de las cargas en la parte del circuito exterior a la pila.



Ítem n° 3. El concepto de Diferencia de potencial se introduce al estudiar las cargas en reposo (Electrostática). Dicho concepto se aplica cuando las cargas están en movimiento (Circuitos eléctricos) porque:

- a) Como se sabe, el movimiento de las cargas en los cables es insignificante debido a los choques de éstas con los restos positivos de la red metálica.
- b) Justifica la corriente que se establece entre dos puntos que, estando a diferente potencial, se conectan mediante un hilo conductor.
- c) El concepto de diferencia de potencial entre dos puntos explica la aparición de la fuerza electromotriz.
- d) No se trata del mismo concepto de diferencia de potencial en la Electrostática que en el caso de Circuitos eléctricos.

Justifica tu elección.

PROTOCOLO PARA EL ANÁLISIS DE LAS RESPUESTAS EN RELACIÓN CON LAS DESCRIPCIONES MACROSCÓPICA Y MICROSCÓPICA

Una de las dificultades en el estudio de los circuitos eléctricos, deriva de la poca comprensión/utilización de las explicaciones en términos microscópicos de los

circuitos. En el caso de la fuerza electromotriz estas dificultades se ven si cabe acentuadas por el hecho de que las fuerzas que realizan el trabajo para separar las cargas son fuerzas no conservativas. Sucede con frecuencia que no se distingue justamente entre propiedades de las cargas y propiedades del campo y circuitos.

Ítem nº 1. Se valorarán positivamente aquellas respuestas que escojan la opción d) señalando que: de una carga, en el seno de un campo, es su energía potencial la propiedad que variaría si se desplazara entre los electrodos de una pila. También sería válida la justificación que descartara una por una el resto de las propiedades, ya que la fuerza electromotriz es una propiedad de la pila y potencial y diferencia de potencial son propiedades del campo.

Ítem nº 2 Se valorarán positivamente justificaciones en línea con las que señalan a la fuerza electromotriz como el trabajo realizado para separar y mantener separadas las cargas en los electrodos de la pila. De forma que, como es sabido, la fuerza electromotriz cuantifica el trabajo realizado sobre cada unidad de carga. Al separarse las cargas y permanecer estas en reposo sobre los electrodos dan lugar a un campo electrostático en el que hay una diferencia de potencial.

En relación con el apartado b), y dado que la diferencia de potencial cuantifica la variación de energía de la unidad de carga entre dos puntos, será esta magnitud la que nos informe de los cambios energéticos (referidos a la unidad de carga) que tienen lugar entre los dos puntos unidos por el conductor, es decir, en la parte del circuito que no es la pila.

Ítem nº 3. Se valorarán positivamente aquellas justificaciones que indiquen de forma explícita como, al conectar dos puntos a diferente potencial, una carga se desplazará de forma que su energía potencial eléctrica disminuya, lo que se deriva de la propia definición de diferencia de potencial como diferencia de energía potencial eléctrica de la unidad de carga entre dos puntos.

En sentido estricto, el mismo concepto se emplea en los dos ámbitos porque a partir de la ecuación de continuidad, que expresa el principio de conservación de la carga en circuitos de corriente, y de la ley de Ohm, se puede obtener la ecuación de

Laplace $\nabla^2 V = 0$, en la que V representa el potencial, es decir, un problema de conducción en estado estacionario puede resolverse de la misma forma que los problemas electrostáticos.

No esperabamos que la mayoría de los profesores se refiriesen a esto, pero si que alguno hiciera alguna mención siquiera en forma más o menos tosca. No se valorarán positivamente aquellas respuestas cuya explicación se limite a una versión del propio enunciado que se quiere justificar.

Cuadro 4.11 Análisis de las ideas del profesorado acerca de la naturaleza y medida de la fuerza electromotriz

CUESTIONARIO PARA CONTRASTAR LAS IDEAS EN RELACIÓN CON LA NATURALEZA Y LA MEDIDA DE LA FUERZA ELECTROMOTRIZ

Ítem nº 1. En el estudio de los fenómenos eléctricos y magnéticos se consideran, en temas diferentes, la fem de una pila ξ ($\xi = V \cdot I$) y la fem de inducción ξ ($\xi = d\phi/dt$).

Razona acerca de la corrección de las siguientes afirmaciones:

- Se trata del mismo concepto en ambos casos, ya que en ambos tipos de fenómenos la fuerza electromotriz se mide siempre en voltios.
- Ambos conceptos tienen en común el que cuantifican energía que se transfiere en el seno de un campo eléctrico no conservativo.
- Las experiencias en las que ambos conceptos participan, reacciones químicas y movimiento relativo entre bobinas e imanes, no tienen nada en común.
- Es por tradición histórica que dos conceptos que no tienen nada en común se nombren de la misma forma y se representen por la misma letra.

Ítem nº 2. En relación con la medida de la fuerza electromotriz de una pila.

Razona sin son correctas o no las siguientes afirmaciones:

- Es indiferente medir fuerza electromotriz de una pila o diferencia de potencial entre sus electrodos ya que con el aparato de medida en ambos casos se obtiene una cantidad en voltios.
- La fuerza electromotriz de una pila conectada a un circuito no se puede medir. De esta forma no toda la energía de la pila se invierte en generar y mantener constante la diferencia de potencial entre sus electrodos.
- Por razones formales se mide la fuerza electromotriz de una pila comparando su valor con el de una pila patrón, utilizando para ello un potenciómetro intercalado en el circuito.
- Para medir la fuerza electromotriz de una pila basta con medir la diferencia de potencial entre sus electrodos y sumar la cantidad $I \cdot r$, donde r es la llamada resistencia interna de la pila.

PROTOCOLO PARA EL ANÁLISIS DE LAS RESPUESTAS ACERCA DE LA NATURALEZA Y MEDIDA DE LA FUERZA ELECTROMOTRIZ

En los libros se habla de fuerza electromotriz de inducción y de fuerza electromotriz de una pila en capítulos diferentes. Al tratarse de ámbitos que presentan

desde el punto de vista fenomenológico algunas diferencias, reacciones químicas en una pila y campos magnéticos variables, parece que se trate de magnitudes de diferente naturaleza que, sólo el fruto de la casualidad o algún “capricho” de raíces históricas justifica en ambos casos el empleo del término fuerza electromotriz. Justamente las circunstancias descritas facilitarían la comprensión de la naturaleza de la fuerza electromotriz: se trata de una acción no conservativa.

Ítem nº 1 Ya se ha señalado como en los libros de texto, al referirse al estudio de los circuitos de corriente continua y cuando se estudian los fenómenos de inducción electromagnética, los autores se refieren a la fuerza electromotriz que en ambos casos se representa por el mismo símbolo \mathcal{E} , pero no queda claro si el mismo símbolo representa al mismo concepto o simplemente es otra de las manifestaciones de la confusión existente en torno a la fuerza electromotriz. Este ítem tenía como objetivo principal indagar en torno a estas ideas. Enunciado a enunciado se comentaran los resultados obtenidos.

En relación con la afirmación a): se valorarán positivamente aquellas respuestas que declaren la falsedad de la afirmación y la justifiquen al menos proponiendo ejemplos en los que magnitudes que se miden en la misma unidad son diferentes como pueden serlo el trabajo realizado por una fuerza de rozamiento y la energía potencial gravitatoria que se miden en julios.

En relación con la afirmación b): se valorarán positivamente las respuestas que reconozcan la veracidad de la afirmación justificando del algún modo el carácter no conservativo de las transferencias energéticas que se cunifican mediante el concepto de fuerza electromotriz.

En relación con la afirmación c): Un vez más se valorarán positivamente aquellas respuestas que señalen como falsa esta afirmación, por tener en común el ámbito de las experiencias que se mencionan el carácter no conservativo de los intercambios energéticos puestos en juego.

En relación con el enunciado d): se valorarán positivamente las respuestas que reconozcan la afirmación como falsa y la justifiquen haciendo referencia explícita a alguno de los argumentos empleados al reconocer la veracidad o falsedad de las afirmaciones anteriores o bien otros en los que se argumente cómo es que se trata del mismo concepto.

Ítem n° 2. La opción a) es un enunciado incorrecto. La fuerza electromotriz de una pila no se mide con un voltímetro. Con el voltímetro se mide la diferencia de potencial. La fuerza electromotriz se mide comparando el valor de la fuerza electromotriz de la pila que se quiere conocer con la de una pila patrón. El instrumento utilizado es un potenciómetro.

La opción b) es correcta. La fuerza electromotriz de una pila es la energía que se pone en juego (por unidad de carga) para separar y mantener las cargas separadas sobre los electrodos. Si pasa corriente por la pila, parte de la energía producida por ésta se transforma en calor por efecto Joule en el interior de la misma, con lo que no toda la energía de la pila se invierte en separar las cargas.

La opción c) es errónea, no son razones formales, sino las apuntadas en el criterio anterior.

La opción d) es de nuevo errónea ya que el valor de la fuerza electromotriz de la pila dependería del circuito al que se conectara, ya que es el tipo de circuito el que condiciona el valor de I y por tanto el del producto $I \cdot r$ y el de V_{ab} , la diferencia de potencial entre los electrodos de la pila.

Por último señalar que, seleccionamos un número de profesores de todos los niveles encuestados y en torno a las respuestas escritas que nos brindaron, mantuvimos una serie de entrevistas, grabadas en cinta magnetofónica, a fin de profundizar en tales respuestas, así como pedir las aclaraciones o ratificación de aquellas cuestiones que representaban algún tipo de duda a la hora de valorarlas.

4.4 Diseños centrados en el aprendizaje logrado en la enseñanza habitual

En este apartado se ha pretendido realizar un análisis de las dificultades existentes en torno al aprendizaje significativo del concepto de Fuerza electromotriz y otras nociones fronterizas relacionadas con el mismo.

Para conseguir las evidencias que permitiesen contrastar las consecuencias **C1** a **C5** que se detallan en el cuadro 4.3, se han realizado dos tipos de pruebas complementarias. Para elaborar la primera de las pruebas partió de los cuestionarios presentados en los cuadros 4.8 a 4.11 anteriores con preguntas abiertas y semiabiertas de tipo cualitativo. En el proceso de selección se tuvo en consideración:

a) Los resultados de algunas investigaciones tomadas de la bibliografía en relación con el tema (Page 1977, Fisher y Varney 1980, Eylon y Ganiel 1990, Lanzara y Zangara 1995, Benseghir y Closset 1996, Furió y Guisasola 1998, Sherwood y Chabay 1999).

b) Los primeros cuestionarios se pasaron a distintos grupos de estudiantes de últimos cursos de Bachillerato y a pequeños grupos de estudiantes de Universidad, con el fin de mejorar la redacción y asegurarnos en la medida de lo posible de que las dificultades no estarían relacionadas con problemas derivados de la comprensión de los enunciados.

c) El consenso alcanzado por tres profesores expertos acerca de los objetivos y enunciados de cada uno de los ítems planteados, que tras el proceso de discusión y reestructuración, fueron validados por ellos mismos.

El cuestionario se ha pasado a 126 estudiantes, distribuidos en dos grupos a los que designamos como:

Grupo GI de estudiantes de Bachillerato (16-17 años) que se preparaban para su entrada en la Universidad en la especialidad de Ciencias e Ingeniería. Dentro de sus programas se estudiaban el campo eléctrico en electrostática y los circuitos eléctricos de corriente continua. Pertenecían a tres centros distintos, dos IES y un centro concertado **N = 71**.

GA de estudiantes de segundo ciclo de la carrera de Físicas e Ingeniería Industrial de las Universidades de Granada y de Málaga respectivamente. En el caso de los estudiantes de segundo ciclo (3º y 5º), las pruebas se pasaron apenas habían terminado de estudiar en sus clases el tema de Electromagnetismo relacionado con las ideas que se querían examinar. Conviene señalar que con los profesores de los estudiantes universitarios, se había pactado que al terminar el tema en cuestión, a sus estudiantes se les iba a pasar una prueba en relación con la evaluación del concepto de fuerza electromotriz. En este grupo $N = 55$.

La segunda prueba ha consistido en una entrevista en profundidad realizada (y grabada en cinta magnetofónica) a una muestra de estudiantes de segundo ciclo de Universidad. Describiremos más adelante en qué términos y en torno a qué cuestiones se realizaron las entrevistas.

Para elaborar el diseño se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

a) Que las situaciones bajo las que es posible abordar el estudio del concepto fuerza electromotriz y su diferenciación del concepto de diferencia de potencial, debe traducirse, a la hora de investigar su aprendizaje significativo, en una diversidad de las cuestiones planteadas y relacionadas entre sí.

b) Que deben presentarse situaciones:

* Novedosas, alejadas del formato habitual académico, en las que los estudiantes se vean ante la necesidad de reflexionar en condiciones idóneas (situación de clase adecuada y sin premuras de tiempo) y que al mismo tiempo sean asequibles a su nivel.

* Que admitan una cierta diversidad de respuestas.

c) Se han desestimado errores de comprensión de enunciados, en primer lugar por las sucesivas revisiones que se hicieron de los enunciados antes de pasarlos a las muestras de estudiantes citadas y en segundo lugar, porque la prueba se pasó siempre en presencia del profesor investigador que atendía durante la realización de la prueba a las consultas y dudas que planteaban los estudiantes.

Por último y en relación con la implementación del cuestionario, señalar que para el análisis del mismo se ha tenido en cuenta que las respuestas de los estudiantes pudieran estar condicionadas por el tipo de pregunta (Viennot, 1996). Así pues, se ha observado si las respuestas de los estudiantes eran susceptibles de agruparse en categorías y con qué frecuencia se repetían, en preguntas que persiguiendo el mismo objetivo, tienen diferente grado de dificultad y de familiarización con el contexto académico. Inicialmente partimos de las mismas categorías de clasificación que habíamos empleado con el profesorado, sólo que con las adaptaciones en los ítems y en los criterios de valoración, pertinentes a los niveles en los que se realizaban las encuestas.

4.4.1 Diseño para contrastar si se distingue entre fuerza electromotriz y diferencia de potencial.

A los estudiantes de 2º ciclo (**grupo GA**) se pasaron los ítems de los cuadros 4.8 y los criterios para valorar sus respuestas fueron los mismos que se expresaron en los protocolos correspondientes.

En el caso de los estudiantes de bachillerato (**grupo GI**), se emplearon los mismos ítems salvo el 2º y 4º que se suprimieron. A través de las respuestas a los cinco ítems anteriores se valoraran las consecuencias contrastables **C1** y la serie **C3**.

En relación con los criterios de evaluación:

PROTOCOLO PARA EL ANÁLISIS DE LAS RESPUESTAS EN RELACIÓN CON LAS DIFERENCIAS ENTRE FUERZA ELECTROMOTRIZ Y DIFERENCIA DE POTENCIAL

Ítem nº 1 A la hora de evaluar la redacción de sus respuestas y el léxico empleados se valorarán de forma laxa en relación con lo que es posible exigir a estudiantes universitarios, licenciados y profesorado en ejercicio. También se aplicarán matices de laxitud cuando las redacciones de los estudiantes de este nivel estén más relacionadas con la densidad de carga que con el potencial.

Ítem n° 3 Bastará en este caso con que expliquen que la fuerza electromotriz de una pila es una propiedad característica y que no varía al conectarla a distintos circuitos.

Ítem n° 5 Como la distinción entre campos conservativos y no conservativos no parece exigible a los estudiantes de este nivel se valorará positivamente el que se haga referencia a que la fuerza electromotriz es una propiedad característica de la pila. No cambia con la configuración del circuito y se mide comparando el valor de la fuerza electromotriz de la pila problema con el valor de la fuerza electromotriz de una pila patrón. Mientras que la diferencia de potencial en un circuito depende de la configuración del mismo, incluso con la misma pila y se mide con un voltímetro convenientemente conectado entre los dos puntos para los que se quiere calcular la diferencia de potencial. Todo ello con los criterios de laxitud en la redacción y pormenorización de las explicaciones a que nos hemos referido más arriba.

4.4.2 Diseño para analizar si se distingue entre la ley de Ohm y ecuación del circuito

De nuevo a los estudiantes de 2° ciclo (**grupo GA**) se pasaron los ítems del **cuadro 4.9** y los criterios para valorar sus respuestas fueron los mismos que se expresaron en los protocolos correspondientes.

Con los ítems anteriores se pretende analizar qué se ha aprendido en relación con esto. Las respuestas a cuestiones que nos facilitarán el análisis y contraste de la consecuencia contrastable **C4**, además de converger en alguna medida con la consecuencia contrastable **C1**.

Al **grupo GI** en relación con este aspecto se pasó exclusivamente el **ítem n° 1**, para cuya corrección se utilizó exclusivamente el que los estudiantes señalen el carácter limitado de la validez de la ley de Ohm para el caso de conductores óhmicos y la pila no lo es o una redacción en este sentido.

4.4.3 Diseño para analizar el aprendizaje acerca de las descripciones macroscópica y microscópica y las relaciones entre la Electrostática y los circuitos eléctricos

Como en ocasiones anteriores a los estudiantes de segundo ciclo se les pasó el cuestionario que se recoge en el **cuadro 4.10** y se les aplicaron los protocolos de evaluación que allí se describen. El análisis de las respuestas a los tres ítems anteriores nos permitirá evaluar la consecuencia contrastable **C2**.

En cuanto a los estudiantes del grupo **GI**, estudiantes de Bachillerato, se les pasaron los ítems 1 y 3 de dicho cuadro y en lo que se refiere al

PROTOCOLO PARA EL ANÁLISIS DE LAS RESPUESTAS EN RELACIÓN CON LAS DESCRIPCIONES MACROSCÓPICA Y MICROSCÓPICA

Ítem n° 1 Se valorarían positivamente aquellas respuestas que escogieran la opción d y la justificaran señalando que ninguna de las magnitudes citadas en las otras opciones son atributos de las cargas.

Ítem n° 3 Se valorarían positivamente las respuestas que seleccionaran la opción b y la justificaran indicando que las cargas se desplazan entre dos puntos que están a diferente potencial.

CAPÍTULO 5. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA CONTRASTACIÓN EXPERIMENTAL DE LA PRIMERA HIPÓTESIS

Con el fin de contrastar nuestra primera hipótesis, en el capítulo anterior la hemos concretado en tres derivaciones que refieren a libros de texto, profesorado y estudiantes. Estas derivaciones han sido operativizadas en un total de 16 consecuencias contrastables (ver cuadros 4.1, 4.2 y 4.3 de las páginas 85, 86, 87 respectivamente). Al mismo tiempo se presentaron una variedad de instrumentos experimentales destinados a contrastar tales consecuencias (ver página 88). En este capítulo presentaremos los resultados obtenidos.

5.1 Resultados obtenidos, en los libros de texto, al analizar cómo se introduce y utiliza el concepto de fuerza electromotriz en el estudio de los circuitos de corriente continua.

Como se recordará, el diseño experimental elaborado para contrastar la primera hipótesis, incluye el análisis de los aspectos didácticos y epistemológicos en la organización y contenidos que los libros de texto hacen del concepto de fuerza electromotriz. La muestra de libros incluye 42 textos del nivel de Secundaria 15-18 años y 33 textos de nivel universitario.

5.1.1 Resultados que muestran deficiencias epistemológicas en la introducción de los contenidos

En el cuadro 4.4 se recogía un estadillo para el análisis epistemológico de los libros de texto, referido al concepto de fuerza electromotriz. A continuación enunciamos de forma resumida los aspectos epistemológicos analizados:

Cuadro 5.1

Cuestiones abordadas en el análisis epistemológico

1. Relaciones con las magnitudes de la Electroestática
2. Ámbito de aplicación del concepto de diferencia de potencial
3. Justificación de la introducción del concepto de fuerza electromotriz
4. Naturaleza y ámbito de aplicación del concepto de fuerza electromotriz
5. Diferenciación de los conceptos fuerza electromotriz y diferencia de potencial
6. Relaciones del concepto de fuerza electromotriz con otros conceptos fronterizos

SI. El texto contempla el contenido de la cuestión que se analiza con el detalle suficiente.

MENCIONA: Hace referencia al contenido de la cuestión, pero se encuentra insuficientemente detallada y no justificada.

NO: No aparece ninguna referencia de interés hacia la cuestión que se analiza o no es tratada en el libro de texto.

Las siguientes tablas y gráficos muestran para cada uno de los textos seleccionados, la valoración y porcentaje de cada apartado.

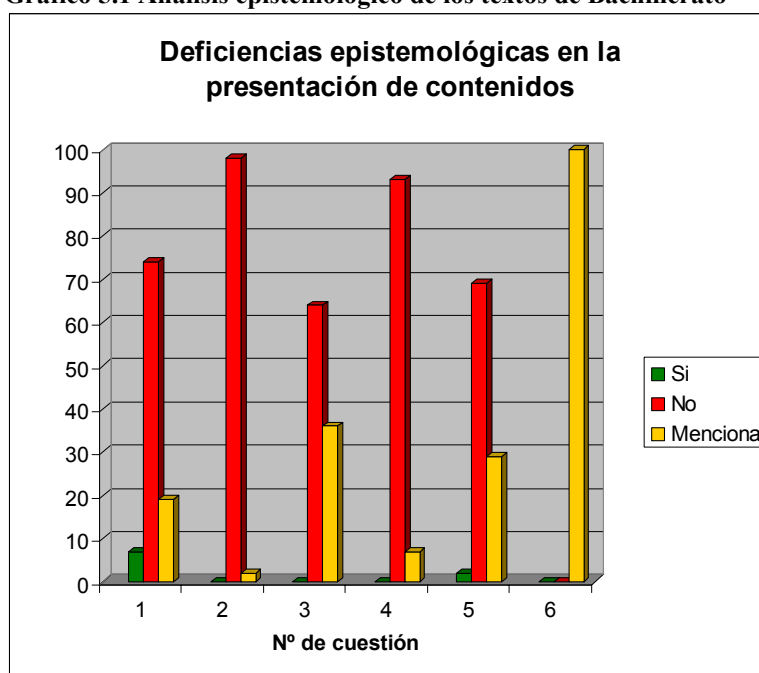
Tabla 5.1

Análisis de textos (Secundaria) N = 42						
A. Carencias epistemológicas en la presentación de los contenidos						
C.O.U	1	2	3	4	5	6
A. Candel et al (1988)	No	No	No	No	No	M
M.A. Olarte et al (1989)	No	No	No	No	No	M
J Casanova et al (1983)	No	No	No	No	No	M
E. García et al (1978)	No	No	No	No	No	M
A. Candel et al (1995)	No	No	No	No	No	M
A Martínez et all (1990)	No	No	No	M	No	M
3º B.U.P.						
A. Candel et all (1988)	No	No	M	No	M	M
M.Olarte et all (1985)	No	No	M	No	No	M
Latorre et all (1979)	No	No	No	No	No	M
L. Gómez (1978)	No	No	No	No	M	M
Cacho et all (1977)	No	No	M	No	M	M
Pascual et all (1986)	No	No	No	No	M	M
J.A.Fidalgo (1984)	No	No	No	No	M	M
Lasheras et all (1978)	No	No	No	M	Si	M
Dou et all (1986)	No	No	M	M	M	M
Martinez et all (1977)	No	No	M	No	M	M
Martinez et all (1987)	No	No	M	No	M	M
Ruiz et all (1988)	M	No	No	No	No	M
2º B.U.P.						
J.A.Fidalgo (1979)	No	No	M	No	No	M
Fidalgo (1992)	No	No	M	No	M	M
L. Gómez (1979)	No	No	No	No	No	M
Escudero et all (1991)	No	No	No	No	No	M
Lasheras et all (1976)	M	No	M	No	No	M
Dou et all (1985)	No	No	No	No	No	M
1º BACH						
Ontañón et all (1997)	No	No	No	No	No	M
Andrés et all (1995)	No	No	No	No	No	M
Hierrezuelo et all (2002)	Si	M	M	No	M	M
Carrascosa et all (2000)	Si	No	M	No	M	M
Fernández et all (2002)	M	No	M	No	No	M
Ontañón et al. (2002)	No	No	No	No	No	M
Andrés D. et al. (1995)	Si	No	No	No	M	M
Andrés D. et al. (2000)	No	No	No	No	No	M
Galindo et all (2000)	M	No	No	No	No	M

Ballestero et all (2002)	M	No	No	No	No	M
Dou et all (1999)	No	No	No	No	No	M
Agustench M et all (2002)	M	No	M	No	No	M
Piñar I., Arróspide C. (2002)	No	No	M	No	No	M
Satoca, J. et al. (2000)	M	No	No	No	No	M
J.A. Hidalgo (2002)	M	No	M	No	No	M
2º BACH						
Gisbert et all (1998)	No	No	No	No	No	M
Andrés et all (1998)	No	No	No	No	No	M
Tejerina et all (2001)	No	No	No	No	No	M

El gráfico siguiente, sintetiza en porcentajes los resultados de la tabla anterior en relación con las seis primeras cuestiones abordadas, en la que se analizan los libros de texto desde una perspectiva epistemológica.

Gráfico 5.1 Análisis epistemológico de los textos de Bachillerato



La siguiente tabla recoge los mismos datos para los textos de nivel universitario.

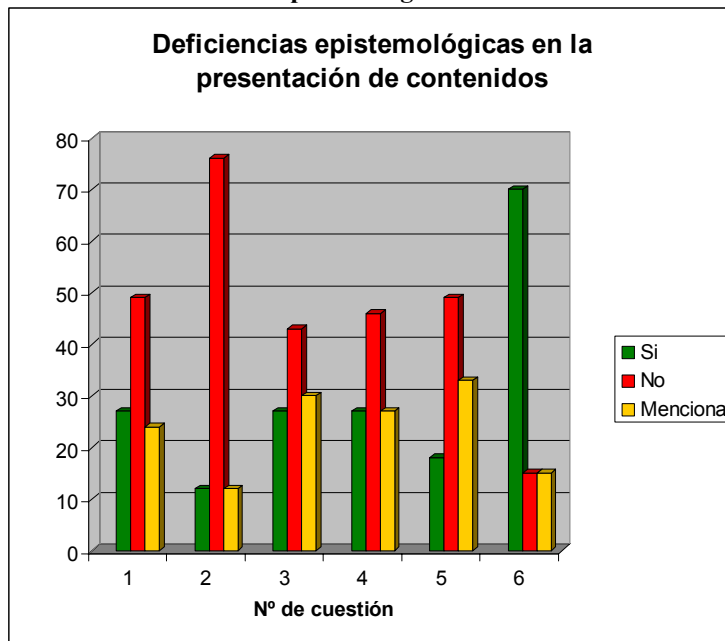
Tabla 5.2

Análisis de textos (Universidad) N = 33						
A. Carencias epistemológicas en la presentación de los contenidos.						
Cutnell	M	No	No	M	No	M
Bújovtsev B.	Si	No	Si	Si	Si	Si
F. Bueche	No	No	M	No	M	Si
Burbano et al	M	No	Si	M	M	M

Serway-Bichner	No	No	No	No	No	Si
Serway	No	No	No	No	M	Si
Gascon et al	M	M	M	Si	No	Si
Kane-Sternhein	No	No	M	No	M	Si
Halliday-Resnick	No	No	No	No	M	Si
Tipler	No	No	No	M	No	Si
Tipler-Mosca	M	No	No	No	No	Si
Hernández-Tovar	M	No	Si	Si	Si	Si
Serway-Jewitt	No	M	No	No	M	Si
Kip	No	M	M	No	No	Si
Sears-Zemansky	M	No	No	Si	Si	Si
Sears-Young	No	No	No	M	No	M
E. M. Purcell	M	No	Si	M	No	M
Gettys et al.	No	No	M	M	M	No
Alonso-Finn	No	No	M	M	M	No
J. Catalá	No	No	No	No	M	No
Arons	Si	No	M	Si	Si	Si
D.Cheng	Si	No	No	No	M	Si
Giancoli	No	No	No	No	No	No
Harnwell	No	No	No	No	No	No
PSSC	M	No	M	M	No	Si
Hewitt	No	No	M	No	No	M
Reitz-Milford	Si	Si	No	No	No	Si
López Rodríguez	Si	No	Si	M	M	Si
Chabay-Sherwood	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Wangness	Si	M	M	Si	No	Si
Rodríguez Danta	Si	Si	Si	Si	No	Si
Cromer	No	No	Si	No	No	Si
Moore	Si	Si	Si	Si	Si	Si

De nuevo el gráfico siguiente, sintetiza en porcentajes los resultados de la tabla anterior en relación con las seis primeras cuestiones abordadas, en la que se analizan los libros de texto, de nivel universitario, desde una perspectiva epistemológica.

Gráfico 5.2 Deficiencias epistemológicas en los textos universitarios



A continuación, analizaremos los resultados obtenidos de manera separada para cada uno de los aspectos enunciados en el cuadro 5.1.

5.1.1. A Relaciones con las magnitudes de la electrostática

A nivel de Secundaria y con respecto a las relaciones entre la electrostática y los circuitos, es de señalar que sólo un 7 % hace referencia explícita a por qué las magnitudes como la diferencia de potencial se emplean en el análisis de circuitos en los que las cargas se mueven. Sólo hacen referencia al contenido de la cuestión, sin entrar en ningún tipo de detalles un 19 % y no lo hacen en absoluto el 74 % de los textos.

En el caso de los textos universitarios sólo en el 27% el asunto es tratado convenientemente. No se trata por tanto de una cuestión sobre la que los libros de texto de este nivel ofrezcan información y justificación de forma generalizada.

Con respecto a los que tratan de las relaciones entre la electrostática y los circuitos, en uno de ellos (Carrascosa et al, 2000) el capítulo dos de la unidad acerca de

la “Corriente eléctrica continua”, se denomina significativamente: **¿Existe alguna relación entre la electrostática y la corriente eléctrica?** En el capítulo se hace alusión a las conclusiones a las que llega Faraday en la primera mitad del siglo XIX, acerca de la naturaleza de todas las formas de electricidad. Se reproduce una versión de la clásica tabla en la que Faraday relaciona los efectos experimentales comunes a las electricidades obtenidas a partir de distintas fuentes.

En el otro de los textos (Hierrezuelo et al., 2002) en el capítulo correspondiente a la corriente eléctrica, se aborda el estudio del campo eléctrico tras la noción de carga eléctrica y su utilización para describir el modelo teórico para interpretar la corriente eléctrica. Cuando se tratan los aspectos energéticos del campo eléctrico, se introduce la noción de diferencia de potencial entre dos puntos que a partir de ese momento se emplea a lo largo del resto del capítulo, para interpretar el movimiento de las cargas. Hay una referencia explícita a la relación entre Electrostática y Circuitos y actividades para que los estudiantes se ejerciten en el empleo de las ideas que se les presentan.

Un texto de los que hemos evaluado como “menciona” (Galindo et al 2000), en el tema de “La corriente eléctrica” se ofrece a los estudiantes información diversa acerca de magnitudes que se han estudiado en el tema de la Electrostática. Esta información se ofrece en una columna al margen, diferenciada de la información principal del texto y no se proponen actividades en las que los estudiantes deban tenerla en consideración; pequeños cuadros en los que puede leerse, por ejemplo: “*Los campos eléctricos que producen la corriente que mueve los electrones en los cables de nuestros aparatos domésticos son del orden de $0,1V m^{-1}$* ” (p. 166)

En otra página se recoge información a tener en cuenta a la hora de interpretar la corriente en un circuito con una pila, se describe el movimiento de cargas en términos de “*campo eléctrico y potencial*” en un conductor.

Interpretamos que sin hacerlo explícito, los autores de alguna manera relacionan la Electrostática y los circuitos eléctricos. La diferencia con el anterior estriba en la información que se hace explícita y las actividades que se plantean para que los estudiantes utilicen la información que se les ha dado para resolverlas. Además en el texto que se ha valorado como “sí”, las referencias a las magnitudes de la Electrostática

no figuran como una información al margen de la específica en torno al tema, sino que forman parte del texto principal que los estudiantes deben utilizar para el estudio del tema de Circuitos.

5.1.1 B Ámbito de aplicación del concepto de diferencia de potencial

Ya nos hemos referido a como la diferencia de potencial es una magnitud definida para campos eléctricos conservativos, como es el caso de la Electroestática y los circuitos de corriente continua estacionaria. En relación con este aspecto, el 2% mencionaba el asunto, específicamente se señalaba en una información al margen, que “en este curso nos limitaremos a ejemplos en los que el desplazamiento y la intensidad de campo tienen la misma dirección. Si bien no se refieren específicamente al asunto que nos parece crucial, si que hay al menos una mención en relación con el ámbito de aplicación de algunos de los conceptos que se van a emplear. El resto de los libros, es decir, el 98% no lo hacían.

En el caso de textos universitarios los resultados también son elocuentes. Sólo el 12% de los textos hacen explícitas salvedades con claridad, es el caso del texto de Halliday-Resnick en el que en el capítulo sobre la ley de Faraday se advierte en un apartado denominado “Campos magnéticos variables con el tiempo”, que “el potencial eléctrico que se puede definir sólo para una fuerza conservativa, *no tienen ningún significado para campos eléctricos producidos por inducción*” (la cursiva es del texto original, página 1248 de la segunda edición de 1974). Merece la pena señalar que una cuestión que nos parece tan relevante desde el punto de vista epistemológico, aparece en el texto citado en unos párrafos con letra pequeña, de esos que no son imprescindibles para seguir la lectura del texto principal. Sólo uno de los textos hace referencia explícita al comienzo del tema correspondiente a las limitaciones en la aplicación del contexto.

5.1.1 C Justificación de la introducción del concepto de fuerza electromotriz

La noción de fuerza electromotriz está relacionada con la separación de cargas necesaria para producir una diferencia de potencial, de hecho el concepto, referido a la unidad de carga, cuantifica la energía puesta en juego en la separación y mantenimiento

de la separación de cargas, para tener los electrodos de la pila a diferente potencial. ¿Cómo se produce la diferencia de potencial entre los electrodos de una pila? ¿Cómo se mantiene esta constante, a pesar de que las cargas circulan de un electrodo a otro cuando se cierra el circuito? Preguntas de este tipo son las que deben contestarse a la hora de introducir el concepto de fuerza electromotriz.

En definitiva y en relación con la justificación que se hace al introducir el concepto de fuerza electromotriz, punto 3 del cuadro 5.1, de nuevo ni uno sólo de los libros de Secundaria presenta dicha noción a partir de alguna pregunta o problema en cuya resolución se involucren los estudiantes. Sólo el 36% hace alguna referencia al contenido de la cuestión, pero se encuentra insuficientemente detallada y no justificada.

El esquema que suelen emplear los libros que hemos analizado, tanto de Secundaria como de Universidad, es que: si en los elementos del circuito se transforma energía, que termina por degradarse y pasar al medio ambiente, necesitaremos para un régimen estacionario de transformación de una fuente que la proporcione. La magnitud que cuantifica esta cantidad de energía es la fuerza electromotriz. La siguiente es la secuencia extraída de uno de los textos (Hierrezuelo et al. 2002, p. 236), en un apartado que se denomina “Fuerza electromotriz y voltaje”, pensamos es muy reveladora:

“En el modelo de corriente se distinguen dos tipos de transferencia energética:

- a) En el generador se produce un aumento de energía de los electrones y disminuye la energía interna de la pila o la energía del sistema que mueve la dinamo.*
- b) En los elementos del circuito (bombillas, motores, etc.) ocurre lo contrario: disminuye la energía de los electrones y aumenta la energía de los distintos sistemas conectados al circuito: energía interna de la estufa, energía cinética o potencial de un motor, etc.*

En los circuitos aplicamos el concepto de diferencia de potencial entre dos puntos, que también se le llama voltaje o tensión entre dos puntos. Expresa la diferencia de energía potencial del sistema cuando una carga positiva de 1 C está en uno u otro punto.

Cuando la diferencia de energía de las cargas está producida por un generador, sea una pila o una dinamo, al voltaje o diferencia de potencial lo llamamos fuerza electromotriz, cuyo símbolo es ε .

Tanto la fuerza electromotriz como el voltaje tienen la misma unidad en el SI, el voltio, pues ambos términos representan la diferencia de energía potencial eléctrica que tiene la unidad de carga entre dos puntos.”

En el texto anterior como en la práctica totalidad de los otros, parecería como si el concepto de fuerza electromotriz no viniese a responder a la necesidad de resolver algún problema, o alguna pregunta, más bien se presenta como un problema en el que cabe incluir hasta su propia denominación “fuerza electromotriz”, ya que no es fuerza sino energía; insistiéndose más en sus supuestas “semejanzas” con la diferencia de potencial que en sus atributos específicos.

En el caso de los textos de nivel universitario la cuestión tampoco se trata con demasiada claridad, sólo en nueve de ellos, el asunto de cómo mantener constante la diferencia de potencial, en un circuito en funcionamiento en el que la corriente se mantiene con un valor constante de la intensidad, se trata resaltando la importancia del concepto que lo justifica.

5.1.1. D Naturaleza y ámbito de aplicación del concepto de fuerza electromotriz

Ya nos hemos referido en otro lugar a como las fuerzas no electrostáticas que actúan sobre las cargas de un conductor pueden tener un origen muy diverso. En una pila seca o en una batería son fuerzas “relacionadas” con las reacciones químicas que se producen en la misma; en el inducido de un generador electromagnético están relacionadas con el movimiento de un conductor en un campo magnético, etc.... En definitiva, es la naturaleza no electrostática de esas fuerzas, la que confiere la naturaleza específica y común a la noción de fuerza electromotriz en cualquier clase de circuito, y es por esto que se representa en todos los casos con el mismo símbolo: \mathcal{E} . Pues bien, sólo 4 libros de Secundaria mencionan este aspecto, pero ninguno lo trata con suficiente detalle. Uno de los libros (Gilbert et al. 1998, pág. 337) que hemos valorado como “menciona”, la referencia es como sigue:

Así como la f.e.m., $\xi = \frac{dW}{dq}$, es la energía del generador necesaria para que circule por el

circuito la unidad de carga, de modo análogo, la f.e.m. inducida se define por la ley de Faraday:

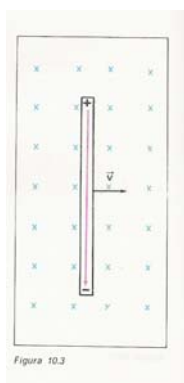
$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}$$

“La f.e.m. inducida es igual a la variación del flujo magnético en la unidad de tiempo. Con signo contrario” (sic).

Esta es toda la relación que se establece con la noción de fuerza electromotriz que se ha estudiado en el caso de los circuitos de corriente continua. Tras de lo cual no creemos que los estudiantes puedan establecer ningún vínculo significativo, desde el punto de vista del aprendizaje, entre ambas situaciones fenomenológicas en las que la energía puesta en juego en el “generador” se representa por el mismo símbolo.

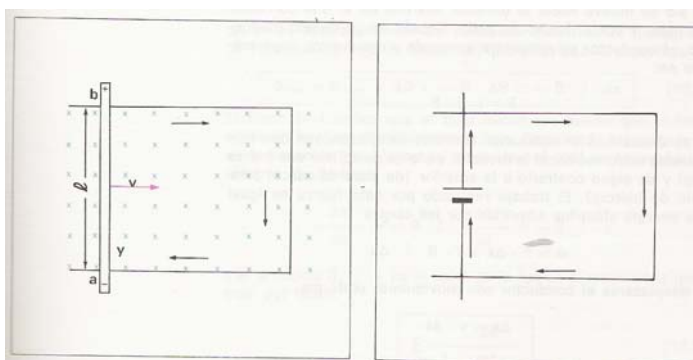
Otro de los textos calificados como “menciona” (Dou et al. 1985, p. 184, 185) lo hace en un apartado que se denomina **“Origen de la fuerza electromotriz inducida”**. Extraemos un resumen de los aspectos en los que explícitamente se hace la referencia:

“¿Por qué las variaciones de campo magnético producen en un circuito una corriente eléctrica inducida? Supóngase que en un conductor metálico como el de la figura se encuentra en un campo magnético perpendicular al plano de este papel y sentido de fuera hacia dentro (alejándose del lector).”



...”Debido a la fuerza a que están sometidos los electrones, el extremo superior del conductor queda con exceso de carga positiva, mientras que el extremo inferior queda cargado negativamente....”En resumen, al mover el conductor en un campo magnético se ha originado en él una tensión eléctrica”..

...”Supongamos que el conductor anterior se desliza sobre un conductor fijo en forma de U....”El conductor móvil actúa exactamente igual que un generador de f.e.m. (fig 10.5). Esta fuerza electromotriz llamada de inducción, se origina por desplazamiento mecánico del conductor en un campo magnético y en ella se fundan los generadores usuales”



Los dibujos están escaneados del original.

Efectivamente la relación se menciona, pero a nuestro entender con algunos errores importantes, como es el que la fuerza electromotriz de inducción origine una diferencia de potencial electrostático, si bien los autores que anteriormente habían hablado sólo de diferencia de potencial ahora introducen el término tensión. Lo que contribuye a que tampoco quede claro si los términos diferencia de potencial y tensión son sinónimos; se produce una situación ambigua que se caracteriza porque se emplea el término tensión cuando *parece* que se podía haber utilizado diferencia de potencial, pero se hace en un contexto empíricamente distinto, que no se aclara y que al parecer se deja para que sean los estudiantes los que hagan las indagaciones oportunas.

Hemos observado como una buena parte de los textos en los capítulos correspondientes a las relaciones entre campo magnético y corriente, hablan de diferencia de potencial, como si de campos eléctricos electrostáticos se tratara, sin hacer ninguna salvedad, lo cual es un lamentable y generalizado error que se ha transmitido desde esos libros de texto.

Sorprende que en una mayoría de los textos de Secundaria, en el tema “Inducción Electromagnética”, en el primer apartado “flujo magnético” se introduzca un subapartado “Fuerza electromotriz y corriente eléctrica” en el que recapitulan de algún modo la noción de fuerza electromotriz introducida en los circuitos de corriente continua. El final de apartado, que reproducimos en su totalidad del texto de Satoca et al 2001, pág 191, es muy ilustrativo:

$$\xi = \frac{P}{I} = \frac{\frac{dW}{dt}}{\frac{dq}{dt}} = \frac{dW}{dq}$$

“Como vemos, la f.e.m. del generador es lo que produce la diferencia de potencial que se establece entre los puntos de un circuito. Ello permite que se desplacen cargas eléctricas por el conductor y que se genere, de este modo, una corriente eléctrica”.

Con el párrafo anterior termina la referencia en relación con el concepto de fuerza electromotriz que se ha estudiado en temas anteriores. Más adelante se introduce, como si de otro concepto se tratara la noción de fuerza electromotriz inducida. No se termina de entender con qué objetivo se introduce el apartado que relaciona la fuerza

electromotriz con la intensidad en un circuito de corriente continua, salvo para señalar que en el caso de la inducción también se produce un diferencia de potencial. Lo que nos lleva a hacer una serie de consideraciones:

1^a) La redacción que vemos induce a que los estudiantes “progresen” en la confusión entre fuerza electromotriz y diferencia de potencial.

2^a) Creemos que contribuye más a confundir que otra cosa introducir ideas sin hacer explícito que se quiere con ello. Los estudiantes por su cuenta es difícil que lleguen a establecer las relaciones que los autores expresamente no subrayan. Este tipo de informaciones o no se tienen en consideración o al quedar al albedrío de los estudiantes, estos las insertarán en su esquema conceptual y si este es erróneo, la nueva idea vendrá a reforzar dicho esquema erróneo.

3^a) Se induce un error grave cuando se introduce la diferencia de potencial electrostático como generadora de corriente en un tema de inducción electromagnética, ya que cuando las corrientes se deben a este fenómeno la diferencia de potencial electrostático no está definida.

En el caso de los textos de nivel universitario que hemos analizado, este aspecto solo es tratado con la suficiente claridad en nueve de ellos, en el resto el asunto no se trata o se menciona de forma poco relevante para el lector no advertido, por lo que, cuando menos se comete un error por omisión, ya que es difícil que un estudiante, pueda llegar a dicha conclusión de la mera lectura del texto.

5.1.1 E Diferenciación de los conceptos fuerza electromotriz y diferencia de potencial

En Secundaria el 29% libros se han clasificado como “menciona” y sólo el 2% como que aborda suficientemente la cuestión. Mostramos a continuación el planteamiento de uno de los libros de Secundaria (Lasheras et al 1978, pág. 378) que hemos clasificado como “menciona”, en el que se aborda la cuestión explícitamente en un apartado que se denomina **“Fuerza electromotriz y diferencia de potencial”**, la

secuencia es la que sigue. Una vez que se ha establecido la ecuación del circuito: $\varepsilon = (V_a - V_b) + r \cdot I$, textualmente se dice:

“Comparando las dos ecuaciones:

$$\varepsilon \cdot I = R \cdot I^2 + r \cdot I$$

$$\varepsilon = (V_a - V_b) + r \cdot I$$

se ve que su significado es análogo. La primera se refiere a la energía por segundo, la segunda a la energía por culombio. En los dos casos hay dos términos que corresponden, respectivamente, al exterior y al interior del generador.

Observa que la diferencia de potencial entre los bornes es menor que la fuerza electromotriz.

Ejemplo: Una pila de fuerza electromotriz 4,5, V y resistencia interior 1Ω , envía corriente a una resistencia de 8Ω . Calcular la intensidad de corriente y la diferencia de potencial entre sus bornes.

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r} = \frac{4,5}{8 + 1} = 0,5 A$$

$$V_a - V_b = \varepsilon - r \cdot I = 4,5 - 0,5 = 4 V$$

¿Podrá la diferencia de potencial, en algún caso, ser igual a la fuerza electromotriz?

Es evidente que: $V_a - V_b = \varepsilon$ cuando $r \cdot I = 0$, lo que sucede si el circuito está abierto.

Puede verse como el estudio de las diferencias entre las dos magnitudes, que los autores abordan, se reduce a las diferencias entre sus valores, lo que se ve reforzado, si se tuviese alguna duda, cuando en una de las últimas líneas del apartado se dice: “Este último resultado (se refieren a la identidad de los valores de las magnitudes en circuito abierto) nos dice que se puede medir la fuerza electromotriz de una pila o de un acumulador con un voltímetro.” Cuando se había estudiado que la diferencia de potencial también se medía con dicho instrumento. Luego se puede deducir erróneamente que salvo en los valores que pueden tomar una y otra de las magnitudes ambas son la misma.

Con el énfasis en aquellos aspectos susceptibles de ser representados mediante una ecuación y el carácter cargado de operativismo de las explicaciones y actividades y ejercicios de los exámenes, creemos que los estudiantes, a partir de informaciones del estilo anterior, difícilmente podrán concluir diferencias entre ambos conceptos.

Entre los que hemos clasificado como que no abordan la diferencia entre ambos conceptos, 69%, un ejemplo es el que sigue (Latorre et al. 1978, páginas 185, 186). En el apartado que se titula: “Generadores de corriente. Fuerza electromotriz. Diferencia de potencial en bornes”, recoge la siguiente información:

*“...Todo generador presenta, en mayor o menor grado, una oposición al paso de los electrones, que llamaremos resistencia interna (r_i). Esta resistencia ocasiona que el potencial (o energía) que tiene el electrón en los bornes de salida sea menor que realmente producido en el interior. El potencial que reciben los electrones en el interior lo definimos como **fuerza electromotriz (f.e.m.)** y se representa por E , y el potencial que tiene a la salida le llamamos **diferencia de potencial en bornes**, representado por V .*

La fuerza electromotriz (f.e.m.) de una pila se define como la energía convertida de la forma eléctrica a la forma no eléctrica, o viceversa, por unidad de carga que atraviesa el generador.

“...La unidad de f.e.m es el voltio, puesto que es igual a: julios/culombios.

El potencial V , que tiene a la salida, será igual a la f.e.m. de la pila menos el potencial gastado en la resistencia interna;...”

Con una información como la anterior, plagada de errores, entre los que cabe destacar la identificación que se hace entre potencial y energía, nos pareció que el libro había que clasificarlo entre los que no abordaban la cuestión.

La mayor parte de los textos no incluyen al final del capítulo preguntas o cuestiones que explícitamente se refieran a las diferencias entre ambos conceptos, si bien en estos ejercicios suele preguntarse por los valores de la diferencia de potencial, conocidos los de la fuerza electromotriz de la pila, o al contrario. Como si cupiese esperar que a partir de estas actividades se puedan inferir las diferencias pertinentes.

En el caso de los textos universitarios que hemos analizado la cuestión no es muy diferente (18% Si; 49% No; 33% Mencionan) los resultados son elocuentes, pero es que algunos de ellos parecería que los autores pretenden lo contrario, es decir, que no parezca que se trata de conceptos diferentes, los siguientes párrafos pertenecen al texto “FISICA” (Tipler 1987):

“Por definición, una fuente de fem ideal mantiene una d.d.p. ε entre los puntos a y b , en donde el punto a se encuentra a un potencial mayor.” O este otro párrafo: “La diferencia de potencial entre los puntos c y d también es ε y la corriente que circula por la resistencia es $I = \varepsilon/R$ ”, (página 840). En los párrafos siguientes se emplean las ecuaciones: $P = I \cdot V$ y $P = \varepsilon \cdot I$ de forma equivalente.

O todavía más: *“Una batería real es más complicada que una fuente de fem sencilla. La d.d.p. entre los bornes de la batería, denominada tensión entre los bornes, no es simplemente la fem de la misma”* (página 841). De lo que el lector puede concluir que en el caso ideal sí son la misma magnitud, lo que se refuerza cuando se emplean las ecuaciones matemáticas que

dan el valor de la fem y la d.d.p. para una situación ideal en la que la resistencia interna de la pila es nula. Pero la redacción todavía da pie a otros errores, habla de “fuente de fem”, de la misma forma que se habla de “fuente de energía” o de “producción de corriente”, en un contexto que puede dar lugar a creer que la fuerza electromotriz participa de atributos como la energía o la corriente y que pr tanto es algo que puede “ir” de un lugar a otro.

Los autores parecería como si redujeran la fuerza electromotriz a un valor singular de la diferencia de potencial, así en la versión remozada del libro de Burbano de 2003, puede leerse:

“La fem de un generador es la diferencia de potencial entre sus polos cuando no se produce corriente, es decir, cuando está en circuito abierto”. Posteriormente define la ley de Ohm

como: $I = \frac{V_1 - V_2}{R_T}$, la que llama ley general de Ohm como: $I = \frac{\varepsilon - \varepsilon'}{R_T}$, en donde ε' es como

una fem negativa”. Posteriormente en la página 458 al enunciar la ley de Kirchhoff lo hace en la forma: $\sum IR = \sum \varepsilon$. Para que no haya ninguna duda en la página 520 cuando trata la

inducción define la fuerza electromotriz como: $\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt}$ y a continuación añade:

“Obedeciendo la ley de Ohm, podemos poner: $I = -\frac{1}{R} \frac{d\phi}{dt}$, con lo que la identificación entre

ambas magnitudes se refuerza todavía más.

Hay un texto que parece intenta subrayar más las posibles semejanzas que las diferencias, es el libro de Serway y Bichner, en el que en un párrafo de la página 857 se dice: *“Cuando se ignora la resistencia interna de la batería, la diferencia de potencial entre los puntos a y b es igual a la fem ε de la batería, es decir, $\Delta V = V_a - V_b = \varepsilon$...se puede establecer que la corriente en un circuito es $I = \Delta V/R = \varepsilon/R$. Puesto que $\Delta V = \varepsilon$, la potencia suministrada por la fuente de fem puede expresarse como $P = I \varepsilon$, que es igual a la potencia entregada a la resistencia $I^2 \cdot R$ ”.*

5.1.1 F Relaciones de la noción de fuerza electromotriz con otros conceptos fronterizos

Como ya se ha señalado (páginas 57, 94) la diferencia entre los conceptos de fuerza electromotriz y diferencia de potencial estriba, en última instancia, en el carácter no conservativo de las fuerzas que actúan sobre la unidad de carga para separarlas y mantenerlas separadas, mientras que en el caso de la diferencia de potencial dichas fuerzas son conservativas. Es decir los campos de fuerzas que operan en uno y otro

caso son no conservativos y conservativos respectivamente. Fuerza, trabajo, energía y campo son nociones implicadas en el correcto aprendizaje del concepto de fuerza electromotriz, amén del concepto de carga.

El 100% de los textos analizados relaciona el concepto de fuerza electromotriz bien con el concepto de energía, con el de trabajo o con el de potencia. Restringiéndose la referencia a las consideraciones necesarias para poder resolver posteriormente una serie de ejercicios numéricos en los que se debe calcular el valor de una u otra magnitud.

Ni uno sólo de ellos hace referencia a la naturaleza o al tipo de fuerzas que, a nivel microscópico, actúan sobre las cargas, ya en la pila o en el resto del circuito. Ni uno sólo de los analizados hace referencia a la noción de campo y mucho menos a la noción de campo no conservativo. Llamando la atención el hecho de que la mayoría de los textos, ni siquiera cuando abordan el estudio del tema de magnetismo y sus relaciones con la corriente eléctrica hacen referencia a este atributo en la naturaleza de los campos magnéticos.

El esquema más general de referirse a las relaciones entre los conceptos y sus relaciones, tiene lugar al referirse a los generadores. El siguiente es un párrafo más o menos estándar:

“Un generador es un dispositivo que mantiene constante una diferencia de potencial, haciendo que pueda circular una corriente eléctrica de una manera continuada. Para ello el generador debe gastar una energía que se transforma en la energía de la corriente. A continuación se introduce el concepto de fuerza electromotriz:

$$\mathcal{E} = \frac{T}{q}$$

resulta que la fuerza electromotriz de un generador es la energía eléctrica que suministra por cada culombio que recorre el circuito”. (Lasheras et al. 1978, p. 376)

Este aspecto es tratado algo mejor en los libros de nivel universitario, donde la mayor parte de los textos (70%) suelen relacionar de forma explícita el concepto de fuerza electromotriz con otros conceptos introducidos en temas anteriores. No obstante, la relación de este concepto con el de campo eléctrico o el de fuerza no conservativos, de forma clara y explícita, ya no es tan generalizada.

5.1.2 Resultados que muestran deficiencias didácticas en la introducción de contenidos

En el cuadro 4.5 **Red de Análisis (II) de libros de texto**, del capítulo anterior se recogía un estadillo para el análisis de las deficiencias didácticas de los libros de texto, en relación con el concepto de fuerza electromotriz en el marco de los circuitos eléctricos de corriente continua. A continuación se resumen en un cuadro los aspectos estudiados.

Cuestiones abordadas en el análisis didáctico
1. Consideración de las ideas previas y dificultades de los estudiantes
2. Análisis del movimiento de cargas
3. Necesidad de utilizar los conceptos de fuerza electromotriz, diferencia de potencial...
4. Promover la diferenciación entre fuerza electromotriz y diferencia de potencial
5. Acerca de la fuerza electromotriz como una propiedad característica
6. En relación con la diferenciación entre la ley de Ohm y la ecuación del circuito
7. En relación con las medidas de la diferencia de potencial y la fuerza electromotriz
8. Interpretaciones o justificaciones a nivel cualitativo en términos de fuerza electromotriz y/o diferencia de potencial.
9. Diferenciación entre los niveles macroscópico y microscópico.
10. Relaciones CTS, para el caso de las pilas.

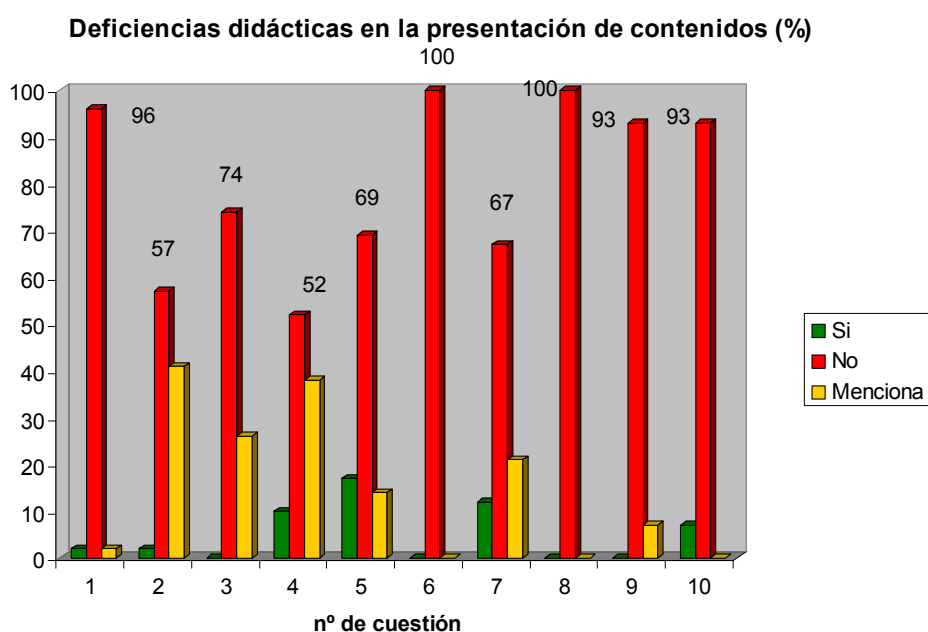
La tabla siguiente (5.3) muestra, para cada uno de los textos citados, la valoración en cada apartado.

Tabla 5.3 (I)

Análisis de textos (Secundaria) N = 42										
B. Deficiencias didácticas en la presentación de contenidos										
C.O.U.	1	2	2.1	3.1	3.2	3.3	4.1	4.2	4.3	5
Candel et all (1988)	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
M.Olarte et all (1989)	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
Casanova et all (1983)	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
E. García et all (1978)	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
A. Candel et all (1995)	No	M	No	No	No	No	No	No	M	No
A Martínez et all (1990)	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
3° B.U.P.										
A. Candel et all (1988)	No	No	No	M	No	No	No	No	No	No
M.Olarte et all (1985)	No	M	No	M	Si	No	Si	No	No	No
Latorre et all (1978)	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
L. Gómez (1978)	No	No	No	M	No	No	Si	No	No	No
Cacho et all (1977)	No	No	No	M	Si	No	No	No	No	No
Escudero et all (1986)	No	No	M	M	Si	No	No	No	No	No
Lasheras et all (1978)	No	No	No	M	No	No	No	No	No	No
Fidalgo (1984)	No	No	No	Si	Si	No	No	No	No	No

Dou et all (1986)	No	M	M	M	No	No	No	No	No	No
Martínez et all (1977)	No	M	No	M	No	No	M	No	No	No
Martínez et all (1987)	No	M	No	M	No	No	M	No	No	No
Ruiz et all (1988)	No	M	M	No	No	No	M	No	No	No
2º B.U.P.										
Fidalgo (1979)	No	No	No	M	M	No	No	No	No	No
Fidalgo (1992)	No	No	No	M	No	No	No	No	No	No
L. Gómez (1979)	No	No	No	M	No	No	Si	No	No	No
Escudero et all (1991)	No	No	No	No	M	No	No	No	No	Si
Lasheras et all (1976)	No	No	M	Si	No	No	M	No	No	No
Dou et all (1985)	No	M	No	No	No	No	No	No	No	No
1º BACH.										
Ontañón et all (1997)	No	M	No	No	No	No	No	No	No	No
Andrés et all (1995)	No	M	No	Si	M	No	Si	No	No	Si
Hierrezuelo et all (2002)	Si	M	M	M	No	No	Si	No	M	No
Carrascosa et all (2000)	M	Si	M	M	M	No	M	No	No	No
Fernández et all (2002)	No	M	M	No	Si	No	No	No	No	No
Ontañón et all (2002)	No	M	No	No	No	No	No	No	No	No
Andrés et all (1995)	No	M	M	M	No	No	No	No	No	Si
Andrés et all (2000)	No	M	No	No	Si	No	M	No	No	No
Galindo et all (2000)	No	M	No	No	No	No	M	No	No	No
Ballestero et all (2002)	No	M	No	M	M	No	No	No	No	No
Dou et all (1999)	No	M	No	No	No	No	M	No	M	No
Agustench M et all (2002)	No	No	No	No	Si	No	No	No	No	No
Piñar I., Arróspide C. (2002)	No	No	M	No	No	No	M	No	No	No
Satoca, J, et al. (2000)	No	No	M	No	No	No	No	No	No	No
J.A. Hidalgo (2002)	No	No	M	Si	M	No	No	No	No	No
2º BACH										
Gisbert-Hernández (1998)	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
Andrés et all (1998)	(38)									
Tejerina et all (2001)	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No

El siguiente es un gráfico que recoge los resultados del análisis didáctico al que se refieren las cuestiones anteriores:



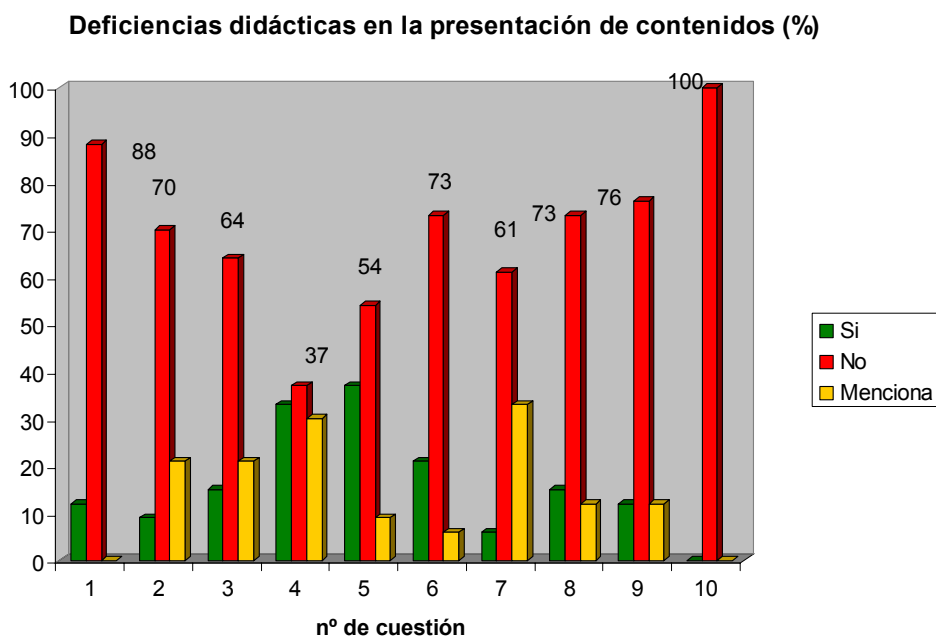
En la tabla siguiente (Tabla 5.3, II) se realiza el mismo análisis para el caso de los libros de texto de nivel universitario.

(Tabla 5.3, II)

B. Deficiencias didácticas en la presentación de contenidos (Universidad)										
Texto	1	2.1	2.2	3.1	3.2	3.3	4.1	4.2	4.3	5
Cutnell	No	No	No	No	No	No	M	No	No	No
Bueche F.	No	No	M	M	No	No	No	M	No	No
Bújovtsev B.	No	M	M	Si	No	No	No	M	Si	No
Burbano et al.	No	M	M	No	No	No	M	No	No	No
Serway-Bichner	No	No	No	M	No	No	M	No	No	No
Serway	No	M	M	M	No	No	M	M	No	No
Gascon et al.	No	No	No	Si	No	No	No	No	No	No
Kane-Sternhein	No	No	No	M	No	No	No	No	No	No
Halliday-Resnick	No	No	No	Si	No	No	No	No	No	No
Hernández-Tovar	No	M	Si	Si	No	No	M	No	M	No
Tipler	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
Tipler-Mosca	No	M	No	No	No	No	M	No	No	No
Serway- Jewtt	Si	M	M	M	Si	No	M	No	No	No
Kip	No	No	No	M	No	No	No	No	No	No
Sears-Zemansky	No	Si	Si	Si	Si	Si	M	Si	Si	No
Sears-Young	Si	M	No	M	Si	M	No	Si	M	No
E. M. Purcell	No	No	No	No	Si	M	No	No	No	No
Guettys et all	No	No	No	M	Si	No	No	M	No	No
Alonso-Finn	No	No	No	Si	M	Si	No	No	No	No

J. Catalá	No	No	No	M	Si	No	No	No	No	No
Arons	No	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si	M	No
D. Cheng	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
Giancoli	No	No	No	No	M	No	M	No	No	No
Harnwell	No	No	No	No	M	No	M	No	No	No
PSSC	No	No	No	No	Si	No	No	No	No	No
Hewitt	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
Reitz-Milford	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
López Rodríguez	No	No	No	Si	No	Si	No	No	No	No
Chabay-Sherwood	Si	Si	Si	Si	Si	Si	M	Si	Si	No
Wangsness	No	No	M	No	Si	No	No	No	No	No
Rodríguez Danta	No	No	M	Si	Si	Si	No	No	M	No
Cromer	No	No	No	M	No	No	No	No	No	No
Moore	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No

Los datos anteriores se sintetizan en porcentajes en el gráfico siguiente:



Se examinan a continuación los resultados de manera separada para cada una de las cuestiones a las que se viene haciendo referencia.

5.1.2. A Consideración de las ideas previas y dificultades de los estudiantes

Algunos textos analizados se publicaron entre finales de los años setenta y principios de los ochenta. Por esos años la literatura existente acerca de las dificultades e ideas alternativas de los estudiantes era escasa, por lo que si uno rastrea en ellos la toma en consideración de tales nociones es normal que no aparezca. Lo que sin embargo llama la atención es que durante los años ochenta, hay un auténtico caudal de investigaciones en casi todos los campos de la física y muy en particular acerca de la electricidad, pero sólo uno de los textos de Secundaria las toma en consideración, es decir, se han diseñado y propuesto actividades para trabajarlas con los estudiantes, y alguno más sólo se refiere a ellas.

Es ilustrativo que en un texto escrito por los mismos autores, para el mismo nivel, con un intervalo de siete años (1988-1995) no se recoja nada al respecto a pesar de las declaraciones de los autores al comienzo de la introducción: “*varias cosas han cambiado...*” (Candel et al. 1995, pág 3) pero todo se queda reducido, tras el análisis, a los cambios normativos o las modificaciones que en relación con tales cambios se han realizado en algunos distritos universitarios. Hay que señalar sin embargo que en estas fechas se han publicado ya una gran cantidad de artículos y libros en los que se recogen los resultados de las investigaciones en el campo de las dificultades de los alumnos en el aprendizaje de las ciencias, en particular en el campo de la Electricidad la bibliografía es abundante.

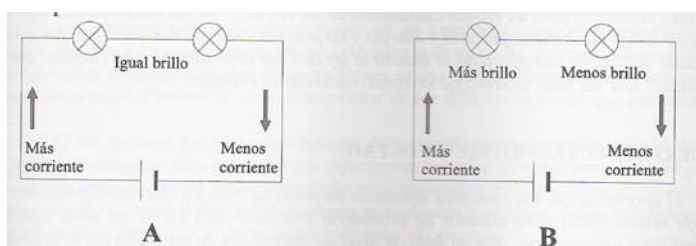
En el único texto de Secundaria (Hierrezuelo et al. 2002) que se refiere a las concepciones alternativas de los estudiantes, los autores señalan **explícitamente**:

...Las ideas previas fundamentales son:

- a) No es necesario que el circuito esté cerrado para que funcione...*
- b) El generador es un depósito de cargas y se comporta como una fuente que suministra cargas al circuito en cuyos elementos se gastan. El generador suministra una corriente constante a cualquier circuito.*
- c) Una variación de una parte del circuito no altera el conjunto. Se considera el circuito dividido en etapas sucesivas separadas unas de otras.*
- d) Existen también dificultades para la comprensión de los fenómenos eléctricos que están relacionadas en gran medida con la comprensión de los modelos acerca de la naturaleza eléctrica de la materia.*

Algunas actividades que en relación con esto los autores proponen a los estudiantes para que las resuelvan son, entre otras:

1) “En los circuitos de la figura las bombillas son iguales. ¿Encuentras algún error? Si fuese así explícalo.”



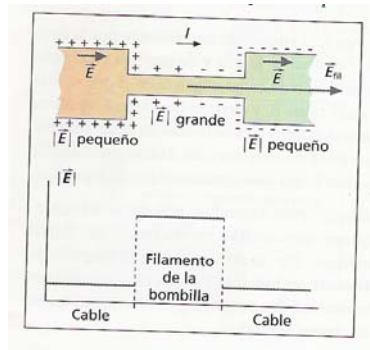
2) Comenta la siguiente frase: “El papel de la pila es suministrar electrones al circuito”.

Los enunciados anteriores abordan inequívocamente la cuestión a la que nos estamos refiriendo.

En el caso de los textos universitarios sólo cuatro de ellos hacen referencia explícita a ideas previas de los estudiantes, y proponen actividades para abordarlas, el libro de Chabay y Sherwood, (2002) *Matter and interactions vol. 2.*, el volumen 2 del texto de Moore y una versión actualizada del clásico Sears y Zemansky *Física vol 2*, realizada por Young y Freedman (1999). Algún texto como el Cutnell, en la versión de 2004, que nosotros hemos revisado, en la introducción hace referencia a una serie de generalidades acerca de las dificultades de los estudiantes que luego no se ven plasmadas en actividades concretas.

5.1.2 B Análisis del movimiento de cargas

Este es un punto importante, de hecho casi la mitad de los autores se refieren a él, pero sólo (Carrascosa et al, 2000) lo hacen de forma muy explícita y propone una información como para que los estudiantes puedan aprenderlas, al menos a priori, de forma significativa. Los autores de dicho texto presentan un capítulo que denominan: “*Primer modelo de funcionamiento de un circuito de corriente continua*” cuyo apartado dos se formula en los términos: “¿*Qué hace una pila para mantener una corriente continua?* en el ámbito de la respuesta se proporciona información acerca de cómo las cargas superficiales se distribuyen en la pila, en el resto del circuito y la relación entre esta distribución de cargas y la corriente en el mismo. Posteriormente se establecen sobre los dibujos y esquemas relaciones entre cargas, campo, potencial y diferencia de potencial. El siguiente es un ejemplo de tales esquemas (página 160):



En otro de los libros que hemos valorado como “menciona” en el apartado que dedican los autores al estudio de la corriente eléctrica, la concretan como:

“... el desplazamiento del conjunto de los electrones en los conductores metálicos... Es necesario precisar el término **desplazamiento de las cargas**. Las cargas eléctricas libres que poseen los conductores se mueven desordenadamente a causa de la agitación térmica...pero en el seno de un campo eléctrico las cargas se mueven en una dirección determinada por la acción de las fuerzas del campo. Este desplazamiento conjunto de las cargas es lo que se llama **corriente eléctrica**.”

Si queremos que las cargas se desplacen **permanentemente** a través del conductor, necesitaremos un aparato capaz de mantener una diferencia de potencial constante entre sus extremos, dicho aparato recibe el nombre **de generador**.” (Dou et al. 1999, p. 171)

Sin embargo los autores no han informado antes por qué las cargas se mueven entre dos puntos del campo a diferente potencial, por lo que efectivamente se hace mención a la cuestión que se analiza, pero no se explica y por supuesto no hay actividades que se refieran al asunto.

Normalmente todos los libros siguen un esquema semejante, si bien hay algunos que sí entran en analizar como las cargas se moverán entre dos puntos a diferente potencial; señalando que las cargas se desplazarán desde donde su contenido energético es mayor hacia donde es menor. El problema es que luego esta idea no se conecta explícitamente con el funcionamiento de la pila, por lo que es difícil que los estudiantes de manera autónoma hagan la transferencia conceptual necesaria.

Señalar que la mayor parte de los libros de nivel universitario tratan el concepto de fuerza electromotriz en un tema sobre energía y corriente en circuitos, que suele venir a continuación de otro sobre corriente y resistencia eléctrica. Es en el tema de

corriente y resistencia en el que los autores se ocupan de los problemas relacionados con el análisis del movimiento de cargas. Los resultados son decepcionantes (3 Si; 23 No; 7 Mencionan).

5.1.2 C Necesidad de utilizar los conceptos de fuerza electromotriz, diferencia de potencial...

El esquema más frecuente entre los autores para introducir la noción de fuerza electromotriz es al referirse a la necesidad de suministrar la energía que se transforma en los distintos elementos del circuito, bombillas, resistencias, etc. El siguiente párrafo de un texto que hemos evaluado “menciona” (Hierrezuelo et al. 2002, p. 236), creemos que representa muy bien este tipo de textos. Se trata de la información que se presenta en un apartado que se denomina **Fuerza electromotriz y voltaje**:

...En los circuitos aplicamos el concepto de diferencia de potencial entre dos puntos, que también se le llama voltaje o tensión entre dos puntos. Expresa la diferencia de energía potencial del sistema cuando una carga positiva de $1C$ está en uno u otro punto.

Cuando la diferencia de energía de las cargas está producida por un generador, sea una pila o una dinamo, al voltaje o diferencia de potencial lo llamamos fuerza electromotriz, cuyo símbolo es ε .

Tanto la fuerza electromotriz (fem) como el voltaje tienen la misma unidad en el SI, el voltio, pues ambos términos representan la diferencia de energía potencial eléctrica que tiene la unidad de carga entre dos puntos.

Fuerza electromotriz ε de un generador es la cantidad de energía que puede ceder el generador a cada unidad de carga.

$$\varepsilon = \frac{\Delta E}{q}$$

Es difícil que los estudiantes puedan concluir acerca de la necesidad de emplear las magnitudes fuerza electromotriz y diferencia de potencial a partir de una información semejante a la anterior, ya que por el contrario parecería que en el caso de una pila es lo mismo referirse a la fuerza electromotriz que a la diferencia de potencial.

5.1.2 D Promover la diferenciación entre fuerza electromotriz y diferencia de potencial

Sólo el 10% de los textos analizados abordan expresamente la diferenciación entre ambos conceptos. La secuencia que presentamos a continuación del texto de Fidalgo (1984) página 115, es un buen ejemplo de cómo, la mayoría de los textos que abordan la diferenciación, la suelen hacer. En un apartado del tema en cuestión que se titula “**Generador. Fuerza electromotriz y contraelectromotriz**”, el primer subapartado se denomina precisamente “**Fuerza electromotriz**” se dice:

“De la misma manera que en una bomba hidráulica existe una proporcionalidad directa entre la energía que consume y el agua que suministra a la conducción, en todo generador existirá también una proporcionalidad directa entre la energía no eléctrica que consume y la carga eléctrica que suministra al circuito. Matemáticamente lo expresamos así $T = E \cdot Q$, donde E es una constante de proporcionalidad, denominada fuerza electromotriz, la cual depende de la forma y construcción del generador... De la expresión anterior podemos definir:

La fuerza electromotriz de un generador es numéricamente igual a la energía no eléctrica (química, mecánica...) que debe consumir para suministrar al circuito una carga de 1 coulomb.

De la expresión $E = T/Q$ se deduce que las dimensiones de E son las mismas que las de una diferencia de potencial. Por tanto, ambas magnitudes se medirán en las mismas unidades, es decir, en voltios.

Sin embargo conviene que te des cuenta de que son conceptos distintos: la fuerza electromotriz es, precisamente, la causa de que exista una diferencia de potencial en los extremos del conductor.”

En ningún momento explica el autor la última afirmación. Pero después de leer la definición que se propone para la fuerza electromotriz se pueden albergar dudas en torno a si la idea de los estudiantes acerca de la pila como artilugio que cede cargas al circuito es una preconcepción o una idea aprendida en las clases.

En un texto (Galindo et al. 2000, pág. 172), calificado entre los que no promueven la distinción entre fuerza electromotriz y diferencia de potencial, en el que se distingue entre generador ideal y generador real en dos apartados consecutivos, pueden encontrarse como conclusiones en el primero de tales apartados, los dos siguientes cuadros:

En un generador ideal la fuerza electromotriz es igual a la diferencia de potencial entre sus bornes

La tarea de un generador ideal es suministrar la energía eléctrica necesaria para compensar exactamente las pérdidas por efecto Joule que se producen en las resistencias que hay en el circuito.

En el apartado siguiente sobre el generador real no se dice una palabra más que pueda introducir matices en la información anterior. Por lo que creemos que a partir de la información anterior es difícil que los estudiantes puedan concluir diferencias entre ambas magnitudes.

En otro texto, evaluado como “Menciona” (Galindo et al. 2002, pág. 430) casi se podría afirmar que induce a la confusión entre ambas magnitudes se dice, tras definir la fuerza electromotriz:

“...la fuerza electromotriz de un generador como la cantidad de energía que éste es capaz de transferir a la unidad de carga que se mueve por el circuito. Es decir: $\varepsilon = W/Q$ ”, añaden:

“Debemos hacer notar que el término fuerza electromotriz (que se mantiene por tradición) es sumamente desafortunado, pues no se refiere a ninguna fuerza. No es más que otra manera de denominar a la “diferencia de potencial” (las comillas son de los autores) que hay entre los polos del generador cuando estos no están unidos por un conductor”

Uno de los textos que hemos calificado como “menciona” (Candel et al., 1988, p. 128), hace la siguiente referencia a la cuestión que nos ocupa, tras definir la fuerza electromotriz de un generador, en un apartado específico, se añade:

“Creemos conveniente resaltar algunos aspectos que eviten posteriores confusiones:

- *La unidad de fuerza electromotriz (f.e.m.) es el J/C, es decir, el voltio. Por tanto, puede confundirse la f.e.m. de un generador con la d.d.p. que es capaz de suministrar entre los extremos de un conductor. En un generador ideal, esto sería cierto...”*

Reducir el asunto a la existencia o no de resistencia interna, cuando en cantidad de ocasiones se refieren los distintos autores a esta consideración a lo largo de sus textos, hace poco menos que imposible que los estudiantes puedan comprender las diferencias entre ambas magnitudes.

Por último señalar que, el argumento empleado por muchos textos refiriéndose a la fuerza electromotriz de la pila como “necesaria para mantener la diferencia de potencial”, sin que en ningún momento se haya explicado por qué la diferencia de potencial entre los bornes tiende a igualarse, puede llevar a los estudiantes a que crean que cuando una pila se agota, lo hace porque se “gasta” la diferencia de potencial o ideas similares.

Es este un extremo que se trata algo más en los textos de nivel universitario que hemos analizado sólo 11 de ellos ofrecen una información clara al respecto, pero que no suele ir acompañada de actividades que brinden a los estudiantes la posibilidad de reflexionar y evaluar la utilización que hacen de la información que se les ha ofrecido, el texto de Moore es una excepción, en la mayor parte de los casos suelen restringirse al caso en el que es posible realizar cálculos numéricos. De algunos podría afirmarse todo lo contrario, por ejemplo en el texto de Tipler-Mosca de 2005, en sus páginas 737 y 738 se dice textualmente: “*La fuente de fuerza electromotriz mantiene una diferencia de potencial ε entre los puntos a y b...por lo tanto la diferencia de potencial entre los puntos a y c también es ε ...*”. No hay ningún añadido que aclare que se están refiriendo los autores a los valores numéricos de ambas magnitudes y no a su identidad como magnitudes. Otro ejemplo de presentación confusa es la de Serway en su libro de (1999) en las páginas 154 y 161, en las que tras establecer la ecuación $V = \varepsilon - Ir$, se añade: “*...en esta expresión ε es equivalente al voltaje en circuito abierto*” y posteriormente: “*Si una pila se atraviesa en la dirección de una fem (de $-$ a $+$ en las terminales) el cambio de potencial es $+\varepsilon$* ”.

5.1.2 E Acerca de la fuerza electromotriz como una propiedad característica

A este aspecto se refieren el 17% de los autores de forma explícita. Veamos algunos ejemplos:

En un apartado que se denomina “**Conservación de la energía en un circuito de corriente continua**”, Olarte et al. 1985, página 115, comienza por describir los elementos “mas significativos” de un circuito, la relación de elementos comienza señalando que “*el generador de corriente está caracterizado por su fem y su resistencia interna*”. Luego no hay ninguna actividad o algún apartado en el que vuelva a insistir en el tema.

En otro de los textos (Cacho et al. 1976, pág. 190), En el apartado “**Fuerza electromotriz de la pila**” se afirma textualmente (y sin haber hecho ninguna salvedad): “...la fuerza electromotriz y la potencia que es capaz de producir son las características principales de los generadores de energía eléctrica...”

Otro de los libros analizados incluye una actividad muy interesante en un apartado en el que se incluyen una serie de actividades bajo el epígrafe “**Comprensión y estudio del tema**”:

Construye una pila con dos chapas metálicas, una de cobre y otra de zinc, interponiendo entre ellas una rodaja de limón. Mide su f.e.m. Cambia la chapa de cinc por otra de hierro. ¿Cambia su f.e.m.? (Pascual et al. 1986, p. 250)

Nos parece una actividad muy adecuada para que los estudiantes comprendan que el valor de la fuerza electromotriz de una pila depende de los materiales de los que está hecha, sobre todo si, al menos el profesor/a, en cuestión realizaba en alguna de las clases el montaje y las medidas experimentales.

Como sucede en otras ocasiones, los autores de textos universitarios suponen que determinados atributos de los conceptos se han debido estudiar en cursos anteriores y no se refieren a ellos, de forma que este aspecto no es tratado en absoluto por el 54% de los textos que hemos analizado.

5.1.2 F En relación con la diferenciación entre la ley de Ohm y la ecuación del circuito

En realidad podría afirmarse todo lo contrario, se confunden ambas nociones hasta el extremo de identificar el principio mucho más general, que se puede representar con la ley de Kirchhoff de las mallas con la ley de Ohm. Ninguno de los libros de Secundaria clarifica esta cuestión, que se trata en un apartado que suele denominarse: “**Generalización de la ley de Ohm**”.

Un ejemplo es el siguiente texto (Escudero et al. 1991) del que presentamos un fragmento de la página 168, en la que se refieren a este particular. Creemos por el contrario que con la información que se da en el texto lo más probable será que se induzca a error. El párrafo pertenece al apartado que se denomina “**La Ley de Ohm**”:

Estas observaciones hacen que podamos afirmar que la diferencia de potencial (V) y la intensidad de corriente (I) son proporcionales, es decir:

$$\frac{V}{I} = \text{constante}$$

La constante de proporcionalidad se denomina **resistencia**, R , y es una medida de la oposición que presenta un conductor al paso de la corriente. Así pues, la expresión anterior toma esta forma, conocida como **ley de Ohm**:

$$\frac{V}{I} = R$$

La ley de Ohm puede generalizarse para un circuito entero, obteniéndose en este caso la **ley de Ohm generalizada**:

$$\frac{E}{I} = R$$

Se informa a continuación de que E es la fuerza electromotriz. Ha bastado sustituir diferencia de potencial por fuerza electromotriz y se ha conseguido la misma expresión pero mucho más general.

En algunos textos, para que no resulte tan arbitrario el nuevo carácter más general por el sólo hecho de cambiar de letra, o eso nos ha parecido, ya que nada se dice al respecto, aparece ahora una llamada fuerza contraelectromotriz, acerca de la cual no se dice casi nada coherente y a veces nada, sin embargo sus valores se calculan en una amplia serie de ejercicios.

Se habla en unos libros de la fuerza contraelectromotriz de un motor, en otros de la fuerza contraelectromotriz de un receptor, es decir, que aparecen una gama de fuerzas contraelectromotrices y cada estudiante habrá realizado cantidad de cálculos acerca de unas o de otras. Por ejemplo, nos podemos preguntar si, incluso un estudiante avanzado, sería capaz de identificar las siguientes definiciones de fuerza contraelectromotriz, si se las presentamos extraídas del libro en el que las estudio:

Fuerza contraelectromotriz (ε') de un motor es la disminución de energía que experimenta cada unidad de carga que pasa por él y que da lugar a un aumento de energía cinética.

(Hierrezuelo et al. 2002, pág 248)

Se llama fuerza contraelectromotriz de un receptor a la energía que transformada por unidad de carga, sin contar la disipada por efecto Joule.

(Fernández et al 2002, pág 146)

Posteriormente añaden los autores que la fuerza contraelectromotriz también se mide en voltios.

En el caso de los textos de nivel universitario el tema tampoco se trata bien, sólo de los siete de los textos analizados se refieren al asunto y en algún caso las líneas en las que se advierte la cuestión pueden quedar diluidas en el resto de la información. Tampoco suelen incluir los textos alguna actividad o ejercicio en el que los estudiantes tengan la posibilidad de recapitular esta información, por lo que la idea que se interioriza acaba siendo errónea. Hay algún libro prestigioso, concretamente el de Purcell (aunque no es el único) que en su segunda edición en castellano de 1992, editada por REVERTÉ, en la página 255 se refiere explícitamente a la relación $\mathbf{I} = \varepsilon/\mathbf{R}$, como ley de Ohm, lo cual nos parece un error grave.

5.1.2 G En relación con las medidas de la diferencia de potencial y la fuerza electromotriz

En física, un atributo de una magnitud es su medida experimental, por ejemplo la fuerza se mide con un dinamómetro, la temperatura con un termómetro, la intensidad con un amperímetro, la diferencia de potencial con el voltímetro, etc. ¿Cómo se mide el valor de una magnitud como la fuerza electromotriz, que como la diferencia de potencial, su unidad es el voltio? En las referencias a la cuestión se dice que con un voltímetro, pero...en “circuito abierto”, como si esto significara algo para los estudiantes no están familiarizados con el trabajo experimental con circuitos. Pero hay más, en circuito abierto se mide diferencia de potencial en los bornes de la pila, y ese valor coincide con el valor de la fuerza electromotriz de la pila. En relación con esto conviene no perder de vista que, si en un momento determinado medimos la aceleración de un móvil y es de $9,8 \text{ m/s}^2$ no decimos que hemos medido la aceleración de la gravedad.

No obstante, el 12% de los textos se refieren claramente a las medidas de fuerza electromotriz y proponen o describen un método para que los estudiantes, a nivel teórico, lo puedan realizar. En uno de estos textos al final de cada capítulo hay un apartado que se denomina “**Experimentos**”, y en el capítulo denominado “**Corriente continua**” se propone un experimento que se denomina: “Medida de fuerzas electromotrices”. Allí explícitamente se dice que el objetivo es “*medir el valor de la fuerza*

electromotriz de un generador a partir de una fuerza electromotriz conocida”. La secuencia incluye la descripción del material necesario y el procedimiento y análisis de los datos. Tal secuencia termina con una pregunta clave: *¿Por qué no es un procedimiento preciso medir la fuerza electromotriz de un generador por la diferencia de potencial entre los bornes de este?* (Olarte et al. 1985, p. 129)

Otro de los textos, bien valorado (Diez et al. 1978, p. 138)), que presenta la siguiente secuencia de apartados: **“5. Concepto de fuerza electromotriz”**, **“6. Ley de Ohm generalizada”**, **“7. Potenciómetro”**, en este último explicita: *“Es un aparato destinado a medir la fem de un generador sin que circule por él corriente ninguna”* Sobre el siguiente dibujo los autores realizan las explicaciones:

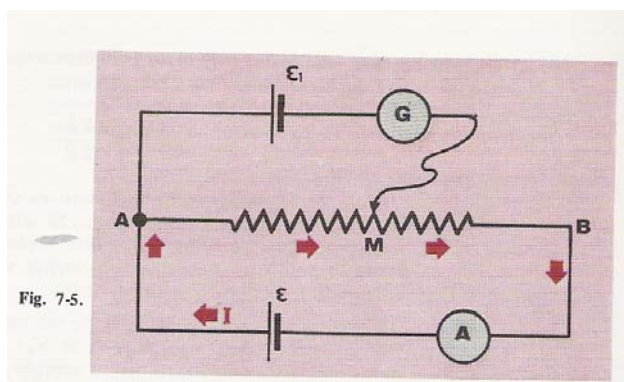


Fig. 7-5.

En un texto que hemos clasificado entre los que mencionan las diferencias entre las medidas de una y otra magnitud (Ruíz et al. 1988, p. 148), en una actividad al final del capítulo, los estudiantes deben distinguir entre fuerza electromotriz, fuerza contraelectromotriz, diferencia de potencial entre los polos de un generador y la diferencia de potencial entre los bornes de un receptor:

Señala en el recuadro correspondiente la respuesta correcta:

$\epsilon = \text{f.e.m. del generador}; V = \text{d.d.p. entre los polos}$			
Circuito abierto	$\epsilon < V$	$\epsilon = V$	$\epsilon > V$
Circuito cerrado	$\epsilon < V$	$\epsilon = V$	$\epsilon > V$
$\epsilon' = \text{f.c.e.m. del receptor}; V' = \text{d.d.p. entre los bornes}$			
Circuito abierto	$\epsilon' < V'$	$\epsilon' = V'$	$\epsilon' > V'$
Circuito cerrado	$\epsilon' < V'$	$\epsilon' = V'$	$\epsilon' > V'$

Nos ha parecido que una actividad de este tipo está más próxima a consideraciones de tipo experimental que de tipo teórico.

Incluso en los libros de nivel universitario sólo dos lo hacen. Es difícil encontrar claramente las razones de por qué la fuerza electromotriz debe medirse comparando con

el valor de una pila patrón, y sin que la corriente pase por la pila cuya fuerza electromotriz se quiere conocer. Lo explica con claridad el libro de Sears y Zemansky (1966), en la página 602.

5.1.2 H Interpretaciones o justificaciones a nivel cualitativo en términos de fuerza electromotriz y/o diferencia de potencial.

No se encuentran menciones en este sentido, en las que los conceptos de fuerza electromotriz y diferencia de potencial vayan más allá de las referencias en términos energéticos y que ya hemos considerado cuando analizábamos la necesidad de introducir los conceptos de fuerza electromotriz y diferencia de potencial. La fuerza electromotriz en relación con la energía que se transforma en el generador y la diferencia de potencial en relación con la energía que se transforma en el resto del circuito. Cuando un aspecto como este no suele tratarse en los textos universitarios, lo hacen cinco de 33, alguno de ellos a partir de analogías que no son fáciles de interpretar lo normal es que el asunto no llegue a los textos de Secundaria.

5.1.2. I Análisis acerca de la diferenciación entre los niveles macroscópico y microscópico

El 93% de los textos analizados no suelen hacer distinciones explícitas entre los niveles de las descripciones y/o explicaciones macroscópicas y microscópicas. Por el contrario suelen mezclarse explicaciones (en cualquier nivel) con las descripciones del funcionamiento. Es en relación con este aspecto, las interpretaciones de los fenómenos eléctricos, que tienen su origen una buena parte de los errores que se transmiten en la enseñanza, por parte de los libros que hemos analizado. Veamos algunos ejemplos, bastante representativos de las ideas que se exponen en el resto de los libros:

Uno de ellos, en el apartado “**Concepto de fuerza electromotriz**”, al referirse a la necesaria distinción entre fem y d.d.p. puede leerse:

“El que dos magnitudes se midan con la misma unidad no implica que sean conceptos físicos iguales, ya que el voltio, como unidad de fem, lo podemos definir como la fuerza electromotriz de un

generador que consume la energía de un julio para suministrar al circuito una carga de un culombio, y el voltio, como unidad de diferencia de potencial, es la diferencia de potencial entre dos puntos tales que al trasladarse de uno a otro una carga de un culombio realiza el trabajo de un julio". (Diez et al. 1978, p. 134)

Según lo que se afirma en el apartado anterior, y al margen de otras consideraciones, la pila suministra cargas al circuito. Esta es una idea que manifiestan los estudiantes y si bien en algunos casos puede deberse a una enseñanza en la que, tras la introducción de un concepto importante, como no suele evaluarse de inmediato lo que se ha entendido, puede suceder que los estudiantes hayan terminado por formarse ideas no expresamente utilizadas por textos o profesores; en otros casos se ve claramente que los errores se deben a libros que los han propiciado.

Hay aún otra potencial fuente de error en el párrafo anterior, en el que explícitamente se afirma que la carga puede realizar trabajo, ¿sobre qué? ¿Sobre sí misma? Estas son cuestiones que no se puede dejar que las interpreten los lectores del libro.

Otro ejemplo ilustrativo, en la misma dirección que el anterior, es el siguiente, en el que los autores presentan una serie de peculiaridades a la hora de tratar el concepto de fuerza electromotriz que merece la pena señalar:

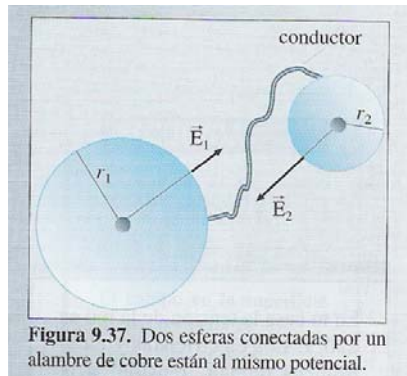
"Fuerza electromotriz, f.e.m., de un generador, ϵ , es el trabajo que realiza el generador por cada unidad de carga que lo atraviesa".

La definición tiene una redacción que puede dar lugar a errores. El primero de ellos es el que deriva de la idea: *"el trabajo que realiza el generador"*. Podemos preguntarnos ¿El trabajo que realiza el generador sobre qué? Ni de la definición ni de los párrafos que siguen en el texto se puede responder esta pregunta.

Otro error grave y generalizado es mezclar y confundir las descripciones de los fenómenos observables con las explicaciones de tales fenómenos desde la perspectiva de las teorías acerca de la materia. Por ejemplo, de un metal concluimos que conduce la electricidad porque si lo conectamos a los electrodos de una pila, por ejemplo, podemos observar que aumenta su temperatura. No podemos decir que un metal conduce la electricidad en un circuito porque tiene electrones libres que pueden moverse, esto

pertenece al ámbito de las explicaciones de lo que es “la conducción de la electricidad”. Las explicaciones a los hechos y fenómenos científicos no son las razones por las que tienen lugar dicho fenómenos. Cuando se dice en un texto:”*El trabajo que realiza el generador por cada unidad de carga que lo atraviesa*” se están mezclando, de forma que el estudiante no puede discriminarlo, los niveles macroscópico y microscópico.

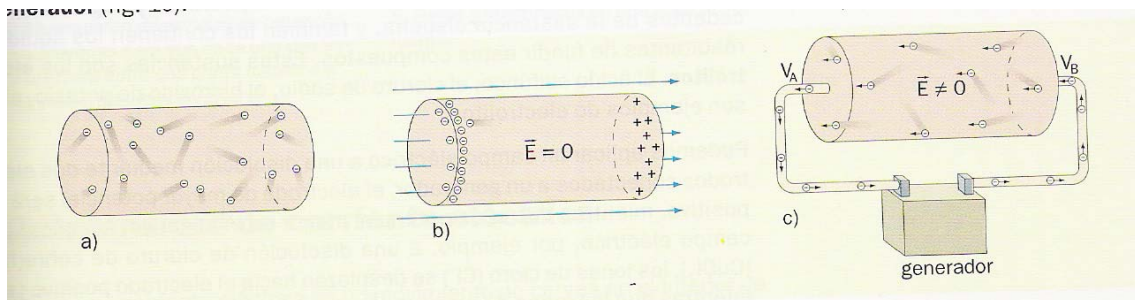
En el tema de Electroestática sí suelen incluirse dibujos y esquemas para ilustrar y explicar las declaraciones teóricas del texto, pero luego esta información prácticamente no se conecta con las explicaciones acerca del funcionamiento de los circuitos. Por ejemplo el siguiente es un dibujo que ilustra una idea interesante en torno a la diferencia de potencial:



(Galindo et al. 2000, p. 161)

Es una idea interesante porque a partir de ella puede explicarse que si las esferas tienen distinto potencial entonces las cargas circularan por el hilo de cobre, lo que es una idea clave a la hora de conectar la Electroestática y la teoría de circuitos a nivel de las explicaciones microscópicas.

Un texto que hemos evaluado como “menciona”(Dou et al. 1999, p. 171)) es porque incluye la siguiente serie de dibujos:



En la serie se relacionan los conceptos de campo carga y diferencia de potencial entre los bornes de una batería. El texto de la serie de dibujos es el siguiente:

- a) *Las cargas eléctricas libres en los conductores se mueven al azar.*
- b) *Al aplicar el campo eléctrico, las cargas se desplazan hasta que éste se anula en el interior del conductor.*
- c) *Para mantener una corriente eléctrica permanentemente hay que aplicar una diferencia de potencial constante entre los extremos del conductor.*

La información se repite tal cual en el texto principal y es la única referencia a la idea de la que nos estamos ocupando. No se explica cómo es que el generador mantiene la diferencia de potencial constante, ni siquiera por qué crea inicialmente una diferencia de potencial entre sus bornes. Esta suele ser la tónica en la práctica totalidad de los textos analizados.

Una vez más el que sólo el 12% de los textos universitarios se ocupen del tema da lugar a que la ausencia sea también generalizada en los textos de Secundaria.

5.1.2. J Análisis de las implicaciones CTS en relación con el uso de las pilas

Si bien una buena parte de los textos, en los capítulos de Electricidad, incluyen información acerca de las relaciones CTS, por ejemplo en relación con las aplicaciones de la Electricidad, la seguridad de las instalaciones domésticas, descripción de generadores a partir de las llamadas “energías renovables”, etc.; en relación con el uso y desecho de las pilas, sólo el 7% de los textos de Secundaria analizados se refieren explícitamente a este aspecto, uno de ellos publicado 1991 para 2º de BUP (Escudero et al), en el que se advertía de los efectos contaminantes del uso indiscriminado de las pilas y otro publicado en 1995 para el actual Bachillerato (Andrés et al.). El primero incluía las referencias en la información complementaria del final del tema y el de Bachillerato la incluía en el apartado 3 “Acumuladores” del tema “**Generadores y aparatos de medida de la corriente**”, como información “principal”. El siguiente es el esquema presentado en el libro en cuestión (página 186):

QUÉ HACER CON LAS PILAS	
Tipo	Basura SI/NO
Botón. Llevan marcas como (+), Hg, M, Mercury	NO. Entregar para reciclado
Alcalinas. Llevan marcas como Alkaline, Alkali	NO. Entregar, necesitan vertedero especial
Recargables. Llevan marcas como Ni-Cd, Nickel-Cadmium	NO. Entregar para reciclado
Salinas. Llevan marcas como Multi-Use	SI. Ante la duda, es mejor entregarlas
Verdes. Llevan marcas como Sin mercurio, Sin cadmio	SI. Ante la duda, es mejor entregarlas

como síntesis de una información pormenorizada en la que los autores se han venido refiriendo a los materiales contaminantes que entran a formar parte de pilas y acumuladores, tales como plomo, mercurio, cadmio, metales pesados, etc.

Pensamos no obstante que se hace necesario señalar que entre los años setenta y ochenta el uso de las pilas era muy limitado, sin ir mucho más allá de linternas o radio-transistores portátiles, por lo que los problemas derivados de su empleo masivo no se hacen patentes hasta principios de los años noventa.

5.1.3. Resumen de los resultados obtenidos en el análisis de libros de texto

Los resultados obtenidos son convergentes en mostrar que los libros de texto presentan graves carencias epistemológicas y didácticas en la presentación y desarrollo del concepto de fuerza electromotriz en un contexto de circuitos sencillos de corriente continua. Así pues, se confirman las consecuencias enunciadas en la hipótesis. Estas deficiencias se concretan en:

- a) Una minoría de libros de texto, de los niveles analizados, justifican explícitamente la necesidad de introducir la magnitud fuerza electromotriz para

explicar la separación de cargas necesaria para producir una diferencia de potencial entre los bornes de una pila en un circuito sencillo de corriente continua. En concordancia con el resultado anterior, ninguno de los libros de texto de Secundaria ni el 64% de los libros de Universidad se refieren de forma explícita a la necesidad de utilizar el concepto de fuerza electromotriz en el modelo explicativo del funcionamiento de un circuito de corriente continua (5.1.2 C).

- b) En realidad la necesidad de emplear el concepto de fuerza electromotriz implica: Referirse al ámbito de aplicación del concepto y a su naturaleza como una propiedad característica de la pila o generador. Sin embargo, hemos visto como sólo una minoría de libros de texto abordan explícitamente esta cuestión. Muy pocos libros de texto tanto a nivel de Secundaria como de Universidad se refieren a la relación entre el concepto de fuerza electromotriz y la naturaleza no conservativa de las fuerzas que actúan en el interior de una batería. Esta falta de precisión en la naturaleza de la fuerza electromotriz supone también:
- c) Que sólo una minoría de libros de texto explican suficientemente la diferencia entre fuerza electromotriz y diferencia de potencial (5.1.1 E 2% Secundaria y 18% en Universidad; 5.1.2 D. 10% en Secundaria y 33% en Universidad), a pesar de que esta diferenciación es clave para realizar el análisis energético de un circuito y contestar a la pregunta: ¿Qué hace una pila para mantener una corriente continua en el circuito? La mayoría de los libros de texto reducen las diferencias entre las dos magnitudes a la diferencia entre sus valores comparando las diferentes ecuaciones que describen el circuito de corriente continua. De hecho cuando abordan esta diferencia con la ecuación del circuito y la ley de Ohm la mayoría de las exposiciones tienden a sustituir magnitudes de fuerza electromotriz por diferencia de potencial y viceversa, sin explicaciones (5.1.2 F: 100% y 21% en Universidad). Sin embargo, tampoco cuantitativamente queda explicada claramente las razones de por qué la fuerza electromotriz debe medirse comparando con el valor de una pila patrón, y sin que la corriente pase por la pila cuya fuerza electromotriz se quiere medir (5.1.2 G: 12% en Secundaria y 6% en Universidad).
- d) La falta de un tratamiento específico para distinguir entre diferencia de potencial y fuerza electromotriz se puede enmarcar en un contexto más amplio de una carencia más grave, la ausencia de un tratamiento específico para el vínculo

entre los conceptos explicados en electrostática y los conceptos del modelo explicativo de circuitos sencillos de corriente continua (electrocinética). Sólo una minoría de textos realizan un tratamiento explicativo específico para unir explícitamente conceptos como campo eléctrico conservativo, diferencia de potencial –explicados en electrostática- con conceptos como fuerza electromotriz, corriente eléctrica, voltaje utilizados en electrocinética para explicar el funcionamiento del circuito (5.1.1 A: 7% en Secundaria y 27 % en Universidad). Sin embargo, esta relación es fundamental para entender de forma significativa el modelo explicativo de funcionamiento de un circuito de corriente continua que relaciona conceptos como campo eléctrico y movimiento de electrones (nivel microscópico) con conceptos como diferencia de potencial y fuerza electromotriz (nivel macroscópico). Sólo una minoría de textos universitarios abordan esta importante problemática y sólo alguno lo menciona en Secundaria (5.1.2 I: 7% en Secundaria y 12% en Universidad).

- e) En relación con las implicaciones entre la Ciencia, la Tecnología y la Sociedad, señalar que: sólo el 7% de los textos de Secundaria se refiere a las implicaciones medioambientales del empleo generalizado de las pilas; ni uno sólo de los textos en los niveles universitarios, lo que podría comprenderse en algunos de ellos, pero no en todos ellos.
- f) Por último merece la pena destacar como, en un intervalo de tiempo de veinticinco años, el esquema conceptual que se ofrece a los estudiantes prácticamente no se ve alterado, los resultados de la investigación didáctica no se incorporan al elenco conceptual de los libros de texto, la renovación se reduce, en la mayor parte de los casos, a las técnicas de impresión.

En resumen, la gran mayoría de los libros de texto, tanto a nivel de Secundaria como de Universidad no abordan el modelo explicativo de un circuito de corriente continua de forma didácticamente coherente, es decir, la explicación a la pregunta ¿Qué hace una pila para mantener una corriente continua en el circuito?, no se aborda como un problema complejo que exige relacionar conceptos a nivel microscópico y macroscópico. Esto último implica la necesidad de una definición significativa del concepto de fuerza electromotriz y su diferenciación clara respecto a otros conceptos como diferencia de potencial, que también son esenciales en la construcción del modelo explicativo. Modelo explicativo que, como ya hemos mostrado en otras partes de este

trabajo, ni es sencillo ni fue fácil su construcción a lo largo de la historia de la electricidad. Sin embargo, parece que los libros de texto subestiman su importancia y lo reducen a la explicación rápida de unas cuantas fórmulas que cuantifican aspectos del balance energético del circuito.

5.2. Resultados obtenidos al analizar las carencias relativas a la enseñanza del concepto de fuerza electromotriz, observadas en profesores

El diseño experimental elaborado para contrastar las consecuencias epistemológicas y didácticas de nuestra primera hipótesis (consecuencias contrastables desde A1 a A3 y desde B1 a B4 respectivamente, que se encuentran en el apartado 4.2), se concretó en los contenidos de los cuadros 4.6 y 4.7. En el transcurso de las entrevistas, junto a las respuestas a los cuestionarios, el profesorado nos brindó información acerca de las estrategias y formas de evaluación que empleaban con sus estudiantes.

Como señalamos en el capítulo anterior, las entrevistas se realizaron con seis profesores que impartían clases en el nivel universitario y con ocho profesores del nivel de Secundaria. De los profesores universitarios, cada uno de ellos tenía en su poder el cuestionario e iba respondiendo a los distintos aspectos del mismo. El investigador a su vez iba pidiendo las aclaraciones o matices oportunos a las repuestas que ofrecían los profesores y todo ello se grababa en cinta magnetofónica. Dos profesores prefirieron contestar por escrito primero y mantener posteriormente la entrevista en torno a sus respuestas. Los profesores de Secundaria contestaron todos por escrito y luego mantuvimos la entrevista, en el curso de la cual el investigador fue preguntando por aquellos aspectos que entendía que merecían matizarse o aclararse más.

Seguidamente, se muestran los resultados obtenidos (en función del tipo de deficiencias observadas), de acuerdo con los protocolos correspondientes a esos documentos.

5.2.1 Resultados relativos a las carencias epistemológicas detectadas en la introducción de los contenidos.

En este apartado se muestran los resultados que se obtuvieron en el curso de las entrevistas, tras analizar las respuestas al cuestionario. Se han venido señalando expresamente si las respuestas eran ofrecidas por un profesor de nivel universitario o de nivel de Secundaria, si bien en muchos casos uno y otro tipo de respuestas apuntan en la misma dirección, los matices diferentes nos ha parecido que deberían señalarse.

5.2.1 A En relación con el recurso a la historia de los conceptos y en concreto del concepto de fuerza electromotriz

Como señalamos en el capítulo cuatro (cuadro 4.6), históricamente la primera dificultad en el establecimiento del concepto era vincularlo con la teoría general de la Electricidad, que era la Electroestática. El concepto lo introduce Volta y posteriormente, cuando se descubre la inducción Faraday vuelve a retomarlo, la vinculación de este ámbito con la Electroestática de nuevo es problemática. El marco que proporcionan las interpretaciones emergentes, en términos de Energía y Campo, terminan por vincular convenientemente el concepto de Fuerza electromotriz con el resto de las magnitudes implicadas en las interpretaciones Electromagnéticas (consecuencias contrastables A1 y A3). Veamos algunas respuestas de los profesores a la cuestión planteada:

Ejemplo 1A:

“Si, yo siempre le doy un enfoque histórico a los temas que explico, en lugar de partir de un concepto axiomático, ecuaciones de Maxwell por ejemplo, parto del discurso histórico para explicar el origen de la fuerza electromotriz, a partir de las experimentos de Faraday, básicamente porque los alumnos no tienen conocimientos previos de la cuestión y entonces realizar un desarrollo axiomático, como digo, del Electromagnetismo a partir de las Ecuaciones de Maxwell es muy duro para los alumnos. Parto por tanto del desarrollo histórico, es decir, parto del origen, cómo se plantea...este es el enfoque que suelo darle...” (Profesor universitario)

Ejemplo 2A:

“Es deseable y siempre que es posible se hacen referencias a cuestiones de tipo histórico, pero ni el tiempo disponible ni la motivación de los alumnos da mucho pie a que este aspecto se pueda tratar de manera sistemática” (profesor de Bachillerato)

Como se desprende de las respuestas anteriores, los profesores no concretan ninguno de los aspectos problemáticos en relación con la génesis y evolución del concepto de fuerza electromotriz. La historia a la que hacen referencia es una historia descriptiva y no una historia de los problemas a superar. Uno de ellos nos había dejado una copia del material que entregaba a sus estudiantes y no era otra cosa que una síntesis de la historia de la electricidad que empieza por las observaciones de las atracciones con la piedra imán y que a lo largo de seis folios hacia una descripción de las distintas aportaciones que se han venido considerando hitos.

También nos parece destacable el hecho de que para algunos de los profesores la fuerza electromotriz es algo que tiene su origen en las experiencias de Faraday, lo cual es algo que se detecta con cierta frecuencia en las referencias históricas del concepto, que ignoran las aportaciones de Volta.

Para los profesores encuestados la descripción de las experiencias de Faraday y su matematización subsiguiente en términos de flujo que varía con el tiempo o la síntesis de la historia que entregaban a sus estudiantes era toda la concreción de la historia en sus programaciones. La respuesta siguiente, ofrecida por otro de los entrevistados, es ilustrativa de esto que decimos:

Ejemplo 3A:

“Bueno, la historia de la Electricidad tiene su interés, pero en este nivel se supone que los interesados pueden informarse bien mediante textos, bien recurriendo a Internet, muchas cuestiones son bien conocidas por ellos, por ejemplo los alumnos han visto en numerosas ocasiones cómo se construye una pila similar a la de Volta, en sus libros de texto de cursos anteriores. Si entramos en otros pormenores el escaso tiempo disponible dejaría seriamente tocados los programas...” (Profesor universitario).

5.2.1 B En relación con las referencias a la problemática que se va a tratar a lo largo del tema o del capítulo

¿Qué problemas, interrogantes, conceptos se van a construir, describir, relacionar a lo largo del tema? ¿Hay conexiones problemáticas o no con conceptos de temas anteriores o siguientes? ¿Se plantean estas cuestiones antes de comenzar el tema del estudio de la corriente continua en circuitos? O por el contrario ¿se trata de una exposición lineal de conocimiento siguiendo la lógica interna de los programas de las asignaturas? (consecuencia contrastable A2) Estas eran algunas de las preguntas que subyacían a la pregunta tal como la formulábamos a los profesores encuestados. En el curso de la entrevista hicimos las aclaraciones oportunas, pero en casi todos los casos, la introducción problemática a la que nos referíamos parecía entenderse como algo similar a las introducciones que suelen presentar los capítulos de los libros de texto al comienzo de cada uno de los temas.

Ejemplo 5A:

“Bueno, yo me he venido preocupando de que los estudiantes tengan el primer día de clase el temario, ahora pueden descargarlo de la página Web. El temario deja claro las relaciones entre los temas, la secuencia y concatenación de los mismos, esto no suele ser algo problemático.” (Nivel universidad)

Ejemplo 6A:

“Si te refieres a la conexión con las aplicaciones tecnológicas, este es un curso de Electromagnetismo general, posteriormente tienen opciones de profundizar en otras asignaturas del Departamento con unos contenidos muy actualizados...” (Nivel universidad)

Ejemplo 7A:

“Tu ya sabes la disponibilidad de tiempo con el que contamos...además se da el caso de estudiantes que están en la opción de ciencias (se refiere a la opción de ciencias en el Bachillerato) y no han cursado física y química desde tercer curso de la ESO, por lo que en ocasiones el escaso tiempo hay que dedicarlo a repasar algunas cuestiones de cursos anteriores. Además determinado tipo de cosas para qué plantearlas, el nivel de motivación es el que es...” (Nivel Secundaria)

Ejemplo 8A:

“Soy consciente de algunos problemas, por ejemplo, la conexión con la Electrostática, pero aun no he abordado una alternativa con los alumnos” (Nivel Secundaria)

Las respuestas anteriores, nos parecen representativas del modo de pensar de los profesores encuestados. En el nivel universitario se apuntan fundamentalmente dos cuestiones, por una parte un sí el “programa” es conocido por los estudiantes los problemas que pudieran plantearse en relación con las relaciones entre los conceptos deberían estar minimizados. Parecería que la relación “natural” entre los conceptos viene dada por sus relaciones dentro del “programa”. Por otro lado, los problemas que pudieran plantearse están más relacionados con la formación inicial de los estudiantes.

En el caso de la Secundaria, las referencias a situaciones problemáticas vienen limitadas por la disponibilidad de tiempo, el nivel de los estudiantes y la motivación de los mismos. Sólo alguno, cuando en el curso de la entrevista se insistió y se ejemplificó acerca de la problemática se admitieron dificultades por resolver (ejemplo 8A).

5.2.1 C En relación con la “importancia” de los conceptos diferencia de potencial y fuerza electromotriz a la hora de interpretar los circuitos eléctricos

En las explicaciones acerca del funcionamiento de lo que llamamos circuito, decimos que la corriente se establece entre dos puntos que están a diferente potencial,

hasta que los potenciales se igualan. Mantener una corriente constante, implica mantener constante la diferencia de potencial; en relación con la separación de cargas necesarias como para que esto se produzca, tiene su lugar el concepto de fuerza electromotriz. Las relaciones entre estos tres conceptos, con frecuencia no se encuentran suficientemente clarificadas en los libros de texto a ningún nivel (consecuencias contrastables A2 y A3), por lo que la intervención del profesorado en este sentido cobra un papel relevante.

Ejemplo 9A:

“Ambos conceptos tienen gran importancia, realmente el concepto de fuerza electromotriz es un concepto fundamental en todo en el desarrollo posterior del Electromagnetismo... diferenciar entre el concepto de diferencia de potencial electrostático, como la diferencia de energía potencial a nivel electrostático del concepto de fuerza electromotriz como aquello que es responsable de una corriente eléctrica, debe quedar bastante claro, tiene mucha importancia ya que el desarrollo posterior de muchos conceptos del Electromagnetismo están basados en esto...”(Profesor universitario)

Ejemplo 10A:

“El concepto de fuerza electromotriz, forma parte de una de las ecuaciones de Maxwell, la importancia de dicho concepto viene subrayada por un hecho como este” (Profesor universitario)

Ejemplo 11A:

“Forman parte importante de la mayor parte de los cálculos en los ejercicios de circuitos, los alumnos no suelen tener problemas serios con esto, siempre que se hayan resuelto algunos ejemplos” (Profesor Bachillerato)

Ejemplo 12A:

“En realidad el concepto de fuerza electromotriz casi no es necesario, con el de diferencia de potencial es suficiente, de hecho las preguntas que en este sentido se formulan a los estudiantes no van mucho más allá de que calculen el valor de la fem en circuito abierto...A nivel cualitativo yo les insisto en que la fuerza electromotriz en realidad no está relacionada con fuerza sino con energía” (Profesor Bachillerato)

No hay grandes diferencias, desde el punto de vista epistemológico, entre las respuestas anteriores. La importancia de los conceptos se establece con relación a su inclusión o no en ecuaciones matemáticas que, posteriormente permitirán la resolución de ejercicios del final de capítulo y mucho menos en relación con sus atributos a nivel cualitativo que, las hace necesarias para explicar las relaciones entre las descripciones globales que construyen los científicos. Esto contrasta con algunas afirmaciones, en las que algunos se lamentan de que los estudiantes no tengan una visión global de la asignatura incluso una vez aprobada.

5.2.2 Resultados relativos a deficiencias didácticas detectadas en las estrategias utilizadas para la introducción de los contenidos

En este apartado se muestran los resultados obtenidos tras analizar el cuestionario que se presentó en el cuadro 4.7. En el curso de las entrevistas se pedían al profesorado las aclaraciones o matices que nos permitiesen la confirmación de algunos extremos.

5.2.2 A En relación con la toma en consideración de las concepciones alternativas de los estudiantes

Merece la pena señalar una vez más que, la línea de investigación en relación con las dificultades de los estudiantes, ha mostrado unos resultados indiscutibles, que ponen de manifiesto que el problema no se restringe a los niveles de Secundaria, se trata de dificultades de un ámbito mucho más general que afecta incluso a sectores del profesorado de todos los niveles. La toma en consideración o no, entra de lleno en el espacio de las consecuencias contrastables B1 y B2.

Ejemplo 1B:

“No entiendo qué quieres preguntar, lo que entiendes por “concepciones alternativas”... (Lo aclaramos y el profesor sigue con su respuesta)...”el concepto de diferencia de potencial los alumnos si entienden lo que es. En relación con el concepto de fuerza electromotriz, sin embargo, no tienen idea clara de lo que es” (profesor universitario)

Ejemplo 2B:

“¿Concepciones alternativas que interfieren con el aprendizaje? No, no tienen ideas de ese tipo...si yo tuviera aquí en Físicas, a los estudiantes de Fisioterapia, los únicos que se saben bien la física del Bachillerato, la cosa iría como una seda, como va allí. Estudiantes que siguen perfectamente las explicaciones y aprueban mayoritariamente. Allí la nota de corte está ahora por encima del 7; aquí se matriculan alumnos que incluso no aprobaron la selectividad en junio” (Profesor universitario)

Ejemplo 3B:

“Hoy una buena parte los libros de texto ya te hablan de ideas previas. Es un problema de libros de texto que es la herramienta más común entre los estudiantes” (Profesor Bachillerato)

Ejemplo 4 B:

“Nosotros seguimos un texto con una guía del profesor que no es una mero solucionario de los ejercicios, y que indica cuales son las ideas alternativas y dificultades de aprendizaje de los estudiantes en relación con muchos de los conceptos que se estudian” (Profesor Bachillerato)

El profesorado universitario se desenvuelve entre el desconocimiento, y por tanto la no consideración en su práctica docente (consecuencia contrastable B1), de lo que venimos denominando como “concepciones alternativas”. Las dificultades de aprendizaje de los estudiantes, se vinculan exclusivamente a la capacidad de estos para seguir sus explicaciones, lo cual no deja de ser algo etéreo, pero que viene confirmado por la capacidad también de los que no las tienen, para aprobar unos exámenes de escaso contenido procedimental, en el que los estudiantes tengan que realizar/ resolver planteamientos cualitativos de problemas, emisión de hipótesis, análisis de resultados, etc. (consecuencias contrastables B2 y B3))

Entre el profesorado de Secundaria, las ideas alternativas de los estudiantes parecería que se tienen en consideración si en alguna medida las tiene en consideración el libro de texto.

Cuando no obstante preguntamos si realizaban algún tipo de prueba para informarse de las potenciales dificultades de los estudiantes, bien de tipo procedimental, ya en relación con los conceptos:

Ejemplo 5B:

“¿Pruebas?... ¿de qué tipo?(Aclaremos que algún tipo de pruebas escritas o cuestionarios)...No nunca (profesor universitario)

Ejemplo 6B:

“Tu ya sabes que se solía pasar una prueba inicial cuando los alumnos nos llegaban al Instituto, hoy día esto carece de sentido porque a los alumnos los tenemos en el centro desde los 11 años y los profesores los tenemos como compañeros en el centro” (Profesor Bachillerato)

Ejemplo 7B:

“Tengo que reconocer que en alguna ocasión he puesto especial énfasis en averiguar si mis alumnos tenían las dificultades que señalaban los autores del libro, después de que yo hubiese explicado con especial interés algunos de los conceptos problemáticos y he descubierto que sí, lo cual no dejó de sorprenderme. Suelo leer con atención estas cosas en la guía para el profesor” (Profesor Bachillerato)

Las respuestas de los ejemplos anteriores son convergentes con las respuestas de los ejemplos de 1B a 4 B. Es una exigua minoría, la que se informa siquiera de manera superficial sobre las concepciones e ideas alternativas de los estudiantes en cualquiera de los niveles docentes.

5.2.2 B En relación con las dificultades para la enseñanza de los conceptos de diferencia de potencial y fuerza electromotriz y su diferenciación.

Aunque pueda parecer redundante, en el caso de las nociones en cuestión, forma parte importante del aprendizaje, y por tanto debería contemplarse desde la enseñanza, la diferenciación de ambos conceptos. Preguntamos a los profesores por las dificultades que suelen plantearse cuando abordan la tarea de enseñar estos conceptos, de uno y de otro y de sus relaciones.

Ejemplo 8B:

“Es una pregunta que podía uno tirarse una hora contestándola. Antes no había problemas, pero las generaciones que llegan cada vez los entienden menos...El Electromagnetismo es muy conceptual y cada vez el nivel de comprensión abstracta de los alumnos es cada día menor, por lo que cada vez les cuesta más entender un concepto abstracto, y esto es algo alarmante” (profesor universitario)

Ejemplo 9B:

“Hace unos años todo esto se entendía mejor, de un tiempo a esta parte dudo que los alumnos se hayan enterado de lo que es la fuerza electromotriz o cualquier otro concepto. El nivel de razonamiento abstracto es muy bajo” (profesor universitario)

Los ejemplos anteriores apuntan en la misma dirección, a la pregunta concreta acerca de la distinción entre los conceptos de fuerza electromotriz y diferencia de potencial, estos profesores responden con generalidades. En relación con sus afirmaciones acerca de que “Hace unos años los estudiantes comprendían más y ahora comprenden menos, su nivel de razonamiento abstracto es muy bajo...” No se ofrecen datos concluyentes ni estadísticas de respuestas a preguntas de pruebas o exámenes a lo largo de los cursos a los que se hace referencia, ni en relación con estos conceptos ni en relación con otros que evidencien ese bajo nivel de “razonamiento abstracto”.

Tratamos de concretar algo más y preguntamos si se proponen actividades o se contemplan en los apuntes de forma explícita o en las explicaciones de clase, referencias a las diferencias entre fuerza electromotriz, voltaje, diferencia de potencial y tensión y si formaban parte de las preguntas que se proponían a los estudiantes en los exámenes:

Ejemplo 10B:

“Raro es el examen en el que en ese concepto no insistí. Básicamente la importancia del concepto de fuerza electromotriz es que luego se transforma en una de las ecuaciones de Maxwell que están fuera

incluso del soporte material. El concepto de fuerza electromotriz de Faraday.. se trasciende con el concepto de fuerza electromotriz de Maxwell que es mucho más abstracto, alejado del soporte material, más abstracto, y más general yo siempre les he insistido mucho en eso...en lo que significa la fuerza electromotriz como creación de un campo no conservativo...de todas formas esto no es un concepto fácil, no es concepto simple” (nivel universidad)

Ejemplo 11B:

“Son conceptos que se estudian en temas diferentes, uno casi al principio del curso y otro bien avanzado este. No es como en el Instituto. Un estudiante de este nivel tiene capacidad para resolver una cuestión como esta de manera autónoma. Maneja un nivel de conocimientos y tiene conocimientos de una bibliografía a la que recurrir” (nivel universidad)

Ejemplo 12B:

“Los alumnos confunden ambas magnitudes porque las unidades en que se miden son las mismas, básicamente por esto. Pasa lo mismo con el trabajo y la energía que los alumnos tienden a confundir lo que es trabajo y lo que es energía porque las unidades son las mismas.” (nivel secundaria)

Ejemplo 13B:

“La verdad es que nunca me ha parecido una cuestión con la suficiente entidad. Los alumnos tienen que aprendérselo de memoria. En el marco de los ejercicios numéricos si se ponen apartados en los que deben calcular valores de diferencia de potencial entre dos puntos, el valor de la fuerza electromotriz para una diferencia de potencial y un valor de la resistencia interna, el valor de la fuerza contraelectromotriz... Aquí si se pregunta por los valores de ambas magnitudes.” (nivel secundaria)

Como veremos más adelante muy pocos de los estudiantes encuestados, saben establecer diferencias entre los conceptos de fuerza electromotriz y diferencia de potencial. En nuestro análisis de las deficiencias de tipo didáctico los ejemplos 12B y 13B anteriores, dejan claro que los profesores, de ningún nivel de enseñanza, les han instruido y mucho menos preguntado explícitamente a sus estudiantes sobre las diferencias entre ambos conceptos. De nuevo los argumentos apuntan en las dirección de validar las consecuencias contrastables A2, A3 y B1), es decir, cada uno de los conceptos se estudia en su tema correspondiente, según la lógica interna de los programas de los textos clásicos, allí se proporciona la información y la instrucción correspondiente, a partir de la cual se supone que los estudiantes han adquirido las destrezas y capacidades par resolver interrogantes y problemas como este.

Señalar también que, a pesar de formar parte del cuestionario escrito y de nuestra insistencia en la entrevista, no se hizo referencia a los términos voltaje y tensión.

Por último, nos llamó la atención que cuando hicimos referencia a algún tipo de actividad o explicación para explicar las diferencias entre ambos conceptos, no surgiera espontáneamente si se hacían o no prácticas de laboratorio. Lo preguntamos expresamente y entonces obtuvimos las siguientes respuestas:

Ejemplo 14B:

“Eso te iba a comentar ahora...Hay prácticas de laboratorio, de hecho son obligatorias y hay que aprobarlas como condición previa antes de hacer el examen final de la asignatura. Una de las cosas que tienen que hacer es determinar la fuerza electromotriz de una pila y diferenciar entre lo que es diferencia de potencial de un circuito y lo que es la fuerza electromotriz en el circuito, es una práctica específica para eso” (profesor universitario)

Ejemplo 15B:

“No tiene sentido entrar en las diferencias entre fuerza electromotriz y diferencia de potencial, y mucho menos hacer prácticas porque cuando se miden una y otra el aparato de medida nos da una cantidad en voltios, esto yo creo que es contundente.” (Profesor universitario)

Ejemplo 16B:

“Esta es una práctica difícil que además de llevar tiempo habría que hacerla con casi treinta alumnos en la clase, lo que lo hace prácticamente inviable” (Profesor Bachillerato)

Los datos obtenidos apoyarían las consecuencias contrastables B3 y B4.

5.2.2 C En relación con las causas que dificultan el proceso de enseñanza del concepto de fuerza electromotriz

Los profesores se han referido a ciertas dificultades de los estudiantes para seguir sus explicaciones en relación con los conceptos objeto de nuestra investigación, a pesar de la ambigüedad de sus declaraciones, tratamos de esclarecer el origen de tales dificultades. El concepto de diferencia de potencial está emparentado con los conceptos de campo electrostático, energía y carga y el de fuerza electromotriz con el de campo eléctrico no conservativo, transferencias de energía en este tipo de campos y con el concepto de carga. Esperábamos que los profesores nos hablaran de las dificultades que habían percibido entre sus estudiantes cuando les explicaban en torno a estas diferencias. Del mismo modo esperábamos referencias concretas a las dificultades de los estudiantes cuando las diferencias entre ambas magnitudes hubiesen de ser expresadas en el lenguaje del álgebra vectorial. Todo esto tuvimos ocasión de concretarlo en el curso de las entrevistas.

Ejemplo 17B:

“Hay aquí dos tipos de razones, por una parte los estudiantes tienen poca costumbre de enfrentarse con razonamientos abstractos, las últimas promociones no tienen capacidad de razonamiento abstracto, son incapaces de pensar sobre una situación que no tenga un soporte inmediato, tienen muy poco entrenamiento en ese sentido. Otra herramienta que les falla mucho es la herramienta matemática, en los desarrollos matemáticos se atascan de una forma cada vez mayor” (profesor universitario)

Ejemplo 18B:

“Las dificultades que yo observo no se limitan al concepto de fuerza electromotriz. El concepto de Entropía, el vector de Pointing o cualquier otro concepto que se salga de lo que es muy evidente de forma experimental directa, es con frecuencia una dificultad casi insalvable por parte de los alumnos. De hecho el índice de abandonos en los primeros cursos de nuestra carrera es importante” (profesor universitario).

La incapacidad de razonamiento abstracto por parte de los estudiantes es una dificultad para enseñarles y el origen hay que buscarlo en la poca costumbre de razonar sobre conceptos abstractos y en la falta de pericia con las matemáticas, la poca “base matemática” del alumnado. Lo que de nuevo nos parece que señala hacia la confirmación de las consecuencias contrastables B2 y B3.

5.2.2 D En relación con las medidas que se adoptan a fin de paliar las dificultades de los estudiantes

Los estudiantes tienen dificultad para seguir explicaciones en torno a determinados conceptos, dificultades relacionadas con los niveles de abstracción, por lo que no se ejercitan en este tipo de reflexiones abstractas. Nos parece que en estas condiciones, el ejercitarse en el diseño y realización de experiencias de las que hubiese que analizar los resultados, interpretarlos en el marco de los modelos teóricos, realizar predicciones coherentes con las formulaciones teórico-matemáticas en las que se ven involucrados los conceptos de diferencia de potencia y fuerza electromotriz, podrían ser actividades para ejercitarse en aspectos básicos de la metodología científica y que podrían mejorar el déficit en estas destrezas que señalan los profesores. Por lo que preguntamos si, conscientes de estas dificultades, se adoptan algún tipo de medidas en este sentido.

Ejemplo 19B:

En relación con las matemáticas no porque la Física tiene un lenguaje que son las matemáticas y...no es posible, aquí... no existe el lenguaje por signos, el lenguaje de la Física son las matemáticas y el que no sabe pues tiene que estudiárselo. Nadie puede leer a Shakespeare en inglés si no sabe inglés, si no sabe inglés de lo tendrá que estudiar. Ahora bien si hay que repetir e insistir sobre las cosas, se insiste y se repite, pero al final el problema es el mismo, faltan de terminados hábitos y herramientas y al final la solución es repetir el curso..., no existe otra solución. (Profesor universitario)

Ejemplo 20B:

“En alguna ocasión, me refiero a estas cuestiones, pero eso interesa sólo inicialmente, si hay que trabajar y no es sólo un paréntesis en las explicaciones importantes de la asignatura puede ser incluso peor... Por otra parte eso lleva mucho tiempo y luego no se terminan los programas y estos ya están en Bachillerato” (Profesor Bachillerato).

No es posible adoptar otras medidas que no sean repetir curso, por parte de los estudiantes, que no se pongan al día cuando se repiten las cosas, en el nivel de la Universidad. En Secundaria la inclusión de aspectos motivacionales es una pérdida de tiempo ya que el alumnado presenta unas elevadas tasas de desmotivación. Lo que pensamos confirma nuestra consecuencia contrastable B4.

5.2.2 E En relación con la conexión entre las explicaciones de los circuitos y las magnitudes de la Electroestática

Un problema didáctico detectado es la ausencia de un tratamiento unificado de la electrostática y circuitos. El mismo concepto se emplea en situaciones en las que las configuraciones de cargas son muy distintas, la mayor parte de los textos no suelen justificarlo, ¿se hace en clase por parte del profesorado?

Ejemplo 21B:

“Yo si, ya que el concepto de diferencia de potencial lo introduzco a partir de la teoría de campos, no como una cuestión de teoría de circuitos sino como una función potencial, así se hace una justificación de la energía potencial a partir de la teoría de campos, no se introduce a partir de la teoría de circuitos sino a partir de la teoría de campos, con lo cual ese problema en parte está salvado. No se introducimos la diferencia de potencial a partir de la teoría de circuitos, porque además no es así, si no a partir de la teoría de campos.

(¿Por qué crees que esto no suele plantearse en una buena parte de los libros de texto de nivel universitario?)

“No lo se, nunca me lo he planteado...se da por supuesto,.. de hecho salvo en algunos casos el uso está justificado...Yo creo que la justificación está muy ligada al concepto de onda y esto claro es una complicación más” (profesor universitario)

Ejemplo 22B:

“Bueno a los alumnos se les explica que eso no es más que una aproximación y ellos lo saben. Por otra parte esta bien la pregunta, pero mi opinión es que eso carece de entidad” (profesor universitario)

Ejemplo 23B:

“La verdad es que nunca me lo he planteado...”

(¿Y ahora que te lo planteo yo?)

“No estoy seguro...no lo se” (Profesor Bachillerato)

Las respuestas son clarificadoras, el profesorado no considera que las referencias explícitas a las relaciones entre las magnitudes de la electrostática y de los circuitos sea un problema relevante por tanto si se refieren a ella lo hacen dentro del discurso de la lógica y secuencia de sus programas.

En el nivel de Secundaria es un problema que los profesores no se plantean y no es algo, por tanto sobre lo que tengan respuestas. Todo esto, de nuevo apunta hacia una confirmación de las consecuencias contrastables A2, A3 y B3.

Resumen de los elementos más destacables en relación con los aspectos epistemológicos y didácticos

- Los resultados anteriores indican que las referencias a la historia de esta parte de la Ciencia, cuando tales referencias se incluyen en las explicaciones o aclaraciones que realizan los profesores, o van más allá de una breve descripción de una secuencia de descubrimientos y aportaciones, que poco o nada tienen que ver con una visión de los problemas a los que los científicos tenían que dar respuestas, cómo evolucionaron y las dificultades en el proceso de construcción conceptual. Lo que confirmaría las consecuencias contrastables A1 y A2.
- Se podría decir que, en coherencia con la visión de la Historia de la Ciencia anterior, los contenidos se presentan en una secuencia que responde sólo a la lógica interna de unos textos (o programas) que presentan los conceptos ya

elaborados, y en los que suelen estar ausentes las relaciones, jerarquización y ámbitos de aplicación de las nociones tratadas. Lo que confirmaría la consecuencia contrastable A3.

- Una buena parte del profesorado de todos los niveles desempeña sus tareas docentes al margen de los resultados de la investigación didáctica, lo que se concreta en no tomar en consideración, de forma explícita, las concepciones alternativas de los estudiantes y las dificultades que se les presentan a los mismos. Esto es un asunto problemático, que se manifiesta por ejemplo en que sólo hemos encontrado dos o tres textos de nivel universitario, que hagan referencia explícita a ellas y a partir de aquí incluyan información explícita y actividades para afrontar la situación. En el nivel de secundaria sólo el 5 % de los mismos las tenían en consideración. Lo que avala la consecuencia contrastable B1.
- Las dificultades de los estudiantes se hacen explícitas con la afirmación “no tienen nivel” ni “capacidad de razonamiento abstracto”, ambas son afirmaciones muy generales pero que justifican unos modos de hacer por parte del profesorado, que avalan la consecuencia contrastable B2.

5.2.3 Resultados relativos al análisis de las ideas del profesorado acerca del concepto de fuerza electromotriz

Los cuestionarios que aparecen en los Cuadros 4.8 (I) y (II); 4.9; 4.10 y 4.11 fueron aplicados por el mismo investigador a todos los grupos de futuros profesores así como a los profesores en ejercicio. Futuros profesores, licenciados en Física, Química e Ingeniería que preparaban los cursos del C.A.P en las Universidades de Granada y Málaga entre los años 2000 a 2005. Los profesores en ejercicio eran de niveles universitarios y de Secundaria, dichos profesores también contestaron a distintos ítems de este cuestionario. Un total de 124 futuros profesores y 15 profesores en ejercicio, 4 de Universidad y 11 de Secundaria. Los profesores de nivel universitario contestaron a los ítems en el curso de una entrevista, por lo que sus respuestas no la hemos incluido en la estadística si bien las contestaciones se han utilizado como ejemplos cuando hacemos referencias a las respuestas en el curso de las entrevistas. Hay que señalar que no todo el profesorado encuestado tuvo que contestar exactamente la misma prueba, en algunos casos sustituimos unos ítems por otros, por lo que el número de individuos puede variar.

El cuestionario se cumplimentó durante el espacio de una hora, pero en cualquier caso no había limitaciones en el tiempo a emplear por los encuestados. De manera general no hubo problemas en la interpretación ni de comprensión de los enunciados.

El cuestionario fue corregido de acuerdo con los criterios expuestos cuando se presentaron dichos ítems en el capítulo anterior.

Nos ha parecido que en relación con el concepto de Fuerza electromotriz y la interpretación de los circuitos de corriente continua, se pueden establecer cuatro dificultades principales. La primera acerca de la confusión entre dicho concepto y el de Diferencia de potencial (cuadro 4.8), la segunda está relacionada con la confusión entre la ley de Ohm ($V = I \cdot R$) y lo que podríamos llamar la ecuación del circuito ($\mathcal{E} = I \cdot R$) (cuadro 4.9), otra está relacionada con las diferencias entre las descripciones macroscópica y microscópica (cuadro 4.10) y la cuarta atañe a la naturaleza y la medida de la Fuerza electromotriz (cuadro 4.11).

5.2.3A: Resultados que muestran las ideas de los profesores acerca de la diferencia entre los conceptos de Fuerza electromotriz y Diferencia de potencial.

La confusión con la Diferencia de potencial va más allá del hecho de que ambas magnitudes se midan en voltios. Mediante el cuestionario del Cuadro 4.8 se indagan las ideas de futuros profesores y profesores en ejercicio en torno a las nociones que en relación con las diferencias entre la Fuerza electromotriz y la Diferencia de potencial es necesario tener claro. Hemos visto como el lenguaje de los libros de texto es poco preciso y confunde el que ambas magnitudes tengan el mismo valor para una configuración determinada del circuito, con que ambas magnitudes sean equivalentes. Más aún parecería que ambas magnitudes están asociadas de tal forma que la existencia de una implica la de la otra. Y esto, como veremos después, está relacionado con la casi inexistente literatura que proponga mecanismos o analogías verosímiles, que expliquen a nivel microscópico, qué trabajo se está cuantificando mediante el concepto de Fuerza electromotriz. Los resultados obtenidos se recogen en la tabla 5.1:

Tabla 5.1: Fuerza electromotriz y diferencia de potencial en el ámbito de un generador de Vander Graaf

Ítem 1 [cuadro 4.8 (I)]	Número profesores = 135 (Porcentaje)				
	Correcta			Incorrecta	NC
	JC	JE	NJ		
E1: Entre los puntos de A y B del generador se crea una diferencia de potencial.	16 (12)	66 (49)	25 (19)	7 (5)	21 (15)
E2: Si unimos dos puntos de A y B mediante un conductor externo, podríamos tener una corriente.	11 (8)	64 (47)	21 (16)	14 (10)	25 (19)
E3: En un generador de Van der Graaf no hay fuerza electromotriz y por tanto no se podrá generar una corriente.	2 (1)	27 (20)	25 (19)	25 (19)	56 (41)

JC = Justifica correctamente; **JE** = Justifica erróneamente; **NJ** = No justifica;
E1 = Enunciado 1 y sucesivos.

El fondo verde indica la columna para la justificación correcta

El fondo amarillo indica la opción más escogida y es interesante distinguirla de la correcta

En relación con el enunciado 1, el 80% de los profesores reconoce la existencia de una diferencia de potencial, pero sólo el 12% lo justifica correctamente. También es significativo el número de profesores que no contesta. El 49% justifica el enunciado erróneamente. Algunos ejemplos de justificaciones erróneas son los siguientes:

- “*Cierto. En A hay un potencial positivo, y en B negativo. Entre ambos puntos hay una diferencia de potencial*”. (Profesora licenciada en Física)
- “*Si, se origina una diferencia de potencial porque un punto tendría un potencial negativo y el otro positivo*”. (Profesora licenciada en Química).

En el caso del enunciado 2, un porcentaje alto de las respuestas indican que el enunciado es correcto (71%), pero una vez más el porcentaje de justificaciones erróneas es alto (47%). El porcentaje de los que no contestan es algo mayor y lo mismo el porcentaje para los que el enunciado no es correcto. Ejemplos de justificaciones que no se han considerado correctas son:

- “*Verdadero, porque habría movimiento de las cargas negativas hacia las positivas*” (Profesor licenciado en Química).
- “*Si, debido a que existe un transporte de cargas entre un extremo y el otro, y el concepto de f.e.m. es aceptable.*” (Profesor licenciado en Física)
- “*Si hay corriente, porque esa diferencia de potencial hace que las cargas positivas se desplacen hacia las negativas y viceversa creando un paso de cargas.*” (Profesora licenciada en Física)

Parece que se desprende de la justificación anterior que la corriente se debe a un flujo de cargas positivas en un sentido y de negativas en el contrario, conocido en la investigación en didáctica de las ciencias como “modelo de las corrientes antagonistas”.

En el enunciado 3, el porcentaje de los que escogen la opción correcta baja sensiblemente hasta el 40%, mientras que sube significativamente también el porcentaje de los que no contestan que llega hasta el 41%. Del mismo modo sube el porcentaje de los que escogen la opción incorrecta que es el doble que en las opciones anteriores. Y nos parece que hay que destacar que en este caso el porcentaje de justificaciones erróneas y de elecciones incorrectas es prácticamente el mismo. Parecería que con la introducción del concepto de Fuerza electromotriz, se han producido estos cambios

bruscos en los porcentajes. Los siguientes son ejemplos de justificaciones que hemos evaluado como erróneas:

- “Falso. Contradice mis respuestas anteriores.” (Las respuestas a los enunciados anteriores de esta licenciada en Física eran):

Enunciado 1: *Cierto. En A hay un potencial positivo, y en B negativo. Entre ambos puntos hay una diferencia de potencial.*

Enunciado 2: *Cierto. Las cargas viajarían de A a B (habría una corriente en este sentido).*

- “Falso, si es posible hablar de fem, pero no es posible hablar de corriente.”

Un ejemplo para ilustrar las opciones incorrectas es el siguiente, como el profesor en cuestión (licenciado en Física) utiliza sus respuestas anteriores como argumentario, es por lo que incluimos todas sus contestaciones:

Enunciado 1: *“Cierta por el razonamiento que hago en 2).*

Enunciado 2: *“Cierto; si unimos mediante un conductor A y B habría transporte de cargas, ya que ambos materiales tenderían a estar neutros, y por un conductor puede circular corriente. Esta corriente realizaría trabajo; por tanto hay diferencia de potencial.*

Enunciado 3: *Falso, por 1) y 2)”*

Parecería que las formas de razonar que se reflejan en las respuestas que redactan estos licenciados, están basadas fundamentalmente en diferencias en la cantidad o el signo de las cargas, es decir, en la cantidad de carga eléctrica. Sólo una minoría justifica correctamente los enunciados (12% E1; 8% E2; 1% E3)

En la situación del **ítem 2**, se trata de averiguar si los profesores relacionan la fuerza electromotriz con la energía puesta en juego para separar cargas, lo que dará lugar a una diferencia de potencial entre dos puntos. Este ítem se ha pasado a 66 profesores. Los resultados se recogen en la tabla 5.2.

Tabla 5.2: Fuerza electromotriz y diferencia de potencial asociados al efecto piezoeléctrico

Ítem 2 [Cuadro 4.8 (II)]	Número de profesores = 66 Porcentaje de respuestas (%)				
	E. Correcta			E. Incorec	NC
	JC	NJ	JE		
E1: A estos fenómenos no es aplicable el concepto de fuerza electromotriz, ya que no existe generador de corriente.	2 (3)	12 (18)	33 (50)	8 (12)	11 (17)
E 2: En este caso la fuerza electromotriz está relacionada con la energía mecánica transferida a las caras del cristal de cuarzo.	4 (6)	12 (18)	18 (27)	20 (31)	12 (18)
E3: En este caso no se puede distinguir entre fem y d.d.p. electrostático ya que el voltímetro mide una cantidad de voltios, que pueden ser de una u otra magnitud.	6 (10)	16 (24)	14 (21)	16 (24)	14 (21)
E4: En este caso la fuerza electromotriz está generada por la diferencia de potencial electrostático entre las caras opuestas del cristal de cuarzo.	9 (13)	11 (17)	9 (14)	26 (39)	11 (17)

En relación con el enunciado 1, el 71% de los encuestados señala la opción correcta, sin embargo una vez más el 50% de las justificaciones son erróneas y el 17% no responde. Justificaciones que se han evaluado como erróneas son las siguientes:

- “Falso. En este caso la fem es la debida a la d.d.p. entre las caras, como consecuencia de la redistribución de los iones.” (Licenciado en física)
- “Falso. En este caso la fem es inducida por fuerzas mecánicas.” (Licenciado en química)

La primera de las justificaciones es muy interesante y pone de manifiesto algo que lo encontraremos reiteradamente: La fuerza electromotriz es debida a la existencia de una diferencia de potencial. Como hemos señalado la presentación acumulativa lineal de los conocimientos da lugar a errores como este, en los que la diferencia de potencial aparece como la causa de la fuerza electromotriz.

Para el enunciado 2, el porcentaje de elecciones correctas ha descendido hasta el 49% y ha aumentado hasta el 31% el porcentaje de respuestas erróneas.

La idea se reitera una y otra vez: tener una diferencia de potencial puede lograrse separando cargas de distintos signo. La explicación del efecto piezoeléctrico es que la fuerza mecánica produce en este caso una redistribución de iones positivos y negativos

de la red cristalina que da lugar a una diferencia de potencial electrostático. Sólo un par de respuestas ha utilizado esta idea de forma correcta, las demás ni siquiera hacen una referencia superficial.

Ejemplos de opciones correctas pero que han justificado de forma equivocada son las siguientes:

- “Verdadero. El trabajo mecánico se transforma en una corriente” (licenciado en química).
- “Verdadero. Esta fuerza produce el movimiento de la carga.” (Licenciado en química)

Ejemplos de respuestas que se han evaluado como erróneas son las siguientes:

- “Falso. Fuerza electromotriz y energía no son conceptos equivalentes.” (Licenciado en física)
- “Podría ser, ya que podría considerarse que la fuerza mecánica que se aplica se transforma en fem.” (Licenciado en física)

Las respuestas se comentan solas, pero no deja de ser sorprendente que se trate de futuros profesores licenciados en física o en química o de profesores en ejercicio. También llama la atención lo parco de las respuestas.

Si bien el porcentaje de los que no responden es para todos los enunciados similar, en este enunciado tercero sin embargo es el caso en el que el porcentaje de los que no contestan es mayor; cuando parecería que optar por la corrección o no del enunciado es más evidente que en la demás opciones, ya que el hecho de que dos magnitudes se midan con la misma unidad no implica que sean iguales, como es el caso de trabajo y energía. El porcentaje de elecciones correctas es del 55%, pero la proporción de los que no justifican su elección también aumentan ligeramente con respecto a los porcentajes de los que no justifican su elección en el resto de los enunciados. Parecería como si se eludiera no responder ante la afirmación que se propone. Entre las respuestas que hemos considerado erróneas las siguientes son un ejemplo:

- “Podría darse por válida, ya que en este caso la fem es debida a la d.d.p., luego el voltímetro mide la d.d.p. entre las caras del cubo que en definitiva es lo que motiva la fem.” (Licenciado en física)

- *“Verdadero, si tenemos corriente. Tal como se dice la fuerza aplicada crea una diferencia de potencial en el cuarzo, independientemente de si estuviesen conectados o no, y después debido a esta diferencia de potencial aparece la corriente eléctrica que dará sentido al concepto de fem”* (Licenciado en física)

Es a destacar el hecho de que en el enunciado en ningún momento se habla de corriente, pero no importa para el profesor que asocia ambos conceptos, él afirma su existencia y sigue con su razonamiento. No es el único caso no obstante la siguiente es otra respuesta del mismo corte:

- *“Verdadero, si se desprecian las pérdidas por resistencia.”* (Licenciado en física)

Ejemplos de respuestas que señalan la opción como correcta pero que justifican erróneamente son los siguientes:

- *“Falso, el voltímetro puede medir la d.d.p. puesto que la fem no existe en realidad.”* (Licenciada en química)
- *“Una diferencia de potencial puede tomar el valor de la fem pero ambas son cosas distintas pues una es fuerza y la otra es potencial”.* (Licenciado en física)

Aunque pudiera parecer anecdótico, sin embargo son muchos los casos en los que se atribuye a la diferencia de potencial la capacidad de generar la fuerza electromotriz, ya nos hemos referido a este error en relación con la comprensión del concepto que nos ocupa.

En las respuestas al enunciado 4 sube hasta el 39% el porcentaje de los que lo consideran verdadero y sólo el 13% lo reconoce como un enunciado falso y lo justifica correctamente. Que casi el cuarenta por ciento de los encuestados se muestre de acuerdo con una afirmación que dice que, la fuerza electromotriz está generada por la diferencia de potencial y que a dos tercios de los que les parece un enunciado equivocado no sepan decir por qué nos parece que pone al descubierto serias deficiencias para enseñar en torno a este concepto. Entre las respuestas erróneas las siguientes son ejemplos:

- *“Verdadero, Se ha producido una polarización en nuestro sistema de moléculas... dicha polarización nos implica una diferencia de potencial lo cual implica la existencia de una fem.”* (Licenciado en física)
- *“Verdadero, por el principio de conservación de la energía la energía mecánica se transforma en la fuerza electromotriz”* (licenciado en química)

Entre los que señalan el enunciado como equivocado, pero justifican erróneamente, el siguiente es uno que nos atrevemos a calificar como paradigmático:

- “Falso, ya que los conceptos de fuerza electromotriz y diferencia de potencial son el mismo, uno no genera otro.” (Licenciado en física)
- “Falso, la fuerza electromotriz se genera porque tenemos cargas de distinto signo en las caras del cristal.” (Licenciado en química)

Con frecuencia encontramos razonamientos y justificaciones que niegan la existencia de la fuerza electromotriz, no deja de ser sorprendente tanto en el caso de licenciaturas de física como en la de química, ya que se trata de un concepto que se van a encontrar en distintas asignaturas y en el caso de los químicos tanto en asignaturas de física, como en varias de las asignaturas de química.

Los resultados del análisis del ítem 3 se recogen la tabla 5.3 siguiente:

Tabla 5.3

Ítem 3 [Cuadro 4.8 (II)]	N = 118; profesores que escoge cada opción (Porcentaje)							
	opción a	opción b	opción c	opción d	JC	JE	NJ	NC
	55 (47)	44 (37)	4 (3)	6 (5)	18 (15)	20 (17)	6 (5)	9 (8)

El 47% de los profesores confunde fuerza electromotriz de una pila con la diferencia de potencial, al menos con la diferencia de potencial en circuito abierto. El 37% señala la opción correcta, pero sólo el 15% la justifica correctamente. Se trata por tanto de un porcentaje muy exiguo el del profesorado que, en la situación que se presenta, distingue claramente los conceptos implicados.

A nosotros nos parece que el porcentaje tan bajo de respuestas correctas, podría estar relacionado con las pocas oportunidades de realizar montajes con pilas y bombillas, ya que cualquiera con cierta experiencia ha observado que la misma pila, cuando se conecta a las mismas bombillas conectadas en serie o en paralelo, las medidas de diferencia de potencial en bornes son distintas.

Algunos ejemplos de justificaciones que se han evaluado como erróneas son los siguientes:

- “En la pila existe una d.d.p. que permanece más o menos constante durante la “vida” de la pila. Da igual lo que se conecta a ella la d.d.p. entre sus electrodos es el mismo.” (Licenciado en química)
- “Permanece constante la d.d.p. porque las cargas que se mueven son las mismas.” (Licenciado en física)

Una justificación de alguien que ha elegido la opción b) y que a primera vista podría parecer correcta, es la siguiente que la brinda un profesor en ejercicio, doctor en química:

- “La F.E.M. de la pila no depende del circuito al que se conecta, la diferencia de potencial y la intensidad sí dependen de ello”

No es más que una justificación formal de la propia elección, ya que el profesor ni explica por qué la fuerza electromotriz de la pila no depende del circuito al que se conecta, ni explica por qué la diferencia de potencial o la intensidad si *dependen de ello*, como dice el profesor en cuestión.

Una respuesta muy “elaborada” de un profesor que escoge la opción a) es la siguiente:

- “Debe ser la misma d.d.p. puesto que no tenemos más que verlo en la vida cotidiana, las pilas suministran siempre la misma d.d.p. porque suponemos que todas tienen la misma energía; dependiendo del aparato duran más o menos pero todos ellos funcionan con el mismo voltaje o d.d.p. luego la fem debe ser diferente en cada caso dependiendo de la resistencia que aumenta en el circuito externo la pila tendrá que dar más o menos resistencia.” (Licenciado en física)

El siguiente es otro ejemplo de justificación de la opción a):

- “Permanece constante la d.d.p. entre los electrodos, que es lo que proporciona el fabricante (por ejemplo, 1,5 voltios)” (Licenciado en física)

Las respuestas son convergentes con los resultados del análisis de los libros de texto en relación con el concepto de Fuerza electromotriz, es decir, un tratamiento deficiente del concepto objeto de esta investigación.

Los resultados del análisis del **ítem 4** se sintetizan en la tabla 5.4

Tabla 5.4: La diferencia de potencial está asociada a un campo electrostático conservativo

Ítem 4 [Cuadro 4.8 (II)]	Número profesores = 124 (Porcentaje)					
	Correcta			Incorrecta	NC	IN
	JC	JE	NJ			
E1: Hay fem responsable de una corriente en el anillo, pero no produce una diferencia de potencial electrostático entre dos puntos, como A y B de éste.	3 (3)	30 (24)	3 (3)	55 (44)	19 (15)	14 (11)
E2: No existe una diferencia de potencial electrostático y por tanto no puede haber corriente en el anillo.	7 (6)	55 (44)	12 (10)	13 (10)	19 (15)	18 (15)
E3: Si hay fem debe haber una diferencia de potencial electrostático asociada a la misma que dará lugar a una corriente eléctrica.	3 (3)	14 (11)	7 (6)	53 (43)	20 (16)	27 (22)
E4: Un voltímetro convenientemente situado entre A y B no indicaría nada, un amperímetro intercalado en A indicaría paso de corriente.	13 (10)	23 (19)	11 (9)	42 (34)	19 (15)	16 (13)

De nuevo con objeto de facilitar la lectura iremos detallando cada uno de los enunciados cuyas respuestas se analizan.

Lo más destacado es que el 44% de los profesores se muestran en desacuerdo con esta afirmación, es decir, se niega el que no pueda existir diferencia de potencial electrostático, en una situación en la que además se afirma la existencia de fuerza electromotriz y de intensidad de corriente. También merece la pena destacarse que el 15% de los profesores no contestan y el 11% ofrece respuestas que hemos catalogado como inclasificables. El 36% acepta que sea correcta la afirmación, pero sólo un exiguo 3% lo justifica convenientemente.

Entre los que señalan que enunciado es verdadero, pero lo justifican de forma errónea, los siguientes son ejemplos:

- “Es verdad que no hay diferencia de potencial porque la espira está cortocircuitada y hace que la d.d.p. que hay valga cero” (Ingeniero Industrial)
- “Es cierto que hay una fem, debida al campo magnético variable. Pero si las cargas se mueven, será porque los dos puntos tienen distinto potencial.” (Licenciado en química)

También son de interés los que dicen que el enunciado es falso, ejemplos de esta opción, que ponen de manifiesto distintos errores son los siguientes:

- *“Es falso porque “si se produce corriente en el anillo hay una d.d.p. como consecuencia de la ley de Ohm.” (Licenciado en física)*

En el mismo sentido argumentaba del siguiente modo un profesor de universidad:

- *“Es erróneo decir que no se produce una d.d.p. entre a y b porque si entre a y b hay resistencia R y es atravesado por una intensidad I (producida por la fem) hay d.d.p. Además, aunque se diga que entre a y b no hay R, para que entonces la d.d.p. sea cero, si se intercala un amperímetro como se dice en 4, como este tiene una resistencia interna (aunque sea muy pequeña, ya no se puede decir que el voltímetro no indicaría nada, a no ser que la d.d.p. esté por debajo del límite del voltímetro.”*

El razonamiento anterior contiene varios errores, nos vamos a hacer eco sólo de uno que hemos encontrado incluso en algún libro de texto de alguna conocida editorial. Si se admite que como consecuencia de la existencia de una corriente eléctrica, entre dos puntos se va a producir una diferencia de potencial, se tendrá que admitir que si se consideran dos puntos no simétricos (como no es el caso del dibujo), es decir, dos puntos cuyas distancias por uno y otro sentido al recorrer el anillo sean diferentes. Se tendrá que admitir que se cumpla $I \cdot R_{ab} \neq I \cdot R_{ba}$, lo que supone que la diferencia de potencial entre los mismos puntos depende del camino recorrido, lo que no es una propiedad de la diferencia de potencial electrostático.

En el enunciado 2, entre los que no contestan y las respuestas inclasificables suman el 30 % del total, esto es algo destacable. El 60% señala la opción como falsa, que lo es, pero una buena parte de las justificaciones erróneas van en el sentido de decir que es una afirmación falsa porque según ellos **sí hay diferencia de potencial**. Las siguientes son algunos ejemplos de estas justificaciones erróneas:

- *“Falso. Como consecuencia de la energía mecánica transferida a las cargas se establece una diferencia de potencial.” (Licenciado en química)*
- *“Falso: Si existe d.d.p. debido a que la presencia del campo magnético origina una d.d.p. que provoca un movimiento de cargas. Por tanto si existe una d.d.p. entre los puntos del*

anillo” (Licenciado en física)

- “Falso, no hay diferencia de potencial y no hay corriente porque hay simetría en el sistema (todos los puntos del conductor están en el mismo estado)” (Licenciado en física)
- “Falso. No hay diferencia de potencial porque las cargas circulan pero no se redistribuyen.” (Licenciado en química)

Las respuestas indican que no se aceptan la idea de que haya corriente si no hay diferencia de potencial, si no hay diferencia de potencial tampoco hay corriente y esto es lo que algunos parece que trataran de justificar.

En el enunciado 3, el 43% de los encuestados se muestran de acuerdo con esta afirmación, fuerza electromotriz y diferencia de potencial electrostático que darán lugar a una corriente eléctrica. Un 19% del total considera la afirmación incorrecta, pero sólo el 3% lo justifica correctamente.

La fuerza electromotriz está relacionada con la energía puesta en juego para producir la corriente eléctrica, pero en esta situación el campo eléctrico creado no es un campo eléctrico electrostático conservativo, ni la corriente continua estacionaria. Las siguientes respuestas son ejemplos de justificaciones que hemos evaluado como erróneas.

- “Falso, puede existir una fem inducida, distinta de la fem de origen electrostático.”
- “Si hay fem inducida pero no hay diferencia de potencial por no haber elementos consumidores o generadores de potencia en el material conductor.” (Ingeniero)
- “Falso, si hay diferencia de potencial electrostático será debido a la diferencia en la naturaleza de las cargas del material conductor (cargas positivas y negativas), pero no diferencia de potencial entendida como fuerza de empuje necesaria para crear corriente eléctrica.” (Licenciado en química)

Las respuestas anteriores ponen de manifiesto también que no se sabe qué es la fuerza electromotriz, que se restringe al valor de la diferencia de potencial que se mide entre los electrodos de una pila en circuito abierto. Fuera de esto se deslizan vaguedades, coletillas o errores de bulto y muy poco más, sobre todo si se trata de fuerza electromotriz y no hay pilas, que dicho sea de paso es el caso más frecuente.

De las respuestas que señalan que la afirmación es correcta los siguientes son ejemplos:

- *“Verdadera al haber una fem se origina una d.d.p. que da lugar a un paso de corriente.”*
(Licenciado en química)
- *“Verdadero, salvo que el material sea un conductor ideal y no exista resistencia.”*
(Licenciado en química)

La primera de ellas no es otra cosa que una versión del propio enunciado para responder y la segunda insinúa que si no hay resistencia no habrá diferencia de potencial, lo que en el caso que nos ocupa es exponente de una falta de comprensión de los aspectos básicos de los conceptos como es su ámbito de aplicación.

En el caso del enunciado 4, de nuevo nos encontramos con el problema de conocer el ámbito de aplicación de los conceptos. En la situación que se presenta no hay diferencia de potencial y por tanto no se podrá medir. Los resultados una vez más son convergentes con otros anteriores y apoyan nuestras hipótesis.

El 34% señala el enunciado como falso, es el porcentaje más alto de respuestas. El 47 % señala la opción correcta (que es verdadero), pero sólo el 10% lo justifica correctamente. Del 28% de los profesores de una u otra forma no es posible conocer sus ideas al respecto.

De entre los que señalan que el enunciado es falso, las siguientes son justificaciones interesantes:

- *“Falso, si el voltímetro no indica diferencia de potencial no puede haber paso de corriente”*
(Licenciado en física)
- *“Falso, el voltímetro no distingue entre las d.d.p. electrostáticas y las otras y, por tanto, marcaría una lectura no nula. Y si hay lectura del amperímetro”* (Licenciado en química)

La idea que subyace a la respuesta anterior se ha puesto de manifiesto en respuestas anteriores: si no hay diferencia de potencial no hay paso de corriente, luego si un amperímetro mide intensidad es falso que no haya diferencia de potencial. Es evidente además que el profesor en cuestión no distingue entre diferencia de potencial y voltaje.

Las siguientes son justificaciones que hemos evaluado como erróneas y que también nos parecen muy ilustrativas del modo de pensar que venimos señalando:

- *Es verdadero “pues el amperímetro medirá el potencial o la diferencia de potencial al paso de la corriente por A”* (Licenciado en química)
- *“Verdadera. El voltímetro mide d.d.p. y como hemos dicho que es cero y no indicará nada puesto que los puntos A y B están al mismo potencial. En cambio el amperímetro si nos daría el valor de corriente debida a la fem inducida al anillo por el campo magnético.”* (Licenciado en química)

Para este profesor el enunciado es verdadero, no importa que el voltímetro no pueda medir, ya lo hará el amperímetro, que medirá el potencial o la diferencia de potencial.

Los profesores entran en contradicciones en sus respuestas o argumentan de forma equivocada, las siguientes secuencias completas de respuestas a los cuatro enunciados ilustran esto que decimos.

Secuencia:

- 1) *“Verdadero, porque el campo magnético es constante.”*
 - 2) *“Falso, porque a pesar de no haber diferencia de potencial, el campo magnético va a producir corriente en el anillo.”*
 - 3) *“Verdadero.”*
 - 4) *“Verdadero, porque no hay d.d.p. pero si hay corriente en el anillo.”*
- (Licenciado en química)

Al margen de la corrección o no de las justificaciones que se emplean llama la atención que el profesor anterior en su respuesta a 1) admite que no haya diferencia de potencial electrostático. En 2) también y explica por qué hay corriente, pero en 3) donde se afirma la existencia de diferencia de potencial afirma que es verdadero.

Secuencia

- 1) *“Falso, si se produce una d.d.p. electrostático entre dos puntos A y B al pasar el campo magnético.”*
- 2) *“Falso, si hay d.d.p. electrostático puesto que el campo magnético produce un desplazamiento de carga.”*

- 3) “Verdadero. La fem está asociada al potencial electrostático que a su vez dará una corriente eléctrica.”
- 4) “Verdadero. El amperímetro indica la intensidad de corriente que se produce en el anillo. El voltímetro no indicaría nada porque no hay resistencia”

(Licenciado en química)

Es una secuencia de respuestas en principio coherente, hay diferencia de potencial, la crea el campo magnético. En su respuesta al enunciado 3) esta idea ya no está tan clara, hay simplemente una utilización del propio enunciado para responder, pero en 4) el profesor explica el enunciado afirmando que el conductor no tiene resistencia. Este razonamiento ha sido utilizado reiteradamente por los profesores participantes, a pesar de que el enunciado señala de que se trata de un material conductor, por lo que tendrá la resistencia que deba tener.

El último ítem de esta serie para analizar las ideas del profesorado acerca de las relaciones entre los conceptos de la Fuerza electromotriz y Diferencia de potencial es el **ítem 5**, en el cual abiertamente se preguntada a los profesores acerca de las diferencias entre ambos conceptos. Hay que reconocer que en la mayor parte de los libros de texto estas diferencias no quedan claramente establecidas, por lo que las ideas que pueda tener el profesorado en relación con estas diferencias será muy importante para que los estudiantes puedan aprender los conceptos puestos en juego adecuadamente. La tabla 5.5 siguiente recoge el resumen de los datos obtenidos.

Tabla 5.5 Diferencias entre fuerza electromotriz y diferencia de potencial

Ítem 5 [Cuadro 4.8 (II)]		Profesores N = 124 Porcentaje (%)
Son conceptos diferentes	No indican diferencias	0 (0)
	Indican diferencias correctamente	3 (2)
	Diferencias erróneamente	76 (61)
Es el mismo concepto		9 (7)
Inclasificables		11 (9)
No contestan		25 (20)

El 63 % de los profesores indican que se trata de conceptos diferentes, pero sólo un porcentaje insignificante señala correctamente diferencias (2%). Un 7% directamente dice que se trata del mismo concepto y un significativo 20% no contesta al ítem. Los siguientes ejemplos ilustran el tipo de respuestas que han dado los profesores.

- *“La fem está relacionada con la d.d.p. y con la intensidad de corriente, pero no es lo mismo que estas dos magnitudes. Si la d.d.p. o la intensidad son cero la fem también lo es. La fem es simplemente, una medida del flujo de corriente entre dos puntos, debido a su d.d.p.”*
(Licenciado en química)
- *“La fuerza electromotriz es la fuerza que genera la corriente en un circuito eléctrico. La d.d.p. entre dos puntos es lo que se ha consumido de fuerza electromotriz entre dos puntos”.*
(Ingeniería Industrial)
- *“Fuerza electromotriz es la tensión en voltios que produce un generador mientras que diferencia de potencial es la tensión en bornes entre dos conductores o entre dos puntos de un circuito.”* (Licenciado en Física)

Es evidente que para el profesor del primero de los ejemplos anteriores la fuerza electromotriz no es una propiedad del generador, sino algo relacionado con el funcionamiento del circuito que no aclara. El segundo de los ejemplos demuestra cuando menos, lo poco que ha significado la coletilla de prácticamente todos los textos en los que se advierte que la fuerza electromotriz no es fuerza sino energía.

El tercero de los ejemplos ilustra un lenguaje oscuro en el que fuerza electromotriz, diferencia de potencial y tensión no son sinónimos si no un recurso para referirse a uno u otro de manera formalmente como algo distinto, pero sin entrar en tales diferencias. El último de los ejemplos apunta una idea sobre la que volvimos a insistir en el curso de las entrevistas y es que entre diferencia de potencial y fuerza electromotriz la primera es más “causa” de la segunda que la viceversa.

Creemos que las respuestas anteriores muestran sobre todo una deficiencia de la enseñanza tradicional a la que ya nos hemos referido. Se trata de la poca coherencia de las argumentaciones al margen de las formulaciones matemáticas. Los ejemplos siguientes, en la misma dirección, creemos que no ofrecen duda sobre esto que decimos.

- “En una pila la única diferencia es la caída de tensión que se produce debido a la resistencia interna de la misma. $\xi = I \cdot r + I \cdot R_{ab}$; $\xi = V_{interna} + V_{ab}$.” (Ingeniería Industrial).
- “Las siguientes ecuaciones aclaran las diferencias entre ambas,
 $Fem = \varepsilon \rightarrow$ cargas en movimiento, depende del tiempo; $\varepsilon = \frac{d\Phi}{dt}$
 $\Delta V \rightarrow$ cargas estáticas, no depende del tiempo. (Licenciado en física)

Merece la pena destacar otra idea en la que, la diferencia de potencial que es la magnitud que explica el movimiento de cargas entre los extremos de un conductor, se relaciona más con la situación de reposo de las cargas.

- “La fem está asociada al movimiento de cargas, en cambio la d.d.p. se asocia a cargas puntuales, es decir, la diferencia de potencial ente dos puntos”.

Entre las respuestas de aquellos que decían que se trataba de la misma magnitud, los siguientes son ejemplos:

- “Creo que es más o menos lo mismo, ya que cuando existe una d.d.p., se genera una fem.” (Licenciado en química)
- “d.d.p. \rightarrow separación de cargas para que se genere una corriente.
 $Fem \rightarrow$ fuerza necesaria para vencer las resistencias e impedancias existentes en un circuito eléctrico.” (Ingeniero Industrial)
- “Una d.d.p. provoca una fem, pero una fem puede tener más orígenes.” (Licenciado en física)

Como vemos, se manifiesta con profusión la idea de que la diferencia de potencial da lugar a la fuerza electromotriz.

En resumen:

En todos los ítems de de esta parte del cuestionario el porcentaje de respuestas correctas es ciertamente minoritario, es decir, que ni sobre situaciones específicas ni sobre cuestiones globales el profesorado muestra una clara comprensión de las diferencias entre fuerza electromotriz y diferencia de potencial. Los índices de justificaciones correctas en todos los ítems suelen estar siempre por debajo del 10%. El ámbito de aplicación de los conceptos se confunde o no se conoce (entre el 1% y el 12% de respuestas correctas en el ítem 1; 15% correctas ítem 3; 2% ítem 5). El concepto de

campo casi no se emplea en las argumentaciones y tampoco las descripciones en términos microscópicos, cuando estas se emplean se mezclan las descripciones macro-micro de manera confusa, confundiendo a veces hechos a explicar con las explicaciones mismas (entre el 3% y el 10% de respuestas correctas en el ítem 4). Se evidencia una insuficiente familiarización con el montaje y análisis de circuitos de forma experimental (entre el 3% y el 15% de respuestas correctas ítem 2).

5.2.3B: Resultados del cuestionario para contrastar las ideas del profesorado acerca de las diferencias entre la ecuación del circuito y la ley de Ohm

Mediante el cuestionario incluido en el Cuadro 4.9 se aborda la aplicación que de la ley de Ohm se hace en el estudio de los circuitos. Mucho libros confunden algo mucho más general como el Principio de Conservación de la Energía, para el caso de los circuitos de corriente continua con la ley de Ohm, llegando incluso a denominar ley de Ohm generalizada lo que no es otra cosa que la ley de Kirchhoff de las mallas, es decir, el estudio del balance energético que tiene lugar en el circuito en su totalidad.

Un error frecuente consiste en aplicar a todos los elementos del circuito, y no sólo a las resistencias, la ley de Ohm. Se identifica la ley de las mallas de Kirchhoff con la ley de Ohm. Son dos errores relacionados con identificar los conceptos de fuerza electromotriz y diferencia de potencial o lo que es lo mismo, la falta de comprensión de las diferencias entre los conceptos de Fuerza electromotriz y diferencia de potencial. Pero también son errores que se deben a esa deficiencia de la enseñanza que consiste en no hacer explícitos los ámbitos de aplicación de los conceptos, dejando a la autonomía de los estudiantes de cualquier nivel el que ellos sólo alcancen este conocimiento.

Los resultados del análisis se presentan en la tabla 5.6.

Tabla 5.6 Ecuación del circuito y ley de Ohm

Ítem 1 [Cuadro 4.9]	Número profesores = 124 (Porcentaje)							
	opción a	opción b	opción c	opción d	JC	JE	NJ	NC
	54 (44)	14 (11)	37 (29)	7 (6)	0 (0)	14 (11)	0 (0)	12 (10)

El 44% del profesorado señala que se cumple la opción a), es decir, este porcentaje se muestra de acuerdo con que la ley de Ohm pueda aplicarse incluso para materiales no óhmicos, pero lo más grave es que la ley de Ohm se refiere a la intensidad entre dos puntos de un conductor que están a una diferencia de potencial determinada. No cabe interpretarla para una trayectoria cerrada. Entre los que optan por esta opción y la c) constituyen el 73% del total. El 11% señala la opción correcta, pero todos ellos lo justifican erróneamente, y el 10% no contestan.

Las siguientes son algunas de las justificaciones de los que optan por a):

- *“Puesto que en un circuito, lo que se verifica es la ley de Ohm y como podemos ver existe una resistencia, una intensidad I que circula por ella, un interruptor cerrado (de ahí que sea un circuito cerrado) y una pila.”* (Licenciada en química)
- *“En un circuito cerrado siempre se cumplirá la famosa ley de Ohm”* (Licenciado en física)
- *“ ξ en la figura representa a V y la ley física que rige los circuitos eléctricos es $V = I \cdot R$. (ley de Ohm)”*. (Licenciado en física)

El tercer ejemplo no puede ser más ilustrativo “ ξ en la figura representa a $V \dots$ ”,

La siguiente es una serie de justificaciones que hemos evaluado como erróneas, todas ellas pertenecen a profesores que eligen b):

- *“La fem es la fuerza que provoca el movimiento de los electrones en el circuito y en éste equivale $\varepsilon = IR$; que no hay que confundir con el concepto de potencial V . Debido al establecimiento de una diferencia de potencial entre dos puntos (que provocaría el movimiento de carga) aparece una fuerza electromotriz. El potencial V en un punto de un circuito no provoca movimiento de electrones (intensidad de corriente), si no se compara con otro punto que se sitúa a otro potencial.”* (Licenciado en física)

La siguiente podríamos considerarla como ampliamente utilizada como justificación errónea o, al menos confusa:

- *“A partir de la ecuación siguiente: $\varepsilon = V + Ir$, como la resistencia interna de la pila es aproximadamente cero, entonces queda $\varepsilon = V$.”* (Licenciada en física)

La siguiente es un compendio de las ideas erróneas que hemos venido señalando:

- *“La ecuación que se cumple es $\varepsilon = I \cdot R$ ya que es la expresión que responde a la ley de Ohm y de aplicación en análisis de circuitos eléctricos. En circuitos eléctricos no tendría sentido hablar de diferencia de potencial electrostático ya que este es un concepto relativo a campos eléctricos. Es decir, no depende la d.d.p. en un campo eléctrico del flujo de cargas eléctricas (I) ni de R sino del campo eléctrico”* (Ingeniería industrial)

Las justificaciones de aquellos que eligen la opción c) también son reveladoras de las ideas que mantienen los profesores en relación con la dificultad que analizamos:

- *“ $\xi = I \cdot R$ es una ley de Kirchhoff y $V = I \cdot R$ una simplificación para circuitos cerrados”* (Licenciada en física)
- *“Al ser despreciable la r (resistencia de la pila) en un circuito cerrado tanto la fem como el potencial van a ser iguales a la intensidad por la resistencia”* (Licenciada en química)
- *“Tenemos que considerar la fem de la misma pila y el potencial que se crea como consecuencia de la creación de la intensidad de corriente según la ley de Ohm. La fem de la pila da lugar a la corriente y el potencial o mejor dicho la diferencia de potencial mantiene la intensidad de la misma”*. (Licenciado en química)

Sólo uno de los profesores ofreció el siguiente argumento correcto:

- *“En un circuito cerrado la variación del potencial a lo largo del camino debe ser cero.”* (Licenciado en física)

Había otras justificaciones correctas, pero la anterior era la única que argumentó haciendo uso de la noción de diferencia de potencial que se deriva de la conocida expresión $\oint E \cdot dl = 0$.

En los libros de texto españoles se habla casi sin excepción de la ley de Ohm generaliza, para referirse a lo que no es otra cosa que el principio de conservación de la energía, de esta forma las ideas erróneas anteriores se pueden ver reforzadas. Esto es lo que analizábamos en las respuestas al **ítem 2** (cuadro 4.9 del capítulo anterior). Las respuestas del profesorado se sintetizan en la tabla 5.7 siguiente:

Tabla 5.7 Análisis de las ideas acerca de la ley de Ohm y el principio de conservación de la Energía

Ítem 2 [Cuadro 4.9]	Número profesores = 76 (Porcentaje)					
	Incorrecto	Correcto	JC	JE	NJ	NC
E1: La ley de Ohm representa y permite cuantificar el Principio de Conservación de la Energía en el circuito.	49 (64)	9 (12)	2 (3)	4 (5)	3 (4)	18 (24)
E2: El Principio de Conservación de la Energía en este sistema se cuantifica mediante los conceptos de fuerza electromotriz y diferencia de potencial.	21 (28)	38 (50)	2 (3)	12 (15)	24 (32)	17 (22)

Con el enunciado 1 se muestra de acuerdo el 64% del profesorado. Un significativo 24% no contesta y sólo un 3% del total lo justifica correctamente. Ejemplos de justificaciones que no hemos calificado positivamente serían las siguientes:

- “Verdadero, la ley de Ohm se obtiene a partir del principio de conservación de la energía, formulado como potencial disipada”. (licenciado en química)
- “Ya que la ley de Ohm relaciona los procesos energéticos que se producen en el circuito” (Licenciado en física)

Más adelante volveremos sobre este aspecto, ya que ante la brevedad de las respuestas, en el curso de las entrevistas insistimos sobre el extremo, entonces justificaron sus declaraciones en lo que recordaban de la llamada ley de Ohm generalizada.

De todas formas, las breves pero rotundas respuestas anteriores, no deja lugar a dudas acerca de la confusión a la que nos referíamos al comienzo de esta parte del análisis, entre una relación experimental restringida (ley de Ohm) y un principio general como el de la energía.

En el caso del enunciado 2, el 28% directamente decía que esta afirmación era incorrecta, la verdad es que la mayoría no lo justificaba y los que lo justificaban, lo hacían porque identificaban la ley de Ohm con una forma del principio de conservación. Un significativo 22% no contestaba. Al 50% le parecía una afirmación correcta, pero el 32% no lo justificaba. Sólo un pobre 3% lo justificaba correctamente:

“La ley de Ohm permite calcular la intensidad del circuito pero no explica el principio de conservación de la energía.”

Ciertamente que el profesor podía haber sido algo más explícito y referirse al carácter restringido de la ley de Ohm a un tipo de materiales, o haber expresado dicho principio en términos de fuerza electromotriz y diferencia de potencial, pero aun así la evaluamos como positiva.

Lo más destacado sería una consecuencia de no distinguir entre fuerza electromotriz y Diferencia de potencial: se pone en evidencia un error muy generalizado que consiste en confundir la ley de Ohm y la segunda ley de Kirchhoff, que expresaría el principio de conservación de la energía para el circuito que se presentaba en el ítem. Junto a esto se evidencia una falta de capacidad para argumentar en torno a cualidades o atributos que puedan expresarse mediante ecuaciones o formulas matemáticas.

5.2.3C: Resultados del cuestionario para contrastar las ideas del profesorado acerca de las descripciones macroscópica y microscópica y las relaciones entre la electrostática y los circuitos eléctricos.

Los ítems de Cuadro 4.10 permiten el análisis de cómo se establecen las relaciones entre los niveles descriptivos macroscópicos y microscópicos. Una declaración de una buena parte de los textos habla de la Fuerza electromotriz como **“el trabajo que la pila realiza sobre cada unidad de carga que circula por el circuito a su paso por el interior de la pila”**. Hay que mostrarse de acuerdo con la escasa importancia que se le ha dado al concepto, para que semejante definición se haya venido manteniendo y transmitiéndose de unos textos a otros. Porque ¿qué es eso del trabajo que la pila realiza sobre la unidad de carga? ¿Cómo algo macroscópico y perceptible por los sentidos como la pila, realiza trabajo sobre algo microscópico cuya existencia pertenece al ámbito de las ideas? La fuerza electromotriz cuantifica un trabajo que no se dice qué fuerzas lo hacen, ni sobre qué se ejercen y cómo es el desplazamiento, es decir, de dónde a dónde y claro, era un trabajo tan “virtual” que todo sobre él se daba por sobreentendido.

En este apartado se han diseñado tres ítems, cuyos resultados además de su propia información serían convergentes, al menos en parte, con los resultados de los ítems acerca de las ideas del profesorado sobre el concepto de Fuerza electromotriz y su diferenciación con el de Diferencia de potencial. La tabla 5.8 sintetiza los resultados obtenidos.

Tabla 5.8 Resultados ámbito aplicaciones propiedades macro-micro

Ítem 1 [Cuadro 4.10]	N = 118; Número de profesores que escoge cada opción (%)							
	opción a	opción b	opción c	opción d	JC	JE	NJ	NC
	6 (5)	21 (18)	58 (49)	24 (20)	5 (9)	15 (13)	4 (3)	9 (8)

Casi la mitad de los profesores (49%) atribuyen a las cargas una propiedad del campo: el potencial. El 20% selecciona la opción correcta, pero menos de la mitad (el 9%) la justifica correctamente. Que incluso el 18% atribuya a una carga la propiedad diferencia de potencial, evidencia un nivel de confusión conceptual en relación con lo que hemos venido llamando el ámbito de aplicación de los conceptos nada desdeñable.

Las siguientes son ejemplos de justificaciones que hemos evaluado como incorrectas:

- “No varían ni la fem ni la d.d.p. ni el potencial porque todas estas magnitudes corresponden a la pila y no a la carga.” (Licenciado en química)
- “...Ya que no se puede decir el potencial de una carga sino el potencial al que está sometida una carga” (Licenciado en física)
- “Ninguna de las magnitudes anteriores ya que la carga eléctrica es una propiedad de la materia.” (Ingeniero Industrial)

No dejan dudas las respuestas anteriores con respecto al nivel de confusión conceptual existente entre el profesorado, al margen de su licenciatura de formación inicial.

Un par de ejemplos para terminar de entre los profesores que escogieron la opción c), que no olvidemos eran mayoría.

- “Varía su potencial porque las cargas eléctricas buscan la situación donde tengan la menor energía posible, así lo que varía es su potencial porque energía eléctrica = carga x potencial” (Licenciado en química).
- “Cuando una carga se desplaza de un electrodo a otro de la pila está pasando de un potencial menor a otro mayor, por tanto, varía su potencial. Si bien, habitualmente se considera que las cargas van del electrodo positivo al negativo, esto no es más que un convenio.” (Licenciada en física)

Aun otras respuestas revelaban otros errores junto a la idea que analizábamos, pero por razones de espacio no es posible entrar en una pormenorización de estas ideas erróneas.

El siguiente ítem (**ítem 2** de esta serie), cuyos resultados se presentan en la tabla 5.9, trataba de profundizar en estas ideas del profesorado.

Tabla 5.9 Descripciones macro-micro de los conceptos fuerza electromotriz y diferencia de potencial

Ítem 2 [Cuadro 4.10]	Número profesores = 76 (Porcentaje)					
	Incorrecto	Correcto	JC	JE	NJ	NC
E1: A nivel microscópico la noción de fuerza electromotriz está relacionada con las explicaciones acerca del movimiento de las cargas en el interior de la pila.	47 (62)	7 (9)	0 (0)	2 (2)	5 (7)	22 (29)
E2: A nivel microscópico el concepto de diferencia de potencial está relacionada con las explicaciones acerca del movimiento de las cargas en la parte del circuito exterior a la pila.	38 (50)	19 (25)	1 (1)	7 (9)	11 (14)	19 (25)

Un porcentaje alto de las elecciones dice que es falso, la verdad es que tampoco se justifica, podríamos decir que “suena” a falso. Los que lo hacen señalan que es falso ya que la fuerza electromotriz está relacionada con la corriente del circuito y la corriente no es algo que se reduzca a la pila.

- “Es falsa, ya que tanto la fem como la d.d.p. explican el movimiento de las cargas en la parte exterior del circuito”

Hay una justificación de que el enunciado es erróneo, de un joven profesor en ejercicio que no nos resistimos a traer aquí:

- *“Falso. A nivel microscópico la fem tiene el mismo sentido que la temperatura o la entropía, ninguno.”* (Licenciado en química)

Casi un tercio de los profesores encuestados (29%) no contesta, y del escaso porcentaje que señala la veracidad del enunciado, ni uno sólo lo justifica correctamente. Ejemplos de justificaciones erróneas son:

- *“Verdadero. Entre dos puntos existe una diferencia de potencial que genera el movimiento de las cargas dentro de la pila”* (Licenciado en química)
- *“Efectivamente así es como se genera una d.d.p. entre los bornes de la pila y esta d.d.p. es la responsable del movimiento de las cargas a través del circuito”* (Licenciado en física)

De las respuestas anteriores se desprende que la diferencia de potencial es la responsable del movimiento de las cargas en todo el circuito, incluyendo la pila, si no es así desde luego los encuestados no han matizado nada que haga pensar lo contrario.

Los resultados del enunciado 2, convergentes con los del ítem anterior, tienen unos índices esclarecedores: el 25% no contesta, el 50% dice que es incorrecto y la idea es la misma que se ha expresado al contestar acerca del enunciado anterior: La diferencia de potencial explica el movimiento de las cargas dentro y fuera de la pila. La mayoría de los que indican que el enunciado es correcto no lo justifican. Un ejemplo de respuesta evaluada negativamente es el siguiente:

- *“La diferencia de potencial es la propiedad característica del circuito entre dos puntos”* (Ingeniería industrial)

La única respuesta que se ha evaluado como positiva es la siguiente:

- *“Creo que es verdadero, aunque no estoy muy seguro, pero la diferencia de potencial no se puede medir dentro de la pila”* (Licenciado en química)

Cabe deducir que el profesor quiere decir que, si no se puede medir la diferencia de potencial en el interior de la pila debe estar relacionado sólo con lo que sucede fuera

de la misma, por lo que aunque no es una explicación en términos microscópicos de lo que sucede la hemos valorado positivamente.

Los resultados del análisis del ítem 3 de esta serie se recogen en la tabla 5.10 siguiente:

Tabla 5.10 Relaciones entre la Diferencia de potencial en la Electroestática y en Circuitos

Ítem 3 [Cuadro 4.10]	N = 124; Número profesores que escoge cada opción (Porcentaje)							
	opción a	opción b	opción c	opción d	JC	JE	NJ	NC
	0 (0)	61 (49)	26 (21)	24 (20)	7 (6)	39 (31)	15 (12)	12 (10)

De nuevo vamos a indagar en las ideas del profesorado en una cuestión que hemos detectado problemática en los textos, las relaciones que guardan con la Electroestática las explicaciones acerca del funcionamiento de circuitos de corriente continua, a través del concepto de Diferencia de potencial.

Merece la pena destacar el resultado de que el 20 % de los profesores crea que se trata de conceptos diferentes la diferencia de potencial que se estudia en la Electroestática y en el ámbito de los circuitos eléctricos. Del mismo modo el 10% que no contesta no resulta baladí, ni mucho menos el 12% que afirma que se trata del mismo concepto pero no explica por qué. El siguiente es un ejemplo utilizado por uno de los profesores que cree se trata de conceptos diferentes:

- “ $V = I \cdot R$ (circuitos)
 $V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}$ (Electroestática; se ve que se trata de dos ecuaciones diferentes.”
 (Licenciado en física)

Es una respuesta que ilustra además un estilo de razonamiento derivado de lo que hemos venido denominando una “presentación básicamente operativista de los conceptos”. El profesor llegaba a afirmar que lo anterior era una “demostración” matemática de lo que decía.

Nos habíamos referido antes a esta idea de la diferencia de potencial como causa de la fuerza electromotriz, pero ahora no hay duda lo proponemos y directamente el 21% de los profesores se muestra de acuerdo con la afirmación.

Por último casi la mitad de los profesores se muestra de acuerdo con la opción correcta, pero el 31% no lo sabe justificar, ya nos hemos referido a como otros ni siquiera lo intentan. Entre las justificaciones que hemos evaluado negativamente los siguientes son algunos ejemplos:

- *“Los potenciales justifican la existencia de corrientes. De forma análoga a como el agua se movería a través de tuberías desde recipientes con mayor volumen de agua a otros con menor, en circuitos donde hay cargas en movimiento se producen corrientes en función de los potenciales.”*
- *“El concepto de potencial en electrostática nos ayuda a entender la diferencia de potencial que se produce por las cargas en movimiento.”*

Un matiz interesante en el segundo de los ejemplos anteriores: la diferencia de potencial en los circuitos se produce como consecuencia del movimiento de las cargas. Esto es una idea errónea frecuente que, probablemente, se produce como consecuencia de no hacer explícito en las declaraciones el hecho de que entre dos puntos a diferente potencial se establece una corriente eléctrica. El siguiente ejemplo apunta en la misma dirección:

- *“El estudio macroscópico de un circuito nos permite establecer que la d.d.p. entre dos puntos, existiendo una resistencia o impedancia, aparece una intensidad, como cantidad de carga por unidad de tiempo o variación de carga respecto al tiempo, luego con la aparición de una I , justifico que hay una d.d.p. entre dos puntos.”* (Licenciado en física)

Hay en la respuesta anterior otro matiz interesante, que nos hemos encontrado reiteradamente: aparece diferencia de potencial si hay resistencia entre los dos puntos. Tampoco es demasiado sorprendente que, esta diferencia de potencial se entienda como algo distinto a la diferencia de potencial entre dos puntos de un campo eléctrico, entre los que no hay resistencia.

Por último un par de ejemplos de justificaciones de aquellos que creen que la diferencia de potencial entre dos puntos es causa de fuerza electromotriz, opción c):

- *“La fuerza electromotriz es la que hace que se muevan las cargas eléctricas. Aparece debido a la diferencia de potencial entre dos puntos”*
- *“La diferencia de potenciales de dos puntos del espacio, origina flujo de cargas desde un punto a otro originando esa fem.”*

En definitiva, el profesorado mantiene visiones deformadas en relación con los niveles de descripción microscópicos de los conceptos de Fuerza electromotriz y Diferencia de potencial. Así, el 49 % del profesorado atribuye a las cargas una propiedad del campo como es el potencial, la mayoría no sabe que la fuerza electromotriz está relacionada con el movimiento de las cargas en el interior de la pila (ítem 2) y el 50% piensa que la diferencia de potencial explica el movimiento de las cargas dentro y fuera de la pila (ítem 2). Más grave, si cabe, es que el 20% de los profesores encuestados piense que la diferencia de potencial en el estudio de los circuitos y en la electrostática son diferentes conceptos (ítem 3). Por último, las explicaciones acerca del funcionamiento de los circuitos, se mantienen aisladas o bien tienen poca conexión con los conceptos que se introducen en la Electroestática.

5.2.3D: Resultados del cuestionario para contrastar las ideas del profesorado en relación con la naturaleza y la medida de la fuerza electromotriz

Los ítems de Cuadro 4.11 nos van a permitir el análisis de las ideas del profesorado acerca de la naturaleza y medida de la fuerza electromotriz. La Fuerza electromotriz aparecía en ámbitos del Electromagnetismo aparentemente distintos, cuando tenían lugar reacciones químicas en una pila y cuando un imán se mueve en el interior de una bobina, y en ambas situaciones se representa por la letra griega ε . ¿Se trata del mismo concepto? ¿Por qué? ¿Cómo se mide la fuerza electromotriz de una pila? Responder a estas preguntas resulta problemático y vamos a explorar qué nociones son conflictivas entre el profesorado. Los siguientes son los resultados que se obtuvieron cuando aplicamos los dos ítems del cuadro 4.11 al objeto de analizar las ideas de los profesores en torno a estas cuestiones.

La tabla 5.11 sintetiza el análisis de las respuestas. El ítem 1 se pasó a 50 profesores.

Tabla 5.11 Resultados análisis de las ideas acerca de la naturaleza de la Fuerza electromotriz

Ítem 1: Cuadro 4.11	Profesores (N = 50) (Porcentaje)				
	Correcta			Incorrecta	NC
	JC	JE	NJ		
E1: Se trata del mismo concepto en ambos casos, ya que en ambos tipos de fenómenos la fuerza electromotriz se mide siempre en voltios.	2 (4)	11 (22)	11 (22)	11 (22)	15 (30)
E2: Ambos conceptos tienen en común el que cuantifican energía que se transfiere en el seno de un campo eléctrico no conservativo.	0 (0)	5 (10)	16 (32)	10 (20)	19 (38)
E3: Las experiencias en las que ambos conceptos participan, reacciones químicas y movimiento relativo entre bobinas e imanes, no tienen nada en común.	4 (8)	8 (16)	10 (20)	9 (18)	19 (38)
E4: Es por tradición histórica que dos conceptos que no tienen nada en común se nombren de la misma forma y se representen por la misma letra.	0 (0)	12 (24)	18 (36)	3 (6)	17 (34)

Vemos como los porcentajes más altos son los de la columna de los que no contestan. Esto es lo más significativo, si bien para este enunciado el porcentaje con ser del 30% es el más bajo de la serie. El 22% se muestra de acuerdo con la afirmación. Siendo el mismo el valor del porcentaje de los que no justifican que el de los que justifican erróneamente. Los siguientes son ejemplos de respuestas evaluadas como erróneas.

- “Es el mismo concepto pero no porque en ambos casos se mida en las mismas unidades, sino porque representan a la fuerza impulsora responsable de un desplazamiento de cargas”.
- “Falso. Se miden en voltios pero no son el mismo concepto. Una es la fuerza electromotriz de la pila que da lugar a una intensidad de corriente por diferencia de potencial y el otro es la variación de ese potencial o variación de intensidad de corriente aplicada al mismo caso en el tiempo.”

En relación con el enunciado 2 el 38% no contesta, el 20% directamente niega un enunciado correcto, de los profesores que aceptan la corrección del enunciado el

32% no lo justifica y el 10% lo hace de forma errónea. Ejemplos de justificaciones que hemos evaluado como erróneas son las siguientes:

- *“Es verdadero porque, aunque el campo eléctrico es conservativo, el efecto Joule hace que el proceso en conjunto no sea conservativo. Por su parte, el campo magnético no es conservativo.”*
- *“Creo que si pero la fem de una pila puede ser el campo eléctrico conservativo ya que es un valor intrínseco del circuito o aparato generador de corriente; mientras que la fem de inducción si puede ser originada por un campo eléctrico no conservativo a veces inducido por un campo magnético.”*

Una vez más el ámbito de aplicación de los atributos de los conceptos, en este caso el de campo, se manifiestan como una deficiencia entre los profesores que hemos encuestado.

Para el enunciado 3, de nuevo el 38% de los profesores no contestan, lo cual parece un resultado coherente con el del enunciado anterior. El 18% se muestra de acuerdo con el enunciado de forma que ambos campos fenomenológicos nada tienen en común, lo que de nuevo es convergente con la respuesta al enunciado anterior.

De los profesores que señalan la incorrección de la afirmación el 20% no lo justifica y el 16% lo hace de forma errónea. Justificaciones de esta clase son:

- *Falso. En las reacciones químicas de las pilas aparecen desplazamientos de cargas, al igual que en los campos magnéticos, debidos a cargas en movimiento.*
- *La fem de la pila es generalmente exclusiva de aplicación de campos eléctricos mientras que la fem de inducción es debida a campos electromagnéticos.*

En el enunciado 4, A pesar de que dicho enunciado tiene una apariencia de arbitrariedad poco coherente con la Física y con la Ciencia, algunos profesores se muestran de acuerdo con la afirmación, si bien el porcentaje es pequeño (6%). El 34% no contesta y de los que señalan como falsa la declaración el 36% no lo justifica y el resto lo hace de forma errónea. Una vez más ilustramos este tipo de argumentaciones:

- *“Falso, no se debe a tradición histórica. Representan a la fuerza impulsora responsable de la circulación de cargas y dimensionalmente son iguales.”*

- “Falso. No tienen por qué llamarse de la misma forma se trata de conceptos diferentes”.

Uno de los encuestados señalaba lo siguiente, que transcribimos sin comentar:

- “No se si es por tradición histórica, pero si es algo que se encuentra en otros muchos casos, por ejemplo con V se indican la velocidad, el potencial, el volumen, etc.”

Con el **ítem 2** afrontábamos un último aspecto en relación con el conocimiento de un concepto: su medida. La tabla 5.12 sintetiza los resultados del ítem 2.

Tabla 5.12 Resultados análisis ideas acerca de la medida de la Fuerza electromotriz

Ítem 2 [Cuadro 4.11]	Profesores (N = 50) (Porcentaje)				
	Correcta			Incorrecta	NC
	JC	JE	NJ		
E1: Es indiferente medir fuerza electromotriz de una pila o diferencia de potencial entre sus electrodos ya que con el aparato de medida en ambos casos se obtiene una cantidad en voltios.	7 (13)	19 (38)	12 (24)	10 (20)	2 (5)
E2: La fuerza electromotriz de una pila conectada a un circuito no se puede medir. De esta forma no toda la energía de la pila se invierte en generar y mantener constante la diferencia de potencial entre sus electrodos.	0 (0)	6 (12)	18 (36)	9 (18)	17 (34)
E3: Por razones formales se mide la fuerza electromotriz de una pila comparando su valor con el de una pila patrón, utilizando para ello un potenciómetro intercalado en el circuito.	0 (0)	11 (22)	14 (28)	14 (28)	11 (24)
E4: Para medir la fuerza electromotriz de una pila basta con medir la diferencia de potencial entre sus electrodos y sumar la cantidad $I \cdot r$, donde r es la llamada resistencia interna de la pila.	0 (0)	0 (0)	3 (6)	38 (76)	9 (18)

Uno sólo de los enunciados fue justificado correctamente por un porcentaje pequeño de los profesores. Ni uno de los profesores sabía, en las condiciones del ítem que les proponíamos, por qué la fuerza electromotriz se mide con un potenciómetro comparando el valor de la fuerza electromotriz de la pila problema con el valor de una pila patrón. Conozcamos el resultado de cada uno de los enunciados.

En relación con el enunciado 1, es significativo que un porcentaje no demasiado alto, pero significativo (20%) acepta que el enunciado es verdadero. De entre el 75% de los profesores a los que les parece incorrecto el 24% no argumenta por qué y el 38% lo hace de forma errónea. Los siguientes son ejemplos de estas argumentaciones erróneas:

- *“Falso, ya que habría que tener en cuenta la resistencia interna de la pila.”*
- *“Falso las medidas de fem y diferencia de potencial se realizan con aparatos diferentes”*

El profesor de la respuesta anterior reconoce que la medida se realiza con instrumentos diferentes, pero no dice nada más por lo que no se ha evaluado positivamente dicha respuesta.

En el enunciado 2, un significativo 34% de los encuestados no se pronuncia sobre esta declaración y un porcentaje menor pero en absoluto despreciable (18%) la identifica como falsa. De los que la declaran verdadera el 36% no lo justifica y el resto lo hace erróneamente.

- *“Verdadero ya que la energía si no se pierde por efecto térmico”*
- *“Efectivamente ya que parte de la fuerza electromotriz se invierte en vencer la resistencia interna de la pila.”*

La primera de las respuestas que podría ser parte de un razonamiento correcto, pero que con ese nivel de concreción por todo razonamiento no se ha evaluado como positiva. La segunda podría interpretarse que el profesor en cuestión parece estar más o menos situado, pero nos parece que un profesor debe ser capaz de utilizar el lenguaje de forma más precisa. La fuerza electromotriz no se invierte en nada y menos en “vencer” resistencias. Si la pila está conectada al circuito sucede que no toda la energía puesta en juego en las reacciones químicas se invierte en separar las cargas y mantenerlas separadas, una parte de la energía se transforma entonces por efecto Joule en la resistencia interna de la pila.

En el enunciado 3, el porcentaje de los que no contestan es más que significativo (24%), casi un tercio de los profesores se muestran de acuerdo con esta afirmación

errónea (28%), al mismo porcentaje le parece le parece errónea pero no dice por qué y el resto lo justifica de forma errónea, como los ejemplos que vienen a continuación:

- *“Falso, lo que ese mide comparando con un patrón es la diferencia de potencial”*
- *“Es falso ya que sabiendo la resistencia interna de la pila podemos medir la fem”*

En el enunciado 4, los resultados son contundentes y confirma que las ideas en relación con las medidas de fuerza electromotriz de una pila son generalmente erróneas y las que no carecen de consistencia. Al 76% de los encuestados les pareció correcto el enunciado, y a los pocos que les parecía incorrecto no justificaron por qué.

Pero los resultados son convergentes con los que muestran que la noción principal es la de diferencia de potencial y la fuerza electromotriz es algo derivado, incluso para medir la fuerza electromotriz, se hace a partir de medidas de diferencia de potencial.

Resumen de los resultados obtenidos en el análisis de los profesores acerca del concepto de fuerza electromotriz

Los resultados obtenidos son convergentes en mostrar que los profesores presentan confusiones y errores conceptuales a la hora de explicar el papel que juega la magnitud fuerza electromotriz en el modelo explicativo de un circuito sencillo de corriente eléctrica. Estos resultados confirman las consecuencias de la hipótesis. Las principales deficiencias detectadas son las siguientes:

- a) En los ítems correspondientes a la primera parte del cuestionario el porcentaje de respuestas justificadas correctamente suelen estar por debajo del 10%, resultando ciertamente muy minoritario. El profesorado no manifiesta una clara comprensión de las diferencias entre fuerza electromotriz y diferencia de potencial, tanto en situaciones específicas como en situaciones globales. Así, el ámbito de aplicación de estos conceptos se confunde o no se conoce (1%-12% de justificaciones correctas en ítem 1; 15% en ítem 3; 2% en ítem 5). No se utilizan explicaciones a nivel microscópico, casi no se emplea el concepto de campo, y se confunden con frecuencia hechos y explicaciones de tales hechos

(3%-10% de justificaciones correctas en ítem 4). Así mismo, se evidencia una falta de familiarización con el montaje y análisis de circuitos de forma experimental (3%-13% de justificaciones correctas en ítem 2).

- b) La no distinción entre diferencia de potencial y fuerza electromotriz lleva al profesorado a cometer errores conceptuales a la hora de definir los ámbitos de validez de leyes del circuito como la ley de Ohm y el principio de conservación de la energía (segunda ley de Kirchhoff). Así, en la segunda parte del cuestionario, ninguno de los profesores encuestados justifica correctamente la respuesta correcta del ítem 1 y, sólo el 3% lo hace en el ítem 2.
- c) Las carencias anteriores convergen con otras deficiencias del profesorado a la hora de interpretar un modelo científico explicativo de los circuitos sencillos de corriente continua que establezca las necesarias relaciones entre los diversos conceptos que emplea el modelo tanto a nivel macro (diferencia de potencial y fuerza electromotriz) como a nivel micro (cargas, campo eléctrico, fuerzas eléctricas). En esta tercera parte del cuestionario, el 49% de los profesores atribuyen a las cargas una propiedad del campo como es el potencial (ítem 1), la gran mayoría de los profesores no saben que la fuerza electromotriz está relacionada con el movimiento de las cargas en el interior de la pila (ítem 2) y el 50% piensa que la diferencia de potencial explica el movimiento de las cargas dentro y fuera de la pila (ítem 2). Más grave, si cabe, es que el 20% del profesorado conteste en el ítem 3 que el potencial definido en electrostática y en los circuitos eléctricos son diferentes.
- d) Estas confusiones conceptuales también afectan a la medida de las magnitudes diferencia de potencial y fuerza electromotriz. En Física una parte importante del conocimiento de las magnitudes y conceptos es conocer aquellos aspectos relativos a su medida. Por ejemplo si se definen el Calor o la Fuerza, una de las primeras cuestiones es indicar cómo se miden y si es posible con qué aparato se realiza la medida. Por ejemplo, la fuerza se mide con un dinamómetro y la intensidad se mide con un amperímetro. También es necesario dejar claro los límites de estos procedimientos. Así, si en un sistema no podemos medir variaciones en su temperatura inferimos que ni ha cedido ni ha absorbido calor.

Desafortunadamente, en los ítems de la cuarta parte del cuestionario, el profesorado no distingue entre la medida que se hace de la magnitud diferencia de potencial y de la magnitud fuerza electromotriz. Así en el ítem 2 casi ningún profesor sabe explicar correctamente cómo mediría ambas magnitudes en diferentes contextos. Así mismo, cuando en el ítem 1 tienen que evaluar el significado de la fuerza electromotriz en un contexto de circuito de corriente continua y en un contexto de inducción electromagnética, alrededor del 50% no lo sabe o no contesta y sólo cerca de un 5% saben justificar adecuadamente la diferencia.

En resumen, los resultados obtenidos en el cuestionario son convergentes en apoyar las consecuencias establecidas en la hipótesis. Estas se verán apoyadas por los resultados cualitativos que hemos obtenido en las entrevistas realizadas a los profesores y que exponemos en la siguiente sección.

5.2.4 Resultados relativos al análisis de las ideas del profesorado acerca del concepto de fuerza electromotriz, obtenidos a través de entrevistas con los mismos.

La intencionalidad de las entrevistas, era obtener información que complementara y completará en lo posible los resultados obtenidos al pasar los cuestionarios escritos, presentados en los cuadros 4.8 a 4.11. De esta manera queríamos asegurarnos de nuestra interpretación de las respuestas e ilustrar de una manera viva y quizá de mayor expresividad, los puntos de vista que los profesores ya nos habían expuesto.

No vamos a presentar estos datos transcribiendo resúmenes más o menos extensos de las entrevistas mantenidas una a una. Sino que vamos a presentarlas desde los mismos esquemas que hemos venido siguiendo a la hora de presentar los resultados de las pruebas escritas. Empezando por el primero de ellos, es decir, las relaciones y diferencias entre los conceptos de Fuerza electromotriz y Diferencia de potencial (Cuadros 4.8 I y II).

Resultados de las entrevistas mantenidas con profesores, para profundizar en los aspectos relacionados con las ideas que mantienen acerca del concepto de fuerza electromotriz y sus relaciones con la diferencia de potencial

Los fragmentos de entrevistas que se presentan se grabaron con dos profesores de Secundaria y un profesor de Universidad, los nombres de todos los profesores y profesoras entrevistados son ficticios. En todos los casos el entrevistador fue el propio investigador.

1. Ejemplo categorizado como *“La diferencia de potencial preponderante sobre la fuerza electromotriz”*

Ejemplo 1:

Le indicamos, en este caso a la profesora, como a través de algunos de los ítems que había contestado intentábamos analizar lo que pensaba acerca de las diferencias

entre ambos conceptos así como sus evidentes relaciones. Así es que le pedimos que leyera de nuevo sus respuestas a las preguntas diseñadas al efecto, se tomara el tiempo que necesitara antes de iniciar la entrevista.

01 Entrevistador (E): *¿Cuáles son las relaciones y diferencias entre los conceptos de Fuerza electromotriz y Diferencia de potencial?*

03 Laura (L): *Bueno, a ver...la fuerza electromotriz y el potencial son lo mismo. El potencial es la capacidad para realizar un trabajo y cuando el trabajo se está realizando hablamos de fuerza electromotriz, pero es lo mismo. También podríamos decir que la fuerza electromotriz es, simplemente, una media del flujo de corriente entre dos puntos, debido a su diferencia de potencial. Sus relaciones son como las del trabajo y la energía.*

Con el fin de evitar respuestas circulares en torno al extremo que se trataba, el entrevistador trato de que la profesora se fijara en la separación de cargas que se producía en el caso del cristal de cuarzo y la pila.

011 (E): *En el ítem nº 2 de esta serie analizamos estas nociones en relación con el efecto piezoeléctrico. ¿Crees que existen analogías entre lo que sucede en la pila y el cristal de cuarzo que puedan expresarse en términos de fuerza electromotriz y diferencia de potencial?*

014 (L): *A ver,...Si, si las hay en ambos casos tenemos una diferencia de potencial y como consecuencia fuerza electromotriz. Es decir, un generador de corriente no es sólo una pila. La fuerza electromotriz como en el caso de la pila, la produce la diferencia de potencial entre la cara superior y la base, por lo que si se puede aplicar el concepto de fuerza electromotriz.*

018 (E): *¿Encuentras alguna analogía entre lo que sucede en el generador de Van der Graaf, el cristal de cuarzo y la pila?*

La profesora revisa los ítems y sus respuestas e inicia su contestación:

020 (L): *Si, es evidente en los tres casos tenemos una diferencia de potencial y por tanto fuerza electromotriz.*

021 (E): *¿Con qué relacionas la diferencia de potencial y con qué la fuerza electromotriz?*

022 (L): *Ahora lo tengo muy claro. La existencia de potenciales positivo y negativo con la diferencia de potencial, la fuerza electromotriz con la corriente eléctrica.*

024 (E): *Me ha parecido entender de tus respuestas que entiendes una especie de relación jerárquica entre ambos conceptos ¿es así?*

026 (L): *Siempre que hay diferencia de potencial hay fuerza electromotriz, de hecho en la pregunta del anillo te digo que no creo que entre los puntos A y B no exista diferencia de potencial.*

Ejemplo 2

01 Entrevistador (E): *¿Cómo explicas a tus alumnos las relaciones y la diferencia entre fuerza electromotriz y diferencia de potencial?*

03 Ricardo (R): *Yo les explico esto de forma que nunca falla. Les digo a mis alumnos que la pila y el circuito es lo mismo que cuando nos vamos de viaje. Cuando nos vamos de viaje tenemos que disponer de una cantidad de dinero, una parte la gastamos en el hotel, lo demás en el resto de los gastos del viaje. Pues bien todo el dinero es la fuerza electromotriz de la pila, lo que nos podemos gastar cuando hemos pagado el hotel es la diferencia de potencial. En la práctica lo que cuenta es el dinero del que disponemos cuando hemos pagado el hotel, porque si después de paga el hotel no tenemos dinero, es lo mismo que si la diferencia de potencial es muy pequeña las bombillas no se encenderán.*

010 (E): *Es una analogía que parece esclarecedora, pero ¿Cómo relacionas la energía y las cargas con los elementos digamos de tu imagen?*

012 (R): *Es claro, el dinero con la energía, pero el asunto de las cargas los alumnos no lo entienden y yo no pierdo tiempo en eso.*

Las dificultades que se ponen de manifiesto en estas entrevistas guardan un paralelismo importante con las consecuencias contrastables C3 en la que se pronosticaba dificultades para distinguir entre fuerza electromotriz y diferencia de potencial y C3.1.2. en la que también se preveía que no se concebiría la fuerza electromotriz relacionada con una acción que separa cargas y las mantiene separadas. Pronosticábamos estas dificultades para los estudiantes y observamos que forman parte de las que exhibe el profesorado. En estos ejemplos aflora un matiz según el cual los conceptos no se distinguen pero hay uno de ellos que se concibe como causa u origen del otro.

2. Ejemplos categorizados como “*Al medir no existen diferencias entre fuerza electromotriz y la diferencia de potencial*”

Ejemplo 1:

La siguiente entrevista se mantuvo de manera fortuita con el pleno de un departamento de ingeniería. El entrevistador había concertado la cita con uno de los profesores de dicho departamento y apenas le formuló la primera pregunta el profesor

invitó al resto de los profesores del departamento, cinco en total, reunidos en una dependencia contigua a participar en la conversación.

01 Daniel (D): *Es un profesor de Instituto que realiza una investigación en Didáctica. Me pregunta si merece la pena investigar las diferencias entre los conceptos de fuerza electromotriz y diferencia de potencial, le voy a responder y me gustaría que vosotros añadieseis aquello que os pareciera oportuno. “Yo creo que tal investigación no merece la pena porque si nosotros medimos con un polímetro (de calidad suficiente) diferencia de potencial y fuerza electromotriz, en ambos casos obtenemos una cantidad en voltios”, así es que ¿si cuando medimos no encontramos diferencias?*

07 (E): *¿Todos ustedes participan de esta opinión?*

Todos asienten, todos. Por lo que el entrevistador continúa:

09 (E): *Desde esa lógica, si con un dinamómetro (de la calidad suficiente) medimos el valor de la fuerza con la que la Tierra atrae una esfera metálica obtendremos una cantidad en newton. Si a continuación y con el mismo dinamómetro, medimos la fuerza con que otra esfera cargada o un imán atraen a la primera esfera, de nuevo tendremos una cantidad en newton. Podríamos concluir que no existen diferencias entre fuerzas gravitatorias y fuerzas electromagnéticas por que cuando medimos con un dinamómetro unas y otras obtenemos en ambos casos una cantidad en newton.*

Tiene lugar un silencio elocuente y la entrevista termina, pero al salir del despacho uno de los profesores dice:

017 (Profesor): *¿Dice usted que es profesor de Instituto? quizá para el Instituto merezca la pena una investigación como esa, porque aquí...*

Ejemplo 2:

Se trata de un profesor de Secundaria, la parte de la entrevista a que se hace referencia, recoge la parte en la que analizamos las respuestas centrándonos en los ítems 2, 4 y 5 del cuadro 4.8.

01 (E): *En el caso del cristal de cuarzo en el apartado c) dices que la fuerza electromotriz es igual a la diferencia de potencial, pero en el caso de una pila distingues entre ambos conceptos, ¿crees que se trata de distinguir entre ambas nociones dependiendo de la situación?*

04 Rafael (R): *Yo creo que es más un problema de lenguaje para referirnos a una parte u otra del circuito. Cuando hablamos de fuerza electromotriz nos referimos a la pila, mientras que la diferencia de potencial es a cualquier parte del circuito.*

07 (E): Dices en el apartado d) del ítem 2 que la fuerza electromotriz está generada porque tenemos cargas de distinto signo en las caras del cristal ¿Quieres decir con esto que la fuerza electromotriz la crea la diferencia de potencial?

010 (R): Quiero decir que el cristal es una pila y tiene por lo tanto fuerza electromotriz.

011 (E): Sin embargo en el apartado c) del ítem 4 que la opción más lógica te parece la que señala que si hay fuerza electromotriz debe haber una diferencia de potencial electrostático asociada a la misma que dará lugar a una corriente eléctrica. ¿Implica esto para ti algún tipo de jerarquía conceptual?

015 (R): Podría ser, no estoy seguro

016 (E): ¿Crees que hay diferencias entonces entre ambos conceptos?

017 (R): Como te he dicho no van más allá de ser una manera de referirnos a una u otra parte del circuito, pero nada más.

La diferencia para algunos es un problema de lenguaje al referirse a una parte u otra de un circuito. Parecería que se utiliza un criterio empírico de diferenciación, en definitiva es una dificultad del mismo tipo que la anterior, no se distingue entre fuerza electromotriz y diferencia de potencial (consecuencia contrastable C3) y parecería que, en el campo de la Física, ciencia de la medida para algunos, el que la medida de ambas magnitudes se exprese y se realice con el mismo instrumento (lo que dicho así también es un error) sería una razón más que suficiente para avalar la identidad entre ambas magnitudes.

Merece la pena resaltar también la recomendación, que el entrevistador percibió como una recomendación de buena fe, de que en el ámbito de la enseñanza Secundaria si podría merecer la pena realizar una investigación en torno a los dos conceptos.

Resultados de las entrevistas mantenidas con profesores, para profundizar en los aspectos relacionados con las ideas que mantienen acerca de la diferencia entre la ecuación del circuito y la ley de Ohm

Vamos a profundizar en las ideas expresadas en las respuestas a los ítems del cuadro 4.9. De nuevo los fragmentos de la entrevista pertenecen a dos profesores de Secundaria y a un profesor de Universidad.

3. Ejemplos categorizados como “*Identidad de las ecuaciones que representan la ley de Ohm y la ecuación del circuito*”

Ejemplo 1:

Sostenida con un profesor de Secundaria, sólo dos o tres días después de que hubiese cumplimentado el cuestionario escrito.

01 Entrevistador (E): *Has escogido la opción b) en tu respuesta al ítem 1, sin embargo en tus explicaciones dices que al ser la resistencia interna de la pila despreciable se van a cumplir indistintamente $\varepsilon = I \cdot R$ y $V_a - V_b = I \cdot R$, ¿Las dos ecuaciones describen algún aspecto para el conjunto del circuito?*

05 Juan (J): *Bueno...si...depende del caso...*

06 (E): *En este caso claro, (señalando el dibujo de la pregunta). Luego nos podemos referir a otras situaciones.*

08 (J): *En este caso si porque...la resistencia interna de la pila es nula y entonces las medidas entre los bornes de la pila y entre la resistencia es la misma. Ya que si la intensidad que circula por el circuito es I y la caída de tensión es la misma es la misma tanto en la pila como en la resistencia tiene que ser la misma entonces se deben cumplir ambas ecuaciones...De todas formas yo creo que...bueno la fuerza electromotriz y la diferencia de potencial son la misma...cosa..., miden la misma cosa..."*

014 (E): *¿Qué miden?*

015 (J): *La tensión en bornes.*

016 (E): *¿Entiendes por tensión algo diferente?*

017 (J): *¡No! Se trata de la misma cuestión.*

Ejemplo 2:

La mantuvimos con un profesor universitario. Nos había pedido conocer la prueba antes de pasarla a sus estudiantes. En el curso de la entrevista, el profesor nos brindaba sus valoraciones acerca del nivel de conocimientos que exigían los distintos ítems de la prueba y de paso le pedíamos contestara y comentara las distintas opciones. El fragmento de entrevista se refiere, por orden, a los ítems 1 y 2 del cuadro 4.9

023 (E): *¿Cree que el enunciado puede prestarse a confusión?*

024 Carlos (C): *No en absoluto*

025 (E): *¿Cree que justificaran correctamente la respuesta los estudiantes?*

026 (C): *No estaría muy seguro. Los estudiantes van a dudar entre las opciones a) y b).*

027 (E): *¿Por qué?*

028 (C): *No sabría decirlo, pero creo que dudarán entre estas dos opciones.*

029 (E): *¿Cuál es la opción?*

030 (C): *Si la resistencia interna es despreciable sería la opción b).*

031 (E): *¿Y si no?*

032 (C): *Habría que verlo, ya que de todas formas la diferencia entre ambas ecuaciones es sutil.*

033 (E): *¿En qué situación no se cumpliría?*

034 (C): *No se...habría que verlo*

035 (E): *¿Pero hay alguna situación en la que no se cumpla?*

036 (C): *Podría ser.*

.....

Puede comprobarse como el profesor encuestado evita pronunciarse en todo momento sobre las preguntas que se le están formulando.

Ejemplo 3:

Se trata de un profesor de Secundaria

01 (E): *El objetivo inicialmente es que puedas matizar, si te parece oportuno, las respuestas a tus preguntas y de paso profundizar en algunas de ellas. ¿En relación con el ítem 1 deseas añadir o rectificar alguna cosa?*

04 Miguel (M): *Bueno no comprendo lo que se pretende exactamente. Si nos referimos a que si las expresiones anteriores a) y b) dan resultados correctos, para el caso concreto que se pone diría que ambas.*

07 (E): *Se quiere saber si para el circuito cerrado de la figura se cumplen las ecuaciones a), la b) o ambas, es decir, si la ecuación del circuito es una u otra o las dos.*

09 (M): *Bueno si hubiese resistencia interna en la pila la ecuación b) habría que modificarla, mientras que seguiría siendo válida a).*

011 (E): *Pero ¿las dos ecuaciones representan lo mismo?*

012 (M): *Se calcula la misma cosa con las dos*

013 (E): *¿Qué cosa?*

014 (M): *Energía... ¡trabajo!*

.....

La dificultad que se manifiesta al identificar las ecuaciones que representan la ley de Ohm y la ecuación del circuito deriva, entre otras razones, de identificar los conceptos de fuerza electromotriz y diferencia de potencial, la hemos indicado en el cuadro 4.3 como la consecuencia contrastable C4 y además las ideas que se manifiestan dan lugar a resultados convergentes con la consecuencia contrastable C3. Además se pone de manifiesto una deficiencia más y es la de aceptar de forma implícita, que la ley

de Ohm puede aplicarse a todos los elementos del circuito, incluyendo aquellos que no son óhmicos, como es el caso de la pila.

4. Ejemplos categorizados como “Identificar la ley de Ohm con la formulación del Principio de conservación de la Energía”

Se trata de fragmentos de entrevista con un profesor de Universidad y un profesor de Secundaria, la entrevista con el segundo la mantuvimos dos días después de cumplimentar la prueba escrita. En el caso del nivel universitario, se trata del mismo profesor que entrevistábamos en el ejemplo 2 anterior.

Ejemplo 1:

01 Entrevistador (E): *En relación con el ítem 2, ¿Le parece correcta la primera afirmación?*

02 Carlos (C): *Depende de cómo se exprese la ley de Ohm. Pero no me parece adecuado, yo no lo enfocaría así.*

04 (E): *¿Pero es un problema de enfoque o es incorrecto?*

05 (C): *Como incorrecto no, pero no se hasta que punto es aconsejable, no me gusta ese enfoque.*

06 (E): *El enunciado b) ¿le parece que podría ser correcto?*

07 (C): *No me gusta el enunciado, yo no lo enfocaría como un problema del Principio de Conservación de la energía.*

Ejemplo 2

Se trata de un profesor de Secundaria

01 Entrevistador (E): *En relación con el ítem 2 ¿Puede representar la ley de Ohm el Principio de Conservación de la Energía?*

03 Miguel (M): *Por supuesto, esto es lo que a los alumnos se les explica como ley de Ohm generalizada.*

04 (E): *Pero cuando se escribe la expresión a la que tu te refieres se escribe en la forma $\varepsilon = I \cdot R$ y no $V = I \cdot R$.*

06 (M): *Bueno, es igual, pero representan lo mismo.*

07 (E): *¿Qué representan?*

08 (M): *¡Hombre! la ley de Ohm.*

Una y otra vez nos hemos encontrado con ideas similares a las anteriores. Pero es más, la denominación en la práctica totalidad de los libros de texto de Secundaria de “ley de Ohm generalizada”, formulada como $\varepsilon = I \cdot R$, para expresar lo que no es otra

cosa que el principio de conservación de la energía, afianza si cabe esta idea errónea que consiste en suponer que la ley de Ohm puede expresar el principio de conservación de la energía y de nuevo, como una pescadilla que se muerde la cola, afianzar la idea de que ϵ y V_{ab} son formas diferentes de representar el mismo concepto. Estamos de nuevo ante una deficiencia similar a la enunciada en la consecuencia contrastable C4.

Resultados de las entrevistas mantenidas con profesores, para profundizar en los aspectos relacionados con las ideas que mantienen acerca de la diferencia entre las descripciones macroscópica y microscópica y las relaciones en la descripción de los circuitos con la Electroestática.

En relación con el cuadro 4.10, las respuestas a estos ítems se ilustran con los fragmentos de entrevistas de dos profesores universitarios y un profesor de Secundaria. Como se ha dicho los profesores de este nivel nos habían pedido conocer previamente la prueba que se iba a pasar a sus estudiantes.

5. Ejemplos categorizados como aquellos en los que “*Se confunden los ámbitos de aplicación de los conceptos*”.

Ejemplo 1

Entrevistador (E): *¿Cuál es su valoración del conjunto de la prueba para evaluar las nociones de fuerza electromotriz y diferencia de potencial?*

Marcos (M): *Ciertamente, digamos... que... las preguntas son poco académicas.*

(E): *¿Entonces?*

(M): *Yo estoy seguro de que mis estudiantes no tendrían problemas en las respuestas al ítem 1 y todos responderían, correctamente, que la carga al desplazarse entre los electrodos de la pila lo que cambia es su potencial. No creo que pudiesen salir bien parados con el resto.*

Ejemplo 2

Entrevistador (E): *Se trata de una serie de ítems para indagar acerca del ámbito de aplicación de las descripciones tanto macroscópicas como microscópicas por parte de los estudiantes de nuevo le pedimos su valoración y si le parece su propia respuesta.*

Carlos (C): *En relación con la pregunta primera aquí no hay dudas la carga entre los electrodos cambia su potencial y esto los alumnos están preparados para responderlo, o eso creo yo.*

.....

Ejemplo 3

Se trata de un profesor de Secundaria, la entrevista se mantuvo un par de días después de cumplimentar la prueba escrita.

Entrevistador (E): *¿Quieres modificar o añadir algo a tu respuesta a esta pregunta? (se trata del ítem 1 del cuadro 4.10)*

José (J): *Bueno yo creo que de todas las opciones lo único que puede cambiar de la carga es su potencial ya que a medida que la carga circula varía su potencial puesto que varía su energía.*

(E): *Cabe la posibilidad de que sean otras propiedades, en las distintas opciones no se mencionan todas.*

(J): *Cuando una carga se mueve de un punto A a otro B, es decir, entre dos puntos varía su energía potencial y por tanto su potencial, ya que: ($V = E_p/q$). El profesor escribe la relación anterior sobre un folio.*

Profesores de la Universidad no tienen dudas de que sus alumnos atribuyen a las cargas una propiedad del campo, el potencial, pero no lo conciben como una idea errónea. Es una deficiencia que pronosticábamos en la consecuencia contrastable C2, en relación con los ámbitos de descripción/explicación de los conceptos. Profesores de Secundaria también tienen dificultades para relacionar/distinguir el nivel empírico del nivel interpretativo (modelos), veremos si estos resultados son convergentes con los que se obtengan con los estudiantes.

6. Ejemplos categorizados como “*Visiones distorsionadas de las explicaciones en los ámbitos macro-micro*”

Los fragmentos de entrevistas pertenecen a las mantenidas con un profesor de Universidad y dos profesores de Secundaria. Las presentamos en ese orden:

Ejemplo 1:

Entrevistador (E): *Me gustaría contar con su valoración acerca de este ítem así como con su respuesta al mismo.*

Marcos (M): *Me parece que es mezclar dos cosas que no tiene mucho sentido. El concepto de fuerza electromotriz es un concepto que se deduce a partir de la ley de inducción de Faraday y mezclarlo con el concepto de la energía electroquímica me parece que es mezclar indebidamente dos conceptos. El concepto de fuerza electromotriz es un concepto macroscópico y mezclarlo con un concepto microscópico puede dar lugar a confusión. La fuerza electromotriz es básicamente un concepto fenomenológico y se introduce a partir de una deducción no microscópica sin basarse en ningún modelo acerca de la materia,*

es independiente del soporte material. Quiero decir que un campo magnético que varíe en una región del espacio crea una fuerza electromotriz y esto no está ligado con ningún soporte material de manera que relacionarlo con lo que sucede en una región del espacio con un soporte material me parece que puede dar lugar a confusión.

(E): *¿Y en el caso de la diferencia de potencial?, como se plantea en el apartado b)*

(M): *Lo explicaría si ese movimiento de las cargas no da lugar a una corriente estacionaria si no, no creo. Pero de nuevo no veo que tenga mucho sentido introducir aquí las explicaciones a nivel microscópico, de nuevo la diferencia de potencial es un concepto fenomenológico, no es un concepto microscópico. El tratamiento clásico del Electromagnetismo se hace al margen de las teorías acerca de la estructura de la materia, por tanto incluir para las explicaciones los niveles fenomenológicos con los niveles microscópicos de la materia, creo que puede conducir a errores.*

Ejemplo 2

La entrevista con los profesores de Secundaria se mantuvo durante la semana siguiente a la realización de las pruebas.

Entrevistador (E): *En relación con este ítem tienes alguna observación o añadido que hacer.*

Inmaculada (I): *No, como te digo aquí ambas afirmaciones son falsas ya que tanto la fuerza electromotriz como la diferencia de potencial explican el movimiento de las cargas en la parte del circuito exterior a la pila.*

(E): *¿Qué conceptos crees que se pueden utilizar para explicar el movimiento de cargas en el interior de la pila?*

(I): *No lo se en este momento, pero en cualquier caso yo creo que a nivel microscópico la noción de fuerza electromotriz no tiene mucho sentido, desde luego yo no la he utilizado nunca, ni recuerdo haberlo encontrado en los libros.*

Ejemplo 3

Entrevistador (E): *En el resto de los ítems de la prueba tus justificaciones son suficientemente explícitas, pero en este te limitas a señalar incorrecto para la opción a y correcto para la opción b). He supuesto que podría tratarse de un problema de falta de tiempo y me gustaría que justificases tus afirmaciones.*

Toñi (T): *A ver,... no fue falta de tiempo sólo. Yo se que no se pueden hacer medidas directas de la caída de potencial en el interior de una pila, pero si en el resto del circuito, por lo que deduzco que la afirmación b) puede ser correcta.*

(E): *¿Y en relación con la afirmación a)?*

(T): *No estoy segura de cómo se mide la fuerza electromotriz y por tanto no puedo extrapolar a lo que representa microscópicamente una medida de fem, como lo hice en el caso de la diferencia de potencial.*

Uno de los profesores mantiene una idea acerca de la fuerza electromotriz en la que este concepto se restringe al caso de la inducción, lo cual no deja de ser llamativo. Pero lo es mucho más el hecho de que fuera de la ecuación de Faraday para la inducción el concepto no tenga sentido. Es un ejemplo claro de una concepción básicamente operativista de los conceptos, que no se conciben al margen de las ecuaciones matemáticas o de las medidas. Por otra parte, es cierto que cuando se formula una buena parte del Electromagnetismo, las teorías vigentes acerca de la naturaleza de la materia no están elaboradas, pero de ahí a negar que el concepto de diferencia de potencial no pueda ser utilizado para explicar el movimiento de las cargas (descripción microscópica) en los cables conductores, entre ambas posiciones decimos hay gran distancia. Es cierto que los libros hacen referencias confusas a la interpretación microscópica del concepto de fuerza electromotriz, cuando se emplean expresiones del tipo: "es el trabajo que la pila realiza sobre la unidad de carga que pasa por ella". Justamente esto es una deficiencia en la enseñanza, de los libros y de los profesores, aclarar cual es el efecto de las fuerzas que se realizan sobre las cargas que se desplazan en el interior de la pila, como consecuencia de tales fuerzas, y esto es una descripción en el ámbito que venimos denominando microscópico.

7. Ejemplos categorizados como "*Explicaciones que no relacionan Electroestática y Circuitos*"

Los fragmentos de las entrevistas que se presentan son parte de las sostenidas con un profesor de la Universidad y otro de Secundaria

Ejemplo 1:

Entrevistador (E): *¿Cuál es su valoración de este ítem y si le parece dígame las respuestas que usted daría? (el entrevistador se refiere al ítem 3 del cuadro 4.10)*

Carlos (C): *Estos enunciados son muy sutiles, los estudiantes tendrán dificultad para responder.*

(E): *¿Quiere decir que un licenciado de esta facultad no tendría que saber responder a esta pregunta?*

(C): *Si no ha cursado la asignatura de "Teoría de circuitos" no.*

(E): *¿Los contenidos del curso de Electromagnetismo no preparan a un estudiante para responder a esta pregunta?*

(C): *No, no lo pueden saber, si no han estudiado la "Teoría de circuitos".*

(E): *Pero la asignatura a que se refiere ¿es obligatoria?*

(C): *No, no lo es.*

(E): *Es decir, un licenciado de esta facultad que no hubiese cursado la asignatura a la que usted se refiere, con su formación inicial tendría dificultades para explicar a sus estudiantes de Bachillerato las conexiones con la Electroestática.*

(C): *No lo se, podría ser, no se que se estudia en el Bachillerato.*

Ejemplo 2:

Entrevistador (E): *Marcaste la opción correcta y me interesan algunos matices de tu justificación.*

Mónica (M): *A ver...si...creo que la diferencia de potencial se aplica en los circuitos eléctricos porque debido a su existencia, se produce una corriente entre los puntos que generan dicha diferencia de potencial, al ser conectados mediante un hilo conductor.*

(E): *¿Se trata del mismo concepto de diferencia de potencial en la electrostática y en la teoría de circuitos?*

(M): *La verdad es que no estoy segura, pero supongo que sí.*

(E): *¿Podría no tratarse del mismo concepto?*

(M): *Admito que yo no se por qué se trata del mismo concepto, creo que nunca me lo han explicado, aunque tampoco recuerdo que me hayan dicho que se trata de otro.*

(E): *¿Cómo se pueden tener dos puntos a diferente potencial?*

(M): *Si no se trata de una superficie equipotencial... en un campo eléctrico tendremos siempre dos puntos a diferente potencial.*

(E): *Antes, en tu justificación al enunciado b) has dicho que se produce una corriente entre los puntos que generan dicha diferencia de potencial, al ser conectados mediante un hilo conductor.*

(M): *... Si*

(E): *Podría explicitar más qué quieres decir con esa parte de “los puntos que generan dicha diferencia de potencial”*

(M): *Bueno en la electrostática la diferencia de potencial se mantiene constante, en los circuitos no,... esa puede ser la diferencia, no estoy segura.*

Una deficiencia detectada en profesores es la de no comprender las relaciones entre la Electroestática y los Circuitos eléctricos, una vez más nos encontramos con una dificultad pronosticada en la consecuencia contrastable C1, para los estudiantes. Más aún un profesor de Universidad estima que sólo si se cursa una asignatura, que por otra parte es opcional, se adquieren los conocimientos necesarios para establecer dichas relaciones, lo que nos parece fuera de lugar, al tratarse de conceptos de física básica.

Resultados de las entrevistas mantenidas con profesores, para analizar las ideas del profesorado acerca de la naturaleza y medida de la fuerza electromotriz

En relación con los resultados que hacen referencia al cuadro 4.11, los siguientes son fragmentos de las entrevistas que se presentan se realizaron con profesores de Secundaria.

8. Ejemplos categorizados como “*La fuerza electromotriz no se concibe como una acción no electrostática y no conservativa*”

Ejemplo 1:

Entrevistador (E): *Dices en tus explicaciones que tienes tus dudas acerca de que la fuerza electromotriz, tanto en el caso de una pila como en el caso de la inducción tengan en común el carácter no conservativo de las transferencias de energía.*

Gabriel (G): *Sí, es la verdad no estoy seguro.*

(E): *¿Podrías explicitar alguna de tus dudas?*

(G): *La fuerza electromotriz es la energía eléctrica que tiene una fuente por cada unidad de carga que circula por ella y esto me parece que no tiene nada que ver con el carácter conservativo o no de la transferencia. Además tampoco tengo claro que sería una transferencia de energía conservativa o no conservativa.*

(E): *Cuando se realiza un trabajo las fuerzas puestas en juego pueden ser conservativas o no, el trabajo realizado por tanto será conservativo o no y la transferencia de energía estará relacionada con un tipo u otro de trabajo. A los alumnos les explicamos estas ideas cuando les hablamos del trabajo de rozamiento.*

(G): *No veo la relación con el caso de una pila o con el caso de la inducción.*

(E): *Se trataría de reflexionar por ejemplo para el caso de la pila o para el caso de la inducción, acerca del carácter conservativo o no de las fuerzas puestas en juego cuando se realiza trabajo a partir del cual tienen lugar los intercambios de energía.*

.....

(G): *No he pensado nunca sobre esto, pero... si estas cosas hay que explicarlas a los estudiantes creo que será difícil que puedan entenderlo.*

(E): *A los alumnos se les habla de campos conservativos y no conservativos.*

(G): *Yo no tengo claro cuando un campo no es conservativo...y no se si esto lo pueden comprender los alumnos de Bachillerato.*

Ejemplo 2

Entrevistador (E): *En las respuestas a tu prueba dices que el enunciado b es correcto pero no lo justificas.*

David (D): *Es que no lo tengo claro, yo se que el campo eléctrico es conservativo y quizá es que el enunciado no es correcto.*

(E): *¿En todos los casos el campo eléctrico es conservativo?*

(D): *Bueno en el caso de la inducción que hay un campo magnético que varía... el campo magnético no es conservativo, pero en el caso de la pila el valor de la fem de la pila es un valor intrínseco del circuito y es un campo eléctrico conservativo. No encuentro las analogías, es posible que no se trate del mismo concepto, aunque si es verdad que en los dos casos tenemos corriente.*

(E): *¿Cómo se te ocurre que sea el campo en el interior de una pila?*

(G): *Nunca he estudiado el campo de una pila. Describimos las pilas... quiero decir cómo funcionan, de qué están hechas, pero el campo en el interior...no se, tendría que pensarlo.*

(E): *Piénsalo, yo no tengo prisa. Especula acerca de cómo serán las interacciones que tienen lugar en el interior de la pila y las interacciones en el caso de la inducción.*

(G): *No se...y... eso necesita tiempo...*

La deficiencia aquí está vinculada a otros conceptos como el de campo, el de fuerza no conservativa y su aplicación en las descripciones del funcionamiento de una pila y de la inducción. Cuando se comienza a estudiar la Electricidad, lo que suele tener lugar comenzando por la Electrostática, se habla del carácter conservativo del campo eléctrico reiteradamente y se establecen ciertas analogías con el campo gravitatorio, conservativo también. Cuando en los temas siguientes el campo no es debido a cargas en reposo y se tiene entonces un campo electromagnético no conservativo, no suele advertirse y por tanto es difícil que pueda aprenderse. Es una dificultad pronosticada en la consecuencia contrastable C3.1.1

9. Ejemplos categorizados como “*Medidas de fuerza electromotriz como medida de la diferencia de potencial en los bornes de la pila*”

Ejemplo 1

(Entrevistador) (E): *En tus respuestas escritas señalas como correctos los enunciados b) y d) del ítem 2, ¿No te parece contradictorio que los dos puedan ser correctos?*

Francisco (F): *¿Cuál es la contradicción?*

(E): *En el enunciado b) se dice que la fuerza electromotriz de la pila no se puede medir conectada al circuito y en el d) se dice que se puede conocer midiendo la diferencia de potencial entre sus electrodos y calculando la cantidad $I \cdot r$, para tener un valor de la intensidad el circuito debe estar cerrado y la pila conectada a él.*

(F): Es verdad...en fin el caso es que la fuerza electromotriz de una pila se mide como dice el enunciado d).

(E): Pero el valor de la Intensidad dependerá de la configuración del circuito.

(F): Pero no el valor de la diferencia de potencial en los bornes de la pila.

(E): La intensidad depende de la diferencia de potencial entre los bornes ($I = \frac{V_a - V_b}{R_e}$), la intensidad cambia porque cambia el valor de la diferencia de potencial.

(F): La diferencia de potencial entre los bornes es un valor constante para una pila determinada, cada pila es capaz de producir una diferencia de potencial determinada, esto si lo tengo claro.

(E): Pero no hablamos de medir la diferencia de potencial entre los bornes de la pila, se trata de medir la fuerza electromotriz de la pila.

(F): ¡Pero en circuito abierto es lo mismo!

(E): ¿Qué es lo que es lo mismo, sólo las medidas o los conceptos también?

(F): Yo tengo claro que la fuerza electromotriz es la diferencia de potencial en circuito abierto, que se mide en circuito abierto.

Ejemplo 2:

Entrevistador (E): Afirmas que el enunciado b) es falso y el d) verdadero. ¿Podrías explicar por qué el enunciado b) no te parece correcto?

Patricia (P): El enunciado b) es falso porque conociendo la resistencia interna de la pila podemos saber su fuerza electromotriz.

(E): ¿Cómo se puede conocer el valor de la resistencia interna de la pila?

(P): Normalmente este es un dato conocido en los ejercicios, es la r pequeña.

(E): Aquí dices que el enunciado d) te parece correcto porque $\Delta V \approx \varepsilon$ debido a la resistencia interna de la pila. ¿Puedes explicar esta relación algo más?

(P): Bueno la verdad es que si conectamos la pila a un circuito con $R \gg r$, donde r es la resistencia interna de la pila entonces $I \approx 0$ y por tanto la diferencia de potencial que se puede medir entre los electrodos de la pila es casi igual al valor de su fuerza electromotriz.

(E): ¿Son iguales las medidas para esa configuración o son iguales los conceptos?

(P): No...no se pueden distinguir.

Hemos comprobado que es difícil comprender por qué la fuerza electromotriz de una pila se mide comparándola con el valor de la fuerza electromotriz de una pila patrón. Resulta arduo comprender que si pasa corriente por la pila, toda la energía que se transforma en ella por efecto Joule, no se invierte en separar las cargas y por tanto en originar una diferencia de potencial y que de una pila de la que no conocemos su fuerza electromotriz no conocemos su resistencia interna. En esto los ejercicios típicos de los

libros en los que se da un valor para r , da lugar a que se crea que esto es un dato conocido a priori de una pila.

Como síntesis de las entrevistas mantenidas con los profesores para analizar sus ideas en relación con el concepto de fuerza electromotriz y sus relaciones con la diferencia de potencial, se pueden destacar:

De los nueve errores que se detallaron en el cuadro 4.9 en relación con el concepto de Fuerza electromotriz, siete de ellos aparecen también como deficiencias entre el profesorado, a la luz del análisis de las entrevistas mantenidas con ellos, en torno a sus respuestas a la prueba que se detalla en los cuadros 4.8 a 4.11. Exactamente los señalados como C1, C2, C3, C3.1.1, C3.1.2, C3.2 y C4.

Por tanto podemos afirmar que, las entrevistas mantenidas por el profesorado, confirman en todos sus extremos los resultados que de forma sintética se recogen en las páginas 212-214 anteriores.

5.3. Resultados obtenidos al analizar el aprendizaje logrado en la enseñanza habitual del concepto de Fuerza electromotriz.

Como hemos indicado los cuestionarios se pasaron a dos grupos de estudiantes, uno de finales del Bachillerato, que denominamos **GI** y otro de estudiantes universitarios que hemos denominado **GA**. El grupo **GI** está constituido por 71 estudiantes de segundo curso de Bachillerato que pertenecían a un centro concertado y a un I.E.S de titularidad pública. La prueba se pasó cuando sus profesores nos indicaron que, habían terminado la fase de recordatorio (repaso) de las ideas principales de cursos anteriores, tanto de la Electrostática como de Circuitos eléctricos y se habían adentrado en la presentación del tema de Campo Electromagnético de segundo curso. Para los estudiantes la prueba significaba una especie de evaluación inicial, pero que se hacía sobre los conceptos que acababan de recordar.

Del mismo modo, el grupo **GA**, constituido por 56 estudiantes de segundo ciclo de la carrera de Físicas e Ingeniería Industrial de las Universidades de Granada y de Málaga respectivamente. Los estudiantes de segundo ciclo resolvieron la prueba justo al final del estudio de los circuitos eléctricos y se planteó como un examen externo sobre los contenidos que acababan de estudiar y cuyos resultados el profesor tomaría en consideración.

Las pruebas en ambos casos fueron pasadas por el mismo investigador y merece la pena señalar que los estudiantes no tuvieron dificultades de comprensión respecto a las preguntas formuladas. El cuestionario de ambos grupos se elaboró a partir de los ítems presentados en los cuadros 4.8 a 4.11 anteriores. Los criterios de corrección fueron los mismos que los presentados allí, con las salvedades que se indicaron para los estudiantes de Bachillerato, es decir, aplicar los criterios de forma laxa sobre todo en lo que se refería al lenguaje y modos de expresión utilizados.

El bloque de preguntas contenido en los cuadros 4.8 (I y II) acerca de las relaciones y diferencias entre los conceptos de Fuerza electromotriz y Diferencia de potencial, está relacionado con las consecuencias contrastables C2 y C3. En ellas se indaga el aprendizaje de la fuerza electromotriz como propiedad característica de la pila; como acción no electrostática y no conservativa que separa y mantiene separadas las

cargas sobre los electrodos de la misma. Además se busca conocer si los estudiantes distinguen entre fuerza electromotriz y diferencia de potencial entre los electrodos de la pila.

Se analizan también las relaciones entre fuerza electromotriz y diferencia de potencial y si los estudiantes son conscientes de que, cuando el campo eléctrico no es conservativo el concepto de diferencia de potencial electrostático, no está definido y por tanto no puede estar relacionado con la fuerza electromotriz.

El bloque contenido en el cuadro 4.9 está relacionado con la consecuencia contrastable C4 y pretende conocer si los estudiantes han aprendido a distinguir entre la ecuación del circuito y la ley de Ohm. La primera es una relación mucho más general que puede expresar incluso el Principio de Conservación de la Energía para el caso de los circuitos, mientras que la segunda es una relación mucho más restrictiva, que se cumple sólo para un número limitado de materiales.

El bloque de preguntas incluidas en el cuadro 4.10 está relacionado con las consecuencias contrastables C1, C1.1 y de nuevo C2, por lo que algunos de los resultados que se obtengan aquí podrían ser convergentes con los obtenidos del análisis de las respuestas de los ítems del cuadro 4.8. Se analizará el aprendizaje de los estudiantes al relacionar/distinguir los niveles empíricos (macroscópicos) y los niveles interpretativos (modelos); comprobaremos si distinguen entre propiedades de las cargas, del campo y del circuito. Analizaremos también qué han aprendido acerca de las relaciones que establecen entre los conceptos estudiados en la Electrostática y los circuitos.

5.3.1 Resultados que demuestran que los estudiantes no distinguen entre fuerza electromotriz y diferencia de potencial.

Básicamente, son las consecuencias que se derivan de analizar las respuestas que han dado los estudiantes al bloque de ítems del cuadro 4.8; aunque como sucede de forma general, existen ítems de otros bloques que así mismo nos llevan a las mismas

conclusiones. Por lo que las conclusiones definitivas se realizarán de manera global al terminar el análisis de las respuestas a cada uno de los bloques.

Los grupos inicial (**GI**), estudiantes de último curso de Bachillerato y avanzado (**GA**), estudiantes de segundo ciclo de carreras universitarias, contestaron a los mismos ítems pero no el mismo número de ellos. Es decir, de las tablas 4.8 a 4.10, los estudiantes de segundo ciclo se enfrentaron a ocho de los ítems y los estudiantes de Bachillerato sólo a cinco. Pensamos que las situaciones que se presentan en el **ítem 4** del cuadro 4.8, el anillo metálico en el seno de un campo magnético variable, podía presentar contextos para los que, los estudiante (**GI**) no tuviesen la experiencia ni la formación necesarias como para argumentar. Lo mismo nos pareció con los ítems que versaban sobre el generador de Van der Graaf y el efecto piezoeléctrico, por lo que los eliminamos de la prueba que se pasó a los estudiantes de Bachillerato.

De esta manera cuando de las respuestas de los estudiantes tengamos datos de los grupos **GI** y **GA**, inicial y avanzado respectivamente, las presentaremos en una tabla conjuntamente y el análisis correspondiente se realizará de esta misma manera. A los criterios de evaluación ya nos hemos referido en el capítulo cuatro para cada uno de los grupos.

Los resultados obtenidos para el **ítem 1**, se recogen en la tabla 5.13 siguiente:

Tabla 5.13. Resultados relaciones entre fuerza electromotriz y diferencia de potencial (Generador de Van der Graaf)

Ítem 1 [cuadro 4.8(I)]	N = 56 (Porcentaje)				
	Correcta			Incorrecta	NC
	JC	JE	NJ		
E1: Entre los puntos de A y B del generador se crea una diferencia de potencial.	19 (34)	18 (32)	7 (12,5)	7 (12,5)	5 (9)
E2: Si unimos dos puntos de A y B mediante un conductor externo, podríamos tener una corriente.	9 (16)	17 (30)	9 (16)	11 (20)	10 (18)
E3: En un generador de Van der Graaf no hay fuerza electromotriz y por tanto no se podrá generar una corriente.	5 (9)	17 (30)	6 (11)	14 (25)	14 (25)

Casi el 79% de los estudiantes identifican como correcto el enunciado 1, pero sólo el 34% lo justifica correctamente, un porcentaje similar, las justifica de forma equívoca. Entre las justificaciones erróneas el siguiente es un ejemplo:

- *“Verdadero hay una diferencia de cargas”*

De nuevo la diferencia entre el porcentaje de los que señalan el enunciado 2 como correcto (62%) y los que lo justifican debidamente (16%) es importante. Ejemplo de una justificación errónea, puede ser la siguiente:

- *“Verdadero. Crearíamos un movimiento de cargas que daría lugar a la corriente.”*

Se han reducido sensiblemente los porcentajes de los que señalan la corrección del enunciado 3 (50%) y de los que justifican correctamente (9%). Ejemplos de justificaciones erróneas que hemos encontrado de forma reiterada en distintos estudiantes son las siguientes:

- *“Falsa, la fem es aplicable a circuitos de corriente, no a fenómenos electrostáticos.”*
- *“Falso, si es posible hablar de fem, pero no es posible hablar de corriente.”*

Merece la pena destacar como el porcentaje de los que no contestan (25%) se distancia de los porcentajes de los que no han contestado en los enunciados anteriores. Los resultados obtenidos para este **ítem 1** avalan las consecuencias contrastables **C1** y **C3.1.1**. También podemos afirmar que los indicadores de aprendizaje **i.2, i.3, i.6 y i.7** no se poden de manifiesto.

La situación que se plantea en el **ítem 2**, sobre el funcionamiento de un artilugio familiar para los estudiantes, exige para su explicación que los conceptos de fuerza electromotriz y diferencia de potencial se conozcan y se diferencien perfectamente.

Los resultados para el ítem 2 se muestran en la tabla 5.14 en la página siguiente:

Tabla 5.14 Cristal de cuarzo. Efecto piezoeléctrico

Ítem 2 [cuadro 4.8 (II)]	Número = 56 (Porcentaje)				
	Correcta			Incorrecta	NC
	JC	JE	NJ		
E1: A estos fenómenos no es aplicable el concepto de fuerza electromotriz, ya que no existe generador de corriente.	1 (2)	25 (45)	11 (20)	8 (14)	11 (20)
E2: En este caso la fuerza electromotriz está relacionada con la energía mecánica transferida a las caras del cristal de cuarzo.	4 (7)	13 (23)	11 (20)	17 (30)	11 (20)
E3: En este caso no se puede distinguir entre fem y d.d.p. electrostático ya que el voltímetro mide una cantidad de voltios, que pueden ser de una u otra magnitud.	6 (11)	9 (16)	16 (29)	12 (21)	13 (23)
E4: En este caso la f.e.m. está generada por la d.d.p. electrostático entre las caras opuestas del cristal de cuarzo.	9 (16)	3 (5)	10 (18)	20 (36)	14 (25)

Como venimos haciendo realizaremos un análisis pormenorizado de las respuestas enunciado por enunciado.

No responde un porcentaje nada desdeñable de los estudiantes y otro porcentaje tampoco despreciable se muestra de acuerdo con el enunciado 1. El (45%) de los estudiantes justifica erróneamente su opción. Entre estas respuestas no válidas el siguiente es un ejemplo ilustrativo:

- *“Falso. En este caso la fem es la debida a la d.d.p. entre las caras, como consecuencia de la redistribución de los iones.”*

La idea que se exhibe ya la hemos encontrado en los profesores, la fuerza electromotriz como “efecto” de la existencia de una diferencia de potencial.

En el enunciado 2 un 30% de los estudiantes directamente dice que el enunciado es falso. Y de los que lo reconocen como correcto sólo el 7% lo justifica con corrección. Un ejemplo de justificación errónea es el siguiente:

- *“Podría ser, ya que podría considerarse que la fuerza mecánica que se aplica se transforma en fem.”*

Al margen de cualquier otra consideración, esta forma de redactar en un estudiante de tercer ciclo no es aceptable, magnitudes que se “transforman” en otras, como en este caso la fuerza mecánica en fuerza electromotriz, no es algo que se pueda aceptar en una explicación y mucho menos cuando no hay una formulación en la que, la parte de la afirmación pueda considerarse un pequeño desliz.

Lo más destacable en este enunciado 3 es que el 21% de los estudiantes indique que la afirmación es correcta. Y junto a esto que el 29% diga que es falsa pero no lo justifique. Un ejemplo revelador de justificación no válida es el siguiente.

- *“Falso, el voltímetro puede medir la d.d.p. puesto que la fem no existe en realidad.”*

Los resultados del enunciado 4 convergen con los que hemos encontrado en el sentido de reconocer a la fuerza electromotriz como una consecuencia de la diferencia de potencial. El 36% se muestra de acuerdo con esta afirmación. Una justificación no válida es la siguiente:

- *“Falso, no hay fuerza electromotriz”*

Las respuestas a esta cuestión ponen de manifiesto que los indicadores de aprendizaje **i.1**, **i.2**, **i.3**, **i.6** e **i.7** no se han alcanzado con lo que se confirma la consecuencia contrastable **C3**. Los resultados son convergentes con los del ítem anterior.

Del **ítem 3** (cuadro 4.8) tenemos datos de las respuestas de los grupos (**GA**) y (**GI**). Como hemos visto, los objetivos principales de este ítem eran analizar si los encuestados saben que la fuerza electromotriz es una propiedad de los generadores de energía eléctrica y no es una propiedad ni del circuito ni de las cargas y se distingue entre fuerza electromotriz de una pila y diferencia de potencial entre sus electrodos.

Los resultados se muestran en la tabla **5.15** siguiente.

Tabla 5.15. Misma pila y distintos circuitos

Ítem 3 [cuadro 4.8 (II)]	Número de estudiantes (Porcentaje)							
	opción a	opción b	opción c	opción d	JC	JE	NJ	NC
(GA)	28 (50)	23 (41)	0 (0)	5 (9)	9 (16)	12 (21)	2 (4)	0 (0)
(GI)	24 (34)	18 (25)	11 (16)	18 (25)	4 (6)	14 (20)	0 (0)	0 (0)

Es a destacar que en ambos grupos la opción más escogida es la a), son los porcentajes más altos, a una distancia considerable de la opción b) que es la correcta. El porcentaje de justificaciones correctas, si bien es diferente, es bajo en ambos grupos. Y el porcentaje de justificaciones erróneas es aproximadamente el mismo. Ejemplos de justificaciones no válidas son:

- “Si la pila es ideal, la d.d.p. la mantiene constante debida a que su fem es constante.”
(GA)
- “En cualquier circuito la intensidad generada en el generador, debida a la diferencia de potencial es constante, pues representa el valor del trabajo que realiza éste al transportar desde el inicio del circuito hasta el final a cada uno de los electrones.”
(GI)

Sólo unos porcentajes muy pequeños de estudiantes identifican la fuerza electromotriz de una pila como una propiedad característica de la misma, que no va a depender de la configuración del circuito. De nuevo las respuestas ponen de manifiesto que los indicadores de aprendizaje **i.5**, **i.6** e **i.7**, no los alcanzan porcentajes significativos de los estudiantes de ningún nivel. De nuevo podemos afirmar que las consecuencias contrastables C3 y C3.1 se ven plenamente confirmadas.

Como hemos dicho el ítem 4 de la tabla 4.8, sólo se pasó al grupo de estudiantes avanzados, **GA**, la tabla siguiente recoge los resultados.

Tabla 5.16 Anillo metálico en el seno de un campo magnético variable

Ítem 4 [cuadro 4.8 (II)]	Número = 56 (Porcentaje)					
	Correcta			Incorrec ta	NC	IN
	JC	JE	NJ			
E1: Hay fem responsable de una corriente en el anillo, pero no produce una diferencia de potencial electrostático entre dos puntos, como A y B de éste.	3 (5)	18 (32)	2 (4)	20 (36)	3 (5)	10 (18)
E2: No existe una diferencia de potencial electrostático y por tanto no puede haber corriente en el anillo.	3 (5)	22 (39)	4 (7)	15 (27)	3 (5)	10 (18)
E3: Si hay fem debe haber una diferencia de potencial electrostático asociada a la misma que dará lugar a una corriente eléctrica.	0 (0)	12 (21)	10 (18)	22 (39)	3 (5)	9 (17)
E4: Un voltímetro convenientemente situado entre A y B no indicaría nada, un amperímetro intercalado en A indicaría paso de corriente.	3 (5)	16 (29)	6 (11)	21 (38)	3 (5)	7 (12)

Al 36% de los estudiantes les parece que el enunciado 1 es falso; esto ya es llamativo y exponente de un aprendizaje deficiente en cuanto al ámbito de aplicación de los conceptos. Pero las justificaciones que se han evaluado como erróneas también ilustran sobre lo que se ha aprendido:

- “Es cierto que hay una fem, debida al campo magnético variable. ¿Por qué no hay d.d.p. entre A y B? si las cargas se mueven, será porque los dos puntos tienen distinto potencial.”

La estudiante lo tiene claro si las cargas se mueven y hay fuerza electromotriz ¿por qué no va a haber diferencia de potencial electrostático? En las respuestas al enunciado segundo veremos de nuevo esta idea.

Casi el 30% entiende que el enunciado 2 es verdadero, pero la justificación evaluada como errónea, siguiente deja las cosas todavía más claras:

- “Falso \Rightarrow Hay fem \Rightarrow hay d.d.p. \Rightarrow hay corriente”

Y los porcentajes de los que justifican con corrección siguen siendo muy pequeños.

El porcentaje de respuestas que considera verdadero este enunciado 3 es elocuente, al 39% le parece correcto. De los que dicen que es falso, ni uno sólo sabe

justificarlo. Son casi los mismos los que no lo justifican como los que lo justifican erróneamente. Un ejemplo de una justificación tal, es la siguiente.

- *“Falsa. La fem inducida se opone a la variación del flujo magnético con el tiempo y la corriente inducida irá a derechas o a izquierdas según varíe el flujo, no podemos tener una diferencia de potencial fija entre los puntos...”*

Al 38% el enunciado 4 le parece una declaración incorrecta, otro 40% se reparte entre los que justifican mal o no justifican, poniéndose de nuevo de manifiesto que no se conoce el ámbito de aplicación de los conceptos ni, como sucede en este caso, en relación con la toma de medidas experimentales.

Una vez más los indicadores de aprendizaje i.6 e i.7 no se han alcanzado y se confirman las consecuencias contrastables C3 y C3.1, y una vez más los resultados vuelven a ser convergentes con los obtenidos en los anteriores ítems.

El último de los ítems del cuadro 4.8 pregunta abiertamente por la diferencias entre los conceptos de fuerza electromotriz y diferencia de potencial. Analizaremos los resultados de forma conjunta para el caso de los estudiantes de segundo ciclo de carreras universitarias y de Bachillerato. Los resultados, se recogen en la tabla siguiente 4.17.

Tabla 5.17 Diferencias entre fem y d.d.p.

Ítem 5 [cuadro 4.8 (II)]		Número de estudiantes (Porcentaje)	
		GA N = 56	GI N = 71
Son conceptos diferentes	No indican diferencias	5 (9)	18 (25)
	Indican diferencias correctamente	1 (2)	0 (0)
	Diferencias erróneamente	39 (70)	35 (49)
Es el mismo concepto		0 (0)	0 (0)
Inclasificables		0 (0)	2 (3)
No contestan		11 (19)	16 (23)

La inmensa mayoría entiende que los conceptos son diferentes el 81% del grupo **GA** y el 74% del grupo **GI**. Pero prácticamente ninguno lo sabe argumentar, pasaba igual con el profesorado, colectivo con el mismo porcentaje de argumentaciones correctas que los estudiantes **GA**, el 2%. A pesar de que en el resto de las preguntas el índice de los que no contesta es nulo o casi nulo entre los estudiantes, ahora los porcentajes son casi del mismo orden.

De nuevo los resultados confirman las consecuencias contrastables del grupo C3, y los indicadores de aprendizaje i.1 a i.5 se comprueba no se han alcanzado. Una vez más la redacción de las respuestas y el contenido de las mismas, ponen de manifiesto la distancia entre los indicadores de aprendizaje i.6 e i.7 y el bagaje de recursos disponibles entre los estudiantes de cualquier nivel.

5.3.2 Resultados que demuestran que los estudiantes no distinguen entre la ecuación del circuito y la ley de Ohm

No distinguir entre fuerza electromotriz y diferencia de potencial lleva a no distinguir entre la ecuación del circuito y la ecuación que representa la ley de Ohm, pero lo contrario también se puede afirmar, identificar ambas ecuaciones lleva a confundir ambos conceptos. Ya nos hemos referido a esa relación que se denomina de forma rimbombante y errónea ley de Ohm generalizada, estamos ante un círculo vicioso que se agrava debido a la presentación esencialmente operativista que se hace de los conceptos y que como veremos los estudiantes han aprendido bien.

Para analizar la dificultad anterior habíamos diseñado **el ítem 1** del cuadro 4.9; los resultados de su análisis incidirán en los indicadores de aprendizaje sobre todo en i.1 e i.5 además de comprobar las consecuencias contrastables C3.2 y C4. Los resultados se sintetizan en la tabla siguiente:

Tabla 5.18. Ecuación del circuito y ley de Ohm

Ítem 1 [cuadro 4.9]	Número de estudiantes (Porcentaje)							
	opción a	opción b	opción c	opción d	JC	JE	NJ	NC
GA	16 (29)	10 (18)	26 (46)	4 (7)	1 (2)	8 (14)	1 (2)	0 (0)
GI	25 (35)	1 (1)	34 (48)	4 (6)	0 (0)	1 (1)	0 (0)	7 (10)

Los porcentajes de los que escogen c), es decir, identifican ambas ecuaciones es el más alto y significativamente parecido; la opción a) también la escoge un porcentaje alto de estudiantes de ambos grupos, sin que entre ellos exista una gran diferencia. Los porcentajes de los que escogen la opción correcta y además la justifican bien son también muy parecidos. En esta ocasión es anormalmente alto el porcentaje de estudiantes de Bachillerato que no contesta.

En esta ocasión, son tan ilustrativos de un mal aprendizaje los ejemplos de justificaciones erróneas como las justificaciones a la opción c), recordemos la más escogida. Ejemplos de justificación errónea son los siguientes:

- *“El enunciado b) es la ley de Ohm generalizada” (GA)*
- *“La ecuación que se cumple es $\varepsilon = I \cdot R$ ya que es la expresión que responde a la ley de Ohm y de aplicación en análisis de circuitos eléctricos. En circuitos eléctricos no tendría sentido hablar de diferencia de potencial electrostático ya que este es un concepto relativo a campos eléctricos. Es decir, no depende la d.d.p. en un campo eléctrico del flujo de cargas eléctricas (I) ni de R sino del campo eléctrico” (GA)*

Las respuestas anteriores están en la línea de los errores que habíamos pronosticado, como por ejemplos C1.1 o C4 y son un claro exponente de cómo a medida que se va accediendo a estudios superiores, los errores se afianzan y se “gana” en capacidad para argumentarlos, que es una de las lecturas que tienen los datos de la tabla anterior, en donde los porcentajes de justificaciones erróneas es claramente mayor en el caso del grupo de estudiantes **GA**.

Los siguientes son ejemplos de justificaciones de la opción c) que abundan en la línea de las deficiencias anteriores:

- *“Al ser despreciable la r (resistencia de la pila) en un circuito cerrado tanto el voltaje como la fem van a ser iguales a la intensidad por la resistencia”. (GA) (GI)*

Entre los estudiantes de uno y otro grupo se encuentra mayoritariamente una respuesta como la anterior. Creemos que esto puede ser fruto de una enseñanza que prima una presentación operativista de los conceptos en la que las explicaciones de tipo cualitativo están devaluadas.

5.3.3 Resultados que demuestran que los estudiantes no diferencian entre la las descripciones macroscópica y microscópica y no relacionan los conceptos estudiados en la electrostática con las explicaciones de los circuitos.

Si bien en las explicaciones anteriores ya hemos encontrado respuestas en esta dirección, no obstante se habían diseñado una serie de ítems para analizarlos de manera específica, los resultados obtenidos de presentan en las tablas siguientes. La primera de ellas, tabla 5.19, los recoge del ítem 1 del cuadro 4.10

Tabla 5.19 Análisis de los niveles de descripción macroscópico y microscópico

Ítem 1 [cuadro 4.10]	Número de estudiantes (%)							
	opción a	opción b	opción c	opción d	JC	JE	NJ	NC
GA	8 (14)	11 (20)	22 (39)	14 (25)	8 (14)	5 (9)	1 (2)	1 (2)
GI	5 (7)	22 (31)	32 (45)	12 (17)	0 (0)	19 (27)	4 (6)	0 (0)

Como se deriva de los datos de la tabla 5.19 anterior la opción más escogida es la c) lo que supone admitir para las cargas eléctricas, propiedades exclusivas del campo eléctrico como el potencial. El porcentaje de elecciones es menor en el grupo GA, grupo que opta por la opción correcta en porcentaje significativamente superior que el grupo GI. De todas formas el porcentaje de los que optan por la opción correcta y lo saben justificar es sólo del 14%. Los siguientes son ejemplos de justificaciones que se han evaluado negativamente:

- “Cuando una carga se desplaza de un electrodo a otro de la pila está pasando de un potencial menor a otro mayor, por tanto, varía su potencial. Si bien, habitualmente se considera que las cargas van del electrodo positivo al negativo, esto no es más que un convenio.”
- “Varía su potencial porque éste depende del campo eléctrico, que es constante entre los electrodos de la pila, y de la distancia a la que se encuentre de ellos. Al moverse \Rightarrow varía ‘d’ \Rightarrow varía el potencial”

También llama la atención que un porcentaje igual al que justifica de forma positiva la opción correcta señala para la carga la propiedad fuerza electromotriz y un

porcentaje todavía mayor 20%, la propiedad diferencia de potencial. Es decir, cuando los estudiantes han cursado varios años de estudios de Electromagnetismo, a nivel universitario, el 86% de ellos de una forma errónea u otra, lo que apoya nuestras consecuencias contrastables C2 y C1.

De forma todavía más específica se había diseñado un ítem para profundizar en el análisis de las relaciones entre la Electrostática y los Circuitos eléctricos. Se trata del ítem 3 del cuadro 4.10, cuyos resultados se presentan en la tabla 5.20 que viene a continuación.

Tabla 5.20 Relaciones Electrostática y circuitos eléctricos

Ítem 3 [cuadro 4.10]	Número de estudiantes (Porcentaje)							
	opción a	opción b	opción c	opción d	JC	JE	NJ	NC
GA	1 (2)	30 (54)	12 (21)	7 (12)	9 (16)	15 (27)	6 (11)	6 (11)
GI	1 (1)	24 (34)	32 (45)	7 (10)	4 (6)	18 (25)	2 (3)	7 (10)

Nos parece destacable en primer lugar los resultados que muestran que el porcentaje de los que creen que no se trata del mismo concepto en Electrostática y Circuitos no cambia sustancialmente, pero si hubiera diferencia sería para admitir que a medida que se avanza en los estudios el porcentaje de los que creen que no se trata del mismo concepto aumenta. Ya hemos comentado en otros ítems y aquí de nuevo se obtienen resultados convergentes, la asociación causa efecto entre diferencia de potencial y fuerza electromotriz. En el segundo ciclo de las carreras en las que el asunto se trata de forma específica en las distintas asignaturas, todavía el 21 % de los estudiantes ve a la diferencia de potencial como la causa de la fuerza electromotriz.

Sólo el 16% de los estudiantes de segundo ciclo y el 6% de los que estudian Bachillerato, saben utilizar correctamente las razones de la manejo de conceptos implicados en la interpretación del funcionamiento de un circuito simple. Lo que de nuevo confirma nuestras consecuencias contrastables C1, C1.1 y C2.

En definitiva los resultados obtenidos del análisis de los distintos ítems han ido confirmando una tras otra nuestras consecuencias contrastables C1 a C4, así como las

B2 y B3. Veamos a continuación los resultados de las entrevistas mantenidas con los estudiantes.

5.3.4 Resultados que muestran, a través de entrevistas estructuradas, que los estudiantes que han recibido una enseñanza siguiendo el modelo habitual, presentan un escaso aprendizaje acerca del concepto de fuerza electromotriz

La técnica que hemos seguido con los estudiantes fue casi la misma que habíamos seguido con el profesorado, es decir, presentarles su propia prueba o la de otros compañeros y en torno a las respuestas establecer las preguntas que nos permitiesen el análisis en profundidad acerca de las ideas en torno a los núcleos que se establecieron en los cuadros 4.8 a 4.10.

Las entrevistas se mantuvieron con 11 estudiantes, 6 del grupo de estudiantes de segundo ciclo y 5 del grupo de Bachillerato. En las transcripciones iremos indicando a cual de ellos pertenece, si bien llama la atención la poca diferencia entre las respuestas de unos y otros en relación con algunas ideas.

Resultados de las entrevistas para profundizar sobre las dificultades de los estudiantes para distinguir entre fuerza electromotriz y diferencia de potencial.

Como se ha señalado no nos centraremos en el curso de las entrevistas en los ítems uno tras otro. El análisis se realizaba en torno a las respuestas a los ítems del digamos núcleo de ideas que se recogía en cada uno de los cuadros de 4.8 a 4.11.

1. Ejemplo categorizado como *“Explicaciones en las que la fuerza electromotriz es causa de corriente”*

Jorge es un alumno de Segundo Ciclo. La entrevista se inicia a partir de sus respuestas al ítem 1 del cuadro 4.8.

01Entrevistador (E): *Dices de la afirmación b) que es verdadera porque es como una pila con un polo positivo y otro negativo ¿Puedes explicar esto un poco más?*

- 03 Jorge (J): *Si, igual que en la pila hay puntos donde se acumulan las cargas positivas y negativas.*
- 05 (E): *¿Encuentras alguna analogía más entre el caso de la pila y el del generador de V. der G.?*
- 07 (J): *Si en ambos casos podemos tener corriente.*
- 08 (E): *En el caso de la pila, el generador de V der G o el cristal de cuarzo ¿Podríamos hablar y distinguir entre fuerza electromotriz y diferencia de potencial?*
- 010 (J): *De diferencia de potencial si ya porque en los tres casos algo así como polos positivos y negativos*
- 012 (E): *¿Y de fuerza electromotriz?*
- 013 (J): *Bueno en la pila si se habla... en los otros casos...no, en los otros casos no, porque no hay corriente.*
- 015 (E): *¿Qué diferencia hay entre fuerza electromotriz y diferencia de potencial?*
- 016 (J): *Pues hay fuerza electromotriz si hay corriente y diferencia de potencial cuando no hay.*
- 018(E): *Acabas de decir que si unimos A y B en el generador de Van der Graaf hay corriente.*
- 020 (J): *Si, bueno en teoría...*

2. Ejemplo categorizado como “Explicaciones en las que la fuerza electromotriz es causa de corriente”

José Manuel es un estudiante de Bachillerato iniciamos la entrevista en relación con sus respuestas al ítem 3 del cuadro 4.8 (II).

- 01Entrevistador (E): *En tu respuesta señalas el apartado d), en ella dices entre otras cosas: ..Porque la diferencia de potencial d.d.p. que equivale a su fuerza electromotriz... ¿Puedes explicar en qué son equivalentes?*
- 04 José Manuel (JM): *No, bueno creo que me equivoqué, debe ser su diferencia de potencial puesto que no tenemos más que verlo en la vida cotidiana, las pilas suministran siempre la misma d.d.p. porque suponemos que todas tienen la misma energía; dependiendo del aparato duran más o menos pero todos ellos funcionan con el mismo voltaje o d.d.p. luego la fem debe ser diferente en cada caso dependiendo de la resistencia que aumenta en el circuito externo la pila tendrá que dar más o menos resistencia.”*
- 09 (E): *¿Hablas de diferencia de potencial y fuerza electromotriz, pero no entiendo bien cómo las diferencias?*
- 011 (JM): *En realidad como digo son equivalentes, la diferencia de potencial de una pila no varía, la fuerza electromotriz es lo mismo pero en relación a las variaciones que se producen cuando conectamos la pila a circuitos con distintas resistencias ya que entonces varía la intensidad de corriente por la ley de Ohm $I = V/R$*
- 015 (E): *Pero aquí has escrito V en vez de ϵ*
- 016 (JM): *Te digo que es lo mismo, solo que si hay corriente hablamos de fuerza electromotriz.*

3. Ejemplo categorizado como “*Explicaciones en las que la fuerza electromotriz es causa de corriente*”

Raúl es un estudiante de Física, la entrevista se inicia con su respuesta al ítem 5 del cuadro 4.8 (II).

01Entrevistador (E): *Dices que la fuerza electromotriz es generada por la diferencia de potencial entre dos puntos. Si no se da esta d.d.p. no se produce ninguna fem. Luego prácticamente una cosa incluye la otra. ¿Puedes explicar la diferencia algo más?*

04 Raúl (R): *“La fuerza electromotriz es la fuerza que genera la corriente en un circuito eléctrico. La d.d.p. entre dos puntos es lo que se ha consumido de fuerza electromotriz entre dos puntos”*

06 (E): *¿Y en el caso del anillo, que relación hay entre diferencia de potencial y fuerza electromotriz?*

El estudiante repasa sus respuestas y continúa:

08 (R): *Aquí vengo a decir lo mismo, la frase a) es falsa sino hay diferencia de potencial no puede haber paso de corriente eléctrica.*

09 (E): *Y la fuerza electromotriz ¿cómo se relaciona en este caso con la diferencia de potencial?*

011 (R): *Ya te lo he dicho, la d.d.p. genera la fem y esta la corriente, si hay corriente es que hay fem y por tanto diferencia de potencial. En definitiva la fem se asocia con movimiento dentro de los tubos de corriente y la diferencia de potencial está relacionada con una distribución de cargas estática.*

La cuestión principal es que los estudiantes no saben qué es la Fuerza electromotriz, por lo que resulta muy difícil que puedan explicar en qué se diferencia de un concepto como la diferencia de potencial. Reconocen que de alguna manera están asociados, pero no saben en qué consiste dicha asociación y por tanto no pueden establecer diferencias.

Los estudiantes asocian fuerza electromotriz con corriente y la diferencia de potencial como causa de la fuerza electromotriz. Los intentos de establecer analogías entre las situaciones que se plantean, en las que tratar de sondear hasta qué punto pudieran relacionar una acción no electrostática con la separación de cargas y a partir de aquí establecer la relación con la diferencia de potencial, fracasan desde el principio. Es algo que no se concibe. Como no lo concebía el profesorado y de lo que no se encuentran explicaciones en la mayoría de los textos. De nuevo las consecuencias contrastables C1 a C4 se confirman en todos sus extremos. Del mismo modo los indicadores de aprendizaje i.1 a 1.5 se comprueba que no forman parte del bagaje de los estudiantes.

Resultados de las entrevistas que demuestran que los estudiantes no distinguen entre la ecuación del circuito y la ley de Ohm

Como hemos dicho una manifestación de no entender la diferencia entre la fuerza electromotriz y la diferencia de potencial es confundir las ecuaciones del circuito y la que representa la ley de Ohm. La ecuación del circuito permite representar el principio de conservación de la energía. La ley de Ohm que no se cumple en materiales no óhmicos no puede incluir la pila, su aplicación no puede incluir al conjunto del circuito cerrado. Indagábamos en torno a estas ideas en nuestra entrevista con los estudiantes en el análisis de sus respuestas a los ítems 1 y 2 del cuadro 4.9

1. Ejemplo categorizado como “*Explicaciones en las que la ley de Ohm es preponderante*”

Ana es estudiante universitaria de segundo ciclo de licenciatura.

01 Entrevistador (E): *Dices en tus respuestas que se cumplen las dos ecuaciones pero no lo justificas ¿Podrías explicarlo ahora?*

03 Ana (A): *En realidad lo que siempre se cumple en un circuito es la ley de Ohm.*

04 (E): *¿Y la otra ecuación?*

05 Ana (A): *“ $\varepsilon = I \cdot R$ es una ley de Kirchoff y $V = I \cdot R$ una simplificación para circuitos cerrados”*

07 (E): *¿Qué relación hay entonces entre ε y V ?*

08 (A): *ε en la figura representa a V y la ley física que rige los circuitos eléctricos es $V = I \cdot R$, que es lo que te dije antes se cumple la ley de Ohm.*

010 (E): *Si pero no creo que respondas a mi pregunta acerca de por qué se puede utilizar una u otra indistintamente.*

012 (A): *Al ser despreciable la r , la resistencia interna de la pila, en un circuito cerrado tanto el voltaje como la fem van a ser iguales a la intensidad por la resistencia y tendremos (la estudiante lo escribe en un folio) $V = I \cdot R$ y $\varepsilon = I \cdot R$*

015 (E): *¿No será que en ese caso los valores de la diferencia de potencial y de la fuerza electromotriz son iguales, no que las dos magnitudes lo sean?*

La estudiante se queda pensativa unos minutos y añade:

018 (A): *No, esto creo que lo aprendí bien, si en dos ecuaciones los segundos miembros son iguales los primeros también lo son, e iguales son iguales.*

020 (E): *Entonces, según eso, ¿la ley de Ohm puede expresar la conservación de la energía en el circuito?*

022 (A): *No recuerdo bien, pero en el Instituto ¿no se estudiaba que se aplicaba la ley de Ohm cuando se calculaba la intensidad en los casos en los que había motores además de la pila?*

024 (E): *¿Qué relación hay entre calcular la intensidad y mi pregunta acerca del principio de conservación?*

026 (A): *Porque se calculaba la intensidad teniendo en cuenta toda la energía que suministraba la pila y considerando la que se gastaba por el calor y otros efectos.*

La alumna se estaba refiriendo a la formulación que suele denominarse en los libros de texto de Secundaria ley de Ohm generalizada.

2. Ejemplo categorizado como “*Explicaciones en las que la ley de Ohm es preponderante*”

Gámez es un estudiante de 2º de Bachillerato

01 Entrevistador (E): *Señalas en tu respuesta la opción c), pero la explicación es muy escueta, ¿podrías añadir algo más?*

03 Gámez (G): *Cuando la resistencia de un circuito es despreciable, se dice que el rendimiento es del 100%, es decir se supone un circuito perfecto, cumpliéndose la ley de Ohm. En este caso no existe diferencia entre el voltaje que nos suministra la pila y la fuerza electromotriz y debe cumplirse que $\varepsilon = V = I \cdot R$, debido a que como se dice en el enunciado se desprecia la resistencia interna.*

07 (E): *¿Te refieres a que las medidas de fuerza electromotriz y diferencia de potencial en ese caso tienen el mismo valor, pero se trata de magnitudes diferentes o no?*

09 (G): *Son cosas diferentes*

010 (E): *¿En qué se diferencian?*

011 (G): *Cuando hablamos de diferencia de potencial, nos referimos a la cantidad de energía que es necesaria para que una carga se desplace de un punto a otro dentro de un campo eléctrico. Puede suceder que esta energía la pueda desprender una partícula en su desplazamiento porque el punto donde se encuentra tenga mayor potencial que el punto de destino o a la inversa. La fuerza electromotriz es el efecto que producen un grupo de cargas que se mueven de un lugar de mayor potencial a otro de menor.*

016 (E): *¿Y como se relaciona eso que dices con los circuitos como el de la figura?*

017 (G): *Lo que te he explicado es la teoría, los circuitos son la realidad y la ley de Ohm es la ecuación que representa lo que podemos medir en el circuito.*

Para este alumno la diferencia entre fuerza electromotriz y diferencia de potencial está en el número de partículas que participan. Esto recuerda la idea anterior en el que la fuerza electromotriz se relaciona con corriente eléctrica. Una vez más la consecuencias contrastables C3.2 y C4 se ven confirmadas, del mismo modo que no lo son los indicadores de aprendizaje i.1 a i.5.

Resultados de las entrevistas que demuestran que los estudiantes no diferencian entre las descripciones macroscópica y microscópica y no relacionan los conceptos estudiados en la electrostática con las explicaciones de los circuitos

Podíamos haber desglosado estos resultados en lo relativo a las descripciones macroscópica y microscópica y por otra parte las relaciones entre la electrostática y los circuitos, pero las explicaciones de los fenómenos de la electrostática se hace normalmente en el ámbito de las descripciones microscópicas. El potencial y la diferencia de potencial se definen en relación con la unidad de carga y los campos eléctricos son, en los razonamientos de los libros de texto, creados por una carga unidad y positiva. De aquí que en el caso del análisis del aprendizaje de los estudiantes hemos decidido englobar en un todo las descripciones macro-micro y las relaciones electrostática y circuitos. Las entrevistas versan sobre el análisis y profundización en las respuestas a los ítems 1 y 3 del cuadro 4.10

1. Ejemplo categorizado como “*Explicaciones erróneas en círculo vicioso*”

Julia es una alumna de Segundo Ciclo, la opción escogida al responder al ítem 1 del cuadro 4.10 ha sido c)

01 Entrevistador (E): *En tu respuesta no queda claro si te refieres a la carga o a los bornes de la pila, ¿puedes explicarlo?*

03 Julia (J): *Varía el potencial de cada borne, al pasar cargas de uno a otro el de uno de los bornes aumenta y el de otro disminuye en la misma medida, quedando su diferencia de potencial constante.*

05 (E): *Y de cada carga ¿qué varía?*

06 (J): *Si una pila que se conecta a distintos circuitos la diferencia de potencial entre sus bornes no varía, varía la intensidad en el circuito, dependiendo de cómo sea este y de qué elementos tenga, resistencias, bobinas y demás..., pero la diferencia de potencial de la pila es siempre la misma.*

09 (E): *Pero cuando las cargas se desplazan ¿qué es lo que cambia?*

010 (J): *Si la carga se mueve de un borne a otro, lo que se produce es una intensidad de corriente que se puede medir.*

012 (E): *Me refiero a lo que cambia de una carga cuando esta se desplaza entre los electrodos de la pila.*

013 (J): *De la carga nada*

014 (E): *¿Entonces por qué se mueve?*

015 (J): *Si tenemos dos puntos con diferente potencial electrostático entonces sobre cualquier carga situada en esa región del espacio actuará una fuerza eléctrica. Así si se pone un cable conductor uniendo*

dichos puntos los electrones más externos de la red metálica experimentarán dicha fuerza moviéndose a lo largo del cable.

019 (E): *¿Quién ejerce la fuerza que mueve la carga?*

020 (J): *Se supone que el campo eléctrico.*

021 (E): *¿Cuál campo eléctrico?*

022 (J): *El que hay entre los electrodos de la pila.*

023 (E): *Y que varía de una carga que se desplaza en ese campo eléctrico.*

024 (J): *Creo que ya te he contestado a esa misma pregunta.*

025 (E): *Por último, ¿tu crees que es correcto referirse al potencial de una carga eléctrica?*

026 (J): *¡Si venimos haciéndolo todo este tiempo!*

2. Ejemplo categorizado como “Explicaciones que ponen de manifiesto una confusión terminológica asociada a una confusión conceptual”

Obdulio es un alumno de 2º curso de Bachillerato.

01 Entrevistador (E): *Hay una justificación pero no has señalado de qué opción se trata, ¿puedes hacerlo ahora?*

03 (O): *¿puedo cambiar la opción también?*

04 (E): *Si*

05 (O): *El potencial de la carga eléctrica es lo que varía.*

06 (E): *¿Puedes explicarlo?*

07 (O): *Si porque la diferencia de potencial que hay entre los dos electrodos de la pila producen el movimiento de los electrones, los cuales al pasar por la pila quedan cargados, siendo esto un ciclo, ya que los electrones al moverse crean corriente, el movimiento de los electrones da lugar a que la pila vaya perdiendo voltaje y acaba gastándose.*

011 (E): *Dices que los electrones al pasar por la pila se cargan y que la pila va perdiendo voltaje y acaba gastándose. ¿Quieres decir que los electrones se cargan de voltaje?*

013 (O): *Si, pero se dice que los electrones tienen potencial, bueno eso entiendo yo.*

014 (E): *¿Es lo mismo potencial que voltaje?*

015 (O): *Potencial, voltaje, fuerza electromotriz, tensión todo es lo mismo, todo se mide en voltios.*

016 (E): *¿Se podría decir entonces que las cargas tienen tensión o fuerza electromotriz?*

El alumno se queda pensativo un ratito y contesta:

017 (O): *Creo que ahora lo he entendido, todo es lo mismo, pero si nos referimos a la pila hablamos de su fuerza electromotriz, si hablamos de los electrones del potencial si es de un cable de la tensión y si es del campo eléctrico de la diferencia de potencial.*

020 (E): *¿Es esta diferencia de potencial la misma magnitud que se estudia en el tema de Electroestática?*

021 (O): *No estoy seguro, las relaciones son diferentes.*

022 (E): *¿A qué te refieres con las relaciones?*

023 (O): *A las formulas...No lo sé...supongo que si, pero no lo sé.*

3. Ejemplo categorizado como “*Explicaciones que ponen de manifiesto una confusión terminológica asociada a una confusión conceptual*”

Cecilia es estudiante de segundo ciclo

01 Entrevistador (E): *Me parece entender de tu respuesta que las cargas tendrían la propiedad que llamamos diferencia de potencial.*

03 (C): *Bueno digo que cuando una carga se desplaza entre los electrodos de la pila varía su diferencia de potencial ya que la pila tiene almacenada energía y cuando se desplaza una carga entre dos electrodos de la misma esta energía disminuye...*

06 (E): *Si varía la diferencia de potencial de la carga será porque la carga tiene esa propiedad.*

07 (C): *En realidad lo que sucede es que sobre la carga actúa una fuerza y se mueve, su potencial varía en tanto en cuanto está variando su posición en el seno del campo eléctrico que generan los bornes de la pila. Con lo que podemos conocer valores relativos del potencial y no absolutos, de aquí que señalara la diferencia de potencial y no el potencial.*

011 (E): *Entonces ¿las cargas tienen potencial o diferencia de potencial?*

012 (C): *Cuando una carga posee desplazamiento, se origina una d.d.p. entre los polos de la pila a consecuencia de esa separación de cargas que se produce y origina un flujo de cargas que se cuantifica como fuerza electromotriz.*

015 (E): *Ahora me ha parecido entender que te refieres a la diferencia de potencial entre los electrodos de la pila.*

017 (C): *Es que depende a qué te estés refiriendo en cada momento.*

Como puede verse de las respuestas en las entrevistas anteriores, Ejemplo 1 (026); Ejemplo 2 (07, 012 y 017), los estudiantes asignan a las cargas propiedades del campo, pero en función de la pregunta que tienen que responder, reasignan estas propiedades cayendo con frecuencia en contradicciones. Como señala el alumno del ejemplo 2 en (017) se trata de lo mismo (no sabe qué) pero dependiendo del elemento del circuito que se trate se nombra de una forma u otra.

Ni uno sólo de los estudiantes justifica que las magnitudes estudiadas en la Electrostática y que se emplean en la descripción del funcionamiento de los circuitos, sean las mismas, llegando a reconocerse abiertamente que no lo saben (Ejemplo 4, 010 a 013)

4. Magín es un estudiante de Segundo ciclo universitario.

01 Entrevistador (E): *¿Te ratificas en tu selección de la opción c)?*

- 02 Magín (M): *Si, las cargas eléctricas se desplazarán de un potencial a otro menor. Si una carga se desplaza entre los bornes de una pila, es porque los potenciales de los bornes son distintos*
- 04 (E): *Pero ¿qué propiedad cambia de la carga?*
- 05 (M): *Varía su potencial porque las cargas eléctricas buscan la situación donde tengan la menor energía posible, así lo que varía es su potencial porque energía eléctrica = carga x potencial*
- 07 (E): *¿No es el potencial es una propiedad del campo eléctrico?*
- 08 (M): *Si pero una carga situada en ese punto del campo tendrá el potencial que tenga ese punto. Por esto se habla del potencial de una esfera o del potencial de una carga.*
- 010 (E): *¿Se trata de la misma propiedad que se estudia en la Electrostática?*
- 011 (M): *Debe serlo ¿Por qué no?*
- 012 (E): *¿Por qué si? es lo que importa en el estudio de esta parte de la Física.*
- 013 (M): *Si contesto es inventado.*

5. Víctor es estudiante de Bachillerato

- 01 Entrevistador (E): *Señalas en tus respuestas que la carga que se desplaza entre los electrodos de la pila tiene potencial, pero no lo justificas ¿Puedes hacerlo ahora?*
- 03 Víctor (V): *Porque es la única magnitud que depende de la posición de la carga.*
- 04 (E): *¿Puedes explicarlo un poco más?*
- 05 (V): *Cuando una carga eléctrica se desplaza entre los dos electrodos de una pila, varía su potencial porque a lo largo del circuito esta carga realiza un trabajo para vencer el rozamiento y varía su potencial. Cuando la carga ha llegado al otro extremo ha sufrido una diferencia de potencial.*
- 08 (E): *Pero la diferencia de potencial ¿no es algo que se mide por ejemplo entre los electrodos de la pila?*
- 010 (V): *Si, pero es como consecuencia del paso de todas las cargas, cada una contribuye un poco a que se produzca la diferencia de potencial.*
- 012 (E): *¿Esta diferencia de potencial es la misma propiedad que la que se estudia en Electrostática?*
- 013 (V): *Las formulas son distintas...*
- El alumno escribe la ley de Ohm y la formula $V = q/kr_i$
- 014 (V): *No encuentro relaciones entre una y otra, no estoy seguro...Pero si nos atenemos a las formulas no se trata de lo mismo.*

El resultado del análisis demuestra que las consecuencias contrastables C1 y C1.1 y C2. Los estudiantes asignan propiedades del campo a las cargas y lo justifican o eluden contestar. Sus razonamientos a falta de otros recursos se dirimen frente a las “fórmulas matemáticas”, ante las cuales no hay escapatoria, con ellas no se especula, ver líneas 013 y 014 anteriores.

Resumen de los resultados de la encuestas y entrevistas a estudiantes

El análisis de las respuestas, junto con la confirmación en todos los casos en el curso de las entrevistas, pone de manifiesto una deficiencia de aprendizaje que se deriva, a nuestro entender, de una enseñanza que no indica explícitamente por qué se introduce el concepto de fuerza electromotriz, qué es lo que mide y cuál es su papel en el modelo explicativo de circuitos sencillos de corriente continua. La enseñanza, como hemos mostrado, se basa en comentarios acerca de ecuaciones cuyo significado se aborda de manera operativa principalmente. Como consecuencia de estas dos deficiencias confunden la ecuación de la ley de Ohm y la ecuación del circuito y, lo que es peor, una ley muy restringida y parcial en sus condiciones de aplicación, se concibe como una forma de expresar el Principio de Conservación de la Energía para el sistema circuito.

Tampoco tienen clara la relación entre las magnitudes que han estudiado en el tema de Electroestática y las magnitudes en el análisis de los circuitos, en concreto entre Diferencia de Potencial e Intensidad de corriente y mucho menos tienen disponibles explicaciones coherentes acerca de las relaciones macro-micro sobre el funcionamiento de los circuitos, lo que se pone de manifiesto al no tener claro el ámbito de aplicación de los conceptos, atribuyendo por ejemplo potencial a las cargas eléctricas.

En el proceso de enseñanza-aprendizaje, adquieren hábitos perniciosos de expresión en los que se confunde resumir brevemente con enunciar, justificar con afirmar o negar. No se aprende a emplear el vocabulario preciso para una explicación, sino a resumir de forma que los conceptos quedan despojados de sus atributos principales, quedándose las justificaciones ceñidas al empleo de alguna fórmula matemática. De forma que por ejemplo en una pila, en un Generador de Van der Graaf, en el caso del efecto piezoeléctrico, se produce una separación de cargas, que dará lugar a una diferencia de potencial, el trabajo puesto en juego para esta separación, por cada unidad de carga, es exactamente la fuerza electromotriz, pero todo esto no puede recogerse en una fórmula, exige descripciones cualitativas, que suelen estar ausentes de las explicaciones. La fuerza electromotriz asociada con corriente, es una consecuencia de una de las ecuaciones de Maxwell, en realidad más que una consecuencia, forma parte de la verbalización posible de dicha ecuación. Esto se ha repetido tanto que los

estudiantes acaban relacionando en todos los casos intensidad de corriente y fuerza electromotriz. Sin embargo antes de la matematización de Maxwell, Faraday describía su experiencia en los siguientes términos: “Siempre que una fuerza magnética aumenta o disminuye, produce electricidad; a mayor rapidez de aumento o disminución, mayor cantidad de electricidad produce.” Posteriormente Maxwell utilizó \mathbf{B} para representar el magnetismo y \mathbf{E} para indicar la electricidad, y del mismo modo utilizó $-\partial/\partial t$ para representar la frase “la tasa de aumento o disminución de...” y $\nabla \times$ para representar “el aumento de...”, con lo que el descubrimiento de Faraday se convertía en la ecuación: $\nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t$ (Aleksandrov, 1973; Chambers, 1973 ; Guillen 1999). Esta es una posible verbalización de la ecuación para el rotacional del campo eléctrico, ausente de los libros de física.

El lenguaje utilizado por los estudiantes es revelador de unos métodos de enseñanza-aprendizaje en los que prima la operativización de los conceptos, en la que la descripción de los atributos de tales conceptos suele estar enmarañada por ecuaciones matemáticas que expresan las relaciones cuantitativas entre las magnitudes implicadas. Relaciones cuantitativas que son por tanto relaciones terminales entre los conceptos, es decir, de las ecuaciones matemáticas no es fácil deducir procesos de transformación, cómo y entre qué límites tienen lugar dichos procesos de cambio. De forma que cuando los estudiantes tienen que aplicar conceptos en situaciones físicas concretas, aparecen multitud de dificultades y de errores.

El profesorado utiliza con frecuencia un lenguaje muy formal, pero con la misma frecuencia hueco, y cuando se ve ante la tesitura de explicarse, es decir, relacionar lo que dice en relación con un concepto con cambios o procesos en los que el concepto interviene las dificultades pueden ser insuperables. El profesorado, a ningún nivel, ha aprovechado la explicaciones de lo más evidente para hacer las salvedades oportunas de lo que no lo es tanto, por ejemplo, hay estudiantes de físicas que señalaban la existencia de una corriente como consecuencia del transporte de cargas en la cinta del generador de Van del Graaf, esto es verdad, hay una corriente, pero no una corriente a la que se puedan aplicar las teorías acerca de la conducción eléctrica y por tanto conceptos como el de Intensidad de corriente aquí no significarían lo mismo.

CAPÍTULO 6. ENUNCIADO Y FUNDAMENTACIÓN DE LA SEGUNDA HIPÓTESIS

6.1 Enunciado de la segunda hipótesis

En los capítulos anteriores hemos analizado el proceso de enseñanza-aprendizaje en relación con el concepto de fuerza electromotriz. Los resultados que se han presentado indican que, los estudiantes al terminar el Bachillerato, poseen carencias significativas de algunas ideas importantes en la interpretación de los circuitos eléctricos sencillos y en particular en aquellas nociones relacionadas con el concepto de fuerza electromotriz. Esto que en sí mismo puede tener un indudable valor, pues el avance en el proceso de enseñanza-aprendizaje sólo es posible conociendo lo mejor posible la situación de partida de aquellos aspectos en los que se quiere progresar, sin embargo no sería suficiente en una investigación como la que presentamos. El conocimiento adquirido, debe emplearse en construir una alternativa que permita superar las dificultades y deficiencias detectadas y de esta manera mejorar el aprendizaje de los estudiantes en relación con el concepto de fuerza electromotriz así como de algunas de las ideas fronterizas con el mismo.

Es por esto que la segunda parte de este trabajo está destinada a mostrar que, es posible introducir y desarrollar una secuencia de actividades de enseñanza acerca del concepto de fuerza electromotriz y su aplicación en la interpretación de los circuitos eléctricos sencillos que, concebida como un modelo de investigación orientada, supere las carencias observadas.

En esta dirección existen antecedentes de otras investigaciones didácticas que, se han concebido como procesos en los que los estudiantes deben “reconstruir” modelos e ideas, a partir de estrategias de enseñanza que tienen en cuenta aspectos de la Naturaleza de la Ciencias que, además, son coherentes con la visión actual de la ciencia que muestran por parte de los estudiantes un mejor aprendizaje de los conceptos implicados (Bullejos, López Gay 2001, Almudí 2002, Zubimendi 2003, Furió et al. 2003,).

La “investigación orientada constituye un modelo de enseñanza-aprendizaje coherente con la investigación didáctica actual, que se basa en la idea de que el aprendizaje y la enseñanza de las ciencias pueden desarrollarse como un proceso de “(re)construcción” de conocimientos, que se inspira en los atributos de la investigación científica. Expondremos las características esenciales del modelo didáctico en el que hemos basado la elaboración de los materiales de enseñanza-aprendizaje empleados en esta segunda parte de nuestra investigación. Pero era un requisito esencial que pudieran observarse mejorías en todos los aspectos relacionados con dicho proceso de enseñanza-aprendizaje, de las nociones problemáticas que se estudiaban.

Los trabajos y reflexiones precedentes nos hicieron concebir una hipótesis cuyo contraste debería suponer la superación de las dificultades que se habían puesto al descubierto, al propugnar un camino más acorde con la naturaleza del conocimiento científico y que favoreciera una comprensión profunda de de las ideas y principios en discusión y que promoviesen actitudes positivas hacia la materia y su aprendizaje (Verdú R. y Martínez-Torregrosa J. 2005, Membiela 2002, Bernal 2003).

Nuestra hipótesis, entorno a la cual se ha vertebrado esta parte de nuestra investigación, para avanzar en la solución del problema didáctico que se ha descrito en los capítulos anteriores 3, 4 y 5, se concreta en el siguiente enunciado:

HIPÓTESIS 2: Es posible elaborar una secuencia de aprendizaje alternativa para la enseñanza del concepto de fuerza electromotriz, en el contexto de los circuitos eléctricos sencillos, basado en un modelo de aprendizaje como “investigación orientada”, que sea coherente con los resultados de la investigación en didáctica de las ciencias y que proporcione una mejoría significativa en el aprendizaje de los conceptos y de los procedimientos, a la vez que genere entre los estudiantes actitudes positivas hacia la materia.

6.2 Fundamentación de la segunda hipótesis

Los resultados que se han presentado en el capítulo anterior, así como los de distintas investigaciones (López Gay, 2001; Guisasola et al., 2003; Zubimendi 2003;

Furió C., Guisasola J., Almudí J.M. y Ceberio M., 2003.), son considerablemente reveladores de un paradigma de enseñanza ampliamente generalizado y también largamente investigado por distintos autores (Gil D. 1991; Porlan, 1993; Désautels et al., 1993; Hodson, 1993; Gil y Pessoa, 1994; Duschl, 1995; Porlan y Marín, 1996,) caracterizado por una transmisión de los conocimientos ya elaborados que, ya sea por acción u omisión transfiere una visión de la ciencia aproblemática, exclusivamente analítica, individualista, socialmente neutra,... Este tipo de enseñanza que el profesorado ha adquirido por “impregnación ambiental” y que tomamos como expresión de “lo natural” escapa fácilmente a la crítica, pero además posee una cierta coherencia y cada uno de sus elementos viene apoyado por los restantes (Viennot, 1989; Gil 1991). Lo anterior significaría que una transformación efectiva de la enseñanza habitual de las ciencias precisa algo más que el simple reconocimiento de algunas de sus insuficiencias más visibles o que la mera introducción de innovaciones puntuales, restringidas a alguno de sus aspectos.

Fruto de los resultados de un amplio abanico de investigaciones, realizadas en distintos países, un grupo de profesores e investigadores (Gil et al., 1999; Gil-Pérez D., Guisasola J., Moreno A. y colaboradores, 2002, , Verdú y Martínez-Torregrosa 2005; Guisasola J., Almudí M., Zubimendi J.L. y Zuza K., 2005,) han formulado unas “estrategias de enseñanza de orientación constructivista para un aprendizaje como investigación orientada”, que suponen un replanteamiento global para el proceso de enseñanza-aprendizaje que partiría de:

- A.** Plantear situaciones problemáticas que, teniendo en cuenta las ideas, la visión del mundo, las destrezas y las actitudes de los estudiantes, sean susceptibles de generar interés y proporcionen un punto de partida para el trabajo de los estudiantes.
- B.** Diseñar una secuenciación de las grandes preguntas iniciales. Esto dará lugar a un hilo conductor en el que cada apartado del tema se convertirá en un problema más concreto cuya solución permitirá avanzar en los problemas iniciales
- C.** Proponer a los estudiantes un estudio cualitativo de las situaciones problemáticas planteadas y la toma de decisiones para acotar problemas

precisos, lo que daría ocasión para que se expliciten sus ideas e intenten idear un plan para su tratamiento.

D. Orientar el tratamiento científico de los problemas planteados, lo que conlleva, entre otros (Guisasola J., Ceberio M. y Zubimendi J.L., 2005):

- La emisión de hipótesis, incluida la invención de conceptos, la elaboración de modelos... (ocasión para que las ideas previas se utilicen para hacer predicciones.
- La elaboración de estrategias (incluyendo, en su caso, diseños experimentales) para la contrastación de las hipótesis a la luz del cuerpo de conocimientos de que se dispone.
- La realización de estrategias y el análisis de los resultados, considerando las predicciones de las hipótesis, cotejándolos por los obtenidos por los otros grupos de estudiantes y por la comunidad científica, estudiando su coherencia con el cuerpo de conocimientos... Ello puede convertirse en ocasión de conflicto cognoscitivo entre distintas concepciones (tomadas todas ellas como hipótesis) y obligar a concebir nuevas hipótesis.

E. En las estrategias de enseñanza utilizadas, los conceptos y modelos se introducen como tentativas, como hipótesis, que deben ser puestas a prueba, tanto a través de su capacidad predictiva en situaciones de laboratorio como en el tratamiento de los problemas planteados en el tema (Guisasola J., Ceberio M. y Zubimendi J.L., 2003). El profesor utiliza analogías que permitan a los estudiantes entender nuevos modelos teóricos y relacionarlos con la experiencia.

F. Plantear el manejo reiterado de los nuevos conocimientos en una variedad de nuevas situaciones para hacer posible la profundización y afianzamiento de los mismos, poniendo un énfasis especial en las relaciones Ciencia/Tecnología/Sociedad que enmarcan el desarrollo científico (propiciando a este respecto la toma de decisiones) y dirigiendo todo este tratamiento a mostrar el carácter del cuerpo coherente que tiene toda la ciencia.

G. La evaluación es concebida como un instrumento de ayuda para el avance en la resolución de las preguntas planteadas. Se Favorece, muy especialmente

las actividades de síntesis (esquemas, memorias, resúmenes, mapas conceptuales...), la elaboración de productos (susceptibles de romper con planteamientos excesivamente escolares y de reforzar el interés por la tarea) y la concepción de nuevos problemas (Alonso M., Gil D. y Martínez-Torregrosa J.1991).

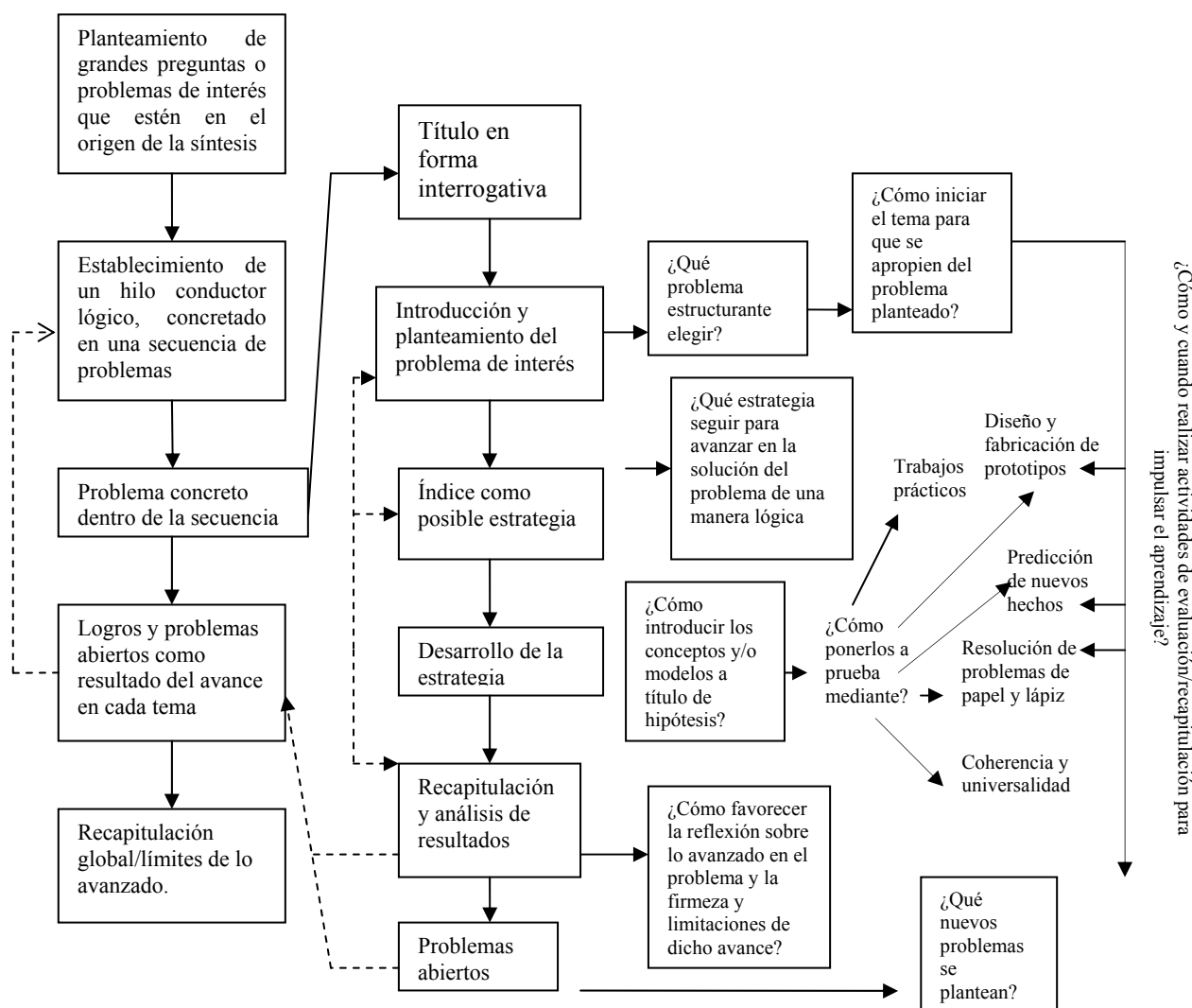
Lo que podríamos denominar etapas A, B y C anteriores vinculan la propuesta con las características esenciales de lo que supuso una nueva visión para el aprendizaje de las ciencias desde una orientación constructivista para el aprendizaje de los conceptos, expuestas con detalle por diversos autores (Posner et al., 1982; Osborne y Wittrock, 1985; Driver, 1986...). Y del mismo modo, en coherencia con esta concepción del aprendizaje como construcción de conocimientos científicos, se propugnan estrategias que asocian el aprendizaje al tratamiento de situaciones problemáticas abiertas (Furió y Gil 1978; Driver y Oldham, 1986; Gil y Martínez Torregrosa, 1987; Burbules y Linn, 1991; Gil et al., 1991; Wheatley, 1991; Gil, 1993) que puedan generar el interés de los estudiantes.

Por su parte, las etapas D y E estarían vinculadas a una perspectiva de la enseñanza de la ciencia que, no pretende distinguir entre la construcción de los significados y la práctica de la ciencia, posición que propugnan autores en didáctica de las ciencias como Duschl y Gitomer (1991), Duschl (1995); Campanario (2003); Furió C. y Guisasola J., 1998).

Finalmente F y G tendrían su fundamento en las aportaciones en torno a la evaluación del aprendizaje en ciencias, a los problemas de contextualización del trabajo científico (relación C/T/S, toma de decisiones...) y a los componentes afectivos (interés por la tarea, clima de trabajo...) (Solbes y Vilches, 1997; Gilbert et al 2003; Laukermann et al 2003,; Hodson 2003, Vilches y Gil, 2003).

Todo ello constituye una forma de trabajo y de secuenciación de la acción educativa que podemos sintetizar en el gráfico 1 elaborado por Verdú y Martínez-Torregrosa (2005):

Grafico 1: estructura básica de una gran síntesis y preguntas que se plantean



En el marco que acabamos de esbozar, hemos prestado especial interés a los aspectos relacionados con modelos mentales de los estudiantes, con el fin de elaborar secuencias y actividades de aprendizaje más eficientes en la dirección que señalan Brown (1995); Vosniadou (1995); o Greca y Moreira (2002), según la cual cuando un sujeto se enfrenta a una situación nueva (la aprehensión de un nuevo concepto) construye modelos mentales que le permitan hacer inferencias y predicciones que le ayuden a comprender y dominar la nueva situación, una representación interna construida a partir de conocimientos previos y nuevas percepciones.

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 (Justi, R. y Gilbert J., 2000). De acuerdo con Tiberghien (1994) los

científicos cuando interpretan y predicen los hechos experimentales, no aplican directamente una teoría a la situación sino que, usando la teoría elegida, construyen un modelo de la situación experimental. Por tanto, el papel del modelo es relacional o de intermediario y, juega un importante papel en la comprensión del fenómeno analizado.

Las personas, para aprender nuevos modelos, usamos analogías –comparaciones entre entidades que consideramos similares en algún sentido– en la vida cotidiana cuando queremos comunicar nuestras ideas sobre temas que nos son menos familiares; para ello solemos recurrir a otros referentes mejor conocidos y que nos parecen semejantes al menos en los aspectos que queremos expresar. Sin embargo, en el trabajo científico las analogías suponen mucho más que una forma de hablar, pues se convierten en un potente instrumento cognitivo para el razonamiento y la explicación en ámbitos conceptuales novedosos y más abstractos (Gentner y Gentner, 1983).

Según estas posiciones teóricas, nos parecía que el uso de las analogías podía convertirse en una herramienta de suma utilidad además, y desde un punto de vista didáctico, el empleo de analogías aparece ligado normalmente en la literatura al aprendizaje en el ámbito conceptual, por ejemplo, como ayuda en la comprensión y desarrollo de nociones abstractas o como recurso dirigido a cambiar las ideas intuitivas ya existentes (Posner et al., 1982; Brown y Clement, 1989; Treagust et al., 1996; Brown, 1994; Clement, 1993; Duit, 1991; Greca y Moreira, 2002; Duit et al. 2003; Orgill et al 2004; Oliva 2005). Pero también existen posiciones que señalan que importantes rasgos característicos del trabajo científico, tales como la invención de hipótesis y modelos, la creatividad y el uso de analogías y del razonamiento analógico favorecen y desarrollan el pensamiento de los científicos y les permiten generar nuevos conceptos y conocimientos, establecer una nueva teoría...(Nersessian, 2002).

De forma que, se encuentra cada vez más en la bibliografía un desplazamiento en el interés por las analogías desde razones de este tipo hacia otras comprometidas con una formación más integral del alumno. En efecto, la idea de que la analogía, como tal, puede ayudar a comprender y desarrollar nuevas nociones abstractas o a cambiar las ideas ya existentes, aun siendo útil y sugerente para ciertos fines, puede conllevar un riesgo importante. Señala Oliva (2004) el peligro que puede derivarse al ignorar otras facetas del aprendizaje de los estudiantes como son las relacionadas con los

procedimientos y actitudes, cuya importancia en el aprendizaje de las ciencias en general se ha sugerido y justificado repetidamente desde diferentes puntos de vista (Gil et al., 1991; Campanario y Moya, 1999; Cudmani et al., 2000; Oliva, et al., 2001). Como señalan algunos autores (Oliva 2004), “sobervalorar la contribución de las analogías en el aprendizaje de conceptos podría llevarnos a subestimar su aportación en el desarrollo de la creatividad y de la imaginación, en la construcción de un pensamiento más integral e interconectado, o en la mejora de la autoestima y otros factores motivacionales”.

Señalar también que, la historia de la ciencia ilustra acerca del papel que las analogías jugaron en el proceso de construcción de las explicaciones en algunos campos de la Física (Furió C. y Guisasola J. 1993), como fue el desarrollo de la teoría del campo electromagnético de Maxwell, que daría lugar a una de las grandes síntesis de la física clásica: la de los fenómenos ópticos, eléctricos y magnéticos. Maxwell utilizó exhaustivamente las analogías y el razonamiento analógico en su intento de conseguir sus más importantes propósitos científicos. Años antes, los primeros trabajos sobre la electricidad de Thomson –realizados durante la década de 1840– estuvieron orientados por una analogía matemática entre los fenómenos térmicos y eléctricos (Archibald T. 1988), analogía esta de la que también se había servido Ohm en el primer cuarto de siglo en sus trabajos acerca de la conductividad eléctrica.

Por último, cabe mencionar que el empleo de analogías físicas, en las que una forma matemática común permitía relacionar fenómenos físicos dispares, también contribuyó a resaltar la unificación de estos fenómenos, lo que resultó de gran importancia para el avance de la física del siglo XIX. Son bastante ilustrativas al respecto las siguientes palabras de Boltzmann (1892): *“Las mismas ecuaciones podían considerarse como solución de un problema de hidrodinámica y de la teoría potencial. La teoría de los remolinos fluidos, así como la fricción de los gases, mostró una analogía sorprendente con la del electromagnetismo.”*

Destaca Oliva (2004) cuatro rasgos en relación con la función de las analogías:

- i) La analogía constituye ante todo un proceso interno al sujeto, y no sólo el estímulo externo que se presenta como recurso a través del libro o de la explicación del profesor.
- ii) Más que un contenido o de un conocimiento a aprender, se trata de un proceso o, si se quiere, de un camino que el alumno ha de recorrer: la transferencia analógica.

iii) El proceso de transferencia analógica exige la construcción de un modelo más profundo que la mera asociación directa de atributos entre el *blanco* y el *análogo*. Este modelo se configura en estrecha conexión con contexto en el que se elabora la analogía, delimitando el mensaje de la misma desde la intencionalidad didáctica con la que se propone.

iv) Además, se genera a través de un proceso bidireccional complejo que se construye en un marco interactivo, entre el *blanco* y el *análogo*, mediado por el modelo sobre el que se sustenta la analogía.

Señalar para terminar que, en este contexto, la analogía no es concebida como un eslabón puntual en el discurso del aula, sino como un elemento recurrente al que se puede apelar en distintas fases de la intervención. Una misma analogía se podría usar de forma repetida en distintos momentos de la enseñanza, con objeto de representar diferentes aspectos del *blanco* bajo estudio. Como también se podría recurrir a diferentes analogías en un mismo momento, al objeto de demarcar de forma más clara el modelo de fondo que se intenta representar.

Más en concreto, la toma en consideración de las reflexiones y resultados anteriores conlleva la realización de un estudio histórico y epistemológico del campo a tratar, pero (y esto es básico) realizado con “intencionalidad didáctica”, para que su estudio sea útil y factible para los estudiantes (Guisasola J., Almodí M. y Furió C., 2005). Este estudio se encuentra dirigido al diseño de una estructura del tema que permita a los estudiantes, con el apoyo del profesor, enfrentarse a situaciones problemáticas de interés, poniendo un juego buena parte de los procesos de producción y validación de los conocimientos científicos (Verdú et al. 2002). Se trataría de contestar a preguntas del tipo:

- ¿Qué problemas están en el origen de las teorías que deseamos pasen a formar parte del bagaje de nuestros estudiantes? (identificación de objetivos clave)
- ¿Cuáles son/fueron los obstáculos más importantes para avanzar en la solución a los problemas planteados? ¿Qué ideas y razonamientos pueden tener los estudiantes en relación con los problemas detectados, que pudieran presumirse como obstáculos para el aprendizaje y, que por tanto deben ser tomados en consideración? (identificación de objetivos obstáculo)
- ¿Qué secuenciación de actividades (plan de investigación según la etapa D y E anterior) conviene proponer a los estudiantes para avanzar en la solución a los problemas iniciales?

En estas tareas, el trabajo del diseñador del itinerario consistirá en graduar la dificultad de las actividades, ya que la elección de los objetivos y modelos que se pretendan alcanzar deben representar un reto accesible para los estudiantes (dentro de lo que sería la zona de desarrollo potencial próximo, en la idea de Vigostky), de tal forma que mediante la interacción y la ayuda de los demás, el estudiante pueda participar en el proceso de (re)construcción de, modificación y enriquecimiento de los modelos, que es lo que define el llamado aprendizaje significativo.

Todas estas consideraciones, deben conformar unas relaciones y un estilo de funcionamiento a la hora de realizar las tareas que, favorezcan la explicitación de las propias ideas y confrontarlas con las de los demás en un ambiente de trabajo en el que abundarán las argumentaciones y justificaciones imprescindibles para el aprendizaje de conocimientos científicos. Se trata de crear un ambiente en el que se potencie la implicación de todos los miembros del “equipo de investigación” (profesores y estudiantes), en la resolución de los problemas. Los estudiantes deben disponer de tiempo en el aula para pensar, argumentar, discutir y posteriormente decidir en torno a la forma de proceder consecuentemente.

El papel del profesorado en estas situaciones es mucho más rico y más complejo, las tareas se diversifican al pasar de transmitir conocimientos ya elaborados, para asumir el papel de director de un equipo muy diverso de investigadores noveles que necesitarán de lecturas suplementarias, de actividades de refuerzo o ampliación peculiares, de la puesta a punto de materiales de apoyo complementarios (con la potencialidad que los medios informáticos y audiovisuales ofrecen en la actualidad), de su capacidad de síntesis de las aportaciones de los distintos grupos, ...La actividad intelectual requerida para esta tarea no se limita al conocimiento de la disciplina aprendida durante la carrera, sino también a saber participar en el impacto y en los cambios que la ciencia produce sobre el mundo en general, así como conocer los resultados de la investigación didáctica produce en el ámbito de las ciencias experimentales, sólo de esta forma podrá concebir experiencias de aprendizaje que sean significativas para sus alumnos y a la par, reconocibles para el científico como actividades científicas en sus principios y en su contenido.

CAPÍTULO 7: OPERATIVIZACIÓN DE LA SEGUNDA HIPÓTESIS Y SUS DISEÑOS EXPERIMENTALES

En el capítulo anterior se han expuesto las razones en las que se apoya nuestra segunda hipótesis, que se refiere a la posibilidad de elaborar y desarrollar un programa para la enseñanza de los circuitos de corriente continua, con especial atención a un concepto fundamental como el de Fuerza electromotriz, basado en un modelo de aprendizaje como investigación orientada, que mejore el aprendizaje de los conceptos y de los procedimientos, y genere en los estudiantes actitudes positivas hacia la materia.

Como ya nos hemos referido anteriormente, el plan de investigación que desarrollamos se fundamenta en abordar situaciones problemáticas que, permitan mejorar a los estudiantes, en los aspectos relacionados con el aprendizaje del tema que se investiga, a través de la resolución de los problemas planteados. Se consideran las aportaciones que la Historia de la Ciencia puede brindar, así como las derivadas de investigaciones en didáctica de las ciencias experimentales en torno a nociones fronterizas con las que aquí se abordan. En este capítulo presentaremos la operativización de la segunda hipótesis de la que se derivan tres consecuencias contrastables, así como los instrumentos que se utilizarán para comprobarlas.

7.1. Operativización de la segunda hipótesis, consecuencias contrastables y visión general del diseño

De la segunda hipótesis enunciada en el capítulo anterior, hemos derivado a su vez dos hipótesis; de cada una de las cuales podrían derivarse un buen número de consecuencias contrastables, pero en este trabajo nos hemos centrado en las siguientes:

D. Es posible desarrollar un programa de actividades para introducir el concepto de fuerza electromotriz que tenga en cuenta las dificultades de los estudiantes y que sea metodológicamente coherente con los procedimientos y razonamientos propios de la cultura científica.

E. El programa elaborado, utilizado con grupos aleatorios de estudiantes de primer curso de Bachillerato, logrará un mejor aprendizaje del concepto de fuerza electromotriz y un mayor interés hacia la Ciencia y su aprendizaje.

Con respecto a esta última derivación, nos hemos propuesto verificar las siguientes consecuencias contrastables:

E1. La aplicación del programa de actividades elaborado produce mejoras significativas, en los indicadores establecidos para una adecuada comprensión del concepto de fuerza electromotriz, respecto a los resultados alcanzados por grupos de estudiantes que han recibido una enseñanza del tipo habitual.

E2. Los estudiantes a los que se les ha aplicado el programa de actividades evidencian actitudes positivas hacia el aprendizaje de la Física.

En la tabla siguiente se presentan los instrumentos que se han diseñado para contrastar cada una de las consecuencias señaladas. De este modo creemos que se proporciona una visión de conjunto y se facilita su localización:

Tabla 7.1. Instrumentos de análisis elaborados para la contrastación de la segunda hipótesis

CONSECUENCIAS CONTRASTABLES	INSTRUMENTOS DE ANÁLISIS	N° DE DOCUMENTO
<p>D. Se desarrollará un programa de actividades, para introducir el concepto de fuerza electromotriz que, tendrá en cuenta las dificultades de los estudiantes, que será metodológicamente coherente con los procedimientos y reflexiones que caracterizan la cultura científica.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Análisis del proceso de planificación de la secuencia de actividades propuesta, con sus objetivos y las dificultades observadas en los estudiantes, se tienen en cuenta las ideas previas y las características de la metodología científica (planteamiento del problema, formulación de hipótesis, atención preferente a las dificultades encontradas en la primera hipótesis, diversidad de estrategias...) 	<p>Unidad didáctica</p>
<p>E1. La aplicación del programa de actividades elaborado produce mejoras significativas, en los indicadores establecidos para una adecuada comprensión del concepto de fuerza electromotriz, respecto a los resultados alcanzados por grupos de estudiantes que han recibido una enseñanza del tipo habitual.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Observación en clase. ▪ Cuestionario escrito e individual para comparar el aprendizaje obtenido en grupos experimentales y grupos de control. ▪ Entrevistas orales con documento escrito a grupos experimentales de estudiantes. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cuadro 7.1 (Documento 1) ▪ Cuadro 7.2 (Documento 2) ▪ Cuadro 7.3 (Documento 3)
<p>E2. Los estudiantes a los que se les ha aplicado el programa de actividades evidencian actitudes positivas hacia el aprendizaje de la Física.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cuestionario sobre actitudes a grupos experimentales de estudiantes. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cuadro 7.4 (Documento 4)

7.2. Diseños centrados en la enseñanza impartida

Este apartado muestra los diseños que permitirán elaborar el conjunto de actividades a que hace referencia la consecuencia contrastable **D** y planificar su aplicación en el aula.

Como se procedió al contrastar la primera hipótesis, en el diseño de instrumentos necesarios para probar la segunda hipótesis, también se han tenido en cuenta su variedad y su convergencia, de forma que ello nos permita reducir de forma considerable las

probabilidades de que algunos hallazgos se pudieran atribuir a semejanzas de método. Veamos a continuación los diseños.

7.2.1. Elaboración de un hilo conductor que tenga en cuenta las dificultades de aprendizaje de los estudiantes y del que se obtenga un programa de actividades, para la enseñanza del concepto de fuerza electromotriz, en coherencia con el modelo de aprendizaje por investigación orientada

Cuando hablamos de hilo conductor con el que desarrollar el concepto de fuerza electromotriz, en el contexto de los circuitos eléctricos sencillos, nos estamos refiriendo a una secuencia para la exposición de los contenidos que sea coherente con la estructura de la disciplina, que proporcione a los estudiantes una clara concepción preliminar de las tareas que se van a realizar y que llene de sentido e interés su trabajo. Este último aspecto, que claramente incide en la motivación de los estudiantes, nos obliga a incorporar en el programa de actividades situaciones problemáticas que se encuentren cercanas a los alumnos.

El programa que presentamos a continuación es la versión que los profesores y estudiantes emplearon durante el curso 2005/06, durante los cursos anteriores las contribuciones de profesores expertos y las implementaciones en clase habían ido ajustando el programa guía de actividades.

- **Apartado 1: ¿Tiene interés el estudio de los circuitos eléctricos?**

En esta primera parte introductoria se trata de motivar a los estudiantes, realizando la importancia de la tarea que se va a abordar.

- **Apartado 2: ¿Por qué se desplazan las cargas eléctricas?**

Una secuencia de actividades que conectan las nociones de la electrostática que se van a emplear para explicar el movimiento de las cargas en el tema de circuitos eléctricos, básicamente las nociones de potencial y diferencia de potencial.

- **Apartado 3: ¿Cómo se puede mantener un flujo continuo de cargas?**

Se trata de estudiar, siguiendo con los razonamientos microscópicos, las acciones que permiten mantener constante la diferencia de potencial entre dos puntos, cuando las cargas comienzan a desplazarse entre ellos.

- **Apartado 4: ¿Cómo mantiene una pila la diferencia de potencial entre sus bornes?: Análisis del interior de la pila en un circuito.**

La pila es un artilugio que permite mantener constante la diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito, en analogía con el funcionamiento de un generador de Van der Graaf se propone un mecanismo para explicar el funcionamiento interno de la pila, lo que va a permitir abordar de paso la confusión entre diferencia de potencial y fuerza electromotriz.

- **Apartado 5: ¿Cómo circulan las cargas eléctricas a lo largo de todo el circuito?: Análisis de lo que sucede en todo el circuito**

Se introduce en este apartado la noción de intensidad de corriente y la transformación de la energía en los elementos del circuito. De paso se abordan de nuevo algunas ideas previas de los estudiantes que se muestran resistentes al cambio, como es la de que las cargas se gastan en los elementos del circuito.

- **Apartado 6: ¿Cómo se cuantifica la energía que se transfiere o transforma en las distintas partes del circuito?**

El conjunto de actividades de esta parte estudian de forma cualitativa las relaciones energéticas en la pila y entre la pila y el resto de los elementos del circuito. Se presta especial atención a lo que significan, en términos de relaciones entre magnitudes físicas, expresiones como $I \cdot R$, $I^2 \cdot R$ o $\Delta V^2 / R$. Lo que de paso permite diferenciar entre fuerza electromotriz y diferencia de potencial al distinguir entre la ecuación del circuito y la ley de Ohm.

- **Apartado 7: Implicaciones tecnológicas y sociales del tema**

Se cierra el tema estableciendo algunas de las posibles relaciones entre las nociones estudiadas y sus implicaciones tecnológicas y sociales.

Como decíamos al señalar los problemas de aprendizaje en torno al tema que nos ocupa, no suelen ser los resultados de la investigación didáctica los que orientan el establecimiento de los currículum en la materia de física, es por esto que a una relación como la que establece la llamada ley de Ohm se le ha venido otorgando un papel destacado en el estudio del tema, por lo que hemos incluido algunas reflexiones en torno a esta idea dentro de un apartado que denominamos:

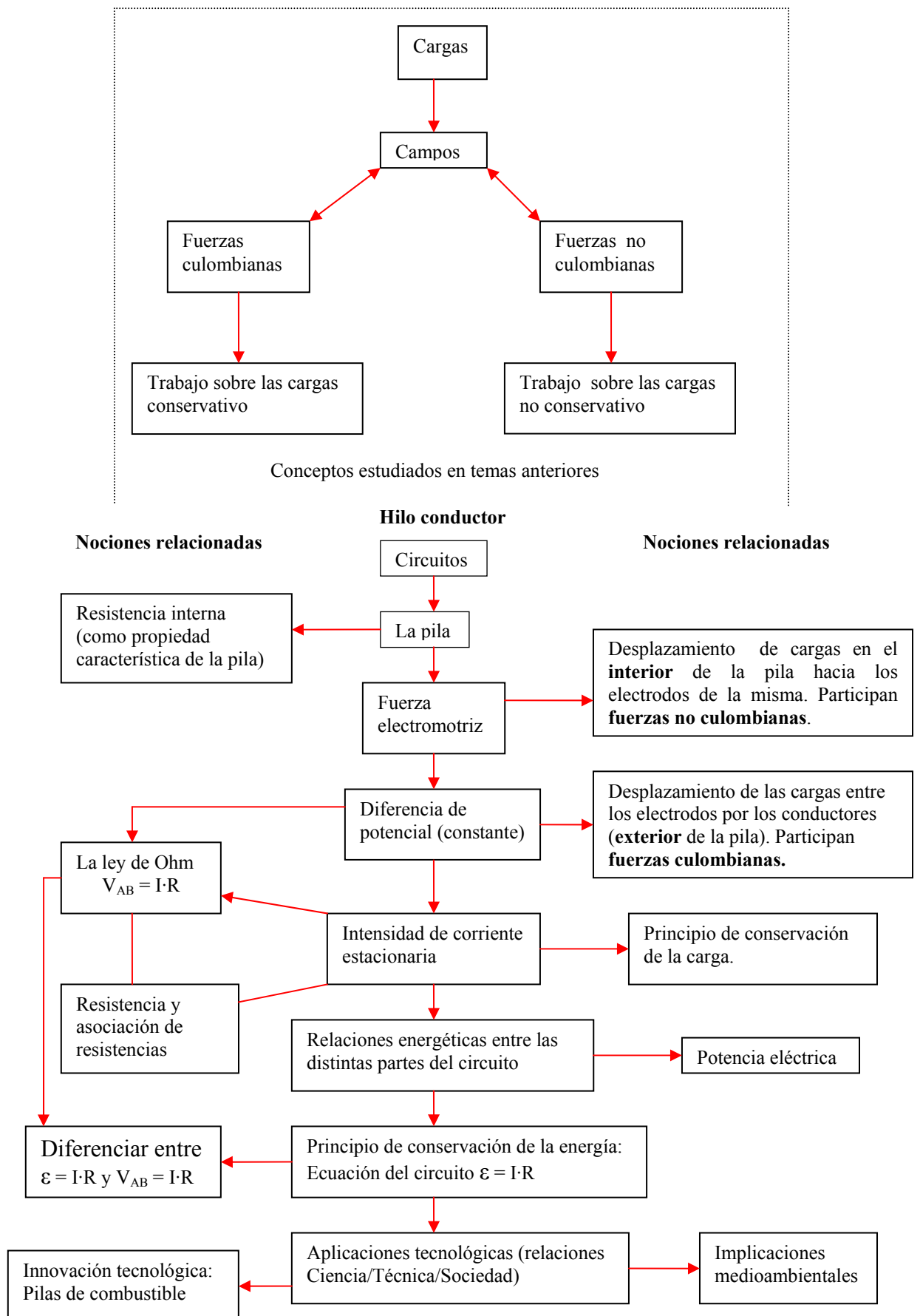
- **Apéndice: ¿Cómo conectar los elementos para lograr circuitos eficaces?**

La ley de Ohm es una relación experimental que se cumple para un elenco restringido de materiales y en un intervalo limitado de temperaturas. En realidad lo que descubrió Ohm fue que $R \equiv \frac{V}{I} = \text{conste}$, es decir, para un objeto dado cuya resistencia, entre extremos bien definidos, es independiente de la corriente que porta, se le denomina como óhmico. Esta propiedad lo que permite en lo cotidiano es la construcción de circuitos más o menos eficaces.

La figura 7.1 siguiente ilustra el esquema lineal elaborado de acuerdo con la secuencia de situaciones problemáticas expuesta, en dicho esquema se expresan de forma más explícita las relaciones conceptuales implicadas, entre las que se han incluido las del ámbito tecnológico y social.

Hemos procurado que se trate de una secuencia ordenada en la que, con carácter problemático, se exponen las situaciones que se van presentando a los estudiantes, de forma que los contenidos conceptuales vayan surgiendo como algo ineludible, incluso obligado, si se quiere profundizar en las respuestas a las preguntas formuladas. Señalamos ideas que se utilizarán reiteradamente en el tema, pero que se debieron tratar en temas anteriores, para de esta forma dejar más claro nuestro hilo conductor.

Figura 7.1



Las tablas que proponemos a continuación, desarrollan los objetivos específicos de cada sección del programa de actividades, y muestran también los posibles obstáculos que pueden dificultar el aprendizaje de los estudiantes, en base a la bibliografía existente, al marco teórico actual de la física, a los resultados parciales obtenidos durante los tres cursos en los que se ha venido elaborando y aplicando la unidad, a las experiencias de los docentes implicados en la experimentación y a la propia experiencia del investigador.

Tabla 7.2. Objetivos/dificultades para las actividades A.1 hasta A.7

RELACIÓN DE INDICADORES (Objetivos) Y DIFICULTADES APRENDIZAJE (Consecuencias contrastables) en relación con las implicaciones medioambientales y los conceptos de la electrostática implicados en el estudio de los circuitos	
Indicadores de aprendizaje	Dificultades
<ul style="list-style-type: none"> • Los estudiantes utilizarán argumentos acompañados de justificaciones racionales basados en el cuerpo teórico de la ciencia. i6 • Los estudiantes utilizarán en sus argumentaciones estrategias propias del trabajo científico. i7 • Describir como una forma de generar diferencia de potencial es mediante la separación de cargas. En la fricción, esta separación supone un trabajo realizado por fuerzas no conservativas. i2, i4 • La diferencia de potencial provoca el movimiento de las cargas a lo largo de un conductor. i1, i6, i7. • El potencial disminuye su valor en la dirección en la cual fluye la corriente convencional de cargas. • Saber analizar aplicaciones CTS que permitan contextualizar la teoría aprendida. i8 	<ul style="list-style-type: none"> • No se comprenden las relaciones entre la Electroestática y los circuitos eléctricos. C1 • En concreto, el concepto de diferencia de potencial en Electroestática y en Circuitos de corriente estacionaria se cree diferente. C1.1 • Relacionar/distinguir el nivel empírico (macroscópico) del nivel interpretativo (microscópico). Diferenciar entre propiedades de las cargas y propiedades del campo y del circuito. C2 • Identificar los atributos de tipo cualitativo de los conceptos, necesario para una mejor comprensión de los mismos. B3 • Establecer las relaciones oportunas entre las nociones estudiadas y no de forma inconexa. A2 • Identificar el potencial y la diferencia de potencial con una propiedad de las cargas. B1, C2 • Comprender el papel que juega el concepto de diferencia de potencial en las explicaciones del movimiento de las cargas en un circuito, facilitará la distinción conceptual entre diferencia de potencial y fuerza electromotriz. C3.

La tabla siguiente comprende las actividades:

Tabla 7.3. Objetivos/Dificultades para las actividades A.8 hasta A.17

RELACIÓN DE INDICADORES (Objetivos) Y DIFICULTADES APRENDIZAJE (Consecuencias contrastables) en relación con las nociones de diferencia de potencial y fuerza electromotriz, como acciones responsables del movimiento de cargas.	
Indicadores de aprendizaje	Dificultades
<ul style="list-style-type: none"> • Saber que la diferencia de potencial explica el desplazamiento de las cargas entre dos puntos a diferente potencial, exige conocer cómo se origina una diferencia de potencial, que podamos medir con el voltímetro. i1, i2 • Uno de los atributos de la noción diferencia de potencial explica el desplazamiento de las cargas entre dos puntos que tienen distinto potencial. i1 • Distinguir en un generador de Van der Graaf las acciones conservativas de las no conservativas, ya en términos de energía o de fuerzas, es necesaria para distinguir entre diferencia de potencial y fuerza electromotriz. i2, i3. • En el generador de Van der Graaf y en una pila, la fricción y las reacciones químicas respectivamente, suponen acciones en las que intervienen fuerzas eléctricas no coulombianas. i3, i4, i6 • La analogía mecánica con el Van der Graaf, para explicar como se produce la separación de cargas en la pila, permite justificar las transferencias de energía en términos de trabajo. i4, i6, i7. • Saber que la fuerza electromotriz es una propiedad característica de la pila, contribuirá a distinguirla de la noción de diferencia de potencial. i5, i6, i2. • Conocer las relaciones cuantitativas entre nociones que se utilizan para describir cualitativamente el funcionamiento de los circuitos. i5, i6, i7. 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilizar las nociones estudiadas en temas anteriores (campo eléctrico, fuerzas eléctricas coulombianas y no coulombianas etc) para explicar el funcionamiento de los circuitos. A2, B3, C1. • Describir en términos de partículas (utilización de modelos) hechos experimentales observables, como por ejemplo el deterioro de una pila tras su utilización. A1, B2, C2. • Establecer analogías y diferencias entre magnitudes (fem y d.d.p.) en los ámbitos macroscópico y microscópico. A3, B3, C2, C3. • Distinguir los ámbitos de aplicación de los conceptos que se estudian. C3, C3.1, C3.1.1 • Distinguir entre pila real (objeto) y pila ideal (concepto). B1, B2, C3.2, C3.1.2. • Establecer las relaciones a nivel cuantitativo entre las descripciones cualitativas y las magnitudes físicas correspondientes, por ejemplo definir la fuerza electromotriz en términos de energía por unidad de carga. B2, B3. • Los estudiantes conciben a la pila como una “fuente” de cargas para el circuito. B1

La siguiente tabla esta en relación con la quinta de las grandes preguntas a responder:

Tabla 7.4 Objetivos/Dificultades para las actividades A.18 hasta A.24

RELACIÓN DE INDICADORES (Objetivos) Y DIFICULTADES APRENDIZAJE (Consecuencias contrastables) en relación con las nociones de Diferencia de potencial e Intensidad de Corriente (en el exterior de la pila).	
Indicadores de aprendizaje	Dificultades
<ul style="list-style-type: none"> • Conocer qué tipo de fuerzas actúan sobre una carga cuando se mueve en el interior y en el exterior de la pila, i3, i4. • Para un circuito determinado, la pila mantiene una diferencia de potencial constante, que da lugar a una corriente estacionaria que se puede medir con el amperímetro. i7 • En el circuito, las cargas son el “vehículo” que transporta la energía que se genera en las reacciones químicas que tienen lugar en la pila. i6, i7. • Distinguir entre cargas, empleadas en la descripción microscópica cualitativa y la unidad de carga (descripción cuantitativa). i6, i7. 	<ul style="list-style-type: none"> • Reconocer los requisitos necesarios para analizar el modelo de corriente continua, estacionaria, B2. • Los estudiantes creen que las cargas se “gastan” a su paso por los distintos elementos del circuito (resistencias, bombillas), B1. • Confundir “corriente de electrones” (electrones/segundo por un punto) con “intensidad de corriente eléctrica” (culombios/segundo por sección del conductor), B1. • La necesidad de medir y la concepción de métodos de medida para una magnitud, así como la relación entre las medidas experimentales y las nociones teóricas implicadas, B3, C2.

La tabla siguiente recoge los objetivos y dificultades en relación con el apartado del programa guía de actividades que se ocupa de estudiar las relaciones energéticas en el circuito de corriente estacionaria. Se trata de un grupo de diez actividades.

Tabla 7.5 Objetivos/Dificultades para las actividades A.25 hasta A.34

RELACIÓN DE INDICADORES (Objetivos) Y DIFICULTADES APRENDIZAJE (Consecuencias contrastables) en relación con las ecuaciones ($\mathcal{E} = I \cdot R$), ecuación del circuito y $V_{AB} = I \cdot R$, una forma de expresión de la relación empírica establecida por Ohm.	
Indicadores de aprendizaje	Dificultades
<ul style="list-style-type: none"> • Relacionar la fuerza electromotriz con una magnitud que permite cuantificar la energía puesta en juego en la pila, i3. • Relacionar la diferencia de potencial con una magnitud que permite cuantificar la energía transformada en el exterior de la pila, i4. • Relacionar las medidas de magnitudes características del circuito, con el valor de la energía transformada en la unidad de tiempo en el mismo, i6. • Diferenciar entre la ecuación del circuito, como expresión del Principio de Conservación de la Energía, y la llamada ley de Ohm, como expresión de la relación entre la intensidad de corriente y la diferencia de potencial entre dos puntos bien definidos de un tipo de conductor. • Diferenciar las magnitudes físicas fuerza electromotriz y diferencia de potencial. • Distinguir entre la medida de la fuerza electromotriz de la pila y las medidas de diferencia de potencial entre dos puntos del circuito. • Distinguir entre el valor de la fuerza electromotriz y la diferencia de potencial entre los electrodos de la pila. • Relacionar las diferentes formas de configurar un circuito con sus aplicaciones tecnológicas cotidianas, en relación con el “consumo de electricidad”. 	<ul style="list-style-type: none"> • Distinguir entre dos magnitudes que miden ambas energía por unidad de carga, C3, C3.2. • Los estudiantes creen que la energía puede “gastarse”, B1. • Se confunde una expresión que puede expresar el Principio de Conservación de la energía para el circuito, con una relación empírica entre dos magnitudes, que se cumple de forma muy limitada, C4. • Distinguir en un conjunto de situaciones y configuraciones distintas, las diferencias entre las magnitudes fem y d.d.p. C3.1 • Comprender que la ecuación $P = I \cdot V = I^2 \cdot R = V^2/R$, expresan la potencial asociada a la transformación de energía potencial electrostática en energía térmica de un conductor. B1 • Dificultades en la aplicación del principio de conservación de la energía. • Comprender que la fuerza electromotriz de una pila real sólo se puede medir cuando no pasa corriente por la misma. <ul style="list-style-type: none"> ➤ Comprender la necesidad de utilizar el montaje que se denomina potenciómetro para medir la fuerza electromotriz de una pila. • Escasa motivación en el proceso de aprendizaje de los conceptos de la Física implicados en el tema.

Los objetivos/dificultades en relación con el grupo de las actividades C/T/S/I, se recoge en la siguiente tabla:

Tabla 7.6 Objetivos/Dificultades para las actividades A.35 hasta A.41

RELACIÓN DE INDICADORES (Objetivos) Y DIFICULTADES APRENDIZAJE (Consecuencias contrastables) referidos a las relaciones ciencia/tecnología/sociedad/innovación	
Indicadores de aprendizaje	Dificultades
<ul style="list-style-type: none"> • Analizar el papel de la ciencia y la tecnología en el proceso de degradación de las condiciones de vida en el planeta, cambio climático, deterioro de la capa de ozono, i8. • Conocer alternativas tecnológicas que favorezcan un desarrollo sostenible. • Justificar en base a los conceptos estudiados algunas medidas de seguridad en las instalaciones domésticas y ciudadanas. • Utilizar un lenguaje y un argumentario fundados en justificaciones racionales que tengan su base en el cuerpo teórico de la ciencia. • Impulsar una educación solidaria, que contribuya a una correcta percepción de la situación del mundo e impulse comportamientos dirigidos al logro de un desarrollo culturalmente plural y físicamente sostenible. • Inculcar la necesidad de dirigir los esfuerzos de la investigación hacia el desarrollo de tecnologías favorecedoras de un desarrollo sostenible. 	<ul style="list-style-type: none"> • Algunas manifestaciones del deterioro medioambiental, agotamiento de recursos, cambio climático, destrucción de la capa de ozono, etc, en algunos lugares todavía no se ven lo suficientemente próximos. • La poderosa influencia de los medios de comunicación y otros grupos de presión a la hora de impulsar hábitos y estilos de vida basadas en el hiperconsumo de las sociedades desarrolladas. • La “aparente” ineficacia de las medidas de compromiso individuales frente a la actividad especuladora de empresas que escapan al control democrático. • Se adolece de una conciencia que reivindique los derechos de solidaridad (a un ambiente equilibrado, a la paz, al desarrollo económico y cultural).

Por último, la tabla siguiente sintetiza los objetivos y dificultades de aprendizaje en relación con la serie de actividades que abordan el estudio de la ley de Ohm. No se trata de un apartado imprescindible para el aprendizaje de los conceptos de fuerza electromotriz y diferencia de potencial, pero lo hemos incluido porque algunos profesores lo consideraban necesario y entonces diseñamos un grupo de actividades que permitiesen dejar claro los dos aspectos que nos parecen más interesantes en relación con la enseñanza/aprendizaje de dicha ley experimental: No confundir la ley de Ohm con la ecuación del circuito y sustentar conceptualmente el diseño de circuitos eficaces.

Tabla 7.7 Objetivos/Dificultades para las actividades A.42 hasta A. 50

RELACIÓN DE INDICADORES (Objetivos) Y DIFICULTADES APRENDIZAJE (Consecuencias contrastables) en relación con la ley de Ohm	
Indicadores de aprendizaje	Dificultades
<ul style="list-style-type: none"> • Saber que la ecuación $R \equiv V_{AB}/I$ define la resistencia R de un objeto conductor, i6 • Saber que la ley de Ohm afirma que R es independiente de V e I para muchos conductores, i7 • Saber que el objeto tiene que tener “extremos” bien definidos. • Comprender que I es el valor de la corriente que el objeto conduce cuando la diferencia de potencial entre sus extremos es V_{AB}, i7 • Identificar un objeto cuya resistencia es independiente de la corriente que porta como óhmico. • Comprender que el potencial del campo eléctrico disminuye en la dirección en la cual fluye la corriente convencional en el alambre, i6. 	<ul style="list-style-type: none"> • Creer que la resistencia es una función de la resistencia y la diferencia de potencial. • En relación con los modelos secuenciales o localistas, algunos estudiantes creen que el valor de la resistencia dependerá de la posición de los aparatos de medida (antes o después de la resistencia), B1, B2 • Comprender que la ley de Ohm describe una propiedad especial de ciertas sustancias y no una propiedad general de la materia. Se trata de una ley empírica y no de un teorema universal, A3, B3 • En muchos casos se refieren a una expresión para el principio de conservación de la energía como ley de Ohm generalizada, B2.

A continuación, presentamos el programa-guía de actividades diseñado para el estudio de los circuitos eléctricos de corriente continua, en el que se destaca el valor explicativo del concepto de fuerza electromotriz, entre cuyas potencialidades destacan el servir de nexo entre las nociones de la electrostática y los conceptos implicados en la descripción y explicación del funcionamiento de los circuitos eléctricos y ser imprescindible en la formulación del principio de conservación de la energía para un circuito constituido por una pila conductores y resistencias, con un funcionamiento en régimen estacionario.

7.2.2. Diseño del programa-guía de actividades

El programa de actividades ha sido diseñado para estudiantes de primer curso del actual Bachillerato. El programa está elaborado como para que pueda ser

implementado en cinco o seis semanas, es decir entre 20 y 25 sesiones de clase de una hora. El tiempo total dedicado estaría en función de la formación inicial de los estudiantes en algunas de las nociones de electricidad previstas en cursos anteriores.

Los primeros ensayos con el programa se realizaron durante los cursos 2001-2002 y 2002-2003, a partir de entonces ha venido experimentando sucesivas modificaciones. Durante los cursos 2004-2005 el material fue empleado por seis profesores, cuatro de la red pública y dos de la red concertada, lo que permitió establecer, con cierto rigor, la optimización del número de actividades y del tiempo (en sesiones de una hora aproximadamente) que podían realizarse. Ya durante este curso se pusieron de manifiesto una serie de dificultades con algunos de los profesores, que necesitaban de monitorización, a lo que nos referiremos en el capítulo de conclusiones. Durante el curso 2005-2006 sólo tres profesores pudieron desarrollar la experimentación, se trataba de profesores con la experiencia suficiente como para minimizar las dificultades de la implementación de la propuesta didáctica que se experimentaba.

El método de trabajo se desarrolló de la siguiente forma: una vez que estuvo elaborada la primera propuesta, elaborada por el investigador, dos de ellos, con amplia experiencia en la elaboración e implementación de materiales didácticos, la tuvieron para estudiarla y realizar las oportunas sugerencias y correcciones, los profesores se dedicaron a esta fase, durante los meses de septiembre y octubre del curso 2004-2005, con una dedicación de aproximadamente 50 horas. Posteriormente otros cuatro, dos de ellos de nuevo con amplia experiencia en la utilización de este tipo de materiales y durante el mismo curso, las aplicaron en clase tras lo cual el investigador se reunió con ellos por separado en dos sesiones de entre una y dos horas, en las que los materiales se sometían al correspondiente análisis, discusión y evaluación. En estas sesiones se evaluaban desde los contenidos y redacción de los textos hasta los dibujos y gráficos empleados, para hacer unos y otros más claros e inteligibles. Uno de los profesores del grupo de trabajo que participaba en la experiencia lo hacía desde otra provincia, por lo que algunas cuestiones en discusión se resolvieron mediante el intercambio de documentos y reflexiones escritas que intercambiábamos por correo electrónico. Tres fueron las cuestiones en las que la discusión resultó particularmente interesante: 1) ¿Existe diferencia teórica entre diferencia de potencial y voltaje? , 2) ¿Es la energía

potencial electrostática una propiedad de las cargas o de las cargas en el campo?, 3) Discusión en torno a la utilización del modelo mecánico para explicar el funcionamiento interno de una pila.

De esta forma durante el curso 2005-2006 tres profesores, entre los que se incluía el investigador, y dos que no habían participado en la experiencia el curso anterior, utilizaron en clase la versión elaborada durante el curso anterior que ya sufrió pocos cambios y que presentaremos posteriormente. Para este curso los profesores dispusieron de un esquema como el que se presenta a continuación en el que, a modo de diario, podían anotar las incidencias surgidas en la práctica docente:

Actividad	<i>Dificultades de comprensión del enunciado</i>	<i>Ideas previas detectadas entre el alumnado</i>	<i>Dificultades de aprendizaje detectadas</i>	<i>Tiempo de realización</i>	<i>Comentarios (propuestas de mejora)</i>
A.1					
A.2					

y de la misma manera para el resto de las actividades.

Nos parece que es necesario aclarar que con la toma en consideración del tiempo de realización de cada actividad no se persigue otra cosa que servir de referencia para el resto de los aspectos analizados. Cabe esperar, que ante un tiempo de realización demasiado prolongado (respecto al que aproximadamente puede estimar un profesor experto) para una actividad concreta, o bien hay dificultades por parte de los estudiantes en su comprensión o bien la actividad no es adecuada para el objetivo que se pretende con la misma. En cualquier caso sería necesaria una revisión en profundidad bien de la actividad, bien del bloque en el que se inserta la misma para rehacerlo y salir al paso de las posibles deficiencias. No se perseguían, mediante el análisis del tiempo necesario para la resolución de una actividad, soluciones uniformes para los profesores y estudiantes que utilizaran la unidad didáctica que se pretendía diseñar. Una propuesta didáctica de este tipo puede ser modificada (y debería serlo) en función de las necesidades/dificultades del grupo de estudiantes, mediante el añadido o supresión de alguna de las actividades que contribuyen a hilvanar el hilo conductor de la unidad didáctica para el estudio de los circuitos.

El siguiente es el índice establecido para el diseño del tema, en forma de situaciones problemáticas, tal y como se ha comentado en las páginas 269-270 de este capítulo.

INDICE

	<u>Página</u>
• 1. ¿Tiene interés el estudio de los circuitos eléctricos?	283
• 2. ¿Por qué se desplazan las cargas eléctricas?.....	288
• 3. ¿Cómo se puede mantener un flujo continuo de cargas?.....	290
• 4. ¿Cómo mantiene una pila la diferencia de potencial entre sus bornes? Análisis del interior de la pila en un circuito.....	294
• 5. ¿Cómo circulan las cargas eléctricas a lo largo de todo el circuito? Análisis de lo que sucede en todo el circuito.....	299
• 6. ¿Cómo se cuantifica la energía que se transfiere o transforma en las distintas partes del circuito?.....	305
• 7. Implicaciones tecnológicas y sociales del tema.....	312
• Apéndice: ¿Cómo conectar los elementos para lograr circuitos eficaces?.....	319

Las actividades que se presentan a continuación van seguidas de unos comentarios en los que se exponen a los profesores una guía didáctica pormenorizada de los objetivos, dificultades, concepciones alternativas, etc. que se acometen con cada una de ellas. En algunos casos los comentarios pueden ser más o menos extensos, pero nunca son exhaustivos, pues en función del grupo de estudiantes el profesor podrá o tendrá que adaptar el grado de discusión y sus propias explicaciones para alcanzar las conclusiones principales en cada caso. Este tipo de materiales expresamente no pretende ser una “nueva especie” de libro de texto sino un documento más abierto que, en todo caso, despierte en profesores y estudiantes la curiosidad, la necesidad de contrastar, comprobar, completar la información que se les presenta o se les demanda.

INTRODUCCIÓN

En relación con las dificultades de los estudiantes de 16-18 años, a la hora de interpretar el funcionamiento de circuitos sencillos Eylon y Ganiel (1990) destacaban:

- Después de la enseñanza los estudiantes no conectan las relaciones cuantitativas de los conceptos implicados, las relaciones funcionales entre ellos y del mismo modo las relaciones macroscópicas y microscópicas. Como consecuencia no adquieren una adecuada comprensión del tema lo que les impide explicar los fenómenos que tienen lugar.
- En el proceso de enseñanza se pone más énfasis en la manipulación de relaciones algebraicas, calculando valores para unas magnitudes y otras, dedicando poco tiempo al análisis de las relaciones cualitativas entre las mismas. Como resultado los estudiantes no terminan de concebir el circuito como un sistema en el que todos los elementos interaccionan entre sí.
- Los estudiantes no relacionan la diferencia de potencial electrostático, ni otras magnitudes de la electrostática (por ejemplo los de campo y fuerza), con la descripción e interpretación de los procesos que tienen lugar en los circuitos. Lo que da lugar a una confusión conceptual en la que, la equivalencia entre fuerza electromotriz y diferencia de potencial es sólo una muestra.
- La mayor parte de los estudiantes de estas edades no tienen una visión coherente y consistente de los mecanismos que tienen lugar a nivel microscópico lo que da lugar a errores e ideas alternativas a la hora de interpretar el circuito como un todo y discernir las relaciones entre las partes.

Hemos elaborado una unidad didáctica en la que expresamente se han querido evitar las dificultades anteriores, si bien será necesario que el avance posterior en el estudio del Electromagnetismo se repase, insista y profundice en estos aspectos hasta conseguir que se produzca un aprendizaje significativo.

La unidad está concebida para que, al menos su núcleo duro, se estudie en un periodo de alrededor de cuatro semanas.

Los comentarios para el alumnado van en letra cursiva, de esta forma se podrán distinguir sin dificultad de la información y comentarios que se incluyen en el material del profesorado.

Es difícil, en las condiciones de las aulas, aplicar de forma ortodoxa un programa-guía de actividades de aprendizaje. Pero es imprescindible que los estudiantes tengan tiempo para leer y comprender lo que se pretende con cada actividad, en este sentido el papel del profesor/a es definitivo. También es necesario que las conclusiones se elaboren partiendo de las aportaciones, por fragmentarias que pudiesen ser, de los alumnos y alumnas, esto les animará a intervenciones futuras, sin las que el aprendizaje no se producirá. También en esto la intervención del profesorado es capital; profesorado que no debe caer en un mero “dictar la solución” de cada actividad. Las conclusiones a las que se llega en una investigación entre un equipo de investigadores tampoco responden a una aportación idéntica de cada uno de ellos.

Dadas las circunstancias conviene recordar que aprender es muy difícil y necesita tiempo.

1 ¿TIENE INTERÉS EL ESTUDIO DE LOS CIRCUITOS ELÉCTRICOS?

Lectura: Circuitos microscópicos

Tocar un timbre cuando llegamos a una casa, encender el alumbrado de una barriada o gran ciudad, “arrancar” un coche, la señal acústica de una alarma, el establecimiento de una llamada con un teléfono móvil, la puesta en marcha de cualquier electrodoméstico mediante un mando a distancia, los robots que en Japón realizan ya funciones de vigilancia en grandes almacenes o regulan el tráfico en las ciudades, todo esto y mucho más no son más que algunos efectos conocidos de la entrada en funcionamiento de lo que se viene en llamar circuitos eléctricos.

En el año 1959 el premio Nóbel de física R. Feynman había ofrecido una recompensa equivalente al precio de un apartamento, a la persona capaz de construir un motor cuyo tamaño no fuera mayor de medio milímetro cúbico. Al año siguiente el ingeniero William McLellan le presentó un motor cuyo funcionamiento tuvo que observar Feynman mediante un microscopio. Tras comprobar su funcionamiento extendió el cheque. La era de la microtecnología había empezado.

En la actualidad, pequeños circuitos casi invisibles forman parte de ordenadores personales, calculadoras, vehículos, etc. Uno de estos microcircuitos, no más grande que una de las letras de esta página, situado en la columna de la dirección del coche, comprueba continuamente si el vehículo pierde velocidad rápidamente cuando tiene lugar un choque. Si esto sucede el microcircuito activa el llenado de una bolsa de aire que protege al conductor y a los pasajeros.

En un hospital, microcircuitos alojados en el monitor conectado a un paciente controlan su respiración, la presión sanguínea, latidos del corazón y otras funciones vitales. Microsensores permiten la vigilancia y cuidado de niños prematuros sin provocar en ellos innecesarios sobresaltos.

Circuitos que forman parte de los microsensores que se instalan bajo la piel de algunos animales o de algunas aves permiten aprender sobre sus ciclos vitales y los movimientos que realizan en sus migraciones. Lo que contribuye a mejorar las condiciones de supervivencia de estos animales.

Circuitos eléctricos permiten facilitar a los usuarios de autopistas y autovías información puntual de problemas de tráfico en determinados puntos del trazado. Y las prótesis que palián los efectos de algunos accidentes funcionan gracias a los circuitos eléctricos instalados en las mismas.

La sustancia química que se conoce como **silicio** es una de las materias primas con la que se fabrican estos ingenios de la técnica. Tratada químicamente o irradiada con haces de partículas cargadas, de forma que se alteran convenientemente algunas de sus propiedades le permiten formar parte de casi todos los “microcircuitos” a los que nos hemos venido refiriendo.

Comentarios lectura: Creemos que comenzar haciendo una reflexión con los estudiantes que ilustre acerca del alcance de lo que se ha dado en llamar “Circuitos eléctricos”, es la mejor manera de contribuir a la respuesta de la pregunta que se plantea, que debería llevar a comprender la conveniencia de su estudio.

Por otra parte se ha introducido una información con la idea de que ahora o en otro momento los estudiantes pudieran preguntar por el hecho de que el establecimiento de una llamada a través de un móvil o el funcionamiento de un mando a distancia se hagan mediante un circuito. La respuesta sólo puede comprenderse si se hace intervenir la noción de campo eléctrico que han estudiado previsiblemente antes de comenzar el estudio de los circuitos.

A.1.- Imagina que las pilas de todo tipo y tamaño desaparecieran súbitamente.

- a) Enumera todo aquello que dejaría de prestar servicios o funcionar.
- b) Haz una estimación de la cantidad, en kilogramos, de pilas que se consumen en tu ciudad en un año.
- c) Los materiales de los que están fabricadas las pilas son altamente contaminantes, sobre todo para las aguas, **(hay estudios que demuestran que una sola pila puede contaminar hasta 150.000 litros de agua)**. A partir de los resultados obtenidos en el apartado anterior ¿crees que es importante organizar la recogida de los residuos que se producen como consecuencia del uso de las pilas?
- d) Haz una estimación de la energía que puede transformarse mediante las pilas en tu ciudad.

***Comentarios A.1:** a) Hasta hace un par de décadas las aplicaciones de las pilas iban sólo poco más allá de las linternas, radio transistores y casetes. En la actualidad la desaparición súbita de las pilas produciría un colapso y no sólo en las comunicaciones (telefonía móvil), prótesis para sordos, marcapasos, cronómetros, computadores, búsqueda y rescate, multitud de pequeños electrodomésticos, usos militares entre los que cabe destacar la alimentación de equipos informáticos y de comunicaciones, sistemas de armamento, etc, etc. dejarían de funcionar con consecuencias dramáticas en muchos casos.*

b) Este apartado b no es un ejercicio de mera aplicación de lo estudiado, es un verdadero problema, y debe ser abordado proponiendo algunas conjeturas.

Se puede partir de la suposición de que el consumo de pilas sea aproximadamente el mismo en cada casa y por tanto comenzar estimando la cantidad de pilas que se gastan en una casa al año. Varios grupos pueden hacer una estimación más fina encuestando a los vecinos de su bloque a los que repartían unos papeles en los que los vecinos sólo tenían que señalar con unas cruces en casilleros acerca del tamaño y usos de las pilas utilizadas en cada hogar.

Para el cálculo final, el profesorado puede tener el peso de pilas de distintos tamaño y de esta forma cuantificar los valores en cada casa. Las cantidades estimadas a la baja en una pequeña ciudad como Nerja de alrededor de 15.000 habitantes, sorprendían al alumnado. Alrededor de 4.000 kg en residuos sólidos procedentes de pilas y baterías de automóviles eran cantidades muy superiores a las que ninguno de ellos esperaba. En el año 2001 se recogieron en Madrid 273 toneladas de pilas. En el año 2003 se renovaron en nuestro país 10 millones de teléfonos móviles y en el 2005 se vendieron 20 millones; de esta forma sin más que medir la masa de la batería de uno de ellos se puede tener un dato bastante aproximado.

c) La lección es definitiva cuando los alumnos realizan un cálculo como el anterior, que les permite tomar conciencia de la deficiente solución que se da a este problema en la mayoría de los municipios.

d) De nuevo los alumnos se enfrentan con un problema, para cuya resolución se habrían de diseñar algunas experiencias sencillas, la búsqueda de una serie de datos técnicos y la emisión de algunas hipótesis de trabajo. Puede que el problema no tenga solución, salvo que se hagan una serie de simplificaciones que sólo nos puedan llevar a la realización de estimaciones groseras.

Sería en este caso demasiada simplificación homogeneizar el tiempo de funcionamiento de las pilas, ya que la duración de una pila dependerá de su tamaño, de la cantidad de energía que se transforme en la unidad de tiempo para el correcto funcionamiento del artilugio en cuestión, etc.

A.2.- Busca en internet información relacionada con los problemas medioambientales generados como consecuencia del empleo generalizado de las pilas.

***Comentarios A.2:** En estas actividades el profesorado cuidará la presentación formal, no sólo el contenido de los informes. Ordenados, limpios, con cuadros y diagramas de flujo, con un lenguaje en el que se utilicen debidamente los conceptos utilizados. El profesorado puede preparar sus informes también y pedirles a los alumnos que corrijan sus trabajos comparando con el del profesor/a en cuestión.*

A.3.- Antes de estudiar los circuitos eléctricos (cargas que se mueven), recordemos los conceptos que hemos estudiado para cargas en reposo. Elabora en tu cuaderno una tabla en la que se recoja el significado de todos los conceptos y relaciones entre ellos.

Conceptos e ideas	Definición/explicación
1. Fuerza eléctrica	1.
2. Campo Eléctrico	2.
3. Potencial Eléctrico	3.
4. Diferencia de Potencial	4
5. Relación entre campo eléctrico y diferencia de potencial	5.
6. Relación entre valores del potencial en dos puntos y el desplazamiento de las cargas libres entre los mismos.	6.

***ComentariosA.3:** En electrostática los alumnos habrán estudiado además de la ley de Coulomb los conceptos de potencial y diferencia de potencial. Estos conceptos son necesarios para responder las cuestiones planteadas en las actividades siguientes, si bien de forma cualitativa y creemos que simple. Esto puede resultar laborioso, pero es preciso recordar que una de las dificultades que se han señalado en distintas investigaciones a lo largo de los últimos años (Benseghir y Closset 1996; Psillos, 1998; Montero 2002) es la necesaria relación entre la electrostática y la electrocinética a la hora de interpretar el funcionamiento de los circuitos sencillos.*

El profesor recordará a los estudiantes que cuando los cuerpos se electrizan se ponen de manifiesto atracciones y repulsiones, que los cuerpos se electrizan porque alguien o algo realiza un trabajo, es decir, tiene lugar una transferencia de energía entre dos cuerpos. Explicar las atracciones o repulsiones implica el recurso a la idea de carga eléctrica. Explicar

y cuantificar cómo tiene lugar la interacción aún cuando los cuerpos no estén en contacto y el valor del trabajo o la energía puesta en juego implica definir una serie de conceptos en los que se ven implicados los conceptos de carga y el de campo. Las nociones que se van a emplear son:

Las **fuerzas culombianas** de atracción y repulsión entre cuerpos cargados guardan semejanzas con las fuerzas gravitatorias, inversas al cuadrado de la distancia entre los cuerpos que interactúan: 1) son directamente proporcionales a la magnitud responsable de la interacción; 2) el trabajo realizado por ellas es conservativo; 3) se puede definir en los campos gravitatorios y eléctricos la magnitud que denominamos potencial y de aquí la diferencia de potencial, etc.

El **potencial**: Es una magnitud que permite cuantificar la energía potencial eléctrica que tiene la unidad de carga en un punto de un campo eléctrico electrostático. $V = E/Q$. La unidad es el voltio. 1 Voltio = 1 Julio /1 Culombio

La **diferencia de potencial eléctrico** entre dos puntos A y B sería la diferencia entre la energía potencial eléctrica que tendría la unidad de carga entre los puntos A y B del campo eléctrico electrostático. $V_A - V_B = (E_A - E_B)/Q$. Evidentemente se mide en Voltios.

La **relación** entre el **campo eléctrico** y la **diferencia de potencial** entre dos puntos del campo eléctrico uniforme que se encuentra a una distancia d: $V_A - V_B = E \cdot d$.

La **relación** entre los **valores del potencial** en dos puntos y el **desplazamiento** de las cargas entre los mismos: En el seno de un campo eléctrico las cargas se mueven entre dos puntos que están a diferente potencial. Este movimiento tiene lugar siempre de forma que las cargas (en su caso la unidad de carga) disminuyen su energía potencial eléctrica.

Los estudiantes tienen dificultades para distinguir entre la **diferencia de potencial y la energía potencial** (ya sean interacciones gravitatorias o eléctricas). Esta dificultad se evita en parte si se distinguen claramente entre las propiedades del campo y las de las cargas en el campo. El campo tiene una propiedad que se denomina potencial, las cargas en el seno del campo no tienen esta propiedad. Las cargas tienen energía potencial, pero no tienen potencial y por tanto no pueden tener diferencia de potencial.

Conviene tener en cuenta no obstante que, una carga (ni un cuerpo macroscópico) aislada no tiene energía potencial. Un cuerpo aislado no tiene energía potencial; un cuerpo tiene energía potencial gravitatoria con respecto a la Tierra. Una carga tiene energía potencial eléctrica con respecto a otra carga o en el seno del campo eléctrico creado por una carga. La energía potencial es una propiedad del sistema de cuerpos o en su caso cargas. Es en este marco que hablamos de la energía potencial de un cuerpo o una carga situada en un punto. Las interacciones tienen lugar en el campo

También hay que tener presente que matemáticamente lo que está definida es la diferencia de potencial, no el potencial. Cuando se habla del potencial de una esfera o de un cuerpo en general siempre suponemos un origen de potenciales (de valor nulo), normalmente o el infinito o la Tierra. El potencial de una esfera es la energía que tendría la unidad de carga situada sobre la **superficie** de la esfera con respecto al valor que tendría en el infinito o con respecto a la tierra. Conviene recordar y tener esto presente cuando se hable del potencial de una esfera o de un cuerpo.

Del mismo modo recordar que el potencial de una esfera tiene el valor: $V = k Q/R$. Es decir, en una esfera se cumple que cuanto menor sea su carga y mayor su volumen, menor será su potencial. Esto es lógico, en una esfera grande, voluminosa, si están situadas pocas cargas, tendrán menor energía potencial eléctrica que en una esfera menor. Cuantas más cargas queramos situar sobre la superficie de un volumen pequeño mayor será el trabajo que se tendrá que realizar para lograrlo.

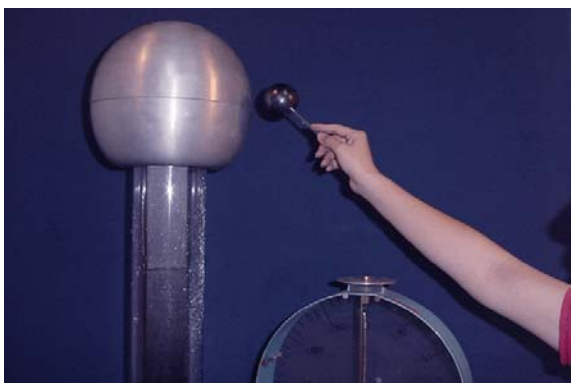
Que los estudiantes entiendan todo esto y lo relacionen correctamente es muy difícil. **No se trata** de que hasta que no comprendan en toda su dimensión la Electrostática no se estudie en toda su dimensión los circuitos de corriente continua estacionaria. **Se trata** de que aplicando los conceptos que se estudian en la Electrostática en el estudio de los circuitos tales conceptos se vayan aprendiendo. ¿Qué sentido tiene estudiar el concepto de diferencia de potencial en este nivel si no es para usarlo en la explicación de por qué mueven las cargas entre dos puntos de un circuito?

A.4.- a) Explica qué sucede al frotar una barra de vidrio con un paño de seda.

b) ¿Se crean las cargas en el proceso de fricción? ¿Es necesario aportar energía para conseguir que se electrice la barra de vidrio y el paño de seda?



c) En la fotografía adjunta las dos esferas están cargadas con el mismo signo. A medida que el brazo acerca la esfera pequeña ¿qué interacciones (tipos de fuerzas) están presentes?



d) ¿La variación de la energía potencial electrostática del sistema esfera grande-esfera pequeña depende de la trayectoria que se haya seguido al acercar ambas? ¿La disminución de energía de la persona dependerá del camino seguido por la esfera pequeña?

Comentarios A.4: a) Inicialmente el cuerpo está descargado y ejercemos sobre él una fuerza de rozamiento. Como consecuencia de esta interacción se ponen de manifiesto cargas de distinto signo sobre la seda y el vidrio. Un cuerpo se carga positiva y el otro negativamente.

b) Es importante que quede claro que las cargas no se **crean** en el proceso de fricción. Al frotar la barra de material aislante lo que hacemos es alterar el equilibrio de las cargas y por tanto dar lugar a que éstas se manifiesten. Volveremos sobre esto en sucesivas actividades.

c) Entre el brazo y la esfera que sustenta tiene lugar una interacción (se ejercen fuerzas). A partir de una distancia aparece una fuerza de repulsión electrostática entre las dos esferas, ésta es otra interacción diferente a la anterior. La naturaleza de ambas fuerzas es diferente. La fuerza electrostática es una fuerza conservativa, la interacción entre el brazo y la esfera no es de naturaleza electrostática. En lo sucesivo vamos llamar a las fuerzas que se establecen entre los cuerpos una vez cargados y en reposo, **fuerzas culombianas**. Entendemos por fuerzas culombianas aquellas que pueden cuantificarse mediante la ley de Coulomb, por no culombianas entendemos otro tipo de interacciones en las que intervienen las cargas eléctricas.

En el caso de las dos esferas que estamos considerando suponemos que la interacción se puede medir sólo mediante la ley de Coulomb, lo que no deja de ser una simplificación notable. Pero entrar en otras consideraciones haría imposible resolver el problema a este nivel.

Las fuerzas no culombianas que terminan por dar lugar a una corriente en un conductor pueden tener un origen diverso, en un pila seca o en una batería de acumuladores tienen su origen en las reacciones químicas, se trata de interacciones electromagnéticas, pero la relación que permite cuantificarlas no es la ley de Coulomb; en el inducido de un generador electromagnético proceden del movimiento de un conductor en un campo magnético, tampoco en este caso es aplicable la ley de Coulomb.

d) Preguntamos por algo que los estudiantes supuestamente han aprendido, pero será el profesor/a el que, previsiblemente, tendrá que recordar. El trabajo que realizan las fuerzas de rozamiento o, como en este caso, las fuerzas musculares, se puso como ejemplo de un tipo de interacciones en las que, el trabajo realizado, es decir, el intercambio de energía puesto en juego entre dos puntos en un trayecto de ida y vuelta es distinto de cero. En estos casos, algunos autores dicen que el trabajo no es conservativo, ya que no se cumple que todo el trabajo se invierta en variar la energía cinética del cuerpo (si el movimiento se realiza en una sola dimensión). Puede que en clase simplemente se haya dicho que cuando hay rozamiento o las fuerzas las realizan los músculos no todo el trabajo se invierte en variar la energía potencial o cinética del cuerpo. A fin de cuentas el hecho es que las fuerzas de rozamiento dan lugar a unas peculiaridades a tener en cuenta cuando se producen determinados intercambios de energía.

En resumen, las fuerzas culombianas son fuerzas conservativas, el trabajo realizado por las mismas es conservativo, es decir, el valor del mismo no depende de la trayectoria entre las posiciones inicial y final. Las fuerzas que la persona realiza con el brazo no son culombianas y no son conservativas; el trabajo realizado por las mismas no será conservativo ya que el valor del mismo dependerá de cómo se mueva el brazo (la trayectoria) al acercar la esfera.

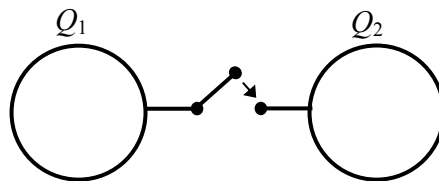
2 ¿POR QUÉ SE DESPLAZAN LAS CARGAS ELÉCTRICAS?

En esta lección nos vamos a ocupar de las cargas en movimiento a través de un cable conductor. La situación será más complicada ya que tenemos que analizar las cargas cuando **no** están en reposo sino cuando se mueven. Así pues, tendremos que aplicar los conceptos que acabamos de recordar (fuerzas culombianas, fuerzas no culombianas, diferencia de potencial...etc.) a una situación nueva de cargas moviéndose por un cable. Vayamos a ello, proponiendo una situación sencilla y luego ya analizaremos un circuito entero.

A.5.- La figura siguiente representa dos esferas metálicas del mismo radio. Se electrizan con cargas Q_1 y Q_2 , de forma que $Q_1 > Q_2$.

a) Señala, cómo se moverán las cargas, después de establecer la unión entre ellas.

b) ¿Pueden los puntos de la superficie de dos esferas con cargas diferentes, tener el mismo potencial? Explica la respuesta.



Comentarios A.5: Los estudiantes tienen dificultades con el aprendizaje del concepto de potencial, estas dificultades alcanzan de manera especial cuando el concepto debe aplicarse en un contexto de circuitos eléctricos sencillos (Furió y Guisasola 1998, Montero 2002). Esta y las siguientes actividades tienen por objetivo salir al paso de estas dificultades.

En general las cargas (los electrones) circularan hasta que los potenciales de las esferas sean iguales. En este momento se cumplirá que:

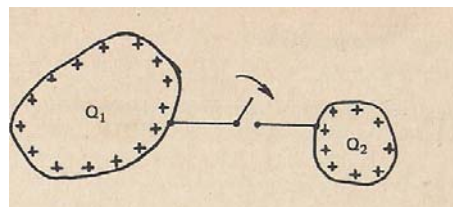
$$k \frac{Q_1}{R_1} = k \frac{Q_2}{R_2} \therefore \frac{Q_1}{R_1} = \frac{Q_2}{R_2}$$

En esta primera actividad las esferas son iguales, por lo que el potencial dependerá sólo de la carga en cada una de las esferas.

b) Evidentemente si, si los radios de las esferas (el volumen) son diferentes.

La conclusión importante es que los estudiantes se den cuenta de que como consecuencia de la diferencia de potencial las cargas se desplazan hacia donde la energía potencial eléctrica de las cargas es menor. Por esta razón también se distribuyen sobre la superficie de las esferas, ya que en esta configuración la repulsión es menor.

A.6.- El dibujo representa dos secciones de dos conductores diferentes que pueden conectarse mediante un cable que dispone de un interruptor. Las cargas de los dos conductores son diferentes.



a) ¿Qué sucederá si conectamos los dos conductores?

b) Cuando cese el paso de cargas, ¿qué relación guardan los valores de los potenciales eléctricos de los cuerpos 1 y 2? ¿Sería correcto decir que las cargas de uno y otro cuerpo cambian su potencial eléctrico? Explica por qué.

Comentarios A.6: a) En este caso, los dos conductores cuyas secciones se dibujan, por ser de diferente forma y tener carga diferente, estarán a potenciales diferentes. Como consecuencia, al conectarlos entre sí las cargas pasarán de uno a otro. Pero no podemos saber de cuál a cuál, ya que no es posible decidir que cuerpo tendrá un potencial mayor, al tener diferente carga y diferente tamaño.

Según el modelo de la materia aceptado actualmente, en realidad los que se desplazan son los electrones, pero en los libros, de cualquier nivel, se refieren indistintamente al movimiento de las cargas tanto positivas como negativas, por lo que hemos mantenido el formalismo. De todas formas no es difícil que los estudiantes se den cuenta de que es lo mismo suponer que se desplazan en un sentido cargas negativas que en el contrario las positivas. **Sólo que** los potenciales hacia los que se desplazan las cargas positivas son decrecientes y las negativas hacia los crecientes.

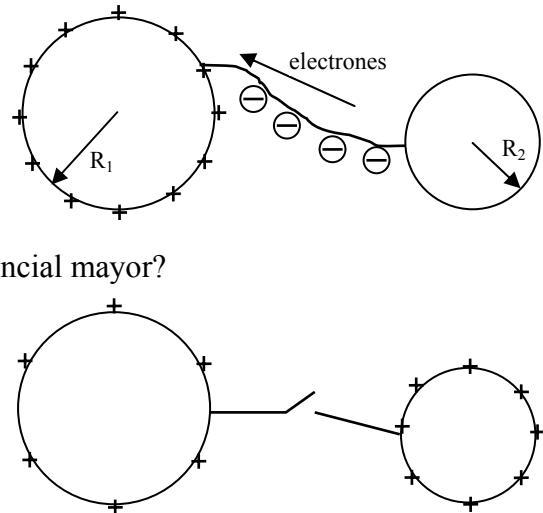
b) El tránsito de cargas cesa cuando los potenciales de los cuerpos puestos en contacto se hacen iguales. Se ha advertido del error generalizado que consiste en confundir propiedades del campo y de las cargas. Como se ha dicho las cargas no tienen potencial sino energía potencial electrostática; al desplazarse los electrones lo hacen de forma que su energía potencial sea lo menor posible. No olvidar que el potencial de los cuerpos 1 y 2 está referido al nivel cero de la tierra o del infinito.

A.7.- Observa el dibujo adjunto en el que se representa una esfera con una carga Q positiva que se conecta a otra esfera que inicialmente está descargada.

a) ¿Por qué pasan electrones desde la esfera descargada a la esfera con carga Q ?

b) En el dibujo siguiente, cuando el interruptor esté abierto ¿Qué esfera tendrá un potencial mayor?

¿Qué ocurrirá si se cierra el interruptor, de forma que se pongan en contacto ambas esferas mediante el cable conductor?



3 Comentarios A.7: a) La

actividad vuelve a incidir en las ideas anteriores. Los electrones pasarán desde la descargada hasta que los potenciales de los puntos de superficie de las esferas tengan el mismo valor. Los potenciales también se igualarían si las cargas positivas de la esfera cargada se moviesen hacia la descargada como se ha visto anteriormente. En definitiva si de la esfera descargada pasan electrones a la esfera cargada, esta esfera 2 quedará con carga positiva. Si de la esfera cargada 1 las cargas positivas hubiesen pasado a la esfera dos, esta quedará cargada positivamente. Hay que hacer ver a los estudiantes que el resultado es el mismo en ambos casos, es decir, se igualarán los potenciales y la esfera 2 quedará con carga positiva.

En el estudio de los circuitos se habla en los libros de la corriente convencional y de la corriente de electrones diciendo que las consideraciones que cabe hacer son las mismas. Como acabamos de ver es lo mismo que de la esfera 2 salgan electrones que lleguen cargas positivas, en ambos casos quedará cargada positivamente.

b) Cualitativamente se ve que el potencial de la esfera 1 es menor que el de la esfera 2, su radio es mayor y su carga menor.

De una forma más cuantitativa podíamos haber escrito lo siguiente:

$$V_1 = k \frac{Q_1}{R_1} \text{ y } V_2 = k \frac{Q_2}{R_2}; \text{ si } Q_1 < Q_2 \text{ y } R_1 > R_2 \Rightarrow V_1 < V_2$$

3 ¿CÓMO SE PUEDE MANTENER UN FLUJO CONTINUO DE CARGAS?

Cuando se conectan dos cuerpos cargados mediante un conductor se establece una corriente eléctrica de uno a otro debido a la diferencia de potencial. Si la diferencia de potencial entre los conductores es cero, no hay movimiento de cargas. Cuando dos conductores a diferente potencial se ponen en contacto en unos pocos nanosegundos el potencial en la superficie de cada uno se iguala y cesa el paso de corriente.

El problema es cómo mantener los dos cuerpos a diferente potencial y conseguir así que se mantenga el flujo de cargas.

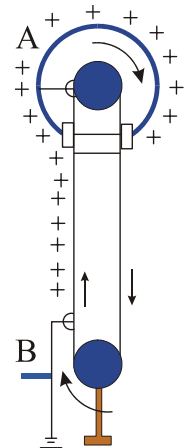
A.8.- ¿Cómo se pueden tener las superficies de dos cuerpos a diferente potencial? Describe mecanismos para conseguirlo y las transformaciones energéticas que se producen.

3.1 Comentarios A.8: Los libros y el profesorado hablan de puntos a diferente potencial, acabamos de referirnos a esferas que están a distintos potenciales, pero no se suele abordar la forma en la que se consigue tener cuerpos a diferentes potenciales (por ejemplo los dos electrodos de una pila). Los estudiantes se ven ante una dificultad cuando deben responder a esta cuestión, es por eso que se introduce esta actividad. La respuesta para el caso de dos sistemas materiales no es evidente para los estudiantes, pero es importante que queden claros algunos mecanismos mediante los cuales es posible tener en la práctica dos puntos a diferente potencial. Por ejemplo, cargando cuerpos mediante la fricción, es decir, la aplicación de unas fuerzas de rozamiento sobre los cuerpos que se electrizan. Tiene lugar la realización de un trabajo y por tanto la transferencia de una cantidad de energía que se almacenará en el cuerpo electrizado en forma de energía potencial eléctrica.

Si se trata de una persona que actúa con un paño de seda sobre una barra o lámina de acetato podemos decir que la persona realiza un trabajo sobre el material plástico, la persona se cansa (gasta una cierta cantidad de su energía interna). El material de acetato gana energía, lo que se manifiesta porque experimentará atracciones o repulsiones con otros materiales cargados o susceptibles de hacerlo por inducción.

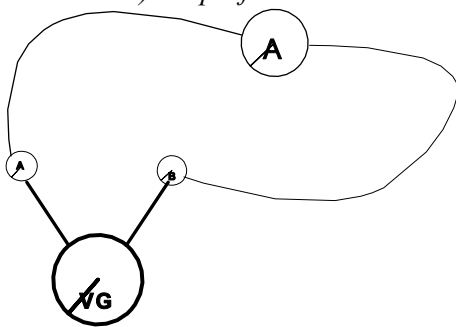
A.9. En el generador de Van der Graaff la fricción de una cinta de material aislante en movimiento, con una escobilla B situada en la parte inferior, hace que la escobilla B quede cargada positivamente y la cinta negativamente. Las cargas negativas son transportadas por la propia cinta y liberadas, mediante una segunda escobilla, sobre una esfera metálica hueca situada en la parte superior.

- Se comprobará que la esfera A del generador está cargada
- Se conectará la esfera A y la parte B con un cable conductor y un amperímetro. Observa y anota en tu cuaderno lo que pasa.
- Dibuja un esquema en el que representes el circuito constituido por el generador, los cables y amperímetro.



Comentarios A.9: La explicación que se ofrece es muy elemental por lo que no se hace mención al efecto corona ni otros mecanismos más complejos para explicar el proceso de carga de la esfera.

- El profesor desarrollará una serie de experiencias mediante las cuales se pone de manifiesto que la esfera está cargada, acercando materiales que serán atraídos o repelidos, etc.



- La corriente que se establezca no es constante por lo que el amperímetro enseguida indicará valor nulo para la intensidad, esto conviene que el profesorado no de lugar a que pase desapercibido.

c) El esquema que buscamos dibujen los estudiantes es similar al siguiente, que nos permitirá iniciar las transferencias analógicas desde el generador de Van der Graaf hasta la pila.

A.10.- En relación con el funcionamiento del generador de Van der Graaf y las observaciones realizadas responde a las siguientes preguntas:

a) ¿Cómo se carga la esfera A? Contesta a la pregunta explicando las siguientes cuestiones: ¿Cómo se separan las cargas?, ¿Quién realiza el trabajo de separarlas?, ¿Qué tipo de fuerzas van separando las cargas eléctricas? ¿Cómo se transportan las cargas hasta la esfera A?

b) ¿Se cargaría la esfera A indefinidamente o llegaría un momento en que ya no admitiría más carga? ¿Qué tipo de fuerzas actúan sobre las cargas que van llegando a la esfera A, a medida que esta se va cargando? ¿Adquiere energía la esfera a medida que se carga? ¿Qué tipo de energía: calorífica, eléctrica, mecánica ..?

c) Al unir mediante un hilo conductor las partes A y B del Generador de Van der Graaf ¿Por qué hay una corriente eléctrica en el cable?

d) ¿Quién o qué proporciona la energía necesaria para que funcione el generador de Van der Graaf?

Comentarios A.10: *Es importante que los estudiantes vean, en primer lugar, el funcionamiento del generador y, en segundo lugar, el profesor/a les estimule a explicar lo que sucede respondiendo a las preguntas que se proponen. Los estudiantes ya poseen los conocimientos necesarios para la explicación y, de acuerdo con nuestra experiencia, con la aportación de todos los grupos se establece la explicación esencialmente correcta.*

a) *El proceso de fricción altera la igualdad de cargas positivas y negativas entre los cuerpos que frotamos. Las fuerzas responsables de separar las cargas son fuerzas de rozamiento, que hemos venido llamando no culombianas. Estas fuerzas realizan el trabajo de separar las cargas, este trabajo es no conservativo. La cinta de material no conductor transporta las cargas hasta la escobilla superior, de material conductor, y de esta las cargas pasan a la esfera.*

b) *La esfera no se carga indefinidamente, la carga máxima de una esfera de radio conocido incluso puede calcularse. Si la cinta se moviese mediante una manivela, podría observarse que cada vez sería más difícil mover dicha manivela, esto se debe a que a medida que van llegando cargas a la esfera éstas son repelidas por las cargas presentes. Estas fuerzas de repulsión son culombianas, su naturaleza es diferente a las fuerzas de rozamiento y de transporte de las cargas hasta la esfera. Conforme la esfera se va cargando se va acumulando energía eléctrica sobre ella. Si el profesor se ha referido a ello puede señalar que la energía potencial eléctrica de las cargas también se hace mayor.*

c) *Por tratarse de dos puntos a diferente potencial al unirlos mediante un conductor se establecerá una corriente por el mismo. La corriente será transitoria, es decir, el valor de la intensidad se irá haciendo menor. Las cargas pasan hasta que se igualan los potenciales de la esfera superior A y la parte señalada B. En este momento el flujo de cargas cesa. Se trata pues de mantener constante la d.d.p. mientras se produce el paso de cargas. Las cargas se desplazan desde dónde tienen mayor energía potencial eléctrica a donde tienen menos, la diferencia de energía potencial eléctrica de un punto a otro, se transforma en energía interna del cable conductor, que se calienta. Cuando cesa el flujo de cargas los potenciales de los dos puntos entre los que estas se desplazaban se han igualado.*

Si quisiéramos que el flujo de carga fuese continuo, tendríamos que idear un mecanismo mediante el cual adecuásemos el “ritmo” de transformación de la energía por el fluir de las cargas en el conductor, al ritmo mediante el cual se aporta la energía que se transforma en dicho proceso. En la práctica esto sería muy difícil conseguirlo.

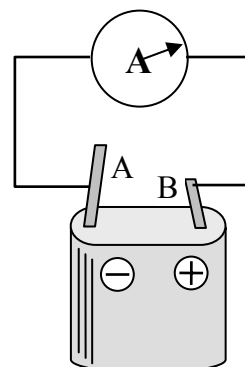
d) Toda la energía puesta en juego en los procesos que tienen lugar en el generador la proporcionan el motor acoplado al mismo o en su caso una persona que mueve la cinta del generador.

A.11.- Compara el circuito de la figura con el circuito que has dibujado en el apartado c de la actividad 9.

a) Señala los elementos de ambos circuitos que te parezca que tienen una función análoga, describiendo cuál la función.

b) ¿Qué función tiene entonces la pila en el circuito?

c) ¿Se crean cargas en la pila?



Comentarios A.11: a) Previsiblemente los estudiantes no tendrán problema para señalar como elementos análogos los amperímetros para medir la corriente; los conductores para facilitar el tránsito de las cargas desde A hasta B; y buscamos que señalen la pila y el generador como artilugios que crean una diferencia de potencial entre los puntos A y B, entre los cuales se establece el flujo de cargas.

b) La función de la pila es crear una diferencia de potencial entre dos puntos del mismo, de forma que pase la corriente por el circuito. Toda la energía necesaria para ello la proporciona la pila.

c) En la pila tampoco se crean cargas, éstas se ponen de manifiesto en el curso de las reacciones que tienen lugar en su interior.

A.12.- Coge una pila de petaca gastada y otra nueva y ábrelas. ¿Qué diferencias observas? ¿A qué crees que se deben?

Comentarios A.12: Queremos que los estudiantes vayan interiorizando la idea de que en una pila se producen una serie de reacciones químicas que son las que proporcionan la energía que se necesita para separar las cargas. Como consecuencia de las interacciones que tienen lugar (también fuerzas **no coulombianas** que actúan sobre las cargas separándolas) se tiene una diferencia de potencial entre sus electrodos.

Pero que tiene lugar una reacción química no es nada evidente para los estudiantes. Sin embargo cuando una pila gastada se abre (conviene que no sea alcalina porque esta operación se ve dificultada por la dureza del material de la carcasa) y se compara con la apariencia de una pila nueva (abierta también) los alumnos tienen clara la diferencia de una a otra y resulta más fácil que comprendan que han tenido lugar cambios en la naturaleza de los materiales que se pueden explicar como cambios químicos.

Para ahorrar tiempo puede proponerse a los estudiantes que realicen esta actividad en casa, pero es muy probable que las diferencias que pueden observarse (textura, sequedad de la pila gastada, deterioro del zinc pudiesen pasar desapercibidas. Algunas de tales diferencias se recogen en la siguiente tabla:

	Pila gastada	Pila nueva
Barra de grafito	Apariencia idéntica	Apariencia idéntica
Materia negra interior (MnO⁻)	Seca y desmenuzada, se adhiere a la barra de grafito.	Húmeda, mantiene su forma, no se adhiere a la barra de grafito
Gel incoloro (KOH)	Poco visible Pequeñas aglomeraciones blancas y secas	Fino lecho de aspecto de gel incoloro.
Envoltura metálica de Zn	Se observan partes más blancas y más delgadas en algunos sitios, algunas veces incluso agujeros.	Apariencia metálica de color gris. Espesor idéntico en toda la pieza.

4. ¿CÓMO MANTIENE UNA PILA LA DIFERENCIA DE POTENCIAL ENTRE SUS BORNES?: ANALISIS DEL INTERIOR DE UNA PILA EN UN CIRCUITO

Una vez que sabemos que la función de la pila en un circuito consiste en mantener la diferencia de potencial entre los bornes de la pila y de esta forma asegurar que los electrones del cable del circuito se moverán, vamos a estudiar con más detalle que pasa en el interior de la pila y cómo se mantiene la diferencia de potencial.

Secuencia de observaciones acerca del funcionamiento de un generador y una pila en un circuito	
<i>(ANALOGO)</i> Generador de Van der Graff-cinta transportadora	<i>(BLANCO)</i> (Pila)
1.- El rozamiento entre las escobillas y la cinta de plástico de material no conductor hace que éste se cargue (las cargas se separan y se ponen de manifiesto). Esto puede observarse. Intervienen fuerzas no culombianas.	1.- En el interior de la pila tienen lugar una serie de reacciones químicas como consecuencia de las cuales suponemos que aparecen cargas que se separan. Esto no puede observarse. Las fuerzas responsables son no culombianas.
2.- La cinta de material no conductor transporta las cargas hasta la esfera de metal A. Se va cargando la esfera de metal. Esto puede observarse. Las fuerzas responsables son no culombianas.	2.- Fruto de las reacciones químicas suponemos que se produce el transporte de cargas hasta los polos. Esto no puede observarse. Las fuerzas responsables son no culombianas.
3.- Llegaría un momento en que ya no podría cargarse más la esfera, se alcanzaría un equilibrio entre las fuerzas repulsivas (culombianas) y las fuerzas que hacen llegar las cargas a la esfera (no culombianas). Puede observarse, si la correa de material aislante se mueve con la mano que, cada vez "cuesta" más esfuerzo mover dicha cinta.	3.- Se alcanza un valor máximo para la diferencia de potencial entre sus polos. En la pila suponemos que también se alcanzaría un equilibrio entre las fuerzas repulsivas (culombianas) y las fuerzas que hacen llegar las cargas a los polos (no culombianas). La transición hasta el estado de equilibrio no puede observarse en la pila

<p>4.- La diferencia de potencial entre la esfera y tierra tiene un valor máximo. Este valor máximo depende de los materiales y del tamaño de la esfera.</p>	<p>4.- La diferencia de potencial máxima entre los polos depende de la clase de materiales que constituyen la pila.</p>
<p>5.- Se denomina fuerza electromotriz o fem al trabajo por unidad de carga que realiza el motor al separar y transportar las cargas hasta la esfera (este trabajo es intuitivo). Las fuerzas que realizan el trabajo no son coulombianas. El transporte de carga no se hace a través de un metal conductor.</p>	<p>5.- Se denomina fuerza electromotriz o fem de la pila al trabajo por unidad de carga que se separa y desplaza hasta los polos (este trabajo no es intuitivo). Las fuerzas que realizan el trabajo no son coulombianas. El transporte de carga no se realiza a través de un metal conductor.</p>
<p>6.- Al conectar por un cable la esfera A (+V) con la parte B (-V), como hay diferencia de potencial fluye la corriente, que no será constante. Esto puede observarse.</p>	<p>6.- Al conectar los dos polos de la pila con un cable, como entre ellos hay una diferencia de potencial fluye una corriente constante. Esto puede observarse.</p>

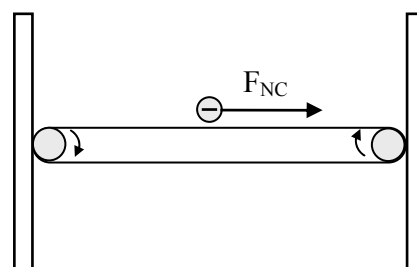
En resumen y a nivel cualitativo: El trabajo realizado o la energía puesta en juego para separar y transportar las cargas que en el caso del generador de Van der Graaf dan lugar a una diferencia de potencial, lo consideramos análogo a lo que sucede en el interior de la pila que también da lugar a una diferencia de potencial.

En ambos casos las fuerzas puestas en juego en la separación y transporte de las cargas hasta situarlas en la posición deseada son de naturaleza no coulombiana.

En ambos casos el valor máximo de la diferencia de potencial que se puede alcanzar depende de características específicas y conformación⁽¹⁾ de los materiales empleados.

En ambos casos el resultado de cuantificar la energía puesta en juego en la separación y transporte de la unidad de carga lo podemos denominar de la misma manera: **fuerza electromotriz**.

A.13.- El dibujo adjunto representa los electrodos de una pila. Vamos a estudiar cómo se produce la separación de cargas, comparando lo que pueda suceder en el interior de la pila con lo que observamos en el generador de Van der Graaf. Vamos a estudiar la situación desde que el primer electrón comienza a desplazarse hasta uno de los electrodos. ¿La fuerza que mueve al electrón es coulombiana o no? Justifica tu respuesta.



Comentarios A.13: Veamos con cierto detalle cómo tiene lugar el proceso. Como consecuencia de las reacciones químicas que tienen lugar en la pila, las acciones, de las que lo

¹ En el caso del generador de Van der Graaf además del tipo de material también importa el tamaño de la esfera.

único que nos interesa es **su naturaleza no culombiana**, comienzan el transporte de cargas negativas desde el electrodo de la derecha hasta el electrodo de la izquierda. Inicialmente son estas fuerzas no culombianas las únicas que actúan sobre los electrones.

En nuestra representación análoga, como consecuencia de las reacciones químicas sucede **como si** una cinta transportadora similar a la del generador de Van der Graff separase y trasportara las cargas de distinto signo sobre los dos electrodos. De esta manera tenemos dos puntos del espacio a diferente potencial. Al conectar un hilo conductor a los electrodos, las cargas se desplazan por el circuito entre los puntos a diferente potencial.

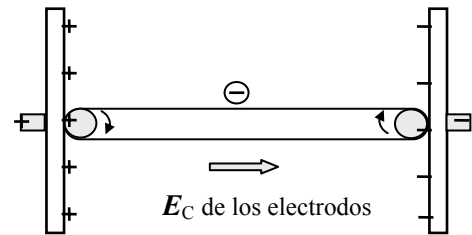
A.14.- El proceso continúa y los polos de la pila se van cargando negativa y positivamente. En la situación representada en la figura:

a) Dibuja las fuerzas actuarán sobre el electrón (representado por una bolita) equidistante de los polos.

b) ¿Existe ahora alguna fuerza de naturaleza culombiana? ¿Y no culombiana? Si es así anótalo con los subíndices correspondientes.

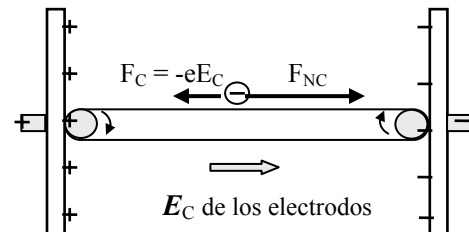
c) E_C representa en el dibujo un campo electrostático de naturaleza culombiana ¿Por qué hay un campo eléctrico entre los polos de la pila?

d) ¿Hasta cuando crees que seguirá el proceso de llevar electrones desde el electrodo de la izquierda al electrodo de la derecha?



Comentarios A.14: a), b) y c)

El proceso continúa acumulando cargas sobre los electrodos hasta que las cargas así acumuladas ejercen una fuerza culombiana ($F_C = -eE_C$) sobre los electrones que se están transportando, mientras que en la dirección opuesta sigue actuando la fuerza no culombiana F_{NC} . La acumulación de carga sobre los electrodos crea un campo eléctrico en el interior de la pila.



Aunque la descripción anterior acerca de lo que sucede es suficiente para los estudiantes, el profesorado no debe perder de vista que ahora hay dos campos eléctricos, uno culombiano y otro que no lo es, con lo que la aceleración de los electrones que se desplazan es ahora menor.

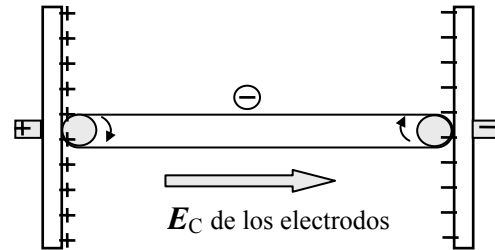
d) Hasta tanto la fuerza culombiana no equilibre su valor con el de la fuerza no culombiana, la resultante o fuerza impulsora neta es igual a la diferencia entre la fuerza no electrostática y electrostática, que seguirá desplazando las cargas y situándolas unas en un electrodo y otras en el otro. El circuito termina por alcanzar un estado estacionario, en el cual la resultante de todas las fuerzas que actúan sobre un portador de carga (incluida la fuerza de viscosidad efectiva) es nula en todas las partes y la intensidad igual en todas las secciones. Por tanto la velocidad de transporte de electrones es constante.

Como consecuencia de la acumulación de cargas sobre los electrodos de la pila, se establece un campo eléctrico culombiano entre los polos cargados, su valor aumenta a medida que van llegando cargas a los polos de la pila. Fuerza y carga están relacionadas en la forma:
 $F_C = e \cdot E_C$

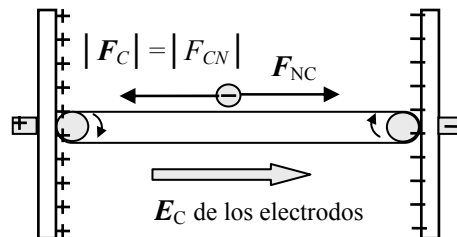
A.15.- Al cabo de un tiempo las fuerzas no culombianas (consecuencia de las reacciones de la pila), igualan su valor al de las fuerzas culombianas (consecuencia de la acumulación de cargas en los polos).

a) Representa sobre el electrón del centro de la figura las fuerzas que actúan en ese momento, señalando el carácter culombiano o no de las mismas.

b) De acuerdo con el modelo que estamos estudiando, ¿la función de la pila es crear cargas?, ¿cuál es en definitiva la función de la pila?



Comentarios A.15: a) Este proceso continúa hasta que $|F_C| = |F_{NC}|$, es decir, la fuerza culombiana va aumentando hasta que su valor se hace tan grande como el de la fuerza no culombiana, no perder de vista que estas fuerzas son iguales en valor, pero distintas en sus características. La cantidad de cargas que pueden separarse sobre los electrodos va a depender de la naturaleza de las reacciones químicas que tienen lugar en la pila.



b) Según el proceso que estamos estudiando en detalle, **la función de la pila es aportar la energía necesaria para realizar el trabajo de separar y mantener separadas las cargas.** La cantidad de cargas que pueden separarse dependerá, en el caso de los generadores “mecánicos” de la fuerza que el hombre o el motor sean capaces de poner en juego y en el caso de la pila de la naturaleza de las reacciones químicas que tienen lugar en la misma.

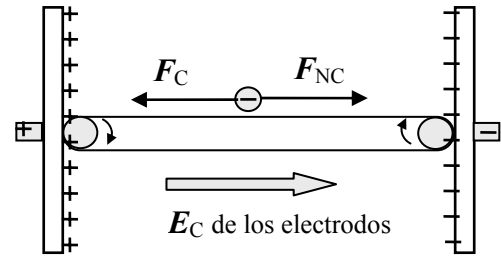
Los estudiantes pueden llegar a pensar que la pila “crea” las cargas que circulan en el circuito eléctrico, conviene insistir en que en el interior de la pila no se “crean” cargas, la idea es que se separan como consecuencia de las reacciones químicas que tienen lugar en su interior. Del mismo modo que al frotar la barra de ebonita no se “crean” las cargas, sino que frotar da lugar a que se manifiesten.

A.16.- Si suponemos los polos de la pila uniformemente cargados y que la distancia de separación es d .

a) ¿Qué trabajo realiza la fuerza no culombiana por cada electrón que desplaza desde el polo positivo hasta el polo negativo?

b) ¿Qué trabajo realizará la fuerza no culombiana sobre dos, tres, etc., electrones? ¿Y si quisiéramos calcular el trabajo sobre uno, dos, tres, etc. culombios?

c) Si queremos definir una magnitud que no tenga en cuenta la cantidad total de carga, podemos referirnos al trabajo que se realiza sobre cada unidad de carga. ¿En qué unidades se expresará el trabajo realizado sobre la unidad de carga?



Comentarios A.16: a) Razonamos de la siguiente manera: Si la distancia entre los dos electrodos es d , el trabajo realizado por la fuerza no coulombiana será $W_{NC} = F_{NC} \cdot d$

b) Para el caso de un culombio (la unidad de carga) tendremos:

$$\frac{W_{NC}}{q} = \frac{F_{NC} \cdot d}{q}$$

En la relación anterior el último término representa la energía que la pila suministra a cada electrón (o en su caso a la unidad de carga). Esta cantidad es exactamente la llamada Fuerza electromotriz de la pila y es una característica de cada tipo de pila (en general de cada generador), al estar asociada a los procesos que tienen en su interior. Esta característica de cada tipo de pila que se traduce en valores diferentes de fem, se debe a los distintos materiales de los que se construye una pila. Una pila cuyos electrodos son cinc (Zn) y cobre (Cu) tiene una fem diferente a otra cuyos electrodos son de cadmio (Cd) y mercurio (Hg) o cloro (Cl) y plata (Ag); y por supuesto esto da lugar a que la resistencia interna también sea diferente.

c) Creemos que los alumnos expresarán sin dificultad cantidad en Julios por cada Culombio. Puede que recuerden que se trata de un Voltio, sino lo puede informar el profesor/a. Esto es justamente la **fuerza electromotriz de una pila**: el **trabajo realizado por una fuerza no coulombiana, sobre cada unidad de carga que se separa y se mantiene separada sobre los polos de la pila**. El profesor estará atento para advertir a los estudiantes, si fuera necesario, que el número de newtones, es decir, el valor de la fuerza que actúa sobre un electrón o sobre la unidad de carga no es el mismo. Para los estudiantes la definición de fuerza electromotriz está ahora llena de sentido.

Fuerza electromotriz (ϵ): La fuerza electromotriz es una acción no coulombiana sobre las cargas que las separa y las mantiene separadas.

De forma más cuantitativa se podría escribir para la fuerza electromotriz:

$$\frac{F_{NC} \cdot d}{q} = \xi$$

A.17.- En la situación de equilibrio representada en figura de la actividad anterior:

a) ¿Qué trabajo realiza la fuerza coulombiana por cada unidad de carga (culombio) que se desplaza desde el polo positivo hasta el polo negativo?

b) Teniendo en cuenta las relaciones estudiadas en electrostática,

$$E_C = F_C/Q$$

$$V_B - V_A = E_C \cdot d$$

Propón una ecuación que relacione la diferencia de potencial entre los electrodos A y B de la pila y el trabajo realizado por la fuerza electrostática sobre la unidad de carga.

c) Si el trabajo de las fuerzas no coulombianas sólo se invirtiera en cambiar la energía potencial eléctrica de las cargas que se acumulan sobre los electrodos ¿qué relación existiría entre el valor de la diferencia de potencial entre los polos de la pila y el valor de la fuerza electromotriz?

d) Si el trabajo de las fuerzas no coulombianas se invierte en cambiar la energía potencial eléctrica de las cargas que se acumulan sobre los electrodos y, además, en el desplazamiento de los electrones en el interior de la pila ¿qué relación existiría entre el valor de la diferencia de potencial entre los polos de la pila y el valor de la fuerza electromotriz?

Comentarios A.17: a) *Se trata simplemente de establecer la relación:*

$$W_c = \frac{F_c \cdot d}{q} ; \text{ donde } q \text{ representa la carga, en este caso 1 Culombio.}$$

b) *Los estudiantes pueden establecer la relación:*

$$|\Delta V_{pila}| = \frac{F_c \cdot d}{q} ; \text{ donde la carga } q \text{ tiene el valor de un culombio.}$$

c) *Si la energía de la pila sólo se invierte en separar y mantener separadas las cargas, significa que estamos o ante una pila ideal (sin resistencia interna) o ante una pila en circuito abierto. En el caso de la pila en circuito abierto (o una pila ideal), toda la energía interna de la pila se invierte en modificar el contenido de energía potencial eléctrica de las cargas al situarlas sobre los electrodos, es decir, dar lugar a una diferencia de potencial entre dos cuerpos. Esta es la razón por la que podemos afirmar que en circuito abierto la fem es igual a la d.d.p. Cuando pasa la corriente, la energía de la pila se transforma en parte en el interior de la propia pila y ya no tienen ni siquiera el mismo valor numérico. Esto es otra cuestión interesante dos magnitudes no son iguales porque tengan el mismo valor numérico en una situación, lo que a veces parece desprenderse de la lectura de muchos textos cuando se refieren a las relaciones entre fuerza electromotriz y diferencia de potencial.*

d) *Buscamos que los estudiantes establezcan la relación $f.e.m > d.d.p.$, que es la normal en el funcionamiento de un circuito.*

5. ¿CÓMO CIRCULAN LAS CARGAS ELÉCTRICAS A LO LARGO DE TODO EL CIRCUITO?: ANÁLISIS LO QUE SUCEDE.

Ahora ya estamos en condiciones de establecer una explicación de cómo se mueve un flujo continuo de cargas por un circuito sencillo y por qué. Vamos, pues, a la tarea.

Para facilitar una visión de conjunto, en los siguientes puntos se sintetizan las ideas principales que se van a estudiar en las actividades de este apartado.

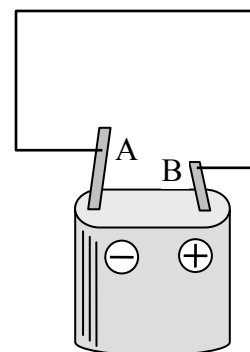
1. *Las cargas se mueven por el cable del circuito debido a la diferencia de potencial que la pila mantiene entre sus bornes (A.18a).REPASO. La diferencia de potencial se medirá con un voltímetro (A.19)NUEVO*
2. *Las cargas se mueven dentro de la pila debido a las fuerzas no coulombianas de las reacciones químicas (A.18b). REPASO.*
3. *Se interpreta el significado de la medida de la d.d.p. entre dos puntos de un circuito (A.19.a) y las transformaciones energéticas a nivel microscópico (A.19.b)*
4. *Se sale al paso de la idea que tienen los estudiantes al creer que las cargas se gastan a su paso por el circuito (A.20.a y b). Contestamos a la pregunta ¿Cómo medir el flujo de cargas? (A.20.c).*
5. *Si la pila no proporciona las cargas hay que explicar de dónde proceden, para evitar que se especule erróneamente entorno a esta idea (A.19.a)*
6. *¿Cuál es el balance de energía del circuito? (A.23) y (A.22). Los resultados de la investigación didáctica señala que los estudiantes tienen problemas a la hora de analizar el consumo de energía en las bombillas y pilas de un circuito sencillo. En esta sección se aborda el problema a nivel global y cualitativo y después, en la sección 7 se analiza el conjunto del circuito y a nivel cuantitativo.*

A.18.- El circuito más elemental está constituido por una pila y cables, como en la figura. Supón que un electrón está situado en la posición A (el electrodo negativo).

a) ¿Por qué se mueve a lo largo del cable hasta B? ¿Qué tipo de fuerzas actúan sobre el electrón en esta porción del circuito?

b) ¿Un electrón que se mueve desde B hasta A por dentro de la pila? ¿Qué tipo de fuerzas actúan sobre él?

c) ¿Por qué los electrones no pasan de A hasta B por el interior de la pila?



Comentarios A.18: *Se ha estudiado con detalle la descripción microscópica de lo que sucede en el interior de la pila y ahora vamos a ver cómo la utilizan en la descripción de un circuito completo. Los estudiantes están en condiciones de contestar que:*

a) *Desde A hasta B se moverá porque entre los polos de la pila hay una diferencia de potencial debida a la acumulación de cargas sobre los electrodos y que permanecen en reposo. Las fuerzas implicadas son por tanto fuerzas eléctricas de tipo coulombiano.*

b) *Este apartado b reitera lo que ya se ha visto. No tiene otro objetivo que resaltar el hecho de que sobre las cargas en el exterior de la pila actúan fuerzas coulombianas, mientras que por el interior actúan fuerzas no coulombianas.*

c) *El tránsito de electrones desde regiones desde A hasta B por el interior de la pila lo impiden las fuerzas no coulombianas. Como se ha dicho estas fuerzas separan y **mantienen** separadas las cargas sobre los electrodos.*

A.19.- a) Se mide la diferencia de potencial entre los puntos A y B de la pila de la figura anterior ¿qué significa en términos de energía el número que indica el voltímetro?

b) Describe las transferencias de energía del electrón que va desde A hasta B por el cable.

Comentarios A.19: a) Interpretamos a nivel microscópico la diferencia de potencial como la medida del trabajo realizado por las fuerzas coulombianas a través del hilo conductor. Este trabajo cuantifica la energía puesta en juego cuando el electrón (en su caso la unidad de carga) cambia su energía potencial eléctrica al ir de A a B por esta parte del circuito. Esta diferencia en la cantidad de energía (por unidad de carga) entre los puntos A y B es la diferencia de potencial entre esos puntos.

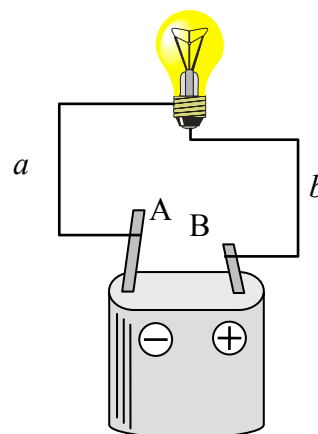
b) Del electrón (en su caso de cada unidad de carga) cambia su energía potencial eléctrica al pasar de A hasta B. Esta disminución de energía potencial eléctrica de las cargas habrá significado el aumento de la energía interna del conductor que aumenta su temperatura.

A.20.- Las cargas fluyen por la parte del circuito comprendido entre A y B debido a la d.d.p. entre los electrodos de la pila. La magnitud que se utiliza para describir el “flujo de cargas” se llama **intensidad de corriente, I**.

a) ¿Cómo definirías la intensidad de corriente? ¿En qué unidades se mide?

b) ¿Circulará la misma corriente por el tramo a que por el tramo b? Explicalo.

c) Dibuja y realiza el montaje necesario para confirmar experimentalmente tus predicciones. Contrasta tus resultados con los de otros grupos de compañeros.

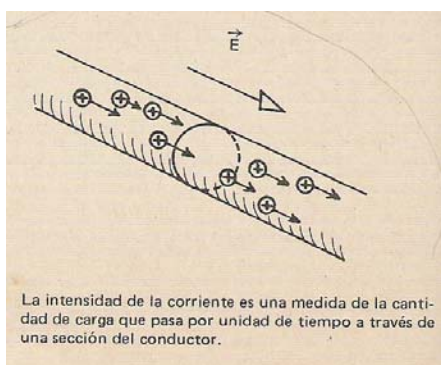


Comentarios A.20: Para muchos estudiantes las cargas se gastan en las bombillas donde se transforman en luz y/o calor. Uno de los objetivos de esta actividad es salir al paso de esta dificultad de aprendizaje.

a) La intensidad de corriente informa de la cantidad de carga que atraviesa una sección del conductor en cada unidad de tiempo. Por tanto el valor de la intensidad puede calcularse mediante la expresión:

$$I = \frac{q}{\Delta t}$$

En relación con la definición de la unidad de intensidad, hay que destacar que la intensidad no es cualquier número de electrones por segundo, sino el número de electrones que hay en un culombio, y la intensidad se mide por tanto en culombios que atraviesan una sección de un conductor en un segundo, lo que se denomina Amperio en honor del físico Francés André-Marie Ampère (1775-1836). Las actividades siguientes pretenden que los estudiantes utilicen estas ideas.



El concepto de intensidad y su definición son muy interesantes porque permiten conectar el modelo teórico de la materia con las medidas que se realizan con los aparatos.

b) Las cargas no se “gastan” a su paso por las bombilas o resistencias. Lo que cambia de las cargas es su energía potencial eléctrica, la cantidad de energía potencial eléctrica de cada carga (o de la unidad de carga) es la que cambia a su paso por los elementos del circuito.

*c) El profesor/a debe explicar antes de seguir **qué medimos con el amperímetro** y **cómo** se conecta en el circuito. Para conectar el aparato al circuito debemos “cortar” siempre el mismo y unir los dos terminales del amperímetro a cada uno de los extremos que obtenemos. Como no se han estudiado las interacciones entre los campos magnéticos y eléctricos no se puede abordar el fundamento del funcionamiento de este instrumento.*

En el tercer apartado deben confirmar experimentalmente la/s hipótesis emitidas. Del mismo modo deben contrastar sus resultados con los de sus grupos de compañeros. Se trata de que se realice el montaje en el que unos amperímetros, convenientemente situados, midan la intensidad que no varía de una parte a otra del circuito. Es conveniente que los alumnos para realizar el montaje hayan realizado antes el dibujo según los símbolos utilizados, para evitar que traten de realizar el montaje a partir del empleo de la técnica ensayo-error. Los científicos no hacen montajes para probar sino que prueban los montajes que han diseñado.

En esta actividad se presenta una situación excelente para que el profesor desempeñe el papel de director de una investigación con los estudiantes, ayudándoles y orientándoles cuando los grupos realicen sus montajes experimentales y contrasten sus resultados, es la metáfora que proponen Gil et al., 1991 acerca del papel del profesor/a en las clases de ciencias. Estas tareas permiten salir al paso de algunas de las visiones deformadas de la ciencia transmitidas por la enseñanza (Fernández et al., 2002). Ahora, la actividad siguiente debe servir para ayudar a los estudiantes a “reconstruir” el modelo teórico para describir el concepto de intensidad de corriente.

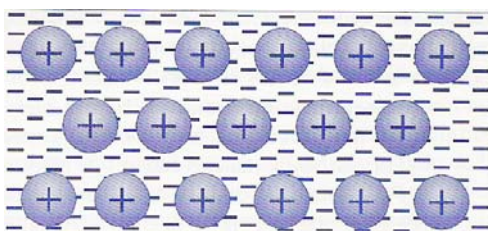
A.21.- a) ¿De dónde proceden las cargas que se mueven por los conductores de un circuito? ¿Se gastan las cargas en su movimiento en el conductor?

b) Teniendo en cuenta que los conductores que se utilizan en los circuitos son mayoritariamente metales, ¿se moverán las cargas positivas o las negativas?

Comentarios A.21: La síntesis después de la discusión de las aportaciones de los grupos podría constar de lo siguiente:

Recordar el modelo de la materia para el caso de los materiales conductores metálicos, es decir, recordar las ideas básicas del enlace metálico o bien introducir dichas nociones básicas, si es que los temas de química se estudian posteriormente. Tendremos la ventaja adicional de que una pregunta que los alumnos/as se hacen siempre “¿esto para qué sirve?” la vamos a estar respondiendo.

El siguiente dibujo representa un esquema conocido mediante el que se representa un cristal metálico a nivel de las partículas constituyentes.



Esencialmente restos positivos situados en un mar de electrones móviles. Es decir, las cargas que se mueven forman parte de los conductores. Están en ellos, pueden moverse y lo harán bajo la acción de un campo eléctrico.

b) Bajo la acción de un campo electrostático coulombiano y entre dos puntos de dicho campo entre los que hay una diferencia de potencial serán los electrones se desplazarán.

Por otra parte cabe señalar que, si se gastaran los electrones a su paso por las bombillas u otros elementos del circuito, sería posible medir posteriormente el grado de electrización de los conductores. Lo que nunca hasta ahora se ha observado.

La tradición histórica en relación con la noción de carga, que se sigue manteniendo, supone indistintamente una corriente de electrones, o bien una corriente de cargas positivas que se mueven justo en sentido contrario.

A.22.- a) ¿Qué intensidad circula por un circuito si en 15 s han pasado 25 culombios por una sección del mismo?

b) ¿Qué carga circula en un minuto por un conductor, si la intensidad de corriente es de 2A?

Comentarios A.22: a) $i = 1,67 \text{ A}$; b) $q = 120 \text{ C}$

En síntesis:

Hay que tener claro que: La fuente de electrones en los cables de un circuito es el material conductor del mismo.

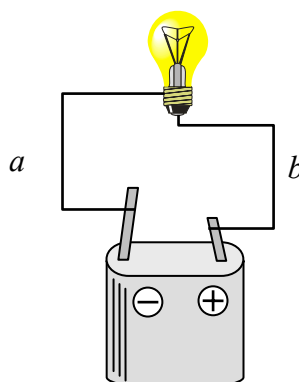
En relación con el concepto de intensidad de corriente hay que distinguir entre:
CORRIENTE CONVENCIONAL Y CORRIENTE DE ELECTRONES

- **Corriente de electrones:** electrones/s que pasan por un punto. La corriente de electrones fluye en sentido contrario al campo eléctrico E.
- **Corriente convencional:** Culombios/s. La corriente convencional fluye en la dirección de E.
- **La intensidad de corriente es una medida de la cantidad de carga que pasa por unidad de tiempo a través de una sección del conductor. Nos referimos a la situación que se denomina corriente continua.**
- **En otro tema se estudiará que existe otra situación que se describirá diciendo que las cargas cambian de dirección cíclicamente. Se habla de corriente alterna en este caso. La corriente alterna es la que transporta energía a los hogares e industrias.**

Los puntos de vista económico y ecológico, están relacionados con la producción y consumo de los materiales de nuestro planeta. Interesa conocer pues cuál es el gasto energético producido en las bombillas o en las pilas del circuito. Las ideas que se utilizan para los balances de energía en un circuito sencillo como los que aquí utilizamos son prácticamente las mismas que las que se emplean para estudiar el

balance energético en ciudades y hogares. De esto vamos a ocuparnos las dos actividades que vienen a continuación y más adelante en el apartado 7.

A.23.- En un circuito como el de la figura, la energía que proporciona la pila, ¿cómo se transforma en los cables y en la bombilla?



Comentarios A.23: La energía eléctrica se transforma en la bombilla en luz y calor (recordar que entendemos la luz y el calor no como tipos de energía sino como energía en tránsito), esto último se puede comprobar tocándola. Es un resultado cualitativo, pero podíamos medirla con un termómetro o diseñar una experiencia que nos permitiese calcularla a partir de la cuantificación del calor intercambiado con un sistema. Que el “calor” se puede cuantificar es un resultado que nos interesa para el estudio energético que venimos haciendo en torno a la pila. En una pila real parte de la energía que proporcionan las reacciones químicas se transforma en calor en la propia pila.

A.24.- Si tocamos la pila después de un rato de funcionamiento conectada a un circuito, podemos comprobar que su temperatura se ha elevado (se ha “calentado”).

a) ¿De dónde procede la energía que se ha transformado en calor como consecuencia del paso de corriente por la pila?

b) La fuerza electromotriz, es decir, la energía para separar las cargas y mantenerlas separadas, ¿se podrá medir cuando la pila está conectada al circuito?

c) ¿Se puede cuantificar la energía que se transforma en la pila como consecuencia del paso de la corriente por ella cuando está conectada a un circuito cerrado?

Comentarios A.24: a) Que la pila tiene una determinada resistencia interna no es nada evidente para los alumnos. La única aproximación que es posible constatar es la que se deriva del calentamiento de la pila. Como en el caso de la bombilla que se calienta debido a su “resistencia”, la pila también lo hace porque la tiene. Prácticamente conseguiremos que la pila se caliente al unir los polos con un cable de cobre, ya que estamos conectando dichos terminales en cortocircuito. Toda la energía procede de las reacciones químicas que tienen lugar en el interior de la pila, cuando esta se conecta al circuito.

b) La fem de la pila entendida como **una acción no culombiana sobre las cargas que las separa y las mantiene separadas**, dando lugar a una diferencia de potencial no puede medirse cuando la pila está conectada al circuito puesto que parte de la energía que suministra se transforma en calor en el interior de la pila. Cómo se mide se verá un poco más adelante, pero esta reflexión ya se puede proponer a los estudiantes. Posteriormente cuando se trate cómo medir la fem de una pila reforzaremos esta idea.

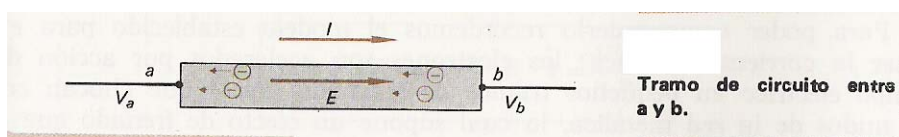
c) Se puede, pero sería difícil que los estudiantes propusieran cómo; por tanto es una cuestión que tendremos que abordar apenas se estudien las actividades que vienen a continuación que proporcionarán, entre otras cosas, el bagaje operativo necesario para ello.

6. ¿CÓMO SE CUANTIFICA LA ENERGÍA QUE SE TRANSFIERE O TRANSFORMA EN LAS DISTINTAS PARTES DEL CIRCUITO?

El consumo de un circuito está relacionado con su rentabilidad y con su incidencia en el medio ambiente. **Las industrias del sector energético en Andalucía (centrales termoelectricas y refineras de Huelva y Algeciras) han aumentado sus emisiones (CO₂, CH₄ y N₂O) en un 64%, en un estudio del año 2003.** En el lenguaje cotidiano se habla del consumo energético, que está relacionado con la potencia, la energía que se transforma por unidad de tiempo. En las siguientes actividades veremos con qué magnitudes de las estudiadas se relaciona la potencia de un circuito.

1. En las actividades A.25; A.26; A.27 y A.31 veremos con qué magnitudes de las estudiadas se relaciona la potencia de un circuito.
2. En ocasiones se quieren conocer las transferencias de energía, a partir de datos como la I y la R del tramo. Esto se plantea en la A.31 y se pide una solución en base a lo ya estudiado hasta ahora. Se trabaja el significado de la solución en A.28 y A.29.
3. Abordamos la manera de expresar el Principio de Conservación de la Energía para el circuito completo. A.29.
4. Se plantea la cuestión de distinguir entre la fem y la d.d.p. de un circuito, deteniendonos en las diferencias entre la ley de Ohm y la ecuación del circuito. A.30.
5. Se abunda en la distinción entre las magnitudes fem y d.d.p., desde el punto de vista macroscópico (de lo que se puede medir y cómo hacerlo). A.32.
6. Para terminar el tema se propone una actividad de autoevaluación que consiste en construir un mapa conceptual de los conceptos definidos y trabajados a lo largo de la unidad. Si los estudiantes no tienen costumbre de realizar mapas conceptuales pueden tener dificultades, aunque haya tenido lugar un aprendizaje significativo. A.34

A.25.- El dibujo representa un tramo cualquiera de un circuito. Debido a la diferencia de potencial ($V_a - V_b$) las cargas se desplazan transformandose una cantidad de energía entre los puntos a y b. Recuerda la actividad A.17.



a) A partir de las definiciones de los conceptos de intensidad y diferencia de potencial propón una ecuación que permita cuantificar la energía transferida/transformada entre a y b en un intervalo de tiempo Δt .

b) ¿Cuál será la expresión para la energía transferida en un segundo?

Comentarios A.25: a) La energía transferida/transformada entre los puntos a y b del dibujo anterior es:

$$\Delta E = q \cdot (V_a - V_b) = I \cdot (V_a - V_b) \Delta t$$

b) La potencia, energía transferida en cada segundo, sería:

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = I \cdot V$$

Recordar a los estudiantes, si fuese necesario, que la unidad de potencia es el vatio. Se dice que la potencia es de un vatio cuando se transfiere un julio de energía en un segundo.

A.26.- a) Averigua la potencia de una calculadora escolar que funciona con dos pilas en serie que proporcionan una diferencia de potencial entre sus polos de 1,5 voltios, si la intensidad de corriente en la calculadora es de 0.1 A

b) Si funciona durante una hora ¿cuánta energía se ha transformado?

Comentarios A.26: a) Sin más que aplicar la ecuación que se ha obtenido en la actividad anterior: $P = I \cdot V_{AB} = 0,1 \text{ A} \cdot 3 \text{ V} = 0,3 \text{ W}$.

b) Si funciona durante una hora: $E = P \cdot t = 0,3 \text{ W} \cdot 3600 \text{ s} = 1080 \text{ Julios}$.

El profesorado debería estar atento por si es necesario recordar a los estudiantes que, la cuantificación energética que se realiza se refiere al exterior de la pila, por lo que la fem aquí no nos proporciona ninguna información.

En ocasiones no se conoce la *d.d.p.* entre los puntos del circuito donde se quiere conocer la cantidad de energía transformada (el “consumo”), pero sí otros datos como la *I* y la *R* del tramo. ¿Cómo calcular el “consumo” en este caso?

ALGUNAS RELACIONES

Se ha visto que la potencia para un tramo de circuito eléctrico que no incluya la pila viene dada por la expresión:

$$P = I \Delta V$$

Si aplicamos a ΔV y posteriormente a la intensidad *I* las relaciones de la ley de Ohm, $\Delta V = RI$, obtenemos las siguientes relaciones para la potencia:

$$1) P = I^2 \cdot R \qquad 2) P = (\Delta V)^2 / R.$$

El producto $I^2 \cdot R$ es positivo en cualquier caso y representa siempre una transformación de energía potencial eléctrica.

A.27.- ¿Qué significa en términos de energía el producto $I \cdot R$?

Comentarios A.27: Los estudiantes emplean las ecuaciones, pero tienen dificultades para comprender y por tanto verbalizar el significado de las mismas o de alguno de sus términos. El producto $I \cdot R$ representa la energía transformada por cada unidad de carga que va de un extremo a otro de la resistencia *R*. Nos parece del máximo interés que el profesorado dedique algún tiempo para asegurarse de que los estudiantes comprenden desde los puntos de vista macroscópico y microscópico la identidad de la relación $\Delta V = I \cdot R$

El resultado $P = I^2 \cdot R$ es muy interesante. Si lo expresamos en la forma $\Delta E / \Delta t = I^2 \cdot R$ y despejamos ΔE , tenemos: $\Delta E = I^2 \cdot R \cdot \Delta t$. Expresión que permite cuantificar la energía transformada en una resistencia en el intervalo de tiempo Δt . Esta energía calculada vendrá expresada en julios, era tradicional expresarla en calorías, ya que en una resistencia la energía eléctrica se transforma en calor, lo que se conoce como Efecto Joule o efecto térmico de la corriente, que venía expresado en la forma:

$$\Delta E = 0,24 \cdot I^2 \cdot R \cdot \Delta t \text{ calorías}$$

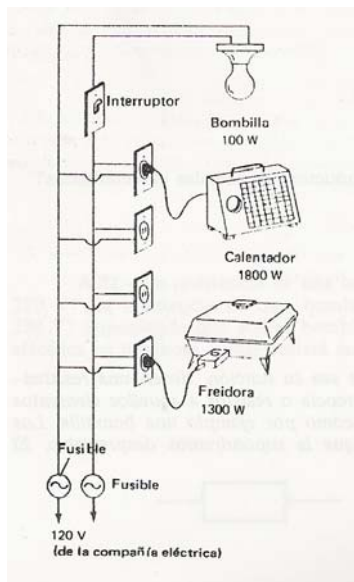
Sin más que tener en cuenta la equivalencia entre ambas unidades:

$$1 \text{ J} = 0,24 \text{ calorías}$$

El establecimiento del efecto Joule tuvo mucha importancia en la construcción de las teorías de la física, especialmente en el establecimiento del Principio de Conservación de la Energía.

A.28.- a) ¿Los aparatos representados en la figura están colocados en serie o en paralelo?

b) A medida que “encendemos” luces y conectamos utensilios eléctricos en una casa ¿cómo varía la resistencia equivalente del circuito doméstico?



c) ¿Por qué conceptos se paga en el recibo a la compañía eléctrica?

Cuanto más aparatos conectamos menor es la resistencia equivalente del circuito. Demuestra que eso debe suponer un mayor consumo de energía eléctrica (disminución de energía potencial eléctrica) en un mismo tiempo.

Comentarios A.28: a) Los elementos están colocados en paralelo.

b) Cuanto mayor es el número de bombillas encendidas, menor es la resistencia equivalente y mayor la cantidad de dinero que se paga a la compañía eléctrica.

c) Esto se debe a que al ser menor la resistencia equivalente es mayor la intensidad de la corriente que pasa por el circuito, por tanto mayor la potencia “transformada” en el circuito de la casa. Los usuarios compramos a la compañía energía eléctrica. La potencia en términos de intensidad y resistencia vale $P = I^2 \cdot R$, la resistencia cuantos más aparatos se conectan se hace menor, pero la intensidad aumenta y la potencia depende del valor al cuadrado de la misma.

Si la potencia la expresamos como $P = (\Delta V)^2 / R$, vemos que la potencia aumenta cuando la resistencia equivalente se hace menor ya que la diferencia de potencial a la que está conectada la casa permanece constante. Conviene no perder de vista que, en una instalación doméstica no es correcto hablar de diferencia de potencial, el campo eléctrico no es debido a una configuración de cargas en reposo (electrostático). La intensidad de corriente no deriva de una diferencia de potencial electrostático. En estos casos el concepto que debe aplicarse es el de voltaje.

A.29.- Supongamos un circuito que podemos considerar, simplificado, como una pila de fuerza electromotriz ε y resistencia interna r y una parte exterior cuya resistencia equivalente es R .

a) Dibuja un esquema del circuito anterior y de forma cualitativa realiza un análisis de las transformaciones energéticas que ocurren en el mismo, aplicando el Principio de Conservación de la Energía.

b) Teniendo en cuenta las conclusiones de la actividad 27, escribe una ecuación que exprese las conclusiones del apartado anterior, refiérelo a la unidad de carga.

Comentarios A.29: a) *De toda la energía suministrada por la pila, una parte se transformaba en el resto del circuito y otra cantidad menor se transformaba en el interior de la pila.*

b) *Si esto lo referimos a la unidad de carga podemos escribir:*

$$\varepsilon = V_{ab} + I r \quad \text{en donde } r \text{ representa la resistencia interna de la pila.}$$

*La ecuación anterior es la **ecuación del circuito**, que para el caso de una pila ideal sería: $\varepsilon = I \cdot R$*

A.30.- a) ¿En qué condiciones la *fem* de la pila y la *ddp* entre sus electrodos tienen el mismo valor numérico?

b) ¿En la situación anterior, la *fem* de la pila es la misma magnitud que la *ddp* entre los polos de la pila?

¿Hay diferencias entre la ley de Ohm $V_{AB} = I \cdot R$ y la ecuación del circuito $\varepsilon = I \cdot R$ o representan lo mismo?

Comentarios A.30: a) *De la ecuación $\xi = V_{ab} + I r$, se deduce que si la resistencia interna de una pila fuese nula coincidirían los valores de la fem y la d.d.p. Este es el interés de las ecuaciones matemáticas, cuando se saben interpretar, que pueden simplificar mucho la información.*

b) *Evidentemente **no**, una cosa es que coincidan sus valores en una situación ideal (no real) y otra cosa bien distinta es que se trate de la misma magnitud. Señalar este extremo no es algo baladí, es justamente la omisión capital de la mayoría de los libros de texto, en los que suele afirmarse que “**cuando la resistencia interna de la pila es despreciable, la fuerza electromotriz y la diferencia de potencial son iguales**”. Los estudiantes por sí solos no van a llegar a la conclusión de que el párrafo en negrita anterior debería terminar añadiendo “...en valor numérico”; que esto es así lo ponen de manifiesto los resultados de la investigación.*

Fuerza electromotriz y diferencia de potencial cuantifican magnitudes bien diferentes: La energía que la pila, fruto de las reacciones químicas que tienen lugar en la misma, suministra a cada unidad de carga es la fuerza electromotriz para crear la diferencia de potencial. Y la diferencia de potencial entre sus electrodos es la energía que la unidad de carga podrá transformar en la parte del circuito exterior de la pila.

c) *Hemos comprobado que los estudiantes, cuando se les pregunta por las analogías y diferencias entre ambas expresiones, razonan del siguiente modo: “Las ecuaciones $\Delta V = I \cdot R$ y $\varepsilon = I \cdot R$, tienen idénticos los segundos miembros, luego debe cumplirse que $\Delta V = \varepsilon$, por lo que matemáticamente se comprueba que fuerza electromotriz y diferencia de potencial son la misma cosa”. Esta es una interpretación errónea de las ecuaciones matemáticas implicadas. La tabla siguiente recoge algunas diferencias significativas entre ambas ecuaciones.*

Ley de Ohm $V_{ab} = R_{ab} \cdot I$	Ecuación del circuito $\varepsilon = R_T \cdot I$
<p>1.- R_{ab}, es siempre la resistencia de un trozo de conductor. Si se trata de la resistencia equivalente del circuito no incluye la resistencia interna de la pila.</p> <p>2.- Relación válida sólo para el tramo de conductor comprendido entre dos puntos a y b.</p> <p>3.- Su ámbito de aplicación: 3.1) No incluye la pila, entre otras cosas porque la pila no es un conductor óhmico. 3.2) Es sólo para los llamados materiales óhmicos y para temperaturas definidas.</p> <p>4.- Representa: El valor de la intensidad por un tramo de conductor ab, de resistencia R_{ab}, entre cuyos extremos la diferencia de potencial es V_{ab}.</p> <p>5.- La diferencia de potencial electrostático está definida para campos eléctricos electrostáticos conservativos exclusivamente.</p>	<p>1.- R_T, es siempre la resistencia total del circuito, incluye la resistencia interna de la pila.</p> <p>2.- Relación válida para todo el circuito cerrado.</p> <p>3.- Su ámbito de aplicación 3.1) Incluye la pila necesariamente. 3.2) En un circuito representa el Principio de Conservación de la Energía.</p> <p>4.- Representa: Siempre la relación entre el valor de la intensidad total del circuito, la resistencia total del mismo y la fuerza electromotriz.</p> <p>5.- En una pila los campos eléctricos existentes no son electrostáticos. La fuerza electromotriz ε siempre está asociada a campos eléctricos no electrostáticos (no conservativos).</p>

Es frecuente encontrar libros en los que se habla de la Ley de Ohm generalizada, para referirse a lo que no es otra cosa que una reflexión sobre el principio de conservación de la energía para circuitos. Esto es en sí mismo un error, al identificar las magnitudes ξ y ΔV y las expresiones $\Delta V = I \cdot R$ y $\varepsilon = I \cdot R$. A esto se añade el error didáctico de creer que los estudiantes sólo serán capaces de establecer las limitaciones necesarias para evitar un aprendizaje inexacto. Pero en el mejor de los casos induce a los estudiantes a creer que una relación aproximada y restringida a algunos materiales tiene el mismo rango de validez que el Principio de conservación de la energía.

A.31.- En la ecuación $\varepsilon = V_{ab} + I \cdot r$ multiplica todos los términos por I . ¿Qué representa ahora cada término de la ecuación?

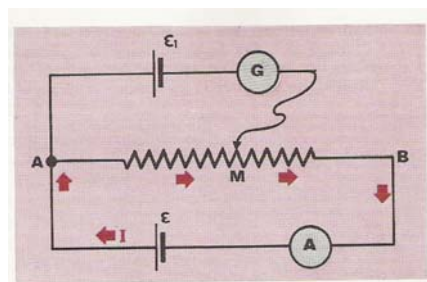
Comentarios A.31: Si en la ecuación $\varepsilon = V_{ab} + I \cdot r$ multiplicamos por I obtenemos: $\varepsilon I = I V_{ab} + I^2 \cdot r$. El primer término podemos expresarlo en la forma $P\varepsilon$ es la potencia total cedida por la pila. La potencia eléctrica $I \cdot V_{AB}$ se suministrada a la porción de circuito comprendida entre A y B. La potencia que se transforma en la resistencia interna de la pila es $I^2 \cdot r$.

A.32.- En una pila ideal, sin resistencia interna, toda la energía proporcionada por la pila a la unidad de carga (su *fem*) se invierte en separar las cargas en los electrodos y mantener la *ddp*. De una pila real ¿cómo podríamos medir su *fem*?

Comentarios A.32: En una pila “real” con resistencia interna, para medir sólo la energía puesta en juego para separar las cargas y mantenerlas separadas, es necesario que no pase corriente eléctrica por la pila, ya que entonces una cierta cantidad de energía se invierte en calor. Esta es la idea importante que queremos aprendan los estudiantes. El método para

hacerlo es muy difícil que puedan proponerlo, pero esto es menos importante que el hecho de que se den cuenta de que la fem de una pila hay que medirla sin que pase corriente por ella por las razones que hemos venido señalando.

La fem de una pila se mide mediante el método de Poggendorff. Esto no es otra cosa que un método que permite medir la fem de una pila comparando el valor de la fem problema con el valor de la fem de una pila patrón, que como todos los patrones se encuentra en la oficina de pesas y medidas de París. El montaje se realiza mediante un potenciómetro, en la forma que se describe a continuación, de la que podemos informar a los estudiantes mediante una transparencia, pero sin destacar más que el hecho de que la medida experimental es de intensidad de corriente, no de diferencia de potencial.



El esquema siguiente representa el montaje (en su forma más simple) para medir la fem de una pila. La diferencia de potencial entre A y B es conocida, la de la pila patrón, cuando desplazando el cursor M se consigue que por el amperímetro G no pase corriente podemos conocer el valor de la fem desconocida ya que la d.d.p. V_{AM} es el valor de la diferencia de potencial entre los electrodos de la pila cuando por ella no pasa corriente.

A.33.- Una pila de linterna tiene una fem de 1,5 V y una resistencia interna de $0,61 \Omega$. Cuando se enciende la linterna pasa por la pila una corriente de 1,4 A. Dibuja un esquema del circuito y calcula:

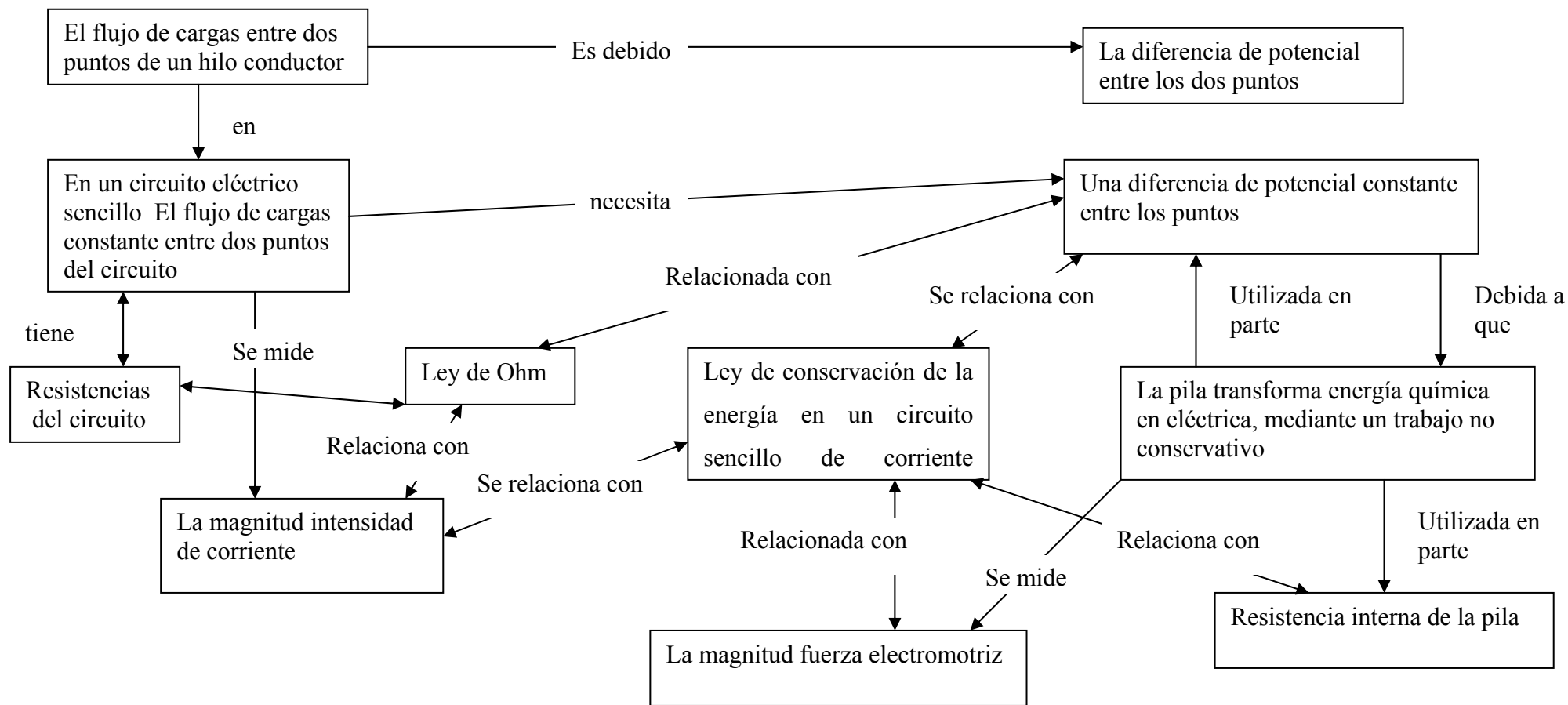
- La potencia cedida por la pila.
- La energía transformada cada segundo en el interior de la pila.
- La energía transformada cada segundo en la parte del circuito exterior a la pila.

Comentarios A.33: Hemos insistido sobre todo en los aspectos cualitativos de las relaciones y conceptos implicados. Este es el caso de una actividad esencialmente cuantitativa, para que apliquen, en un caso sencillo, las relaciones estudiadas.

A.34.- Para terminar te pedimos que propongamos un ‘mapa o dibujo’ en el que muestres la relación entre los conceptos de carga, fuerza electromotriz, diferencia de potencial, intensidad de corriente, resistencia, ley de Ohm y Principio de conservación de la Energía cuando se utilizan para describir un circuito con una pila y una resistencia.

Comentarios A.34: El esquema que al profesorado le permite al iniciar la unidad tener una visión de conjunto de la unidad didáctica, creemos que puede ser una meta para los alumnos al terminar la misma. Es una tarea difícil y necesariamente terminal por lo que su realización debería ser algo a tener en cuenta en la valoración que se haga del aprendizaje, es decir, pensamos que la realización de este diagrama tendrá valor en la nota de evaluación del tema en un porcentaje a negociar dada la dificultad que entraña.

Un estudiante que tuviese esencialmente claras este tipo de relaciones conceptuales, no debería tener demasiadas dificultades para abordar la realización de los clásicos ejercicios numéricos, en los que tiene que realizar cálculos del valor de magnitudes bajo determinadas condiciones que hay que relacionar con las expresiones matemáticas en las que se ven implicadas tales magnitudes.



MAPA DEL UNIVERSO DE CONCEPTOS EN LA INTERPRETACIÓN DE UN CIRCUITO CON UNA PILA Y RESISTENCIAS

7. IMPLICACIONES TECNOLÓGICAS Y SOCIALES DEL TEMA

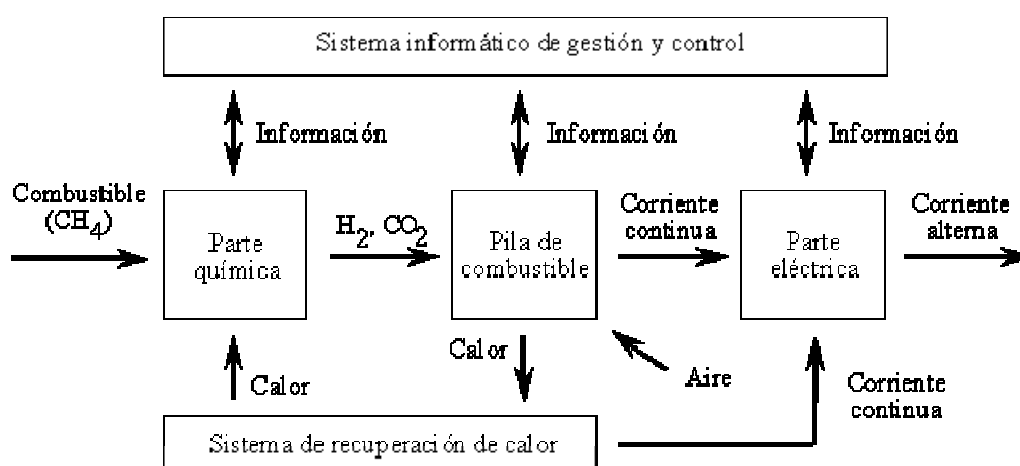
A.35.- En las dos últimas décadas está teniendo lugar una verdadera revolución en los métodos de producción, almacenamiento y conversión de energía. El empleo en este sentido de combustibles fósiles, tales como el petróleo, el carbón y el gas natural, constituye la piedra angular sobre la que se ha fundamentado el espectacular avance tecnológico e industrial que ha experimentado el mundo occidental desde mediados del siglo pasado, pero hoy en día sus reservas están próximas a agotarse y, además, son considerados como altamente peligrosos para la supervivencia del hombre y del medio ambiente que lo rodea. Es por ello que en los últimos años se están desarrollando nuevas tecnologías para generar energía de forma limpia, eficiente y descentralizada. De entre todas ellas, son las llamadas pilas de combustible ('fuel cell' en el mundo anglosajón) las que mejores expectativas presentan. De hecho, las pilas de combustible parecen destinadas a ser campos de alta tecnología a principios del próximo siglo. Se prevé que la operación de estas instalaciones, así como la construcción de aplicaciones, sistemas y componentes, creará en un futuro próximo numerosos puestos de trabajo de alto contenido tecnológico.

Busca información en la red acerca de las pilas de combustible y redacta un informe en el que recojas:

- Un esquema general de una planta basada en una pila de combustible.
- Ventajas de las pilas de combustible.
- Inconvenientes de las pilas de combustible.

Comentarios A.35: "La educación científica no se ocupa del futuro, ni siquiera del más inmediato. No aborda los problemas a los que la humanidad ha de hacer frente" (A. Vilches y D. Gil, 2003). Pensamos que actividades de este tipo deben formar parte de las tareas de aprendizaje de las ciencias en el tiempo reglado para ello y bajo la supervisión directa del profesorado.

El esquema general de una planta basada en una pila de combustible aparece representado en la figura siguiente:



Esquema general de una planta basada en una pila de combustible.

A modo de resumen se puede afirmar que una pila de combustible es un sistema electroquímico que, alimentado con combustible reformado, proporciona energía eléctrica y

agua como productos finales de una reacción que transcurre de forma separada en cada uno de los electrodos. Como subproducto, se obtiene energía térmica.

3.2 Ventajas e inconvenientes

Las pilas de combustible ofrecen una serie de ventajas respecto de los sistemas tradicionales de producción de energía. Entre las más importantes podemos señalar:

- 1 *Alta eficiencia energética:* Las pilas de combustible no son máquinas térmicas, por lo que su rendimiento no está limitado por el ciclo de Carnot, pudiendo acercarse teóricamente al 100%. Sólo las limitaciones en el aprovechamiento de la energía generada y en los materiales empleados en su construcción impiden alcanzar este valor.
- 2 *Bajo nivel de contaminación medioambiental:* Al estar sustituida la combustión a alta temperatura de combustibles fósiles por una reacción electroquímica catalizada entre el hidrógeno y el oxígeno, no existe emisión de gases contaminantes (óxidos de nitrógeno y azufre, hidrocarburos insaturados, etc.), con lo que el impacto sobre el medio ambiente es mínimo. Es éste quizás, el aspecto más atractivo de las pilas de combustible.
- 3 *Carácter modular:* La disponibilidad de las pilas de combustible como módulos independientes supone una ventaja adicional, ya que un cambio de escala en la potencia requerida se consigue fácilmente mediante la interconexión de módulos.
- 4 *Flexibilidad de operación:* Una pila de combustible puede funcionar a alto rendimiento y sin interrupción en un amplio rango de potencias suministradas. Además, pueden realizarse variaciones rápidas de potencia; por ejemplo, es posible aumentar la potencia de una pila de combustible en un 10% en tan sólo un segundo. En contraste, los sistemas convencionales son muy inflexibles, debiéndose mantener la carga de combustible siempre por encima del 80% para garantizar una correcta operación.
- 5 *Admisión de diversos combustibles:* Cualquier combustible es apto para ser reformado, con tal de que incluya hidrógeno en su composición. Han sido empleados con éxito combustibles tan dispares como el gas natural, el gasóleo, el carbón gasificado o el metanol.
- 6 *Funcionamiento silencioso:* se ha estimado que el nivel de ruido a 30 metros de una pila de combustible de tamaño medio es de tan sólo 55 decibelios. Ello sugiere el uso de estos dispositivos para la generación de energía en recintos urbanos.
- 7 *Bajo impacto estético:* Al no existir tubos de emisión de gases ni torres de refrigeración, el impacto visual de una planta de producción de energía basada en pilas de combustible es mínimo. Se ha llegado incluso a proponer su integración en edificios residenciales.
- 8 *Fiabilidad:* Los sistemas informáticos de control permiten automatizar el funcionamiento de una pila de combustible, siendo mínima la intervención manual requerida.
- 9 *Sencillez de instalación:* Las obras de infraestructura son prácticamente innecesarias.

Frente a estas ventajas evidentes, el empleo de pilas de combustible como fuente de energía eléctrica presenta algunas desventajas:

1. *Tecnología emergente:* Determinados problemas aún no resueltos afectan al funcionamiento de las pilas de combustible, especialmente en lo que respecta a su vida útil, lo que repercute en su comercialización.
- 2 *Alto coste:* Al tratarse de una tecnología en desarrollo y al existir todavía una baja demanda de unidades, su precio no puede, hoy en día, competir con el de las tecnologías convencionales. Es de esperar que, conforme la demanda se incremente, los precios se vayan equiparando.

- 3 *Sensibilidad hacia los venenos catalíticos: Los electrodos empleados incorporan catalizadores para favorecer el desarrollo de las reacciones electroquímicas. El contacto de estas sustancias con los llamados venenos catalíticos, tales como el monóxido de azufre o los compuestos de azufre, provoca su inactivación irreversible. En la actualidad se trabaja en la sustitución de estos catalizadores por materiales más resistentes.*

Hay aun otro aspecto de interés con el tema de las pilas de combustible y es el que señalan desde el equipo de investigadores de Jean Marc Levy Leblond. El asunto está en relación con las explicaciones que se proponen para dichas reacciones que de alguna forma cuestionan el concepto de carga tal como lo entendemos en la actualidad. Contemplar este aspecto en las actividades de aprendizaje es importante ya que tener algún conocimiento de los desarrollos científicos recientes y sus perspectivas permite transmitir una visión dinámica, no cerrada, de la ciencia (Gil y otros, 1997).

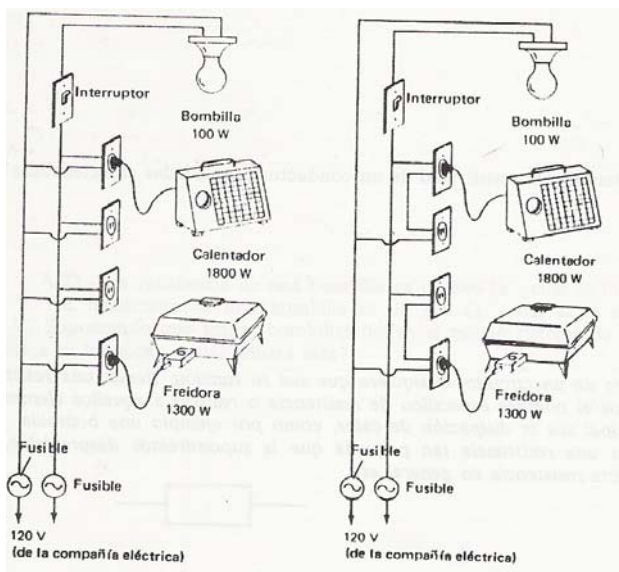
A.36.- a) Redacta un informe en el que señales aplicaciones domésticas del efecto Joule y precauciones que es necesario tomar en algunos casos.

b) En relación con los inconvenientes señala propuestas de mejora.

Comentarios A.36: *Una buena parte de estas actividades pueden servir para reforzar las nociones que se estudian en clase, pero algunas de ellas pueden proponerse casi desde el principio del tema que se estudia. Son actividades lo bastante abiertas como para que a los estudiantes les pueda resultar atractiva la búsqueda de las soluciones. Si es así puede ser algo que a la vez tenga un efecto positivo para abordar el estudio de otras partes del tema.*

El profesorado cuidará la presentación formal y de contenido de los informes. Ordenados, limpios, con cuadros y diagramas de flujo, con lenguaje en el que se utilicen debidamente los conceptos utilizados. El profesorado puede preparar sus informes también y pedirles a los alumnos que corrijan sus trabajos comparando con el que se les ha proporcionado.

A.37.- Los siguientes dibujos representan dos instalaciones domésticas. ¿Cuál de ellas te parece más conveniente? ¿Por qué? Representa en un diagrama con los símbolos habituales ambas instalaciones.



Comentarios A.37: No es fácil que los estudiantes salvo que hayan realizado muchos montajes experimentales distinguan de un vistazo que el dibujo de la derecha representa una instalación en serie. El tema se simplifica si realizan la correspondiente representación utilizando los símbolos estándar.

A.38.- Busca información acerca de las medidas de seguridad que hay en una casa para evitar que se produzcan accidentes con la electricidad.

Comentarios A.38: En la entrada de las casas es donde se suele alojar el llamado cuadro de distribución. En él se colocan distintos interruptores de seguridad: el interruptor diferencial y varios interruptores magneto térmicos. El objetivo de estos es “abrir” el circuito doméstico en caso de que por cualquier circunstancia la intensidad que circula por alguna parte del circuito sea superior a determinado valor.

El interruptor diferencial se basa en la ley de Kirchoff de la conservación de la carga. De forma que el interruptor diferencial detecta la corriente que circula en el circuito general de la casa y controla que la corriente absorbida, o sea “entrante”, sea igual a la de “retorno”. Si se verifica una diferencia (o sea, si la corriente de “retorno” fuese menor) el dispositivo se dispara inmediatamente cortando el suministro de corriente (los términos para la corriente de “entrante” y “retorno” son los utilizados por los técnicos para describir estas situaciones, que en las clases de física suelen resolverse mediante los signos matemáticos más (+) y menos (-)).

En efecto, si la corriente de “retorno” es menor, significa que una parte se está descargando a tierra, quizá a través de una persona. La interrupción de la corriente es tan rápida que la persona no se da cuenta del peligro que ha corrido.

Suele alojarse también en el cuadro de distribución el interruptor de control de potencia (limitador). Este dispositivo lo que hace es controlar el valor de la intensidad máxima de corriente que puede pasar sin que el circuito doméstico se desconecte. Sin embargo el limitador es una medida de la compañía de distribución de la electricidad para asegurarse sobre todo tasas económicas.

A.39.- a) ¿Has detectado alguna deficiencia en la seguridad en relación con la electricidad en tu casa?
b) ¿En tu barrio?
c) ¿En tu ciudad?

Comentarios A.39: Se trata de que la información de los estudiantes a este respecto la utilicen con sentido crítico de forma que puedan evaluar de inmediato el valor de la información que acaban de recibir en las clases. Una forma de hacerlo es averiguar si en casa las medidas de seguridad que se consideran estándar están operativas.

Recientemente (en el verano del 2004) han llegado a la opinión pública hechos graves sucedidos, entre otros lugares, en Madrid; en esta ciudad varios edificios debieron ser desalojados tras la explosión que tuvo lugar en una subestación de transformación situada en un núcleo urbano.

Creemos que en el siglo XXI un estudiante debe ser capaz de emitir una hipótesis plausible acerca de las causas que originan un accidente de este tipo. Que un ciudadano adquiera esta destreza después de estudiar ciencias es lo que da validez al estudio de las ciencias. ¿Qué utilidad tiene en el siglo XXI ser magnífico en la resolución de ejercicios en los

que se vea implicada la relación $Q = I^2 \cdot R \cdot 0,24$ y ser capaz de aceptar explicaciones cargadas de papanatismo o mentiras por parte de los responsables de la política o de las compañías eléctricas?

En el caso de la subestación de Madrid la explicación de lo sucedido en primera instancia, no es otra cosa que una aplicación del efecto Joule. Tuvo lugar en este caso una elevación de temperatura que llega al punto de fusión y/o ignición de algunas de las sustancias de la subestación. Lo cual significaba que había fallado limitadores de intensidad, ventilación adecuada del local, sistemas de alarma contra incendios, etc...

A.40.- Realiza una búsqueda acerca de las aplicaciones de la electricidad en general y en medicina en particular. Organiza la información de una forma clara para que:

- Pueda ser útil al resto de tus compañeros.
- Pudiera ser útil para personas que no hayan estudiado electricidad.
- ¿Por qué una “descarga” eléctrica puede producir la muerte?

Comentarios A.40: a) Creemos que la realización de estas actividades deben permitir no solamente aumentar el nivel de información de los estudiantes, sino además servir para desarrollar determinado tipo de destrezas: la organización y presentación de los datos o información obtenida. Es esta una tarea de primordial importancia en la actividad científica.

Puede parecer una sutileza innecesaria distinguir entre compañeros y personas que no hayan estudiado electricidad, pero creemos que conviene que los estudiantes tomen conciencia de que la información para no “expertos” debe detenerse más en la descripción de los fenómenos o los hechos que en las explicaciones de los mismos.

*De manera general se puede decir que desde siempre la electricidad se contempló como algo que podía tener importantes aplicaciones en medicina. Durante mucho tiempo incluso se creyó en las posibilidades de la electricidad para resucitar cadáveres. Hoy día las aplicaciones son amplísimas, dando lugar a lo que se conoce como **Electroterapia**: Corrientes aplicadas a lesiones musculares, de articulaciones, onda corta, etc.*

b) La siguiente es una propuesta de presentación de la información para la que no hacen falta conocimientos de física:

Aplicaciones (positivas)	Inconvenientes
Construcción: Sería difícil la construcción de grandes edificios, puentes y carreteras hoy día sin el concurso de la electricidad, al menos en el tiempo.	Guerras: La industria armamentista tiene una buena parte de sus avances en la electricidad y la electrónica.
Comunicaciones: No existirían ni la radio, ni la televisión, ni Internet...	Contaminación: La contaminación mundial está producida por los avances tecnológicos, que en buena medida no se habrían producido sin la electricidad.
Transportes: En la actualidad, coches, trenes, barcos...tienen el funcionamiento que conocemos gracias a la electricidad.	Alteración modos de vida: Nuestro modo de vida actual esta basado en un consumo exacerbado de energía. Esto no sólo contamina sino que nos hace más vulnerables como colectivo y como personas. Aparecen como necesarios hábitos y costumbres impensables hace sólo unas décadas.
Educación: en la actualidad los libros se maquetan por ordenador y, el funcionamiento	

de las imprentas anteriores al descubrimiento de la electricidad lo encontraríamos muy deficiente.	
Ocio: juegos de ordenador, televisión, revistas... todo esto cambiaría radicalmente sin la electricidad.	
Alimentación: Los alimentos frescos se estropearían sin refrigeración. Sin hornos, microondas, vitrocerámica, etc nuestras costumbres y posibilidades alimentarias serían otras.	



c) Las siguientes son algunas de las consecuencias de una descarga eléctrica, por electrocución o lo por lo que algunas veces se denomina como “fulguración por rayo”, a la vista de tales efectos, que no son excluyentes entre si, puede explicarse como una descarga puede llevar a la muerte.

- **Quemaduras:** Estas quemaduras deben ser diferenciadas de las quemaduras electrotérmicas profundas y severas por el efecto de Joule cuando la corriente eléctrica pasa a través del cuerpo. La corriente utiliza con preferencia los caminos de menos resistencia, es decir el sistema vascular y nervioso.
- **Efectos neurológicos:** El coma no es raro; puede ser superficial o profundo. La amnesia del accidente es frecuente. Es debido al paso de la corriente a través de las estructuras encefálicas. Keraunoparalysis, una lesión periférica con trastornos vasomotores, mejora en el plazo de 24 horas. Las secuelas son frecuentes (hemiplejia, atrofia del córtex, epilepsia, síndrome extrapiramidal, lesiones nerviosas espinales y periféricas).
- **Lesiones cardiovasculares:** El paro circulatorio sucede por asistolia o fibrilación ventricular. También puede tener lugar una lesión miocárdica directa por efecto Joule, una contusión miocárdica por la onda de choque, una trombosis de las arterias coronarias o periféricas
- **Lesiones respiratorias:** puede ser un tetanización de los músculos respiratorios por un tiempo corto, una lesión directa de los centros nerviosos, una ruptura bronquial o pleural, o una lesión de la membrana alveolo-capilar cuando el aire recalentado estalla.
- **Efectos neuro-sensoriales:** las lesiones oculares son sobretodo el desprendimiento de la retina y la catarata tardía que deben ser sistemáticamente buscadas. Las lesiones auditivas incluyen la ruptura del tímpano y los trastornos del equilibrio debidos al daño del laberinto.
- **Efectos musculares:** una ruptura muscular extensa con necrosis y rhabdomyolysis puede ocurrir en el trayecto de conducción.
- **Efectos renales:** hay principalmente tres consecuencias: una patología tubular debida a la lisis del músculo (el equilibrio fluido temprano es vital); una lesión parenquimatosa debida a una trombosis arterial; una lesión traumática.
- **Lesiones cutáneas:** quemaduras de todos los grados, en particular en los puntos de entrada de la corriente y en los puntos en contacto con el metal.

A.41.- El siguiente es un fragmento de los diálogos de la película MATRIX en la que Morfeo explica la verdadera situación a Neo:

“Una singular conciencia que generó toda una raza de máquinas. No sabemos quién atacó primero, nosotros o ellas. Pero sí sabemos que nosotros arrasamos el cielo. En aquella época, dependían de la energía solar. Y se creía que no podrían sobrevivir sin una fuente de energía, tan abundante como el sol. A lo largo de nuestra historia hemos dependido de las máquinas para sobrevivir (RIE) El destino, al parecer no está carente de cierta ironía. **El cuerpo humano genera más bioelectricidad que una pila de ciento veinte voltios** y más de veinticinco mil julios de calor corporal. Combinado con una forma de fusión, las máquinas habían encontrado toda la energía que podían necesitar. Existen campos, Neo interminables campos donde los seres humanos ya no nacemos. Se nos cultiva. Durante mucho tiempo me negué a creerlo. Y entonces vi los campos con mis propios ojos. Vi cómo licuaban a los muertos para administrárselos por vía intravenosa a los vivos. Y estando allí contemplando su pura y horripilante precisión me di cuenta de lo obvia que era la verdad ¿Qué es Matrix? Control Matrix es un mundo imaginario generado por ordenador construido para mantenernos bajo control **y convertir a un ser humano en ESTO.**”



Analiza el texto y señala ideas que creas no están de acuerdo con los conceptos e ideas que has estudiado. Desde el conocimiento actual, ¿es previsible el futuro descrito en MATRIX? Justifica tu respuesta.

Comentarios A.41: La ciencia-ficción interesa a muchos, puede estimular la imaginación, simplificar cuestiones complejas o a inquietar ante lo desconocido. Las clases de ciencias pueden servir para paliar la indefensión que puede provocar determinados planteamientos pseudo científicos. Algunas situaciones presentadas en el cine, pueden servir también para afianzar y evaluar conocimientos aprovechando además momentos de máxima motivación por parte de los estudiantes. En el fragmento que se trae a colación se pueden destacar algunos errores.

Para empezar la diferencia de potencial entre los electrodos de las pilas, hasta ahora no se han podido conseguir d.d.p. superiores a los 4 voltios. De forma teórica se hacen extrapolaciones que permiten calcular pilas con una d.d.p. entre cátodo y ánodo de unos 7,5 voltios para lograrlo habría que usar un ánodo de estroncio (Sr) y un cátodo de fluoruro de xenón (XeF) en un hipotético disolvente que no fuera atacado por dichos compuestos. De forma que con el conocimiento actual no tiene sentido hablar de una pila de 140 voltios. Sin embargo, alguien podría argumentar que en el mercado hay pilas de 9 voltios (o incluso más). Las pilas de nueve voltios en realidad son 6 pilas normales de 1,5 voltios, conectadas en serie. La propiedad característica de la pila que venimos llamando fem, entre otras propiedades determina la d.d.p. máxima que puede medirse entre sus electrodos, lo que depende de la naturaleza de las sustancias que reaccionan en la misma. Creemos que este momento es el más adecuado para abordar este aspecto, pero todo dependerá de cómo hayan transcurrido las sesiones de discusión con los alumnos.

Otro error, es mezclar energía y voltaje. Suponiendo que estemos hablando de un conjunto de pilas, capaz de proporcionar 140 voltios, la energía desarrollada (en realidad transformada) por dicho conjunto puede ser mucha o poca en función de la capacidad que tenga. La potencia se mide como el producto entre la intensidad y la d.d.p.; y la energía que pueda proporcionar depende del tiempo de funcionamiento. Así, aunque un conjunto de pilas tenga un voltaje de 140 V, si solo dura un par de segundos no es útil. De la misma forma, si

dura mucho pero la intensidad que puede proporcionar es pequeña, la utilidad también se ve muy limitada.

Y finalmente llegamos al punto más conflictivo, el tema de la bioelectricidad. En el cuerpo humano se produce numerosas reacciones electroquímicas, pero no es posible coordinarlas para lograr un funcionamiento similar al de una pila convencional donde se consigue un flujo de electrones por un cable conductor. Hay corrientes eléctricas en movimiento, por ejemplo en los nervios; pero las intensidades son bajísimas, ya que estos flujos se utilizan para transmitir señales, no energía. Y también se podría argumentar que estas señales se coordinan para producir energía, como es el caso de los músculos. Sin embargo, no se trata de energía eléctrica sino energía interna (energía química debida a un cambio en la posición de las moléculas). Para almacenar energía eléctrica deberíamos disponer de unas células especializadas, llamadas electrocitos, (lo que no es previsible que suceda en el futuro de los próximos cientos de años dado el sentido de la evolución actual en el género humano). Este es el caso de las anguilas, torpedos o rayas eléctricas. Estos peces poseen un órgano especializado, formado por este tipo de células, las cuales son capaces de producir una descarga eléctrica sincronizada equivalente a la de una diferencia de potencial de más de 600 voltios (durante un corto instante de tiempo).

Por lo tanto podemos afirmar que el futuro descrito en Matrix, al menos desde el punto de vista electroquímico, es muy difícil que pueda tener lugar algún día.

APÉNDICE

¿CÓMO CONECTAR LOS ELEMENTOS PARA LOGRAR CIRCUITOS EFICACES?

*Hace muchos años que los científicos saben que existen materiales buenos conductores de la propiedad que llamamos carga eléctrica y otros que no. Pero, **¿permiten todos los conductores el paso de la corriente de la misma forma? ¿Cómo disponer los conductores en un circuito para que el funcionamiento de éste sea el más eficaz?** Preguntas como estas trató de contestar un científico alemán, llamado Georg Simon **Ohm**, a principios del siglo XIX.*

En las actividades de esta sección los estudiantes ya han construido el modelo explicativo de circuito basado en un contexto **microscópico** (movimientos de cargas) y relacionadas con magnitudes **macroscópicas** como d.d.p., f.e.m., intensidad de corriente. En esta sección se trata de establecer algunas relaciones entre magnitudes macroscópicas con el interés de hacer circuitos eficaces. Así pues las actividades van dirigidas a la utilización del análisis de variables dos a dos, dejando la tercera variable siempre fija. La investigación didáctica ya ha mostrado que los estudiantes suelen tener dificultades en el análisis de variables, y pensamos que las actividades que siguen pueden ser una buena ocasión para ir superando estas dificultades.

Es preciso dejar bien claro desde el principio que el análisis de variables se circunscribe **SÓLO a UNA PARTE DEL CIRCUITO, LA PILA NO ENTRA.**

1. Se deja constante la pila y se analiza la resistencia para optimizar la intensidad:
 $I = f(R)$ (A.1)

2. Se deja constante la resistencia y se varía la d.d.p. para optimizar la intensidad $I = f(V)$ (A.2). Se define la ley de Ohm
3. Se define la resistencia R (A.3)
4. Se practica análisis de variables con la ley de Ohm. Se deja constante d.d.p. (A.4a). Se deja constante R (A.4b).
5. Se analizan como cambian las variables dependiendo de la forma de colocación de resistencias. Aquí además del análisis de variables es necesario aplicar el modelo explicativo del circuito (cuánta intensidad circula por cada rama y por qué) A.5, A.6, A.7.

A.1.- Con una pila que te proporcionará el profesor, cables de distinta naturaleza y tamaño y un amperímetro responde a una pregunta similar a la que trató de contestar Ohm: Con una sola pila ¿qué características debe tener el cable para conseguir la máxima intensidad de corriente?

Comentarios A.1: Al restringir el problema a una sola pila estamos fijando la d.d.p. y estamos acercando el planteamiento del problema a una solución tecnológica del mismo: ¿En qué condiciones para una pila la intensidad es la mayor posible? Las “condiciones” es un problema de la clase de materiales empleados y de cómo los disponemos, longitud, grosor, lo cual puede entenderse como un asunto básicamente tecnológico. Se pueden emplear cables de cobre y níquel del mismo grosor para poner de manifiesto la naturaleza del conductor en el valor de la intensidad.

Luego se pueden utilizar cables de la misma naturaleza y distinta longitud y posteriormente de la misma naturaleza e igual longitud pero de distinto grosor. Los valores de las dimensiones deben ser suficientes como para que su variación pueda apreciarse con claridad: Valores de longitud doble, triple, etc. e igual con el grosor.

En la actualidad el interés de la enseñanza de la ley de Ohm pensamos que está más relacionado con la tecnología que con su enjundia conceptual. Históricamente sintetizaba lo que fue la primera teoría sobre la conducción eléctrica y posteriormente sus resultados permitieron a Kirchhoff avanzar en la elaboración de las teorías eléctricas y en el establecimiento de la ley de la conservación de la energía. Merece la pena señalar que Ohm cuando en 1825 comienza sus investigaciones acerca de la conductividad de varias clases de hilos de materiales conductores, los conceptos de la electricidad, que entonces no era otra que la Electroestática, no se habían extendido a lo que hoy serían los circuitos (todo esto se conocía como galvanismo). En esta época galvanismo y electricidad eran dos campos teóricos, sobre todo fenomenológicos, diferentes. Sólo cuando galvanismo y electricidad estática se entendieron como manifestaciones diferentes de la misma propiedad de la materia el trabajo de Ohm fue tomado en consideración y se reconoció el mérito del mismo.

Lo que hoy conocemos como ley de Ohm $I = \Delta V/R$, es una adaptación de las investigaciones de este físico alemán al bagaje conceptual disponible casi cuarenta años después de la publicación de sus trabajos. En tiempos de Ohm el concepto de intensidad de corriente eléctrica no existía ni estaban disponibles los aparatos para su medida, si acaso aparatos precursores; ni el concepto de diferencia de potencial era aplicable al galvanismo, que como se ha dicho no se concebía como una parte de la electricidad. Tampoco existían voltímetros ni precursores de los mismos. Ohm medía “fuerzas electroscópicas” para lo que utilizaba un electroscopio, posteriormente Kirchhoff, en el curso de sus investigaciones, identificó la diferencia de potencial con la fuerza electroscópica de Ohm y es cuando Ohm, ya anciano, alcanza la fama y el reconocimiento.

A.2.- Si se puede cambiar la diferencia de potencial a la que se conecta un conductor (por ejemplo, conectándolo a diferentes pilas) ¿cómo varía la intensidad para un mismo conductor?

a) Propón una ecuación que relacione la *ddp* (ΔV_{AB}) entre los puntos A y B (en los extremos del conductor) y la intensidad de corriente I en cualquier punto de ese conductor.

b) Diseña y lleva a cabo una experiencia que permita comprobar si la expresión propuesta se cumple.

Comentarios a.2: a) Después de la realización de la actividad anterior, es previsible que los estudiantes propongan la ecuación de la ley de Ohm, bien en la forma $I = \Delta V/R$ o en la forma $\Delta V = I \cdot R$.

b) El diseño de la experiencia debe incluir la variación de la d.d.p. para estudiar su influencia sobre la intensidad I , manteniendo constante la naturaleza del conductor. La variación de la diferencia de potencial se puede lograr cambiando el número de pilas asociadas en serie o con un rectificador que permita salidas de diferencia de potencial a distintos valores. Esto último es muy cómodo pero el profesor debe ser consciente de que para los estudiantes inicialmente es una caja negra.

Buscamos un resultado cualitativo, a medida que aumentamos el valor de la diferencia de potencial (el número de pilas en serie) aumenta el valor de la intensidad que medimos. Esto es un resultado interesante: La intensidad depende de la diferencia de potencial entre los extremos del conductor, los estudiantes suelen creer lo contrario. La intensidad de corriente que circula por un conductor es directamente proporcional a la diferencia de potencial entre sus extremos: $I = K \cdot \Delta V$. Ohm experimentalmente encontró la relación $I = |\Delta V|/R$.

Anotarán los datos en una tabla previamente construida por ellos. Conviene discutir que variable se pondrá en abscisas y cuál en ordenadas; es decir, cuál es la variable independiente y cuál la dependiente, así como las implicaciones de tal decisión a la hora de interpretar el funcionamiento del circuito. Finalmente, conviene comprobar si la gráfica obtenida es la esperada y de esta forma dejar contrastada la hipótesis.

Es importante que el profesorado insista a los estudiantes sobre el hecho de que es una relación que se cumple sólo de manera aproximada (ya que la temperatura influye en la conducción) y para el caso de algunos materiales, que se denominan óhmicos. En ningún caso se trata de una ley de validez general, como puede serlo la ley de la gravedad o la Conservación de la Energía.

En los libros de texto la ley de Ohm suele estudiarse justo antes de realizar el estudio de los circuitos eléctricos. La conclusión de esta ley es que si entre los extremos a y b de un conductor de resistencia R , existe una diferencia de potencial electrostático que representamos por ΔV , pasará una corriente de intensidad I , la relación entre las tres magnitudes viene dada por la ecuación $I = \Delta V/R$, con frecuencia escrita en la forma: $\Delta V = I \cdot R$.

A.3.- a) ¿Qué significa que la constante R de la ecuación anterior tenga un valor grande o pequeño?

b) ¿Cómo definirías el ohmio a partir de la ecuación que has obtenido?

Comentarios a.3: Cuanto mayor es la constante, menor es la intensidad de corriente que circula para una d.d.p. dada. De manera que el valor de la constante es un índice de la

dificultad que opone el conductor al paso de la corriente, de aquí que se le dé el nombre de resistencia eléctrica (R).

En la segunda parte de la actividad se trata de definir una magnitud derivada de otras dos. Se busca una definición del tipo: “la resistencia de un conductor por el que circula una intensidad de un amperio cuando entre sus extremos hay una d.d.p. de un voltio”. Debe evitarse una definición del tipo: $1\Omega = 1\text{ V} / 1\text{ A}$.

A.4.- En la dirección: http://www.walter-fendt.de/ph11s/ohmslaw_s.htm encontraras un applet acerca de la ley de Ohm. Lee las indicaciones que allí encontrarás, ten en cuenta que lo que se denomina tensión es lo que conoces como diferencia de potencial. Luego contesta las siguientes cuestiones:

a) Para un valor constante de la d.d.p. V , ¿qué indica el amperímetro cuando se aumenta el valor de la resistencia? Comienza por ejemplo con un valor de $800\ \Omega$ para la resistencia.

b) Pon a cero los valores de I y de V , para un valor de $R = 200\ \Omega$ ¿Qué sucede con los valores de I cuando vas aumentando los de V ? Recoge dichos valores en una tabla.

Otras direcciones que puedes visitar sobre el mismo tema son:

<http://jersey.uoregon.edu/vlab/Voltage/>

[Simulador de la ley de Ohm de la Universidad de Oregon](http://usuarios.lycos.es/pefeco/leyohm/leyohm.htm)

<http://usuarios.lycos.es/pefeco/leyohm/leyohm.htm>

Comentarios A.4: El interés del estudio de la ley de Ohm a nivel didáctico reside en sus posibilidades de manipulación experimental, establecimiento de relaciones entre magnitudes, realización de gráficos, etc. Mucho de este trabajo puede realizarse de forma individualizada a través de programas de simulación informáticos. Estos son los objetivos de esta actividad que aprovecha unos recursos que interesan al alumnado. El profesorado debe hacer un seguimiento y evaluación de este tipo de actividades para evitar que los estudiantes se queden en lo anecdótico del recurso.

A.5.- Conectamos una plancha a un voltaje de 220 V y comprobamos que la intensidad en la misma es de 4 A .

a) Calcula la resistencia de la plancha.

b) Si se conecta la plancha a 125 V , ¿cuál es la resistencia de la plancha?, ¿qué intensidad habrá ahora en un punto de la resistencia de la plancha?

c) Si conectamos una bombilla a 220 V , ¿la intensidad en la bombilla será 4 A ?

Comentarios A.5: Se trata de una actividad para que apliquen las ideas y relaciones estudiadas y se ejerciten en la utilización de las mismas en situaciones reales.

a) $I = |\Delta V| / R$, a partir de la ecuación se obtiene para R el valor: $55\ \Omega$

b) La resistencia de la plancha, o en el caso de una bombilla de la bombilla, es una propiedad característica de la plancha o del artilugio de que se trate, por tanto su valor no dependerá de la diferencia de potencial a la que se conecte. Si la plancha funciona correctamente para los valores de las magnitudes en el caso a) su resistencia será de nuevo $55\ \Omega$, y por tanto $I = 125/55 = 2,27\text{ A}$.

c) Dependerá del valor de la resistencia de dicha bombilla.

Por la razones expuestas anteriormente creemos que el profesorado al final de estas actividades y en su evaluación debe asegurarse de que los estudiantes comprenden que:

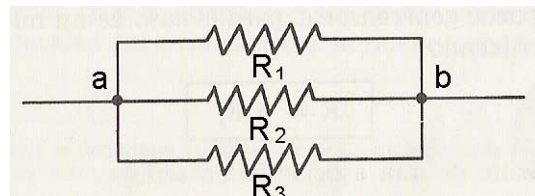
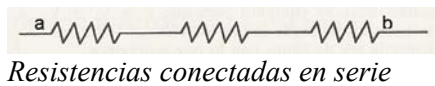
La relación conocida como ley de Ohm $I = |\Delta V|/R$ es sólo aplicable a conductores. Esta fórmula no representa un principio ni una ley fundamental de la física. Representa sólo una relación (aproximada) que se cumple en algunos materiales, los llamados óhmicos.

A.6.- Las bombillas son conductores con una cierta resistencia.

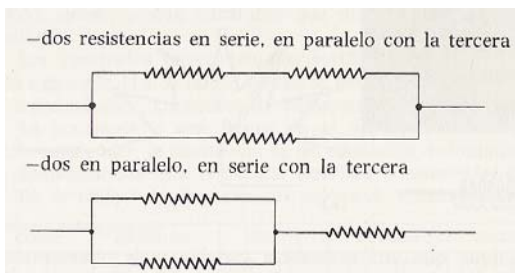
- Dibuja un esquema en el que se refleje las formas distintas en las que pueden conectarse tres resistencias (o tres bombillas).
- Dibuja también un esquema en el que se represente cómo pueden conectarse tres pilas.

Comentarios A.6: Los estudiantes previsiblemente propondrán esquemas como los siguientes:

a)

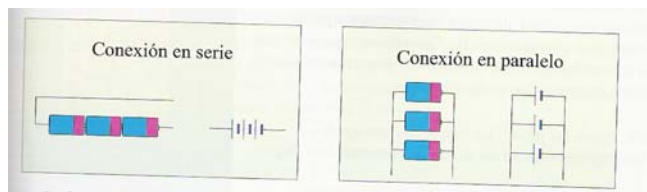


O incluso como los siguientes:



Todos son válidos pero nos referiremos a la hora de hacer las consideraciones al primer y segundo esquema, ya que el tercero no es más que un híbrido de los dos primeros.

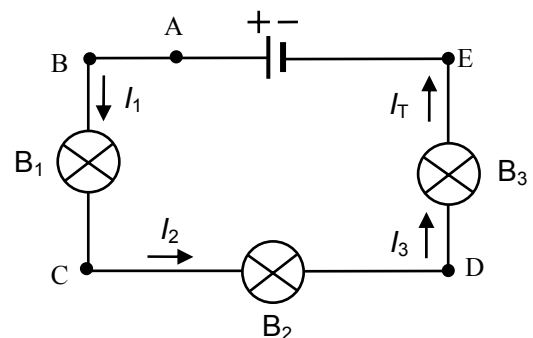
b) Si bien algunos alumnos pueden dibujar un esquema mixto serie-paralelo, las conexiones por las que se les pregunta son las siguientes:



En la asociación en serie las cargas pasan por cada una de las pilas por lo que recibirán energía de cada una de ellas. En la asociación en paralelo sólo reciben de uno de los generadores. Cuando los aparatos funcionan con pilas, estas suelen estar conectadas en serie. Cuando hay pilas conectadas en paralelo es porque se pretende que el circuito esté funcionando durante mucho tiempo sin tener que cambiarlas.

A.7.- Las bombillas de circuito son diferentes y están conectadas en serie.

- ¿Cómo serán los valores de I_1 , I_2 , I_3 e I_T ? Dibuja un esquema que represente el montaje necesario para comprobar tus predicciones.
- ¿Qué sucedería si desconectas una de las bombillas del circuito?



c) ¿Cuánto valdría la resistencia total de las bombillas en el circuito? ¿Cómo lo comprobarías experimentalmente?

Comentarios A.7: a) En coherencia con lo que se ha visto en la actividad 24 anterior y si se cumple el principio de conservación de la carga debe suceder que $I_1 = I_2 = I_3 = I_T$. El esquema puede contener un amperímetro antes de B1 y otro después de B3, con lo que se comprueba que la intensidad antes y después de las bombillas es la misma. Pero también podrían intercalar un amperímetro entre cada dos bombillas.

b) Al desconectar una bombilla del circuito todas las demás se apagarán ya que la operación es equivalente a cortar el circuito.

c) En la agrupación en serie puesto que por todas pasa la misma intensidad ocurrirá que $I_1 = I_2 = I_3 = I_T$. Cada unidad de carga que pasa por cada una de las resistencias o bombillas transformará una cantidad de energía, la misma en cada bombilla, es decir, entre cada bombilla habrá una d.d.p. V_1, V_2, V_3 , de forma que $V_1 + V_2 + V_3 = V_{ab}$. Ahora aplicando la ley de Ohm a cada una de las resistencias tenderemos:

$$RI_T = R_1I + R_2I + R_3I + \dots \text{ de donde } R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$

Expresión que puede generalizarse, para un número cualquiera de resistencias, escribiendo:

$$R_{\text{equivalente}} = \sum R_n$$

La **resistencia equivalente** de una combinación de resistencias R_1, R_2, R_3, \dots sería la resistencia que introducida en el circuito en vez de R_1, R_2 , etc, no modifica los valores de la intensidad.

Se trata de que apliquen lo que han visto en la actividad anterior $R_T = R_1 + R_2 + R_3$. Este valor se puede determinar por medidas (aproximadas) conocidos los datos de I_T y mediante la medida de la d.d.p. entre los extremos de la pila, aplicando la ley de Ohm.

A.8.- En la figura las bombillas son diferentes y están conectadas en paralelo.

a) ¿Cómo serán los valores de I_1, I_2, I_3 e I_T ? Dibuja un esquema que represente el montaje necesario para comprobar experimentalmente tus predicciones.

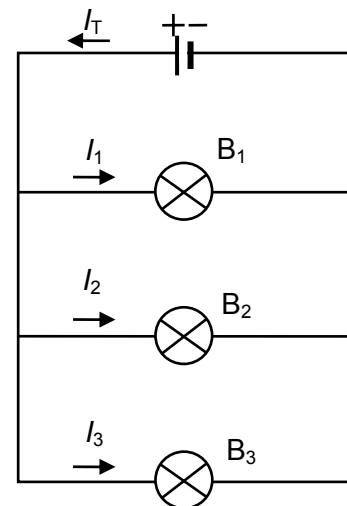
b) ¿Qué sucedería si desconectas una de las bombillas del circuito?

c) ¿Cuánto valdría la resistencia total de las bombillas en el circuito? ¿Cuándo es mayor en el circuito en serie o en éste?

Comentarios A.8: a) Se trata de una aplicación de lo estudiado en la actividad anterior. Los amperímetros habría que intercalarlos junto a B1, B2 y B3 respectivamente.

b) Ahora al desconectar una bombilla las otras dos no se quedan en ningún circuito abierto por lo que seguirán brillando.

c) De nuevo habría que proceder como en la actividad anterior, es decir se calcula a partir de los datos de los valores de la d.d.p. medida entre los electrodos de la pila y la I_T . Se



trata de destacar el hecho de que la resistencia equivalente en este caso es menor que en el caso en el que las bombillas se conectan en serie.

En el caso de una conexión en paralelo, todas las resistencias (o bombillas) están conectadas a la misma diferencia de potencial $V_{ab} = V_1 = V_2 = V_3$ y la intensidad será $I_T = I_1 + I_2 + I_3$. Y expresando ahora I en función de R mediante la ley de Ohm, tendremos:

$$\frac{V_{ab}}{R} = \frac{V_{ab}}{R_1} + \frac{V_{ab}}{R_2} + \frac{V_{ab}}{R_3} \text{ y en general } \frac{1}{R} = \sum \frac{1}{R_n}$$

A.9.- Contesta a las siguientes cuestiones:

- ¿Es posible la existencia de ddp entre dos puntos sin que exista intensidad de corriente entre esos dos puntos? Explica la respuesta con algún ejemplo.
- ¿Es posible que exista intensidad de corriente entre dos puntos de un conductor aunque la diferencia de potencial entre esos dos puntos sea nula? Pon algún ejemplo.
- ¿Es correcto decir que la intensidad de corriente en un conductor con resistencia R produce diferencia de potencial entre dos puntos de ese conductor?
- ¿Se cumple la ley de Ohm para cualquier elemento del circuito? Explica la respuesta.

Comentarios A.9: a) Si es posible, por ejemplo entre los “casquillos” de un portabombillas en el que no se ha colocado una bombilla, también entre los electrodos de una pila que no se ha conectado a ningún circuito.

b) No es posible poner ningún ejemplo de este caso, las cargas sólo se mueven entre dos puntos si hay una $d.d.p.$ entre esos dos puntos.

c) Se trata de recalcar las relaciones de causa-efecto entre la $d.d.p.$ y la intensidad. Queremos dejar claro que, en el tipo de circuitos que estudiamos, la causa de una corriente es la diferencia de potencial y no alrevés. En el caso de la mecánica la pregunta podría ser ¿puede una aceleración dar lugar a la aparición de una fuerza?

d) Si el elemento es un material de los llamados óhmicos sí, si no es óhmico no se cumple.

7.3 Diseños centrados en el aprendizaje logrado con la alternativa didáctica propuesta

Nuestra segunda hipótesis predice que el programa alternativo de enseñanza que hemos presentado y aplicado en clase con grupos experimentales, producirá una mejora en los indicadores que caracterizan el aprendizaje significativo de los conceptos y procedimientos empleados en la descripción/interpretación de los circuitos eléctricos de corriente continua.

Esta hipótesis será contrastada mediante los diseños que a continuación se describen:

- Diseños centrados en aprendizaje de conceptos y procedimientos, para lo cual se han diseñado una serie de nuevos ítems para lo que se ha seguido el mismo procedimiento que se describió cuando se presentaron los diseños que se emplearon en la operativización de la primera hipótesis, es decir, se validaron las preguntas con respecto a su pertinencia o no, mediante el juicio de otros investigadores y profesores expertos, algunos de ellos incluso ajenos a la propia investigación (cuadro 7.1, p- 329). Esto fue necesario ya que no todos los ítems empleados allí eran pertinentes para estudiantes de primero de Bachillerato, si bien algunos de ellos en su totalidad o en parte se recogían en el enunciado de los que se presentaban en los cuadros de 4.8 a 4.11.
- Diseños de entrevistas centradas en el aprendizaje de procedimientos y conceptos, para lo que nos hemos basado en los documentos que se recogen en los cuadros 4.8 a 4.11. Las entrevistas se mantuvieron con algunos de los estudiantes de los grupos experimentales, con este instrumento se pretendía evaluar aspectos que incidían de forma más específica en el diseño y toma de medidas empíricas de algunas magnitudes implicadas en la descripción del funcionamiento de los circuitos. Y que se describen en el cuadro 7.2.
- Diseños centrados en aspectos actitudinales y que se recogen en el cuadro 7.4, que evalúa tres dimensiones diferentes: los contenidos, la forma de trabajo en el aula y la satisfacción con la que se ha trabajado en clase.

Para evaluar los contenidos conceptuales de los grupos experimentales, se ha tenido en cuenta el modo y la profundidad del aprendizaje en relación con los cuatro niveles (recordar, comprender, aplicar y deducir) que recomienda Kempa (1986). En concreto:

Nivel 1: Conocimiento y recuerdo de hechos, hipótesis, teorías, terminología y convenciones científicas.

Nivel 2: Comprensión de los conocimientos científicos y sus relaciones, manifestada en la capacidad para explicar e interpretar la información presentada y expresarla en diferentes formas.

Nivel 3: aplicación del conocimiento científico a situaciones nuevas, lo que implica la capacidad de seleccionar entre conocimientos los adecuados para resolver la nueva situación.

Nivel 4: Análisis, síntesis y evaluación de la información científica que implica descubrir sus constituyentes (análisis), reorganizarlos en nueva estructura (síntesis) y juzgar a cerca de su validez científica.

Los contenidos procedimentales son aquellos relacionados con el trabajo científico como podrían ser: observación, descripción y modelización de fenómenos, obtención y clasificación de datos, control de variables para el diseño de investigaciones, elaboración de estrategias tanto descriptivas como explicativas, conocimiento de técnicas de trabajo y manipulación de aparatos, análisis de resultados... aspectos que, sin lugar a dudas, contribuyen al éxito académico (Duschl 1995-b, Álvarez 1997, Guisasola et al 2002-b)

La evaluación de la ejecución de técnicas de laboratorio exige la observación directa cuando la acción está teniendo lugar, pero las capacidades cognitivas que forma parte de la metodología de la investigación pueden evaluarse mediante pruebas de lápiz y papel (Olivares, 1995).

7.3.1. Diseños de los grupos experimentales

Entendemos que es condición previa para cualquier tipo de intervención destinada a mejorar el aprendizaje que, las propuestas se lleven a cabo en las

condiciones usuales establecidas por el Centro, Departamento, etc., para la organización de la docencia.

Quiere esto decir que, tanto los grupos experimentales con los que se ensayen las propuestas alternativas, como aquellos grupos que sean empleados de control, estarán ya constituidos sin que haya habido ninguna selección de estudiantes por nuestra parte. Ello conlleva el mismo temario y el mismo tiempo para impartirlo así como la misma atención por parte del profesorado, etc. Hay al menos dos razones que hacen evidente esta premisa. En primer lugar, las eventuales mejoras que pudieran detectarse tras una intervención didáctica llevada a cabo en condiciones significativamente mejores a las usuales podrían atribuirse en buena medida a tales condiciones, más que al propio modelo experimental. En segundo lugar, deben poderse llevar a cabo por parte de cualquier otro equipo investigador, de modo que deban minimizarse las exigencias de aplicación.

La alternativa elaborada ha sido empleada por cinco profesores a fin de evitar en lo posible el efecto Hawthorne (las cosas salen mejor cuando las hace el mismo que realiza la propuesta innovadora).

La propuesta didáctica alternativa ha sido aplicada por cinco profesores en cuatro centros, uno de ellos de la red concertada y tres Institutos de Secundaria de la red pública durante los cursos 2003-2004 y 2004-2005, se trataba de grupos que cursaban primero de Bachillerato (con un número de alumnos que oscilaba entre 25 y 30) de ciencias de la Salud y dos grupos del Bachillerato tecnológico, lo que influyó solo en una serie de actividades adicionales que los profesores de esta última opción añadieron al programa guía consensuado.

El diseño para evaluar el aprendizaje logrado por los grupos experimentales se ha pasado durante los dos cursos, como parte de la prueba para evaluar el tema (en el caso de los dos profesores de los grupos del Bachillerato tecnológico) o como único examen de la misma. En los cuadros siguientes se recoge la prueba diseñada.

Cuadro 7.1 Prueba de evaluación para los indicadores aprendizaje (Documento 1)

Ítem nº 1.- Si una carga eléctrica se desplaza entre los dos electrodos de una pila:

- Variará la fuerza electromotriz de la carga.
- Variará la diferencia de potencial de la carga.
- Ninguna de las magnitudes anteriores.

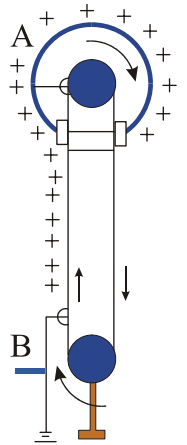
Justifica tu respuesta

Ítem nº 2.- En un generador de Van der Graaf la fricción de una cinta de material aislante en movimiento, con una escobilla B situada en la parte inferior, hace que la escobilla B quede cargada negativamente y la cinta positivamente. Las cargas positivas son transportadas por la propia cinta y liberadas mediante una segunda escobilla, sobre una esfera metálica hueca situada en la parte superior.

- ¿Puede ser correcta la afirmación?: “Si unimos los puntos A y B mediante un conductor externo, podríamos tener una corriente”.

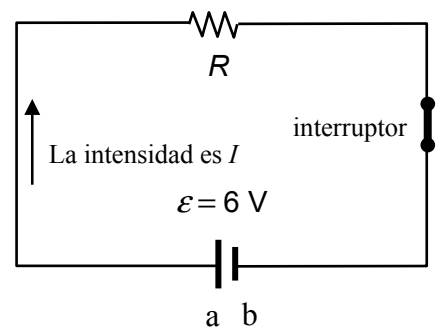
Justifica tu respuesta

- Identifica las fuerzas eléctricas coulombianas y no coulombianas que se pueden distinguir en un generador de Van der Graaf.
- ¿Qué efectos producen unas y otras en este caso?



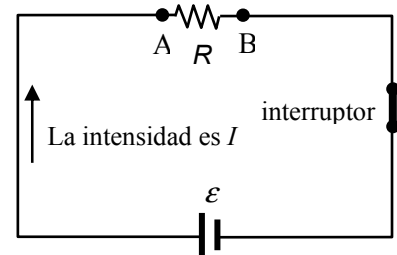
Ítem nº 3.- En relación con el funcionamiento de un circuito como el de la figura:

- Explica cómo se produce la diferencia de potencial entre los electrodos a y b de la pila.
- Explica qué relación hay entre el valor de la fuerza electromotriz y la diferencia de potencial entre los electrodos a y b de la pila. **Justifica tu respuesta.**
- ¿En qué condiciones es máxima la diferencia de potencial $V_a - V_b$?
¿Cuál sería su valor?



Ítem nº 4.- El circuito de la figura está cerrado y se supone **despreciable** el valor de la resistencia interna de la pila. $V_{AB} = (V_A - V_B)$ representa la diferencia de potencial en los extremos de la resistencia R.

- ¿Este circuito se representa por las ecuaciones: $V_{AB} = IR$ y $\varepsilon = IR$ o sólo por una de ellas?
- ¿Qué expresaría cada una?
- ¿Qué diferencia hay entre ambas ecuaciones?



Ítem nº 5.- Explica si son correctas o incorrectas las afirmaciones siguientes, referidas a un circuito como el representado en la pregunta 4.

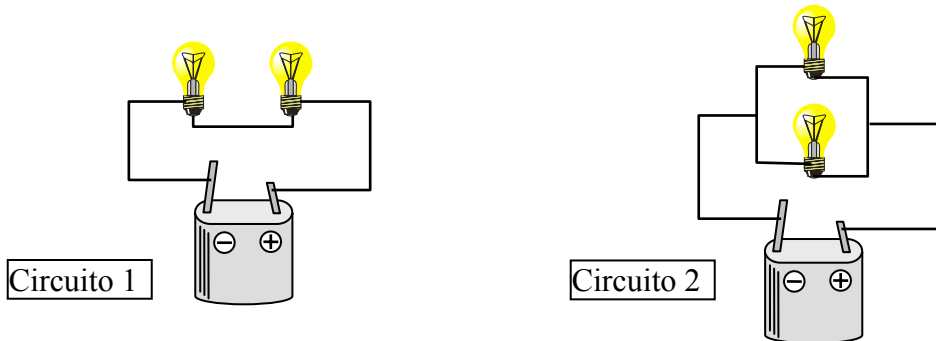
- La ley de Ohm ($V_{ab} = I \cdot R$) representa y permite cuantificar el Principio de Conservación de la Energía.
- El principio de Conservación de la Energía en este sistema se explica y se cuantifica mediante los conceptos de fuerza electromotriz y diferencia de potencial. Propón en este caso la ecuación.

Cuadro 7.1 (continuación) Prueba de evaluación para los indicadores aprendizaje (Documento 1)

6.- Las bombillas y pilas que participan en los dos circuitos son iguales.

Indica si las proposiciones siguientes son correctas o incorrectas. Corrige aquellas que sean incorrectas.

a) La intensidad en la pila en ambos circuitos es la misma puesto que la fuerza electromotriz de ambas pilas es la misma.



b) La intensidad es la misma en las dos bombillas del circuito 1.

c) La intensidad es la misma en las dos bombillas del circuito 2.

d) La intensidad en las bombillas del circuito 1 es igual que la intensidad en las bombillas del circuito 2, pues tanto las pilas como las bombillas son iguales

7.- En el tema se han empleado las magnitudes fuerza electromotriz y diferencia de potencial. También se empleado los términos recogidos en la tabla siguiente.

Fuerza coulombiana	Fuerza no coulombiana	Propiedad de la Pila
Desplazamiento de cargas	Separación de cargas	Energía
Energía transformada fuera de la pila	Energía transformada en la pila	Unidad de carga

a) ¿Con qué términos recogidos en la tabla está relacionada la fuerza electromotriz? Justifica cada una de las relaciones que establezcas.

b) ¿Con qué términos recogidos en la tabla está relacionada la diferencia de potencial? Justifica cada una de las relaciones que establezcas.

8.- Señala, si las hubiera, las diferencias entre fuerza electromotriz (f.e.m ϵ) y diferencia de potencial (d.d.p. $V_A - V_B$)

PROTOCOLO PARA EL ANÁLISIS DE LAS RESPUESTA Y CORRECCIÓN DE LOS ÍTEMS DE LOS CUADROS 7.1 (I y II)

Con cada uno de ellos se pretendía evaluar alguno de los indicadores de aprendizaje que se presentaron en el capítulo segundo y por tanto los objetivos que se han explicitado en las tablas 7.3 a 7.7. Veamos de forma pormenorizada los criterios de evaluación de cada uno de los ítems.

Ítem n° 1. Este ítem es idéntico al ítem n° 3 del cuadro 4.8 (II), con el que se pretende evaluar las explicaciones que los estudiantes ofrecen en relación con el ámbito de aplicación de los conceptos estudiados, así como sus limitaciones. Los criterios de evaluación serán los mismos que se explicitaron allí. Con este ítem queríamos evaluar los indicadores de aprendizaje i6 e i7.

Ítem n° 2. Este guarda una notable semejanza con el n° 1 del cuadro 4.8 (I), sólo que ahora, después de hacer explícita la diferencia entre fuerzas coulombianas y no coulombianas en el proceso de enseñanza, se indaga si los estudiantes identifican las situaciones que, a nivel microscópico involucran a unas y otras y los efectos que a nivel macroscópico es posible señalar. Queríamos evaluar los indicadores i1 e i2.

Ítem n° 3. Queremos comprobar si la analogía mecánica para explicar el funcionamiento de la pila ha sido útil para que se comprenda, por parte de los estudiantes, cómo se produce la separación de cargas que origina la diferencia de potencial entre los electrodos de la pila. Del mismo modo si distinguen entre las magnitudes fuerza electromotriz y diferencia de potencial y por último si han aprendido las relaciones que existen entre ambas magnitudes y el resto de las magnitudes que describen el funcionamiento del circuito. Indicadores i2, i3, i4, i5.

Ítem n° 4. Existe de nuevo una gran analogía entre este enunciado y el del ítem n° 1 del cuadro 4.9. Las pequeñas diferencias en el enunciado se deben a que allí queríamos averiguar si se distinguía entre la ley de Ohm y la ecuación del circuito, y ahora, una vez que se ha estudiado explícitamente tal diferencia, queremos evaluar si se ha aprendido y se recuerda. Indicadores i6 e i7.

Ítem n° 5. De nuevo un ítem con un enunciado casi idéntico al n° 2 del cuadro 4.9, los criterios de corrección serán los mismos que se detallaron allí. Indicadores de aprendizaje i6 e i7.

Ítem n° 6. Queremos evaluar si los estudiantes distinguen entre fuerza electromotriz y diferencia de potencial, una de las manifestaciones de la confusión es identificar la noción de pila con una pila real, y de aquí fuerza electromotriz de la pila con diferencia de potencial entre sus electrodos. Queremos evaluar también si los

estudiantes han superado la idea de que las cargas se “gastan” a su paso por los elementos del circuito, en este caso las bombillas. La afirmación a) es falsa, el valor de la intensidad que pasa por un circuito no la determina la fuerza electromotriz de la pila, sino la configuración del mismo en el “exterior” de la pila; b) es cierta; c) también lo es, pero no por las mismas razones que b); d) es falsa. Indicadores i6 e i7.

Ítem 7. Se trata de evaluar el aprendizaje de las nociones de fuerza electromotriz y diferencia de potencial en sus relaciones entre ellas y otras magnitudes del circuito y conceptos estudiados en la electrostática. El esquema siguiente bien podría servir para evaluar las respuestas a los apartados a) y b).

fem (ϵ)	Propiedad de la pila	Fuerza no culombiana	Separación y desplazamiento de cargas	Energía y unidad de carga	Energía transformada en la pila
d.d.p. (V_{AB})	Fuerza culombiana	Desplazamiento de cargas	Energía y unidad de carga	Energía transformada fuera de la pila	

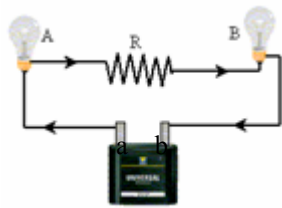
Indicadores de aprendizaje evaluados i1, i2, i3, i4, i5, i6, i7.

Ítem n° 8. Este ítem es idéntico al ítem n° 5 del cuadro 4.8 (II), los criterios de corrección pueden ser los mismos que se señalaron allí, solo que se ha concretado, dado el nivel de los estudiantes la noción de campos conservativos o no a la de fuerzas culombianas o no.

El indicador de aprendizaje i8, en relación con la contextualización de la teoría aprendida en sus relaciones C/T/S así como algunas otras cuestiones en relación con los procedimientos empíricos no se habían incluido en la prueba de evaluación para no hacerla excesivamente larga o porque nos parecía que algunos aspectos relacionados con actitudes, una prueba escrita podría limitar en exceso la información que nos ofreciera por lo que se diseñó una entrevista que nos permitiera profundizar en estas cuestiones.

Cuadro 7.2 Análisis/diseño experimental de circuitos y actitudes/relaciones C/T/S (Documento 2)

CUESTIONARIO PARA LA ENTREVISTA EN RELACIÓN CON EL ANÁLISIS/DISEÑO DE CIRCUITOS Y ASPECTOS CTS



1)

1.1) ¿Cómo están conectados los elementos de este circuito? ¿Cómo lo comprobarías?

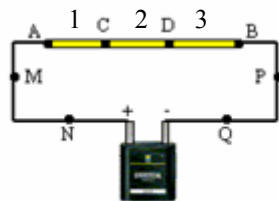
1.2) ¿Aumentará o disminuirá el brillo de las bombillas A y B a medida que aumentemos el valor de R? ¿Dependerá de si las bombillas son iguales o no?

1.3) ¿Qué sucederá con el valor de la fuerza electromotriz de la pila a medida que aumentemos el valor de la resistencia R?

1.4) ¿Qué podríamos hacer para tener un valor de R muy grande?

1.5) ¿Cómo mediríamos en ese momento el valor de la fuerza electromotriz de la pila?

2)



$\epsilon = 4,5 \text{ V}$

2.1) Si las resistencias 1, 2, 3 valen respectivamente 1,5 Ω . ¿Pueden ser ciertos los datos de la tabla siguiente?:

	Valores para la intensidad			Valores para la diferencia de potencial		
	Serie 1	$I_M = 1 \text{ A}$	$I_C = 0,9 \text{ A}$	$I_P = 0,7 \text{ A}$	$V_{AC} = 1,5 \text{ V}$	$V_{CD} = 1,5 \text{ V}$
Serie 2	$I_M = 0,92 \text{ A}$	$I_C = 0,92 \text{ A}$	$I_P = 0,92 \text{ A}$	$V_{AC} = 1,3 \text{ V}$	$V_{CD} = 1,3 \text{ V}$	$V_{DB} = 1,3 \text{ V}$

Justifica tus respuestas

2.2) Dibuja el esquema del circuito incluyendo los instrumentos que permitiesen medir las intensidades en los puntos indicados y las diferencias de potencial entre los puntos indicados.

2.3) Con el material que tienes encima de la mesa realiza el montaje de un circuito como el que has dibujado en el apartado anterior. Señala las dificultades que encuentres para ello.

3) Recientemente los medios de comunicación han ofrecido la noticia de que en nuestro país se estima que había en el año 2005 la cifra de 1,06 teléfonos móviles por persona. El 25% de los mismos se renueva cada año.

3.1) Analiza el dato anterior en relación con los residuos sólidos producidos en nuestro país en 10 años.

3.2) A partir de los resultados que obtengas valora de 0 a 5 las siguientes afirmaciones:

a) Para los ciudadanos es un derecho saber cómo y dónde se reciclan o se eliminan estos residuos.

b) Es mejor no saberlo ya que los ciudadanos en realidad no podemos hacer casi nada.

c) Es mejor confiar en que los avances tecnológicos resolverán favorablemente los problemas de reciclaje.

d) La tecnología parece mejorar la calidad de vida a primera vista, pero por debajo contribuye al deterioro del medio ambiente.

e) La tecnología proporciona a la sociedad los medios para mejorar o destruirse a sí misma, dependiendo de como se ponga en práctica.

PROTOCOLO DE CORRECCIÓN PARA LA ENTREVISTA EN RELACIÓN CON EL ANÁLISIS Y DISEÑO EMPÍRICO DE CIRCUITOS Y DE ACTITUDES ACERCA DE LAS RELACIONES C/T/S/I

Señalábamos en la consecuencia contrastable B2 que la enseñanza habitual no toma en consideración las dificultades procedimentales de los estudiantes. Derivadas de una escasa utilización de aspectos básicos de la metodología científica (planteamiento cualitativo del problema, emisión de hipótesis, diseño y realización de experimentos, análisis de los resultados...) que coadyuvan a un aprendizaje memorístico de los conceptos. En consecuencia, no hay explicaciones o actividades sobre los requisitos necesarios para analizar el modelo de corriente continua o para poder realizar predicciones con el modelo. Del mismo modo en la consecuencia contrastable B4 se señalaba que no se presta la atención a los aspectos motivacionales (C/T/S). Lo que conlleva una presentación descontextualizada socialmente de la Ciencia, ocasionando desinterés hacia el tema. Queríamos evaluar los hipotéticos progresos que en relación con estas dificultades experimentaban los estudiantes que seguían la alternativa didáctica diseñada.

La entrevista se desarrollaba en el laboratorio de Física o en las clases que los profesores nos proporcionaban pero en todos los casos se disponía de portalámparas, cables, bombillas, pilas de petaca de 4,5 voltios y varios modelos de amperímetros y voltímetros didácticos o polímetros comerciales. Los estudiantes tenían el cuestionario para que pudiesen recurrir a los enunciados cuantas veces desearan. Los estudiantes acudían a esta prueba voluntariamente para subir nota o recuperar algunas preguntas de la prueba no evaluada positivamente.

En relación con el **bloque A** de preguntas:

- 1) Los elementos están conectados en serie, expresamente buscábamos que la primera cuestión fuese fácil para evitar bloqueos debidos a la inseguridad.
- 2) El brillo disminuirá ya que la intensidad de corriente total por el circuito es menor, lo que no tiene nada que ver con el hecho de que las bombillas sean iguales o no.

- 3) El valor de la fem es una propiedad característica de la pila y no se ve alterado por la variación de los valores de la resistencia equivalente del circuito.
- 4) Se aceptaría como correctas respuestas del tipo: “aumentando la longitud del hilo que forma la resistencia o disminuyendo su sección o buscando una de material peor conductor.
- 5) Cuanto mayor es la resistencia menos es la intensidad que pasa por el circuito, podríamos llegar a tener una intensidad nula, y en este momento el valor de la diferencia de potencial medida entre los electrodos de la pila nos daría el valor de la fuerza electromotriz, como se desprende de la ecuación que relaciona estas magnitudes del circuito: $\varepsilon = V_{ab} + I \cdot r$

En relación con el **bloque B**:

1) En relación con la **serie 1** de medidas: Se trata de una serie de valores teóricos, a partir de los datos y siempre que se suponga que se trata de una pila ideal con valor nulo para su resistencia interna r . Los valores cada vez más pequeños de la intensidad de corriente se deberían a creer que las cargas se gastan a su paso por las resistencias 1 a 3. La diferencia de potencial entre los extremos de las resistencias debe ser el mismo, ya que las resistencias son iguales y su valor debe ser igual al valor de la ε de la pila.

En relación con la **serie 2** de medidas: Se trata de una serie de valores empíricos, con una pila que tendrá resistencia interna y unos conductores no ideales, que ofrecerán resistencia al paso de la corriente. La intensidad es la misma en todos los puntos pero es algo menor que la calculada teóricamente. Los valores de la diferencia de potencial entre los distintos puntos es la misma, pero su suma es algo menor que la fem de la pila, ya que $V_{ab} = \varepsilon - I \cdot r$, la diferencia de potencial ahora entre los electrodos de la pila no coincide con el valor de la fem de la pila.

2) Se trata de comprobar que los alumnos dibujen el amperímetro intercalado en serie en el circuito y el voltímetro en paralelo.

3) Los estudiantes deben realizar el correspondiente montaje experimental.

En relación con el **bloque C**:

Si suponemos que la masa media de las pilas de un móvil es de 50 g y el número de habitantes se estima en 44 millones de personas.

- El número de kg de pilas sería de $2.332.000 = 2.332 \text{ Tm} \approx 58$ camiones de 40 toneladas cada uno.

Si el 25% de esta cantidad se renueva cada año, se puede estimar que, manteniéndose estas cifras durante los próximos diez años la cantidad de residuos sólidos a reciclar serían:

- Número de toneladas en diez años: $5.830 \text{ Tm} \approx 146$ camiones de 40 toneladas cada uno.

A partir de esta estimación se pide a los estudiantes que valoren de 0 a 5, las cinco afirmaciones siguientes, en las que la escala va de: 1 totalmente en desacuerdo a 5 totalmente de acuerdo, pasando por indiferente 3.

7.3.1.1 Diseños para evaluar el aprendizaje a corto-medio plazo de las nociones implicadas en el concepto de fuerza electromotriz

Queríamos valorar el aprendizaje logrado por los estudiantes una vez que hubiese transcurrido un tiempo, lo suficientemente largo, como para minimizar los logros imputables a los recuerdos memorísticos. Para ello la misma prueba que se ha presentado en el cuadro 7.1 decidimos pasarla a los estudiantes en el mes de junio, a los tres meses de finalizar el estudio de la unidad didáctica y preparamos una adaptación de dicha prueba, que permitiese evaluar todos los indicadores que habíamos establecido, pero sin entrar en la pormenorización que por razones obvias habíamos incluido en la prueba del documento 1. Presentamos a continuación dicha prueba y los protocolos para el análisis de las respuestas.

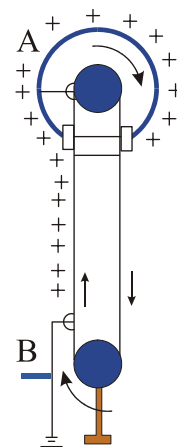
Cuadro 7.3 Prueba de evaluación pasada al principio del curso siguiente (Documento 3)

Ítem nº 1.- Si suponemos que una carga eléctrica se desplaza entre los dos electrodos de una pila, ¿cuál de las siguientes magnitudes variará en la carga?: La fuerza electromotriz, la diferencia de potencial, la energía potencial. **Justifica tu respuesta.**

Ítem nº 2.- En un generador de Van der Graaf la fricción de una cinta de material aislante en movimiento, con una escobilla B situada en la parte inferior, hace que la escobilla B quede cargada negativamente y la cinta positivamente. Las cargas positivas son transportadas por la propia cinta y liberadas mediante una segunda escobilla, sobre una esfera metálica hueca situada en la parte superior.

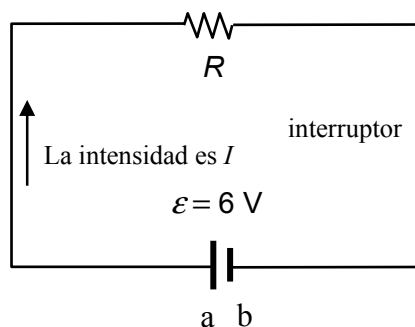
¿Puede ser correcta la afirmación?: “Si unimos los puntos A y B mediante un conductor externo, podríamos tener una corriente”.

Justifica tu respuesta



Ítem nº 3.- En el circuito como de la figura:

a) **Explica** cómo se produce la diferencia de potencial entre los electrodos a y b de la pila.



4.- Lee atentamente los términos recogidos en la tabla siguiente:

Fuerza culombiana	Fuerza no culombiana	Propiedad de la Pila
Desplazamiento de cargas	Separación de cargas	Energía
Energía transformada fuera de la pila	Energía transformada en la pila	Unidad de carga

a) Con cuales de ellos está relacionada la fuerza electromotriz?

b) ¿Con cuales de ellos está relacionada la diferencia de potencial?

Justifica cada una de las relaciones que establezcas.

PROTOCOLO PARA EL ANÁLISIS DE LAS RESPUESTA Y CORRECCIÓN DE LOS ÍTEMS DEL CUADRO 7.3

En esta ocasión cada uno de los ítems evaluaba un rango más restringido de indicadores de aprendizaje, pero todos ellos eran reiteradamente valorados, de forma que las conclusiones a las que pudiésemos llegar, tras las oportunas correcciones, respondieran a un control estricto del aprendizaje logrado por los estudiantes.

Ítem nº 1. Este ítem está redactado de forma parecida al ítem 1 del cuadro 7.1, los criterios de evaluación decidimos que fuesen los mismos, por tanto, que se hicieron explícitos allí y los indicadores de aprendizaje evaluados son i.6 e i.7 y sin lugar a dudas el i.5.

Ítem nº 2. Este ítem es el mismo ítem 2 del cuadro 1, sólo que se han suprimido los apartados b y c. Los criterios de corrección serán los mismos que se explicitaron para evaluar este apartado en la prueba anterior. Los indicadores de aprendizaje implicados son: i1, i6 e i7.

Ítem nº 3. Este ítem de nuevo es idéntico al tres del cuadro 1, solo que de nuevo se han suprimido los apartados b y c. Por lo tanto los criterios de corrección serán los mismos que se emplearon allí y los indicadores de aprendizaje evaluados son i2, i6 e i7.

Ítem 4. Idéntico al ítem 7 del cuadro 7.1 (continuación) y con idénticos criterios se evalúa en esta ocasión. Los indicadores de aprendizaje implicados son ahora: i3, i4, i6 e i7.

7.3.2. Diseños para medir las actitudes hacia el aprendizaje de la noción de fuerza electromotriz, en los grupos experimentales

Nuestra segunda hipótesis postula que el modelo de aprendizaje como investigación orientada incide en aspectos de carácter actitudinal, lo que favorece que los estudiantes no sólo aprendan más, sino mejor. De este modo para finalizar el capítulo 7, presentamos el diseño que hemos elegido para evaluar la influencia del modelo de enseñanza-aprendizaje expuesto, en la actitud de los alumnos.

Pensamos que el cuestionario pasado a los estudiantes responden a lo que debe ser un instrumento de medida: ante todo, válido y preciso. Válido en la medida en que mide lo que se pretende y preciso o fiable porque lo mide bien. El diseño que aquí se presenta es un cuestionario de escala Likert adaptado a la puntuación 1 a 10. Consta de 13 preguntas, que se pasó a los estudiantes después de finalizar el tema y antes de recibir sus notas de la prueba de evaluación de conocimientos. El cuestionario fue

pasado por un profesor distinto al investigador y los estudiantes contestaban anónimamente. El cuadro siguiente recoge el cuestionario empleado.

Cuadro 7.4 Medida de las actitudes de los estudiantes en relación con el tema impartido (Documento 4)

CUESTIONARIO PARA MEDIR LAS ACTITUDES DE LOS ESTUDIANTES HACIA EL TEMA IMPARTIDO

El cuestionario consta de tres apartados. En cada uno de ellos se escriben varias afirmaciones, por favor léelas atentamente antes de responder, **luego puntúa de 0 a 10** cada una de ellas según tu acuerdo o desacuerdo con lo que dicen, empleando la siguiente escala:

Totalmente de acuerdo:	de 8 a 10
De acuerdo:	de 6 a 7
Indiferente:	5
En desacuerdo:	de 3 a 4
Totalmente en desacuerdo:	de 0 a 2

1. LOS CONTENIDOS QUE SE HAN TRABAJADO

- 1.1 La cantidad de contenidos ha sido la adecuada.....
- 1.2 Los objetivos que se perseguían estaban claros (sabías para qué iban a servir)....
- 1.3 Los contenidos perseguidos eran interesantes.....
- 1.4 Cuando se introducían nuevos conceptos se relacionaban con los que se habían introducido anteriormente....

2. LA FORMA DE TRABAJO EN EL AULA

- 2.1 El método de enseñanza fue adecuado a los contenidos tratados.....
- 2.2 En clase se daban las condiciones necesarias como para que los alumnos y alumnas pudieran aprender.....
- 2.3 Las actividades propuestas en clase eran adecuadas para que pudieran ser resueltas por los estudiantes.....
- 2.4 Se hacían puestas en común que ayudaban a clarificar las soluciones a las actividades.....
- 2.5 En el aula había buen clima de trabajo.....

3. LA SATISFACCIÓN CON LA QUE SE HA TRABAJADO EN CLASE

- 3.1 Las clases de este tema han conseguido atraer mi atención.....
- 3.2 Nunca tengo ganas de que llegue la hora de clase de esta materia.....
- 3.3 Existe, por parte del profesor, apoyo y disposición para ayudar a los estudiantes a superar sus dificultades.....
- 3.4 En la clase ha habido un clima de cooperación entre los estudiantes.....

CAPITULO 8: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA CONTRASTACIÓN EXPERIMENTAL DE LA SEGUNDA HIPÓTESIS

En los capítulos anteriores hemos fundamentado nuestra segunda hipótesis y presentado el diseño experimental para su contrastación. Se ha incorporado una propuesta alternativa para abordar el estudio de los circuitos eléctricos de corriente continua estacionaria, prestando especial atención al concepto de fuerza electromotriz. En este capítulo se expondrán los resultados obtenidos por los grupos experimentales y de control que se diferencian fundamentalmente en el tipo de enseñanza recibida. Emplearemos el estadístico (Z) para demostrar que existen diferencias significativas a favor del primer grupo.

Como obtenidos durante el curso académico 2005/06. Los cuestionarios recogidos en los cuadros 7.1 y 7.2 fueron contestados por los estudiantes en situación de examen. Las entrevistas fueron realizadas con estudiantes que se habían presentado voluntarios para mejorar sus notas. Presentamos también los resultados relativos a las actitudes hacia la asignatura, que los estudiantes contestaron en la misma sesión de examen, de forma anónima, y antes de conocer las notas alcanzadas.

8.1 Resultados que muestran que los estudiantes de los grupos experimentales obtienen una mejoría en aspectos conceptuales básicos y metodológicos en relación concepto de fuerza electromotriz, respecto de los estudiantes de los grupos de control.

En este apartado se analizarán las diferencias que existen entre los porcentajes de respuestas correctas de los grupos experimentales y de control para el cuestionario recogido en el cuadro 7.1. Así mismo en el apartado 8.1.2, se hace una valoración en base a las grabaciones de las entrevistas efectuadas sobre el cuestionario recogido en el cuadro 7.2, en relación con los procedimientos empleados por los estudiantes de los grupos tratados. En la tabla siguiente se sintetiza el proceso seguido en la recogida de los datos, cuyos resultados se presentan.

n° de documento y página donde se encuentra	n° de ítems	Circunstancias en las que se pasa el documento
Cuestionario recogido en el cuadro 7.1, Pág. 329 y 330	8	Situación de examen individual escrito.
Cuestionario para las entrevistas recogido en el cuadro 7.2 de la página 333	Bloques 1 y 2 de preguntas en torno a dos montajes prácticos de circuitos.	Grabaciones en situación de examen individual escrito y en la puesta en común del grupo.
Cuestionario para las entrevistas recogido en el cuadro 7.2 de la página 333	Bloque 3 de preguntas en relación con aspectos C/T/S	Grabaciones en situación de examen oral individual y en la puesta en común del grupo.
Cuestionario recogido en el cuadro 7.3 de la página 337		Encuesta anónima de carácter individual, antes de conocer los resultados de los exámenes.

Se trata de contrastar si existen diferencias significativas entre los resultados porcentuales de ambos grupos, ya que podría ocurrir que las eventuales diferencias que se observen entre uno y otro grupo se deban a fluctuaciones aleatorias y no al tipo de enseñanza recibido.

8.1.1 Resultados del análisis de las pruebas efectuadas para comparar el aprendizaje conceptual logrado en la unidad didáctica por los grupos experimentales y de control

Los resultados obtenidos se presentan en tablas, una por cada ítem. Cada tabla recoge los porcentajes de aciertos de los tres grupos experimentales, que denominaremos A, B y C respectivamente, el porcentaje promedio de los tres grupos así como el porcentaje de aciertos del grupo de control, por último se expresa el valor del estadístico Z para comparar las medias obtenidas por los grupos experimentales y por el grupo de control.

En cuanto a los grupos de control señalar que, se trataba de tres grupos de alumnos de centros de la red pública, ubicados en zonas con una extracción social equivalente y equivalente a su vez a la de los estudiantes de los grupos experimentales, en todos los casos se trataba de profesores con amplia experiencia docente, que mostraron interés en participar en la experiencia para replicar los datos de los estudiantes experimentales.

Como ya hemos indicado, los ítems que se exponen en las tablas que vienen a continuación corresponden al documento 1 del cuadro 7.1 (páginas 329-330).

Tabla 8.1. Porcentajes de respuestas correctas obtenidos al evaluar el ámbito de aplicación de los conceptos.

Nº del ítem	Porcentaje de respuestas correctas (%)					
	Grupo A (N =30)	Grupo B (N = 31)	Grupo C (N = 30)	Promedio experimental (N =91)	Grupo Control (N = 77)	Z
Ítem 1	60	81	67	69	3	9,04 (p<< 0,01)

Los siguientes son algunos ejemplos que ilustran respuestas correctas por parte de los estudiantes de los grupos experimentales:

Un estudiante que ha escogido la opción c), lo justifica del siguiente modo:

Javier: “Ni la fem ni la ddp son propiedades de la carga, En todo caso lo que variará será la energía potencial electrostática de la carga. La fem es una propiedad característica de la pila y la ddp es una propiedad del campo eléctrico”

O esta otra respuesta:

** “Las opciones a y b son falsas, las cargas no poseen fuerza electromotriz que es una propiedad característica de la pila. Tampoco poseen diferencia de potencial, las cargas poseen energía potencial electrostática”.*

En el ítem 2 los estudiantes debían contestar a tres apartados, se presentan los porcentajes de respuestas correctas para cada apartado, para los valores calculados para el estadístico Z para cada uno de los apartados.

Tabla 8.2. Porcentaje de respuestas correctas en relación con nociones clave para diferenciar entre d.d.p. y fem

Nº del ítem	Porcentaje de respuestas correctas (%)					
	Grupo A (N =30)	Grupo B (N = 31)	Grupo C (N = 30)	Promedio experimental (N =91)	Grupo Control (N = 77)	Z
Ítem 2						
2a	63	71	60	65	17	6,4 (p<< 0,01)
2b	60	65	57	61	3	8,05 (p<< 0,01)
2c	53	58	47	53	4	7,65 (p<< 0,01)

Algunos ejemplos de respuestas ofrecidas por los estudiantes de los grupos experimentales son los siguientes:

Paula: “a) La afirmación sí es correcta puesto que al conectar los puntos A y B que se encuentran a diferente potencial, habrá un paso de cargas entre ambos puntos para así igualar ambos potenciales, lo que genera una corriente.

b) En un generador de Van der Graaf podemos distinguir una fuerza no culombiana que sería la realizada por la persona para mover la manivela que a su vez mueve la polea y la cinta. También la fuerza de rozamiento entre la cinta y las escobillas es una fuerza no culombiana. Distinguimos también las fuerzas culombianas de repulsión que se ejercen sobre las cargas que llegan a la esfera superior, y, finalmente si conectamos con un conductor los puntos A y B, habría fuerzas culombianas que actúan sobre las cargas que se mueven como consecuencia de la diferencia de potencial.

c) Los efectos son separación de cargas como consecuencia del rozamiento o fricción y repulsiones o atracciones.”

Tabla 8.3. Porcentaje de respuestas correctas en relación con el funcionamiento y papel de la pila en el circuito.

Nº del ítem	Porcentaje de respuestas correctas (%)					
	Grupo A (N =30)	Grupo B (N = 31)	Grupo C (N = 30)	Promedio experimental (N =91)	Grupo Control (N = 77)	Z
3a	60	65	40	55	3	7,43 (p<< 0,01)
3b	54	55	50	53	0	7,79 (p<<0,01)
3c	47	58	50	52	4	6,96 (p<< 0,01)

Los siguientes son algunos ejemplos de respuestas ofrecidas por los estudiantes:

Marcelo: “a) En la pila tienen lugar unas reacciones químicas que provoca un trabajo realizado por las fuerzas no culombianas. Este trabajo es el encargado de separar las cargas y mantenerlas separadas en los electrodos de la pila lo que provocará una diferencia de potencial entre ambos electrodos.

b) Al haber una intensidad, el valor de ε no se corresponde con el de la $V_A - V_B$, por lo que la relación vendrá establecida por la ecuación del circuito.

$$\varepsilon = V_{AB} + I r \rightarrow V_{AB} = \varepsilon - I r$$

c) La $V_A - V_B$ es máxima cuando $I = 0$, porque en ese caso (y como consecuencia de la ecuación del circuito) toda la ε se empleará en crear la d.d.p. En ese caso $V_A - V_B = \varepsilon = 6 V$ ”.

O esta otra:

* “ a) La diferencia de potencial entre los electrodos a y b de la pila se produce por las reacciones químicas que hay en el interior de la pila, que producen la fuerza electromotriz. La fuerza electromotriz es una propiedad característica de la pila relacionada con separar y mantener separadas las cargas, surgiendo así la diferencia de potencial.

b) Mediante la ecuación del circuito: $\varepsilon = V_{AB} + I r$

c) Cuando el circuito está abierto que $I = 0$ y $V_A - V_B = \varepsilon = 6 V$.”

Tabla 8.4. Porcentaje de respuestas correctas en relación con la diferenciación entre la ley de Ohm y la ecuación del circuito.

Nº del ítem	Porcentaje de respuestas correctas (%)					
	Grupo A (N =30)	Grupo B (N = 31)	Grupo C (N = 30)	Promedio experimental (N =91)	Grupo Control (N = 77)	Z
4a	47	49	50	49	0	6,72 (p<< 0,01)
4b	70	58	54	61	0	7,82 (p<< 0,01)
4c	60	52	47	53	1	7,54 (p<< 0,01)

Los siguientes son ejemplos de respuestas evaluadas como correctas:

Samuel: “a) Sólo se cumple la ecuación $\varepsilon = IR$, ya que la ley de Ohm no incluye todos los elementos del circuito.

b) $V_{AB} = IR$ representa la energía puesta en juego cuando se desplaza la unidad de carga entre los puntos A y B.

$\varepsilon = IR$ representa el principio de conservación de la energía, incluye a todos los elementos del circuito.

c) La ley de Ohm no se cumple en la pila, esta no es un material óhmico, la ley de Ohm no representa el principio de conservación de la energía. La ecuación del circuito representa el principio de conservación de la energía y se cumple para todo el circuito incluyendo la pila.”

** “a) Hemos de saber que la ecuación del circuito $\varepsilon = IR$ siempre se cumple, ya que es la ecuación que representa todos los circuitos, pero $V_{AB} = IR$, la ley de Ohm, es sólo aplicable a materiales óhmicos ¡la pila no es un material óhmico! Luego se podrá aplicar a todo el circuito menos a la pila.

b) $\varepsilon = IR$ Expresa la cantidad de energía que genera la pila.

c) $V_{AB} = IR$ Expresaría la diferencia de energía por unidad de carga entre los puntos A y B.”

Vemos como, los ejemplos anteriores expresan de manera correcta las relaciones y limitaciones de una y otra ecuaciones.

Tabla 8.5. Porcentaje de respuestas correctas en relación con la diferenciación entre la ley de Ohm y la ecuación del circuito.

Nº del ítem	Porcentaje de respuestas correctas (%)					
	Grupo A (N =30)	Grupo B (N = 31)	Grupo C (N = 30)	Promedio experimental (N =91)	Grupo Control (N = 77)	Z
5a	67	61	60	63	0	8,75 (p<< 0,01)
5b	57	42	67	55	0	7,97 (p<< 0,01)

Las siguientes son ejemplos de respuestas valoradas como correctas:

* “a) Este enunciado es falso, la ecuación que representa y permite cuantificar el principio de conservación de la energía es la ecuación del circuito, ya que la ley de Ohm no incluye a todos los elementos del circuito.

b) Es correcta, la ecuación que representa esta relación es: $\varepsilon = \Delta V_{AB} + Ir$ ”

** “a) No, porque la ley de Ohm no tiene en cuenta la pila, y en la pila por efecto Joule tiene lugar una transformación de energía y si la ley de Ohm no tiene en cuenta esto no representa ni permite cuantificar el Principio de Conservación.

b) La ecuación que representa y permite cuantificar el principio de conservación es la ecuación del circuito: $\varepsilon = V_{AB} + Ir$ ”

Tabla 8.6. Porcentaje de respuestas correctas en relación con la diferenciación entre fuerza electromotriz y diferencia de potencial

N° del ítem	Porcentaje de respuestas correctas (%)					
	Grupo A (N =30)	Grupo B (N = 31)	Grupo C (N = 30)	Promedio experimental (N =91)	Grupo Control (N = 77)	Z
6a	37	55	53	48	14	4,79 (p<< 0,01)
6b	90	71	50	70	19	6,8 (p<< 0,01)
6c	53	35	30	39	17	3,24 (p<< 0,02)
6d	70	68	63	67	18	6,45 (p<<0,01)

Los siguientes son ejemplos de respuestas evaluadas como correctas:

* “a) Falso, ya que la resistencia total en el circuito 1 es diferente a la resistencia total del circuito 2, uno está en serie y otro en paralelo, por lo que la intensidad también es diferente.

b) Verdadero, ya que se trata de un circuito en serie.

c) Si, porque al ser las bombillas iguales la intensidad que pase por ambas será la misma.

d) Igual que en el apartado a) al ser circuitos diferentes, uno en serie y otro en paralelo, la Intensidad en los circuitos es diferente.”

** “a) Falso. La intensidad en el circuito 2 es mayor ya que la suma de las resistencias es menor. Si la resistencia es mayor, la intensidad es menor. Son inversamente proporcionales. $I = V_{AB}/R$.

b) Verdadero, $I_T = I_1 = I_2$

c) Verdadero, $I_T = I_1 + I_2$

d) Falso, en el circuito 2 la intensidad es mayor porque en el circuito 2 las bombillas están en paralelo y la resistencia equivalente (total) es menor.”

Tabla 8.7. Porcentaje de respuestas correctas en relación con la diferenciación entre los atributos de los conceptos de fuerza electromotriz y diferencia de potencial

N° del ítem	Porcentaje de respuestas correctas (%)					
	Grupo A (N=30)	Grupo B (N=31)	Grupo C (N=30)	Promedio experimental (N=91)	Grupo Control (N=77)	Z
7a	83	74	80	79	16	7,87 ($p < 0,01$)
7b	77	74	70	74	9	8,67 ($p < 0,01$)

Las respuestas correctas, en los porcentajes indicados, siguen un esquema similar al ejemplo de respuesta que se indica a continuación:

Lucía: “fem: 1) Fuerza no culombiana, 2) Propiedad de la pila, 3) Separación de cargas, 4) Energía transformada en la pila, 5) Energía, 6) Unidad de carga.

- 1) La fem es el trabajo realizado por fuerzas no culombianas.
- 2) La fem es una propiedad característica de la pila.
- 3) En el interior de la pila, la fem es la causa que separa cargas y las mantiene separadas entre sus electrodos.
- 4) Las cargas en el interior de la pila reciben trabajo y por lo tanto energía.
- 5) $Fem = WF_{NC}/Q \rightarrow$ unidad de carga.

d.d.p.: 1) Fuerza culombiana, 2) Desplazamiento de cargas, 3) Energía, 4) Energía transformada fuera de la pila, 5) Unidad de carga.

- 1) Son fuerzas culombianas (de atracción o repulsión) las que actúan sobre las cargas fuera de la pila.
- 2) La d.d.p. es la diferencia de energía que tiene la unidad de cargas entre los puntos A y B de un circuito.
- 3) V_{AB} se corresponde con el valor de la energía que se transforma en el exterior de la pila.
- 4) La d.d. podemos representarla mediante la ecuación: $V_A - V_B = WF_C/q \rightarrow$ unidad de carga.

Tabla 8.8. Porcentaje de respuestas correctas en relación con la diferenciación entre los conceptos de fuerza electromotriz y diferencia de potencial

N° del ítem	Porcentaje de respuestas correctas (%)					
	Grupo A (N=30)	Grupo B (N=31)	Grupo C (N=30)	Promedio experimental (N=91)	Grupo Control (N=77)	Z
Ítem 8	60	71	50	60	5	7,64 ($p < 0,01$)

Ejemplos de respuestas evaluadas positivamente son:

** “En la fuerza electromotriz las fuerzas que se encargan de separar y mantener separadas las cargas para crear una diferencia de potencial, se trata de fuerzas no culombianas.*

En la diferencia de potencial, la fuerza que se encarga de realizar el trabajo de desplazamiento de la unidad de carga desde un punto A a otro B, en el circuito y fuera de la pila son fuerzas culombianas.”

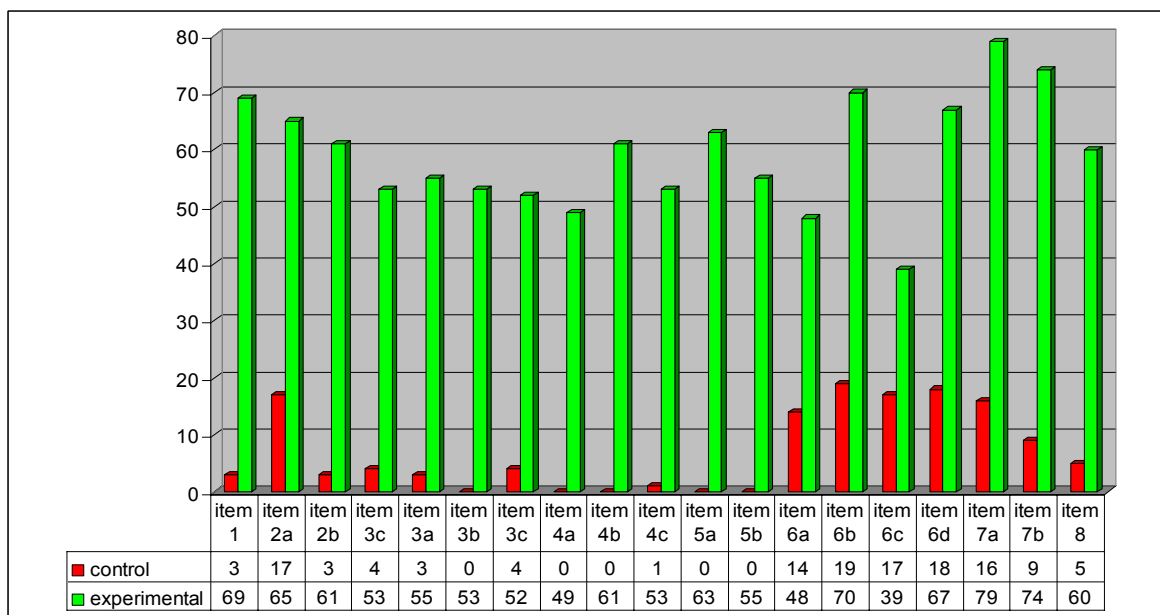
*** “La fem es una propiedad de la pila y el trabajo para desplazar y mantener separadas las cargas es realizado por fuerzas no culombianas, mientras que la diferencia de potencial, existe entre dos puntos del circuito y el trabajo para desplazar las cargas entre esos puntos lo realizan fuerzas culombianas.”.*

De nuevo el porcentaje de los estudiantes del grupo de control que no contestan al ítem es significativamente alto: 64%, en línea con los resultados que obteníamos al contrastar la primera hipótesis. Es decir, una respuesta del tipo “la fem es la diferencia de potencial de la pila en circuito abierto”, carece de significado para los estudiantes.

Tal como indicábamos al comienzo del capítulo se ha aplicado el estadístico Z para comparar las medias correspondientes a los grupos experimental y de control, con la intención de comprobar si el tipo de enseñanza recibido influye en los resultados de manera significativa o las diferencias observadas son fruto del azar. Con un nivel de confianza superior incluso al 99%, puede asegurarse, que la enseñanza recibida es el factor determinante en los resultados que se observan.

A modo de síntesis recogemos en un gráfico los resultados obtenidos, en términos de porcentajes, para cada uno de los ítems y sus apartados correspondientes. Se recogen los porcentajes promedio de los grupos experimentales y los porcentajes del grupo de control.

Grafico 8.1 Porcentajes de respuestas a los ítems de la prueba pasada a los grupos de control y experimental (promedio)



No queremos dejar de señalar, aunque no haya sido el objetivo principal que nos proponíamos resaltar con estos ítems, que se ha detectado una mejoría en aspectos relacionados con la metodología científica, fundamentalmente en la variedad de estrategias planteadas y en el análisis de los resultados. Los ejemplos que se han descrito muestran que los estudiantes utilizan reiteradamente tanto en estrategias de tipo descriptivas (predictivas), cuando los estudiantes responden al ¿cómo?, como aquellas de tipo explicativo que responden al ¿por qué?

Como vemos los resultados apoyan de manera convincente las posibilidades de mejora que ofrece la propuesta de enseñanza/aprendizaje como investigación orientada, referente al concepto de fuerza electromotriz y circuitos sencillos de corriente continua estacionaria elaborada por el investigador. Un análisis más detallado, pero más cualitativo y pormenorizado que el que se ofrece en el gráfico anterior, se realiza en el apartado 8.2, donde se atiende específicamente a los indicadores establecidos en 2.2 respecto a un aprendizaje comprensivo del tema tratado.

8.1.2 Resultados del análisis de las pruebas escritas y de las entrevistas a estudiantes de grupos experimentales, al enfrentarse a la interpretación y montaje de algunos circuitos.

Los grupos experimentales estaban constituidos por estudiantes que cursaban 1º de Bachillerato, es decir, que las actividades desarrolladas con ellos estaban sometidas al horario escolar, por tanto a la hora de realizar una prueba se disponía de una hora y excepcionalmente unos minutos más tomados de un recreo, previa negociación, o de un profesor que retrasaba o adelantaba unos minutos su comienzo o final. En estas condiciones evaluar destrezas procedimentales es muy difícil. Tampoco es posible, dadas las circunstancias, obligar a los estudiantes a que vengan por la tarde unas horas para realizar actividades docentes, es por todo esto, como ya nos hemos referido al comienzo de este capítulo, que las entrevistas se han llevado a cabo con estudiantes a los que se les brindó la posibilidad de subir nota. Queremos señalar que no se trataba ni exclusiva, ni mayoritariamente de estudiantes con buenas notas que aspiraban a obtener un sobresaliente, sino que seleccionamos entre estudiantes de buenas notas y estudiantes que esperaban mejorar como para alcanzar la calificación de suficiente.

El procedimiento seguido en las sesiones de trabajo era el siguiente: en una primera sesión, los estudiantes tenían que responder por escrito a la prueba que se recoge en el cuadro 7.2 de la página 333 (Documento 2), disponía del material como para realizar los montajes y comprobaciones pertinentes y cuando terminaba el profesor le preguntaba en relación a sus conclusiones y esta parte se grababa en cinta magnetofónica. En una segunda sesión, había una puesta en común, que también fue grabada. Las entrevistas se realizaron con estudiantes de los grupos A y B. Este diseño no se realizó con las estudiantes del grupo C debido a cuestiones de organización escolar ajenas al profesor que implementaba el programa. A continuación mostraremos algunos ejemplos de las entrevistas correspondientes a la fase de puesta en común, donde tienen que justificar sus conclusiones y argumentarlas delante de los demás compañeros y el entrevistador.

BLOQUE 1

Protocolo 1. Seguimiento de la puesta en común de los estudiantes del Grupo A sobre la pregunta 1.1

01. Entrevistador: ¿Habéis comprobado que los elementos del circuito están conectados en serie?

02. **Marcos:** Se ve en el dibujo que están conectados en serie...el enunciado dice ¿cómo lo comprobarías? no que lo compruebes.
04. **Entrevistador:** ¿Qué medida experimental nos permite comprobarlo?
05. **Candela:** La intensidad debe ser la misma en todas las partes del circuito... Pondríamos un amperímetro en varios puntos del circuito. Esto ya lo hicimos en clase.
07. **Entrevistador:** Lo importante es **saber y saber hacer** cómo se “pone”.
08. **Federico:** Cortamos el circuito antes de la resistencia y después de la resistencia por ejemplo, quiero decir que desconectaríamos las pinzas entre la bombilla A y la resistencia R y colocaríamos un amperímetro y haríamos lo mismo entre la resistencia R y la bombilla B. Los dos amperímetros deben marcar lo mismo.
12. **Alexis:** Lo curioso es que yo he conectado tres amperímetros, antes de A, después de A y después de la resistencia R y a medida que conecto amperímetros la intensidad se hacía menor, la misma en los tres amperímetros, pero menor si bien no mucho, pero se nota, pero no se por qué es así, o ¿Lo he hecho mal? ¿Esto se comentó en clase?

En la pregunta 1.1., se indaga, en un contexto de circuito sencillo, sobre el aprendizaje de dos ideas clave, recogidas en los indicadores de aprendizaje: la fem como propiedad de la pila y la medida de la fuerza electromotriz de una pila, pero contemplado desde el punto de vista de los procedimientos y destrezas empleadas por los estudiantes.

Como se muestra en el protocolo 1 los estudiantes tratan de justificar sus afirmaciones no sólo con referencias a la teoría (línea 02) sino que proponen diseños experimentales para su comprobación experimental o citan experimentos ya realizados (líneas 08-11; 05-06). Así mismo, analizan de forma crítica los resultados obtenidos (líneas 12-15) y discuten algunas anomalías con la teoría y preguntan por ellas. En el caso de Alexis parece claro que ha desarrollado un pensamiento crítico muy de acuerdo con el espíritu del trabajo científico.

En esta misma fase explicativa de la pregunta 1.1, podemos ver cómo también los estudiantes del grupo B saben analizar los resultados de la experiencia de forma crítica, reflexionando sobre resultados que, en principio, son diferentes a lo estudiado en clase:

Protocolo 2. Seguimiento de la puesta en común de los estudiantes del Grupo B sobre la pregunta 1.1.

01. **Entrevistador:** ¿Cómo ha ido esa comprobación?
02. **Marta:** Era fácil, creo, pero algo me ha llamado la atención, es que se nota cuando se van conectando amperímetros al circuito, todos marcan igual, pero la medida es algo menor cuando se ponen tres amperímetros a cuando se conecta sólo uno.
05. **Entrevistador:** ¿Cómo podríamos explicarlo?
06. **Cristina:** Si no hay error los amperímetros gastan energía. Esto no es lo que vimos en clase, los instrumentos de medida no gastan energía ellos mismos.

08. **Antonio:** *Eso no es normal dentro hay cables normales...*
 09. **Entrevistador:** *¿Qué es eso de cables normales?*
 10. **Antonio:** *Quiero decir que no son ideales, que algo de resistencia ofrecen cuando la corriente pasa por ellos y por tanto al conectar varios la intensidad total por el circuito es menor.*

Antonio (líneas 10-11) reflexiona sobre las contradicciones entre el experimento y los resultados teóricos de clase (líneas 2-4) y lo resuelve con éxito.

Protocolo 3 Seguimiento de la puesta en común de los estudiantes del Grupo A sobre las preguntas 1.2 y 1.3

01. **Entrevistador:** *Algunos no habéis respondido a la segunda parte de la pregunta 2), me gustaría que comentásemos las dificultades, mirad cada uno vuestros papeles y al menos indicarme por qué.*
04. **Candela:** *Yo no me he dado cuenta de esta parte.*
05. **Alexis:** *Yo he puesto que el brillo disminuirá cuando aumente R y si las bombillas son diferentes el brillo no será el mismo, porque lo comprobé poniendo dos bombillas diferentes...pero no se muy bien por qué el brillo es diferente.*
08. **Federico:** *Yo no he contestado a la segunda parte porque no se me ocurrió hacer el montaje, pero ahora creo que si las bombillas son diferentes, la energía que se transforma en ellas es diferente y esto puede ser la razón de que el brillo no sea el mismo.*
12. **Entrevistador:** *Federico léenos tu respuesta a la pregunta 3).*
12. **Federico:** *Yo creo que no ocurrirá nada sólo que la energía que proporciona la pila a cada unidad de carga (fem), se invertirá en R cada vez en mayor cantidad.*
14. **Entrevistador:** *Entonces ¿la fem de la pila no es una constante, varía en función de la configuración del circuito?*
16. **Marcos:** *A la fuerza electromotriz no le pasará nada, permanece constante.*
17. **Federico:** *Eso es lo que yo quiero decir, la pila proporciona cada vez más energía pero se transforma en el exterior cada vez en más cantidad, con lo que la proporción es la misma.*
21. **David:** *No, la fem queda igual, puesto que ésta sólo se encarga de separar y mantener separadas las cargas en el interior de la pila, sólo actúa en el interior de la pila, por lo que no le afecta lo que sucede en el exterior a ella.*
22. **Entrevistador:** *David se puede distinguir entre la pila y la fem de la pila?*
23. **David:** *Bueno...la pila es un objeto y la fem es un concepto ...En clase hemos visto que la fem es una propiedad característica de la pila... .*
28. **Jimena:** *La fem de la pila seguirá siendo la misma, pero me gustaría comprobar que pasa con la d.d.p. entre los polos cuando cambiamos el valor de R, ¿Qué pasa Alexis?*
29. **Alexis:** *Que es distinta cada vez.*
29. **Jimena:** *¿Lo comprobaste?*
29. **Alexis:** *No hace falta, eso lo dice la ecuación del circuito...pero lo hacemos ¿puedo? Tras unos minutos Alexis mide la d.d.p. entre los electrodos de la pila tras cambiar las bombillas y nos comunica sus resultados. Varía cada vez. Uno sabe que esto es así, pero ¡hay que verlo para creerlo!*
33. **Entrevistador:** *¿Te sorprende obtener ese resultado?*
34. **Alexis:** *No, he querido decir que... bueno deberíamos poder hacerlo siempre así, así no se olvidan las cosas, se aprenden mejor.*

De nuevo aparecen argumentaciones características del trabajo científico. Los estudiantes se cuestionan acerca de las conclusiones que deben esperarse de la ecuación del circuito y se deciden a comprobarlo (línea 28), saben cómo proceder para la comprobación y les satisface comprobar que sus predicciones se cumplen (líneas 29-32), lo que ellos identifican como un anclaje de sus conocimientos (líneas 34-35). Así

mismo, saben explicar la diferencia entre hechos y conceptos (explicaciones) cuando se les pregunta sobre ello (líneas 22-24).

Es de resaltar que los estudiantes muestran un alto grado de comprensión del concepto de fem integrado en la explicación del montaje realizado (líneas 16; 19-21).

Respecto al alto grado de aprendizaje alcanzado sobre el modelo explicativo del circuito que analizan, vamos a mostrar otra parte de la entrevista sobre la misma fase del bloque A con estudiantes del grupo B. En el siguiente protocolo podemos ver cómo explican los estudiantes lo que sucede en el circuito, utilizando los conceptos estudiados en clase:

Protocolo 4 Seguimiento de la puesta en común de los estudiantes del Grupo B sobre las preguntas 1.2, .3 y 1.4

01. **Entrevistador:** *¿Alguna cuestión a destacar?*
02. **Antonio:** *Si ponemos dos bombillas diferentes brillan distinto, pero yo he comprobado que la intensidad es la misma, porque he conectado el amperímetro antes y después de cada una. Solo después de comprobar que la intensidad era la misma me di cuenta de la explicación.*
05. **Marta:** *¿Cuál es la explicación?*
06. **Antonio:** *La que nos dio el profesor de que la resistencia de cada bombilla es su propiedad característica.*
08. **Cristina:** *Me he quedado igual.*
09. **Antonio:** *Si cada bombilla tiene una resistencia diferente, es normal que la cantidad de energía que se transforma en ella sea diferente, yo no lo comprendí bien en clase, pero ahora al hacer el montaje me di cuenta de lo que significaba.*
12. **Marta:** *¿Quieres decir que como las resistencias son diferentes, los brillos también lo son?*
12. **Antonio:** *Claro, las resistencias diferentes con la misma cantidad de carga pasando da lugar a un brillo distinto en cada bombilla.*
15. **Entrevistador:** *Veamos vuestras respuestas a la cuestión 3).*
16. **Marta:** *Bueno yo voy a empezar por la 4), poniendo más bombillas la resistencia R del circuito aumenta, pero el brillo se hace menor porque la intensidad que pasa por ellas es menor, pero esto no tiene nada que ver con la fem de la pila, la fem de la pila separa las cargas en los polos, pero digamos este efecto no se ve afectado por las bombillas que se colocan fuera.*
21. **Entrevistador:** *¿Por qué?*
21. **Marta:** *Bueno... la fem es una propiedad característica de la pila, no depende de a qué circuito se conecte.*
23. **Entrevistador:** *¿Y la ley de Ohm no se aplica en este caso?*
24. **Antonio:** *Para la pila no, pero si la resistencia R se hace mayor la intensidad I disminuye, pero...ahora lo veo claro, si, si.*
28. **Cristina:** *Lo que pasa es que eso es un círculo vicioso...cambias una cosa y te cambian las demás ...lo tienes que ver todo a la vez ..*

Antonio realiza un análisis sistémico del circuito (líneas 2-4; 9-11) y le explica a Cristina que termina por comprender que no es posible contemplar los cambios en una parte del circuito como si lo demás no cambiara, “lo tienes que ver todo a la vez” (líneas 26-27). Marta aporta más explicaciones que dan idea del alto grado de aprendizaje

logrado al integrar los conceptos de intensidad, resistencia y fem en un modelo explicativo de un circuito eléctrico de corriente continua (líneas 16-19).

El alto nivel de aprendizaje conceptual logrado por los estudiantes también se muestra cuando tiene que realizar un diseño experimental para medir la fem de la pila, como vemos en el siguiente pasaje de los estudiantes del Grupo B:

Protocolo 5 Seguimiento de la puesta en común de los estudiantes del Grupo B sobre la pregunta 1.5

01. **Entrevistador:** *Ya tenemos una R muy grande, ¿cómo medimos ahora la fem de la pila?*
02. **Marta:** *¡Eso lo digo yo! primero comprobamos que la intensidad es cero, no pasa corriente por el circuito, y entonces medimos la diferencia de potencial entre los electrodos de la pila, el valor que midamos para la diferencia de potencial debe coincidir con el valor de la fem de la pila. La verdad es que hasta ahora no lo he visto tan claro.*

Sobre esta misma pregunta del primer experimento (bloque A) podemos observar cómo los estudiantes son capaces de plantear el diseño experimental para medir la fem de la pila y relacionarlo con el significado del concepto de fem.

Protocolo 6 Seguimiento de la puesta en común de los estudiantes del Grupo A sobre las preguntas 1.4 y 1.5

01. **Entrevistador:** *¿Quién empieza?*
02. **Marcos:** *Se trata de poner más resistencias en serie en el circuito.*
03. **David:** *Yo he aprovechado y he conectado un cable de esto más fino...quiero decir de sección menor.*
05. **Entrevistador:** *¿Qué sucede entonces con la medida de la fuerza electromotriz?*
06. **Candela:** *Colocamos un voltímetro entre los electrodos de la pila y midiendo la diferencia de potencial...*
08. **Federico:** *Eso habría que hacerlo cuando comprobásemos que la intensidad en el circuito vale cero, de nuevo es algo que se puede concluir a partir de la ecuación del circuito.*

Los estudiantes llegan a la conclusión correcta en relación con la medida de la fem del circuito, para una configuración determinada y saben cómo proceder para la medida de la fem: donde y como se conecta el voltímetro y comprobar antes que la intensidad en el mismo es cero. Así mismo, puede observarse una autorregulación en el lenguaje, un cable pasa de ser “más fino” a tener una “sección menor”.

BLOQUE 2

En las respuestas a las preguntas del bloque 2 los estudiantes muestran el aprendizaje realizado en procedimientos propios del trabajo científico, así como en la apropiación de un tipo de argumentación propio de la comunidad científica. Veamos un

ejemplo de justificación de las afirmaciones que realizan para la primera pregunta del bloque B.

Protocolo 7 Seguimiento de la puesta en común de los estudiantes del Grupo A sobre la pregunta 2.1

01. **Entrevistador:** *¿Quién abre el turno?*
02. **Federico:** *¿Puedo leer lo que he escrito, luego discutimos?*
03. **Entrevistador:** *¡Adelante!*
04. **Federico:** *Yo creo que los datos verdaderos van a ser los valores para la intensidad de la serie 2, puesto que en un circuito en serie la intensidad en todos los puntos es la misma. También creo que los datos correctos para los valores de la d.d.p. son los de la serie 2, ya que si la fem vale 4,5 V, no es posible que toda la energía que se “gaste”(pongo el gaste entre comillas) en el circuito se destine a las resistencias como en el caso de la serie 1, sino que una parte de la energía se transforma en el interior de la pila y también en los cables que no tendrán resistencia cero, por lo que los valores correctos son los de la serie 2.*
11. **Entrevistador:** *¿Alguna objeción?*
12. **Marcos:** *Yo estoy de acuerdo con Federico, pero ¿Puedo leer yo mi justificación?*
13. **Entrevistador:** *De nuevo adelante.*
14. **Marcos:** *En la serie 1 el valor para la diferencia de potencial no es correcto ya que la pila tiene 4,5 voltios de fem. La ecuación del circuito incluye la pérdida de energía que se produce en la resistencia interna de la pila, si sumamos en la serie 1 los valores de d.d.p. nos dan 4,5 V, lo que supone no contar con la pérdida, lo que no es posible.*

Tanto Federico (líneas 4-10) como Marcos (líneas 14-17) utilizan el concepto de fem y ‘pila ideal’ para realizar el análisis de los resultados que se les ofrecen. Ambos aplican correctamente los conceptos aprendidos. Este concepto de ‘pila ideal’ y sus consecuencias en el análisis de resultados también surge en la discusión de los estudiantes del Grupo B, como vemos en el siguiente ejemplo:

Protocolo 8 Seguimiento de la puesta en común de los estudiantes del Grupo B sobre la pregunta 2.1

01. **Entrevistador:** *¿Quién quiere comenzar?*
02. **Cristina:** *Yo quiero preguntar algo, a lo mejor es una tontería, pero ¿puede existir una pila ideal?*
04. **Entrevistador:** *¿Qué entiendes por pila ideal?*
05. **Cristina:** *Una pila que no tenga ninguna resistencia interna, quiero decir que las pilas como las que usamos aquí todas tienen resistencia interna ¿no?*
07. **Entrevistador:** *¿Alguien quiere contestar?*
08. **Antonio:** *Las pilas ideales son como un concepto, o sea, como un desplazamiento sobre un plano sin rozamiento.*
10. **Entrevistador:** *¿Sin duda?*
11. **Antonio y Marta:** *Sin duda.*
12. **Cristina:** *Pues entonces los valores de la serie 1 son incorrectos para la diferencia de potencial porque no toda la energía de la pila se va a transferir fuera, en el circuito, una parte se transforma dentro de la misma, en la resistencia interna. Lo que se representa con los valores de la serie 2 para la diferencia de potencial.*
16. **Entrevistador:** *Y ¿para los valores de la intensidad?, Sigue tu Marta.*
17. **Marta:** *Bueno yo he puesto que son incorrectos, por que la intensidad no puede ser cada vez menor en un circuito en serie, sino igual en todos los puntos, eso ya lo hemos comprobado.*

Los profesores hablamos en las clases de pilas ideales y de pilas reales, dando por supuesto que los estudiantes no van a tener dudas acerca del ámbito de existencia de unas y otras, la pregunta de Cristina es un ejemplo de esta situación. Sin embargo, cuando los estudiantes se enfrentan por primera vez a este tipo de cuestiones es normal que surjan dudas (líneas 5-6). Esta cuestión es bien contestada por Antonio (líneas 8-9) argumentando sobre la diferencia entre conceptos explicativos y objetos reales. Una vez despejada la duda Cristina (líneas 12-15) no vacila en dar una respuesta que es correcta. Todos los estudiantes han dibujado correctamente el esquema que se les pide y se han dado cuenta de las dificultades que tiene realizar el montaje posterior.

Los estudiantes en el análisis de los resultados del experimento propuesto en el bloque 2, no sólo argumentan correctamente sino que, al igual que sucede en la experimentación científica, se plantean nuevos problemas que surgen en el contexto del experimento. Veamos un ejemplo:

Protocolo 9 Seguimiento de la puesta en común de los estudiantes del Grupo A sobre las preguntas 2.2 y 2.3

01. **Entrevistador:** *¿Qué tenéis que decirme en relación con los apartados 2) y 3)?*
02. **Alexis:** *Que el 3) no se puede hacer.*
03. **Entrevistador:** *¿Por qué?*
04. **Alexis:** *Porque no tenemos resistencias de un 1,5 óhmios*
05. **Federico:** *Ni de 4,5.*
06. **Entrevistador:** *¿Por qué no me comentáis todo lo que tengáis en relación con estos apartados?*
07. **Marcos:** *Con el esquema no hay problemas, pero al no tener resistencias de esos valores no lo pudimos hacer, o ¿es que tú no nos las has dado?*
09. **Entrevistador:** *¿Por qué me dices eso?*
10. **Marcos:** *Alexis y yo estuvimos hablando de cómo hiciste tú el apartado 1) ¿cómo has podido tu calcular los valores de la serie 2? O ¿no lo has hecho tú?*
12. **Alexis:** *Una práctica teórica, para que salgan las cuentas*

Los estudiantes se dan cuenta de problemas en el desarrollo real de un experimento (líneas 04; 07-08; 12). Además, en el grupo B los estudiantes proponen una posible solución al problema:

Protocolo 10 Seguimiento de la puesta en común de los estudiantes del Grupo B sobre las preguntas 2.2 y 2.3

01. **Álvaro:** *Bueno, el apartado dos sin problemas, pero el 3 no se puede hacer, bueno... o nos faltan cables o bombillas de 1,5 óhmios o de 4,5. ¿Existen ya cables o algo con valores de resistencias conocidas de antemano?*
04. **Entrevistador:** *Y..., si no hay*
05. **Cristina:** *Bueno, a lo mejor debería saberlo, pero ¿cómo se corta un trozo de cable que tenga 1,5 óhmios o el valor que sea?*
06. **Entrevistador:** *¡Se admiten propuestas!*

07. **Álvaro:** *Se puede hacer ¿no?*
 08. **Marta:** *Pero... es complicado, y según lo que hemos visto con una pila tendríamos errores... porque la d.d.p. cambia cada vez que cambia la resistencia resultante...*

Cristina (líneas 05-06) ha propuesto un verdadero problema de corte experimental, en el que habría que diseñar el montaje del circuito, con los correspondientes aparatos de medida intercalados, hacer predicciones, proponer réplicas de los valores, etc. Marta (líneas 08-09) realizando un análisis sistémico del circuito, que muestra el alto aprendizaje logrado, cae en la cuenta de que con una pila no será posible tener valores muy precisos, a partir de datos cualitativos hace inferencias sobre aspectos que pueden afectar a la toma de medidas...

BLOQUE 3

En esta última fase de la entrevista se propone a los estudiantes que apliquen los conceptos aprendidos a un problema de medio ambiente relacionado con las pilas. Los estudiantes deben argumentar sobre las ventajas y riesgos de las aplicaciones tecnológicas derivadas de la nueva teoría científica que han estudiado.

Protocolo 10 Seguimiento de la puesta en común de los estudiantes del Grupo A sobre las preguntas 3.1 y 3.2

01. **Entrevistador:** *Describidme vuestro análisis, señalando lo que os parezca más llamativo.*
 02. **Marcos:** *Estas cosas uno ni se las imagina, ¡estamos hablando de más de 11,5 millones de móviles cada año a los vertederos que sea a partir de este curso! Inmediatamente uno se pregunta cómo se recicla un móvil y cómo una cantidad como esa.*
 05. **Candela:** *Yo además he supuesto que cada móvil pesa 100 g y he calculado esa cantidad en kilogramos, hablamos de más de un millón de kilogramos de residuos a partir de es año a los basureros.*
 08. **Alexis:** *Suponiendo que todo siga igual, quiero decir que las cantidades no vayan en aumento. Las cantidades que hemos calculado son enormes, yo he hecho como tú hiciste en clase y he supuesto camiones de cuarenta toneladas, me salen alrededor de 30. Estas noticias deberían adjuntarse a los tickets de compra, por lo menos que la gente sepa lo que hace.*
 12. **Marcos:** *Mas de 30 camiones al año, en los diez años...*
 13. **Jimena:** *A mi no me gusta hablar de esto. ¿Son datos reales?*
 14. **Entrevistador:** *¿Por qué?*
 15. **Jimena:** *No me gusta...me da miedo.*
 16. **Federico:** *El miedo es no saberlo y sobre todo no saber qué se hace con esos móviles que ya no sirven. Porque ¡como se reciclen como las pilas en nuestro pueblo!*
 18. **David:** *Hay que confiar en la solución por parte de los avances tecnológicos, eso no puede seguir así y yo creo que se pondrán los medios para solucionar ese problema. Nosotros lo estamos aprendiendo, en la clase esto se ha comentado, al principio estas cosas... pero luego haces los cálculos, alguien habrá hecho los cálculos y han terminado por reciclar las aguas que antes se lanzaban al mar, con esto pasará lo mismo. Es un esfuerzo para todos y a ninguno nos gusta hacerlo, pero no quedará más remedio.*
 24. **Entrevistador:** *¿Alguien ha puntuado con 5 o por el estilo el apartado b) de la pregunta 2)? Todos han puntuado con 0 este apartado, menos Marcos que ha puesto 1, él lo explica:*
 25. **Marcos:** *Yo con 1, como he dicho saber estas cosas te compromete, supone un esfuerzo que a*

ninguno nos gusta hacer. Pero yo me alegro de que nos hayamos ocupado de estas cosas y les doy la vara en mi casa a mis hermanos y a los demás.

Los estudiantes han tenido que realizar cálculos sobre los datos iniciales, bien en número de teléfonos o bien en número de kilogramos de residuos (líneas 05-07) y especular sobre ellos (líneas 08-11). Los estudiantes muestran opiniones que ponen de manifiesto una toma de conciencia sincera acerca de un problema en relación con el reciclaje de los residuos sólidos (líneas 02-07; 26-28). Expresamente se han suprimido los párrafos que, en una conversación de este tipo con gente joven, podrían parecer más la transcripción de una reunión de ecologistas radicales. Los estudiantes quieren saber y a algunos les produce inquietud los datos (líneas 15-17), pero tratan de dar alternativas para que el miedo no lleve a conductas nihilistas en relación con el tema (líneas 18-23; 26-28). Es de resaltar el carácter social y de educación para la ciudadanía que implican los comentarios mencionados, argumentando en base a un desarrollo tecnológico basado en actitudes responsables con la conservación del medio ambiente, tal y como señalan David y Marcos.

Los datos obtenidos en las grabaciones del Grupo B confirman las conclusiones que acabamos de indicar. Veamos un ejemplo:

Protocolo 11 Seguimiento de la puesta en común de los estudiantes del Grupo B sobre las preguntas 3.1 y 3.2

01. **Entrevistador:** *¿Qué es lo que os ha parecido más llamativo de vuestro análisis?*
02. **Cristina:** *Yo he supuesto 44 millones de habitantes y he hecho cuentas a partir de esa cantidad, aunque sea un 25% de los móviles se trata de millones de teléfonos a la basura. ¿Hay empresas que se dediquen a la recogida y reciclaje de estos teléfonos?*
05. **Álvaro:** *Yo he supuesto entre 100 y 150 g para cada móvil o sea 125 g y he calculado a partir de aquí la masa de residuos sólidos que se producirían cada año, me salen unas 14500 toneladas más o menos. Busqué en Internet y encontré que en el año 2002 se había producido 3000 y que se calculaba que cada año podrían aumentar en 1000 toneladas, o sea que me he pasado un poco.*
10. **Entrevistador:** *Puede que te hayas pasado sólo en 50 g por teléfono, no en el resto de los cálculos ¿Qué más buscaste en Internet?*
12. **Álvaro:** *Hay una empresa en un pueblo de Vizcaya... bueno lo leo ¿no? Pues dice "que los tipos de residuos reciclables generados por los móviles se pueden clasificar en accesorios (cargador, manos libres, antena, teclado, transformadores) y terminales (componentes eléctricos, carcacas, baterías, placas de circuitos). Una vez que el ciudadano hace entrega de su teléfono móvil en un punto de recogida, éste es llevado a una planta de reciclaje ubicada en Erandio (Vizcaya), donde se le extrae la batería, que se traslada a un gestor autorizado de residuos peligrosos. Allí también se separan los materiales plásticos y metálicos que, tras una trituración, pueden ser reutilizados para otros teléfonos o materias electrónicas. Gracias a este proceso, el 95 por ciento del teléfono se recicla".*
21. **Marta:** *Es un número de toneladas enorme, cada año. Los ciudadanos no es que tengamos derecho es que tenemos la obligación de saber estas cosas.*
23. **Antonio:** *Deberíamos saberlo y saber las consecuencias que tiene y no sólo cuando se recogen, en la fabricación de tantos millones de estos ejemplares ¿no se contamina también? Todo el*

mundo tiene móvil pero... ¿es tan importante?, en el instituto la gente lo quiere para hacer fotos, mensajitos y oír música, si esto produce toneladas de residuos contaminantes cada año, podemos preguntarnos, si contaminamos para algo que merezca la pena.

28. **Entrevistador:** *¿Qué valoración le dais al apartado c)?*

29. **Marta:** *Yo le doy cero, la tecnología está muy bien, pero si nosotros no colaboramos..., la tecnología no es algo que funciona por si solo... Por ejemplo, la tecnología son los ordenadores, esta muy bien la comunicación y todo lo que se puede hacer con ellos e Internet, pero ¿cuánta electricidad se necesita para mantenerlos encendidos?*

33. **Cristina:** *La tecnología no es algo malo en sí, por ejemplo las placas solares son un avance tecnológico y eso es algo positivo, los gases de los frigoríficos ya no son contaminantes para la capa de ozono, yo este apartado d) lo he valorado sólo con 2, no todo lo que sea tecnología es igual que contaminación.*

37. **Álvaro:** *Es verdad, lo que yo he leído no es para ser pesimistas, otra cosa es que sólo se recicle en Vizcaya y en los demás sitios vaya a la basura...*

Los estudiantes, a partir de unos datos los reelaboran, hacen conjeturas (líneas 05-09), las contrastan (líneas 12-20) buscando datos para ver si sus cálculos pueden ser ciertos. Esto, a una escala elemental, es un proceso en el que se emiten hipótesis y se contrastan. Los estudiantes hacen valoraciones críticas (líneas 23-27) y argumentan acerca de la tecnología, sobre sus implicaciones medioambientales, sobre la ética de su utilización, cuando se plantean el uso de los móviles que ellos mismos hacen, el gasto energético derivado del uso generalizado de los ordenadores, etc. (líneas 29-32; 33-36).

8.1.3 Resultados obtenidos en los grupos A y B al pasar las pruebas tres meses después de estudiar la unidad didáctica.

En los grupos A y B se pudo volver a pasar la prueba, el otro profesor había empezado el estudio de la materia de primero de Bachillerato por la parte de química, con lo que, para el Grupo C, el tema de electricidad fue el que cerró el curso. La prueba se paso en los primeros días de junio en los días de máxima tensión para los estudiantes, debida al calendario de exámenes finales. No se trataba de un examen voluntario, a los estudiantes, al comenzar el tema, se les dijo que habría dos exámenes uno al terminar la unidad (como siempre) y de nuevo volverían a examinarse a fin de curso, bien para recuperar bien para subir nota, si los resultados eran malos la calificación podría revisarse a la baja. Los estudiantes no sabían que se trataba de la misma prueba con exactamente los mismos ítems.

Así mismo, hay que señalar un aspecto de la estrategia de enseñanza utilizada en el apartado de evaluación: Los profesores de los grupos A y B cuyos resultados recogen

las tablas, al día siguiente de realizar los exámenes de cada unidad, de realizar un examen, entregan los exámenes corregidos a sus estudiantes para que hagan comparaciones con la corrección, en una sesión que dirige el profesor. Todo esto cuando los conceptos que se estudian aún están recientes para los alumnos, y en un momento de máxima motivación para el aprendizaje: la justificación de las notas. Esta manera de proceder tras la realización de cualquier prueba, refuerza el aprendizaje de los conceptos puesto que el alumno, cuando más le importa el resultado y cuando aún recuerda las explicaciones tiene la oportunidad de reflexionar sobre sus errores. Esperamos que esta estrategia de evaluación como instrumento de aprendizaje contribuya también a afianzar el aprendizaje a largo plazo.

Presentamos a continuación los porcentajes de respuestas correctas para cada uno de los ítems, en una prueba realizada, como decimos, unos tres meses después de terminar el estudio de la alternativa didáctica. En las columnas los grupos aparecen como A (II) y B (II), para referirnos a los resultados de la segunda prueba.

Tabla 8.9. Porcentajes de respuestas correctas obtenidos al evaluar el ámbito de aplicación de los conceptos al finalizar el tema y tres meses después

Nº del ítem y lugar en el que aparece	Porcentaje de respuestas correctas (%)			
	Grupo A (N=30)	Grupo A (II) N = 30	Grupo B (N = 31)	Grupo B (II) N = 31
Ítem 1	60	50	81	66
Ítem 2a	63	57	71	78
Ítem 2b	60	53	65	65
Ítem 2c	53	60	58	65
Ítem 3a	60	53	65	58
Ítem 3b	54	53	55	49
Ítem 3c	47	43	58	49
Ítem 4a	47	40	49	45
Ítem 4b	70	40	58	38
Ítem 4c	60	47	52	39
Ítem 5a	67	52	61	52
Ítem 5b	57	48	42	39
Ítem 6a	37	32	55	48
Ítem 6b	90	82	71	68
Ítem 6c	53	48	35	45
Ítem 6d	70	64	68	64
Ítem 7a	83	72	74	62
Ítem 7b	77	68	74	62
Ítem 8	60	53	71	58

Los porcentajes han cambiado, son algo menores, en casi todos los ítems pero las diferencias no son significativas, de acuerdo con el estadístico Z que venimos aplicando a lo largo de este estudio. Además hay que señalar que después de transcurridos tres meses en casi todos los ítems existe un grupo significativo (no menos del 50%) que continúa mostrando un aprendizaje satisfactorio del modelo explicativo de circuito eléctrico utilizando significativamente los conceptos de fem, diferencia de potencial e intensidad de corriente. A continuación vamos a recoger a modo de ejemplo algunas de las contestaciones del alumnado que muestran la persistencia del aprendizaje significativo logrado:

Ejemplo ítem 1 (Javier):

- a) No, puesto que la fuerza electromotriz es una propiedad de las pilas y no de las cargas, no es posible que ésta varíe en una carga.*
- b) No, puesto que la diferencia de potencial no es una propiedad de las cargas, la d.d.p. la propiedad de las cargas es la energía potencial eléctrica.*
- c) Ninguna de las magnitudes anteriores por lo dicho en los apartados a) y b).*

En el ítem 2 los estudiantes no sólo demuestran que aprendieron de forma significativa el concepto de diferencia de potencial para explicar el flujo de corriente, sino que han depurado algunas nociones y ahora, el porcentaje de los que distinguen correctamente entre los efectos que producen las fuerzas culombianas y las no culombianas es incluso más alto, pasando del 53 al 60 (grupo A) y del 58 al 65 (grupo B). Veamos un ejemplo:

Ejemplo ítem 2 (Paula):

- a) Si, podría ser correcta, pues en el probable caso de que existiera una diferencia de potencial entre ambas partes, las cargas tenderían a desplazarse hacia donde su energía potencial electrostática sea menor. El movimiento de los electrones daría lugar a un flujo de corriente eléctrica, que cesaría cuando los potenciales de A y B se igualasen.*
- b) Las fuerzas de rozamiento mediante la que se separan las cargas positivas y negativas y se transportan, constituyen fuerzas no colombianas. Las fuerzas de repulsión producidas cuando, a medida que se van liberando cargas positivas en la esfera A, éstas se repelen entre ellas, son fuerzas culombianas.*
- c) Efectos que producen: $F_C \rightarrow$ Aumenta la energía potencial electrostática de las cargas en la esfera A. Esto se debe a que la repulsión es cada vez mayor.
 $F_{NC} \rightarrow$ Producen el desplazamiento de las cargas positivas hasta la esfera A y la separación entre cargas positivas y negativas producida por la escobilla situada junto a B.*

En el ítem 3, el porcentaje de éxito ronda globalmente el 50%, incluso tres meses después de haber estudiado las nociones puestas en juego. Una parte significativa de los estudiantes muestra una asimilación de larga duración del esquema científico

estudiado en clase que les permite asimilar de forma inteligible el concepto de fuerza electromotriz y, por tanto, el papel de la pila en el circuito: 1) separación de cargas; 2) acción no electrostática para ello que, realizan fuerzas no coulombianas; 3) trabajo no conservativo realizado sobre las cargas. Veamos un ejemplo:

Ejemplo ítem 3 (Marcelo):

a) La diferencia de potencial en los electrodos de la pila se debe a una propiedad de la pila llamada fuerza electromotriz, que es: el trabajo realizado por las fuerzas no coulombianas para separar y mantener separadas las cargas eléctricas en el interior de la pila, creando con ello una diferencia de potencial entre ambos electrodos.

b) En condiciones normales, el valor de ε es mayor que la d.d.p., ya que la fuerza electromotriz no es utilizada sólo en separar y mantener separadas las cargas, sino que hay una parte de la energía que se transforma en energía interna de la pila, por efecto Joule, aumentando la temperatura de esta.

c) Cuando la intensidad de corriente que circula por el interior de la pila es 0, a partir de la ecuación del circuito ($\varepsilon = V_{AB} + I \cdot r$) la $\varepsilon = V_{AB}$, por lo que el valor de la V_{AB} sería de 6 V.

En el ítem 4 el porcentaje de los que han aprendido la diferencia entre las ecuaciones del circuito $\varepsilon = I \cdot R$ y la ley de Ohm $V_{AB} = I \cdot R$ (en definitiva, entre fuerza electromotriz y diferencia de potencial contextualizado en un circuito de corriente continua) disminuye sensiblemente. Así en el apartado b) se pasa del 70% al 40% en el grupo A y del 58% al 38 % en el grupo B. Esto muestra que el asunto no es trivial. En ningún otro caso la disminución que se produce en los resultados es análoga. Veamos un ejemplo de un estudiante que contestó correctamente en el primer examen pero que tres meses después no lo hace:

Ejemplo ítem 4 (Carolina) primer examen respuesta correcta:

“Hemos de saber que la ecuación del circuito $\varepsilon = I \cdot R$ siempre se cumple, representa cualquier circuito como estos; pero la $V_{AB} = I \cdot R$, que es la ley de Ohm, debemos recordar que es ecuación es únicamente aplicable a materiales óhmicos, ¡la pila no es un material óhmico!, por tanto se podrá aplicar a todo el circuito menos a la pila.”

Tres meses después:

“Si suponemos despreciable el valor de la resistencia interna de la pila, estaremos hablando de que no hay pérdidas de energía interna en ella, por lo que en las condiciones descritas en el circuito, se podrían cumplir ambas fórmulas.”

Nuestros datos indican que, este es uno de los conflictos más difíciles de superar a la hora de distinguir entre los conceptos diferencia de potencial y fuerza electromotriz. No hemos aceptado como buenas explicaciones como las siguientes:

“La ecuación $\varepsilon = I \cdot R$ representa la fuerza electromotriz”

“La ecuación $V_{AB} = I \cdot R$ representa la diferencia de potencial”

Los resultados del ítem 5 muestran que tres meses después los estudiantes han aprendido bien que la ley de Ohm no representa el balance global de energía para el

conjunto del circuito, pero la integración de los dos conceptos en este balance es más problemática, si bien, para los que lo han aprendido, el anclaje en la memoria a largo plazo se puede observar bastante sólido, sólo ha disminuido el 5% y el 3% en los dos grupos que se ha podido realizar el seguimiento.

En el ítem 6, en el apartado a) el porcentaje de respuestas del grupo B indican un aprendizaje correcto de la idea, pero en el grupo A los resultados son más discretos. Este apartado hace referencia a la necesidad de utilizar un análisis sistémico de los circuitos de corriente continua y los resultados confirman las dificultades de aprendizaje en este tipo de análisis. En el apartado b) los porcentajes de respuestas correctas son altos, por encima del 60%, incluso transcurrido cierto tiempo. De nuevo afloran las dificultades en el apartado c), los alumnos tienen dificultades para explicar por qué en el circuito 2 la intensidad que pasa por las bombillas es la misma. Si bien en el grupo B se pone de manifiesto una sensible mejoría en los porcentajes obtenidos en la segunda prueba.

En cuanto al apartado d) es de resaltar el hecho de que, la explicación correcta que significa comprender la relación entre la intensidad y la fuerza electromotriz y la relación entre la intensidad y la configuración del circuito simultáneamente sea algo que tiene sólidamente aprendido más del 60% de los estudiantes.

En el ítem 7, Los porcentajes no dejan lugar a las dudas al respecto de un aprendizaje comprensivo y consolidado. Es un ítem que sintetiza los atributos de los conceptos fuerza electromotriz y diferencia de potencial, conocerlos indicaría un aprendizaje de los conceptos en cuestión, pero también de sus diferencias. Veamos un ejemplo:

Ejemplo ítem 7 (Lucía):

a) Fem:

- *Fuerza no culombiana* → pues son fuerzas producidas por las reacciones químicas que tienen lugar en el interior de la pila.
- *Propiedad de la pila* → Desplazamiento de las cargas, las desplaza de forma que las separa y mantiene separadas en los electrodos de la pila.
- *Separación de cargas* → lo hace para mantener la d.d.p. entre los electrodos de la pila.
- *Energía* → en este proceso se suministra energía a las cargas para separarlas y mantenerlas separadas.
- *Unidad de carga* → la fem es el trabajo realizado por F_{NC} sobre la unidad de carga que se separa y mantiene separada en los electrodos de la pila.

- b) d.d.p.
- i. *Fuerza culombiana* → se trata de fuerzas de atracción o repulsión.
 - ii. *Desplazamiento de cargas* → se desplazan hacia donde su energía potencial electrostática sea menor.
 - iii. *Energía* → En el desplazamiento de las cargas se transforma energía potencial electrostática (de las cargas) que se convierte en energía interna del circuito y energía luminosa si hay bombillas.
 - iv. *Energía transformada fuerza de la pila* → Se transforma en el circuito y en las resistencias externas.
 - v. *Unidad de carga* → es el trabajo realizado por fuerzas culombianas sobre la unidad de carga.

Algunas ideas quizá sean reiterativas, pero el lenguaje que se utiliza sigue siendo bastante preciso, correcto, si bien hay algunas cuestiones, como la que hace referencia a la energía luminosa que, no son estrictamente correctas, pero en el contexto no oscurecen un aprendizaje afianzado en relación con las ideas que ha estudiado en la unidad.

El ítem 8 trata de que los estudiantes como resumen final, vuelvan a describir las diferencias entre fem y diferencia de potencial. Los resultados que hemos obtenido ponen de manifiesto que en un porcentaje superior al 50%, incluso tres meses después de estudiar el tema, los estudiantes son capaces de argumentar correctamente en torno a las diferencias entre ambas magnitudes. Veamos algunos ejemplos:

Ejemplo ítem 8 (Alfredo):

* “La fem es el trabajo realizado por las F_{NC} mientras que en la d.d.p. el trabajo lo realizan las F_C , una se desarrolla en el interior de la pila (la fem) mientras que la d.d.p. se desarrolla en el exterior; la fem produce una separación y desplazamiento de cargas, mientras que la d.d.p. sólo produce un desplazamiento de las cargas.”

Ejemplo 8 (Julia):

** “La fem es una propiedad de la pila, relacionada con fuerzas no conservativas. En la diferencia de potencial intervienen fuerzas conservativas, aparte están las diferencias que se pueden observar en el ejercicio anterior”.

8.1.4 Resultados obtenidos al pasar la prueba al principio del curso siguiente, entre seis-siete meses después de estudiar la unidad didáctica.

Buscábamos datos sobre el aprendizaje logrado con la unidad didáctica transcurrido un plazo de tiempo importante. Pasamos la prueba en las condiciones más adversas para atribuir los resultados al fruto de recuerdos dispersos. El tipo de prueba, en la que había que elaborar las respuestas y sus explicaciones, el tiempo transcurrido,

después de las vacaciones estivales, a los pocos días de comenzar el curso, a lo largo de la primera semana de clases, una buena parte de los estudiantes encuestados estaban matriculados en la asignatura de Química de segundo curso de Bachillerato, conscientes por tanto de que la nota obtenida no podría influir de ninguna manera para ellos; estas eran sucintamente las condiciones en las que debieron enfrentarse en la prueba que se les pasaba. Creemos que hay que señalar que, los estudiantes que participaron lo hicieron todos voluntariamente, siendo su motivación la de participar en una investigación sobre lo que habían aprendido acerca del concepto de fuerza electromotriz en el curso anterior. Los alumnos que faltaban sencillamente ya no estaban en el instituto.

Del grupo A se pasó la prueba a 20, eran 30 inicialmente, y del grupo B a 24 estudiantes, eran 31 inicialmente. En la tabla siguiente se presentan los resultados obtenidos por cada uno de los grupos en cada uno de los cuatro ítems.

Tabla 8.10. Resultados obtenidos al evaluar a los estudiantes al comenzar el curso siguiente.

Nº de ítem		Grupo A (N = 20)	Grupo B (N = 24)	Nº encuestados (44) (%)
Ítem 1	Correctas	9	12	48
	Incorrectas	8	12	45
	N/C	3	0	7
Ítem 2	Correctas	14	21	80
	Incorrectas	6	4	23
	N/C	0	0	0
Ítem 3	Correctas	11	12	52
	Incorrectas	5	12	39
	N/C	4	0	9
Ítem 4	Correctas	14	16	68
	Incorrectas	4	8	27
	N/C	2	0	5

Hemos incluido una columna en la que se agrupan todos los estudiantes encuestados y se dan los porcentajes de aciertos e incorrecciones, se trata de estudiantes que han seguido los mismos materiales didácticos y la misma metodología de trabajo, la principal diferencia, a priori, es que el profesor de uno de los grupos de estudiantes es el investigador. La significación estadística de estos datos no es la misma que la de los

resultados anteriores, pero apuntan una tendencia clara: meses después de haber estudiado los materiales didácticos, en las condiciones más desfavorables, un porcentaje de estudiantes superior a la media muestra un aprendizaje conceptual significativo, como ilustramos a continuación con los ejemplos de respuestas que se han seleccionado.

En cualquier caso insistimos en que, con la última columna se trata simplemente de agrupar datos, de forma que los porcentajes se ofrezcan sobre un número de estudiantes que tenga alguna significación.

En relación con el **ítem nº 1:**

Los siguientes son ejemplos de respuestas evaluadas como correctas:

** “La energía potencial de la carga variará, ya que para desplazarse de un electrodo a otro de la pila, se ha tenido que ejercer alguna fuerza sobre la carga, lo cual se traduce en el desplazamiento de la misma y en el aumento de su energía potencial.*

También porque la energía potencial es la única de las magnitudes que es propiedad de las cargas, y no del circuito (el campo) o la pila”.

*** “La fuerza electromotriz es una propiedad de la pila y por lo tanto no podemos decir que varía en la carga. La diferencia de potencial es una propiedad del circuito y por ello tampoco podemos decir que varíe en la carga.*

La energía potencial si varía ya que es una propiedad de las cargas. Al desplazarse la unidad de carga por el circuito disminuye su energía potencial y aumenta la energía interna de los conductores”.

En relación con el **ítem nº 2:**

Ofrecemos ahora otros dos ejemplos de respuestas evaluadas como correctas, los estudiantes, sin que se les pregunte por ello, explícitamente se refieren a las fuerzas coulombianas que actúan sobre las cargas cuando se desplazan entre dos puntos a diferente potencial electrostático.

** Si sería correcta puesto que tenemos dos cuerpos con diferente potencial y por lo tanto si los unimos con un conductor, debido a las fuerzas coulombianas, se tendrá una corriente (paso de electrones) hasta que se igualen los potenciales de ambos cuerpos”.*

*** “si podríamos tener una corriente porque el generador provoca mediante la fricción y el desplazamiento de las cargas que los puntos A y B posean un potencial diferente, es decir, hay una diferencia de potencial. Por eso al conectar ambos puntos las cargas se desplazarían para conseguir igualar los potenciales de dichos puntos. Este desplazamiento es producido por fuerzas coulombianas.”*

El siguiente es un ejemplo de respuesta que **no** hemos evaluado positivamente:

** “Si, porque en el punto B se quedan las cargas negativas y en el A las positivas, por lo que se produce una corriente”.*

En relación con el **ítem nº 3:**

Los siguientes ejemplos ilustran respuestas evaluadas correctamente.

** “En el interior de la pila, la fuerza electromotriz crea esa diferencia de potencial entre los electrodos mediante el trabajo que fuerzas no coulombianas ejercen sobre la unidad de carga, desplazando y separando las cargas sobre los electrodos en el sentido contrario a que lo harían las fuerzas coulombianas entre las cargas”.*

*** “La energía química de las reacciones de la pila es la responsable de que las cargas se separen, debido a fuerzas no coulombianas. Cuando esto ocurre, hay una diferencia de potencial debida a que uno de los electrodos está cargado positivamente y el otro negativamente”.*

En relación con el **ítem nº 4:**

Debido a la extensión con la que los estudiantes respondían esta pregunta sólo vamos a recoger un ejemplo de respuesta de las valoradas como correctas:

** a) “La fuerza electromotriz se relaciona con: Fuerza no coulombiana, separación de cargas, propiedad de la pila, energía transformada en la pila, energía, unidad de carga.*

b) d.d.p. se relaciona con: fuerza coulombiana, desplazamiento de cargas, energía transformada fuera de la pila, unidad de carga.

a) Se relaciona con las fuerzas no coulombianas, porque estas son las que realizan el trabajo de separar y mantener separadas las cargas en el interior de la pila.

Se relaciona con separación de cargas porque la fuerza electromotriz es la propiedad que separa las cargas y las mantiene separadas en el interior de la pila. Es una propiedad característica de la pila.

En la pila se transforma energía al actuar las fuerzas no coulombianas para separar y mantener separadas las cargas, parte de esta energía se manifiesta en forma de calor.

b) Las fuerzas coulombianas son las que realizan el trabajo de desplazar la unidad de carga entre dos puntos A y B del circuito eléctrico. Las cargas se desplazan entre dos puntos debido a la diferencia de potencial entre ellos, tendiendo a igualar los potenciales. En este desplazamiento de cargas también hay transformación de energía. Decimos que es la unidad de carga, el Culombio, la que se desplaza intentado igualar los potenciales.”

8.2 Resultados obtenidos en la contrastación experimental de la segunda hipótesis, desde el punto de vista de los indicadores de un aprendizaje comprensivo.

Como se recordará, en el Capítulo 2 analizamos el significado y la utilidad del concepto de fuerza electromotriz y señalamos los que deberían ser los indicadores de un aprendizaje, con comprensión, sobre las nociones y procedimientos ligados a dicho concepto y su papel en la interpretación del funcionamiento de una pila y de un circuito eléctrico sencillo de corriente continua estacionaria. Así pues, a la exposición de resultados que hemos llevado a cabo en los apartados 8.1.1, 8.1.2 y 8.1.3, debemos añadir un análisis de los mismos resultados desde la perspectiva de estos indicadores.

Veamos uno a uno el análisis, en base a estos indicadores, de los resultados obtenidos por los estudiantes que han sido preguntados por escrito en situación de examen así como de los que han sido entrevistados, pertenecientes todos ellos a grupos experimentales.

Indicador 1.- Para que las cargas se desplacen a través de un hilo conductor es necesaria la existencia de diferencia de potencial entre dos puntos del hilo.

Este indicador se ha medido a través de los ítems 2a y 4b. En el ítem 2a el promedio de los porcentajes obtenidos por los alumnos de los tres grupos experimentales es del 65% para las respuestas correctas, que justifican, en un contexto electrostático, la necesidad de la diferencia de potencial para que haya movimiento de cargas. Se trata de un porcentaje que nos permite inferir que una mayoría de los estudiantes experimentales, han aprendido esta noción. Incluso los datos que poseemos acerca del aprendizaje a corto-medio plazo indican que, es una idea que los estudiantes han afianzado, puesto que los porcentajes de respuestas correctas, en la prueba realizada tres meses después son 57 % y 78 % para los grupos A y B.

En el ítem 4b se plantea la cuestión en un contexto electrocinético. Los estudiantes deben utilizar la noción de potencial y aplicarla correctamente en las explicaciones del funcionamiento de un circuito de corriente continua. De nuevo el porcentaje promedio de explicaciones correctas para los grupos experimentales es del 61% , si bien pasado el tiempo en los grupos A y B se observa que, en este contexto electrocinético los porcentajes de respuestas correctas disminuyen.

Los resultados obtenidos en relación con este ítem al comienzo del curso siguiente son buenos sin paliativos, del conjunto de los estudiantes, el 80% responde con corrección a la pregunta que evalúa este indicador, haciendo intervenir en sus explicaciones el carácter conservativo (culombiano) de las fuerzas que desplazan las cargas entre dos puntos a diferente potencial.

Los resultados de los ítems muestran un sólido aprendizaje del indicador en cuestión, al menos en las circunstancias evaluadas.

Indicador 2.- El concepto de fuerza electromotriz procede del hecho de que la pila separa cargas y crea una diferencia de potencial.

La evaluación de este indicador se realiza mediante los ítems 2c, 3a y 7a. En el ítem 2c el valor promedio alcanzado por los tres grupos experimentales supera el 50% cuando se evalúa la unidad por primera vez. Era importante para nuestros objetivos que la noción de separación de cargas se comprendiera para el caso del Van der Graaf, ya que pretendíamos, a partir de aquí, que los estudiantes, por analogía, trasladaran para el funcionamiento de la pila esta acción de separar las cargas. Los resultados cuando se analiza esta acción para el caso del generador electrostático son satisfactorios. Los porcentajes para los grupos A y B del 60 y 65 % respectivamente de explicaciones correctas alcanzados tres meses después seguían siéndolo.

Los resultados obtenidos en el ítem 3a superan, como promedio, el 50% de éxitos. Los estudiantes explican satisfactoriamente cómo se produce la diferencia de potencial en una pila, una descripción, esto no debe olvidarse, que se realiza en el ámbito microscópico, con lo que la fuerza electromotriz deja de ser **sólo** la medida de la diferencia de potencial en circuito abierto. Los alumnos al aprender la relación entre lo

macro y lo micro, demuestran un aprendizaje sólido de las ideas que es necesario utilizar en las explicaciones, lo que se confirma con los resultados que se obtienen al evaluarles de nuevo un tiempo después, en este momento, aproximadamente, un 50 % de los estudiantes sigue empleando argumentaciones elaboradas y correctas, como ya se ha mostrado.

En cuanto a los resultados del ítem 7a, son realmente buenos en los porcentajes de aciertos en la primera prueba, porcentajes que rozan o superan el 75% de éxito, pero cuando los estudiantes responden por segunda vez más del 60 % de ellos demuestra que el indicador de aprendizaje que describe, a nivel microscópico, los atributos del concepto de fuerza electromotriz, ha sido aprendido significativamente.

Los resultados obtenidos, en relación con este indicador, con los resultados convergentes de los ítems 3 y 4, dejan claro que el aprendizaje de este indicador es uno de los más firmemente aprehendidos por los estudiantes, un porcentaje superior a la media en todos los casos ofrece explicaciones correctas.

Indicador 3.- La fuerza electromotriz es la magnitud que mide el trabajo realizado por fuerzas no conservativas para separar las cargas y desplazarlas.

Pero el concepto de fuerza electromotriz puede ir más allá del ámbito de los circuitos de corriente continua, como se dice en el indicador anterior. La acción de separar y desplazar cargas es una noción que permite explicar el funcionamiento (a nivel microscópico) de una pila, pero también de un generador de Van der Graaf o el propio efecto piezoeléctrico. Este indicador lo hemos evaluado parcialmente mediante el ítem 2 apartado b), pero también mediante el ítem 3 apartado b); el ítem 4 apartado b) y el 7 a).

Este indicador se ha evaluado en un contexto de circuitos de corriente continua mediante los ítems 3b y ítem 4b. Así mismo, en el ítem 8 se plantea la relación entre las magnitudes de diferencia de potencial y fuerza electromotriz. Los resultados de los ítems 3b, 4b y 8 apuntan todos en la misma dirección y es que, proporcionar a los estudiantes explicaciones de lo que sucede a nivel microscópico, lejos de ser una complicación añadida, les facilita la comprensión y la aplicación de los conceptos. Los resultados indican que las nociones puestas en juego se utilizan correctamente en un

abánico de situaciones que avalan que, la noción a la que se refiere este indicador se ha aprendido de manera satisfactoria incluso en un plazo de tiempo medio.

Pasado el verano los resultados muestran como la mayoría de los estudiantes evaluados (globalmente un 68%) han aprendido correctamente este indicador.

Indicador 4.- La diferencia entre la fuerza electromotriz y la diferencia de potencial viene dada por medir diferentes tipos de acciones producidas por causas radicalmente diferentes.

Este indicador se mide a través de los ítems 2b, 4, 5 y 8. Distinguir entre fuerzas eléctricas culombianas y no culombianas parecía un “exceso” a algunos profesores, pero los resultados demuestran que, muy al contrario, a la hora de explicar el funcionamiento de una pila o de un Van der Graaf, como se hace en el ítem 2b, esta distinción resulta plausible y verosímil para los estudiantes. En los textos de Bachillerato que hemos analizado la única fuerza eléctrica que los alumnos han estudiado, antes de iniciar el estudio de los circuitos, es la fuerza de Coulomb que se refiere a las atracciones y repulsiones de las partículas cargadas. Si tener una diferencia de potencial, en el caso de una pila o en el de un Van der Graff, supone una separación de cargas, ¿cómo es posible que “este efecto” se le impute a fuerzas culombianas? habría que añadir otros atributos a las fuerzas de Coulomb. La distinción, por tanto, resulta útil a la hora de explicar el funcionamiento de los generadores que se estudian y como nociones que permiten explicar el funcionamiento de un circuito como los que se han estudiado y los resultados son contundentes 60%, 65% y 57% muestran un aprendizaje comprensivo del indicador y pasado un tiempo el porcentaje para el grupo B prácticamente no ha cambiado y para el grupo A ha disminuido ligeramente.

Pero, no se trata sólo de que la fem y la diferencia de potencial miden diferentes tipos de acciones producidas por causas radicalmente diferentes, se trata también de conocer el ámbito en el que se pueden realizar las medidas de las acciones, es decir conocer el ámbito de aplicación de los conceptos, bien sea para realizar cálculos tras la toma de las medidas oportunas (nivel macro), o bien en el ámbito en el que los conceptos pueden aplicarse a la hora de las explicaciones a nivel microscópico. Los resultados obtenidos en el ítem 4, demuestran un nivel satisfactorio de aprendizaje de

esta noción cuando se evalúa la primera vez, los porcentajes globalmente están por encima del 50%, no obstante, es el único aspecto que globalmente y pasado un tiempo, tampoco llegan al 50% de éxitos. Así mismo, el ítem 5 que se sitúa en el mismo contexto que el ítem 4, obtiene parecidos buenos resultados, 67%, 61% y 60% de respuestas correctas para el ítem 5a y, 75%, 42% y 67% para el ítem 5b. A largo plazo los resultados descienden. Esto nos confirma los resultados de la investigación sobre dificultades en el aprendizaje del modelo explicativo de circuitos sencillos de corriente continua. Sin embargo, como ya hemos visto, los resultados obtenidos con nuestra estrategia de enseñanza son notablemente mejores que los obtenidos por la enseñanza tradicional.

Así mismo, el ítem 8 confirma la tendencia de resultados que muestran un aprendizaje significativo de este indicador.

Una vez más los datos en relación con este indicador, derivados de la evaluación del ítem nº4 de la prueba pasada entre los seis y los siete meses después, indican que la mayoría de los estudiantes (68%) asocian fuerza electromotriz con fuerzas no coulombianas y la diferencia de potencial con las fuerzas coulombianas.

Indicador 5 .- 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.

Hemos medido este indicador a través de los ítem 1, 6a y 7a. En el ítem 1, porcentajes de respuestas correctas obtenidos por los estudiantes de los grupos experimentales, 60%, 81% y 67% demuestran que es un aspecto del aprendizaje del concepto de fuerza electromotriz que los estudiantes aprenden de forma muy mayoritaria y lo que es más, con el paso del tiempo más del 50% de los estudiantes a los que se les ha vuelto a preguntar por ello, tienen claros no sólo los ámbitos de aplicación del concepto de fem sino que, para la situación que se les planteaba, el mismo porcentaje señalaba como la carga no posee fuerza electromotriz sino energía potencial electrostática. También forma parte de las argumentaciones de los estudiantes cuando al justificar el apartado 1.3 bloque 1 de las entrevistas. Sin embargo, hemos visto que menos del 5 % de los textos de Bachillerado y poco más del 20 % de los textos de nivel universitario hacían referencia explícita a la propiedad característica de la pila que se denomina “fuerza electromotriz”. Evidentemente tampoco se hacía explícito que el

potencial es una propiedad asociada a los puntos del espacio y así sucesivamente con los conceptos implicados en el estudio de los circuitos eléctricos. Coherentemente con la poca atención que le dedica a este indicador la enseñanza habitual, los porcentajes de respuestas correctas obtenidos por los estudiantes del grupo de control, están en línea con el porcentaje de textos que se refieren al asunto.

Los buenos resultados del ítem 1 son confirmados por los de los ítem 6a y 7a. Se trata pues de un indicador de aprendizaje que podemos afirmar que los estudiantes de los grupos experimentales parecen haber incorporado a su estructura cognitiva positivamente.

Sólo el 48 % del total de los estudiantes evaluados al comenzar el curso siguiente, argumentan en sus explicaciones como para considerar que este indicador es alcanzado positivamente. No obstante si comparamos con los porcentajes de respuestas correctas ofrecidas por estudiantes del CAP, liceciados en Física y Química, podemos pensar que se trata de un avance significativo, en un aspecto del aprendizaje de los concepto físicos menos cuidados por los autores de materiales didácticos y libros de texto: el ámbito de aplicación y límites de los conceptos que se van presentando a los estudiantes.

Indicador 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.

Es evidente que el indicador anterior expresa todo un estilo de trabajo. Es una meta global en cuya consecución se trabaja en clase, una manera de alcanzar el conocimiento proponiendo reiteradamente a los estudiantes actividades, la solución de las cuales, pasa por ese estilo reflexivo que consiste en intercambiar argumentaciones, señalar limitaciones, hacer propuestas, etc. Para ello se diseñaron las cuestiones para las entrevistas tanto individuales como de puesta en común. Como ya hemos explicado en el apartado 8.1.2 se intenta indagar sobre el conocimiento científico que utilizan los

estudiantes al justificar sus afirmaciones y su proximidad con la metodología de trabajo en ciencias. En el apartado 8.1.2 se han recogido los aspectos más destacados de las entrevistas con los estudiantes. Creemos que las explicaciones que los estudiantes emplean reiteradamente allí, ilustran fehacientemente un estilo de razonamiento en línea con el propósito de este indicador y que nos permite señalar avances positivos en esta dirección.

En relación con este indicador de aprendizaje, los resultados obtenidos al comienzo del curso siguiente también nos permiten hacer una valoración muy positiva de su logro. Las explicaciones que dan los estudiantes, están bien elaboradas, demuestran un análisis comprensivo de la situación que se les plantea y sobre la que deban pronunciarse.

Indicador 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.

No es la situación de examen de una hora de duración la más adecuada para evaluar actitudes como las que se expresan en este indicador. Porque la propia situación puede llevar a los estudiantes a dar las respuestas que, a partir de la valoración que hayan hecho de las opiniones del profesor, crean que éste espera de ellos, en lugar de expresar sus propias opiniones o convicciones. Es esta una de las razones por las que solicitamos alumnos voluntarios para contestar al cuestionario y por lo que este bloque cerraba una entrevista en la que “ya nos habíamos ocupado de los conocimientos”, se trataba de, en la medida de lo posible, indagar en la autenticidad de las opiniones de los estudiantes en torno al tema.

Creemos que las entrevistas en torno al bloque 3 (cuestionario que se recoge en el cuadro 7.2) ponen de manifiesto cómo a partir de unos datos los estudiantes realizan una secuencia de cálculos que les llevan a: 1) Interesarse por la forma en la que se reciclan unas cantidades de residuos sólidos que, a la vista de sus propios cálculos les parece que hay que considerar. 2) Apuntan a su “deber” como ciudadanos de conocer la información relacionada con el tema, 3) Adoptar una actitud crítica con algunos

comportamientos relacionados con el consumo desaforado que fomentan algunos avances tecnológicos.

Valoramos que, las opiniones recogidas en esta parte de las entrevistas, nos permiten hacer una estimación positiva en lo que se refiere al aprendizaje que debiera reflejar este indicador. Los datos que hemos venido exponiendo confirman que los indicadores previstos para facilitar la contrastación del tipo de aprendizaje realizado, se han cumplido. Por último y a modo de resumen la tabla siguiente recoge el indicador, el ítem con el que se ha valorado y el porcentaje promedio de respuestas correctas de los estudiantes experimentales.

Tabla 8.17. Indicadores implicados en los ítems de la prueba pasada a los estudiantes experimentales y porcentaje de respuestas correctas.

Indicador	Ítem (contexto de aplicación)	Respuestas correctas % Promedio experimental
1	2 a (Electrostático)	65
	4 b (Electrocinético: circuito sencillo de corriente continua)	61
2	2c	53
	3a (Nivel microscópico: interior de la pila en un circuito)	55
	7a (Nivel macroscópico: relaciones entre conceptos)	79
3	2 b) (cuadro 7.1)	61
	3b (contexto electrocinética)	53
	4b (contexto electrocinética)	61
	7 a) (cuadro 7.1)	79
	8 (nivel macroscópico: relaciones entre magnitudes)	60
4	2b (Electrostático)	
	4a (Electrocinética: nivel macro)	49
	4b (Electrocinética: nivel micro)	61
	4c (Electrocinética: nivel macro)	53
	5a (Electrocinética: nivel macro)	63
	5 b (Electrocinética: nivel macro)	55
	8 (nivel macroscópico: relaciones entre magnitudes)	60
5	1 (Nivel micro)	69
	6 a (electrocinética: macro)	48
	7a (Nivel macroscópico: relaciones entre conceptos)	79
6	Bloque 1 (Entrevista)	
	Bloque 2 (Entrevista)	
7	Bloque 3 (Entrevista)	

8.3 Resultados que muestran que la propuesta alternativa contribuye a generar actitudes positivas de los estudiantes hacia el aprendizaje del concepto de fuerza electromotriz.

Ya nos hemos referido a la importancia de probar que la enseñanza impartida genera actitudes positivas hacia las ciencias y su aprendizaje por parte de los estudiantes de Bachillerato.

En la tabla siguiente se recogen los resultados obtenidos al pasar el instrumento diseñado (presentado en el cuadro 7.3) para valorar la actitud con la que los estudiantes de los grupos experimentales han acogido el estudio de los materiales y el tipo de enseñanza que conlleva. El cuestionario fue pasado por cada uno de los profesores durante el curso 2005-2006, en la sesión del examen y antes de que los estudiantes conocieran el resultado de la evaluación de conocimientos.

Hay un comentario más en relación con las actitudes de los estudiantes, que no nos resistimos a señalar aquí, antes de presentar los datos del cuestionario específico. Cuando en el mes de Septiembre de 2006, al comenzar el curso siguiente en el que se llevó a cabo la última recogida de datos, les pedimos a los estudiantes que queríamos que volviesen a resolver un examen para evaluar su aprendizaje sobre algunos de los conceptos estudiado en el curso anterior, después de las reticencias iniciales, hay que señalar que, todos los estudiantes participaron de buen grado conscientes de que, lo único que iban a obtener eran datos sobre su aprendizaje, la mayoría incluso cursaban la asignatura de Química de 2º curso de Bachillerato, por lo que no cabía pensar en ningún tipo de motivación interesada en relación con futuras evaluaciones. Los estudiantes del I.E.S del investigador preguntaron incluso cómo habían contestado a la prueba a los pocos días de haberla realizado.

Nosotros valoramos que esta actitud positiva hacia su aprendizaje, en alguna medida, refuerzan y avalan los datos que sobre actitudes presentamos a continuación.

Tabla 8.17. Resultados del cuestionario sobre actitudes (cuadro 7.3)

<i>Aspectos analizados</i>	Grupo A N = 30		Grupo B N = 31		Grupo C N = 32	
	Media	Moda	Media	Moda	Media	Moda
1. Contenidos trabajados						
<i>La cantidad de contenidos ha sido adecuada</i>	7,73	7	6,58	6	7,63	7
<i>Los objetivos que se perseguían estaban claros</i>	6,33	6	5,8	6	6,90	8
<i>Los contenidos eran interesantes</i>	6	6	6,06	7	7,26	6
<i>Los nuevos conceptos se relacionaban con anteriores</i>	7,26	7	7,38	9	6,80	7

2. La forma de trabajar	Media	Moda	Media	Moda	Media	Moda
<i>El método de enseñanza es adecuado a los contenidos previstos.</i>	6,16	7	6,54	7	6,53	6
<i>Condiciones necesarias para aprender</i>	6,70	6	6,90	7	6,40	6
<i>Las actividades propuestas en clase eran adecuadas</i>	5,93	5	6,48	7	6,16	7
<i>Se hacían puestas en común clarificadoras</i>	7,53	8	7,16	9	5,56	5
<i>En el aula había buen clima de trabajo</i>	6	6	7,77	8	6,50	7

3. La satisfacción	Media	Moda	Media	Moda	Media	Moda
<i>Las clases han conseguido atraer mi interés</i>	6,9	7	5,90	5	7,40	6
<i>Nunca deseo que llegue la hora de clase</i>	3,8	5	4,58	5	3,66	5
<i>Existe apoyo por parte del profesor para superar las dificultades</i>	6,66	5	7,35	8	6,90	5
<i>Ha existido un clima de cooperación entre los estudiantes</i>	6,90	8	8,03	9	8,30	8

Si tenemos en cuenta que la puntuación 5 sería neutra, como intermedia entre los valores máximo y mínimo susceptibles de ser usados en su valoración por los estudiantes, entendemos que, en general, muestran una actitud positiva hacia los contenidos trabajados (primera parte). Destacando especialmente los aspectos que hacen referencia a la relación con los conceptos estudiados con anterioridad y a la cantidad de contenidos trabajados en el programa.

Con relación al segundo bloque cabe señalar un aspecto del máximo interés y es que los estudiantes en este bloque evalúan/valoran cuestiones que les implican tanto a nivel colectivo como individualmente, por ejemplo en las condiciones de trabajo en el aula, en las puestas en común, el clima de trabajo su propia actitud influye notablemente y ellos en la sesión en la que el investigador ofreció a sus alumnos el resultado global de la prueba así lo reconocieron, que ellos se habían puntuado también a sí mismos y no sólo lo que estaba relacionado con el profesor; admitiendo que habían sido severos a la hora de evaluar su propia actitud en las puestas en común.

En cuanto al tercer bloque se puede señalar que la media de los tres grupos esta por debajo del 5 cuando valoran el apartado que hace referencia al momento de ocuparse de esta asignatura. También destaca la valoración que hacen de la disponibilidad del profesor para ayudarles en sus dificultades de aprendizaje.

CAPITULO 9. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Este trabajo se ha ocupado de la problemática educativa en torno a la enseñanza/aprendizaje de los circuitos eléctricos sencillos de corriente continua estacionaria y más concretamente de aquellas nociones relacionadas con el concepto de fuerza electromotriz. Se ha ocupado también de su implementación, circunscrita al nivel de la Secundaria postobligatoria, primer curso de Bachillerato de Ciencias.

El concepto de fuerza electromotriz, tradicionalmente ha ocupado un lugar de poca relevancia en la enseñanza de las ideas clave de la electricidad y de aquí, entre otras razones, su escaso desarrollo ontogenético como señalan Jiménez y Duran (1998). Actualmente, en el Bachillerato, el tema de electricidad se inserta en una unidad sobre las Transferencias de Energía y desde luego sería difícil encontrar un ámbito de la Física mejor, en el que las nociones de energía, trabajo conservativo y no conservativo, potencia, etc. tanto desde las perspectivas macroscópicas como de las microscópicas, faciliten la formación y la educación de los estudiantes en el manejo de dichos conceptos. Un circuito eléctrico con una pila y resistencias es un sistema idóneo como ningún otro, para comprender las transferencias de energía.

El desarrollo de la investigación se ha estructurado alrededor de tres cuestiones básicas:

1. ¿Qué significa aprender el concepto de fuerza electromotriz, en el contexto de los circuitos elementales de corriente continua?

Responder adecuadamente a la pregunta anterior exige establecer criterios, se les ha llamado indicadores, que se muestren eficaces para distinguir cuando el aprendizaje sobre el tema propuesto es comprensivo o no.

2. ¿Cuáles son las principales dificultades conceptuales y procedimentales que tienen los estudiantes en relación con el concepto en cuestión?

Es necesario para responder a esta pregunta establecer un análisis crítico de la enseñanza habitual, en relación con el marco teórico establecido en la actualidad. Esto supone un análisis de la presentación del tema por parte de los libros de texto y el profesorado, así como el aprendizaje logrado por los estudiantes.

Ante la insatisfacción que producen los resultados obtenidos, surge una pregunta obligada:

3. ¿Es posible diseñar una propuesta alternativa que proporcione una mejoría significativa en el aprendizaje conceptual y procedimental, así como de las actitudes mostradas hacia el tema objeto de la investigación?

Se hace una propuesta curricular, según el modelo de enseñanza/aprendizaje como “investigación orientada”, analizando en términos de los indicadores establecidos, si dicha propuesta da lugar a una mejoría significativa en relación a los conceptos implicados, los procedimientos y las actitudes de los estudiantes respecto a la materia tratada.

A continuación y en relación con cada una de las cuestiones planteadas, se pasa a resumir las contribuciones más destacadas de este trabajo.

9.1 Resumen y Conclusiones

I.

En la **primera parte** de la investigación se ha establecido la **relevancia del concepto de fuerza electromotriz** en la mejora sustantiva del aprendizaje de nociones fundamentales en el estudio de los circuitos eléctricos (véase planteamiento del problema). La noción de fuerza electromotriz es una **idea puente entre la Electrostática y los sistemas que denominamos circuitos**, por lo que se hace necesario analizar el significado y utilidad de dicha noción (planteamiento del problema y apartado 2.1), lo que además se ha realizado con cierto pormenor en la propuesta alternativa que se ha presentado.

La relación del concepto con las nociones de carga y energía nos ha llevado a una **revisión histórica** (apartado 1.2), **con objeto de analizar las dificultades epistemológicas que se dieron en el desarrollo del concepto de fuerza electromotriz** (apartado 1.3). Tener en cuenta estos aspectos nos ha permitido salir al paso de algunas dificultades de aprendizaje (apartado 1.4); lo que en la organización y secuenciación tradicionales del currículo se olvida con frecuencia.

El análisis histórico mencionado nos reveló una estructura problematizada en relación con la correcta interpretación de la función de la pila en un circuito, sobre todo

desde la perspectiva de la descripción de las interacciones eléctricas que tienen lugar a nivel microscópico, lo que **nos llevó a elaborar un conjunto de indicadores** capaces de describir en qué consiste **un aprendizaje comprensivo** de las nociones relacionadas con el concepto de fuerza electromotriz. Los indicadores construidos, en las dimensiones conceptuales epistemológicas y actitudinales, son los siguientes (apartado 2.2):

1. Un modelo explicativo del movimiento de las cargas en un circuito sencillo de corriente continua acepta que *para que las cargas se desplacen a través de un hilo conductor es necesario la existencia de diferencia de potencial entre dos puntos del hilo.*
2. Una manera de generar una diferencia de potencial 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. De aquí la necesidad de definir el concepto de *fuerza electromotriz, como acción no electrostática que separa cargas y las mantiene separadas, creando de este modo una diferencia de potencial.*
3. Separar cargas supone un desplazamiento de las mismas, lo que implica la realización de un trabajo, es decir, una transferencia de energía. Pero el trabajo necesario para separar las cargas en los electrodos, lo realizan **fuerzas eléctricas no conservativas**. 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.*
4. Las cargas que se desplazan a través de un conductor lo hacen bajo la acción de fuerzas eléctricas conservativas. *La diferencia entre la fuerza electromotriz y la diferencia de potencial viene dada por medir diferentes tipos de acciones producidas por causas diferentes.* La primera debida a la acción de un campo de fuerzas no conservativo y la segunda a uno conservativo. En síntesis, con un lenguaje en términos de energía podemos decir que: ***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.***
5. Todo lo anterior nos lleva a señalar 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. La complejidad de la construcción conceptual exige que los estudiantes sean conscientes de que: los conceptos se introducen con el propósito de resolver situaciones problemáticas de interés, en nuestro caso la *descripción e interpretación del papel de la pila con un léxico que exprese la trama conceptual*.
7. El aprendizaje de los conceptos exige utilizar reiteradamente las estrategias del trabajo científico, de modo que los estudiantes se enfrenten a *un análisis cualitativo de situaciones problemáticas, diseñando y realizando comprobaciones e interpretaciones de datos* que con limitaciones les permitan interpretar físicamente datos numéricos, análisis crítico de proposiciones, y todo esto en nuestro caso en el contexto que proporciona un circuito de corriente continua compuesto por pilas y resistencias.
8. Y todo lo anterior debe permitir que los estudiantes sean capaces de analizar aplicaciones CTS que permitan contextualizar la teoría aprendida y que les permita en un futuro, como ciudadanos que son, *la adopción de actitudes responsables* hacia el desarrollo tecnológico y las implicaciones de carácter social que ello conlleva.

II.

Una vez fundamentado el marco desde el que se va a realizar el análisis crítico de la enseñanza habitual de los circuitos eléctricos de corriente continua, en la **segunda parte** de la investigación formulamos nuestra **primera hipótesis**:

La enseñanza habitual del concepto de fuerza electromotriz, dentro del modelo explicativo de corriente continua en circuitos sencillos, no tiene en cuenta los resultados de la investigación en didáctica de las ciencias y por ello, presenta deficiencias didácticas de tipo conceptual, epistemológico y actitudinal, que dificultan un aprendizaje basado en la comprensión por parte de los estudiantes.

El control experimental de las derivaciones de esta primera hipótesis (apartados 4.1 y 4.2), ha conducido a unos resultados que, en todos los casos son convergentes y la corroboran. Podemos resumir las conclusiones generales del siguiente modo:

1. La mayoría de libros de texto, de los niveles analizados, no justifican explícitamente la necesidad de introducir la magnitud fuerza electromotriz para explicar la separación de cargas necesaria para producir una diferencia de potencial entre los bornes de una pila en un circuito sencillo de corriente continua. Ninguno de los libros de texto de Secundaria ni el 64% de los libros de Universidad se refieren de forma explícita a la necesidad de utilizar el concepto de fuerza electromotriz en el modelo explicativo del funcionamiento de un circuito de corriente continua.

2. Aspectos importantes de la interpretación de los circuitos quedan sin aclarar: la diferencia entre las magnitudes fuerza electromotriz y diferencia de potencial y consecuentemente la posibilidad de diferenciar entre las ecuaciones $\varepsilon = I \cdot R$ y $V = I \cdot R$ y sus ámbitos de aplicación, así como sus diferencias a nivel microscópico, con lo que la interpretación del circuito permanece globalmente como algo confuso, restringido a la realización de ejercicios en los que se aplican fórmulas para calcular el valor de resistencias o cantidades de calor transferidas.

3. Los libros presentan de forma bastante generalizada una visión aporreada, acumulativa lineal y en exceso analítica de la construcción del conocimiento científico, donde los conceptos se introducen atendiendo, casi exclusivamente, a una estructura formal en su versión acabada actual y sin que existan problemas estructurantes que los justifiquen (Lederman 1999, Fernández et al. 2002).

4. No se desarrollan en clase aspectos históricos que podrían servir precisamente para resaltar el carácter problemático de la construcción de conceptos (Campanario 2003), ni se presta atención a contenidos procedimentales propios de la metodología científica (Guisasola et al 2003-a) como el análisis cualitativo de los problemas, la formulación de hipótesis y su significado, análisis del alcance de la solución propuesta, búsqueda de posibles soluciones más generales, etc. (ver cuadro 4.1 sobre carencias epistemológicas).

5. Se proponen, casi exclusivamente, situaciones tipo en las que los estudiantes básicamente trabajan aspectos cuantitativos, con lo que se llega a situaciones de

resolución de problemas que adquieren un carácter meramente operativo, obviando de esta forma las deficiencias procedimentales que tienen los estudiantes.

6. Finalmente, es de señalar la visión descontextualizada de la ciencia que muestra el profesorado que suele dedicar poco tiempo a las actividades relacionadas con la Ciencia/Técnica/Sociedad más allá de lo que supone una aplicación inmediata de los conceptos y que, por tanto, no favorecen los aspectos motivacionales entre los estudiantes (ver cuadro 4.2 sobre las carencias didácticas). Todo esto se ve confirmado de forma general y no sólo para el tema del que aquí nos ocupamos por distintas investigaciones, Sánchez y Varcárcel 2000, Leonard et al. 2002 y Zubimendi 2003.

Como consecuencia de las deficiencias apuntadas, hemos podido comprobar que, si bien los estudiantes son capaces de responder correctamente cuando se trata de aplicar un procedimiento memorístico a una cuestión semejante a las que resuelven en clase, cuando les son planteadas en cuestiones, escritos y entrevistas situaciones de alta demanda cognitiva, se produce un alto fracaso que indica un aprendizaje no comprensivo de los conceptos (apartado 5.3). En concreto hemos contrastado que:

- Algunas dificultades de los estudiantes, se asemejan a los problemas epistemológicos que hubieron de superarse en el proceso de construcción de las ideas formales acerca del concepto de fuerza electromotriz. Ocurre también, que los estudiantes presentan ideas explicativas derivadas de la utilización de una metodología del sentido común.
- Los estudiantes no saben por qué se introduce el concepto de fuerza electromotriz, qué es lo que mide y cuál es su papel en el modelo explicativo de circuitos sencillos de corriente continua. Para la mayoría el problema se resuelve empleando el concepto de Diferencia de Potencial que “*es lo mismo, como se deriva de las ecuaciones que las representan, $V_A - V_B = I \cdot R$ y $\varepsilon = I \cdot R$ ”*. Explicaciones de este tipo son esgrimidas por porcentajes entre el 98% y el 100% de los estudiantes.
- Los estudiantes confunden una ley que se cumple para un restringido número de materiales, y en unas condiciones de temperatura determinadas (ley de Ohm), con el Principio de Conservación de la Energía. De nuevo sólo un

singular 2% de los estudiantes del grupo avanzado eran capaces de hacer distinciones y ninguno entre los estudiantes de Bachillerato.

- La mayoría de los estudiantes no es capaz de explicar coherentemente, en el ámbito de lo microscópico, el papel de la pila o la diferencia de potencial en el circuito. De manera general las relaciones entre las magnitudes de la Electrostática y las de los circuitos no se articula con un lenguaje que demuestre un aprendizaje comprensivo de los conceptos y sus relaciones, lo que se pone de manifiesto para un porcentaje superior algunos casos al 84% de los estudiantes.

Las entrevistas realizadas a los estudiantes confirman en todos sus extremos los resultados obtenidos en las pruebas escritas (apartado 5.3.4).

Todos los resultados anteriores han apoyado de un modo convergente la primera hipótesis de esta investigación y nos permiten afirmar que: **Existe un problema didáctico en la enseñanza habitual de los circuitos eléctricos de corriente continua estacionaria y que, en general, la enseñanza habitual adolece de graves insuficiencias epistemológicas y didácticas que son factores destacados para justificar el escaso aprendizaje comprensivo logrado por los estudiantes.** Esta ha sido nuestra respuesta a las dos primeras cuestiones que han estructurado el trabajo (ver páginas 378 y 379 de este capítulo).

III.

La respuesta a la tercera interrogante, la buscamos en la validación de nuestra *segunda hipótesis*: **Es posible elaborar una secuencia de aprendizaje alternativa para la enseñanza del concepto de fuerza electromotriz, en el contexto de los circuitos eléctricos sencillos, basado en un modelo de aprendizaje como “investigación orientada”, que sea coherente con los resultados de la investigación en didáctica de las ciencias y que proporcione una mejoría significativa en el aprendizaje de los conceptos y de los procedimientos, a la vez que genere entre los estudiantes actitudes positivas hacia la materia.**

Podemos resumir las contribuciones que este trabajo aporta en relación a las características epistemológicas y didácticas que debe poseer un material curricular sobre

circuitos que, a su vez, sea coherente con las aportaciones actuales de la investigación didáctica en la enseñanza de las ciencias, a través de los siguientes puntos (apartado 6.2):

1. **Plantear al inicio del curso**, así como en los grandes bloques que constituyen el temario, **situaciones problemáticas que sirvan como punto de partida para el trabajo de los estudiantes**, con objeto de que éstos se apropien de los problemas que se les presentan, tomen conciencia de su interés y se impliquen en la tarea encomendada.

2. **Tomar en consideración** las aportaciones de la Historia de la Ciencia. La contextualización histórica de las teorías científicas, muestra que éstas son productos socio-históricos en continuo proceso de reelaboración y sometidas a debate permanente. Esta visión de la ciencia implica, en el terreno didáctico, **la necesidad de realizar una presentación de las teorías científicas alejada de una visión del crecimiento de la ciencia como una acumulación lineal de conocimientos acabados y de carácter definitivo**. Una segunda aportación de la Historia de la Ciencia es la detección de los obstáculos epistemológicos y ontológicos que se dieron en el desarrollo de las teorías. Esta aportación trasladada al terreno didáctico, nos indica que en la estructuración del programa alternativo que presentamos, se deben tener en cuenta estos obstáculos para afrontar la enseñanza desde una perspectiva científica en la construcción de conocimientos.

3. **Proponer actividades**, expresamente diseñadas **para superar las posibles dificultades de los estudiantes y sus ideas alternativas**, en relación con la noción de fuerza electromotriz y los conceptos fronterizos con ella.

4. **Diseñar la secuenciación** de los contenidos del curso con una lógica problematizadora, esto es, **como una posible estrategia para avanzar en la solución a las grandes preguntas iniciales**; lo que da lugar a un hilo conductor en el que cada apartado se convierte en una concreción del problema inicial y cuya solución permite avanzar en la de éste, al mismo tiempo que puede generar nuevos problemas, multiplicando así las relaciones entre diferentes aspectos. **De este modo, los conceptos son introducidos funcionalmente como parte del proceso de tratamiento de los problemas planteados.**

5. **En este contexto de resolución de problemas**, los conceptos y modelos se introducen, por parte de los estudiantes y del profesor, como tentativas, como hipótesis fundadas, que deben ser puestas a prueba, tanto a través de su capacidad de predicción a la hora de abordar situaciones problemáticas abiertas concretas, como a través del establecimiento de su consistencia con la globalidad de los conocimientos establecidos por investigaciones precedentes. **La incertidumbre se presenta como algo intrínseco a la ciencia moderna, que nos proporciona ayuda para plantearnos preguntas relevantes y no respuestas “correctas”.**

6. **Resulta esencial la recapitulación periódica** sobre lo que se ha avanzado en la solución al problema planteado, los obstáculos superados y lo que queda por hacer, **prestando así especial atención a la regulación y orientación de los estudiantes** en el desarrollo de la investigación y, a la vez, de **su aprendizaje.**

Todas estas consideraciones constituyen **una forma de trabajo en el aula que favorece explicitar las ideas propias y confrontarlas con las de otros**, en un ambiente hipotético-deductivo rico en episodios de argumentación y justificación, tan importantes para el aprendizaje de conocimientos científicos. Se pretende así crear un ambiente que favorezca simultáneamente la implicación afectiva y la racionalidad científica de todos los implicados (profesor y estudiantes) en la resolución de problemas. Por supuesto, ello exige una cuidadosa planificación de la tarea del profesor, mediante actividades debidamente engarzadas en un programa, y dejar tiempo en el aula para que los alumnos reflexionen, argumenten, refuten y tomen decisiones.

El control experimental de las derivaciones de la segunda hipótesis (apartado 7.1), ha conducido (en su estado final) a resultados que en todos los casos son convergentes (capítulo 8) y la corroboran.

En efecto, los resultados obtenidos tras la aplicación de nuestro programa alternativo a tres grupos experimentales de alumnos durante el curso 2005-2006 pueden examinarse, no sólo al comparar los resultados obtenidos por los estudiantes que han seguido los materiales alternativos y los que no (apartado 8.1; ver gráfico comparativo de la página 348), sino sobre todo a la luz de los indicadores de un aprendizaje

comprendivo, aspecto este último que se resume en los siguientes términos (ver, para mayor información el apartado 8.2 a partir de la página 367):

- Una mayoría de estudiantes de los grupos experimentales (en promedio de un 65 %), que ha respondido al cuestionario escrito en situación de examen, ha sabido explicar que *para que las cargas se desplacen a través de un hilo conductor es necesaria la existencia de diferencia de potencial entre dos puntos del hilo.*

Indicador 1.

- Asimismo, la mayoría de nuevo de los estudiantes de los grupos experimentales reconoce que la noción de fuerza electromotriz está asociada con *el hecho de que la pila separa cargas, las mantiene separadas y crea de este modo una diferencia de potencial.*

Indicador 2.

- Un porcentaje alto de estudiantes, 79%, reconocen, describen y definen la fuerza electromotriz como *la magnitud que mide el trabajo realizado por fuerzas no conservativas (no coulombianas) para separar las cargas y desplazarlas.*

Indicador 3.

- Porcentajes que superan el 50% distinguen los atributos que hacen diferentes las magnitudes fuerza electromotriz y diferencia de potencial, diferencia que *viene dada por medir diferentes tipos de acciones producidas por causas radicalmente diferentes.* La primera debida a un **campo no conservativo** (campo de fuerza no coulombianas) y la segunda a uno **conservativo** (campo de fuerzas coulombianas). Y lo que es más, identifican el trabajo realizado por unas y otras como formas distintas de producirse la transferencia de energía entre las cargas y en concreto en relación con la unidad de carga.

Indicador 4.

- Para el 69% de los estudiantes que han seguido la alternativa didáctica que hemos elaborado, la fuerza electromotriz es una propiedad característica de la pila *y no es una propiedad ni del circuito ni de las cargas.*

Indicador 5.

- Los resultados obtenidos al pasar la prueba tres meses después de estudiar el tema, en condiciones difíciles ya que los estudiantes se enfrentaban a su fin de curso, los resultados muestran que, un porcentaje superior al 50% de los estudiantes ha alcanzado un aprendizaje significativo de los indicadores que evalúan los conceptos implicados.
- Los resultados obtenidos al pasar una prueba para evaluar el aprendizaje de los indicadores al comienzo del curso siguiente, muestran que, globalmente, un

porcentaje próximo al 65% de los estudiantes encuestados exhibe un conocimiento notable de los conceptos implicados y su diferenciación.

Por último, (apartado 8.3, página 375), se ha valorado la actitud de los estudiantes que han seguido la alternativa presentada, obteniéndose en el cuestionario diseñado que los aspectos analizados han sido puntuados con generosidad por el alumnado, lo que es un indicador que refleja de forma positiva el interés que ha tenido la experiencia investigadora. Este interés se puso de manifiesto de forma destacada cuando al principio del curso siguiente, les pedimos que volviesen a realizar una prueba y todos los estudiantes a los que tuvimos acceso participaron en ella de buen grado y con todo esmero.

9.2 Perspectivas abiertas

Este trabajo, ha mostrado una forma de abordar la enseñanza-aprendizaje de los conceptos implicados en el aprendizaje de la interpretación del funcionamiento de los circuitos eléctricos de corriente continua que, permite superar dificultades en el aprendizaje de los conceptos fuerza electromotriz y diferencia de potencial señaladas reiteradamente en la bibliografía desde hace cerca de 40 años como exponíamos al plantear el problema que íbamos a investigar (página 3).

Pero la relación energía por unidad de carga tiene todavía una interpretación más: la de voltaje. En cursos posteriores al Bachillerato, está por investigar la potencialidad de esta noción de energía por unidad de carga, en el ámbito de campos eléctricos no conservativos, para distinguir entre transferencias de energía en la fuente y en el exterior de la misma. Evidentemente no nos referimos sólo a la descripción macroscópica, sino a la interpretación microscópica de las situaciones, en este sentido la noción de fuerza electromotriz como acción no electrostática que separa las cargas y las mantiene separadas creemos que tiene una enorme capacidad descriptiva; no se olvide que $fem = \oint E \cdot dl$, con un E que representa la fuerza resultante sobre la unidad de carga de prueba, para situaciones electrostáticas, electromagnéticas, químicas, piezo, Seebeck, etc. Esto abre un horizonte de investigación acerca de la didáctica de

las transferencias de energía en el ámbito del Electromagnetismo, sobre todo si se trata de construir sobre lo que ya ha demostrado cierto nivel de eficacia. Creemos que es momento de tener presente que la secuenciación de los contenidos de la Física en general y del Electromagnetismo en particular, tal como se recogen en los libros de texto, no tiene un fundamento que emane de la investigación didáctica.

Pero incluso en cursos de postsecundaria profundizar en los mismos aspectos, es decir, distinguir entre la ecuación del circuito y la ley de Ohm, las relaciones entre electrostática y circuitos, etc. pero destacando y explicando el papel descriptivo de las ecuaciones matemáticas empleadas en estos procesos, creemos que es fundamental para salir al paso de reduccionismos del tipo: *“En $\varepsilon = I \cdot R$ y $V = I \cdot R$ como los segundos miembros son iguales también lo serán los primeros”*, lo que hace necesario

conciliar descripciones como las de la ecuaciones $V_{AB} = -\int_A^B E \cdot dl$ y $\oint E \cdot dl = 0$ con la configuración de circuitos de corriente continua y hacer compatibles tales descripciones con las medidas de la diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito cerrado. No solamente es previsible, entre el medio y largo plazo, un mejor y más sólido aprendizaje, hasta que la Docencia de las Ciencias Experimentales no sea una especialidad universitaria, también una mejor enseñanza.

Tras el análisis de circuitos, los libros de texto suelen presentar una secuencia de temas: campos magnéticos, corrientes e imanes, simetría y flujo...en el que se describen una serie de fenómenos sin un aparente hilo conductor, nos asaltan una serie de preguntas: Cuando se hacen intervenir los campos magnéticos ¿Qué significa la relación energía por unidad de carga cuando se trata de corrientes alternas o cuando la corriente se debe a campos magnéticos variables? ¿En estas situaciones tiene sentido distinguir entre la relación energía por unidad de carga en las fuentes y en el resto del circuito? ¿Se ve afectada la relación energía por unidad de carga de los efectos relativistas de los campos magnéticos? ¿Interpretamos de la misma forma medir 10 voltios entre dos puntos de un circuito elemental con una pila y bombillas y medir 10 voltios entre los extremos de una barra de cobre que se mueve en el seno de un campo magnético? ¿Son pertinentes preguntas como las anteriores? Si lo son ¿se pueden encontrar las respuestas en los libros de texto? ¿Merece la pena que se les planteen a los estudiantes universitarios? Nos parece que la secuencia de “preguntas clave” (el

programa-guía de actividades) que permita la “reconstrucción” significativa de la enorme cantidad de información que se acumula en esos temas está por hacer, al menos para los primeros cursos universitarios.

En cursos más elementales, Secundaria, las nociones de fuerza y energía, así como sus transferencias presentan severas dificultades, por lo que añadir a las dificultades existentes las de distinguir entre trabajo conservativo y no conservativo puede ser un exceso, pero cuidar el lenguaje y diseñar programas de actividades en los que no se empleen como sinónimos los términos diferencia de potencial y voltaje o fuerza electromotriz, quizá permitiría en el futuro, a la luz de los problemas que hemos señalado, construcciones de conceptos menos problemáticas.

La cantidad de conocimientos acumulados en el ámbito de la Física o de la Química junto con la limitación de tiempo, impone la selección de conceptos, de forma que, en tercer curso de la Enseñanza Secundaria, pongamos por caso, ya no es posible aquello de “dar a los alumnos una visión general, en la que se les expongan los conceptos más importantes”. Hay que elaborar programas-guía de investigación en torno a los cuales, los estudiantes desarrollen capacidades procedimentales y actitudinales, sobre las que las futuras construcciones conceptuales puedan apoyarse. Por ejemplo, teniendo en cuenta las dificultades de los estudiantes, la corriente se “gasta”, el razonamiento secuencial, etc. ¿por qué no replicar el problema de Ohm? En torno a este problema los estudiantes aprenderán un léxico: conductor, resistencia, resistividad, serie, paralelo...Manejo e instalación de instrumentos de medida: voltímetros, amperímetros, fuentes de alimentación...Organización y presentación de datos: tablas, gráficos...Formular preguntas y los correspondientes diseños experimentales para contestarlas, establecer relaciones entre magnitudes ¿cómo tener un cable con una resistencia de $1,5 \Omega$?...Elaborar informes y comunicar resultados...Además este problema, junto con otros muchos, actualmente gozan de un apoyo en la red y otros medios de la información y comunicación que amplían el abanico de destrezas educativas que es posible abordar. Se ha encontrado que, la ausencia de las habilidades a las que se aluden, se convertían con frecuencia en uno de los obstáculos más importantes que se han tenido que superar en esta investigación, pero además es una línea de investigación didáctica en muchos países de Europa (Hodson 2005).

A la pretensión de un aprendizaje de conceptos que “les sirvan para comprender el tema tal del próximo curso” la investigación didáctica responde una y otra vez el escaso, a veces nulo e incluso erróneo aprendizaje conceptual de los estudiantes que se enfrentan a una organización curricular que se concibe como un tratado general de física cuyos fragmentos se van estudiando curso a curso.

La experiencia enseña que, la puesta en práctica de los materiales empleados exige de una acción de monitorización con el profesorado, sin la cual y en muchos casos, la tarea no tiene la continuidad necesaria a pesar de la buena voluntad. Probablemente se trata de una concepción de la formación del profesorado, a la que por razones obvias no se hace referencia aquí, estando de acuerdo con los planteamientos que señalan como, de no remediarse, la brecha que se abre entre los investigadores y profesores va a ser cada día mayor, “contribuyendo así a incrementar las dificultades de permeabilidad y transferencia de un colectivo a otro” (Oliva, 2005).

Quiero terminar con una sentencia que leí en alguna ocasión y que continua siendo un estímulo en mi quehacer cotidiano: ***“El aprendizaje no se logra por casualidad; debe buscarse con pasión y atenderse con esmero”*** (Abigail Adams).

Antonio Montero

Torrox agosto de 2006

Bibliografía

- ALBIN, M. (1957). *Lavoisier, Correspondance recueillie et annotée par René Fric*. Fascicule II (1770-1775). Éditions pp. 251 à 536.
- ALTERS, B.J. (1997). Whose nature of science? *Journal of Research in Science Teaching*, 34 (1), pp 39-55.
- ALEKSANDROV, A.D., KOLMOGOROV A., LAURENTIEV, A, (1973) *La matemática: su contenido, métodos y significado*. Madrid. Alianza Universidad.
- ALMUDÍ, J.M., (2002). *Introducción del concepto de campo magnético en primer ciclo de Universidad: dificultades de aprendizaje y propuesta de enseñanza alternativa de orientación constructivista*. Tesis Doctoral. Univerisad del País Vasco.
- ALONSO M., GIL D. Y MARTÍNEZ-TORREGROSA J. (1991). *Propuesta de la evaluación en Física y análisis de la evaluación habitual* C.I.D.E.: Madrid.
- ALVAREZ, R.M. (1996). Las controversias científicas, *Alambique*, 8, pp. 63-69.
- ALVAREZ, R.M. (1997). Argumentación y razonamiento en los textos de física de Secundaria, *Alambique*, 11, pp. 65-74.
- ANDERSSON, B. Y BACH F. (2005) On designing and evaluating teaching sequences taking geometrical optics as an example, *Science Education*, 89, pp. 196-218.
- ARCHIBALD, T. (1986). Carl Neumann versus Rudolf Clausius on the propagation of electrodynamic potentials, *American Journal of Physics*, vol 54 (9), September 1986, pp 786-790.
- ARCHIBALD. T. (1988). Tension and Potential from Ohm to Kirchoff. *Centaurus*, vol 31, pp 141-163.
- ARONS, A. B. (1970) *La Evolución de los conceptos de la Física*. México Trillas.
- ARONS, A.B. (1990). *A guide to introductory physics teaching*. Jhon Wiley and Sons Editors. New York.
- AZCONA, R. (1997). *Análisis crítico de la Enseñaza-aprendizaje de los conceptos de cantidad de sustancia y mol. Una alternativa didáctica basada en el aprendizaje por investigación*. Tesis doctoral. Universidad del Pías Vasco.
- BACHELARD, G. (1985) *La formación del espíritu científico*. Siglo veintiuno.
- BAGNO, E. Y EYLON, B. (1997), From problem solving to a knowledge structure: An exmple from the domain of electromagnetism, *American Journal of Physics*, vol 65, n° 8, pp726-736.
- BARRAGÉS, J.L. (2003). *La enseñanza de la probabilidad en primer ciclo de Universidad. Análisis de las dificultades y propuesta alternativa de orientación constructivista*. Tesis doctoral. Universidad del País Vasco.
- BENSEGHIR, A. Y CLOSSET, J.L. (1993). Prégance de l'explication électrsotatique dans la construction du concept de circuit électrique: points de vue historique et didactique. *Didaskalia* n° 2, pp 31-47.
- BENSEGHIR, A. Y CLOSSET, J.L. (1996). The electrostatics-electrokinestics transition : historical and educational difficulties. *International Journal of Science Education*, 18 (2) pp 179-191.
- BERKSON, W. (1981). *Las teorías de los campos de fuerza*. Madrid. Alianza Universidad.
- BERNAL, J.M. (2002). Innovación y tradición en la enseñazna de las ciencias. Algunos antecedentes en la construcción de la didáctica de las ciencias en España. *Alambique*, 34, pp 9-16.
- BEVILAQUA y GIANNETTO (1998). The History of Physics and European Physics Education. *In International Handbook of ScieencieEducation*.vol II, pp 1015-1026. Kluver Academic Publiser.

- BOLTZMANN, L (1986). Sobre la evolución de la Física en los tiempos recientes, en "Escritos de mecánica y termodinámica", pp 131-165. Alianza Editorial Madrid.
- BRANSFORD J.D., BROWN, A.L. y COCKING, R. (2000). *How people learn*, Washington: National Academy Press.
- BRICKHOUSE, N.W. (1990). Teachers' beliefs about the nature of science and their relationship to classroom practise. *Journal of Teacher Education*, 41 (3), pp 53-62.
- BROCKMAN, C. (1928). The origin of voltaic electricity: The Contac vs Chemical Theory before the Concept of E.M.F. was developed, *Journal of Chemical Education* vol 5, nº 5, pp549-555
- BROWN, T.M. (1969), The electrical current in Early Nineteenth-Century French Physics. *Historical Studies in the physical Sciences*. vol (1), pp 61-103.
- BROWN, D.E. y CLEMENT, J. (1989). Overcoming misconceptions via analogical reasoning: abstrac transfer versus explanotory model constrction. *Instructional Science*, 18, pp. 237-261.
- BROWN, D.E. (1994). Facilitating conceptual change using analogies and explanatory models. *International Journal of Science Education*, 16 (2), pp 201-214.
- BUCHWALD, J.Z. (1977) William Thomson and the Mathematization of Faraday's Electrostatics. *Historical Studies in the Physical Sciences*. vol 8, pp 101-136.
- BUCHWALD, J.Z. (1985), *FROM MAXWELL TO MICROPHYSICS, Aspects of Electromagnetic Theory in the Last Quarter of the Nineteenth Century*. Edit University of Chicago Press.
- BUCHWALD, J.Z.(1994) *The Creation of Scientific Effects*, Edit. The University of Chicago Press.
- BULLEJOS, J. (2001). *La enseñanza y el aprendizaje del cambio químico en la Educación Secundaria. Análisis crítico y propuesta de mejora*. Tesis doctoral. Universidad de Granada.
- BURBULES, N. y LINN, M. (1991). Science education and philosophy of science: congruence or contradicción, *International Journal of Science Education*, 13 (3), pp 227-241.
- CAMPANARIO, J.M. (2001). ¿Qué puede hacer un profesor como tú o un alumno como el tuyo con un libro de texto como éste? *Enseñanza de las Ciencias*, 19 (3), pp 351-364.
- CAMPANARIO, J.M. (2002). Asalto al castillo: ¿A qué esperamos para abordar en serio la formación didáctica de los profesores universitarios de ciencias? *Enseñanza de las Ciencias*, 20 (2), pp 315-325.
- CAMPANARIO, J.M. (2003). ¿Cómo escribir un artículo. La enseñanza de la ciencia en preguntas y respuestas. En <http://www2.uah.es/jmc>.
- CAMPANARIO, J.M. y MOYA, A. (1999). ¿Cómo enseñar ciencias? Principales tendencias y propuestas. *Enseñanza de las Ciencias*, 17 (2), pp 179-192.
- CANEVA, K.L. (1978), From Galvanism to Electrodynamics: The Transformation of German Physics and Its Social Context, *Historical Studies in the Physical Sciences*, vol 9, pp 63-159.
- CAÑAL, P. y CRIADO, A. (2002). ¿Incide la investigación en didáctica de las ciencias en el contenido de los libros de texto escolares? *Alambique*, 34, pp 56-65.
- CARDOT, F. (1985), *Les Merveilles de l'électricité. (Louis Figuier)*. Edit. Association pour L'Histoire de L'électricité en France.
- CHABAY R. W. y SHERWOOD B.A., 2002, *Electric & Magnetic Interactions*. (Jhon Wley & Sons, Inc.)
- CHAMBERS, LL.G. (1973). *An introduction to the Mathematics of Electricity and Magnetism*. Edit. Chapman and Hall. London.

- CHI, M.T. (1991). Conceptual Change within and across ontological categories: Examples from learning and discovery in science. R. Giere (ed.), *Cognitive models os Science: Minnesota Studies in the philosophy os Science*, University of Minnesota Pres. Minnesota.
- CLEMENT, J. (1993). Using brindging analogies and anchoring limitations to deal with estudent's preconceptions in physics. *Jouernal of research in Science Teaching*, 30 (10), pp 1241-1257.
- CLEMINSON, A. (1990). Establishing an epitemological base for science teaching in the light of contemporary notions of the nature of science and of how children learn science, *Journal of Research in Science Teaching*, 27 (5), pp 23-29.
- CLOSSET, J.L. (1983), Sequential reasoning in electricity in *Research on physics Education: proceeding of the First International Workshop* (Editions du NCR, Paris), pp313-320.
- COBERN, W.W. (2000). The nature of science and the role of knowledge and belief. *Science Education*, 9 (3), pp 219-246.
- COHEN, R., EYLON, B y GANIEL, U. (1983), Potential difference and current in simple electric circuits: a study of student concepts. *American Journal of Physics*, vol 51, 5, 407-412.
- COHEN, L. y MANION, L. (1990). *Métodos de investigación educativa*. La Muralla. Madrid.
- COHEN, B.I., (1989), *Revolución en la Ciencia*, Barcelona. Editorial GEDISA,
- COLIN, A. (1959). The electrochemical Theory of Sir Humphry Davy. The voltaic Pile and Electrolysis, *Annals of Science*, vol 15, nº 1, pp 1-14.
- COLLETTE, J.P. (1985) *Historia de las matemáticas*. Edit. Siglo veintiuno.
- CROSS, R.T. y FENSHAM, P.F. (2000). *Science and the citizen. For education and the public*. Arena Publications, Fitzroy, Victoria, Australia.
- CUDMANI, L.C., PESA, M.A. Y SALINAS, J. (2000). Hacia un modelo integrador para el aprendizaje de las ciencias. *Enseñanza de las ciencias*, 19 (3), pp. 3-13.
- DARRIGOL, OLIVIER (1998) Aux confins de l'ectrodynamique: Ions et électrons vers 1897. *Revue d'histoire des sciences*. Vol 51/1, pp 5-34.
- D'AGOSTINO, S. (1993). Hertz's Researches and Their Place in Nineteenth Century Theoretical Physics, *Centaurus*, vol 36, nº 1, pp46,82.
- DEL CARMEN, L. y JIMÉNEZ, M.P. (1997). Los libros de texto: Un recurso flexible. *Alambique*, 20 , pp 7-14.
- DÉSAUTELS, J., LAROCHELLE, M., GAGNÉ, B., y RUEL, F. (1993). La formation a l'enseignement des sciences:le virage épistemologique. *Didskalia*, 1, pp 49-67.
- DÉSAUTELS, J., LAROCHELLE, M., (1998). Á propos de la posture epistemologique des enseignants et enseignantes de science. *Connecting Research in Physics Education with Teacher Education*, ICPE Books. <http://www.physics.ohio-state.edu/jossem/ICPE/BOOKS.html>
- DOMINGUEZ, J.M. (2000). *Evolución de las formas de hacer y pensar sobre un sistema material, en el marco dela termodinámica y del modelo de partículas. Estudio mediante esquemas de acción y de razonamiento*. Tesis doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- DRIVER, R. (1986). Psicología cognoscitiva y esquemas conceptuales de los alumnos. *Enseñanza de las Ciencias*, 4 (1), pp 3-15.
- DRIVER,R. Y OLDDHAM (1986) A constructivist approach to curriculum development in science. *Studies in Science Education*, Vol13, 105-122.
- DRIVER, R., LEACH, J., SCOTT, P, WOOD-ROBINSON, C. (1994) Young people's understanding of science concepts: implications of cross-age studies for curriculum planning, *Studies in Science Education*, 24, pp.75-100.

- DUDDLEY, S., HEEREMA, B.D. y HAALAND, R.K. (1997). The human discharge chain, *American Journal of Physics*, vol 65, nº 6, pp 553-555.
- DUIT, R., JUNG, W. y RHÖNECK, C (1984), *Aspects of Understanding Electricity*, Kiel. Universidad de Kiel.
- DUIT, R. (1991). On the role of analogies and metaphors in learning science. *Science Education*, 75, pp649-672.
- DUIT, R., GOLDBERG, F. y NEDDERER, H. (1992). *Research in physics learning: Theoretical issues and classroom studies*. Kiel. Germany. IPN.
- DUIT, R. y TREAGUST, D. (2003), Conceptual Change: a powerful framework for improving science teaching and learning. *International Journal of Science Education*, vol 25, nº 6, pp 671-688.
- DUPIN, J.J. y JOSHUA, S. (1987). Conceptions on French pupils concerning electric circuits: structure and evolution. *Journal of Research in Science Teaching*, 24, pp 791-806.
- DUSCHL, R. A. (1994). *Research on the history and philosophy of science*. In D.L. Gabel (eds) *Handbook of Research on Science Teaching and Learning*, pp 443-465. McMillan Pub.Co. New York.
- DUSCHL, R. A. (1995). Más allá del conocimiento: los desafíos epistemológicos y sociales de la enseñanza mediante cambio conceptual. *Enseñanza de las ciencias*, 13 (1) pp 3-14.
- DUSCHL, R. A. (1997) *Renovar la enseñanza de las Ciencias*. Edit, Narcea. Madrid.
- DUSCHL, R. A. (1998). La valoración de argumentos y explicaciones: promover estrategias de retroalimentación. *Enseñanza de las Ciencias*, 16 (1), pp 3.20.
- DUSCHL, R. y GITOMER, D (1991). Epistemological perspectives on conceptual change: implications for educational practice, *Journal of Research in Science Teaching*, 28 (9), pp. 839-858.
- DUSCHL, R. (2000). Making the nature of science explicit. In R. Millar, J. Leech & J. Osborne (Eds.) *Improving Science Education: The contribution of research*, Philadelphia: Open University Press. pp 187-206.
- ERICSON, T.J. (1968), The concepts of potential difference, voltage and E.M.F., *Physics Education*, 3 pp. 238-241
- ERLICHSON, H. (1998). The experiments of Biot and Savart concerning the force exerted by a current on a magnetic needle, *American Journal of Physics*, vol 6, nº 5, pp 385-391.
- EYLON, S. Y GANIEL, U. (1990), Macro-micro relationships: the missing link between electrostatics and electrodynamics in students' reasoning, *International Journal Science Education*, vol12, nº 1, 79-94.
- FERNÁNDEZ, I. (2000). *Análisis de las concepciones docentes sobre la actividad científica: una propuesta de transformación*. Tesis doctoral. Universidad de Valencia,
- FERNÁNDEZ, I., GIL, D., CARRASCOSA, J., CACHAPUZ, A. Y PRAIA, J. (2002). Visiones deformadas de la Ciencia transmitidas por la Enseñanza. *Enseñanza de las Ciencias*. Vol 20, nº 3, pp 477-488.
- FEYNMAN, R., LEIGHTON, R.B. y SANDS, M. (1987). *Física. Electromagnetismo y materia*. Vol II. Addison-Wesley Iberoamericana.
- FISHER, L.N. (1976), Contact potentials between metals: History, concepts, and persistent misconceptions, *American Journal of Physics* Vol 44, (5) pp 464-475.
- FOX, R. (1974), The Rise and Fall of Laplacian Physics. *Historical Studies in the Physical Sciences*. Vol (4), pp 89 - 136.
- FOX, R. (1990), Laplacian Physics, *Companion to the History of Modern Science*, Routledge. London.
- FRANKEL, E. (1977), J.B. Biot and the Mathematization of Experimental Physics in Napoleonic France, *Historical Studies in the Physical Sciences*. Vol 8, pp 33-72.

- FURIÓ, C. (1994). Tendencias actuales en la formación del profesorado de Ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, 12 (2), pp 188-195.
- FURIÓ, C. y GIL, D. (1978). *El programa-guía: una propuesta para la renovación de la didáctica de la física y de la química*. ICE de la Universidad de Valencia.
- FURIÓ, C Y GUIASOLA, J (1993). ¿Puede ayudar la historia de la ciencia a entender por qué los estudiantes no comprenden los conceptos de carga y potencial eléctricos? *Revista Española de Física*, vol 7, nº 3 pp 46-50.
- FURIÓ, C.y GUIASOLA, J. (1997), Deficiencias epistemológicas en la enseñanza habitual de los conceptos de campo y potencial eléctrico. *Enseñanza de las ciencias*, vol 15, nº2, pp 259-272.
- FURIÓ, C., GUIASOLA, J. y ZUBIMENDI, J.L. (1998). Problemas históricos y dificultades de aprendizaje en la interpretación newtoniana de fenómenos electrostáticos considerados elementales. *Investigações Em Ensino De Ciências*, 3(3).
En http://www.if.ufrgs.br/public/ensino/vol13/n3/v3/_n3_a2.htm
- FURIÓ C. Y GUIASOLA J. (1998-a), Construcción del concepto de potencial eléctrico mediante el aprendizaje por investigación, *Revista de Enseñanza de la Física* 11(1), 25-37.
- FURIÓ, C. Y GUIASOLA, J. (1998-b). Dificultades de aprendizaje de los conceptos de carga y de campo eléctrico en estudiantes de bachillerato y universidad. *Enseñanza de las Ciencias*. Vol 16, nº1, pp 131-146.
- FURIÓ, C. Y GUIASOLA, J. (1999). Concepciones alternativas y dificultades de aprendizaje en electrostática. Selección de cuestiones elaboradas para su detección y tratamiento. *Enseñanza de las Ciencias*, 17 (3), pp 441-452.
- FURIÓ C., AZCONA, R y GUIASOLA J. (2000). Difficulties in teaching the concepts of amount of substance and mole. *International Journal of Science Education*, 22(12), pp 1285-1304.
- FURIÓ C., GUIASOLA J., ALMUDÍ J.M. Y CEBERIO M. (2003), Learning the electric field concept as oriented research activity, *Science Education* 87, 640-662)
- FURIÓ C., GUIASOLA J. Y ALMUDÍ J.M., (2004), Elementary electrostatic phenomena: Historical hindrances and students' difficulties, *Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education* 4(3), 291-313.
- GAGLIARDI, R. y GIORDAN, A. (1986). La Historia de las Ciencias: una herramienta para la Enseñanza. *Enseñanza de las Ciencias*, 4 (3), pp 253-259.
- GAGLIARDI, R. (1988). ¿Cómo utilizar la Historia de las Ciencias en la enseñanza de las ciencias? *Enseñanza de las Ciencias*, 6(3), pp 291-296.
- GALILI, I. (1995). Mechanics background influences students' conceptions in electromagnetism. *International Journal of Science Education*, 17 (3), pp371-387.
- GALLEGO, A.P. (2002). *Contribución del comic a la imagen de la ciencia*. Tesis doctoral. Universidad de Valencia.
- GARCÍA DE CAJÉN, S., DOMÍNGUEZ, J.M., y GARCÍA-RODEJA, E. (2002). Razonamiento y argumentación en ciencias. Diferentes puntos de vista en el currículo oficial. *Enseñanza de las Ciencias*, 20 (2), pp 217-228.
- GARCÍA-RODEJA, I. (2002). Evolución de la actividad del área de didáctica de las ciencias en la Universidad de Santiago. *Alambique*, 34, pp 66-70.
- GEE B. (1972). The role of the history of physics in physics education. *Physics Education*, vol 7, pp 521-522.
- GENTNER, D. y GENTNER, D.R. (1983). Flowing Waters or Teeming Crowds: Mental Models of Electricity. En D. Gentner y A.L. Stevens (Eds.): *Mental Models*., pp. 99-129. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- GIANNETO, E., TARSITANI, C. y VICENTINI, M. (1992). The relations between Epistemology, History of Science teaching from the point view of the research on mental

- representations. *Proceedings of the second International conference on History and Philosophy of Science in Science Education*, pp 359-374. Toronto.
- GIERE, R.N. (1992). *Cognitive Models of Science*. University of Minnesota Press.
- GIL, D. (1983). Tres paradigmas básicos en la enseñanza de las ciencias, *Enseñanza de las ciencias*, vol 1 (1), pp 26-33.
- GIL, D y MARTINEZ-TORREGROSA, J. (1987). Los programas-guía de actividades: una concreción del modelo constructivista de aprendizaje de las ciencias. *Investigación en la Escuela*, 3, pp3-12.
- GIL, D., CARRASCOSA, J., FURIÓ, C., MARTINEZ-TORREGROSA, J. (1991). *La Enseñanza de las Ciencias en la Educación Secundaria*. Barcelona. Ice-Horsori.
- GIL,D. (1991). ¿Qué han de saber y saber hacer los profesores de ciencias? *Enseñanza de las Ciencias*, vol 9, nº 1, pp 69-77.
- GIL,D.(1993). Contribución de la historia y de la filosofía de la ciencia al desarrollo de un modelo de enseñanza-aprendizaje como investigación. *Enseñanza de las ciencias*, vol 11, nº2, pp 197-212.
- GIL, D. (1994). Diez años de investigación en didáctica de las ciencias: realizaciones y perspectivas. *Enseñanza de las Ciencias*, 12(2), pp154-164.
- GIL, D y PESSOA, A. (1994). *Formación del profesorado de las ciencias*. Madrid Editorial Popular.
- GIL,D. y VALDÉS, D.(1996). La orientación de las prácticas de laboratorio como investigación: un ejemplo ilustrativo. *Enseñanza de las ciencias*. Vol 14, n1 2, pp 155-163.
- GIL-PÉREZ, D. (1996). New trends in science education. *International Journal of Science Education*, vol. 18, No 8, pp 889-901.
- GIL, D., VILCHES, D., GAVIDIA, D., FURIÓ, C., SOLBES, D. y CARRASCOSA, J.(1997) *Los Cambios Curriculares en la Educación Científica y la Formación del Profesorado. Formación continuada del profesorado de Ciencias. Una experiencia en Centroamérica y el Caribe*. Madrid: OEI.
- GIL, D. FURIÓ, C., VALDÉS, P., SALINAS, J., MARTÍNEZ-TORREGROSA, J., GUIASOLA, J., GONZÁLEZ, E., DUMAS-CARRÉ, A., Y PESSOA, A. (1999). Tiene sentido seguir distinguiendo entre aprendizaje de conceptos, resolución de problemas de lápiz y papel y realización de prácticas de laboratorio? *Enseñanza de las ciencias*. Vol 17, nº 2, pp 311-320.
- GIL-PÉREZ D., GUIASOLA J., MORENO A. Y COLABORADORES (2002), Defending constructivism in Science Education, *Science and Education* 11, 557-571
- GILBERT J., TREAGUST, D., GOBERT, J. (2003), Science Education: from the past, through the present, to the future. *International Journal of Science Education*, vol 25, nº 6, pp 651-669.
- GLASSON, G.E. y BENTLEY, M.L. (2000). Epistemological undercurrents in scientists reporting of research to teachers. *Science Education*, 84 (4), pp. 469-485.
- GOOFARD, M y DUMAS-CARRÉ, A. (1996). Los problemas de Física y su pedagogía. *Alambique*. 8, pp 89-104.
- GOODING, D. (1980-a). Faraday, Thomson, and the Concept of the Magnetic Field. *The British Journal for The history of Science*. Vol 13, nº44, pp 91-120.
- GOODING,D.(1980-b).Metaphysics versus Measurement: the Conversion and Conservation of Force in Faraday's Physics. *Annals of Science*. Vol 37, pp 1-29.
- GUERLAC, H (1976). Chemistry as a Branch of Physics: Laplace's Collaboration with Lavoisier, *Historical Studies in the Physical Sciences*. Vol 7, pp 193-276.
- GUILLEN, M. (1999). *Cinco ecuaciones que cambiaron el mundo*. Editorial Debate. Madrid.

- GUISASOLA, J. (1996). Análisis crítico de la Enseñanza de la electrostática en el Bachillerato. Tesis doctoral. Universidad del País Vasco.
- GUISASOLA J., ALMUDÍ, J.M., CEBERIO M. Y ZUBIMENDI J.L. (1997). ¿Contribuye la enseñanza de problemas tipo al aprendizaje significativo de los conceptos y principios fundamentales de la física de primer curso de Universidad?. *Enseñanza de las Ciencias*. (nº especial del Congreso de Murcia, 1997), pp 140-151.
- GUISASOLA J., CEBERIO M. Y ZUBIMENDI J.L. (2003-a). El papel científico de las hipótesis y los razonamientos de los estudiantes universitarios en resolución de problemas de Física, *Investigações em Ensino de Ciências* 8(1), en línea en <http://www.if.ufrgs.br/public/ensino/vol8/n1/20indice.html>
- GUISASOLA J., CEBERIO M. Y ZUBIMENDI J.L. (2003-b). Dificultades de aprendizaje de los estudiantes universitarios en la teoría del campo magnético y elección de los objetivos de enseñanza. *Enseñanza de las Ciencias*, 21 (1), pp 79-94.
- GUISASOLA J., ALMUDÍ M., ZUBIMENDI J.L. Y ZUZA K. (2005), Campo magnético: Diseño y evaluación de estrategias de enseñanza basadas en el aprendizaje como investigación orientada, *Enseñanza de las Ciencias* 23(3), 303-320
- GUISASOLA J., ALMUDÍ M. Y FURIÓ C. (2005). The nature of science and its implications for Physics textbooks: the cases of classical magnetic field theory, *Science & Education* 14 (3-5), 321-328
- GUISASOLA J., CEBERIO M. Y ZUBIMENDI J.L. (2005) University students' strategies for constructing hipótesis when tackling paper-and-pencil task in physics, *Research in Science Education*, publicado en línea en <http://www.springerlink.com/qfy43455j2ezt445415bjs45/app/home/contribution.asp>
- 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), 47-60.
- GRATTAN, I. (1991). Lines of Mathematical Thought in the electrodynamics of Ampère, *Physis*, vol 28, pp 115-129.
- GRECA, M. y MOREIRA, A. (2002). Além da detecção de modelos mentais dos estudantes. Uma proposta representacional integradora. *Investigações em ensino de Ciências*, vol 7, nº1. pp 280-293.
- GURIDI, V. y SALINAS, J. (2001). El vínculo entre aspectos conceptuales y epistemológicos en el aprendizaje de la Física. *Investigações em Ensino de Ciências*, 6 (2). En <http://www.if.ufrgs/public/ensino/revista.htm>
- GURUSWAMY, C. Y LOMERS M.D. (1997). Students' understanding of the transfer of charge between conductors, *Physics Education*, vol 32, pp 91-96.
- KELLOGG, O.D. (1953). *Foundations of Potential Theory*, Edit. Dover Publications. New York.
- KEMPA, R.F. (1986). *Assessment in Science*. Cambridge University Press.
- KUHN, T.S. (1987). *La estructura de las revoluciones científicas*. Edit. Fondo de Cultura Económica. Madrid.
- HARMAN, P.M. (1990). *Energía, fuerza y materia. El desarrollo conceptual de la física del siglo XIX*. Madrid. Alianza Editorial.
- HÄRTEL, H. (1982). The electric Circuit as a System: A new Approach. *European Journal of Science Education*, vol 4, pp 45-55.
- HEGEL, G.W. (1985). *Fenomenología del espíritu*, Fondo de Cultura económica. México. 1ª edición 1821.
- HEALD, A. (1984), Electric fields and charges in elementary circuits, *American Journal of Physics*, nº 52, pp 522-526.
- HESTENES, D., (1992). Modelling Games in the Newtonian World. *American Journal of physics*. Vol 60 (8), pp 732-748.

- HIERREZUELO, J.y MONTERO, A. (1991), *La ciencia de los alumnos*. Vélez Málaga. Elzevir.
- HODSON, D. (1985). Philosophy of science, science and science education. *Studies in Science Education*, 12, pp 25-57.
- HODSON, D. (1988). Towards a philosophically more valid science curriculum, *Science Education*, 72 (1), pp 1940.
- HODSON, D. (1992). In search of a meaningful relationship: an exploration of some issues relating to integration in science and science education. *International Journal of Science Education*, vol 14, n° 5, pp 541-566.
- HODSON, D. (1993). Philosophic stance of secondary school science teachers, curriculum experiences, and children's understanding of science: some preliminary finding. *Interchange*, 24 (1-2) , pp 41-52.
- HODSON, D. (1994). Hacia un enfoque más crítico del trabajo de laboratorio. *Enseñanza de las ciencias*, vol 12, n°3, pp 299-313.
- HOLTON, D. (1998). On the teaching and learning of mathematics at university level. *Educational Studies in Mathematics*, 36 (1), pp 91-103.
- HODSON, D. (2003). Time for action: science education for an alternative future, *International Journal of Science Education*, vol 25, n° 6, pp 645-670.
- HODSON, D (2005). Toward Research-based practice in the Teaching laboratory. *Studies in Sciences Education*, 41, pp. 167-176.
- HOME, R.W. (1983). Poisson's Memoirs on Electricity: Academics Politics and a New style in Physics. *B. Journal Historical Sciences*. Vol 16, pp 239-259.
- HUMPHREYS, A.W. (1937), The Development of the conception and measurement of electric current. *Annals of Science*, vol 2, n°2, pp164-178.
- HURD, D.L. y KIPLING, J.J. (1964). *The Origins and Growth of Physical Science*. Pelican books. Baltimore.
- IRWIN, A.R. (1992). Historical case studies: Teaching the nature of science in context. *Science Education*, 84 (1), pp 5-26.
- IZQUIERDO, A.M. (2000). Relaciones entre la Història i la Didàctica de les Ciències. *Actes de les V trobades d' historia de la ciencia i de la tècnica*. Barcelona. pp. 115-124.
- JAKEWAYS, R. (1995). Understanding dielectrics or Gauss's theorem is useful after all!, *Physics Education*, vol 30, n°1, pp27-31.
- JIMENEZ, L.M. (2001). *Desarrollo sostenible y economía ecológica. Integración medioambiente-desarrollo y economía ecológica*. Madrid. Síntesis.
- JIMENEZ, E. y MARÍN, N. (1996). ¿Cuándo un contenido académico tiene significado para el alumno? Implicaciones didácticas. *Enseñanza de las Ciencias*. 14 (3), pp 323-330.
- JIMENEZ, E. y FERNÁNDEZ, E. (1998) Didactic Problems in the Concept of electric Potential Difference and Analysis of its Philogesis, *Science Education*, 7, pp 129-141.
- JOHNSUA, S. (1984) Students' interpretation of simple electrical diagrams, *Eur. Journal of Science Education*, vol 6, n° 3, pp271-275.
- JO NYE, MARY, (1986), *The Question of the Atom: From the Karlsruhe Congress to the First Solvay Conference, 1860-1911*. Los Ángeles/San Francisco. Tomash Publishers.
- JUSTI, R. Y GILBERT J. (2000) History and Philosophy of science through models: some challenges in the case of 'the atom', *International Journal of Science Education* 22(9), 993-1009
- LANZARA, E.y ZANGARA, R. (1995). Potential difference measurements in the presence of a varying magnetic field. *Physics Education*, Vol 30, n°2; pp 85-89.
- LAKATOS, I. (1983). *La metodología de los programas de investigación científica*. Alianza Editorial. Madrid.

- LARKIN, J. y RAINARD, B. (1984). A research methodology for studying how people think, *Journal of research in Science Teaching*, 21 (3), 235-254.
- LAUKENMANN, M. BLEICHER, M., MAYRING, P. Y RHÖNECK, C, (2003), An investigation of the influence of emotional factors on learning in physics instruction. *International Journal of Science Education*, vol 25, nº 4, pp 489-507.
- LEACH J. Y SCOTT P. (2002), Designing and evaluating science teaching sequences: an approach drawing upon the concept of learning demand and a social constructivist perspective on learning, *Studies in Science Education* 38, 115-142.
- LEDERMAN, N.G. (1999). Teachers' understanding of nature of science and classroom practice: factors that facilitate or impede the relationship. *Journal of Research in Science Teaching*, 36 (8), pp 916-929.
- LEONARD, W.J., GERACE, W.J. Y DUFRESNE, R.J. (2002). Resolución de problemas basada en el análisis. Hacer del análisis y del razonamiento el foco de la enseñanza de la Física. *Enseñanza de las Ciencias*, 20 (3), pp. 387-400.
- LÉVY-LEBLOND J.M. (1986). *La Física en preguntas. Electricidad y Magnetismo*. Madrid. Alianza Editorial.
- LÉVY-LEBLOND J.M. (1996). *Aux Contraires, L'exercice de la pensée et la pratique de la science*. Éditions Gallimard. (France).
- LICHT, P. (1987). Strategy to deal with conceptual and reasoning problems in introductory electricity education. *Second International seminar on misconceptions and educational strategies in Science and Mathematics*. Ithaca. New York.
- LICHT, P. (1991), Teaching electrical energy, voltage and current: an alternative approach, *Physics Education*, nº 26, pp 272-277.
- LIÉGEOIS, L. (2002) High school students' understanding of resistance in simple series electric circuits. *International Journal Science Education*, vol 24, nº 6, pp 551-564.
- LINN, M.C. (2002). Promover la educación científica a través de las tecnologías de la educación y comunicación (TIC). *Enseñanza de las Ciencias*, 20 (3) , pp 347-355
- LOMBARDI, O.I. (1997). La pertinencia de la Historia en la enseñanza de las Ciencias: argumentos y contra argumentos. *Enseñanza de las Ciencias*. 15 (3), pp 343-349.
- LÓPEZ-GAY, R. (2001). *La introducción y utilización del concepto de diferencial en la Enseñanza de la Física*. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Madrid.
- LÓPEZ, J.A., DÍAZ, J.I., ROMERO-ÁVILA, C. (2004). *La pila de combustible*. Servicio publicaciones Universidad de Valladolid.
- McCOMAS, W.F. (2000). *The nature of Science in Science Education. Rationales and strategies*. Kluwer Academic Publishers. London.
- McCOMAS, W.F., CLOUGH, M.P. y ALMAZORA, H. (1998). The role and character of the nature of science in Science Education, en W.F. McComas (ed). *The nature of science in Science Education. Rationales and strategies*, pp 3.39. Kluwer Academic Publishers. Netherlands.
- McDERMOTT, L. (1998). Commentaires sur: Apprendre et comprendre les concepts clés de l'électricité. *Connecting Research in Physics Education with Teacher Education*, ICPE Books. <http://www.physics.ohio-state.edu/jossem/ICPE/BOOKS.html>
- MARTÍN, J. (1999). La introducción del concepto de campo en Física. Tesis doctoral. Universidad de Valencia.
- MARTINEZ-TORREGROSA, J. (1987). *La resolución de problemas de Física como investigación: un instrumento de cambio metodológico*. Tesis doctoral. Universidad de Valencia.
- MARTÍNEZ-TORREGROSA, J., DOMÉNECH, J.L. y VERDÚ, R. (1993). Del derribo de ideas al levantamiento de puentes: La epistemología de la ciencia como criterio organizador de la enseñanza de las ciencias. *Curriculum*, 6 y 7, pp 67-89.

- MARTINEZ-TORREGROSA, J., LÓPEZ-GAY, R., GRAS, A. y TORREGROSA, G. (2002). La diferencial no es un incremento infinitesimal . Evolución del concepto de diferencial y su clarificación en la enseñanza de la Física. *Enseñanza de las Ciencias*, 20 (2), pp 271-284.
- MATTHEWS, M.R. (1994-a). *Science teaching: the role of history and philosophy of science*. Rontdlege: New York.
- MATTHEWS, M.R. (1994-b). Historia, Filosofía y Enseñanza de las Ciencias: la aproximación actual, *Enseñanza de las Ciencias*, 12(2), pp 255-277.
- MATTHEWS, M.R. (1998-a). In defense of Modest Goals When Teaching about the Nature of Science. *Journal of Research in Science Teaching* 35 (2), pp 161-174.
- MATTHEWS, M.R. (1998-b). *Constructivism in science education: a philosophical examination*. Dordrech: Kluwer Academic Publishers.
- MAXWELL, J.C.(1997). *Escritos Científicos*. Edición de José M. Sánchez Ron. CSIC. Madrid.
- MEICHTRY, Y. (1999). The nature of science and scientific knowledge: Implications for a preserve elementary methods course. *Science and Education*, 8 (3), pp 273-286.
- MEMBIELA, P. (2001). *La enseñanza de las ciencias desde la perspectiva Ciencia-Técnica-Sociedad*. Ed. Narcea. Madrid.
- MEMBIELA, P. (2002). Investigación-acción en el desarrollo de proyectos curriculares innovadores de ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, vol 20, nº 3, pp 443-450.
- MELLADO, V. y CARRACEDO, D. (1993). Contribuciones de la filosofía de la ciencia a la didáctica de las ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, 11 (3), pp 331-339.
- MILLAR, R. y KING, T. (1993). Students' understanding of voltage in simple series circuits. *International Journal Science Education*. 15(3), pp 339-343.
- MILLAR, R. y OSBORNE, J. (1998). *Beyond 2000: Science Education for the Future*. School of Education, King's College. London.
- MILLAR, R. (1998). Students' understanding of the procedures of scientific enquiry, en *Connecting Research in Physics Education with Teacher Education*. ICPE Books.
- MILLAR, R., LEACH, J. Y OSBORNE, J. (2000). *Improving Science Education*. Open University Pres.
- MILLER, D. (1972). Rowland and the Nature of Electric Currents, *Isis*, vol 63, pp 5-27.
- MORENO, L.E. Y WALDEGG, G. (1998). La Epistemología Constructivista y la Didáctica de las Ciencias: ¿Coincidencia o complementariedad? *Enseñanza de las Ciencias*. Vol 16, nº3, pp421-429.
- MONK, M. y OSBORNE, J.(1997). Placing the History and Philosophy of Science on the Curriculum: A Model for the Development of Pedagogy; *Science Education*, 81, pp 405-424.
- MULHALL, P., McMITTRICK, B. Y GUNSTONE, R. (2001). A perspective on the resolution of confusions in the teaching of electricity. *Research in Science Education*, 31, pp 575-587.
- NERSESSIAN, N. J. (1989). Conceptual Change in science and in science education. *Sinthese*, 80, pp 163-183.
- NERSESSIAN, N. J. (2002). Maxwell and "the Method of Physical Analogy": Model based reasoning, generic abstraction, and conceptual change. En D.B. Malament (Ed.): *Essays in the History and Philosophy of Science and Mathematics*, pp. 129-166. Lasalle, IL: OpenCourt. En línea en <http://www.cc.gatech.edu/aimosaic/faculty/nersessian/papers/maxwell-and-the-method-of-physical-analogy.pdf>
- NUFFIELD FOUNDATION (1975). *Física Básica. Guía de experimentos IV*. Editorial Reverté. Barcelona.

- OLIVA, J. M^a (2004). El pensamiento analógico desde la investigación educativa y desde la perspectiva del profesor de ciencias, *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, vol 3, nº 3.
- OLIVA, J. M^a (2005). Sobre el estado actual de la revista *Enseñanza de las Ciencias* y algunas propuestas de futuro. *Enseñanza de las ciencias*, vol 23 , nº 1, pp123-131.
- OLIVA, J.M., ARAGÓN, M.M., MATEO, J., BONAT, M. (2001). Una propuesta didáctica basada en la investigación para el uso de las analogías en la enseñanza de las ciencias. *Enseñanza de las ciencias*, 19 (3), pp 453-470.
- OLIVARES, E. (1995). Tipos de contenidos y instrumentos de evaluación. *Alambique*, 4, pp. 16-23.
- ORGILL, M.K. y BODNER, G. (2004). What research tell us about using analogies to teach chemistry. *Chemistry Education: Research and Practice in Europe*, 5 (1), pp 15-32.
- OSBORNE , R.y FREYBERG, P. (1985). *Learning in Science*, Hong Kong. Heinemann.
- PAGE, CH.H. (1977). Electromotive force, potential difference, and voltage. *American Journal of Physics*, vol 45, nº 10, pp 978-980.
- OSBORNE, R. y WITTRICK, M. (1985). The generative learning model and its implications for science education. *Studies in Sciences Education*. Vol 12, pp 59-87.
- PANCALDI, G. (1990). Electricity and life. Volta's path to the battery. *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*. Vol 21, pp 123-160.
- PARK, J., KIM, M., y LEE, M. (2001). Analysis of students processes of confirmation and falsification of their prior ideas about electrostatic. *International Journal of Science Education*, 23 (12), pp 1219-1236.
- PARKER, S. (1970) Electrostatics and current flow, *American Journal of physics*, nº 38, pp720-723.
- PFUND, H y DUIT, R. (1994). *Bibliography: Students' alternative frameworks and science education*, 4^a edition. Kiel. Germany (Institute for Science Education at the University of Kiel).
- PFUND, H y DUIT, R. (1998). *Bibliography: Students' alternative frameworks and science education*, 6^a edition. Kiel. Germany (Institute for Science Education at the University of Kiel).
- PREDRINACI, E. (1993). La construcción histórica del concepto de tiempo geológico. *Enseñanza de las Ciencias*, 11(3), pp 315-323.
- PREYER, N.W. (2000). Surface charges and fields of simple circuits. *American Journal of physics*, nº 68 (11), pp1002-1193.
- PERALES, F.J. (2000). *Resolución de problemas*. Editorial Síntesis. Madrid.
- PIAGET, y R. ZWAART, S. (1977). *La explicación en las ciencias*. Barcelona. Martínez Roca.
- PIAGET, J. (1979). *Tratado de lógica y conocimiento científico, vol(IV). Epistemología de la Física*. Buenos Aires. Paidós.
- PIAGET, J. y GARCÍA, R. (1982). *Psicogénesis e historia de la Ciencia*. México Siglo XXI.
- PONTES, A. (1999). *Aportaciones al estudio de las concepciones de los estudiantes sobre electromagnetismo y sus implicaciones en la didáctica de la física*. Tesis doctoral. Universidad de Córdoba.
- PONTES, A. y DE PRO, A. (2001). Concepciones y razonamientos de expertos y aprendices sobre electrocinética: consecuencias para la enseñanza y la formación de profesores. *Enseñanza de las Ciencias*, 19 (1)pp 103-121.
- POPPER, KARL, R (1985). *"Realismo y el objetivo de la ciencia"*. Madrid. TECNOS.
- PORLAN, R. (1993). *Constructivismo y escuela. Hacia un modelo de enseñanza-aprendizaje basado en la investigación*. Sevilla:Diada.

- PORLÁN, R. Y MARTIN, R. (1996). Relaciones entre la historia y la filosofía de la ciencia y la enseñanza de las ciencias. *Alambique*, 8 pp 211-227.
- PORLÁN, R., RIVERO, A, y MARTIN DEL POZO, R. (1997). Conocimiento profesional y epistemología de los profesores I: Teoría, métodos e instrumentos. *Enseñanza de las Ciencias*. 15 (2), pp155-171.
- POSNER et all. (1982). Accomodation of a Scientific Conception: Toward a Theory of Conceptual Change. *Science Education*, vol 66, pp 211-227.
- POZO, J.I. (1987). *Aprendizaje de la ciencia y pensamiento causal*. Editado por Visor libros. Madrid.
- POZO, J.L., GÓMEZ, M.A., LIMON, M. y SANZ, A. (1991). *Procesos cognitivos en la comprensión de la ciencia*. Servicio de publicaciones del MEC.
- POZO, J.I. (1994). *La solución de problemas*. Madrid. Santillana.
- PSILLOS, D. (1998). Teaching introductory electricity. *Connecting Research in Physics Education with Teacher Education*, <http://www.physics.ohio-state.edu/jossem/ICPE/BOOKS.html>
- PRADANOS, A. (2001). Controles de calidad ratifican el mediocre nivel educativo en Matemáticas y Lengua. *El diario Vasco* (8/12). San Sebastián.
- PREYER, W. (2000), Surface charges and fields of simple circuits, *American Journal of Physics*, vol 68, nº 11, pp 1002-1006.
- PRIETO, J. (2001). Evaluación de la Secundaria. Los alumnos españoles de Secundaria, entre los países de los países desarrollados. *El País* (5/12), Madrid.
- RAMÍREZ, J.L. (1990). *La resolución de problemas de Física y de Química como investigación en la Enseñanza Media: un instrumento de cambio metodológico*. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Barcelona.
- RAÑADA, A., GARCIA, J. y YUSTE, M. (1997). *Física Básica. Volúmen II*. Alianza Editorial. Madrid.
- REDISH, E., JEFREY M., STEINBERG, R.(1998). Student expectations in introductory physics (1998), *American Journal of Physics*, vol 66, nº1, pp 212-224.
- REITZ, J.R., MILFORD, F., CHRISTY, R. (1996). *Fundamentos de la Teoría Electromagnética*. Addison-Wesley Iberoamericana.
- RODRIGUEZ DANTA, GONZÁLEZ, A., BELLVER, C. (1999) *Campos Electromagnéticos*. Universidad de Sevilla.
- ROMER, R.H. (1982). What do voltmeters measure?: Faraday's law in a multiply connected region. *American Journal of Physics*. Vol 50 (12), pp 1089-1094.
- RONEN, M. Y ELIAHU, M. (1997), Addressing students' common difficulties in basic electricity by qualitative simulation-based activities. *Physics Education*, nº 12, pp 392-399.
- ROSE-INNES, A.C. (1985), Electromotive force, *Physics Education*, 20, pp. 272-274.
- RUSSELL, C.A. (1959), The Electrochemical Theory of sir Humphry Davy, *Annals of Science*, vol 15, nº 1, pp 1-25
- RUSSELL, C.A. (1961). A quarterly review of the History of Science and Technology since the Renaissance. *Annals of Science*. Vol 15, pp 1-14.
- SALINAS, J., CUDMANI, L.C. y PESA, . (1996). Modos espontáneos de razonar: un análisis de su incidencia sobre el aprendizaje del conocimiento físico a nivel universitario básico. *Enseñanza de las Ciencias*, 14 (2), pp 209-220.
- SÁNCHEZ RON, J.M. (1998). *Escritos científicos*. J.C. Maxwell. CSIC. Madrid.
- SÁNCHEZ, G y VARGARCEL, M.V. (2000). ¿Qué tienen en cuenta los profesores cuando seleccionan el contenido de enseñanza? *Enseñanza de las Ciencias*, 18 (3), pp 423-427.
- SATIEL, E. y VIENNOT, L. (1985). ¿Qué aprendemos de las semejanzas entre las ideas históricas y el razonamiento espontáneo de los estudiantes? *Enseñanza de las ciencias*, vol3, nº2, pp137-144.

- SCHWEDES, H. y DUDECK, W.G. (1996). Teaching electricity by help of a water analogy (how to cope with the need for conceptual change).
- SCOTT, W.T. (1963). On the Evolution of the Electromagnetic Field Concept. *American Journal of Physics*. Vol 31, nº1, pp 819-826.
- SCOTT, D., HEEREMA, B., HAALAND, R. (1997). The human discharge, *American journal of physics*, vol 65, nº 6, pp 533-555.
- SEARS Y ZEMANSKY (1966). *Física*, Madrid. Aguilar.
- SEBASTIÁ, J.M. (1993). ¿Cuál brilla más?: predicciones y reflexiones acerca del brillo de las bombillas. *Enseñanza de las Ciencias*. 11 (1) pp 45-50.
- SEROGLOU, F., PANAGIOTIS, K. Y VASSILIS, T. (1998), History of science and instructional desing : the case of electromagnetism. *Science and Education*, 7, pp 261-280. [4,32]
- SEROGLOU, F. Y KOUMARAS, P. (2001). The Contribution og the History of Physics in Physiscs Education science: A Review. *Science and Education*, 10, pp 153-172 [33].
- SHAFFER, P. y McDERMOTT, L. (1992). Research as a guuide for curriculum development: an example from current electricity. *American Journal of Physics*, 60, pp 261-280.
- SHERWOOD, A. y CHABAY,R. (1999), A unified treatment of electrostatics and circuits, <http://www4.ncsu.edu:8030/rwchabay/mi/circuit.pdf>
- SHIPSTONE, D., RHÖNECK, C., JUNG, W., KARRQUIST, C., DUPIN, J. JHOSUA, S y LICH, P. (1988). A study of students' understanding of electricity in five European countries. *International Journal of Science Education*, 10 (3), pp 303-316.
- SOLBES, J.y TRAVER, M. (1996). La utilización de la historia de las ciencias en la enseñanza de la Física y Química. *Enseñanza de las Ciencias*, 14 (1) pp 103-112.
- SOLBES, J Y VILCHEZ, A. (1997). STS Interactions and the teaching of physics and chemistry. *Science Education*, 81 (4), pp 377-386.
- SOLBES, J.y TRAVER, M. (2001). Resultados obtenidos introduciendo la historia de la ciencia en las clases de física y química: mejora de la imagen de la ciencia y desarrollo de actitudes positivas. *Enseñanza de las ciencias*, vol 19, nº1, pp 151-162.
- SOLOMON, J. (1997). New Science Education Research for the Nww Europe? *Studies in Science Education*, 29, pp 93-124.
- SOLOMON, J. (2002). Science Stories and Science Texts: What Can They Do for Our Students?, *Studies in Science Education*, vol 37, pp 85-105.
- STEINGERG, M.S. (1992). What is electric potencial? Connecting Alssandro Volta and contemporary studens. *Proceding of the second International Conference on the History and PhilosaPhy and Science Teaching*. Kingston, Ontario. Vol II, pp 473-480.
- STOCKLMAYER, S. y TREAGUST, D.F. (1996). Images of electricity: how do novices and experts model electric current? *International Journal os Science Education*, 18, pp 163-178.
- SUTTON, G. (1981). The politics of science in early Napoleonic france: The case of the voltaic pile. *Historical Studies in the Physical Sciences*, Vol 11 (2), pp 329-366.
- TARÍN, F. (2002). *El Principio de Conservación de la Energía y sus implicaciones didácticas*. Tesis Doctoral. Universidad de Valencia.
- THACKER, B.A., GANIEL, U, y BOYS, D. (1999). Macroscopic phenomena and microscopic proecesses: Student understanding of transients in direct current electric circuits. *Physics Education Research (A supplement to the American Journal of Physics)*. Vol 67 (7), pp S25-S31.
- TIBERGHIE A. (1994). Modeling as the basis for analyzing teaching-learning situations, *Learning and Instruction* vol. 4, 71-87.

- TIPLER P.A. y MOSCA G., 2005, *Física para la ciencia y la tecnología* (volumen 2) (Reverté. Barcelona)
- TOULMIN, S. (1977). *La comprensión humana: el uso colectivo de los conceptos*. Alinaza Editorial. Madrid.
- TREAGUST, D.F., DUIT, R., y FRASER, B. (1996). *Improving teaching and learning in science and mathematics*. New York. Teachers College Press.
- VALDÉS, P., VALDÉS, R., GUIASOLA, J. y SANTOS, T. (2002). Implicaciones de las relaciones ciencia-tecnología en la educación científica. *Revista Iberoamericana de Educación*. 28, pp 101-128.
- VARNEY, R.N. y FISHER, L.H. (1976). Contact potentials between metals: History, concepts, y persistent misconceptions. *American Journal of Physics* Vol 44 (5), pp 464-475.
- VARNEY, R.N. y FISHER, L.H. (1980). Electromotive force: Volta's forgotten concept, *American Journal of Physics* vol 48 (5), pp 405-408.
- VARNEY, R.N. y FISHER, L.H. (1984), Electric fields associated with stationary currents, *American Journal of Physics*, vol 52, nº 12, pp 1097-1099.
- VELAZCO, S. (1998). *El campo Electromagnético en la enseñanza y el aprendizaje de la Física*. Tesina predoctoral. Universidad nacional de Tucumán.
- VERDÚ R. Y MARTÍNEZ-TORREGROSA J. y OSUNA, L. (2002). Enseñar y aprender en una estructura problematizada. *Alambique*, 34, pp 47-55.
- VERDÚ R. Y MARTÍNEZ-TORREGROSA J., (2005), *La estructura problematizada de los temas y cursos de Física y Química como instrumento de enseñanza y aprendizaje*. Tesis doctoral editada por su autora. Alicante, ISBN 84-689-2380-X.
- VIENNOT, L. (1979). *Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire*. Paris Hermann.
- VIENNOT. L. (1989). La didáctica de la enseñanza superior para qué?. *Enseñanza de las Ciencias*, 7(1), pp 3-13.
- VIENNOT. L. (1989). L'enseignement des sciences physiques object de recherche. *Bulletin de l'Union des physiciens*, 716, pp 899-910.
- VIENNOT, L. (1996). *Raisonnement en Physique élémentaire*. De Bock y Larcier. Paris.
- VIGOTSKY, L.S. (1973). *Aprendizaje y desarrollo intelectual en la edad escolar*. Akal: Madrid.
- VILCHES, A. y GIL, D. (2003). *Construyamos un futuro sostenible*. Cambridge University Press, Madrid.
- WANDERSEE, J.H. (1986). Can the History of Science help Science Educators anticipate Student' Misconceptions? *Journal of Research in Science Teaching*, 23 (7), pp 581-597.
- WANDERSEE, J.H. (1992). The historicity of cognition : implications for Science Teaching and Learning. *Journal of Research in Science Teaching*, 29 (4), pp 423-434.
- WANDERSEE, J.H., MINTZES, J.J., NOVAK, J.D. (1994). Research on alternative conceptions in Science. *Handbook of Research on Science-Teaching and Learning*. McMillan Pub. Co. New York.
- WANGSNESS, R.K. (1999). *Campos electromagnéticos*. México. LIMUSA.
- WEISS, I.R. (1993). Science teachers rely on the textbooks, in R.E. Yager (ed.). *What research says to science teacher? Vol 7. The science, technology, society movement*. Washintong DC: National Science Teacher Association.
- WHEATLEY, G.H. (1991). Constructivist perspectives on Science and Mathematics learning, *Science Education*, 75 (1), pp 9-21.
- WHITE, R.T. (1998). Research, Theories of Learning, Principles of Teaching and Classroom Practice: Examples and Issues. *Studies in Science Education*, 31, pp55-70,

- WHITTAKER, E. (1951). *A History of the Theories of Aether and Electricity*. Edit. Tomash Publishers.
- WILLIAMS P, L. (1962). The Physical Sciences in the first half of the nineteenth Century: Problems and Sources. *History of Science*. vol1, pp 1-15.
- WISE, N.M. (1990). "Electromagnetic Theory in the Nineteenth Century", *Companion to the History of Modern Science*, Edit Routledge. London.
- ZUBIMENDI, J.L., (2003). *La Enseñanza de la Capacidad Eléctrica en Primer ciclo de Universidad: Análisis de dificultades y propuesta alternativa*. Tesis Doctoral. Universidad del País Vasco.

ANEXO: RELACIÓN DE LIBROS DE TEXTO ANALIZADOS

NIVEL SECUNDARIA	EDITORIAL	AUTORES	AÑO Edición
3º BUP	ANAYA	A. Candel, J.B. Soler, J.Satoca, J.J. Tent	1988
C.O.U.	ANAYA	A. Candel, J.B. Soler, J.Satoca, F. Tejerina, J.J. Tent	1988
C.O.U.	ANAYA	A. Candel, J.B. Soler, J.Satoca, J.J. Tent, F. Tejerina,	1995
1ºBACH	ANAYA	J. Satoca, F. Tejerina, J.F. Dalmau	2000
2º BACH.	ANAYA	J. Satoca, F. Tejerina, J.F. Dalmau	2001
3º BUP	BRUÑO	A. Martínez, J. Riaño, J. Couselo, P. Castrillo	1977
3º BUP	BRUÑO	A. Martínez, J. Riaño, J. Couselo, P. Castrillo	1987
COU	BRUÑO	A. Martínez, J.L. Hernández, M. Gisbert Briansó	1990
1ºBACH	BRUÑO	G.Ontañón, E. Ontañón	1997
1º BACH	BRUÑO	G. Ontañón, E. Ontañón, J. Soriano, A.J. Martín,	2002
2º BACH	BRUÑO	M. Gisbert Briansó, J.L. Hernández Neira	1998
2º BUP	CASALS	J.M. Dou, M.D. Masjuan, N. Pfeiffer	1985
3º BUP	CASALS	J.M. Dou, M.A. Febrer, M.D. Masjuan, N. Pfeiffer	1985
3º BUP	CASALS	J.M. Dou, M.D. Masjuan, N. Pfeiffer, A. Travasset	1999
3ºBUP	ECIR	A. Ruíz, L. Miralles, M.R. Fernández, V. Cotanda	1988
2ºBUP	DIDASCALIA	L. Gómez, M.H. Díez, P. del Campo	1979
3º BUP	DIDASCALIA	L. Gómez, M.H. Díez, P. del Campo	1978
3º BUP	EDELVIVES	M. Latorre, J.F. Moliner, J.Mª Rius	1978
1º BACH	EDELVIVES	I. Piñar, Arróspide C.	2002
1ºBACH	EDITEX	D.M. Andrés, J.L. Antón, J. Barrio, MªC. de la Cruz,	1995
1º BACH	EDITEX	D.M. Andrés, J.L. Antón, J. Barrio	2000
1º BACH	ELZEVIR	J. Hierrezuelo, E. Molina, C. Sanpedro, V. del Valle	2002
2º BUP	EVEREST	J.A. Fidalgo Sánchez	1979
3ºBUP	EVEREST	J.A. Fidalgo Sánchez	1984
3º BUP	EVEREST	J.A. Fidalgo Sánchez	1991
1º BACH	EVEREST	J.A. Hidalgo y M.R. Fernández	2002
1ºBACH	MCGRAW	A. Galindo, J.M. Savirón, A. Moreno, J.M. Pastor	2000
C.O.U	NAGORE	E. García, E. Elizalde, F. Arjona	1978
1º BACH	OXFORD	M. Ballester, J. Barrio	2002
2º BUP	SANTILLANA	F.Cacho, I. Portela, E. Rubio, M.A. Suárez	1976
3º BUP	SANTILLANA	C. Aragón, F. Cacho, E. Rubio, M.A. Suárez	1977
2ºBUP	SANTILLANA	J.M. Pastor, R. Pascual, MªT. Lauzurica, P. Escudero	1986
3º BUP	SANTILLANA	R. Pascual, J.M. Pastor, MªT. Lauzurica, P. Escudero	1986
1º BACH	SANTILLANA	J. Carrascosa, S. Martínez, J. Martínez	2000
C.O.U.	SANTILLANA	J. Casanova, J.L. Casanova, M.L. Sánchez	1983
2º BUP	S.M.	A. Arriola, J.L. Barrio, A. Cañas, M. García, E. Lowy	1991
3º BUP	S.M.	M.A. Olarte, M. Hidalgo, E. Lowy, M. Segura	1985
1º BACH	S.M.	M. Agustench, J.I. Del Barrio, V. Del Castillo, N. Romo	2002
C.O.U.	S.M.	M.A. Olarte, E. Lowy, J.L. Robles	1989
2º BUP	VICENSIVIVES	A. L. Lasheras, Mª Pilar Carretero	1976
3º BUP	VICENSIVIVES	A. L. Lasheras, Mª Pilar Carretero	1978
1º BACH	VICENSIVIVES	R. Fernández, L. de Peña, J.L. Hernández, A. Lozano	2002

Anexo II. Relación de libros de texto analizados (Universidad)

- ALONSO M. et al., 1995, Física. (Addison-Wesley Iberoamericana. USA).
- ARONS A., 1970, Evolución de los conceptos de la Física. (Trillas. México D.F.).
- BUECHE F., 1978, Ciencias físicas. (Reverté. Barcelona)
- BÚJOVTSEV B.B., 1986, Física (volumen 3). (Mir. Moscú)
- BURBANO et al., 2003, Física General. (Tebar. Zaragoza).
- CATALÁ J., 1966, Física general. (SABER, Valencia).
- CHABAY R.W. & SHERWOOD B.A., 2002, Electric & Magnetic Interactions. (Jhon Wley & Sons, Inc.).
- CHENG D.K., 1998, Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería. (Addison-Wesley-Longman. México D.F.).
- CROMER A., 1998, Física en la Ciencia y en la Industria. (Reverté. Barcelona).
- CUTNELL, 2004, Física. (Limusa. México).
- GASCÓN F. et al., 2004, Electricidad y Magnetismo. (Pearson. Madrid).
- GETTIYS W.E. et al., 1991, Física clásica y moderna. (Mc Graw Hill. Madrid).
- GIANCOLI D.C., 1985, Física Principios y aplicaciones. (Reverté. Barcelona).
- HABER-SCHAIM U. et al., 1973, Física (PSSC). (Reverté. Barcelona).
- HALLIDAY D. & RESNICK R., 1974, Física. (C.E.C.S.A. México D.F.).
- HARNWELL G.P., 1961, Principios de Electricidad y Electromagnetismo. (Selecciones científicas. Madrid).
- HERNÁNDEZ J. & TOVAR J., 1997, Electricidad y Magnetismo. (Universidad de Jaén)
- HEWITT P.G., 1995, Física Conceptual. Addison-Wesley Iberoamericana. U.S.A).
- KANE J.W. & STHERHEIM M.M., 2000, Física. (Reverté. Barcelona).
- KIP A.F., 1967, Fundamentos de Electricidad y Magnetismo. (Ediciones del Castillo. Madrid).
- LÓPEZ V., 1998, Problemas resueltos de Electromagnetismo. (Centro de estudios Ramón Areces. Madrid).
- MOORE T.A., 2005, Física seis ideas fundamentales. (Mc Graw Hill. México).
- PURCELL E.M., 1992, Berkeley Physics Course. Electricidad y Magnetismo. (Reverté. Barcelona).
- REITZ J.R. et al., 1996, Fundamentos de la teoría electromagnética. (Addison-Wesley Iberoamericana. E.U.A.).
- RODRIGUEZ M. et al., 1999, Campos Electromagnéticos. (Secretariado publicaciones Universidad de Sevilla).
- SEARS F.W. & ZEMANSKY M.W., 1966, Física. (Aguilar. Madrid)
- SEARS F.W. et al., 1999, Física Universitaria (volumen 2). (Pearson educación. México).
- SERWAY R.A., 1999, Electricidad y Magnetismo. (Mc Graw Hill. México)
- SERWAY R.A. & BICHNER R.J., 2000, Física para ciencias e ingeniería. (Mc Graw Hill. México).
- SERWAY R.A. & JEWETT J., 2004, Física (volumen 2). (Thomson-Paraninfo)
- TIPLER P.A., 1988, Física (volumen 2). (Reverté. Barcelona).
- TIPLER P.A. & MOSCA G., 2005, Física para la ciencia y la tecnología (volumen 2) (Reverté. Barcelona)
- WANGSNESS R.L., 1999, Campos electromagnéticos. (Limusa. México).



Volta supo que se encontraba frente a un descubrimiento con futuro, pero seguramente no pudo imaginar que pasados dos siglos el estilo de vida de la sociedad sólo era posible gracias a la pila.