

Hacia una enseñanza de la epistemología de la física a través de sus instrumentos: una visión cognitiva



Luis Mauricio Rodríguez-Salazar¹, Carmen Patricia Rosas-Colín²

¹*CIECAS, Instituto Politécnico Nacional, Lauro Aguirre 120, Colonia Agricultura, CP 11360, México, D.F.*

²*Facultad de Psicología, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Universidad 3004, Coyoacán, Copilco Universidad, CP 04510, Ciudad de México.*

E-mail: luismauriciors@gmail.com

(Received 28 May 2016, accepted 2 October 2016)

Resumen

Con el fin de hacer una propuesta para la enseñanza de la epistemología de la física, se presenta desde el marco de la epistemología de la imaginación, una categorización de instrumentos en cuanto a su origen y uso como instrumentos científicos, herramientas metodológicas y desarrollos tecnológicos. La primera categoría, considera aquellos instrumentos que al ser creados, a su vez son creadores de nuevos fenómenos en ciencia. Una vez creado el instrumento, la teoría que le dio origen se estandariza mediante la precisión y calibración de tal o cual instrumento, es cuando los proponemos como herramientas metodológicas. Al ser llevados a la producción de bienes y servicios, los instrumentos adquieren la categoría de desarrollos tecnológicos. Se toma entonces dicha categorización para plantear la “familia” de instrumentos involucrados en el origen y desarrollo del electromagnetismo. Esta aproximación epistemológica, incluye los procesos cognitivos a nivel individual y psicosocial implicados en el trabajo experimental al momento del diseño, construcción, adaptación o modificación de nuevos instrumentos.

Palabras clave: Epistemología de la física, cognición, instrumentos científicos.

Abstract

In order to make a proposal for teaching epistemology of physics, this article presents from the framework of the epistemology of the imagination, a categorization of instruments regarding its origin and use as scientific instruments, methodological tools and technological developments. The first category, considers those instruments that when they are created, they create a new phenomenon in science. Once created the instrument, the theory that originated it is standardized by the accuracy and calibration of this or that instrument, which is when we propose them as methodological tools. To be brought to the production of goods and services, the instruments are categorized as technological developments. In this article, such categorization is taken to establish the "family" of instruments involved in the origin and development of electromagnetism. This epistemological approach includes cognitive processes at individual and psychosocial level implicated in experimental work at the moment of design, construction, adaptation or modification of new instruments.

Keywords: Epistemology of physics, cognition, scientific instruments.

PACS: 01.30.-y, 01.30.Ee, 01.30.Tt

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

En estas primeras décadas del siglo XXI, se ha fomentado con ahínco la tendencia que inició a finales de los 80 de considerar las aportaciones de la historia de la ciencia, la filosofía de la ciencia y la epistemología en la enseñanza de las ciencias en general y en forma particular en la enseñanza de la física; tanto para el diseño curricular, como para el diseño y elaboración de nuevas estrategias y materiales didácticos [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. Otros intentos en menor escala, han sido aquellos que plantean la importancia de incluir como contenido en los planes y programas de estudio, la

enseñanza de la epistemología de las ciencias, lo cual sobre todo va dirigido al nivel posgrado y a licenciaturas que forman profesorado [8, 9, 10]. En este sentido, en el terreno de la enseñanza de la física, varios autores han hecho notar que, abordar contenidos epistemológicos e históricos, es decir, cuestionamientos sobre la naturaleza y desarrollo del conocimiento científico y las implicaciones del trabajo científico, así como el planteamiento de estudios de caso de la historia de la física, pueden facilitar la comprensión y actitud del alumno sobre diferentes temáticas de la física [11, 12].

El presente trabajo, plantea el origen del aparato galvánico de Ørsted, como una alternativa no sólo para la enseñanza de la física y su historia a nivel superior, sino para reflexionar sobre la enseñanza de la epistemología de la física a través de sus instrumentos. En ello, se presenta el debate que generó un reporte de Ørsted en la comunidad científica en el primer cuarto del siglo XIX, en el que se vieron envueltos Biot, Ampère, Davy y Faraday, dando paso a una “familia” de instrumentos tanto materiales como matemáticos, que permitieron el surgimiento y establecimiento del electromagnetismo como nuevo fenómeno de la física, así como su estandarización y su producción como bien y servicio a través de posteriores herramientas metodológicas y desarrollos tecnológicos.

Lo que en este artículo se presenta entonces, es la síntesis de una línea de investigación que se ha venido realizando por poco más de una década, cuyo objetivo fundamental ha sido desarrollar una propuesta teórica propia: la epistemología de la imaginación, cuyo propósito ha sido dar cuenta del significado epistemológico de los instrumentos, no sólo considerando su uso, como comúnmente se hace, sino yendo en busca de su origen en cuanto a las acciones cognitivas y materiales a nivel individual y psicosocial, implicadas en su diseño y construcción, así como las operaciones mentales que involucra su desarrollo hasta su formalización y aceptación por la comunidad científica [13, 14, 15].

Con esta intención epistemológica, se planteó una clasificación de instrumentos bajo tres categorías: instrumentos científicos, herramientas metodológicas y desarrollos tecnológicos. Las dos últimas categorías responden al **uso** que se da a los instrumentos, mientras que la primera, responde al **origen** de dichos instrumentos. En este trabajo entonces, se toma un pasaje de la historia de la física como laboratorio para la experimentación epistemológica; esto, en el intento de dar cuenta de la génesis de un cambio teórico en ciencia, en este caso, del electromagnetismo, con base en el origen y desarrollo de una familia de instrumentos.

Ahora bien, qué entender por epistemología en general y particularmente por epistemología de la física. Comúnmente tanto en el ámbito de la enseñanza de la ciencia en general, como en el de la enseñanza de la física, los estudios sobre epistemología son abordados como las creencias que tienen tanto los profesores como los estudiantes sobre el conocimiento científico, sobre un contenido en particular o incluso sobre el aprendizaje mismo [4, 5, 17, 18, 19, 20, 21].

Nosotros no nos referimos a las creencias de profesores y estudiantes, sino a aquellos cuestionamientos que se hacen desde el ámbito de la epistemología y de la filosofía de la ciencia, lo cual también abordamos con profundidad en otro trabajo previo [22]. En este artículo se plantea un estudio epistemológico de linaje científico, es decir, una teoría científica del conocimiento científico, diferente a la tradición que considera la epistemología como rama de la filosofía, la cual el primer autor la ha considerado como una epistemología de ralea filosófica [16, 23]. Es en este marco en el que se plantea la propuesta de una epistemología de la física, con énfasis en los procesos cognitivos involucrados en

el origen y desarrollo simultáneo de nuevos conceptos en ciencia y de los instrumentos que les dan origen. En el transcurso del artículo, se irá aclarando el tipo de abordaje epistemológico del que se trata.

II. SOBRE LA EPISTEMOLOGÍA DE LA IMAGINACIÓN Y EL ESTUDIO DE LOS INSTRUMENTOS

Analizar el significado epistemológico de los instrumentos como tratado en una obra, no es lo mismo que hacer un comentario general e incluso aislado sobre ello, aunque tal comentario esté enmarcado en el contexto de una discusión sobre el tema. Esto último es el caso del comentario de Bachelard al que Albert Van Helden y Thomas L. Hankins hacen referencia en la introducción al volumen 9 de la revista *Osiris* [24]. Según dichos autores, Bachelard en dos de sus obras [25, 26] se refirió a los instrumentos como “teorías reificadas” (p.2). Algo similar sucede con el concepto de imaginación, que se puede remontar al siglo VIII a. C. con el contexto literario que le dio Homero, hasta el abordaje filosófico que le dieron Platón y Aristóteles; y antes de ellos Sófocles, Eurípides y Heródoto. La imaginación también ha sido analizada desde su papel en el pensamiento y el conocimiento [27, 28], lo cual ha sido abordado desde el punto de vista filosófico y psicológico.

En un estudio reciente se hizo un abordaje de la conceptualización de imaginación de autores clásicos como Descartes, Locke, Berkeley, Leibniz, Hume, Kant, Hegel, William James, Freud, y Bergson, entre otros [29]. En tal estudio, se planteó que estos autores clásicos han analizado de manera general el papel de la imaginación en el conocimiento. Incluso, en algunas de sus obras, se plantean diferentes tipos de relaciones, tales como: pensamiento racional e imaginación o imágenes y abstracción de ideas. De manera aún más puntual, se ha planteado la idea de esquemas de imaginación como mediadores entre los conceptos y el entendimiento [30]. No obstante, en ningún caso, los autores clásicos desarrollaron o propusieron el concepto de epistemología de la imaginación como tal.

Otro abordaje de la imaginación desde autores clásicos, lo presenta Claudia Jáuregui, quien editó el libro “Entre pensar y sentir: estudios sobre la imaginación en la filosofía moderna”, en el que varios autores hacen su propia interpretación del abordaje de la imaginación de Nicolás de Cusa, Descartes, Spinoza, Leibniz y Kant [31].

El papel de la imaginación en el pensamiento y el conocimiento ha sido tratado también por autores contemporáneos como Husserl, Cassirer, Jung, Bachelard y Piaget. De manera particular, se pueden citar los libros de Bachelard: “El aire y los sueños: ensayo sobre la imaginación del movimiento” y “El agua y los sueños: ensayo sobre la imaginación de la materia” [25, 26, 32, 33].

Estos ensayos de Bachelard no son tratados de epistemología de la imaginación, sino, como él mismo los

califica, son ensayos para una nueva psicología de la imagen: una psicología de la imaginación. Lo más cercano a un tratado de epistemología de la imaginación, son dos libros que comparten el mismo nombre pero desarrollan su conceptualización desde marcos diferentes. Se trata de las propuestas de “Filosofía de la Imaginación” de Lapoujade [34] y la de Coccia [35].

Para la epistemología de la imaginación, no se puede reducir la imaginación a un conjunto de imágenes, sino que plantea una “imaginación sin imágenes”, que para Bachelard no se trataría ya de imaginación, sino de “ensoñación” [32]. En cambio, para la epistemología de la imaginación, se considera la imaginación como un tipo particular de razonamiento, un razonamiento simbólico-imaginativo en donde los símbolos, son considerados pre-conceptos. Se propone entonces el estudio de un lenguaje pre-conceptual en el trabajo científico, en el que a favor de ideas nuevas, se abandonan los conceptos previos aceptados por la comunidad científica, así como su representación formal vigente.

Este tipo de razonamiento deriva de una experiencia simbólico-imaginativa del científico que innova. Se trata de una experiencia cognitiva que se vincula con el razonamiento práctico y el razonamiento formal; esto, bajo la propuesta de noción ampliada de experiencia que propone la epistemología de la imaginación y que se fundamenta en la síntesis de la propuesta epistemológica de Jean Piaget, tanto de su teoría psicogenética como de su epistemología genética [16]. Dicha noción ampliada de experiencia, toma en cuenta la experiencia práctica y la experiencia formal unidas a la experiencia simbólico-imaginativa.

Tradicionalmente, se ha considerado como experiencia, lo que la epistemología de la imaginación refiere como experiencia práctica, que al expresarlo de esta manera, da la impresión de ser una redundancia. De igual forma, hablar de razonamiento práctico puede parecer una aberración, es decir, un error grave del entendimiento o de la razón. Asimismo, puede parecer aberrante hablar de experiencia formal, y más aún de razonamiento y experiencia simbólico-imaginativa: razonar simbólicamente, no de manera formal ni práctica, sino mediante una experiencia evocada bajo simbolizaciones individuales de una realidad imaginada.

En este marco entonces, los instrumentos son considerados, en todo caso, “reificaciones de las acciones”, no “reificaciones de la teoría”; reificación de acciones cognitivas mediante las cuales el sujeto (el científico adulto en ejercicio en el que se interesó Piaget y fue motivo de su propuesta epistemológica), “busca” nuevas simetrías en los fenómenos de la naturaleza (invariancia ante las transformaciones), lo cual, según la epistemología de la imaginación, es el “origen” de los instrumentos entendidos como “extensiones” de las acciones cognitivas. Se prefiere el concepto de extensión, en el sentido filosófico de “corporeizar” o dar cuerpo a una idea u otra cosa no material, en este caso, corporeizar las abstracciones sobre los invariantes de los fenómenos. Esto es lo que marca la diferencia de analizar el origen de los instrumentos y el análisis de su uso, que es en lo que se centran la mayoría de

Al respecto, se pueden citar las obras de Robert J. Ackermann Thomas Crump y Davis Baird [36, 37, 38]. Por otra parte, dos buenas aproximaciones, sin que ello signifique que, a juicio propio, logren el objetivo de una propuesta epistemológica del origen de los instrumentos científicos, son los trabajos de Paolo Rossi “Los Filósofos y las Máquinas” [39] y el de Albert Van Helden “*The Birth of the Modern Scientific Instruments*” [40]. Por otra parte, otras dos referencias pero en este caso obligadas dada su cercanía al estudio sobre el origen de los instrumentos, sin llegar a una propuesta clara al respecto, son el citado volumen 9 de la revista *Osiris* [24], en el que todo el volumen está dedicado a los instrumentos científicos; y el libro *Instruments and Imagination* de Thomas L. Hankins y Robert J. Silverman, publicado al año siguiente [41]. Igualmente, se destacan estudios más recientes como los que Isaac Record reunió en el 2010 en un número especial de la publicación digital *Sptaneous Generations (a journal for the history and philosophy of science)* titulada: *Scientific Instruments: Knowledge, Practice and Culture* [42]. Y otro estudio que propone los instrumentos como productos de la cultura material de las prácticas científicas [43].

El presente artículo aborda el análisis epistemológico del “origen y uso” de los instrumentos materiales y los instrumentos matemáticos, ambos, desde la categorización que propone la epistemología de imaginación. Se trata del estudio cognitivo de la génesis de la teoría y de su desarrollo, es decir, de las estructuraciones cognitivas nuevas de la realidad, así como su estabilización, formalización y estandarización. En este proceso, juega un papel fundamental la representación simbólico-imaginativa de los invariantes de los fenómenos, los cuales pueden entenderse como un lenguaje pre-conceptual de los grupos de simetrías que conforman posteriormente la estructura de la teoría (lenguaje conceptual). Bajo este marco, la conceptualización de imaginación que se tiene, es la de esquemas simbólicos mediadores entre los fenómenos de la realidad y su estructuración conceptual (formalización y validación).

De acuerdo con su **uso**, la epistemología de la imaginación categoriza los instrumentos como herramientas metodológicas y como desarrollos tecnológicos. Las primeras, se entienden como aquellos instrumentos que habiendo mostrado su utilidad para el estudio de ciertos fenómenos, son utilizados cotidianamente en el laboratorio con fines de estandarización en el marco de la investigación y la docencia. Los desarrollos tecnológicos, son aquellos instrumentos que se utilizan en los laboratorios industriales como apoyo al proceso productivo. En cambio, considerando su **origen**, aquellos instrumentos que juegan algún papel en el desarrollo de una nueva teoría, más aún, aquellos que se originan en la propia génesis de una nueva teoría, la epistemología de la imaginación los categoriza como instrumentos científicos.

III. LA IMAGINACIÓN COMO EXPERIENCIA SIMBÓLICO-IMAGINATIVA EN ESPACIOS PSICOSOCIALES

La condición *sine qua non* para llevar a cabo un análisis del significado epistemológico de los instrumentos científicos, tanto de los instrumentos materiales como de los instrumentos matemáticos que diera cuenta del origen y naturaleza de los instrumentos como generadores de nuevo conocimiento científico, fue contar con una teoría epistemológica. La teoría que más correspondía con la hipótesis de trabajo era la teoría psicogenética del célebre pero mal conocido Jean William Fritz Piaget (1896-1980). Sin embargo, la teoría psicogenética de Piaget, por tratarse de una teoría general del conocimiento, es decir, una teoría acerca del origen del conocimiento en los sujetos cognoscentes, no aborda de manera específica el problema del origen del conocimiento científico. La teoría de Piaget que aborda el problema de la sociogénesis del conocimiento científico es la epistemología genética, sin embargo, para los objetivos de esta investigación, el problema fue que la epistemología genética no da cuenta del origen y naturaleza de los instrumentos creados y utilizados en el ámbito científico.

Se realizó entonces una síntesis de las dos grandes propuestas teóricas de Piaget: su teoría psicogenética del conocimiento en general y su teoría sociogenética del conocimiento científico en particular, mejor conocida como epistemología genética. Esta síntesis, que puede considerarse como una propuesta psico-socio-genética, fue llevada a un caso particular de la historia de la ciencia para analizar el trabajo de otro célebre y también mal conocido: *Johannis Christianus Ørsted*, nombre con el que firmó su trabajo publicado en latín el 21 de julio de 1820, y cuando él mismo tradujo al inglés dicho trabajo, lo firmó con el nombre de John Christian Oersted. Ahora, es mundialmente conocido como Hans Christian Ørsted, que es su nombre en danés. Su reporte científico publicado el 21 de julio de 1820 como facsímile, hizo célebre su nombre, sin embargo su trabajo experimental sigue siendo mal conocido. Por lo tanto, Ørsted, al igual que Piaget, es célebre pero mal conocido.

Paulatinamente, la síntesis basada en las dos propuestas epistemológicas de Piaget, al ser aplicada al análisis del trabajo experimental de Ørsted, de manera co-evolutiva se fue transformando en una propuesta epistemológica propia: la epistemología de la imaginación. Esta nueva propuesta epistemológica se considera de base psico-socio-genética ya que la génesis de una nueva teoría se da en un espacio que no es ni individual ni social, sino psicosocial, es decir, implica una coordinación interindividual en un lenguaje simbólico-imaginativo, un lenguaje pre-conceptual o de simbolizaciones no formalizadas y validadas aún, respecto a una realidad imaginada.

En este sentido, se propone el concepto piagetiano de “monólogo colectivo”, el cual, en el marco de la teoría psicogenética y respecto al proceso de socialización de los niños entre 2 y 4 años de edad, se trata de una forma de

coordinación tanto intra como interindividual en la que cada sujeto permanece centrado en sí mismo y no en el otro. Dicho de otra manera, ante una situación grupal (espacio psicosocial), cada niño coordina sus propias acciones cognitivas y materiales sin preocuparse de ser comprendido por el otro. El interlocutor funciona como incitante, es decir, el ser escuchado por otros es lo que estimula al sujeto, no en sí la interacción, por ello se refiere como monólogo, no como diálogo. Se trata de la expresión de pensamientos en voz alta de cada uno de los integrantes del grupo, incluso a veces hasta en forma simultánea, sin alternar respuestas.

La epistemología de la imaginación lleva este concepto al trabajo de científicos contemporáneos de cierta época. Siendo así, el origen de la nueva teoría “electro-magnética” planteada como una especie de monólogo colectivo, se refiere al grupo de científicos del siglo XIX interesados en el tema, que si bien estaban hablando de lo mismo, cada uno lo hacía desde un marco teórico distinto; unos desde teorías establecidas, mientras que otros trataban de establecer un nuevo marco teórico [16, 23]. Los primeros lo hacían mediante un lenguaje conceptual expresado en imágenes geométricas formalmente establecidas, mientras que los segundos, lo hacían expresándose en un lenguaje de representaciones simbólicas imaginadas: un lenguaje simbólico pre-conceptual, es decir, previo al lenguaje conceptual desarrollado por una teoría aceptada por la comunidad científica (formalizada y validada).

Con esta propuesta de epistemología de la imaginación, se analizaron dos décadas del trabajo experimental de Ørsted [44], así como el inicio de una serie de experimentos en el así llamado por la epistemología de la imaginación, espacio psicosocial, en el que se presume, tiene origen el cambio teórico en ciencia. Desde este marco entonces, el trabajo de Ørsted no sólo es el punto de referencia del cambio conceptual de la electrostática a la electrodinámica (su teoría del conflicto eléctrico); sino que con él, surge el electromagnetismo en términos de lenguaje pre-conceptual. En esta génesis, se destaca que Ørsted planteó que la electricidad se comportaba como si fuera un imán sin serlo, pero que tampoco seguía siendo electricidad como era conceptualizada en esa época.

Dicho de otra manera, Ørsted empezó a proponer simbolizaciones de una electricidad que ya no era la electricidad estática que conocían, que ahora se comportaba como si fuera un imán, pero que tampoco era el imán que ellos conocían. Epistemológicamente hablando, no se trataba de la simple unión del término de electricidad con el de magnetismo, que eran dos conceptos que en forma separada daban significado a dos fenómenos totalmente diferentes para la época. Para hablar del nuevo fenómeno “electro-magnético”, no se referían los fundamentos teóricos que sustentaban ambos fenómenos de forma separada, sino que, se planteaban representaciones de índole simbólico-imaginativo a los resultados experimentales obtenidos, buscando darle una estructura al comportamiento del nuevo fenómeno.

Tales representaciones, adquirieron un carácter colectivo mediante la coordinación cognitiva interindividual implicada

en las acciones experimentales evocadas mentalmente por otros sujetos (científicos) al momento de repetir el experimento de Ørsted (que aquí, se plantea como el experimento de partida). Se trata de una coordinación mediante la cual, se buscan nuevas posibilidades experimentales, que conllevaban la creación de nuevos instrumentos.

A continuación entonces, se presenta la “familia” de instrumentos materiales que se consideran producto de dicha coordinación interindividual que dieron origen a un nuevo fenómeno en física, el electromagnetismo. Posteriormente, se plantea la correspondencia entre los instrumentos materiales y los instrumentos matemáticos, como intentos de estructuración material y abstracta del fenómeno nuevo hasta su estabilización y posterior estandarización, estableciendo dicha correspondencia en las tres categorías de instrumentos propuesta en este artículo: instrumentos científicos, herramientas metodológicas y desarrollos tecnológicos.

La estructuración material corresponde al universo material, y la estructuración abstracta corresponde a lo que se ha denominado universo empírico de lo imaginado (el universo matemático), que se considera empírico porque el sujeto es capaz de actuar sobre sus propias abstracciones de la realidad. En tal sentido, a diferencia de la aproximación de cultura material de las prácticas científicas [43] que para el estudio de los instrumentos parte del supuesto de que materialidad genera materialidad, en el marco de la epistemología de la imaginación se propone que la materialidad genera abstracciones y que las abstracciones además de generar abstracciones de las abstracciones, generan también nueva materialidad. El artículo termina con una reflexión final a manera de conclusión, en la que se sugiere una primera aproximación a las implicaciones de esta propuesta epistemológica para la enseñanza de la física y de la epistemología de la física.

IV. LOS INSTRUMENTOS MATERIALES INVOLUCRADOS EN EL ORIGEN DEL ELECTROMAGNETISMO

Para ejemplificar la propuesta del cambio teórico en ciencia a través de la configuración imaginaria en el universo material, entendida la configuración como darle forma en la imaginación a la estructura de conjunto del nuevo fenómeno, se hace una breve descripción de los experimentos que suscitó el reporte de Ørsted del 21 de julio de 1820, basado en su teoría del conflicto eléctrico [45, 46]. Para hacer explícita su teoría del conflicto eléctrico, es decir, la teoría de la transmisión de la electricidad galvánica en forma ondulatoria al interior de los cuerpos, Ørsted utilizó un alambre metálico como medio transmisor, buscando la incandescencia en el alambre metálico generada por el conflicto eléctrico.

La configuración imaginaria de Ørsted fue que la incandescencia del alambre producida por el conflicto eléctrico debido a la resistencia del alambre a la transmisión

de la electricidad, produciría un efecto magnético. Con esto, él pensaba que la electricidad se podría transformar en magnetismo, lo cual iba en contra de lo socialmente aceptado, ya que desde Gilbert, dos siglos atrás, se consideraba que la electricidad y el magnetismo eran dos fenómenos totalmente diferentes.



FIGURA 1. Cierre del circuito galvánico sobre sí mismo [47].

Para lograr la incandescencia del alambre metálico, Ørsted creó sus propios aparatos galvánicos, los cuales eran variantes de la pila recién inventada por *Alessandro Volta*. Aun cuando no logró el efecto magnético mediante su incandescencia, el alambre metálico quedó integrado en el aparato galvánico, dando origen a un nuevo instrumento científico: un instrumento que producía un efecto completamente diferente al efecto producido por la pila voltaica. El nuevo instrumento era un aparato galvánico en el que el alambre metálico con el que realizó sus experimentos para lograr su incandescencia, quedó formando parte del dispositivo que cerraba su circuito externo sobre sí mismo, como se muestra en la Figura 1.

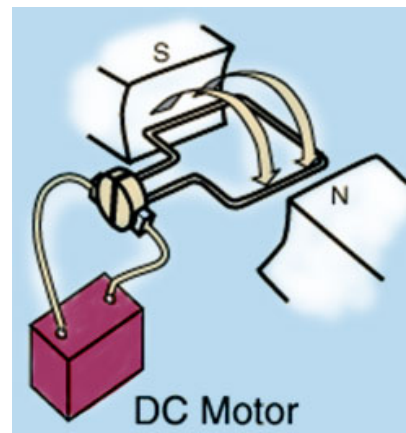


FIGURA 2. Representación esquemática del cierre del circuito galvánico sobre sí mismo como paso de la electrostática a la electrodinámica y su conversión en campo electromagnético [48].

El cierre del circuito sobre sí mismo se aprecia mejor en el esquema de la Figura 2, que en la Figura 3 se presenta su representación actual como desarrollo tecnológico. Este nuevo instrumento dio origen, por primera vez, a la creación artificial del fenómeno magnético producido por una corriente eléctrica, dando origen a su vez a dos grandes teorías: la teoría electrodinámica y la teoría del campo electromagnético. Sin embargo, hubo varios científicos que quisieron explicar el nuevo fenómeno en el marco de una teoría ya establecida, entre ellos *Jean Baptiste Biot*, que en ese entonces pertenecía a una comunidad científica guiada por normas institucionales socialmente aceptadas. Esto permite ejemplificar lo que la epistemología refiere como espacio psicosocial debido a un nuevo acontecimiento científico, en este caso, la creación artificial del fenómeno electromagnético producido por Ørsted.

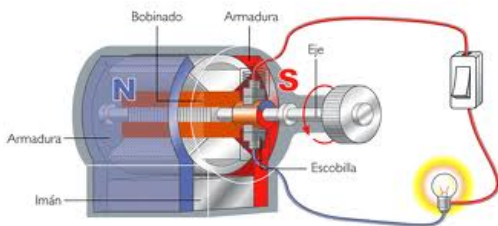


FIGURA 3. Representación actual del cierre del circuito galvánico sobre sí mismo en un motor eléctrico [49].

Se trata de una situación de debate teórico y experimental creada en un espacio entre el individuo y la sociedad, en este caso entre Ørsted y la comunidad científica de su tiempo; situación que aquí se ha venido refiriendo como el espacio psicosocial en el que se gesta un cambio teórico en la ciencia. Guiado por la norma social de su comunidad científica, Biot trató de explicar la electricidad producida por el nuevo aparato galvánico de Ørsted en el marco de la teoría electrostática aceptada por la comunidad científica de su tiempo, que explicaba el fenómeno producido por la pila voltaica.

En el marco de la teoría newtoniana de atracción y repulsión, que *Coulomb* aplicó a las fuerzas eléctrica y magnética, Biot utilizó el aparato galvánico de Ørsted para explicar el nuevo fenómeno magnético producido por la corriente eléctrica (el conflicto eléctrico como le llamaba Ørsted), describiéndolo como un efecto circular alrededor del alambre en forma revolutiva. De esta manera, el grupo de desplazamientos del alambre conductor alrededor de la aguja magnética, fue estructurado por Biot, de manera abstracta, como grupo de simetrías que lo llevaron a representar, desde el punto de vista geométrico, la fuerza revolutiva de atracciones y repulsiones entre la electricidad y el magnetismo como una estructura circular, como se muestra en la Figura 4.

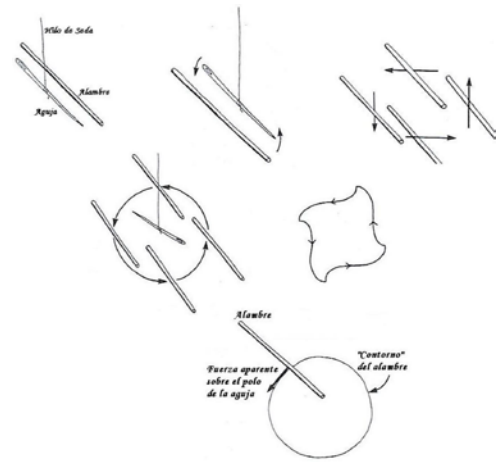


FIGURA 4. Representación de Biot del nuevo fenómeno magnético como fuerza revolutiva [50].

En cambio, la configuración imaginaria de Ørsted era la de un efecto circular en todo el espacio circunyacente al alambre, no sólo en su periferia, lo cual rompía con la conceptualización de la acción a distancia de la teoría newtoniana-laplaciana, que llevó a Biot a representarlo como una fuerza revolutiva. Para Ørsted en cambio, el efecto circular, dado que abarcaba todo el espacio circunyacente al alambre, su representación abstracta era la de una espiral, o vórtice, como también le llamó, en el que ya no se trataba de una interacción entre la electricidad y el magnetismo, sino de un fenómeno en el que la electricidad se comportaba como si fuera un imán.

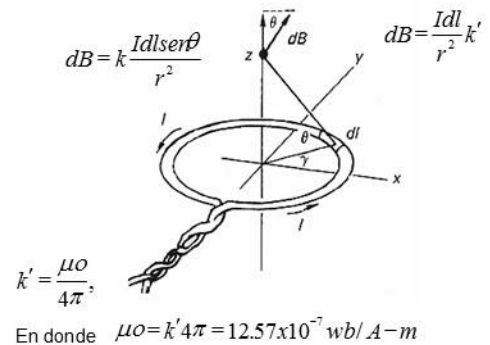


FIGURA 5. Representación de la ecuación de Biot-Savart en el marco de la teoría newtoniano-laplaciana [51].

Desde el punto de vista del análisis epistemológico que se propone en este artículo, tiene grandes repercusiones que tanto Biot como los miembros de la comunidad científica a la que pertenecía, hayan configurado una imagen del efecto alrededor del alambre en forma de círculo, conceptualándolo como una fuerza revolutiva, mientras que Ørsted lo conceptualaba como un vórtice en forma de espiral. Con la

matemática del momento, Biot propuso la formalización de la atracción y repulsión de dichas fuerzas en el marco de la matemática laplaciana. No es entonces trivial decir que la estructuración geométrica de la fuerza revolucionaria representada en forma de círculo, como se muestra en la Figura 4, facilitó la estructuración algebraica de las atracciones y repulsiones entre la electricidad y el magnetismo, como se muestra en la figura 5.

La conceptualización de Ørsted de un efecto en todo el espacio circunyacente al alambre sentó las bases para el posterior desarrollo de la teoría de campo. Se creó así un espacio psicosocial de coordinación interindividual por medio de un lenguaje simbólico, producido por la configuración imaginaria del nuevo fenómeno, derivada de los resultados obtenidos por los diversos miembros de la comunidad científica que llevaron a cabo el experimento de Ørsted bajo sus propios diseños experimentales, creando nuevas variedades de aparatos, en una especie de monólogo colectivo desde su propia configuración imaginaria del nuevo fenómeno.

En un trabajo reciente [23], también se abordó la ejemplificación de la configuración imaginaria del nuevo fenómeno en forma de monólogo colectivo, señalando que Ørsted en sus experimentos, utilizó un alambre de platino como conductor de la electricidad galvánica con el cual cerró sobre sí mismo el circuito del aparato, provocando el efecto magnético sobre una brújula. Biot en cambio sustituyó la aguja magnética suspendida sobre un pivote, que es como está construida la brújula, por una aguja magnética suspendida de un hilo de seda, lo cual le permitía mover el alambre a su alrededor, a fin de mostrar el efecto magnético producido por la electricidad galvánica. Por su parte Arago, mostró el efecto magnético de la electricidad galvánica utilizando limadura de hierro en lugar de una brújula o una aguja suspendida.

Por otra parte, el experimento de Davy era una ingeniosa mezcla de los experimentos de todos ellos, siendo a la vez completamente diferente. En su experimento suspendió no una, sino varias agujas de acero, las cuales, a diferencia de la utilizada por Biot, no estaban magnetizadas. Asimismo, en lugar de suspenderlas de un hilo de seda como lo hizo Biot, las suspendió de un fino hilo de plata, colocándolas en diferentes posiciones como se muestra en la Figura 6.

Con las agujas colocadas en diferentes posiciones en el alambre de plata, Davy cerró el circuito galvánico por medio del hilo de plata que contenían las agujas (como lo había hecho Ørsted con el alambre de platino) y colocó limadura de acero junto a las agujas. Su objetivo era comprobar el efecto magnético alrededor del alambre si la limadura de hierro se adhería a las agujas, como en el experimento de Arago. Finalmente, Davy cerró el circuito por un momento, para después abrirlo:

Todas ellas [las agujas] fueron magnetizadas: aquellas que estuvieron paralelas al alambre atrajeron la limadura de la misma manera que el alambre, pero aquellas que estaban en dirección transversal exhibieron cada una dos polos [...] Al cortar la corriente, todas las agujas de acero que estaban en el alambre en una dirección transversal retuvieron su

magnetismo, el cual fue tan poderoso como siempre, mientras que aquellas que estuvieron paralelas al alambre de plata parecieron perderlo al mismo tiempo que el alambre [...] la limadura de acero se orientó en línea recta siempre en ángulo recto al eje del alambre. Davy, 1821, pp. 9-10, citado por [50].

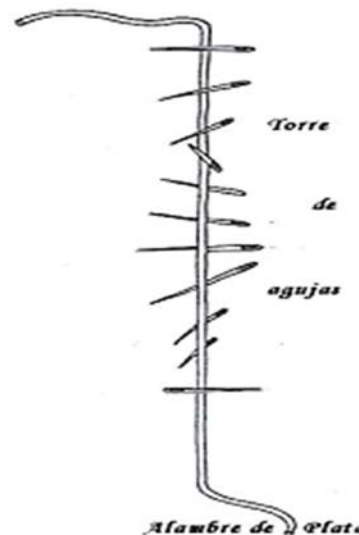


FIGURA 6. Representación de la Torre de agujas de Davy que muestra la mezcla de las acciones experimentales de Ørsted, Biot y Arago [50].

De acuerdo con la cita anterior, quiere decir que sólo las agujas que se colocaron transversalmente al eje del alambre se magnetizaron en forma permanente, mientras que las que fueron colocadas en forma paralela al alambre, sólo se magnetizaron durante el paso de la corriente, que a su vez produjo el alineamiento de la limadura de hierro. Con ésta base, Davy planteó un ingenioso experimento en el que comparó agujas magnetizadas electromagnéticamente, con agujas hechas de imanes ordinarios, suspendiendo de un hilo de seda ambos tipos de agujas, de modo que quedaran apuntando en direcciones diferentes. Con las agujas colocadas de ésta manera, como una torre de agujas, Davy ya no tuvo la necesidad de mover el alambre alrededor de las agujas, sino que lo colocó en forma perpendicular a la torre por la mitad de la misma (ver Figura 7), con el polo positivo del aparato a la derecha del observador, es decir, en el lado este.

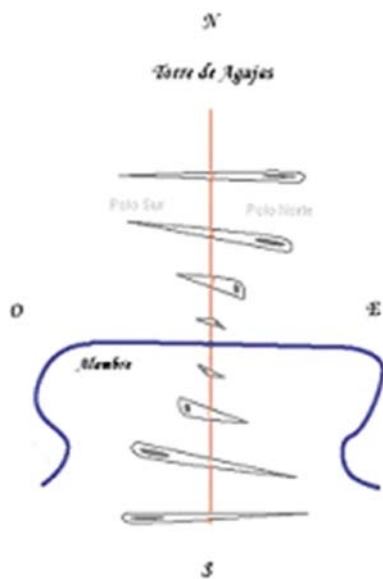
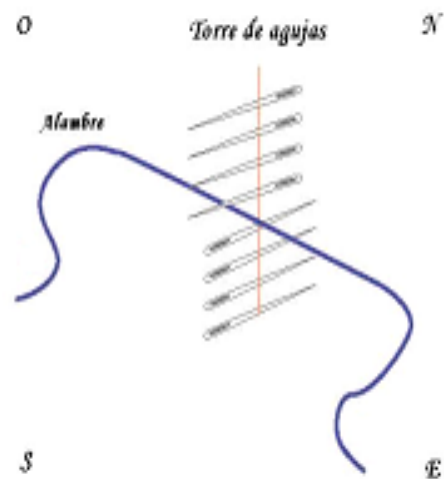


FIGURA 7. Torre de agujas de Davy en el que se suprime el movimiento del alambre conector [50].

El primer cambio de Davy fue eliminar el movimiento del alambre, dado que ya no fue necesario desplazar el alambre encima y debajo de la aguja magnética, como lo hicieron Ørsted y Biot. Lo que hizo fue colocar el alambre por el que circulaba la electricidad (que si bien Ørsted utilizó el nombre de corriente eléctrica no existía el concepto como tal) a la mitad de la torre, quedando agujas encima y debajo del alambre, mismo que permanecía fijo, como se muestra en la figura 7. Ahora lo que se movía eran las agujas (Figura 8), debido al nuevo efecto magnético producido por la electricidad:

Se encontró que todas las agujas que estaban colocadas debajo del alambre (el extremo positivo de la batería estando en el este) tuvieron sus polos norte sobre el lado sur del alambre, y sus polos sur sobre el lado norte; y que las colocadas encima tuvieron sus polos sur volteados al sur, y sus polos norte volteados al norte (p. 50), [50].

El gran valor epistemológico del experimento de Davy es que el comportamiento de las agujas ya no dependía del comportamiento del experimentador: ya no dependía del desplazamiento del alambre alrededor de las agujas. En el marco de la epistemología de la imaginación, las acciones intelectuales y motrices de desplazamiento del alambre alrededor de la aguja magnética, fueron prolongadas en el pensamiento como acciones evocadas. De esta manera, al dejar fijo el alambre, Davy experimentó en la imaginación el comportamiento que tendrían las agujas, tanto las que se encontraban en la parte superior como las que se encontraban en la parte inferior (ver figura 8)



FIGUR 8 Torre de Davy con cambio de orientación de las agujas en un solo movimiento.

Para Gooding [50] siguiendo a Ian Hacking [52], el experimento tiene vida propia, mientras que para Baird [38], lo que tiene vida propia es el instrumento. Davis Baird cuando se refiere a los instrumentos como *Working Knowledge*, señala que el conocimiento queda contenido en los instrumentos, por lo tanto actúan por sí mismos. En el marco de la epistemología de la imaginación, lo que queda contenido en los instrumentos son las acciones cognitivas y motrices, por eso dan la apariencia de que actúan por sí mismos como si los instrumentos tuvieran vida propia. El problema epistemológico radica en que, en un primer momento, en el marco del trabajo experimental, las acciones del experimentador y los fenómenos a los que dan origen, tienen la misma estructura. Sin embargo, al quedar contenidas en los instrumentos las acciones cognitivas y motrices, los instrumentos adquieren un valor epistemológico, ya que ahora, al actuar sobre los instrumentos, se actúa sobre los fenómenos para hacerlos cognoscibles.

Se creó así una situación psicosocial basada en un lenguaje experimental de representaciones simbólicas del nuevo fenómeno electromagnético, el cual, necesitó varios años para convertirse en el concepto de campo electromagnético en el marco de una teoría socialmente aceptada. Para la epistemología de la imaginación, no se trata de una teoría que refuta a otra como se señala desde otros marcos, sino de la convivencia entre una teoría que gozaba de la aceptación social y un espacio psicosocial en el que se gestaba una nueva teoría. La convivencia de la teoría de la fuerza reactiva y la gestación de la teoría del campo electromagnético se aprecia cuando Davy y Faraday colocaron varias agujas sin magnetizar alrededor de un círculo de cartón, con el alambre conector colocado en el centro de dicho círculo (Figura 9a). Sin embargo, Davy y Faraday también realizaron experimentos en los que actuaron sobre todo el espacio circunyacente al alambre, como se muestra en la Figura 9b.

La enseñanza de la epistemología de la física a través de sus instrumentos entre la electricidad y magnetismo, y del instrumento científico que lo hizo posible [53].

Antes de la materialización del aparato de rotación electromagnética, su configuración imaginaria fue confeccionada en trazos, bocetos y diagramas, como se muestra en la figura 11. Bajo este planteamiento, la configuración imaginaria de realidades posibles no es un proceso de iluminación repentina, como algunos divulgadores de la ciencia suelen manejarlo, sino la anticipación a una realidad hasta entonces inexistente. En la figura 12 se muestra una ingeniosa representación actual de este fenómeno, utilizando materiales tan simples como una pila común, un imán un tornillo y un pedazo de alambre de cobre¹.

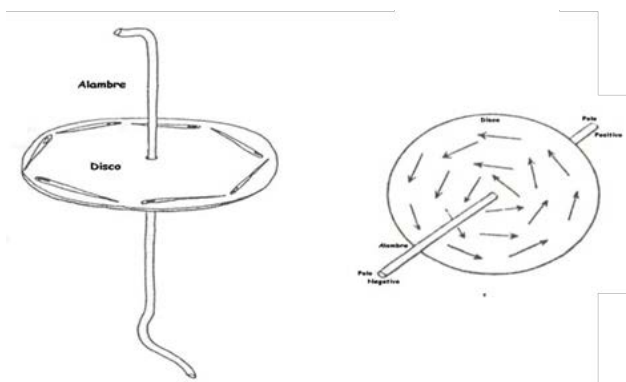


FIGURA 9 Fenómeno electromagnético: (a) como efecto en el contorno circular y (b) como efecto en el espacio circunyacente al alambre.

Con este experimento se sentaron las bases para el desarrollo, medio siglo después, de una nueva teoría: la teoría del campo electromagnético. En tal lapso, los experimentos de Faraday sobre las líneas de fuerza –un excelente ejemplo de configuración imaginaria de una realidad hasta entonces insospechada–, jugaron un papel fundamental. Fue así que, con la construcción de un nuevo aparato, se pasó del fenómeno electromagnético al fenómeno de rotación mutua entre la electricidad y el magnetismo. No es una redundancia decir que el aparato de rotación electromagnética dio origen al fenómeno de rotación electromagnética, (Figura 10), que los autores presentamos como otro ejemplo de la creación simultánea de un nuevo instrumento y un nuevo fenómeno en ciencia.

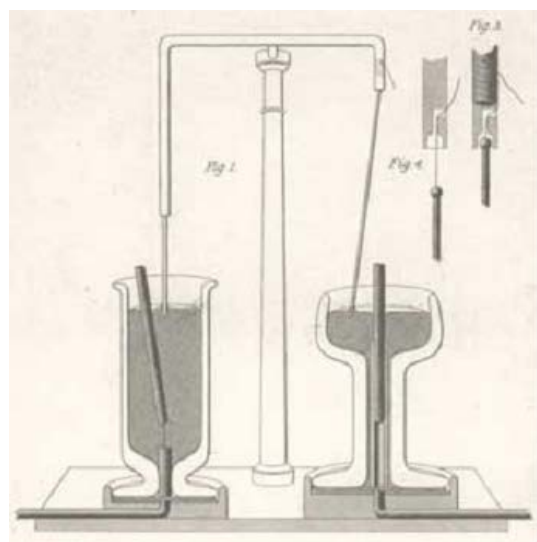


FIGURA 10. Aparato de Rotación electromagnética de Faraday que muestra el origen simultáneo del fenómeno de rotación mutua

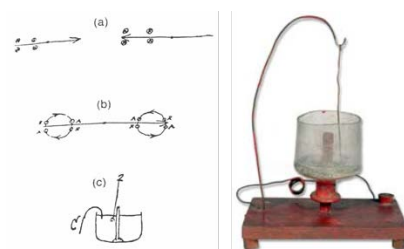


FIGURA 11. Confección y materialización de una configuración imaginaria representada en trazos, bocetos y diagramas previos a la construcción del aparato de rotación electromagnética de Faraday [50, 53].

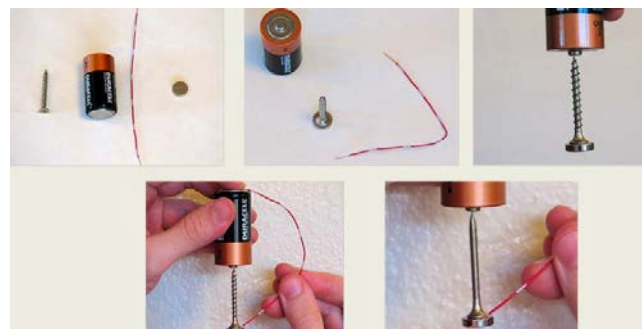


FIGURA 12. Representación actual del Aparato de Rotación electromagnética de Faraday, en el que al cerrar el circuito el tornillo gira como si se estuviera atornillando [54].

Respecto a los instrumentos materiales, en una fecha muy próxima a los experimentos realizados por Faraday, el físico-matemático Peter Barlow (1776-1862) creó un instrumento en el que una rueda de cargas electrostáticas, al ponerse en

¹ La rotación puede ser apreciada con toda claridad en el video que aparece en el sitio web de donde fue tomado el ejemplo (Windell, 2006), en donde además se hace una descripción detallada de los sencillos pasos a seguir para elaborar el dispositivo que en este artículo sirve para ejemplificar la creación de un nuevo instrumento científico.

movimiento producía el efecto magnético y el de rotación electromagnética. Dicho instrumento es conocido como Rueda de Barlow (lado izquierdo de la figura 13), que al igual que el aparato de rotación electromagnética de Faraday son considerados comúnmente como motores eléctricos. En cambio, de acuerdo con la categorización de instrumentos de la epistemología de la imaginación, son herramientas metodológicas que sirvieron para estabilizar el nuevo fenómeno de manera previa a su representación socialmente aceptada. Igualmente en un espacio psicosocial, fue que se desarrolló un aparato precursor a los primeros prototipos de los motores eléctricos, el cual era una combinación de la rueda de Barlow y el aparato de rotación electromagnética de Faraday. En ese ingenioso instrumento, el aparato de rotación electromagnética ponía a rotar la rueda de Barlow, como se muestra en el lado derecho de la figura 13.



FIGURA 13. Representación de nuestra interpretación de la materialización de la configuración imaginaria en espacios psicosociales. Izquierda: Rueda de Barlow. Derecha: Combinación del Aparato de Faraday y la Rueda de Barlow [53].

En la historia de la ciencia hay evidencia de una gran variedad de configuraciones imaginarias, materializadas en muy diversos instrumentos, entre los que destacan los del fabricante de instrumentos convertido en filósofo de la naturaleza William Sturgeon (1783-1850), así como una pléyade de instrumentos de la Compañía Benjamin Pike & Sons, fundada por el físico-óptico Benjamin Pike padre. De sus hijos destacó Benjamin Pike Jr. (1809-1864), quien se dedicó a la fabricación de los llamados instrumentos filosóficos, instrumentos utilizados por los filósofos de la naturaleza. Asimismo, se dedicó a la fabricación de microscopios y telescopios [55].

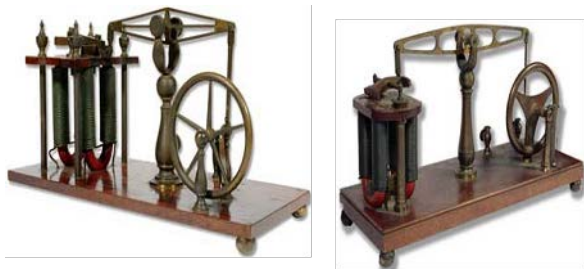


FIGURA 14. Máquinas electromagnéticas: Izquierda: Máquina

electromagnética de Daniel Devis. Derecha: Máquina electromagnética de Charles Pages [53].

Otros fabricantes de instrumentos de la primera mitad del siglo XIX son Daniel Davis, William Ritche y Charles Page. El despliegue hacia el exterior de sus configuraciones imaginarias se puede apreciar en los instrumentos en los que se integra el principio de rotación electromagnética de Faraday, la rueda de Barlow y el prototipo del motor electromagnético de Sturgeon, como se muestra en la figura 14. No importa el grado de complejidad que vayan adquiriendo las configuraciones imaginarias de nuevos instrumentos, siempre están confeccionados en los diagramas que a su vez guían su construcción, como se muestra en la figura 15.

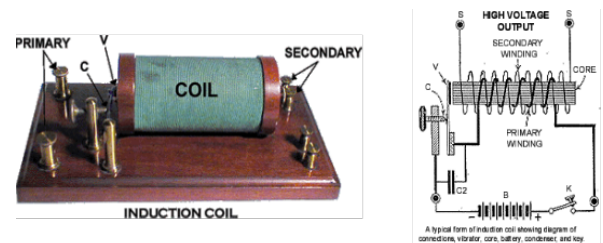


FIGURA 15. Representación de nuestra propuesta de la confección y materialización de la configuración imaginaria de un motor eléctrico, producto de la coordinación de los tres conjuntos de estructuras cognitivas del sujeto [53].

Tal vez resulte difícil, de acuerdo a la categorización de instrumentos presentada en este artículo, conceptuar la diferencia entre un instrumento científico y una herramienta metodológica, entendidos, respectivamente, como el paso de un nuevo instrumento que dio origen a un nuevo fenómeno en ciencia, a su estabilización conceptual como nuevo fenómeno. Lo que no es difícil es la conceptualización de los instrumentos materiales como desarrollos tecnológicos, como es el caso de los actuales motores eléctricos, que en el marco de una epistemología de la imaginación se considera que antes de la materialización de cada una de sus piezas y su integración total (Figura 16), hay una configuración imaginaria de las mismas y una confección diagramática previa a su construcción.

No es entonces una mera analogía conceptuar la estructura algebraica con la que se representan los motores eléctricos ($P=V \cdot I$) como desarrollo tecnológico, como se muestra en la figura 17. La conceptualización de las estructuras algebraicas en tanto instrumentos matemáticos considerados al igual que los instrumentos materiales como desarrollos tecnológicos, más allá de su mera analogía, se puede establecer con la correspondencia entre los componentes del motor eléctrico (Figura 18) y la correspondiente estructura algebraica de cada uno de ellos (Figura 19), que es lo que permite conceptualarlos como instrumentos matemáticos. En el marco de la epistemología de la imaginación entonces, tanto el motor eléctrico que se diseña y construye para darle diferentes usos, así como su correspondiente estructuración

algebraica, son conceptualizados en la categoría de desarrollos tecnológicos, que tienen lugar tanto en el universo material como en el universo empírico de lo imaginado respectivamente.

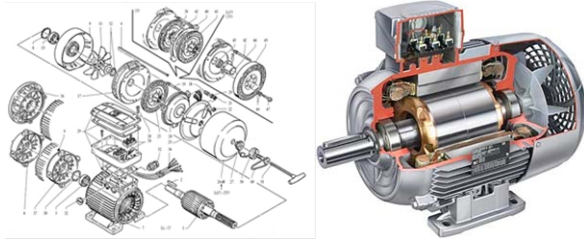


FIGURA 16. Motores eléctricos como desarrollos tecnológicos, desde su configuración imaginaria y su confección diagramática, hasta la materialización de sus piezas y su integración general [56, 57].



FIGURA 17. Instrumentos matemáticos como desarrollos tecnológicos, en analogía con los Instrumentos Materiales. Esto queda representado con las estructuras algebraicas sobre un motor eléctrico [58].

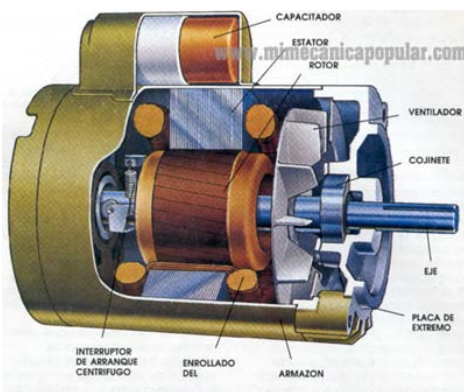


FIGURA 18. Instrumento material como desarrollo tecnológico [58].

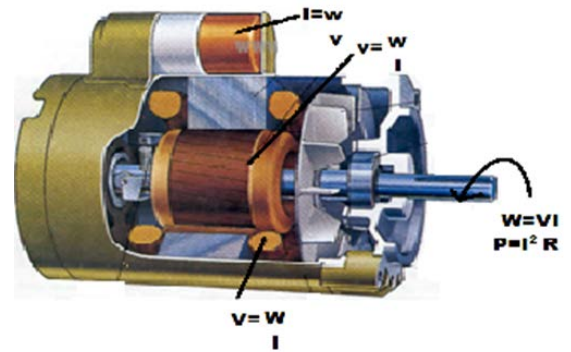


FIGURA 19. Instrumento matemático como desarrollo tecnológico [58].

V. UNIVERSO MATERIAL Y UNIVERSO EMPÍRICO DE LO IMAGINADO

En la propuesta de una epistemología de la imaginación no se prescinde de la experiencia; se amplía la noción de experiencia al universo de las estructuras algebraicas, planteado como una experiencia en el universo empírico de lo imaginado utilizando instrumentos matemáticos. Bajo este planteamiento epistemológico general, la diferencia fundamental entre los instrumentos materiales y los matemáticos es que cada uno ocupa espacios en realidades diferentes. Como instrumentos materiales, el *versorium* de Gilbert y la aguja magnética de Ørsted son muy similares en su forma: agujas montadas sobre un pivote (ver figura 20).



FIGURA 20. Antecesores del electrómetro y el galvanómetro. Izquierda: Versorium de Gilbert. Derecha: Aguja magnética de Ørsted [53].

Sin embargo, su función es completamente diferente: la aguja de Gilbert detectaba la electricidad estática, mientras que la aguja de Ørsted detectaba el magnetismo producido por la electricidad en movimiento, movimiento al cual le dio el nombre de conflicto eléctrico. Por lo tanto, se puede decir que la aguja de Ørsted también detectaba la electricidad, pero no la electricidad estática, sino la electricidad dinámica, como establecería posteriormente Ampère con el ahora llamado amperímetro. En cuanto a los instrumentos matemáticos, la misma similitud se presenta en las ecuaciones de Coulomb (ver figura 21), expresiones algebraicas del comportamiento de la electricidad estática y el magnetismo.

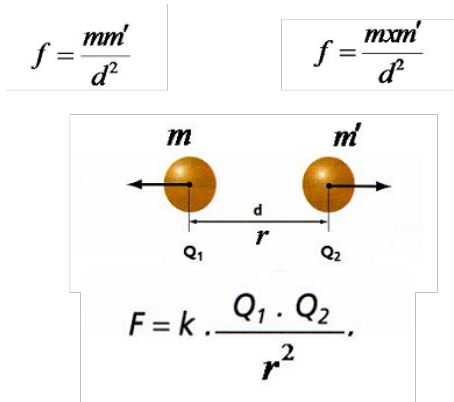


FIGURA 21. Analogía de un instrumento matemático con un instrumento material [51, 59].

En el marco de la epistemología de la imaginación, el *versorium* es el ancestro del electrómetro en tanto instrumento de medición de la electricidad estática. En cuanto a los instrumentos matemáticos, la ecuación desarrollada por Jean Baptiste Biot y Felix Savart representa una estructuración algebraica análoga al electrómetro (figura 22). En cambio, la brújula de Ørsted y el galvanómetro (ver figura 23), técnicamente hablando, son el mismo instrumento, pero en el marco del experimento tenían funciones diferentes.

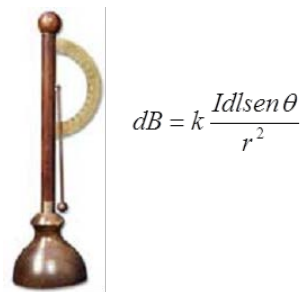


FIGURA 22. Representación de nuestra propuesta de la unión de un instrumento material y un instrumento matemático: Electrómetro y Ley de Biot-Savart. [51, 53].

Un gran debate epistemológico puede ser desarrollado en torno a estos dos instrumentos, ya que operaban bajo el mismo principio; una aguja magnética montada sobre un pivote, pero su función era diferente. Para Ørsted la aguja detectaba el magnetismo producido en el espacio circunyacente al alambre, producido por la circulación de la electricidad galvánica en su interior, lo que Ørsted llamaba conflicto eléctrico. Por lo tanto, para Ørsted la aguja se movía por el efecto magnético producido por el conflicto eléctrico: era una brújula. En cambio, para Ampère la aguja se movía por el efecto de la corriente eléctrica que circulaba

en el circuito cerrado de corriente. Por medir la cantidad de electricidad galvánica se le dio el nombre de galvanómetro, sin embargo, por haber sido Ampère el que lo propuso se le dio el nombre de amperímetro.

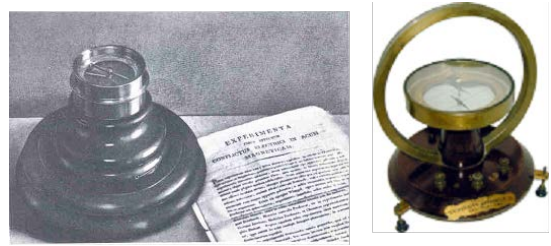


FIGURA 23 Brújula de Ørsted y Galvanómetros. Debate epistemológico en torno al mismo instrumento en el marco de dos teorías diferentes. [47, 53].

Bajo este marco, se suscitó un debate teórico entre Ampère y Ørsted en torno al magnetismo terrestre, debate vigente hasta la fecha ¿El movimiento de la aguja de la brújula lo produce el gran imán que hay en el polo norte?, o bien, como en la rueda de Barlow, el magnetismo es generado por el movimiento de las cargas alrededor del ecuador. De esta manera, una vertiente del debate epistemológico se debe a que para Ampère el efecto de cualquier imán es por el movimiento de cargas eléctricas en su interior, como si fueran pequeños aparatos galvánicos, o bien, si son metales magnetizados. La otra vertiente tiene que ver con un problema epistemológico con gran repercusión filosófica desde los años setenta del siglo pasado y que perdura hasta la fecha: el problema de la inconmensurabilidad de las teorías. En una especie de paradoja, el galvanómetro y la brújula, que como se acaba de mencionar, técnicamente son el mismo instrumento, realizan la medición de dos teorías diferentes: la teoría electrodinámica y la teoría electromagnética. El problema de la inconmensurabilidad de las teorías se ve desdibujado en el caso de los instrumentos matemáticos: la Ley de Coulomb, la Ley de Lorentz la Ley de Biot-Savart, la Ley de Ampère y la Ley de Ampère-Maxwell integradas en la teoría del campo electromagnético. Se trata de la propuesta de las estructuras algebraicas como instrumentos científicos, como herramientas metodológicas y como desarrollos tecnológicos, como se verá enseguida.

La estructuración algebraica de Coulomb de las cargas eléctricas y magnéticas, conocidas como ecuaciones de Coulomb o Ley de Coulomb, son considerados instrumentos matemáticos por tratarse del desarrollo co-evolutivo de la formalización de ambos fenómenos y su expresión como ley. Basado en las ecuaciones de Coulomb, el físico alemán Hendrik Antoon Lorentz desarrolló una estructura algebraica que representaba su interacción en un campo electromagnético. Para ilustrar la propuesta de una epistemología de la imaginación con los entes matemáticos como instrumentos científicos en el universo empírico de lo imaginado, no con fines de un análisis desde la física o la

matemática, se hace una muy breve descripción de este episodio de la historia de la ciencia.

Como actualmente se sabe, una carga en movimiento crea a su alrededor un campo magnético, de manera tal que cualquier carga eléctrica que se mueva en dicho campo experimenta una fuerza. La fuerza que experimenta la partícula cargada eléctricamente será la suma de la fuerza eléctrica y la fuerza magnética (ver figura 24a). Bajo el presente análisis epistemológico, la experiencia en el universo imaginado utilizando instrumentos matemáticos, se considera empírica ya que dichos instrumentos no sólo pueden ser manipulados, sino que también puede ser transformada su estructura dando origen a un nuevo instrumento matemático.

$$(a) \quad F_t = F_e + F_m$$

$$(b) \quad \text{donde} \quad F_e = \frac{q'q}{r^2} \quad \text{y} \quad F_e = Lq \quad \text{siendo} \quad E = \dots$$

$$(c) \quad F_m = \frac{mm'}{r^2} \quad F_m = Bm' \quad \text{siendo} \quad B = \frac{m}{r^2}$$

Así la primera ecuación queda:

$$(d) \quad \vec{F}_t = q \vec{E} + qvB$$

FIGURA 24. Ecuación de Coulomb llevadas por Lorentz al campo electromagnético [51].

De esta manera, Lorentz diseñó un experimento matemático en el que colocó una carga al interior de un campo electromagnético para analizar su comportamiento. Al igual que con los instrumentos materiales en tanto instrumentos científicos, en los que el diseño experimental estaba implícito, Lorentz diseñó instrumentos matemáticos para llevar a cabo su experimento de colocar una carga al interior de un campo electromagnético. Partiendo de la ecuación de Coulomb de las cargas eléctricas, Lorentz desarrolla la estructura algebraica para medir la intensidad de un campo eléctrico (ver figura 24b).

Asimismo, partiendo de la ecuación de Coulomb de las masas magnéticas desarrolla la estructura algebraica para medir la intensidad de un campo magnético dentro del cual se mueven las cargas (figura 24c). Así, se podía indicar la posición de una partícula cargada sometida a la acción de un campo electromagnético. La ecuación reestructurada se muestra en la figura 24 (d). En el marco de la categorización que se planteó al inicio de este artículo, se trata de un instrumento matemático considerado como instrumento científico, ya que en la estructuración misma de la ecuación, se estructuraba algebraicamente el comportamiento de una carga eléctrica en un campo electromagnético.

La enseñanza de la epistemología de la física a través de sus instrumentos

Como cualquier matemático lo puede apreciar, no se trata de la descripción del proceso de estructuración algebraica en la transformación de una ecuación en otra. El objetivo epistemológico es presentar las estructuras algebraicas como instrumentos científicos, que tanto los físicos como los matemáticos pueden manipular para transformarlas. Desde el punto de vista epistemológico, al manipular estos instrumentos matemáticos lo que se está manipulando son las estructuras cognitivas para estructurar algebraicamente los fenómenos de la realidad exterior.

Por lo tanto, para presentar las estructuras algebraicas como instrumentos científicos manipulables en el universo empírico de lo imaginado, así como para mostrar la conmensurabilidad de las teorías, se muestra la estructura algebraica de la figura 25. Esta ecuación, según Francisco Hernández “es frecuentemente denominada como ley de Ampère pero debe ser atribuida a los franceses mencionados (Biot y Savart) que la propusieron en el año de 1820” (p.105), [51]

Es así que, la ecuación de Biot-Savart, en el marco de la epistemología de la imaginación, es una herramienta metodológica para la teoría newtoniano-laplaciana, llevada al campo electromagnético reestructurada, como se indica en la segunda y tercera estructura algebraica mostrada en la figura 25. Para finalizar, con fines ilustrativos la propuesta de una epistemología de la imaginación, como se ha venido mencionando, se señala que Maxwell transformó la Ley de Ampère para llevarla al campo electromagnético (ver figura 25). Posteriormente, desarrolló la ecuación conocida como Ley de Ampère-Maxwell o ley de Ampère generalizada (última estructura algebraica de la figura 25), como parte del conjunto de ecuaciones de alto grado de complejidad que todo matemático conoce. No se trata entonces solo de necesitar una mente brillante como la de Maxwell, sin restarle mérito a su brillantez, para que se creara la estructuración matemática del campo electromagnético, sino que se requerían todas las aportaciones previas.

Existe la idea generalizada de que, dado que Faraday no sabía matemáticas, no pudo llegar a la estructuración algebraica de su propuesta de campo electromagnético. No obstante, como se puede observar, tanto Biot como Ampère sabían matemáticas, sin embargo, lo que queda claro para la epistemología de la imaginación, es que ninguno de los dos podría hacer una estructuración matemática de lo que no existe, ya que ninguno de los dos concibió el efecto circular alrededor del alambre como un efecto de campo. Lo que sí aportaron, fueron los instrumentos matemáticos, considerados como herramientas metodológicas de la estabilización de las teorías de Newton y Laplace llevadas a un nuevo fenómeno, las cuales, posteriormente se conjuntaron, no en un eclecticismo de teorías, como se diría en las ciencias sociales, sino en una estructuración matemática integrada de la teoría general del campo electromagnético.

$$\vec{F}_t = q \vec{E} + qv\vec{B}$$

$$B = \mu_0 \frac{I}{2\pi r}$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint_c \frac{d\vec{l} \times \vec{R}}{R^3}$$

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \iint_S \vec{J} \cdot d\vec{S} = I_{enc}$$

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \iint_S \vec{J} \cdot d\vec{S} + \frac{d}{dt} \iint_S \vec{D} \cdot d\vec{S}$$

FIGURA 25 Ecuación de Coulomb, Biot Savart, Ampere y Ampere Maxwell llevadas al campo electromagnético. [51, 60].

En la figura 26, se muestra la integración de la teoría electrodinámica con la teoría del campo electromagnético (lado izquierdo de la figura), así como su estructuración matemática en expresión vectorial, la cual tiene su correspondencia con la estructura algebraica del campo electromagnético que se mostró en la figura 25. Finalmente, en la figura 27, se muestra el motor eléctrico y una fuente de recarga electromagnética, ya como desarrollos tecnológicos integrados en un automóvil, un modelo de taxi eléctrico. De esta manera, bajo este análisis epistemológico, se puede decir que detrás de los taxis eléctricos que están iniciando a circular en la Ciudad de México (ver fig. 27), está toda la historia del origen y desarrollo de la teoría electrodinámica y la teoría electromagnética, expresadas ambas en instrumentos materiales e instrumentos matemáticos.

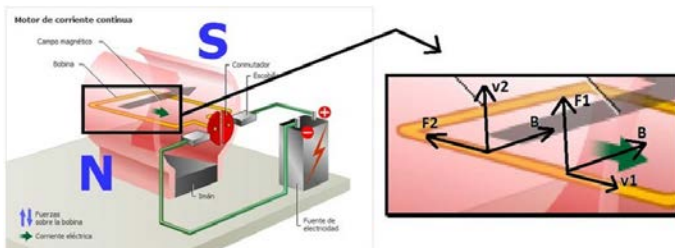


FIGURA 26. De la electrodinámica al campo electromagnético y su representación vectorial. Ejemplificación de la representación material de las ecuaciones de Maxwell como instrumento matemático.



FIGURA 27. Taxis de la Ciudad de México que cuentan con motor eléctrico y fuente de recarga electromagnética [61].

V. REFLEXIONES FINALES A MANERA DE CONCLUSIONES

Como pudo observarse, la propuesta epistemológica que aquí se aborda, es distinta de lo que en general plantean los trabajos de epistemología en la enseñanza de las ciencias. A juicio de los autores, plantear el significado epistemológico de los instrumentos científicos, considerando la historia de la ciencia como laboratorio epistemológico, es sumamente novedoso. Implícitamente, la propuesta fomenta una visión no acumulativa de la enseñanza de la ciencia; por el contrario, promueve la imaginación e ingenio implicado en el diseño, adaptación, modificación y construcción de nuevos instrumentos, tanto materiales como matemáticos. En ello, como se destacó a lo largo de todo el artículo, subyace el diseño experimental, que no es un proceso azaroso ni por ensayo y error, como comúnmente se dice. Nuestra propuesta es que responde a tanteos dirigidos por el marco conceptual a partir del cual el científico intenta explicar un fenómeno, seleccionando los mejores resultados.

Asimismo, al tratarse de una visión que aborda de manera vinculada el desarrollo de instrumentos tanto materiales como matemáticos, evita el aparente divorcio de las matemáticas con las demás ciencias que muchas veces es reportado en los estudios que entienden la epistemología como creencias de estudiantes y profesores [4, 5, 17, 18, 19, 20, 21]. De esta manera, es posible que el estudiante vislumbre de manera más clara, que el conocimiento científico no es absoluto, sino parcial y en construcción.

Consideramos que la epistemología de la imaginación provee de un marco teórico que permite una aproximación cognitiva de los procesos individuales y psicosociales que subyacen el origen y uso de los instrumentos, por lo que esta visión es de gran impacto en la educación. En tal sentido, se acerca al grupo de trabajos muy recientes que se desarrollan en el marco de lo que se propone como “cognición epistémica”; termino global empleado para referirse a los estudios relativos a los procesos cognitivos implicados en todas las clases explícitas y tácitas de cogniciones relacionadas con asuntos epistémicos o epistemológicos [62]. Igualmente, está relacionado con estudios en enseñanza de la ciencia que tienen que ver con la construcción de aparatos [4, 63].

En este sentido, destacamos que la tesis doctoral de la segunda autora de este artículo, es una propuesta del diseño y construcción de artefactos hechos con materiales caseros para el abordaje de la matematización de fenómenos físicos, que se fundamenta en los principios teóricos de la epistemología de la imaginación, con énfasis en las fases de configuración, confección y ostentación tanto material como matemática, el cual está relacionado estrechamente con este artículo [64].

Por lo tanto, la perspectiva que la epistemología de la imaginación plantea, brinda tanto una aproximación teórica como metodológica para la enseñanza tanto de las ciencias como de su epistemología a través de sus instrumentos. Esta propuesta actualmente se sigue desarrollando en el ámbito de la epistemología de la psicología, retomando trabajos relativos a la arqueología experimental, cuyo objetivo es la construcción de artefactos, dispositivos y aparatos antiguos con los mismos materiales y condiciones en las que surgieron, con el fin de comprender mejor su origen, uso, bondades y limitaciones. Consideramos que esta tendencia es la que bien puede nutrir tanto a la enseñanza de las ciencias, como la de la enseñanza de la epistemología de las ciencias a través de sus instrumentos.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo fue realizado en el marco de los proyectos SIP 20160778 (IPN) y DGAPA-PAPIIT IN402515 (UNAM) y la estancia posdoctoral de la segunda autora realizada con apoyo del Conacyt.

REFERENCIAS

[1] Gutiérrez-Goncet, R., Marco-Stiefel, B., Olivares-Jimenez, E. & Serrano-Gisbert, T., *Enseñanza de las ciencias en la educación intermedia*, Tratado de educación Personalizada. (Rialp, España, 1990).

[2] Escalante Arauz, P. *Aprendizaje por Indagación*. Medellín.edu.co (Portal Educativo creado por la Alcaldía Municipal de Medellín, Colombia, 2004), <<http://www.medellin.edu.co/sites/Educativo/Paginas/quienesomos2011.aspx>>, consultado el 5 de febrero de 2014.

[3] Gil Pérez, D. & Guzmán Ozámi, M., *Enseñanza de las Ciencias y la Matemática. Tendencias e Innovaciones*. (Organización de Estados Iberoamericanos para la Educación, la Ciencia y la Cultura / Editorial Popular [versión digital HTML], 1993), <<http://www.oei.es/oeivirt/ciencias.htm>>, consultado el 2 de octubre de 2009.

[4] Matthews, M. R. *Pendulum Motion: How the History and Philosophy of Science can Enrich its Teaching, and Promote Liberal Education*. (Simposium: Enseñanza de la Ciencia, Facultad de Psicología, UNAM, México, 2010).

[5] Monroy Nasr, Z., Álvarez Díaz de León, G. & León-Sánchez, R. *Instrumentos científicos históricos, cognición y*

La enseñanza de la epistemología de la física a través de sus instrumentos enseñanza de la ciencia, (Simposium: Enseñanza de la Ciencia, Facultad de Psicología, UNAM, México, 2010).

[6] Vázquez-Mireles, S., *Correlating Mathematics and Science. Mathematics*, Teaching in the Middle School **15**, 100-107 (September, 2009).

[7] Solbes, J. y Traver, M.J., *La utilización de la historia de las ciencias en la enseñanza de la física y la química*. Enseñanzas de las ciencias. *14* (1). 103-112 (1996).

[8] Zamudio Gómez, J. G., *Epistemología y Educación*. (Red Tercer Milenio, México, 2012).

[9] López Rupérez, F. *Epistemología y didáctica de las ciencias. Un análisis de segundo orden*. Enseñanza de las ciencias **8**, 65-74 (1990).

[10] Concarí, S. B. *Las teorías y modelos en la explicación científica: implicancias para la enseñanza de las ciencias*, Ciencia y Educación, disponible en <<http://dx.doi.org/10.1590/S1516-73132001000100006>> (2001).

[11] Colombo de Cudmani, L. y Salinas de Sandoval, J. *¿Es importante la epistemología de las ciencias en la formación de investigadores y de profesores en física?* Enseñanza de las ciencias **22**, 455-462 (2004).

[12] Salinas de Sandoval, J. y Colombo de Cudmani L. *Epistemología e Historia de la Física en la formación de los profesores de física*, Revista Brasileira de Ensino de Física **5** (1-4), 100-109 (1993).

[13] Rodríguez-Salazar, L. M., *En busca del significado epistemológico de los instrumentos científicos*, Investigación Hoy, (2000), pp. 48-52.

[14] Rodríguez-Salazar, L. M., *Instrumentos Materiales e Instrumentos Matemáticos: su significado epistemológico bajo una noción ampliada de experiencia*, Tesis inédita para obtener el grado de doctor en ciencias en la especialidad de matemática educativa. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. México, (2008).

[15] Rodríguez-Salazar, L.M. & Rosas-Colín, C. P., *Bases Teórico-Methodológicas de una Epistemología de la Imaginación: ¿Por qué Piaget?* En Rodríguez-Salazar, L. M., Quintero-Zazueta, R. & A. R. Hernández Ulloa, A. R. (Coords.), *Razonamiento Matemático. Epistemología de la Imaginación*. (Re)pensando el papel de la Epistemología en la Matemática Educativa, (Gedisa Editorial / Cinvestav, Barcelona, España / México, 2011), pp. 33-91.

[16] Rodríguez-Salazar, L. M., *Epistemología de la imaginación*, El trabajo experimental de Ørsted. (Corinter, México, 2015).

[17] Hammer, D. *Epistemological beliefs in introductory physics*. Cognition and Instruction. **12**, 151-183 (1994).

[18] Hammer, D., *Epistemological considerations in teaching introductory physics*, Science Education **79**, 393-413 (1995)

[19] Elby, A. y Hammer, D. *On the substance of a sophisticated epistemology*. Science Education **85**, 554-567 (2001).

[20] Trautwein, U. y Lüdtke, O. *Epistemological beliefs, school achievement, and college major: A large-scale*

longitudinal study on the impact of certainty beliefs. Contemporary Educational Psychology 32, 348-366 (2007).

[21] Stathopoulou, C. y Vosniadou S., *Exploring the relationship between physics-related epistemological beliefs and physics understanding*, Contemporary Educational Psychology. **32**, 255-281 (2007).

[22] Rosas-Colín, C. P., Rodríguez-Salazar, L. M. y Quintero-Zazueta, R., *Una epistemología científica en, de y para la Matemática Educativa*, En Rodríguez-Salazar, L. M., Quintero-Zazueta, R. & Hernández-Ulló, A. R. (coords.). Razonamiento Matemático, Epistemología de la Imaginación: (Re)pensando el papel de la Epistemología en la Matemática Educativa, (Gedisa/Cinvestav, México, 2011), pp. 93-166.

[23] Rodríguez-Salazar, L. M., *El cambio teórico en ciencia desde una epistemología de la imaginación*, Elementos **101**, 21-27 (2016).

[24] Van Helden, A. & Hankins, T. L., *Instruments*. Osiris. A Research Journal Devoted to the History of Science and Its Cultural Influences **9**, (1994).

[25] Bachelard, G., *Les intuitions atomistiques (essai de classification)*, (Boivin, Paris, 1933).

[26] Bachelard, G., *L'activité rationaliste de la physique contemporaine*, PUF, París, 1951.

[27] Hutchins, R. y Adler, Mortimer, *Great Books of the Western World*, (Encyclopædia Britannica Inc., Chicago, IL, USA, 1952).

[28] Adler, M., *Great Books of the Western World*, 2^{da} Ed. 6ta reimpresión 1996, (Encyclopædia Britannica Inc. Chicago, IL, USA, 1990).

[29] Monroy Nasr, Z y Rodríguez-Salazar, L. M. *Imaginación y Conocimiento: de Descartes a Freud*, (Corinter Humanidades-Gedisa, México, 2016).

[30] Rodríguez-Salazar, L.M., *La imaginación en Kant y la epistemología de la imaginación*. En Monroy Nasr, Z. & Rodríguez-Salazar, L. M.. *Imaginación y Conocimiento: de Descartes a Freud*, (Corinter Humanidades-Gedisa, México, 2016).

[31] Jáuregui, C. (Editora). *Entre pensar y sentir*. Estudios sobre la imaginación en la Filosofía Moderna. (Prometeo Libros, Buenos Aires, 2011), p. 276.

[32] Bachelard, G. *El aire y los sueños: ensayo sobre la imaginación del movimiento*. [Traducción de Ernestina de Champourcin], (Fondo de Cultura Económica, México, 1958/1997).

[33] Bachelard, G. *El agua y los sueños: ensayo sobre la imaginación de la materia*, [Traducción de Ida Vitab], (Fondo de Cultura Económica, México, 1978).

[34] Lapoujade, M. N. *Filosofía de la imaginación*. (Siglo veintiuno editores, México, 2011).

[35] Coccia, E. *Filosofía de la imaginación. Averroes y averroísmo*. (Adriana Hidalgo Editora, Argentina, 2005).

[36] Ackermann, R. *Data, Instruments and Theory*, (Princeton University Press, Princeton, NJ, USA, 1985).

[37] Crump, T. *A Brief History of Science: As seen through the development of scientific instruments*, Carroll & Graf Publishers, New York, NY, USA, 2001).

[38] Baird, D., *Thing Knowledge. A Philosophy of Scientific Instruments*, (University of California Press Berkeley, CA, USA, 2004).

[39] Rossi, P., *Los Filósofos y Las Máquinas 1400-1700*. [Versión en Español], (Labor, México, 1970).

[40] Van Helden, A. and Hankins, T. L., *Instruments*, Osiris. A Research Journal Devoted to the History of Science and Its Cultural Influences **9**, (1994).

[41] Hankins, T. & Silverman, R., *Instruments and the Imagination*, (Princeton University Press, Princeton, New Jersey, U.S.A, 1995).

[42] Record, Isaac. *Scientific Instruments: Knowledge, Practice, and Culture*, Spontaneous Generations: A journal for the History and Philosophy of Science **4**, DOI: 10.4245/sponge.v4i1.14231 (2010).

[43] Cházaro, *Los instrumentos matemáticos en la Nueva España: circulación, usos y transformaciones de la medición*, La Gaceta de la RSME **14**, 739-752 (2011).

[44] Jerved, K., Jackson, A.D. & Knudsen, O. (Trads. y Eds.) *Selected Scientific Works of Hans Christian Ørsted*. (Princeton University Press, Princeton, New Jersey, USA, 1998).

[45] Ørsted, H. C., *Experimenta Circa Effectum Conflictus Electrici in Acum. Magneticam*, Facsimile, Sarton, G., (June, 1928). The foundation of electromagnetism. Isis, 10, 2, 437-440 (1820a).

[46] Ørsted, H. C., *Experiments on the Effect of the Electric Conflict on the Magnetic Needle*, Facsimile in G. Sarton (June, 1928). The foundation of electromagnetism. Isis **10**, 441-444. (1820b).

[47] Dibner, B., *Orsted and the Discovery of Electromagnetism*, (Blaisdell Publishing Company, New York, 1962).

[48] Alejandro, *Motores de Corriente Continua*, Electricidad/Electricitat (2008), <<http://electricidad-viarger.blogspot.mx/2008/04/motores-de-corriente-continua.html>>, consultado el 4 de noviembre de 2012.

[49] Ioana, M. *Alternador, Dinamo y Motor Eléctrico*, (IES Goya 4to Diver, Murcia España, 2009), <<http://iesgoya4adiver.blogspot.mx/2009/11/alternador-dinamo-y-motor-electrico.html>>, consultado el 4 de noviembre de 2012.

[50] Gooding, D. *Experiment and the Making of Meaning: human agency in scientific observation and experiment*, (Kluwer Academic Press, Dordrecht, 1990).

[51] Hernández, F., *Charles A. Coulomb*, Colección Metrología Técnica. Serie: Los científicos y el sistema internacional de unidades (SI), (CONALEP-Limusa, México, 1988).

[52] Hacking, I., *Representar e intervenir. Seminario de Problemas Científicos y Filosóficos*, (Paidós- Instituto de Investigaciones Filosóficas, UNAM, México, 1996).

[53] Jenkins, J. D., *Electricity Sparks Invention, Early electric motors*, Sparkmuseum. (s. f.), disponible en <<http://www.sparkmuseum.com>>.

[54] Windell, L., *Cómo hacer que el motor eléctrico más simple, basado en David Kagan 2005*, The Physics Teacher,

- Evil Mad Scientist. (2006), <<http://www.evilmadscientist.com/2006/how-to-make-the-simplest-electric-motor/>>, consultado el 4 de noviembre de 2012.
- [55] Smart, Ch. E., *The makers of surveying instruments in America since 1700*, (Regal Art Press, New York, USA, 1962), <http://www.surveyhistory.org/benjamin_pike_jr.htm>, consultado el 13 de febrero de 2008.
- [56] Servo. *Motores Eléctricos*. Servo Recambios, S. A., [sitio web],. (s.f.), <http://www.servorecambios.com/motores/despieces/despiece_bm_mgm.shtml>, consultado el 5 de octubre de 2012.
- [57] Irvin Systems. Tecnología Diaria, *Conocimientos Básicos de Motores Eléctrico*, (2007-2010), <<http://www.irvinsystems.com/?p=3201>>, consultado el 5 de noviembre de 2012.
- [58] Rodríguez-Elías, L., *Perfiles de Ingeniero en Unilever Planta Morelos*, (Documento personal, inédito, Cuernavaca, Morelos, México, 2012).
- [59] Aleman, P., *Ley de Coulomb*, (2011), <http://angiealeman.blogspot.mx/2011_04_01_archive.html>, consultado el 4 de noviembre de 2012.
- [60] Tripler, P., *Physics for scientists and engineers: Electricity, Magnetism, Light, and Elementary Modern Physics*. Ley de Ampère, 5ª Ed. (Wikipedia, 2004). Última modificación 29 de mayo de 2008, <http://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_ampere>, consultado el 22 de marzo de 2008.
- [61] Chavarría, E., *Taxis cero emisiones ya son realidad en DF*. (La Razón, 2011), <http://www.razon.com.mx/spip.php?page=imprimir_articulo&id_article=93361>, consultado el 7 de noviembre de 2012.
- [62] Greene, J. A., Sandoval, W. A. y Braten, I. *Handbook of Epistemic Cognition*. (Routledge, NY, USA, 2016).
- [63] Vosniadou, S., Skopeliti, I. y Ikospentaki, K., *Reconsidering the role of artifacts in reasoning: Children's understanding of the globe as a model of the earth*, *Contemporary Educational Psychology* **32**, 255-283 (2005).
- [64] Rosas-Colín C. P., *Matematización de fenómenos físicos: un estudio post-piagetiano con experimentadores novatos y avanzados en un ámbito extra-curricular*, Tesis inédita para obtener el grado de Doctorado en Ciencias en la especialidad de Matemática Educativa, (DME, Cinvestav, México, 2014).