

CAPÍTULO 3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LAS HIPÓTESIS PRINCIPALES

La justificación de las hipótesis emitidas se dividirá en dos apartados, a saber: en primer lugar se realizará un análisis histórico y epistemológico del desarrollo del Magnetismo como Ciencia; en segundo lugar, se hará una revisión de las diferentes teorías actuales sobre la enseñanza-aprendizaje de las Ciencias.

El conocimiento de la materia a enseñar, es decir conocer los problemas que originaron la construcción de los conocimientos, es uno de los requisitos básicos que debería atesorar el profesorado, pues como dice Gil et al. (1994):

“Conocer la historia de las ciencias, no sólo como un aspecto básico de la cultura científica general que un profesor precisa (Moreno 1990), sino primordialmente, como una forma de asociar los conocimientos con los problemas que originaron su construcción (Bevilaqua y Kennedy 1983, Pessoa 1989, Mathews 1990), sin lo cual dichos conocimientos aparecen como construcciones arbitrarias (Otero 1985 y 1989).

Se puede así conocer cuáles fueron las dificultades, los obstáculos epistemológicos (Bachelard 1938) que hubo que superar, lo que constituye una ayuda imprescindible para comprender las dificultades de los alumnos (Saltiel y Viennot 1985) y también cómo evolucionaron dichos conocimientos y cómo llegaron a articularse en cuerpos coherentes, evitando así visiones estáticas y dogmáticas que deforman la naturaleza del trabajo científico (Gagliardi y Giordan 1986)”.

Sin embargo es un hecho contrastable la poca formación filosófica, histórica y epistemológica de la Física que tiene el profesorado (Guisasola 1993), de la que se derivarán visiones distorsionadas de la misma por parte del docente, que se transmiten implícitamente en el proceso de enseñanza.

Retomando las ideas de Gil, y como señala Wandersee (1992): “there is a growing consensus that the historical aspects of cognition are important for understanding both how individuals and disciplines know what they know” (p. 425).

Es decir, una primera hipótesis de progresión en la construcción de los conocimientos científicos se puede inferir al estudiar la historia concebida como

evolución de modelos preteóricos y teóricos que han ido resolviendo problemas planteados por los científicos en dominios y contextos sociales específicos (Nersessian 1989, Duschl 1994, Solbes & Traver 1996, Seroglou, Panagiotis and Vassilis 1998, Bevilacqua & Gianneto 1998).

Cuando hablamos de problemas epistemológicos nos referimos a problemas relacionados con las ideas acerca del conocimiento científico o, en nuestro caso, acerca de cómo se estructura, cómo evoluciona y cómo se produce la teoría del magnetismo. Hoy sabemos que este tipo de problemas constituyen un obstáculo importante para el aprendizaje de las ciencias y es responsable de muchos de los fracasos que registran los enfoques que se proponen para la enseñanza de las ciencias (Linder 1993).

La detección de estos problemas ayudará, por una parte, a comprender las dificultades que puedan presentarse en el aprendizaje de los conceptos físicos, lo que redundará en un auxilio muy importante para que el profesorado seleccione una secuencia de contenidos que ayude a los estudiantes a (re)construir las ideas científicas aceptadas (Wandersee 1986); por otra parte permitirá mostrar las visiones distorsionadas de la Ciencia y del trabajo científico que se pueden presentar en la enseñanza habitual y, en particular, cuando se enseña el Campo Magnético Estacionario.

En segundo lugar, se realizará una revisión de las tendencias actuales del proceso de enseñanza-aprendizaje de las ciencias que facilitarán tanto la crítica didáctica de las metodologías de enseñanza habituales, como la puesta a punto, con posterioridad, de estrategias didácticas que favorezcan, de forma fundamentada, la innovación en el microcurrículum.

Vamos, por consiguiente, a desarrollar a continuación, de una forma pormenorizada, estos dos aspectos básicos para la fundamentación de nuestras hipótesis, y que ya hemos explicitado al comienzo de este capítulo.

3.1. Análisis histórico y epistemológico del desarrollo del magnetismo como ciencia

En este apartado no pretendemos esbozar un retrato completo de lo que son las Ciencias experimentales (en particular la Física), ni analizar comparativamente las diferentes visiones que se han propuesto para ellas, sino recoger las aportaciones convergentes de diversos historiadores y epistemólogos de la ciencia a la investigación educativa en ciencias.

Empezaremos pues, profundizando en el papel que puede jugar la Historia y la Epistemología de la Ciencia en la Enseñanza de las Ciencias, con objeto de establecer con precisión cuales son esas aportaciones. Posteriormente nos detendremos especialmente en el estudio del desarrollo de la teoría del magnetismo, estableciendo aquellos saltos cualitativos que permitieron su avance. Todo esto nos ayudará a explicitar los aspectos que consideramos más significativos para discernir en qué medida una propuesta educativa puede favorecer la formación de los estudiantes en el conocimiento científico.

3.1.1. Profundización en el papel que pueden desempeñar la Historia y la Epistemología de la Ciencia en el desarrollo del aprendizaje de las Ciencias

Desde hace más de una década se está publicando abundantes trabajos sobre el papel de la Historia y la Filosofía de la Ciencia en la Enseñanza de las Ciencias (Wandersee 1992, Matthews 1994 y 1998-a, Lombardi 1997, Moreno 2000, Fernández González 2000, Seroglou and Koumaras 2001).

En un clima que propicia la colaboración entre Ciencia, Historia y Filosofía, algunas voces se han alzado para presentar fuertes críticas al programa de introducir la Historia de la Ciencia en la Enseñanza de las Ciencias. Una de las voces es la de Martin Klein (1972) que sostiene que todo intento de presentar los contenidos científicos desde una perspectiva histórica implica una historia simplificada que no tiene en cuenta la rica complejidad de los hechos del pasado. En palabras de Klein (1972): "...es difícil imaginar la combinación entre la rica complejidad de los hechos a los que el historiador aspira, con la versión simple y precisa que el físico busca".

Las consideraciones de Klein advirtiéndole de la simplificación de la historia, quizás hubieran evitado algunos intentos de introducción de la Historia de la Ciencia en la enseñanza (en la actualidad, dicha introducción, tiene una orientación distinta gracias a los trabajos realizados en esta última década) que se limitaban a:

- Realizar un estudio cronológico de descubrimientos científicos.
- Citar algunas anécdotas que inmediatamente son caricaturizadas.
- Presentar breves biografías de algunos sabios.

Sin embargo, al contrario que Klein, nosotros contemplamos aquí una visión hegeliana de la historia cuya misión no consiste en la mera recapitulación exhaustiva de datos “imparciales” sino en la elaboración de un relato coherente y significativo que permita explicar acontecimientos del pasado (Hegel 1985). Así pues, todo relato histórico, más aún orientado a la enseñanza, debe necesariamente seleccionar algunos hechos considerados relevantes a la luz del sentido que se desea brindar a tal relato. el problema que emerge en esta concepción de la historia es: ¿sobre qué criterios se efectúa la selección de hechos del pasado?

Respecto a esta cuestión Whittaker (1979) plantea el problema de la interpretación de los datos históricos. Whittaker argumenta que la historia utilizada en los cursos de ciencias es, en realidad, una cuasi-historia pues constituye “el resultado de numerosos libros de autores que han sentido la necesidad de dar vida a sus explicaciones...con un poco de contenido histórico, pero que de hecho ha reescrito la historia acomodándola paso a paso con la Física”.

En lo que se refiere a la objeción levantada por Whittaker a la relevancia de la historia en la enseñanza de las ciencias, la epistemología actual reconoce la imposibilidad de una objetividad absoluta de en la historia. Toda construcción de un relato histórico implica decisiones por parte del historiador respecto a los factores relevantes para los acontecimientos que desea relatar. Según Bachelard (1951) es necesario adjuntar a la historia de los hechos una historia evaluadora, cuyos criterios se fundan en la ciencia actual. Por lo tanto, la objeción de Whittaker parece referirse a una concepción en la actualidad anticuada de la propia naturaleza de la Historia como disciplina.

A lo anterior se puede añadir objeciones por parte del propio profesorado que critica el uso de la Historia de la Ciencia en la enseñanza porque resulta monótono “repetir todos los procesos de los científicos”, uno a uno, con sólo algunas demostraciones (Brush 1989). Esto vendría a indicar que el significado de Historia de la Ciencia para los profesores no siempre se aparece a aquello que los filósofos e historiadores tienen en mente.

Un problema importante estriba en que casi siempre se acaban haciendo reconstrucciones históricas demasiado simplistas. Estas deformaciones historiográficas se denominan “whiggismo”, y han sido objeto de una intensa controversia, principalmente en el marco de la Biología y el de su enseñanza (Bizzo 1992-a)

Otro whiggismo consistiría en la tendencia a presentar el pasado como un antecedente lineal del presente, sin dar cuenta de las diversas discusiones y teorías de la misma época (Butterfield 1951)

Sin embargo, el principal interés de las publicaciones más recientes reside, según determinados investigadores, en que enriquecen las orientaciones constructivistas del aprendizaje (Brush 1989, Duschl 1994, Matthews 1994, Bevilacqua y Giannetto 1998) y que no se limitan a recomendar la introducción de la Historia de las Ciencias en el currículum de Ciencias. De hecho las aportaciones que se realizan desde la Historia y Epistemología de la Ciencia tienen como finalidad ayudar al alumnado a construir sus propias concepciones sobre la Ciencia (Fillon 1991).

Cuando en la hipótesis nos hemos referido a posibles graves carencias epistemológicas de la enseñanza habitual del Magnetismo, queremos indicar que la enseñanza del mismo debe tener en cuenta las aportaciones de la Historia de la Ciencia en dos aspectos, a saber:

a) La contextualización histórica de las teorías científicas muestra que éstas son productos socio-históricos que son puestos en cuestión, reelaborados y sometidos perpetuamente a la crítica del pensamiento y de la experiencia (Khun 1971, Lakatos 1983, Guilbert y Meloche 1993, Lombardi 1997). Esto implica resaltar el papel del debate, 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 de que no pueden ser sometidos a discusión debido a su aceptación por la comunidad científica); apoyada en el mejor de los casos, por 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 la superación de las mismas (Duschl 1990).

b) Podríamos indicar que la Historia de la Ciencia puede contribuir en mayor medida a la Enseñanza si nos fijamos más en la historia de los problemas que en la de los resultados. En este sentido, una hipótesis plausible de trabajo enunciada ya con sumo cuidado por Piaget y García (1975), indica que las similitudes entre la construcción del conocimiento científico en la historia de la humanidad y en la mente del estudiante no se refiere sólo al contenido de estas construcciones, sino también a los métodos seguidos en las mismas. En esta dirección hay bastantes trabajos de investigación (Wandersee, Mintzees and Novak 1994, Gagliardi 1988), que sugieren que el desarrollo de los conceptos de una teoría a lo largo de un período 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 conceptos científicos pueden parecerse a las dificultades que se presentaron en el desarrollo de las teorías científicas a través de la historia.

Esta comparación, no debe significar la aceptación de un paralelismo estricto 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).

Por otro lado, un elemento sustancial, en el seguimiento del desarrollo histórico de la Ciencia, es el que consiste en considerar las diferencias ontológicas, (formas de ver el mundo), que puedan existir en la evolución de las teorías científicas, o al pasar de una teoría a otra. Esta característica tiene especial importancia en las dificultades de aprendizaje de determinados conceptos científicos (Chi 1991).

Estas orientaciones permiten una de las mayores contribuciones de la Historia de la Ciencia a la Enseñanza, en el sentido de que posibilita la anticipación de problemas epistemológicos y ontológicos que puedan dificultar el proceso de aprendizaje y la elaboración de estrategias de enseñanza, que puedan contemplar los debates originales, ofreciendo mayor número de alternativas a los estudiantes. Así pues, la determinación de los obstáculos ontológicos y epistemológicos permite encarar la enseñanza desde el ángulo de la construcción de los 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). Esto permite que el alumnado tome conciencia de su propia forma de construcción del saber y enriquecer sus concepciones como parte de un proceso de investigación científica. Ello facilita la metacognición del estudiante al 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.

Otra de las principales aportaciones de la Historia y de la Epistemología de la Ciencia es su papel como medio para motivar a los alumnos en el estudio de la Ciencia en general y de la Física en particular. Se ha comprobado que existe una relación entre los resultados de los estudiantes en una disciplina y la representación que tienen de la misma en cuanto a sus objetivos, funciones métodos, campo de aplicación, etc. Así pues, aquellos estudiantes que tienen una concepción abstracta y puramente formal de la disciplina escolar, encuentran más dificultades que aquéllos para los que la disciplina tiene una utilidad social y práctica (Rapports de Recherches 1987, Schibeci 1984).

En resumen, un análisis sistemático de las principales dificultades que se produjeron en la construcción de los conocimientos científicos puede ayudarnos a fundamentar mejor su enseñanza y a comprender los posibles obstáculos que puedan tener los estudiantes en el aprendizaje del Magnetismo. Así pues, habrá que hacer un análisis de las pre-teorías y teorías desde la época de los filósofos griegos hasta la teoría de H. A. Lorentz, que por su importancia representaron verdaderos saltos cualitativos en la construcción del Magnetismo, centrándose en particular, en aquellas dificultades y problemas cuya superación determinaron el avance científico. Este será el objeto del próximo apartado.

3.1.2. Análisis de las principales aportaciones epistemológicas a la construcción del Magnetismo como ciencia.

A continuación se irán concretando las diferentes categorías históricas para el campo del MAGNETISMO, haciendo un análisis de las principales aportaciones epistemológicas a la construcción del Magnetismo como Ciencia.

Se comenzará describiendo aquellas modelizaciones que definieron las primeras ideas sobre la naturaleza magnética de la materia, para después continuar introduciendo aquellas pre-teorías semicuantitativas que se desarrollaron y que finalmente, tras controvertidos debates y saltos cualitativos, desembocaron en las teorías actuales (Holton y Roller 1963, Whittaker 1987, García Doncel 1987, Taton 1988, Borges 1997)

El modelo Vitalista-Animista (desde los filósofos griegos hasta el año 1600)

Este modelo, como el resto de modelos que irán apareciendo a lo largo de la historia de la ciencia, se basa en unos principios básicos, pero determinados aspectos, inherentes a él, se van modificando con el transcurso del tiempo.

Empecemos por los filósofos griegos. Éstos en un intento de explicar las atracciones entre imanes, así como el hecho de que éstos sólo atraen a materiales de hierro (es decir, a unos cuerpos atraen y a otros no) dan diferentes explicaciones, todas ellas con un denominador común: se otorga vida y conciencia a todo tipo de materia, tanto animada como inanimada. Por ejemplo, el modelo de Aristóteles (siglo IV a. C.) que fue el que tuvo mayor influencia durante toda la Edad Media. Su teoría consistía en asegurar que los fenómenos magnéticos conocidos se debían a una “oculta cualidad magnética”; dicha “cualidad oculta”, característica de los imanes, se difunde a través del espacio y confiere al hierro un poder de automoción que lo guía hasta unirlo con la piedra imán (Heilbron 1979).

El modelo animista, de los filósofos griegos, presentaba, sin embargo, una serie de problemas explicativos, como eran los siguientes:

- La metodología de trabajo es exclusivamente cualitativa
- No se reconoce ni se explica la repulsión entre imanes
- No se tiene en cuenta la “polarización magnética”
- No distingue entre sí las fuerzas gravitatoria, eléctrica y magnética

Santo Tomás, en el siglo XIII, es continuador de las teorías aristotélicas, pero la modifica y completa en cierto sentido. Analiza un nuevo referente empírico cual es el de que la acción magnética sólo se produce a pequeñas distancias del imán. En su modelo, el magnetismo es una propiedad intrínseca de los imanes; atraen el hierro transfiriéndole algún poder atractivo cuando está en el “área de influencia del imán”. Si el hierro está fuera de ese área no lo atrae.

Hizo el primer intento de distinguir la gravedad del magnetismo y lo hizo de forma cualitativa, diferenciando el automovimiento del hierro por un imán de la caída libre en la gravedad (la caída libre se producía a cualquier distancia, mientras que la atracción del hierro por el imán sólo si el hierro estaba en el “área de influencia del imán)

Por otro lado, Pierre de Maricourt, (alias Peter Peregrinus) en ese mismo siglo, descubre, y define factualmente los polos de un imán. Además, en su trabajo, que puede ser visto, en muchos aspectos, como una recopilación del cuerpo de conocimiento (en el ámbito del magnetismo) disponible en la Europa del siglo XIII, aparece por primera vez el análisis del fenómeno de repulsión entre imanes, estableciendo la regla “factual” según la cual los polos semejantes de un imán se repelen y los polos diferentes se atraen. Dicha regla se explica en términos de “agent-patient” (agente-receptor). Cuando se acercan dos “agentes” hay repulsión; si se acercan agente y receptor, hay atracción (Lenoble 1964).

También este modelo, de alguna manera modificado del animista “griego”, tiene sus lagunas, a saber:

- La metodología sigue siendo cualitativa
- Todo se debe a la propiedad intrínseca de los imanes, en consecuencia, no existen estructuras ni identidades asociadas con el magnetismo.

- No se hace ni siquiera una aproximación semicuantitativa de la variación de la “fuerza” con la distancia.

El modelo de Gilbert (1600)

Es un modelo intermedio entre el anterior, vitalista-animista, y los que surgirían con fuerza en el siglo XVIII.

Los referentes empíricos mas destacables son: a) diferenciación clara entre interacción eléctrica y magnética, b) la Tierra aparece como un gigantesco imán, c) el poder magnético de la Tierra decrece con la distancia, d) existencia de un “campo magnético” de la Tierra.

El modelo de Gilbert implica un cambio metodológico, respecto de la época anterior, en la forma de trabajar ya que se fundamentaba en criterios de evidencia empírica, frente al enfoque cualitativo de siglos pasados.

A pesar de lo anterior, el magnetismo lo entiende como una propiedad característica de la materia, en igualdad con la masa, el volumen, etc. La Tierra y los imanes tienen un magnetismo intrínseco, aunque eso sí, rechazando explicaciones basadas en “simpatías”, “vapores”, “effluvia” (Borges 1997)...Se asocian los efectos magnéticos conocidos a una “forma”, en oposición a los efectos eléctricos, que eran debidos a la materia. Esta “forma” era inherente a la estructura del Universo, y se manifestaba sólo en presencia de un cuerpo magnetizado (Heilbron 1979)

Quizás uno de los aspectos que hace más importante a este modelo, es que el Magnetismo adquiere el rango de ciencia “separada” de la Electricidad.

Como el modelo animista también tiene sus propios déficits, los más importantes serían:

- No cuantifica los resultados obtenidos.
- No existe estructura ni identidades asociadas al magnetismo.

El modelo materialista de Descartes (Siglo XVII)

Descartes era un filósofo natural del Renacimiento, su visión ontológica era la siguiente: el mundo está lleno de materia y toda acción de un cuerpo sobre otro se realiza por contacto directo o indirecto. Por ejemplo pensaba que un imán actúa sobre un trozo de hierro a través de un flujo de materia que sale del imán y vuelve a él. Su ingeniosa solución, fue de gran influencia durante mucho tiempo (Lenoble 1964)

Su modelo, con el que trató de analizar los mismos referentes empíricos contemplados hasta el momento, es una pre-teoría de lo que hoy llamaríamos “teoría de campo”, que alcanzaría su máximo esplendor en el siglo XIX con investigadores como Faraday, Maxwell o Hertz. Es un modelo que forma parte de otro más global que intenta explicar todos los fenómenos físicos conocidos.

Es una teoría donde las atracciones y repulsiones eran explicadas mediante impulsos mecánicos, y eran además absolutamente distintas a la teoría de la gravedad.

Es un modelo materialista, en el que el magnetismo se produce por emanación de partículas elementales, que sólo pueden penetrar en cuerpos como el hierro debido a la forma de las partículas y a las formas de los “poros” en esos materiales. Representa, por lo tanto, un cambio en la visión “ontológica” del fenómeno, respecto de las visiones de siglos anteriores (Heilbron 1979, Berkson 1981).

El modelo de Descartes presenta varios problemas como serían:

- Su metodología es cualitativa.
- No tiene en cuenta la polarización magnética.
- No explica la disminución del “poder magnético con la distancia”

Modelo de fluido único de Aepinus (1724-1802)

Los referentes empíricos son en este caso, además de los anteriores: a) los imanes actúan sólo sobre algunos materiales (los magnéticos), b) la acción magnética decrece

con la distancia (semicuantitativa), c) polarización magnética (magnetización de la materia), d) los fenómenos eléctricos y magnéticos son análogos pero inconexos.

Como en el caso de Gilbert, el modelo de Aepinus es un modelo intermedio entre el modelo de “fluido único” (imperante en aquella época, para explicar las acciones eléctricas), que utiliza para explicar el porqué de la acción magnética, y el modelo de acción a distancia o newtoniano (que comienza a ser el paradigma científico de la época) que asumirá para explicar el cómo de la acción magnética.

El modelo persigue establecer la “ley de la fuerza magnética”. Como se ha dicho antes, tiene como base las teorías eléctricas de la época, en un intento de construir una teoría similar a la del fluido único de Franklin para la Electricidad.

La experimentación de las propiedades termoeléctricas de la turmalina, llevan a Aepinus a considerar los fenómenos eléctricos y magnéticos análogos. Establece de forma semicuantitativa que la fuerza depende inversamente de la distancia (pero no establece la relación operativa).

En su teoría de fluido único, los polos son + ó – según la cantidad de fluido magnético que tienen. Todos los fenómenos magnéticos dependen del desplazamiento del fluido magnético dentro del hierro...así la magnetización de la materia es explicada como la inducción eléctrica. Además, la permanencia de los imanes es explicada suponiendo que el fluido estaba enredado en sus poros, por lo tanto se desplaza con dificultad (Aepinus 1979).

Aepinus asumía que los polos podían actuar a distancia. Las partículas de fluido se repelían entre sí y atraían a las partículas de hierro y acero. En concreto, el fluido magnético podría atravesar fácilmente todas las sustancias a excepción del hierro, acero e imanes. Todo el magnetismo se reduce a los efectos de las fuerzas ejercidas entre fluidos magnéticos o del fluido sobre las masa de materia férrea.

Respecto a la magnetización del hierro se puede producir de dos maneras: “más” o “menos”, dependiendo de si contiene más o menos que la “cantidad natural” de fluido magnético; así un imán tiene una parte “menos” y otra “más”. El propio Aepinus dice

que su teoría se sostiene asumiendo que el hierro y los imanes son perfectos “aislantes” respecto al fluido magnético (Whittaker 1987).

Los problemas explicativos que se aparecen en este modelo serían:

- Metodología cualitativa. No se define ninguna magnitud, ni cuantifica el decrecimiento de la fuerza magnética con la distancia.
- Presenta dificultades para explicar la no existencia de monopolos.
- Necesidad de que las partículas de hierro se repelan en la misma proporción que la atracción de sus fluidos magnéticos.

El modelo newtoniano de Coulomb (1736-1806)

Los referentes empíricos que trata de analizar este modelo, además de los anteriores serían: a) la fuerza magnética decrece con el cuadrado de la distancia, por ejemplo lo hace con imanes muy largos de manera que los polos están en sus extremos y se puede hacer la aproximación de monopolos, para cuantificar la interacción entre estos últimos, b) Al dividir un imán quedan otros imanes, cada uno con sus dos polos (es decir no hay monopolos)

Este modelo, aunque de inspiración claramente newtoniana, mantiene a nivel molecular la existencia de dos fluidos para poder explicar que no hay monopolos.

La gran aportación de Coulomb al magnetismo está en que cuantifica (encuentra un modelo matemático) la ley de la fuerza magnética, introduciendo una metodología cuantitativa, similar a la utilizada en la mecánica newtoniana (de ahí el nombre del modelo) que sirve para definir, operativamente, a partir de sus efectos dinámicos, los conceptos de polo magnético y fuerza magnética de tipo “central” (Heilbron 1979).

En cuanto a su otra importante aportación, (explicación de la magnetización de la materia), indica que los fluidos magnéticos, (magnetismo Norte y Sur, cuyas partículas obedecen a la ley del inverso del cuadrado), difieren de los fluidos eléctricos solamente en que no se pueden separar a gran distancia. En ese sentido, los fluidos magnéticos estaban atrapados en cada molécula, de forma que cuando un trozo de hierro se

imanaba, los fluidos se separaban sólo dentro de cada molécula; así que no hay posibilidad de imanes unipolares, y estas moléculas se comportan como dipolos eléctricos, produciendo magnetización por “polarización” (Mattis 1965).

Dificultades que presenta este modelo para explicar determinados aspectos que hoy conocemos:

- No considera más que el magnetismo “en equilibrio” (es decir la única fuente del magnetismo son los imanes)
- No explica cómo determinados materiales (tenedores por ejemplo), alcanzados por rayos, (fenómeno conocido en su época), atraían luego a clavos.
- No explica cómo con la descarga de una botella de Leyden se magnetizaba una aguja metálica (por ejemplo una aguja de coser). Evidentemente estos dos últimos aspectos tienen que ver con la inducción electromagnética, pero ya eran conocidos en los tiempos de Coulomb.
- No explica las fuerzas “no centrales” que ya Gilbert había comprobado en sus trabajos con imanes y brújulas.
- No podía explicar experiencias de diverso tipo como la transformación de fuerzas de Davy; experiencias de Fresnel en el ámbito de la teoría ondulatoria de la luz (interacción paso a paso), que además repudiaba la disyunción entre materia ordinaria y las sustancias imponderables, lo que significaba una fuerte objeción al “programa de investigación” basado en los fluidos imponderables.

Así pues la teoría de Coulomb extendía la mecánica newtoniana al magnetismo. De esta forma se acepta el modelo que subyace en la mecánica newtoniana: el mundo está constituido por “corpúsculos” sólidos y extensos, por espacio vacío y la fuerza. Cada corpúsculo posee la propiedad de “actuar a distancia” y ejercer fuerzas directas e instantáneas sobre otros cuerpos del universo. Dentro de las hipótesis de Newton, de la uniformidad del espacio y de la acción a distancia, es plausible el carácter central de las fuerzas.

Como dice W. Berkson (1981) no está claro que la concepción descrita fuera “realmente” la de Newton, pero sí creemos que el modelo de Newton es básicamente similar al que se le atribuye, justificada o injustificadamente.

Esta era la situación, en cuanto a la investigación en el ámbito del magnetismo, que se daba en las últimas décadas del siglo XVIII. En este orden de cosas conviene resaltar el hecho de que en todo el período de tiempo analizado hasta el momento, las únicas fuentes conocidas e investigadas del magnetismo fueron los imanes. Precisamente el gran salto que va a suponer, durante el siglo XIX, la investigación en magnetismo es el descubrir que la corriente eléctrica es una fuente del mismo.

Sin embargo este descubrimiento tiene sus precedentes, aunque muy superficiales, en el siglo XVIII.

A este respecto, parece que ya en el primer tercio del siglo XVIII se sospechaba, por parte de los filósofos naturales, que alguna clase de relación debería existir entre la electricidad y el magnetismo.

Ya en una publicación del año 1735: “Philosophical Transactions” se hablaba de que después de una tormenta, unos tenedores a los que les había alcanzado unos rayos atraían luego clavos.

En 1751 Franklin ensayó a magnetizar una aguja de coser por medio de una descarga de una botella de Leyden y tuvo éxito, pero no tenía claro que ese magnetismo se debiese al paso de corriente.

Estos hechos eran suficientemente conocidos y los estudiosos de la época se vieron movidos a buscar si había algún vínculo entre el magnetismo y la electricidad. Durante este siglo no lo consiguieron. Posibles razones de este fracaso pudieran ser las siguientes:

a) No se consideró, en general, más que la electricidad estática.

b) La razón anterior, entiendo, no estaba desligada del hecho de que la corriente que se podía manejar entonces era efímera y transitoria, ya que aún Volta no había inventado la pila.

c) Por otro lado, en 1805, dos investigadores franceses: Harchette y Desormes intentaron determinar si una pila voltaica aislada, (Volta ya la había inventado en 1799), libremente colgada, se orientaba por el magnetismo terrestre (Whittaker 1987). Evidentemente no tuvieron éxito. La causa, creo, radica en que como no se conocían las fuentes del magnetismo tampoco se sabía muy bien sobre quién actuaba éste.

En definitiva, a comienzos del siglo XIX, se empieza seriamente a cuestionar, por un número importante de investigadores, la teoría imperante durante el siglo XVIII, que es tanto como decir la teoría newtoniano-coulombiana. A este movimiento de cambio contribuyeron fundamentalmente dos situaciones: por un lado el de la relación entre la Filosofía y la Ciencia y por otro las dificultades, cada vez mayores, que tenía la Física newtoniana para explicar determinados aspectos de la Ciencia.

Relaciones entre la Filosofía y la Ciencia en los comienzos del siglo XIX

En la teoría física del siglo XVIII los fenómenos mecánicos se estudiaban matemáticamente y se soslayaba hacer hipótesis sobre los átomos y la naturaleza de las fuerzas. Por contra el calor y la electricidad se explicaban, en general, presuponiendo la existencia de “fluidos” imponderables del calor y de la electricidad y de fuerzas que actúan entre las partículas de esos fluidos y los átomos de la materia ordinaria; eran teorías especulativas y por lo general cualitativas, diferentes a la ciencia mecánica que era exacta y cuantitativa.

A finales de este siglo se hicieron intentos de tratar el calor y la electricidad matemáticamente, intentos que iniciaron la unificación conceptual de la Ciencia Física.

Sin embargo la Física del siglo XIX se caracteriza por el papel unificador del nuevo concepto de energía. Este impulso dado a la creación de una física unificada fue influenciado por corrientes filosóficas que divergían del mecanicismo newtoniano, tanto respecto de la visión del mundo como de la forma en que los humanos conocemos ese mundo. Veamos alguna de esas relaciones Filosofía-Ciencia que pusieron objeciones al modelo coulombiano (Harman 1990).

a) En Alemania, hacia 1800, en la época romántica, aparece una tendencia filosófica, la Naturphilosophie, que proponía una visión dinámica de la naturaleza basada en dos grandes postulados: el de “unidad” y el de “polaridad”. Según el primero la naturaleza constituye un todo, un sistema único y dinámico en que las fuerzas se metamorfosean de muchas maneras. Según el segundo, estas fuerzas son positivas unas y negativas otras, oponiéndose en una especie de lucha perpetua en la que equilibrios y desequilibrios van alternándose (Mason 1985).

b) En la misma época aparece la filosofía de Immanuel Kant (1724-1804), en la misma línea de unificación de los fenómenos naturales, que tuvo, entre otros aspectos fundamentales, una incidencia especial, a nivel de metodología científica, al teorizar sobre la forma en que el hombre puede conocer la realidad. En este aspecto tuvo una gran influencia sobre Ampère, como se verá más adelante (Berkson 1981, Williams 1989).

Analicemos a continuación el otro elemento que puso “en cuarentena”, a comienzos del XIX, la teoría coulombiana.

Dificultades del modelo newtoniano en diversos dominios de la Física en el siglo XIX

a) La teoría ondulatoria de J.A. Fresnel que suponía que la luz se propagaba mediante las vibraciones de un éter mecánico, en consecuencia, introdujo la óptica en el marco de una concepción de transmisión de la interacción “paso a paso” a través de un medio material. De esta forma, el matemático Fresnel fue capaz de explicar resultados que difícilmente podía explicar la teoría de Newton de la naturaleza corpuscular de la luz.

b) En 1800 Volta había descubierto que se podía producir corriente eléctrica continua disponiendo materiales de una forma determinada. Poco después, ese mismo año, Nicholson y Carlisle demostraron que la corriente eléctrica podía descomponer sustancias químicas en disolución acuosa y, en particular, el agua. Esta conversión de una “fuerza” en otra (eléctrica en química) no cabía en los esquemas newtonianos. Estos hechos venían a apoyar las tendencias filosóficas ya mencionadas, que defendían la unidad de las fuerzas de la naturaleza. Estas concepciones quedarían resaltadas en 1840

cuando se formuló la ley de la conservación de la energía, sometiendo los fenómenos de la luz, calor, química, electricidad y magnetismo a un marco de principios generales. Es importante resaltar, por un lado que el descubrimiento de Volta fue determinante para que Davy descubriera la descomposición eléctrica del agua en 1800, que le llevó a enunciar una teoría de la Electricidad basada en las fuerzas de afinidad química; por otro la influyente teoría ondulatoria de la luz propuesta por Fresnel, que rechazaba la disyunción de la materia ordinaria y las sustancias imponderables, concibiendo una Física unificada basada en las propiedades mecánicas del éter lumínico, lo que implicaba otro argumento más al programa de investigación basado en los fluidos imponderables.

c) En relación a nuevos hechos experimentales que cuestionaban el modelo newtoniano de Coulomb, se ha de mencionar en lugar destacado el descubrimiento del electromagnetismo por H.C. Oersted (1777-1851). Con dicho descubrimiento quedaba constatado, experimentalmente, la existencia de “acciones transversales” entre la corriente eléctrica y la brújula, oponiéndose a la concepción de “fuerzas centrales” para todas las acciones a distancia.

Oersted poseía una sólida cultura filosófica y había seguido a lo largo de muchos años las doctrinas de Kant y Schelling (este último uno de los grandes teóricos de la Naturphilosophie), entre otros metafísicos alemanes, alimentando sus reflexiones sobre las relaciones entre los fenómenos químicos, eléctricos y magnéticos. Así pues, a pesar de que pudieron intervenir muchos otros factores, el nacimiento del electromagnetismo en 1820 habría sido muy bien preparado por especulaciones apriorísticas respecto a la transformación de las fuerzas de la Naturaleza (Thuillier 1989).

En definitiva, en los comienzos del siglo XIX nos encontramos por un lado, con el éxito de la teoría de Coulomb en el ámbito de la Electroestática, basada en el modelo newtoniano, y por otro, se descubren hechos experimentales como “la transformación de las fuerzas” eléctricas en químicas, o las “fuerzas transversales” de Oersted que cuestionaban dicho modelo.

El “gran salto”. Aparición del Electromagnetismo en el siglo XIX

Con las experiencias de Oersted, en 1820, se produce un hecho fundamental: la corriente eléctrica produce, desde el punto de vista magnético, el mismo efecto que un imán...se había descubierto el electromagnetismo.

De sus experiencias se deduce la existencia de “fuerzas circulares”, inexplicables bajo el punto de vista newtoniano. Además, y en contra de la teoría newtoniano-coulombiana, se constata que los fenómenos eléctricos y magnéticos no solamente son análogos sino que además están interrelacionados .

Ante el hecho de que la corriente eléctrica actúa sobre los imanes, surgen dos hipótesis para explicarlo:

- La corriente está formada por imanes diminutos (Berzelius, Oersted, Wollaston)
- Los imanes están formados por pequeñas corrientes circulares (Ampère)

Una de las explicaciones de Oersted para dar cuenta de sus experiencias consistía en afirmar que lo que él llamaba “conflicto eléctrico”, sólo actúa sobre partículas magnéticas de la materia. Es decir, todo cuerpo no magnético es permeable a la penetración del “conflicto eléctrico”, mientras que los cuerpos magnéticos, o mejor dicho sus partículas magnéticas ofrecen resistencia al paso del “conflicto”, lo que supone que pueden moverse bajo el ímpetu de las fuerzas contendientes (García Doncel 1987).

A partir del descubrimiento de Oersted del electromagnetismo, y de la aparición de la teoría de campos de Faraday, coexisten en el siglo XIX dos enfoques ontológicos en la comunidad científica, el de “acción a distancia” y el de “campo”, aunque como se analizará más adelante, no son caminos paralelos sino que se entrecruzan con frecuencia. Por todo lo anterior los modelos que van a aparecer a continuación tienen su base en una de las dos teorías señaladas.

El modelo newtoniano de A.M. Ampère (1775-1836)

Es el iniciador de la electrodinámica y uno de los principales científicos de la Francia del siglo XIX. El modelo de Ampère hunde sus raíces en el de “acción a distancia” (generalizado en la escuela francesa) y tiene como referentes empíricos los siguientes: a) se vuelve a relacionar la Electricidad y el Magnetismo, b) los imanes interactúan con corrientes eléctricas, c) atracción entre hilos de corriente paralelos, recorridos por intensidades en el mismo sentido, d) repulsión entre hilos de corriente paralelos recorridos por intensidades en sentido contrario, e) magnetización de la materia, f) acción de un circuito cerrado sobre un elemento infinitesimal de corriente, perpendicular a ese elemento.

En el modelo de Ampère los imanes están formados por pequeñas corrientes circulares moleculares, por lo que la interacción entre imanes y corrientes era simplemente una interacción entre corrientes (Taton 1988). Ésta es la gran contribución de Ampère al magnetismo, en el sentido que unifica las fuentes del magnetismo conocidas en la época.

Sin embargo Ampère pensaba que la principal aportación de su teoría era el descubrimiento y posterior cuantificación, de la interacción entre dos hilos paralelos recorridos por una intensidad de corriente. En ese sentido publica en 1827 una memoria titulada: “*Theorie mathématique des phénomènes électrodynamiques uniquement déduit de l’expérience*” en la que se muestra a favor del modelo newtoniano y acusa a Oersted de seguir un modelo de torbellinos cartesianos.

En su teoría se matematiza la acción entre hilos paralelos, a través de una fuerza de tipo newtoniano pero que se aleja de él en cuanto que esa fuerza depende de los ángulos que forman los “elementos de corriente” (que actúan como los puntos másicos de Newton) (Berkson 1981).

Formula que la fuerza mecánica sobre un elemento de un conductor por el que circula una corriente, cuando dicho conductor se encuentra inmerso en un, como diríamos hoy en día, campo magnético, es perpendicular a dicho elemento de corriente.

Por lo que respecta a la magnetización de la materia, el modelo de Ampère indica que ésta se produce por alineamiento de las corrientes moleculares por la acción de una fuerza externa. La diferencia entre los cuerpos magnéticos y no magnéticos estriba en que en los primeros las corrientes pueden cambiar de dirección y ser alineados. En este modelo, a diferencia del de Coulomb, se alinean las corrientes moleculares y no las moléculas mismas...se pasa de un modelo “sustancialista” a otro de “elementos de corriente” (Williams 1965).

En otro orden de cosas, Ampère utiliza para sus investigaciones una metodología basada en la filosofía de E. Kant, según la cual los fenómenos son explicados mediante hipótesis; implica por lo tanto un cambio metodológico de importancia (Williams 1989)

Evidentemente este modelo tiene sus carencias, algunas de ellas serían:

- La instantaneidad de propagación de la interacción magnética.
- Dificil contrastación para el caso de corriente abiertas.
- Desconocimiento de lo que realmente es la “intensidad eléctrica”.
- Desconocimiento de los fenómenos de “Inducción Electromagnética”.

Modelo de “Campo” de Michael Faraday (1791-1867)

Faraday propone un nuevo modelo para explicar las interacciones conocido como “teoría de campo”. Este modelo constituye para muchos historiadores de la Ciencia una de las cuatro grandes revoluciones de la Física, sólo equiparable con la revolución de la Mecánica Clásica del siglo XVII y con las ulteriores revoluciones Relativista y Cuántica del siglo XX).

Los referentes empíricos a los que se enfrenta Faraday son, además de los ya citados para Ampère, los siguientes: a) las rotaciones electromagnéticas, b) el fenómeno de inducción electromagnética, c) el estudio de materiales, desde el punto de vista magnético, como por ejemplo los cristales diamagnéticos.

Su modelo de “campo” rechaza la noción de “acción a distancia”...supone pues, un cambio ontológico profundo. En aquél define la noción de fuerza como entidad

fundamental que llena todo el espacio. Introduce el concepto de “líneas de fuerza” que lo va modificando con el transcurso del tiempo; en primera instancia es una representación del campo en cualquier punto, más tarde son los caminos por donde se transmite la fuerza (Harman 1990).

Este nuevo modelo de cómo está constituido el Universo es de tal importancia, y su desarrollo en el posterior desarrollo de las teorías físicas ha sido tan importante, que nos ha parecido necesario mostrarlo, (ver cuadro), junto al modelo newtoniano.

CUADRO 3.1.2

MODELO DE CAMPO	MODELO NEWTONIANO
<p>- La materia (fuerza) y el espacio son entidades inseparables entre sí y separables del tiempo.</p> <p>- Las fuerzas actúan sobre otras fuerzas. Esto es consecuencia de establecer la igualdad entre materia y fuerza.</p> <p><u>Implicaciones derivadas:</u></p> <p>- Esta interacción se ejerce paso a paso a través del medio (líneas de fuerza); esto es coherente con la interpretación de que el espacio es prolongación de la materia y, por tanto, interviene en la interacción.</p> <p>.</p> <p>- Por tanto, esta interacción no puede ser instantánea ya que depende del medio intercalado entre los dos cuerpos.</p>	<p>- La materia, el espacio y el tiempo son entidades separadas, absolutas e independientes.</p> <p>- Las fuerzas como aspectos particulares de las interacciones (sin explicación procedimental).</p> <p><u>Implicaciones derivadas:</u></p> <p>- Esta interacción se ejerce a distancia. Ello es coherente con la observación empirista y su carácter probativo (la atracción o repulsión sería una manera de “verse” la materia corpórea).</p> <p>- Por tanto, esta acción a distancia ha de ser instantánea ya que es independiente del medio intercalado.</p>

Por otro lado, su descubrimiento de las “rotaciones electromagnéticas” (1821) le hace decir: “Las atracciones y repulsiones de Ampère no son resultados simples sino complejos. El resultado simple es la rotación del imán en torno a un alambre y viceversa” (Berkson 1981).

Con el descubrimiento de la Inducción Electromagnética (1832) explica la experiencia del disco de Arago y entra en debate con la investigación de Ampère. Faraday resalta que la inducción actúa sobre cables por los que no pasa corriente, lo que no se puede explicar, dice, como interacción entre corrientes.

En el modelo de “campo”, uno de los elementos clave, que contradice la “acción a distancia”, es que la interacción magnética no es instantánea, por lo tanto tiene lugar en un tiempo finito.

Los problemas explicativos que presenta este modelo serían:

- Falta de modelización matemática para su teoría.
- Desconocimiento formal de la intensidad de corriente, con respecto a la teoría actual. Para Faraday la estructura de la electricidad es desconocida, pero desprecia los fluidos.
- No da explicaciones acerca de los mecanismos por los que las fuerzas se propagan.

Modelo newtoniano de W.E. Weber (1804-1891)

En el siglo XIX, en el continente europeo, fundamentalmente en Francia y Alemania, y a diferencia de lo que ocurría en las Islas Británicas donde el modelo imperante era el de “campo”, el modelo en el que se basaban las investigaciones en el ámbito del Magnetismo era el newtoniano de “acción a distancia”. El científico alemán W. Weber era un de los máximos exponentes de esta corriente.

En su modelo se contemplan todos los fenómenos magnéticos conocidos a nivel macroscópico. Los cuantifica en su “Ley de la Fuerza”, la cual esta basada en el modelo newtoniano, pero modificado en el sentido de que la fuerza depende de la

velocidad y de la aceleración que llevan las partículas que son las que forman, según él, la corriente eléctrica. En esta ley, están incluidas: la fuerza coulombiana, la fuerza entre hilos de Ampère y también se explica con ella el fenómeno de inducción electromagnética descubierto por Faraday (García Doncel 1987, Whittaker 1987).

Su teoría sobre la corriente eléctrica, formada por cargas eléctricas de diferente signo que se mueven en sentidos opuestos por el conductor, es un primer acercamiento a lo que más tarde deviene en la Teoría de los Electrones de H.A. Lorentz.

Respecto a la magnetización de la materia, asume la existencia de corrientes moleculares permanentes en los materiales magnéticos. En el estado no magnetizado las corrientes están distribuidas aleatoriamente; sin embargo al aplicar un “campo” exterior se alinean sus ejes antiparalelamente a la dirección del campo...así explica el diamagnetismo (Woodruff 1962).

Sus principales problemas explicativos serían:

- Su modelo de corriente, que está formada por dos tipos de partículas positivas y negativas que avanzan en sentidos opuestos, choca con las investigaciones, realizadas a posteriori, de Rowland, en las cuales éste demostró que se creaba un “campo” magnético al hacer girar un disco cargado con un único tipo de carga eléctrica.
- La no instantaneidad de la transmisión de la fuerza magnética.

Modelo de “campo” de W. Thomson (1824-1907) y J.C. Maxwell (1831-1879)

Los referentes empíricos de este modelo son todos los fenómenos magnéticos conocidos (a nivel macroscópico), así como la unificación de las teorías de la luz y del magnetismo realizada por J. C. Maxwell.

Es un modelo en el que primero W. Thomson y luego J.C. Maxwell intentan desarrollar teorías físicas de propagación de fuerzas por medio de teorías mecánicas del éter y así hacer inteligible, físicamente, los conceptos de Faraday, reformándolos a partir del programa de explicación mecánica (Berkson 1981, Griffiths 1998).

William Thomson introduce una forma de investigar que es el “método de las analogías”, entendida como sigue: “La analogía matemática entre flujo de fluido, calor y electricidad y magnetismo implicaba un parecido matemático, no una similitud física; la similitud se daba entre las relaciones matemáticas, no entre los fenómenos así relacionados (Herman 1990, Nersessian 1990).

Por otro lado Maxwell, que se desvía de Faraday sobre todo en el hecho que para aquél el concepto de materia y de campo son entes totalmente diferentes, conecta las ideas de Faraday con las analogías matemáticas de Thomson. Concretamente el objetivo de Maxwell era encontrar un modelo apropiado para explicar el mecanismo básico de los fenómenos electromagnéticos. Eligió el modelo de vórtices de Thomson (Berkson 1981).

El modelo le permitió deducir un conjunto de leyes que daban cuenta de todos los fenómenos magnéticos, a nivel macroscópico, de una manera formal, explicando también la óptica física. Posteriormente abandonó el modelo mecánico, por ofrecer demasiadas dificultades, y se quedó con sus ecuaciones (lo que los historiadores de la ciencia denominan la “Interpretación Operativa”). El descubrimiento de Hertz de las ondas que llevan su nombre, fue el espaldarazo definitivo a la teoría de campos de Faraday y Maxwell.

A pesar del enorme éxito que tuvo esta teoría, una vez descubiertas las ondas hercianas, presenta algún problema explicativo, como podría ser:

- Desconocimiento formal de lo que era la intensidad eléctrica

Justamente este asunto lo aborda H.A. Lorentz (1853-1928) en su “Teoría de los Electrones”, donde postulaba que las partículas eléctricas, sucesivamente llamadas iones en 1895 y electrones en 1899 estaban inmersas en un éter electromagnético. En su teoría madura del éter electromagnético, proponía privar al éter de toda propiedad mecánica, reduciendo las leyes de la Naturaleza a las propiedades definidas por las ecuaciones del campo electromagnético (Taton 1988).

Los diferentes modelos del campo magnético no se agotan con los hasta aquí expuestos (faltaría el de “los dominios o campo molecular” de Weiss, el relativista de Einstein...característicos del siglo XX). Sin embargo van a quedar fuera de este trabajo ya que en éste nos vamos a limitar a analizar el campo magnético estacionario en el vacío. En todo caso, es preciso resaltar que las ecuaciones elaboradas por Maxwell, y por tanto las hipótesis de Faraday, siguen teniendo validez en el marco teórico actual de la Física ya que son invariantes respecto a las transformaciones relativistas.

3.1.3. *Síntesis de las principales contribuciones a la construcción del Magnetismo como ciencia*

En este análisis de las principales aportaciones epistemológicas a la construcción del Magnetismo como ciencia, hemos encontrado que en el desarrollo de la teoría del magnetismo se pueden distinguir diferentes categorías que tienen su propio modelo. Estas categorías, de acuerdo con lo mencionado anteriormente, las podemos resumir en el Cuadro 3.1.3 de la página siguiente.

Hay que precisar, sin embargo, que cada categoría no se puede tomar como un todo aislado y cerrado, sino que se van transformando de forma que un modelo da paso a nuevas investigaciones que posibilitan a su vez un cambio de modelo, que permitirá ir explicando cada vez más hechos empíricos que el anterior no podía.

También las metodologías que se utilizan van sufriendo modificaciones, desde la puramente probativa típica del empirismo hasta la más sistemática e hipotético-deductiva de la actual teoría.

En cualquier caso, en el Cuadro 3.1.3. que se ha elaborado en función de los diferentes modelos, se observa cómo en una misma época coexisten varios, fundamentalmente el newtoniano de acción a distancia y el modelo de campo.

CUADRO 3.1.3

Síntesis de las principales aportaciones pre-teóricas y teóricas a la construcción del Magnetismo como Ciencia.			
Principales Investigadores	Pre-teoría/ teoría	Principales ideas propugnadas	Hechos experimentales explicados
Aristóteles (s. IV a.C.) Santo Tomás (siglo XIII) Gilbert (1544-1603)	Vitalista /Animista	El magnetismo se debe a la innata estructura de algunos materiales	- Atracción y repulsión entre imanes. - Atracción de imanes sólo a materiales de hierro. - La Tierra es un imán.
Aepinus (1724-1802)	Fluido único	El magnetismo es una sustancia compuesta de partículas que se repelen entre sí y atraen a las partículas del hierro y el acero	- Los mismos que los anteriores. - La acción magnética decrece con la distancia (semicuantitativa). - Magnetización de la materia.
Coulomb (1736-1806) Ampère (1775-1836) Weber (1804-1891)	Acción a distancia (Newtoniano)	Las fuentes se diversifican (fluido, elementos de corriente, cargas) y pueden interactuar a distancia, siendo ésta instantánea. El medio no tiene influencia relevante. Las fuerzas son de tipo central.	- Los mismos que los anteriores. - Cuantificación de las interacciones magnéticas. - No existencia de imanes unipolares. - Interacciones entre corrientes eléctricas. - Interacciones entre corrientes e imanes. - Inducción electromagnética.
Faraday (1791-1867) Maxwell (1831-1879)	Campo Magnético	La carga eléctrica en movimiento crea un campo de fuerza a su alrededor, representado por las líneas de campo. A cada punto se le asocia una intensidad y dirección. La interacción no es instantánea.	- Los mismos que los anteriores. - Experimento de Oersted. - Rotaciones electromagnéticas. - Inducción electromagnética. - Interacción no instantánea (Hertz)

Se ha visto cómo a lo largo de la Historia del Magnetismo, los principales modelos que trataban de explicarlo, (vitalista, fluido único, newtoniano, campo...), se van modificando con el transcurso del tiempo, intentando mantener sus bases, pero modificando ciertos aspectos característicos de cada uno de ellos.

En el siglo XIX hubo dos grandes programas de investigación, el newtoniano y el de campo. Entre ambos existían importantes diferencias pero compartían los fundamentos físicos básicos. Por un lado, todos los teóricos de campo rechazaban la acción a distancia, pero utilizaban la dinámica newtoniana (las tres leyes de la Mecánica). Por otro, los físicos de acción a distancia mantenían estos principios pero intentaron modificar la ley de fuerza para que dependiera de los ángulos (Ampère), para que dependiera de la velocidad y la aceleración (Weber), o para renunciar a fuerzas centrales (Grassman) (Berkson 1981).

Como complemento al cuadro 3.1.3, parece interesante esquematizar cuáles fueron, y cuando se produjeron, los principales “saltos” en la historia de la ciencia electromagnética:

Primer salto (De la época de los griegos y Edad Media al año 1600 con Gilbert)

Se caracterizó por el paso de: a) La unificación de fuerzas a su separación, es decir, de la no distinción de las interacciones gravitatoria, eléctrica y magnética a la separación de ellas como fuerzas diferenciadas, b) Una metodología de investigación no experimental y cualitativa a otra de evidencia empírica pero no cuantificada (sin modelo matemático).

Segundo salto (Del siglo XVII al XVIII)

Se caracterizó por el paso de: a) La visión vitalista a la corpuscular, es decir, se pasa de considerar al magnetismo como una cualidad propia de algunos materiales a considerarlo como un fluido imponderable. Posteriormente se abandona el modelo de fluido para definir al magnetismo a través de sus efectos y sus definiciones operativas, para finalmente hacer una interpretación netamente positivista, b) El paso de una metodología cualitativa a otra cuantitativa donde se definen magnitudes físicas.

Tercer salto (Del siglo XVIII al XIX)

Se caracterizó por el paso de: a) Una única fuente del magnetismo (el imán), a constatar que también era fuente del campo magnético las cargas eléctricas en movimiento, lo que implicó el nacimiento del Electromagnetismo, b) De la teoría explicativa newtoniana a la teoría de campo (de la “acción a distancia” a la “acción paso a paso”); bien entendido que la segunda no sustituyó a la primera sino que coexistieron y se complementaron.

Cuarto salto (Del siglo XIX al XX)

Aunque nosotros no lo hemos analizado en este trabajo, este salto supuso pasar de la teoría macroscópica de campos a la microscópica de “dominios” de Weiss, finalmente explicada a través de razonamientos que pertenecen al ámbito de la Mecánica Cuántica.

Así pues, y en general, la evolución del estudio del magnetismo, a lo largo de su historia, ha pasado de lo cualitativo a lo cuantitativo y de lo macroscópico a lo microscópico.

Una vez esbozadas las diferentes categorías epistemológicas que se han producido en el desarrollo del Magnetismo como Ciencia, esto puede ayudarnos a suponer que los estudiantes tendrían dificultades de aprendizaje (ver 3.1.4) y, por otro lado, que existirían deficiencias epistemológicas de la enseñanza habitual en general y en este caso concreto de la enseñanza del Campo Magnético Estacionario (ver 3.1.5).

Esto justificaría la afirmación que se hizo en la Primera Hipótesis de este trabajo, respecto de las deficiencias epistemológicas y didácticas que presentarían los estudiantes sometidos a un proceso habitual de enseñanza.

Como hemos dicho anteriormente todas estas deficiencias que cabe esperar que se produzcan, las formularemos en los dos siguientes “subapartados”.

3.1.4. Dificultades de aprendizaje de los conceptos básicos del Campo Magnético Estacionario

Una vez que hemos establecido las diferentes categorías epistemológicas que se han producido en el desarrollo de la teoría magnética, así como los problemas que dieron lugar a su puesta en cuestión y reelaboración, podemos aproximarnos a los resultados de las investigaciones sobre concepciones de los estudiantes para intentar comprender más globalmente el posible trasfondo de sus explicaciones a la hora de interpretar fenómenos cotidianos. En este sentido no es casualidad que la misma investigación en concepciones alternativas (Wandersee, Mintzes and Novak 1994) haya resaltado que existe cierto isomorfismo entre algunas de las ideas de los estudiantes resistentes a la enseñanza y algunas de las que se han presentado en la Historia de la Ciencia. En consecuencia, estamos en condiciones de establecer posibles dificultades de aprendizaje que presentarán los estudiantes en la comprensión de los conceptos (Wandersee 1986).

Por otra parte, el conocimiento científico contiene modelos del mundo real y procesos que son elaborados e interrelacionados por la comunidad científica para interpretar la Naturaleza. Estos modelos son sometidos a crítica, revisados y modificados a medida que los científicos analizan las posibilidades de cada modelo y, eventualmente, algunos alcanzan el suficiente consenso para ser divulgados a través de libros de texto y cursos académicos. Un modelo científico debe satisfacer dos condiciones: ser conceptualmente comprensible y ser productivo. El conocimiento científico, a diferencia del conocimiento de “sentido común”, supone tentativas de entender por qué algo ocurre o existe tal como es. Es a partir de esta síntesis de hechos (deducir de los que se sabe) como surgen y se modifican los modelos y teorías científicas (Duschl 1990).

En contraste con el carácter público de los modelos científicos, las representaciones mentales son personales y sólo existen en la mente de cada persona; sin embargo, ambos son un mediador entre la realidad y la mente humana. Ambos, modelos científicos y representaciones mentales, nos hablan de la forma de pensar, de los conocimientos previos y de nuestra experiencia, así como de la realidad externa

formada por fenómenos, objetos y procesos. Su utilidad consiste en que son una representación simplificada de la realidad.

En ese sentido, cuando se habla de paralelismo entre la construcción del conocimiento científico en la historia de la humanidad y en la mente del estudiante, se suele apuntar a ciertas similitudes entre las categorías epistemológicas que se han producido en el desarrollo de la teoría científica y las diferentes categorías explicativas que tiene dicho estudiante, dependiendo del contexto y del contenido que se trate (Marton 1981), y que le sirve para comprender esa teoría.

Sin embargo, sería poco razonable esperar una correspondencia punto a punto entre las teorías históricas y las concepciones de los estudiantes ya que como dice Saltiel y Viennot (1985): “la forma de razonamiento de las teorías primitivas y la de los estudiantes actuales se han desarrollado en contextos demasiado diferentes para poder influirse”. Por lo tanto, esta comparación entre las primeras teorías científicas y el razonamiento espontáneo de los estudiantes no debe ser tomada en sentido estricto.

Así pues, de acuerdo con el desarrollo histórico de la teoría del Magnetismo que acabamos de realizar, podemos suponer que los estudiantes presentarán dificultades de aprendizaje en los siguientes casos:

a) Hemos visto cómo a lo largo de la historia los fenómenos eléctricos y magnéticos se han unificado o separado, hasta llegar a la formulación actual que los relaciona pero define claramente sus características propias. En consecuencia, pensamos que existirán problemas para reconocer la diferente naturaleza del campo electrostático y del campo magnético estacionario; asimilando ambos de forma acrítica, tanto en lo que se refiere a sus fuentes como a los efectos que aquéllos producen, (en gran parte consecuencia del conocimiento difuso de las fuentes del campo magnético estacionario).

b) Como hemos visto, el proceso de unificación de las fuentes del Campo Magnético Estacionario (imanes y corriente) fue muy laborioso y complicado. Por ello, suponemos que se presentarán problemas a la hora de interpretar cómo funcionan los imanes, y como consecuencia, no se relacionará el campo magnético que crean con el que crean otras fuentes de dicho campo, por lo que no se llegará a interiorizar la

unicidad, en el fondo, de la fuente del campo magnético estacionario: las cargas eléctricas en movimiento.

c) De acuerdo con el apartado anterior, también suponemos que habrá dificultades para interpretar aquellos fenómenos magnéticos que puedan tener su origen en elementos como: intensidad de corriente, cuerpo cargado en reposo o/y cuerpo cargado en movimiento.

d) Hemos visto que una de las divergencias más importantes entre la teoría newtoniana y la de campo es el papel del medio. Así pues, es posible que aparezcan dificultades a la hora de interpretar el papel del “medio” en las interacciones magnéticas. En concreto aflorarán problemas de aprendizaje de aquellos fenómenos que para su correcta interpretación, exijan considerar la interacción magnética no sólo como una propiedad localizada en las partículas materiales sino también en el medio circundante (cambio ontológico). Entre otras cosas es esperable que a las “líneas de campo” se les adjudique un carácter “material” (Galili 1995, Pocovi and Finley 2001).

3.1.5. Deficiencias epistemológicas de la enseñanza habitual del Campo Magnético Estacionario

Hemos comentado que una de las aportaciones de la Historia y Epistemología de la Ciencia es que nos permite establecer las características fundamentales de la naturaleza de la Ciencia y el trabajo científico. Estas características nos permitirán detectar las visiones distorsionadas de la Ciencia y del trabajo científico que se dan frecuentemente en la enseñanza habitual, y que comentamos a continuación.

Una de las características de la naturaleza de la Ciencia es la consideración de teorías y modelos como productos socio-históricos sometidos a discusión y reelaboración por la comunidad científica. En contraposición, nos encontramos frecuentemente en la enseñanza habitual y en los libros de texto con una “*visión acumulativa lineal*” que no tiene en cuenta las diferentes formulaciones y saltos cualitativos que se dieron en el desarrollo de la teoría como por ejemplo, la unificación del campo eléctrico y magnético hasta el siglo XVII, su separación más tarde (en los

siglos XVII y XVIII), para posteriormente llegar a su unificación, (a partir del siglo XIX con la aparición del Electromagnetismo), hasta llegar al modelo actual.

Otra de las características de la naturaleza de la Ciencia es el papel protagonista de los problemas como motor de desarrollo de las teorías, que permiten pasar a otras nuevas de mayor poder explicativo de los fenómenos considerados. Frente a esta concepción de la Ciencia, que viene a converger con la anterior, frecuentemente se suele encontrar en la enseñanza habitual y en los libros de texto una “*visión aproblemática*” que no explica, por ejemplo: la necesidad de nuevas fuentes para explicar el magnetismo, la relación entre ellas que desemboca en la asunción de la unicidad de dichas fuentes y así poder llegar de forma natural a entender el magnetismo en la materia (como mínimo al modelo de Ampère), el ordenamiento que se hace de las diferentes configuraciones que producen campos magnéticos, etc. Es decir los conceptos se introducen de forma arbitraria y sin considerar, como hipótesis que son, responden a una necesidad epistemológica o actitudinal de resolver algún problema que presenta en la teoría

Así mismo, otra de las características que hemos explicitado, es que el trabajo científico tiende a elaborar teorías unitarias de alto poder explicativo que englobe el mayor número de fenómenos posibles. Tal y como hemos visto, esta razón fue la que impulsó muchas de las investigaciones del siglo XIX en electromagnetismo. Sin embargo, es frecuente encontrar en la enseñanza habitual y en los libros de texto, una excesiva “*visión analítica*” que no hace ver la necesidad de establecer una explicación unitaria para los distintos conceptos y teorías.

Por último es necesario resaltar el cambio ontológico que se produce al pasar de una visión newtoniano-coulombiana a otra de campo, en la forma de concebir la interacción magnética, y que no suele tenerse en cuenta en la enseñanza habitual de estas teorías. La carencia de esta nueva visión ontológica puede llevar a vaciar de contenido la teoría de campo, considerándola como una forma muy “abstracta” y prescindible de justificar las interacciones magnéticas.

Al hilo de la reflexión anterior, es un hecho incontestable en ciencia la no inmutabilidad de leyes y conceptos; a medida que pasa el tiempo, nuevas leyes y teorías

modifican las antiguas, quedando éstas limitadas en lo que a su aplicabilidad se refiere. Sin embargo sucede con frecuencia que nos encontramos en los libros de texto, y también por parte del profesorado, con una “*visión acrítica*” de la Ciencia que no hace ver el grado de aplicabilidad de leyes y conceptos, conduciendo esto, a menudo, a que dichas leyes se conviertan, para los estudiantes, en “recetas mágicas” utilizables en cualquier circunstancia.

La segunda parte de la justificación de las hipótesis, sobre deficiencias didácticas, requiere realizar una revisión de las tendencias actuales del proceso de enseñanza-aprendizaje de las ciencias...éste será, en consecuencia el objetivo siguiente a analizar.

3.2. Fundamentación didáctica: el aprendizaje de la Física como investigación orientada

Las investigaciones didácticas llevadas a cabo, fundamentalmente, en las dos últimas décadas, encaminadas a renovar la enseñanza de las Ciencias, han dado lugar a una abundante literatura dirigida a comprender los procesos mediante los cuales los estudiantes construyen los conocimientos cuando se les enseña dichas materias (Gabel 1994, Fraser y Tobin 1998, Perales y Cañal 2000). Esto ha contribuido a la aparición de diferentes modelos de intervención didáctica cada vez más y mejor fundamentados.

El objetivo de este apartado es realizar una exposición, no demasiado exhaustiva, de los avances realizados en este campo de investigación que nos permita abordar, a posteriori, los aspectos fundamentales de nuestro modelo de “aprendizaje como investigación orientada” (Furió y Gil 1978, Gil et al. 1991, Gil 1993, Furió 2001), que vendría a fundamentar las estrategias didácticas con las que se debería enseñar, en cuanto al método se refiere, la Física. Así pues, se trata de establecer las principales características del modelo de aprendizaje para poder aplicarlo posteriormente al diseño y desarrollo de la unidad didáctica del Campo Magnético Estacionario que presentaremos en la tercera parte de este trabajo, y mediante el cual propondremos una alternativa innovadora del proceso de enseñanza-aprendizaje habitual de esta área de la Física. De acuerdo con el objetivo señalado, no vamos a realizar aquí una revisión histórica minuciosa de las tendencias innovadoras en la Enseñanza de las ciencias; en todo caso para este propósito se podría consultar la obra de Pozo (1989).

Las concepciones epistemológicas se refieren a las ideas acerca del conocimiento científico: su estructuración, evolución y producción. Hoy sabemos que las concepciones epistemológicas sobre la ciencia guardan relación con las concepciones sobre cómo se aprende ciencia y son responsables, en parte, de muchos de los fracasos que registran propuestas innovadoras para la enseñanza de las ciencias (Linder 1993, Hammer 1995, Roth y Roychoudhury 1994). Por ejemplo, pensar que el conocimiento se ha producido de manera lineal y acumulativa puede llevar a explicar la disciplina sólo de forma operativa como un conjunto de leyes y ecuaciones. Lo más grave es que este tipo de concepciones epistemológicas, no acordes con el marco teórico actual, no son meros obstáculos pasivos que hay que corregir, sino verdaderas dificultades que sesgan

y filtran los contenidos del curriculum. Así pues, consideramos de interés comentar las concepciones epistemológicas en las que basaremos nuestra propuesta didáctica y para ello, será necesario contestar a la siguiente cuestión: *¿Cuál es la visión actual sobre la actividad científica?*

Queremos señalar, en primer lugar, que somos conscientes de que la naturaleza de la actividad científica ha dado lugar a serios debates en los que se manifiestan profundas discrepancias entre los expertos: Popper, Khun, Bunge, Toulmin, Feyerabend, Lakatos, Laudan, Chalmers...(Mellado y Carracedo 1993). Ello genera, en ocasiones, una cierta perplejidad entre los investigadores en didáctica y lleva a plantear si tiene sentido hablar de una concepción correcta de la ciencia (Stinner 1992). No obstante pensamos que existen algunos aspectos esenciales en los que se da un amplio consenso y que podemos resumir así (Chalmers 1982, Mellado y Carracedo 1993, Orozco y Fernández 1995, Gil, Fernández y Carrascosa 1999):

a) En primer lugar, hemos de referirnos al rechazo de la idea misma de “Método Científico” como conjunto de reglas perfectamente definidas a aplicar mecánicamente e independientes del dominio investigado. Con palabras de Bunge (1980): “La expresión Método Científico es engañosa, pues puede inducir a creer que consiste en un conjunto de recetas exhaustivas e infalibles...”.

b) En segundo lugar, hay que resaltar el rechazo generalizado de lo que Piaget (1970) denomina “el mito del origen sensorial de los conocimientos científicos”, es decir, el rechazo de un empirismo que concibe los conocimientos como resultado de la inferencia inductiva a partir de “datos puros”. Esos datos no tienen sentido en sí mismos, sino que requieren ser interpretados de acuerdo con un sistema teórico. Así, por ejemplo, cuando se utiliza un amperímetro no se observa la intensidad de corriente, sino la simple desviación de una aguja.

Es preciso insistir en la importancia de los paradigmas conceptuales, de las teorías, como origen y término del trabajo científico (Bunge 1976), en un proceso complejo que incluye eventuales rupturas, (cambios revolucionarios), del paradigma vigente en un determinado dominio y surgimiento de nuevos paradigmas teóricos. Es preciso también insistir en que los problemas científicos constituyen inicialmente

“situaciones problemáticas” confusas: el problema no viene dado, siendo necesario formularlo de manera precisa, modelizando la situación, haciendo determinadas opciones de cara a simplificarlo más o menos para poder abordarlo, clarificando el objetivo, etc. Y todo esto partiendo del corpus de conocimientos que se posee del campo específico en que se realiza la investigación.

c) En tercer lugar, hay que resaltar el papel jugado en la investigación por el pensamiento divergente, que se concreta en aspectos fundamentales, y erróneamente relegados en los planteamientos empiristas, como son la invención de hipótesis y modelos o el propio diseño de experimentos. No se razona pues, en términos de certezas más o menos basadas en “evidencias”, sino en términos de hipótesis, que se apoyan, es cierto, en los conocimientos adquiridos, pero que son contempladas como simples “tentativas de respuesta”, que han de ser puestas a prueba lo más rigurosamente posible. Y si bien la obtención de evidencia experimental, en condiciones definidas y controladas, ocupa un lugar central en la investigación científica, es preciso relativizar ese papel, que sólo cobra sentido con relación a la hipótesis a contrastar y a los diseños concebidos a tal efecto. En palabras de Hempel (1976): “al conocimiento científico no se llega aplicando un procedimiento inductivo de inferencia a datos recogidos con anterioridad, sino más bien, mediante el llamado método de las hipótesis a título de intentos de respuesta a un problema en estudio y sometiendo luego éstas a la contrastación empírica”.

Son, por lo tanto, las hipótesis las que orientan la búsqueda de datos. Unas hipótesis que a su vez nos remiten al paradigma conceptual de partida, poniendo de nuevo en evidencia el error de los planteamientos empiristas.

d) Otro punto fundamental es la búsqueda de coherencia y de globalidad (Chalmers 1992). El hecho de trabajar en términos de hipótesis introduce exigencias de rigor suplementarias: es preciso dudar sistemáticamente de los resultados obtenidos y de todo el proceso seguido para obtenerlos, lo que conduce a revisiones continuas, a intentar obtener esos mismos resultados por caminos diversos y, muy en particular, a mostrar su coherencia con los resultados obtenidos en otras situaciones. Es necesario llamar aquí la atención contra las interpretaciones simplistas de los resultados de los experimentos y contra un posible “reduccionismo experimentalista”...no basta con un

tratamiento experimental para falsar o verificar una hipótesis; se trata sobre todo de la existencia, o no, de coherencia global con el marco de un corpus de conocimientos.

De hecho, uno de los fines más importantes de las ciencias estriba en la vinculación de dominios aparentemente inconexos. En efecto, en un mundo en el que lo primero que se percibe es la existencia de una gran diversidad de materiales y de seres, sometidos a continuos cambios, la ciencia busca establecer leyes y teorías generales que sean aplicables al mayor número posible de fenómenos. La síntesis del electromagnetismo, los principios de conservación, los esfuerzos que se realizan para unificar los distintos tipos de interacción existentes en la Naturaleza, etc., son buenos ejemplos de esa búsqueda de coherencia y globalidad, aunque ello se deba realizar partiendo de problemas y situaciones particulares muy concretas.

El desarrollo científico, pues, tiene como objetivo establecer generalizaciones aplicables a la Naturaleza. Precisamente esa exigencia de aplicabilidad, de funcionamiento correcto para describir fenómenos, realizar predicciones, abordar y plantear nuevos problemas, etc., es lo que da validez, que no certeza o carácter de verdad indiscutible, a los conceptos, leyes, teorías, etc., que se elaboran.

e) Por último, es preciso comprender el carácter social del desarrollo científico, lo que se evidencia no sólo en el hecho de que el punto de partida, (el paradigma teórico vigente), es la cristalización de las aportaciones de generaciones de investigadores, sino también en que la investigación responde cada vez más a estructuras institucionalizadas (Khun 1989, Sutton 1998, Mathews 1998), en las que la labor de los individuos es orientada por las líneas de investigación establecidas, por el trabajo del equipo del que forman parte, careciendo prácticamente de sentido la idea de investigación completamente autónoma. Señalar esto puede parecer superfluo, sin embargo, la idea de que hacer ciencia es poco menos que una tarea de “genios solitarios”, que se encierran en su torre de marfil, desconectando de la realidad, constituye una imagen tópica muy extendida que la enseñanza lamentablemente no ayuda a superar, dado que se limita a la transmisión de contenidos conceptuales y, a lo sumo, entrenamiento en alguna destreza, pero dejando al lado los aspectos históricos, sociales,...que enmarcan el desarrollo científico.

Se dibuja así una imagen imprecisa de la metodología científica, lejos de toda idea de algoritmo, en la que nada garantiza que se llegará a un buen resultado, pero que representa, sin duda, la mejor forma de orientar el tratamiento de un problema científico (como atestiguan los impresionantes edificios teóricos construidos).

Puede decirse, en síntesis, que la esencia de la orientación científica, (dejando de lado toda idea de método), se encuentra en el cambio de un pensamiento y acción basados en las “evidencias” del sentido común, a un razonamiento en términos de hipótesis, a la vez más creativo, (es necesario ir más allá de lo que parece evidente e imaginar nuevas posibilidades), y más riguroso, (es necesario fundamentar y después someter a prueba las hipótesis, dudar del resultado y buscar la coherencia global).

Es preciso, por otra parte, tener presente que una característica esencial de una aproximación científica es la voluntad explícita de la simplificación y de control riguroso en condiciones preestablecidas, lo que introduce elementos de artificialidad indudables, que no deben ser ignorados ni ocultados: los científicos deciden abordar problemas resolubles y comienzan, para ello, ignorando consciente y voluntariamente muchas de las características de las situaciones estudiadas, lo que evidentemente les “aleja” de la realidad, y continúan alejándose mediante lo que, sin duda, hay que considerar la esencia del trabajo científico: “la invención” de hipótesis, la construcción de modelos imaginarios.

El trabajo científico exige pues tratamientos analíticos, simplificadorios, artificiales. Sin embargo, ello no supone, como a veces se critica, incurrir necesariamente en visiones parciales y simplistas. En la medida en que se trata de análisis y simplificaciones conscientes, se tiene presente la necesidad de síntesis y de estudios de complejidad creciente. Pensemos, por ejemplo, que fue sólo a finales del siglo XIX cuando se produjo la fusión de tres dominios aparentemente autónomos - Electricidad, Óptica y Magnetismo- en la teoría electromagnética, abriendo un enorme campo de aplicaciones que sigue revolucionando nuestra vida diaria. Y no hay que olvidar que estos procesos de unificación han exigido, a menudo, vencer fuertes resistencias ideológicas e incluso persecuciones y condenas. La historia del pensamiento científico es una constante confirmación de que ésta es la forma de hacer ciencia, profundizando en el conocimiento de la realidad en campos definidos, acotados; es esta

profundización la que permite, posteriormente, llegar a establecer lazos entre campos aparentemente inconexos.

La idea de “método científico”, ha perdido hoy su supuesta naturaleza de camino preciso e infalible, así como su supuesta neutralidad. Ello no supone, sin embargo, negar lo que de específico ha aportado la ciencia moderna al tratamiento de los problemas: la ruptura con un pensamiento basado en estudios puntuales, en las “evidencias” de sentido común y en seguridades dogmáticas, introduciendo un razonamiento que se apoya en un sistemático cuestionamiento de lo obvio y en una exigencia de coherencia global que se ha mostrado de una extraordinaria fecundidad.

Estos puntos de consenso entre epistemólogos de la ciencia van a tener importantes implicaciones en el proceso de enseñanza-aprendizaje de la misma como veremos a continuación en la breve revisión de las principales tendencias y propuestas de enseñar ciencias que exponemos a continuación.

3.2.1. Breve revisión del “movimiento de innovación curricular” en la enseñanza de las ciencias de los años 60-70

Hasta principios de la década de los 60 la enseñanza de las ciencias permanecía anclada en la transmisión verbal de los conocimientos ya organizados, y en la que se observan características de la teoría asociacionista. La naturaleza prescriptiva rígida de la psicología asociacionista era consistente con, y apoyada por, las concepciones positivistas o empiristas de la naturaleza del conocimiento y la investigación, hechas populares por Francis Bacon en 1620 y más tarde por Karl Pearson (1900) y un grupo de filósofos de la “Escuela de Viena” (García 1989).

Estas ideas fueron hegemónicas en el campo de la psicología hasta mediados de los años setenta, y llevadas a la educación dieron lugar a una forma de conocimiento de tipo analítico, que requiere jerarquizar los conocimientos para que el aprendizaje se inicie por los conceptos más simples antes de enfrentarse a los más complejos (Pozo 1989). Supone también un tipo de aprendizaje repetitivo y considera al estudiante como receptor pasivo de información y al profesor como transmisor de conocimientos (Novak 1988).

En la enseñanza de las Ciencias, una de las consecuencias más palpables del modelo de transmisión-recepción fue la tendencia de limitar los contenidos del aprendizaje a aspectos estrictamente conceptuales, y en particular, hechos y leyes, según una visión positivista simple de la Ciencia.

Sin embargo, la idea de que la Ciencia no es simplemente un cuerpo teórico de conocimientos sino que también incluye un método de trabajo, dio origen a un nuevo enfoque de la enseñanza de las Ciencias que tenía como objetivo principal convertir al estudiante en un “pequeño científico”, y para ello tenía que hacer lo mismo que él: ir al laboratorio para practicar el método científico y con ello descubriría la teoría y le gustaría más las Ciencias. Es así como, a partir de los años 60, se produjo una eclosión de proyectos innovadores basados en el denominado “aprendizaje por descubrimiento” (Hodson 1985)

El aprendizaje por descubrimiento, con su énfasis en la participación activa de los alumnos y en el aprendizaje y aplicación de los procesos de la ciencia, se postulaba como una alternativa a los métodos pasivos basados en la memorización y en la rutina. Desde el punto de vista psicológico los defensores del aprendizaje por descubrimiento fundamentan su propuesta en la teoría de Piaget (Pozo y Carretero 1987). En esta teoría de la enseñanza se presta escasa atención a los contenidos concretos que el alumno debe aprender frente a los métodos.

Sin embargo, numerosos estudios empíricos y análisis críticos han puesto de manifiesto deficiencias en el aprendizaje por descubrimiento. Una de las críticas más frecuentes es la que pone de manifiesto que este aprendizaje se basa en concepciones epistemológicas hoy superadas y que se caracterizaban por un empirismo extremo que reducía la actividad científica a los aspectos meramente experimentales, admitiendo que los conocimientos serían aprendidos de forma inductiva a partir de las experiencias realizadas autónomamente por los estudiantes (Millar y Driver 1987, Cleminson 1990, Hodson 1994).

En relación con lo anterior, el estudio de Martin (1972), en pleno desarrollo de los proyectos de “enseñanza por descubrimiento” para la reforma de las Ciencias, apuntó críticamente que la relación entre la Filosofía de la Ciencia y la Enseñanza de la

Ciencia no había sido prácticamente explorada. En ese mismo sentido se manifestaron otros trabajos desarrollados a principios de la década de los 80. Así por ejemplo, Abimbola (1983), en una revisión de los proyectos curriculares de los años 60, sostenía que había poca relación entre las concepciones de descubrimiento mantenidas por los educadores de ciencias y las que mantenían los filósofos actuales de la Ciencia.

Otra de las críticas importantes al “aprendizaje por descubrimiento” ha venido del campo de la psicología cuando Ausubel distingue entre “aprendizaje memorístico” y “aprendizaje significativo”(Ausubel 1978). Según Ausubel lo importante en el aprendizaje no es que sea receptivo o por descubrimiento, sino que sea memorístico o significativo. Así por ejemplo, la participación de los estudiantes en los trabajos prácticos se puede convertir en una mera manipulación que difícilmente dará lugar a un aprendizaje significativo.

A pesar de las limitaciones del enfoque de ‘aprendizaje por descubrimiento’, consideramos que tuvo efectos positivos sobre la enseñanza de las Ciencias dado que obligó a los detractores del aprendizaje por descubrimiento a reflexionar profundamente sobre la naturaleza de la Ciencia y de la actividad científica (Gil 1993).

Esta situación de crisis favoreció un retorno hacia orientaciones del aprendizaje por recepción de la información transmitida pero basadas en la teoría del aprendizaje significativo de Ausubel y colaboradores (Ausubel 1978).

Según esta teoría *aprendizaje significativo* es el proceso a través del cual una nueva información se relaciona de manera *no arbitraria y sustantiva* (no literal) con la estructura cognitiva de la persona que aprende. Para Ausubel (1963, p. 58) el aprendizaje significativo es el mecanismo humano por excelencia para adquirir y almacenar la gran cantidad de ideas e informaciones representadas en cualquier campo del conocimiento. Según él la no arbitrariedad y la sustantividad son las características básicas del aprendizaje significativo.

No-arbitrariedad quiere decir que el material potencialmente significativo se relaciona de manera no-arbitraria con el conocimiento ya existente en la estructura cognitiva del aprendiz. O sea, la relación no es con cualquier aspecto de la estructura

cognitiva sino con conocimientos específicamente relevantes a los que Ausubel llama “subsumidores”. Por otro lado, *Sustantividad* significa que lo que se incorpora a la estructura cognitiva es la sustancia del nuevo conocimiento, de las nuevas ideas, no las palabras precisas usadas para expresarlas...queda entonces claro que, en la perspectiva ausubeliana, el conocimiento previo (la estructura cognitiva del aprendiz) es la variable crucial para el aprendizaje significativo (Moreira 1997).

Hasta aquí el aprendizaje significativo se ha enfocado desde un punto de vista básicamente cognitivo. Obviamente todos sabemos que el ser humano no es sólo cognición, las personas conocen, sienten y actúan...¿cómo queda entonces el aprendizaje significativo en una perspectiva humanista? El propio Ausubel al explicitar las condiciones del aprendizaje significativo (1968), en cierta forma tiene en consideración el lado afectivo del asunto y dice: “el aprendizaje significativo requiere no sólo que el material de aprendizaje sea potencialmente significativo, sino también que el aprendiz manifieste una disposición para relacionar el nuevo material de modo sustantivo y no-arbitrario a su estructura de conocimiento”.

En esta disposición para aprender se puede percibir la importancia del dominio afectivo en el aprendizaje significativo ya en la formulación original se Ausubel, pero fue Joseph Novak (1977, 1981) quien dio un *toque humanista* al aprendizaje significativo. Según Novak el aprendizaje significativo subyace a la integración constructiva entre pensamiento, sentimiento y acción lo que conduce al engrandecimiento humano.

Novak “adoptó” la teoría de Ausubel, sin embargo, dio nuevos significados o extendió su ámbito de aplicación al concepto de *aprendizaje significativo*; en su teoría humanista de educación *el aprendizaje significativo subyace a la construcción del conocimiento humano y lo hace integrando positivamente pensamientos, sentimientos y acciones, lo que conduce al engrandecimiento personal*.

A pesar de lo dicho hasta ahora sobre el *aprendizaje significativo*, es evidente que la facilitación del mismo en el aula está lejos de ser trivial (Moreira 1997). En este sentido, y en lo que se refiere a la facilitación programática del aprendizaje significativo, Ausubel (1978) propone cuatro principios programáticos del contenido:

diferenciación progresiva, reconciliación integrativa, organización secuencial y consolidación. La teoría de Ausubel ofrece, por lo tanto, directrices, principios y una estrategia que él cree que serán facilitadores del aprendizaje significativo; es su continuador Novak (1991, 1997) quien desarrolla, basado en la *diferenciación progresiva* y la *reconciliación integrativa* ausubelianas, un instrumento de gran éxito en el aula: los “mapas conceptuales”. Dicho instrumento puede usarse como recurso didáctico, de evaluación y de análisis del currículum (Moreira 1993) y también puede servir como instrumento de metacognición (Novak y Gowin 1984, 1988, 1996).

Pero tampoco este cambio de orientación en la enseñanza de las Ciencias por transmisión/recepción, basado en el “aprendizaje significativo” de Ausubel, permitió alcanzar los objetivos de conseguir una mayor aptitud científica y de interesar más a los alumnos y alumnas de ciencias. En efecto, la persistencia de graves errores conceptuales en los estudiantes, incluso de niveles universitarios y entre profesores (Pfundt & Duit 1998, Wandersee, Mintzes and Novak 1994) son dificultades de la práctica docente sin resolver que ponen en cuestión tanto la enseñanza por descubrimiento como la enseñanza por transmisión de conocimientos.

Por otra parte y relacionado con lo anterior, conviene resaltar que el fracaso en una de las actividades más frecuentes en las clases de Ciencias, como es la resolución de problemas de lápiz y papel, es otro síntoma más de la ineficacia del paradigma de enseñanza-aprendizaje por transmisión/recepción de los conocimientos. En efecto, los resultados de las investigaciones sobre la resolución de problemas (Gil y Martínez Torregrosa 1984, Perales 1993, Maloney 1994 y Gangoso 1999) muestran que en la enseñanza habitual los problemas son también “explicados”, ocultando al estudiante todo el proceso de incertidumbre y búsqueda, inherente a la resolución de cualquier situación problemática.

3.2.2. *La teoría del cambio conceptual como inicio de las ideas constructivistas en la enseñanza de las Ciencias.*

El principal interés de las investigaciones sobre esquemas conceptuales alternativos de los estudiantes, como expresa Gil (1986), no reside en el conocimiento detallado de cuáles son sus preconcepciones en cada dominio (aunque dicho

conocimiento sea hoy imprescindible para un correcto planteamiento de las situaciones concretas de aprendizaje) sino que han contribuido a la elaboración de una nueva orientación en el aprendizaje de las Ciencias. Diversos autores han planteado la búsqueda del ‘cambio conceptual’ dentro lo que se denomina teoría constructivista del aprendizaje (Driver 1986, Novak 1990, Gruender y Tobin 1991).

Las primeras propuestas de cambio conceptual, al menos, tenían en cuenta aspectos básicos del aprendizaje, como que “todo aprendizaje depende de conocimientos previos” o que “quienes aprenden construyen significados” y “establecen relaciones”. De acuerdo con Resnick (1983), las principales características de esta orientación constructivista del aprendizaje se pueden resumir de la siguiente forma:

- Lo que hay en el cerebro del que va a aprender tiene importancia. Es decir, el aprendizaje no sólo depende de los conocimientos que se transmiten al alumnado sino de las ideas previas del aprendiz.
- Quien aprende construye activamente significados. La construcción de significados implica un proceso activo de formulación de hipótesis que son contrastadas por experiencias sensoriales y que termina en la comprensión de la situación. En caso de no verificarse las hipótesis emitidas será necesario un replanteamiento de la situación y una nueva emisión de hipótesis.
- Encontrar sentido (comprensión) supone establecer relaciones (cuanto mayor sea esta estructuración mayor será su permanencia en la memoria). En este sentido el que aprende no reproduce simplemente lo que lee o lo que se le enseña sino que su grado de aprendizaje depende del nivel de relación que establece entre sus esquemas mentales y la información externa.
- Los alumnos y alumnas son responsables de su propio aprendizaje. Es el propio estudiante el que debe hacer uso de sus ideas para construir nuevos conocimientos, implicándose personalmente en las tareas de aprendizaje. Así mismo será responsabilidad del profesor el lograr las condiciones idóneas para que el alumnado se pueda implicar en la tarea.

Por otra parte, Posner y colaboradores (1982) describen las condiciones necesarias para el “cambio conceptual”:

- El estudiante debe experimentar insatisfacción con una concepción existente. Sin un nivel suficiente de insatisfacción, los estudiantes tienden a asimilar información conflictiva dentro de la amplia red de preconcepciones, más que ir hacia un proceso de cambio conceptual.
- La nueva concepción debe ser inteligible. Si esta condición no se da, al aprendiz no le queda otra opción que interiorizar la concepción a través de aprendizaje memorístico, lo que significa que no hay conexión proposicional formada, y la reconciliación con el esquema anterior no ocurre.
- La nueva concepción debe ser plausible. También debe ser congruente con el conocimiento personal. Los estudiantes, de cualquier modo, pueden estar socializados para creer que el profesor nunca se equivoca o que esos autores son infalibles; por tanto, las ideas transmitidas directamente desde estas fuentes pueden acarrear un nivel predeterminado de plausibilidad.
- La nueva concepción debe ser fructífera. La nueva concepción debe ser útil, o sea, resolver problemas que no resolvía la anterior, predecir fenómenos más decisivamente que la concepción que será reemplazada, etc.
- Necesidad del establecimiento de aspectos afectivos para lograr el cambio conceptual (Pintrich et al. 1993).

Esta visión del cambio conceptual en el aprendizaje de las ciencias se inspira desde el punto de vista epistemológico en las teorías de Kuhn y Lakatos sobre el cambio en la Ciencia y en los postulados de Toulmin sobre la evolución conceptual en ciencias dentro de un marco de ecología conceptual (Mellado y Carracedo 1993).

La secuencia que proponen las estrategias de enseñanza basadas en el cambio conceptual consiste en sacar a la luz las ideas de los alumnos, favoreciendo su

formulación y clarificación, para después crear conflictos que las pongan en cuestión e introducir a continuación las concepciones científicas, cuya mayor potencia explicativa va a hacer posible el cambio conceptual. Por último se proporcionan oportunidades a los estudiantes para aplicar las nuevas ideas en diferentes contextos o situaciones (Osborne y Wittrok 1985, Driver 1986 y 1989).

La mayor efectividad de estas estrategias sobre la simple transmisión de conocimientos ya elaborados fue refrendada por numerosas investigaciones realizadas en diferentes campos de las ciencias (Joung 1993; Wandersee, Mintzes y Novak 1994). Es cierto que dichas estrategias pueden, puntualmente, dar resultados positivos al llamar la atención sobre el peso de ciertas ideas de sentido común, asumidas acríticamente como evidencias. Sin embargo, pronto se constató que ciertas concepciones alternativas eran resistentes a la instrucción, incluso cuando ésta se orientaba explícitamente a producir el “cambio conceptual”. Parece que el efecto de las evidencias contrarias a las preconcepciones de los estudiantes de cara a lograr el cambio conceptual es menor que lo que se pensaba en un principio y los contraejemplos o conflictos cognitivos no siempre son útiles para lograr dicho cambio (Fredette y Lochhead 1981, Engel y Driver 1986, Shuell 1987, Hewson y Thorley 1989). Estas estrategias de “conflicto cognitivo” practicadas reiteradamente, producen una inhibición y un rechazo muy comprensibles. En efecto ¿qué sentido tiene hacer que los alumnos, una y otra vez, expliciten y afiancen sus ideas para seguidamente cuestionarlas? (Rela y Tricárico 1997). ¿Cómo no ver en ello un artificio que aleja la situación de lo que constituye la construcción de conocimientos científicos? Esa construcción nunca se plantea para cuestionar ideas, para provocar cambios conceptuales, sino para resolver problemas de interés para los investigadores (es decir, en nuestro caso para los estudiantes); problemas que se abordan, como es lógico, a partir de los conocimientos que se poseen y de nuevas ideas que se construyen a título tentativo. En ese proceso, las concepciones iniciales podrán experimentar cambios e incluso, aunque más raramente, ser cuestionadas radicalmente -en su uso científico, bien entendido, sin que ello afecte necesariamente a su uso en el nivel cotidiano (Mortimer 1995)-, pero ése no será nunca el objetivo, sino, repetimos, la resolución de los problemas planteados. No se trata, como puede verse, de eliminar los conflictos cognoscitivos, sino de evitar que adquieran el carácter de una confrontación entre las ideas propias (incorrectas) y los conocimientos científicos (externos). En conclusión, se hacía evidente que los

indudables *progresos* logrados con las estrategias de cambio conceptual resultaban todavía *insuficientes* (Pintó, Aliberas y Gómez 1996, Osborne 1996, Oliva 1999).

Debido, en parte, a las dificultades mencionadas surgen nuevas aportaciones en la investigación didáctica que tratan de explicar las limitaciones anteriores y proponer nuevas estrategias de enseñanza. Por un lado, diversos estudios muestran que a partir de obstáculos conceptuales el estudiante puede tener dificultades de tipo estratégico que se presentan en el momento de intentar resolver problemas cuantitativos, y que puede explicar muchos errores conceptuales de los estudiantes. Es decir, una de las principales dificultades a ser superadas para una correcta adquisición de los conocimientos científicos no se presenta solamente en la existencia de preconcepciones (ideas previas que posee el estudiante) o ideas alternativas (ideas erróneas que persisten aún después de haber estudiado), sino también en el uso reiterado de razonamientos basados en la metodología de *sentido común*, (Hashweh 1986, Segura 1991, Gil y Carrascosa 1993).

Esta metodología “de la superficialidad” o “de sentido común” posee las siguientes características (Gil y Carrascosa 1985):

- Generalizar acríticamente en base a observaciones cualitativas.
- Buscar respuestas rápidas y seguras, no sometidas a ningún análisis previo.
- No buscar una coherencia global en las respuestas.
- No explicitar las explicaciones de las respuestas ni debatirlas con expertos en el tema. Al contrario, compararlas con otras respuestas individuales buscando su comportamiento frente a situaciones reales.

Esta forma de analizar los fenómenos naturales conducen a dificultades de tipo estratégico en los estudiantes como son, entre otras, la *fijación funcional* que se presenta cuando los sujetos fijan la representación de un problema de acuerdo a su fijación funcional y fallan al representarla con una nueva función (Anderson 1990, Furió y Calatayud 2000) y la *reducción funcional* entendida como la tendencia a razonar sin tomar en cuenta todas las posibles variables que influyen en un problema (Viennot 1992, Furió y Calatayud 2000).

Así pues, estos estudios resaltan el papel de los aspectos metodológicos en el cambio conceptual como especialmente relevante. Esto supone aceptar que el cambio conceptual será difícil sin el cambio metodológico. Es decir, sólo haciendo que el estudiante practique, ayudado por el profesor, aspectos esenciales de la metodología científica, como por ejemplo, plantearse y precisar situaciones problemáticas, emitir hipótesis, realizar diseños de experimentación, analizar resultados, etc., le permitirá superar la metodología del sentido común y, consecuentemente, construir conocimientos científicos (Gil et al. 1991, Bandiera et al. 1995, Valdés y Valdés 1999).

Por otra parte, nuevas aportaciones de la Historia y Filosofía de la Ciencia indican que cuando se producen cambios o revoluciones científicas no sólo hay una transformación de la teoría vieja sino que también se producen cambios en las formas de ver el mundo, (componente ontológica), en las formas de razonar, (componente epistemológica), en los métodos, (componente metodológica) y en los propios valores y propósitos de la nueva teoría, (componente axiológica) (Duschl 1990, Duschl y Gitomer 1991, Mortimer 1995, Gil et al. 1999). Así pues, las aportaciones de la Historia y Filosofía de la Ciencia nos sugieren que las estrategias de cambio conceptual deben ir acompañadas de un profundo cambio epistemológico, ontológico y axiológico.

Además, también es necesario tener en cuenta las condiciones contextuales (históricas y sociológicas) en que se han dado las construcciones científicas. Es decir, hay que asumir que los conocimientos se construyen principalmente en forma cooperativa. No sólo se aprende cuando se construye individualmente el conocimiento, sino que también es necesario dialogar y comunicarse con las demás personas, compartiendo significados e integrándose en la misma cultura científica. En este sentido es preciso no confundir “construcción personal” con “construcción aislada”. En este sentido, la interacción con el profesor y otros compañeros debe constituir una estrategia potencialmente eficaz para aspirar a estadios cognoscitivos más elevados y compatibles con los científicos. Cabría resaltar que esta interacción creativa debe extenderse a los pequeños grupos de estudiantes que trabajan juntos, entres sí y con el docente (Gil et al. 1991, Wheatley 1991).

En resumen, las contribuciones de la Historia y Epistemología de la Ciencia nos permite superar el reduccionismo de los modelos de cambio conceptual, centrados

exclusivamente en los contenidos conceptuales, y recuperar como objetivo la familiarización de los estudiantes con las formas de razonamiento científico. Este cambio, a la vez conceptual, epistemológico y actitudinal, favorecerá estrategias centradas en el tratamiento de situaciones problemáticas abiertas de interés que responden a un modelo constructivista de aprendizaje como investigación orientada, que comentaremos a continuación.

3.2.3. *El aprendizaje de las Ciencias como investigación orientada*

Teniendo en cuenta los estudios anteriores y las dificultades señaladas, la estrategia de enseñanza que nos parece más coherente con la orientación constructivista y con las características del razonamiento científico, es la que plantea el aprendizaje como ***tratamiento de situaciones problemáticas abiertas que los alumnos puedan considerar de interés*** (Furió y Gil 1978, Driver y Oldham 1986, Gil y Mtnez-Torregrosa 1987, Burbules y Linn 1991, Gené 1991, Gil et al 1991, Duschl 1990 y 1995, Wheatley 1991, Pessoa de Carvalho y Gil 1995, National Research Council 1996, Guisasola y de la Iglesia 1997, Furió y Guisasola 1998, Jiménez 1998). Un tratamiento con aspiración científica que no puede traducirse en fórmulas sencillas, sino que ha de contemplarse, ***como una actividad científica, abierta y creativa, debidamente orientada por el profesor*** (Gil 1993, Hodson 1992, García y Cañal 1995, Valdés y Valdés 1999, Furió 2001), que incluya, entre otros:

* La ***consideración del posible interés y relevancia de las situaciones*** propuestas que dé sentido a su estudio y evite que los alumnos se vean sumergidos en el tratamiento de una situación sin haber podido siquiera formarse una primera idea motivadora.

* El ***estudio cualitativo de las situaciones problemáticas*** planteadas y la toma de decisiones, para acotar problemas y operativizar qué es lo que se busca (oportunidad para que los estudiantes comiencen a explicitar *funcionalmente* sus concepciones).

* ***La invención de conceptos y emisión de hipótesis***, (oportunidad para que las ideas previas sean utilizadas para hacer predicciones susceptibles de ser sometidas a prueba).

* La **elaboración de estrategias de resolución** (incluyendo, en su caso, diseños experimentales) para someter a prueba las hipótesis, a la luz del cuerpo de conocimientos de que se dispone.

* La **resolución y el análisis de los resultados**, cotejándolos con los obtenidos por otros grupos de estudiantes y por la comunidad científica. Ello puede convertirse en **oportunidad de conflicto cognoscitivo entre distintas concepciones** (tomadas todas ellas como hipótesis) y obligar a concebir nuevas conjeturas y a replantear la investigación.

* **El manejo reiterado de los nuevos conocimientos en una variedad de situaciones**, 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 de cuerpo coherente que tiene toda ciencia, favoreciendo, para ello, las **actividades de síntesis** (esquemas, memorias, recapitulaciones, 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**.

Es conveniente remarcar que *las orientaciones precedentes no constituyen un algoritmo* que pretenda guiar paso a paso la actividad de los alumnos, sino indicaciones genéricas que llaman la atención sobre aspectos esenciales en la construcción de conocimientos científicos que, a menudo, no son suficientemente tenidos en cuenta en la enseñanza de las ciencias. Nos referimos tanto a los aspectos metodológicos como a los problemas de contextualización del trabajo científico (relaciones C/T/S, toma de decisiones...) (Solbes y Vilches 1997) y a los componentes afectivos (interés por la tarea, clima de trabajo...). El aprendizaje de las ciencias es concebido, así, no como un simple cambio conceptual, sino como un cambio a la vez conceptual, metodológico y axiológico (Gallego y Pérez Miranda 1994) o, mejor, como **un proceso de investigación orientada** que permite a los alumnos participar en la (re)construcción de los conocimientos científicos (que habitualmente la enseñanza transmite ya elaborados), lo que favorece un aprendizaje más eficiente y significativo.

En definitiva, *la propuesta constructivista en el campo de la educación científica se concretan en un trabajo colectivo de investigación orientada, tan alejado del descubrimiento autónomo como de la transmisión de conocimientos ya elaborados* (Gil 1983, Millar y Driver 1987). Dicho con otras palabras: entre la metáfora del alumno como simple receptor y la que le asimila, siguiendo a Kelly, a un "investigador" autónomo (Pope y Gilbert 1983, Solomon 1994), proponemos la metáfora del "**investigador novel**" que integra coherentemente, además, las aportaciones de Vigotsky sobre la "zona de desarrollo potencial" y el papel del adulto en el aprendizaje (Howe 1996). Las situaciones problemáticas abiertas, el trabajo científico en equipo y la interacción entre los equipos se convierten así en tres elementos esenciales de una orientación que llegamos a denominar "constructivista radical" del aprendizaje de las ciencias (Gil 1993, Furió 1994).

Las estrategias didácticas han de terminar concretándose en una planificación de actividades y tareas para trabajar en el aula los contenidos de aprendizaje seleccionados. Esta cuestión será la que trataremos en el siguiente apartado.

3.2.4. *El programa de actividades como concreción de la nueva idea sobre el currículum en el aprendizaje como investigación orientada*

Como ya hemos indicado, la idea básica que subyace en el modelo de enseñanza como investigación es favorecer que los alumnos y alumnas puedan construir y afianzar los conocimientos al tiempo que se familiarizan con las características fundamentales de la metodología científica. Esto requiere que las actividades a realizar en clase estén bien diseñadas para evitar aprendizajes inconexos y procesos excesivamente erráticos. Por tanto, no puede pensarse en actividades sueltas ni en una completa improvisación, sino en un *verdadero programa de investigación* que pueda *orientar* y prever el trabajo de los estudiantes y proporcione a éstos un hilo conductor que dé sentido a su trabajo. Esto no quiere decir que este programa no sea flexible y abierto dependiendo de las circunstancias concretas del aula, sino que es necesario evitar la improvisación debida a una falta de preparación previa, que llevaría a no cubrir el contenido del tema objeto de estudio (Calatayud et al. 1988, Martínez-Torregrosa et al. 1993, Azcona et al. 1996).

Los programas-guía de actividades como aplicación del modelo constructivista de aprendizaje como investigación orientada ha sido ya definida hace algunos años por sus autores Furió y Gil (1978) como:

“La idea básica es que el desarrollo del tema ha de programarse a base de actividades a realizar por los alumnos, constituyendo lo que podríamos denominar un programa-guía. Con estas actividades se trata, en la medida de lo posible, de colocar a los alumnos en situación de producir conocimientos, de explorar alternativas, superando la mera asimilación de conocimientos ya elaborados”

Estos programas de actividades tienen una doble ventaja: por una parte, favorecen el trabajo colectivo de los estudiantes al tiempo que se detectan más fácilmente las dificultades que se les presentan al debatirlas, y por otra, permite realizar de una forma sencilla, la evaluación del programa de actividades ya que se puede constatar cuáles de éstas han dado el resultado esperado.

La utilización del programa de actividades se realiza en una clase estructurada en pequeños grupos de estudiantes que actúan como equipos de investigación que trabajan las actividades bajo la dirección del profesor. Esta estructura organizativa es coherente con las características de una investigación orientada: un trabajo de investigación en el que constantemente se cotejan los resultados de los distintos equipos y se cuenta con la inestimable ayuda de un experto. Son bien conocidos los argumentos en favor del trabajo en pequeños grupos como forma de incrementar el nivel de participación y la creatividad necesaria para abordar situaciones no familiares y abiertas (Ausubel 1978, Solomon 1987, Linn 1987, Burbules y Linn 1991, Robinson y Niaz 1991). Cada actividad será realizada dentro de estos pequeños grupos, favoreciendo la comunicación y dando a cada individuo una primera oportunidad de poner en cuestión sus ideas.

Así mismo, hay que tener en cuenta que el funcionamiento de estos grupos no es autónomo sino que es necesario fomentar de forma ordenada la interacción entre ellos, mediante la puesta en común de cada actividad, de manera que se puedan replantear, reformular o validar las soluciones dadas a las situaciones problemáticas planteadas.

Dentro de ciertos límites será necesario ejercer una cierta “presión” positiva para que el trabajo se realice con rapidez, evitando la dispersión y el aburrimiento. Así

mismo, no es necesario que todos los grupos hayan terminado antes de pasar a la puesta en común, ya que tan importante como elaborar una respuesta es que el alumnado tenga la posibilidad de asumir la actividad como propia y haya iniciado la discusión. La puesta en común ya ofrece la posibilidad de completar una discusión pendiente en algún grupo.

Es necesario resaltar que *no se trata de que los estudiantes construyan por sí solos todos los conocimientos científicos* que tanto tiempo y trabajo exigieron de los más importantes científicos, *sino de colocarles en una situación* en la que puedan familiarizarse con el trabajo científico y sus resultados, abordando problemas conocidos.

La orientación constructivista pretende reemplazar la idea del profesor que actúa como difusor del aprendizaje por la del profesor como *facilitador* del mismo. En ese sentido se puede utilizar la metáfora del director de un equipo de investigación para caracterizar las funciones del profesor, siendo la persona que dirige el trabajo colectivo de los estudiantes y quien orienta y matiza los resultados del trabajo realizado por los grupos. En cualquier caso, es necesario que el profesor, durante la puesta en común, juegue un papel activo, centrando las intervenciones de los grupos e interrumpiéndolas en un momento dado, con una reformulación globalizadora. Su papel no consiste en dar la respuesta correcta desde el principio sino en conducir el debate, haciendo reflexionar sobre detalles concretos y, en ocasiones, actuando como portavoz de la comunidad científica.

En este modelo constructivista el papel del profesor, como transmisor continuo de información, es sustituido por el de facilitador de aprendizaje, entendido como mediador entre la Ciencia y los estudiantes; de esta forma la tarea del profesor se orienta hacia una docencia como investigación. Esta orientación del proceso de enseñanza-aprendizaje hacia la investigación de situaciones problemáticas abiertas y de interés no sólo es consistente con las implicaciones de la Historia y Filosofía de la Ciencia, que anteriormente se ha indicado, sino que también es convergente con el papel de investigador en la acción que desde campos de la investigación y práctica pedagógicas como la teoría crítica de la enseñanza se vienen reclamando para el profesor desde hace tiempo (Cañal y Porlán 1987).

En definitiva, la idea central que preside la elaboración del programa de actividades, es el abordar cada unidad didáctica que conforma el programa de la asignatura, en forma de *situaciones problemáticas y/o exposiciones iniciales que permitan desarrollar un hilo conductor donde se integran tanto la introducción de conceptos, como la resolución de problemas y los trabajos experimentales*. El objetivo no es que los estudiantes construyan ideas espontáneas sobre el mundo sino que hagan suyas las teorías científicas bien constituidas, en un proceso creativo, realizando el programa de actividades de cada unidad didáctica con ayuda del profesor.

No podemos acabar la descripción del modelo de aprendizaje como investigación sin hacer referencia a una de las partes fundamentales del proceso de enseñanza-aprendizaje, como es el de la evaluación del mismo. Éste será el objeto de nuestro próximo apartado.

3.2.5. La evaluación en el aprendizaje como investigación orientada

Parece evidente que el modelo de aprendizaje como investigación quedaría incompleto si no va acompañado de un método de evaluación coherente con el mismo. Además, será necesario destacar las características más importantes de esta evaluación para poder aplicarlas al diseño y realización de la unidad didáctica del Campo Magnético Estacionario.

Por otro lado, los métodos de evaluación pueden afectar profundamente a las características de aprendizaje del alumnado, así como a la calidad y cantidad del mismo. En efecto, poco importan las innovaciones introducidas o los objetivos enunciados si la evaluación sigue consistiendo exclusivamente en ejercicios para constatar el grado de asimilación de algunos conceptos.

La propuesta de evaluación en el modelo de aprendizaje por investigación considera que el profesor, en su papel de director de “investigadores novatos”, ha de corresponsabilizarse de los logros alcanzados por los estudiantes, de forma que la pregunta deja de ser “quién merece una valoración positiva y quién no”, para convertirse en “qué ayudas precisa cada cual para seguir avanzando en el proceso de construcción del conocimiento”.

Para evitar equívocos, es conveniente aclarar que lo anterior no quiere decir que esta propuesta se alinea con posiciones “no evaluativas” o de defensa de una evaluación meramente “cualitativa”. Consideramos que estas propuestas generadas a partir de los años 70 (Parlett y Hamilton 1976), adolecen de falta de concreción en un modo efectivo de cómo evaluar, y constituyen una reacción ante el modelo de la época anterior, centrado en la medición y los resultados. Así pues, creemos que una situación de no evaluación afectaría no sólo a un aspecto esencial del ciclo del currículum, sino al proceso de aprendizaje en su conjunto.

Eliminar la evaluación significaría, para esta propuesta, tanto como eliminar las posibilidades reales de reorientar e impulsar el aprendizaje, al dejar a los estudiantes sin ocasiones para reconocer qué han aprendido y qué no.

Desde la concepción del aprendizaje como investigación, la función evaluadora debe orientarse a establecer las ayudas precisas para que cada estudiante siga avanzando en la construcción de los conocimientos. Precizando más la idea expuesta, las características del proceso evaluador deberían ser las siguientes (Alonso 1994):

1) Las situaciones de evaluación deben ayudar a los estudiantes en el conocimiento y regulación de sus procesos de avance. Se ha de fomentar las situaciones de “feed-back” entre los estudiantes y sus propios procesos que les permitan percibir su propio avance, así como sus deficiencias.

2) De acuerdo con el modelo de aprendizaje como investigación, la evaluación deberá comprender todos los aspectos (conceptual, epistemológico y actitudinal) que ese aprendizaje entraña, rompiendo con la habitual reducción a aquello que permite una medida fácil y rápida: la memorización repetitiva de los “conocimientos teóricos” y su aplicación igualmente repetitiva a ejercicios de lápiz y papel de mera aplicación.

3) Se ha de evaluar sobre criterios claros que hagan referencia a objetivos asumidos y a los contenidos (conceptuales, epistemológicos y actitudinales) trabajados.

4) Si aceptamos que la cuestión esencial es lograr que la mayoría sea capaz de hacer las cosas bien, será necesario que la evaluación se realice a lo largo de todo el proceso de aprendizaje, integrando las actividades evaluadoras en el mismo.

De acuerdo con el proceso de evaluación definido y con objeto de dar una idea precisa del método que utilizaremos en el diseño de la unidad didáctica, se expone a continuación sus características:

a) En la introducción de cada tema se da una idea de los objetivos y los aspectos conceptuales, metodológicos y actitudinales que se trabajarán.

b) Así mismo, en los comentarios para el profesor, se ordenarán los objetivos principales en una tabla con las posibles dificultades a superar.

c) Si se desea incidir positivamente en el proceso de aprendizaje para impulsarlo, es obvio que la utilización exclusiva de exámenes al final de amplios períodos no va a permitir incidir en dicho proceso de manera efectiva. Por lo tanto, se introducirán a lo largo de la unidad didáctica pequeños ejercicios (actividades especialmente diseñadas) que permitan ir controlando y orientando el proceso de modo ágil y operativo. Por supuesto que las pruebas globales de evaluación final del tema siguen teniendo sentido; en ellas se incluirán los objetivos más importantes que están definidos en la tabla antes mencionada.

d) Dentro de la diversidad de actividades de evaluación que se pueden diseñar, esta propuesta considera importante incidir en los siguientes tipos:

- Actividades que ponen el énfasis en el planteamiento cualitativo de un problema y que permiten que el alumnado exprese sus “ideas alternativas” dentro del proceso de resolución de problemas. Serían actividades de evaluación inicial que posteriormente permitirían a los estudiantes percibir sus avances y deficiencias en el proceso de aprendizaje.

- Actividades que se centran más en aspectos metodológicos como la descripción, ordenación y clasificación de observaciones, emisión de hipótesis, observación y análisis de los resultados, etc.

- Actividades centradas en aplicar un concepto ya trabajado en un contexto diferente, por ejemplo, de aplicación a la vida cotidiana de lo trabajado en el aula (aspectos de las relaciones Ciencia/Técnica/Sociedad). En estos casos también es necesario utilizar aspectos metodológicos como comunicación de resultados, interpretación de gráficas o tablas de datos o aplicación de situaciones límites.

Finalizamos aquí estas reflexiones sobre la evaluación, que nos han permitido un replanteamiento de su función y formas habituales, así como su integración coherente con el modelo de enseñanza-aprendizaje como investigación que venimos describiendo.

En definitiva, uno de los rasgos más distintivos del enfoque actual del *aprendizaje como investigación orientada* que aquí proponemos es su afán integrador de los diversos aspectos del aprendizaje y su orientación '*radicalmente constructivista*' (entendiendo por tal una orientación que contempla una participación activa de los estudiantes en la construcción de los conocimientos y no la simple reconstrucción personal de los conocimientos proporcionados, ya elaborados, por el profesor o el texto) fundamentada en las teorías y puntos de vista actuales en Filosofía, Historia y Epistemología de la Ciencia (Campanario 1999). Los autores que trabajamos desde esta perspectiva constructivista hemos consolidado una línea de investigación y práctica escolar sólida y fructífera (Vilches 1993, Alonso 1994, Romo 1998, Tarín 2000, Guisasola y Perez de Eulate 2001).

En consecuencia, de acuerdo con el modelo de enseñanza/aprendizaje como investigación orientada, cabe esperar deficiencias en la enseñanza habitual que justificarían los déficits asumidos en las hipótesis. En concreto, respecto al tema del Campo Magnético Estacionario, las deficiencias esperadas se ven en el apartado 3.2.6.

3.2.6. Deficiencias de la enseñanza habitual del Campo Magnético Estacionario

En función del análisis realizado en los apartados anteriores, podemos suponer que la enseñanza habitual presentará las siguientes deficiencias:

A) No se presentarán situaciones problemáticas que justifiquen la introducción de los nuevos conceptos, lo que se traduce en una “*visión operativista*”; en consecuencia, no habrá aproximaciones cualitativas, necesarias para poder entender aquellos conceptos como hipótesis ideadas para solucionar problemas. Así, la presentación habitual se fijará fundamentalmente en las leyes de la Ciencia, limitándose a presentar definiciones operativas y relaciones matemáticas donde se marginan aspectos tan necesarios como por ejemplo los problemas que dieron origen a estas leyes, o el modelo de concepción del mundo en que se basa (Solbes y Martín 1991).

B) No se realizará un análisis informal (más bien cualitativo) que ayude a precisar el problema que se quiere resolver y que ayude a que los estudiantes expliciten sus ideas sobre el mismo. Esta forma de actuación dará lugar a una “*visión simplista*” de acuerdo con la cual la enseñanza se sitúa en la transmisión verbal de los conocimientos científicos ya construidos y, por tanto, en esta visión bastaría con que el profesor presente una buena organización de los conocimientos científicos para que sean asimilados por los estudiantes. Por consiguiente el aprendizaje basado en esta visión no tendrá en cuenta, como se ha dicho antes, las ideas previas de los estudiantes, y se ignorará los avances procedentes en la Didáctica de las Ciencias.

C) No se familiarizará a los estudiantes con el uso de estrategias de resolución coincidentes con las de la metodología científica. Es decir, *no se fomentará un enfoque científico* de los problemas que permita trabajar procedimientos característicos del trabajo científico como emisión de hipótesis, elaboración de estrategias (diseño de experimentos, realización de los mismos, análisis detenido de los resultados, etc.).

D) No se considerará lo estudiado desde diferentes perspectivas, replanteando el estudio a diferentes niveles de complejidad como por ejemplo el nivel newtoniano y el nivel de la teoría de campo magnético, ley de Biot y Savart y ley de Ampère, etc., en el

caso del campo magnético. En particular, no se considerarán las implicaciones Ciencia/Técnica/Sociedad, dando una “*visión descontextualizada*” de la Ciencia

E) *No se fomentará la dimensión colectiva del trabajo científico*, de forma que los estudiantes, a través del trabajo en grupo o de la interacción con un experto, puedan disminuir el alto nivel de abstracción requerido por algunos de los conceptos del Campo Magnético Estacionario, desarrollando lo que Vygotsky llama “zona de desarrollo potencial”.

F) No se evaluará sobre criterios claros que hagan referencia a los objetivos asumidos, y que tengan en cuenta no sólo los contenidos conceptuales sino también los metodológicos y actitudinales, de forma que se rompa con la reducción habitual de medir únicamente la memorización repetitiva de los “conocimientos teóricos” y su aplicación igualmente repetitiva a ejercicios de “lápiz y papel”. Esto dará lugar a una “*visión reduccionista*” de la evaluación en la enseñanza, que se caracteriza por limitar la evaluación a la simple reproducción de hechos y leyes explicados en clase y a un tratamiento puramente operativo.

Finalizamos aquí esta segunda parte del trabajo en la que hemos presentado las dos hipótesis que hemos realizado como posibles soluciones al problema planteado, así como, las líneas maestras de su fundamentación epistemológica y didáctica. Se ha descrito el papel que desempeñan la Historia y la Filosofía de la Ciencia en el desarrollo de estrategias didácticas dentro del paradigma constructivista y, en particular, la ayuda que nos puede procurar a la hora de organizar y secuenciar los contenidos (conceptuales, procedimentales y actitudinales) en un programa del Campo Magnético Estacionario. También hemos mostrado que dichas hipótesis aparecen ligadas a un modelo de enseñanza-aprendizaje como investigación orientada que reúne una serie de características que son reclamadas, cada vez más, por la investigación en Didáctica de las Ciencias.

A partir de aquí, nos proponemos dedicar la segunda parte de este trabajo a la operativización de la primera hipótesis y a la presentación de los diseños realizados para contrastarla.