

Análisis ontosemiótico de la emergencia y evolución del concepto de carga eléctrica

Juan D. Godino
jgodino@ugr.es

Departamento de Didáctica de la Matemática. Universidad de Granada, España

Resumen

En este trabajo caracterizamos los diversos significados del concepto de carga eléctrica y las conexiones entre los mismos aplicando las herramientas del enfoque ontosemiótico (EOS). Estas etapas comienzan con la observación del efecto eléctrico al frotar el ámbar, siguen con el estudio cuantitativo a nivel macroscópico, la introducción del concepto de campo y el estudio estructural atómico-molecular, hasta alcanzar el reconocimiento de la carga eléctrica como una propiedad fundamental cuantizada de la materia a nivel subatómico. El EOS ayuda a identificar, para cada significado parcial, los diferentes tipos de fenómenos y problemas en cuya solución interviene el concepto de carga, así como las prácticas operativas y discursivas que se ponen en juego. También tiene en cuenta el papel de las herramientas simbólicas y experimentales en la conformación de cada significado. Finalmente indicamos algunas implicaciones para el diseño de los procesos de enseñanza y aprendizaje de los fenómenos eléctricos. La comprensión de los diversos significados puede ayudar a superar concepciones erróneas sobre la carga eléctrica.

Palabras clave: Carga eléctrica; Enfoque ontosemiótico; Historia; Epistemología; Didáctica de la física.

Onto-semiotic analysis of the emergence and evolution of the electric charge concept

Abstract

In this paper, we characterize the diverse meanings of the electric charge concept and the connections between them by applying the tools of the onto-semiotic approach (OSA). These stages begin with the observation of the electric effect upon rubbing amber, continue with the quantitative study at the macroscopic level, the introduction of the field concept, and the atomic-molecular structural study, culminating in the recognition of electric charge as a fundamental quantized property of matter at the subatomic level. The OSA facilitates the identification, for each partial meaning, of the different types of phenomena and problems in whose solution the concept of charge intervenes, as well as the operative and discursive practices that are brought into play. The study also considers the role of symbolic and experimental tools in the shaping of each meaning. Finally, we provide some implications for the design of teaching and learning processes related to electrical phenomena. Understanding these diverse meanings can help overcome misconceptions about electric charge.

Keywords: Electric charge; Onto-semiotic approach; History; Epistemology; Didactic of physics

Analyse onto sémiotique de l'émergence et de l'évolution du concept de charge électrique

Résumé

Dans ce travail, nous caractérisons les différents sens du concept de charge électrique ainsi que les connexions entre eux, en appliquant les outils de l'approche onto sémiotique (EOS). Ces étapes commencent par l'observation de l'effet électrique produit en frottant l'ambre, se poursuivent avec l'étude quantitative au niveau macroscopique, l'introduction du concept de champ et l'étude structurelle atomique et moléculaire, jusqu'à la reconnaissance de la charge électrique comme une propriété fondamentale quantifiée de la matière au niveau subatomique. L'EOS permet d'identifier, pour chaque

signification partielle, les différents types de phénomènes et de problèmes dans la résolution desquels intervient le concept de charge, ainsi que les pratiques opératives et discursives mises en œuvre. Il prend également en compte le rôle des outils symboliques et expérimentaux dans la formation de chaque signification. Enfin, nous indiquons quelques implications pour la conception des processus d'enseignement et d'apprentissage des phénomènes électriques. La compréhension des divers sens peut aider à surmonter les conceptions erronées relatives à la charge électrique.

Mots-clés : Charge électrique ; Approche onto sémiotique ; Histoire ; Épistémologie ; Didactique de la physique

Análise onto-semiótica da emergência e evolução do conceito de carga elétrica

Resumo

Neste artigo, caracterizamos os diversos significados do conceito de carga elétrica e as conexões entre eles, aplicando as ferramentas da abordagem onto-semiótica (AOS). Essas etapas começam com a observação do efeito elétrico ao esfregar âmbar, continuam com o estudo quantitativo em nível macroscópico, a introdução do conceito de campo e o estudo estrutural atômico-molecular, culminando no reconhecimento da carga elétrica como uma propriedade quantizada fundamental da matéria em nível subatômico. A AOS facilita a identificação, para cada significado parcial, dos diferentes tipos de fenômenos e problemas em cuja solução o conceito de carga intervém, bem como as práticas operativas e discursivas envolvidas. O estudo também considera o papel das ferramentas simbólicas e experimentais na formação de cada significado. Finalmente, apresentamos algumas implicações para o planejamento de processos de ensino e aprendizagem relacionados a fenômenos elétricos. A compreensão desses diversos significados pode ajudar a superar concepções errôneas sobre a carga elétrica.

Palavras-chave: Carga elétrica; Abordagem onto-semiótica; História; Epistemología; Didática da física

1. INTRODUCCIÓN

El concepto de carga eléctrica es fundamental en la física al intervenir en fenómenos, tanto a escala microscópica (donde la carga es una propiedad cuantizada cuya unidad fundamental es la carga del electrón o protón), como macroscópica (interacción entre cuerpos cargados y corrientes eléctricas). Como señaló Feather (1968, p. 2), a nivel atómico, "las únicas cualidades fundamentales de la materia son la electrificación y la masa". La carga juega también un papel crucial en la generación de fenómenos ondulatorios (ondas electromagnéticas), donde las cargas aceleradas generan el campo electromagnético. Lo que hace particularmente significativa a la carga eléctrica en física es su rol como concepto unificador a través de estas diferentes escalas y manifestaciones. La misma propiedad fundamental y sus leyes asociadas explican fenómenos que van desde interacciones de partículas subatómicas hasta radiación cósmica, demostrando la notable consistencia de las leyes físicas en diferentes escalas de observación.

La carga eléctrica no es, por tanto, solamente un número y una unidad de medida, sino un invariante fundamental de la naturaleza que contribuye a estructurar el espacio-tiempo mediante el campo electromagnético que genera, conecta las teorías de la física clásica y cuántica, y su conservación refleja simetrías profundas del universo. Además, la relación ontológica entre carga y energía es fundamental: la carga eléctrica representa la propiedad física que posibilita las interacciones, mientras que la energía cuantifica el potencial transformador asociado a dichas interacciones. Esta dualidad proporciona un marco conceptual coherente para comprender y predecir los fenómenos electromagnéticos en cualquier escala de la realidad física.

En este trabajo abordamos el estudio del concepto y propiedades fundamentales de la carga eléctrica desde la perspectiva ontosemiótica (EOS) (Godino, 2024; Godino et al., 2007), aplicando las posibilidades que ofrece este marco teórico para la comprensión de los conocimientos físico-matemáticos. Indagaremos los fenómenos y problemas que motivan la introducción de la carga, sus conceptualizaciones y teorías, así como las herramientas simbólicas y dispositivos experimentales elaborados para su estudio. De este modo caracterizamos los diversos significados de la carga, desde el más intuitivo y cualitativo hasta los más generales y matematizados. Este análisis aporta un enfoque innovador para estudiar la física desde una perspectiva filogenética y sus implicaciones para la didáctica de las ciencias experimentales. Desarrollamos un modelo de análisis de la actividad físico-matemática y de los objetos emergentes para determinar aspectos cruciales de los conocimientos científicos y didácticos que deberían tener los profesores para diseñar procesos educativos idóneos. De esta manera ampliamos la manera de entender el conocimiento pedagógico del contenido en las ciencias experimentales (Deng, 2018; Gess-Newsome et al., 2017) al problematizar la naturaleza del conocimiento científico especializado para la enseñanza.

El artículo comienza describiendo el marco teórico y el método (estudio documental histórico-epistemológico guiado por el EOS). Seguidamente, se describen los significados identificados: cualitativo-fenomenológico, cuantitativo macroscópico, el ligado al campo electromagnético, el estructural atómico-molecular y el asociado a la teoría cuántica de campos. Finalmente, se presenta el significado global u holístico, destacando las articulaciones y generalizaciones progresivas, y se

discuten las implicaciones educativas de esta visión histórico-epistemológica.

2. PROBLEMA, MARCO TEÓRICO Y MÉTODO

Las cuestiones específicas que abordamos en este trabajo sobre el concepto de carga eléctrica son las siguientes: 1) ¿Qué significados se han atribuido al concepto de carga eléctrica en las diferentes etapas históricas? 2) ¿Cómo se distinguen tales significados desde el punto de vista ontosemiótico? 3) ¿Qué implicaciones educativas se derivan de la visión global de la carga elaborada?

El Enfoque Ontosemiótico (EOS) en educación matemática (Godino, 2024; Godino et al., 2007) aporta las herramientas teóricas para este análisis. Esta perspectiva adopta una visión antropológica (Wittgenstein, 1953) y pragmatista (Peirce, 1931-58) donde los conceptos científicos emergen de las acciones humanas frente a problemas específicos. Los significados se entienden como sistemas de prácticas operativas y discursivas para resolver problemas tanto matemáticos como de ciencias experimentales. En la caracterización de un objeto conceptual como la carga eléctrica, el primer paso consiste en identificar los diversos contextos institucionales donde se utiliza, analizando las situaciones-problemas que motivan su emergencia y revelan su razón de ser. Estas prácticas involucran configuraciones de diferentes objetos: representaciones lingüísticas, elementos regulativos (definiciones, propiedades, procedimientos) y argumentos (explicaciones y justificaciones), que emergen mediante procesos de representación, definición, algoritmización y generalización.

La indagación que realizamos es un estudio documental basado en la selección de textos que describen la emergencia del concepto de carga en distintas etapas históricas, así como publicaciones con análisis epistemológicos de dicho concepto. El análisis de la trayectoria histórica de la carga eléctrica se inscribe en los estilos de razonamiento epistemológico antropológico (Hacking, 1992) y ecológico (Toulmin, 1977; Morin, 1992), asumiendo el "giro hacia la práctica" (Rheinberger, 2010) en filosofía e historia de las ciencias. Nuestra interpretación está orientada hacia la enseñanza y aprendizaje en diferentes niveles educativos, diferenciándose de los enfoques puramente físicos o históricos centrados en la secuencia de descubrimientos.

El análisis ontosemiótico de los conceptos matemáticos y físicos implica una indagación de tipo histórico, pero también y principalmente una mirada epistemológica, ontológica y educativa. Los problemas que impulsan el desarrollo del conocimiento en las ciencias experimentales surgen de la necesidad de describir y explicar fenómenos naturales. Inicialmente, esto se aborda mediante observaciones descriptivas y no sistematizadas. Posteriormente, se identifican variables cuantificables, se desarrollan métodos de medición rigurosos y se construyen teorías matematizadas con poder predictivo. En física, este proceso depende críticamente de herramientas experimentales (p. e., telescopios, espectrómetros) que permiten reproducir

fenómenos bajo condiciones controladas, facilitando la observación sistemática y la medición cuantitativa.

3. SIGNIFICADO CUALITATIVO-FENOMENOLÓGICO (ANTIGÜEDAD HASTA EL SIGLO XVII)

El estudio de la electricidad, desde la Antigüedad hasta el siglo XVII, se puede caracterizar como cualitativo-fenomenológico al centrarse en la descripción y clasificación de los fenómenos observados, más que en la medición cuantitativa y elaboración de modelos matemáticos. "Hasta finales del siglo XVII, la electricidad como tema se reducía a lo que acertadamente se ha denominado el «efecto ámbar», en el que los objetos ligeros se mueven hacia el ámbar frotado" (Buchwald, 2013a, p. 433). A continuación, se presentan algunos detalles sobre los fenómenos y problemáticas abordados, la manera en que se conceptualizaba la electricidad y los dispositivos utilizados. Usamos como fuentes principales Heilbron (1979) y Wittaker (1951).

3.1. Fenómenos y problemas

Los fenómenos y problemas relacionados con la carga eléctrica abordados desde la antigüedad hasta el siglo XVII incluyen:

- *Atracción del ámbar.* Desde Tales de Mileto (600 a.C.), se conocía la capacidad del ámbar frotado para atraer objetos ligeros como plumas o paja. Gilbert (1544-1603) acuñó el término "eléctrico" derivándolo de la palabra griega para ámbar (*elektron*).
- *Distinción entre fenómenos eléctricos y magnéticos.* Durante el siglo XVII, se hizo un esfuerzo consciente por diferenciar estos fenómenos, aunque inicialmente estaban entrelazados en las investigaciones, como ejemplifica el trabajo de Gilbert.
- *Influencia de la humedad.* Se observó que la humedad afectaba la capacidad de los materiales para electrizarse por fricción y que el contacto con el agua debilitaba la "virtud eléctrica" de sustancias como el ámbar, aunque el efecto completo no se comprendió inicialmente.
- *Transmisión de la electricidad.* Hacia finales del siglo XVII, Guericke (1602-1686) observó que un globo de azufre frotado podía ejercer su "virtud" a través de un hilo de lino, atrayendo objetos en el extremo lejano.

3.2. Conceptualización y teorías

Se elaboraron varias conceptualizaciones y teorías para describir y explicar los anteriores fenómenos relacionados con la carga eléctrica, las cuales incluyen:

- *Teorías de efluvios.* En el siglo XVII, surgieron teorías que explicaban la atracción eléctrica mediante la emisión de "efluvios" o partículas de materia eléctrica por los cuerpos electrificados. Gilbert se refería a esta propiedad como una "virtud" que emanaba de los cuerpos electrificados. Estas

teorías influyeron en la dificultad para reconocer la atracción eléctrica.

- *Filosofía corpuscular y el vórtice cartesiano.* Filósofos como Descartes buscaron explicar la electricidad en términos de la forma y el movimiento de partículas materiales. La explicación del "vórtice eléctrico" propuesta por Descartes predominó en la física francesa hasta el siglo XVIII.
- *Concepto de "cualidades ocultas".* Los físicos aristotélicos se interesaban por las "causas verdaderas" de los fenómenos. Cabeo (1586-1637) inicialmente ofreció explicaciones basadas en elementos naturales como el aire para la atracción eléctrica.
- *Dificultad para reconocer la mutualidad y la repulsión.* Las teorías de efluvios tendían a implicar una acción unilateral de los cuerpos electrizados, lo que dificultó el reconocimiento de la mutualidad en las interacciones eléctricas y del fenómeno de repulsión electrostática.

La conceptualización de los fenómenos eléctricos durante este período estuvo profundamente influenciada por la filosofía aristotélica, predominante en el pensamiento científico medieval y renacentista (Heilbron, 1979). El marco aristotélico, con su énfasis en las cualidades inherentes a los cuerpos y la teoría de los cuatro elementos, proporcionó el vocabulario teórico mediante el cual los primeros investigadores intentaron explicar la "virtud eléctrica".

3.3. Herramientas experimentales

Algunos de los artefactos y montajes experimentales que se usaron los investigadores que elaboraron las anteriores teorías incluyen:

- *El ámbar frotado.* Desde la antigüedad, el ámbar frotado se utilizó como el principal "instrumento" para observar la atracción de objetos ligeros; también se emplearon otras resinas y el vidrio.
- *El globo de azufre de Otto von Guericke.* Guericke inventó el primer dispositivo mecánico para producir electricidad estática. Consistía en una esfera de azufre montada en un torno de alfarero. Al girar la esfera y frotarla con la mano, se podía cargar eléctricamente por fricción. Guericke también demostró la transmisión de la "virtus" eléctrica a través de un hilo de lino utilizando este globo de azufre.
- *Montajes experimentales simples.* Las primeras indagaciones solían implicar montajes experimentales sencillos para observar los efectos de la "virtud eléctrica". El experimento de Guericke con el globo de azufre y el hilo de lino para demostrar la transmisión de la electricidad representa un montaje experimental primitivo.

Este período cualitativo-fenomenológico sentó las bases para la revolución que experimentaría el estudio de la electricidad durante el siglo XVIII. Al finalizar el siglo XVII, ya se habían identificado los fenómenos básicos

de atracción eléctrica y se contaba con rudimentarios dispositivos experimentales.

4. SIGNIFICADO CUANTITATIVO MACROSCÓPICO (SIGLO XVIII)

El siglo XVIII fue crucial para la comprensión de la carga eléctrica. Franklin (1706-1790) estableció una teoría influyente y una nomenclatura que aún se utiliza. Coulomb (1736-1806) cuantificó la fuerza entre cargas, proporcionando una ley fundamental. Volta (1745-1827) inventó la batería, abriendo la puerta al estudio de la corriente eléctrica. Watson (1715-1787) realizó descubrimientos clave sobre la conducción. Todos ellos, junto con otros investigadores, abordaron los fenómenos de atracción, repulsión, almacenamiento y movimiento de la carga eléctrica, sentando las bases para el desarrollo posterior de la teoría electromagnética en el siglo XIX (Buchwald, 2013a; Heilbron, 1979; Wittaker, 1951).

4.1. Fenómenos y problemas

Entre los fenómenos y problemas abordados destacan:

- *Almacenamiento de carga.* El desarrollo de la botella de Leyden, realizado por Pieter van Musschenbroek (1692-1761), permitió almacenar carga eléctrica por primera vez. Los experimentos con la botella de Leyden llevaron a la observación de descargas eléctricas (chispas y choques) y al estudio de la "velocidad de la electricidad".
- *Conducción eléctrica.* Gray (1666-1736) mostró que la electricidad podía transmitirse a través de ciertos materiales a largas distancias.
- *Experimentos con rayos.* Franklin realizó su famoso experimento con la cometa en 1752, demostrando que los rayos eran fenómenos eléctricos.
- *La pila voltaica:* Volta desarrolló hacia 1799 la primera batería eléctrica, generando electricidad mediante reacciones químicas.
- *Electrostática.* Investigadores como Watson y Nollet (1700-1770) realizaron numerosos experimentos sobre los efectos de la electricidad estática (circuitos eléctricos, transmisión a larga distancia, descarga eléctrica en el vacío, entre otros).

4.2. Conceptualización y teorías

Durante el siglo XVIII surgieron varias teorías para explicar la naturaleza de la carga eléctrica:

- *Teoría de los dos fluidos eléctricos.* Du Fay (1698-1739) propuso que existían dos tipos distintos de electricidad: la "vítreo" (producida al frotar vidrio) y la "resinosa" (producida al frotar resinas como el ámbar). Según esta teoría, fluidos eléctricos de tipo opuesto se atraían mutuamente, mientras que los del mismo tipo se repelían.
- *Teoría del fluido único.* Franklin propuso que la electricidad consistía en un solo fluido etéreo que podía estar en exceso (carga positiva) o en defecto (carga negativa) respecto a un estado natural o neutro. Esta teoría explicaba la conservación de la

- carga y estableció la terminología de "positivo" y "negativo" que usamos actualmente.
- **Teoría cuantitativa de las fuerzas eléctricas.** Coulomb desarrolló una teoría matemática que describía la fuerza entre cargas eléctricas. Mediante experimentos precisos con su balanza de torsión, estableció que esta fuerza era inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre las cargas y directamente proporcional al producto de sus magnitudes ($F = k \cdot (q_1 \cdot q_2) / r^2$).
 - **Teorías complementarias.** Nollet propuso la teoría efluente, que postulaba "atmósferas eléctricas" alrededor de cuerpos cargados. Galvani (1737-1798) desarrolló la teoría de la "electricidad animal", mientras que Volta, refutándola, propuso que el contacto entre metales diferentes generaba electricidad, lo que llevó al desarrollo de la primera batería. Watson anticipó el principio de conservación de la carga al proponer que la electricidad se transfería entre cuerpos.

La formulación de la ley de Coulomb representó una ruptura paradigmática con la física mecanicista cartesiana dominante, al postular fuerzas que actuaban a distancia sin contacto mecánico directo. Mientras los cartesianos exigían mecanismos visualizables mediante "torbellinos" o "presiones", la tradición newtoniana que siguió Coulomb aceptaba fuerzas a distancia matemáticamente descritas, aunque mecánicamente inexplicables (Heilbron, 1979).

4.3. Herramientas simbólicas y experimentales

En el siglo XVIII, se elaboraron diversos dispositivos y artefactos cruciales para el estudio de los fenómenos eléctricos y electromagnéticos. A continuación, se enumeran y describen brevemente algunos de los más importantes, destacando el comienzo de la matematización en el estudio de la electricidad mediante el uso de representaciones simbólicas y ecuaciones.

Representaciones simbólicas y ecuaciones

- La principal herramienta de representación simbólica de la carga eléctrica y de expresión de relaciones con otras magnitudes es la ley de Coulomb: $F = k \cdot (q_1 \cdot q_2) / r^2$ donde F es la fuerza, q_1 y q_2 son las cargas, r es la distancia y k es la constante de proporcionalidad.

Herramientas experimentales

- **Máquina electrostática de fricción.** Evolucionó desde simples esferas de azufre o vidrio frotadas manualmente hasta máquinas sofisticadas como la de Ramsden (1735-1800), con discos giratorios y colectores metálicos que generaban cargas por fricción.
- **Electroscopio.** Instrumento para detectar la presencia y magnitud de cargas eléctricas mediante la divergencia de láminas o bolas suspendidas. El electroscopio de panes de oro de Bennet (1749-1799) permitía mediciones más sensibles.

- **Balanza de torsión.** Coulomb diseñó una balanza para medir con precisión las fuerzas eléctricas entre cargas, estableciendo así la ley que lleva su nombre.
- **Condensador.** Volta diseñó un dispositivo para acumular y detectar pequeñas cantidades de electricidad, significativamente más sensible que los electroscopios anteriores.
- **Pila voltaica.** Primera batería eléctrica consistente en discos alternados de zinc y cobre separados por cartón humedecido con salmuera, produciendo corriente continua.
- **Batería eléctrica de botellas de Leyden.** Conexión de múltiples botellas en paralelo para aumentar la capacidad de almacenamiento eléctrico, diseñada por Franklin.
- **Termómetro eléctrico.** Kinnersley (1711-1778) construyó un termómetro para medir el calor generado por descargas eléctricas, demostrando la conversión de energía eléctrica en térmica.

Estos dispositivos y artefactos fueron esenciales para avanzar en la comprensión de la naturaleza de la carga eléctrica y sentaron las bases para los descubrimientos posteriores en el campo del electromagnetismo. La mejora de las técnicas de fabricación de vidrio y metal durante el siglo XVIII también contribuyó al desarrollo de estos instrumentos.

5. SIGNIFICADO DE CARGA LIGADO AL CAMPO ELÉCTRICO (SIGLO XIX)

El concepto de campo representó una revolución en la física del siglo XIX, transformando la comprensión de las interacciones eléctricas. En lugar de postular una acción instantánea a distancia, se propuso que cada carga crea un campo eléctrico que se propaga por el espacio y ejerce fuerzas sobre otras cargas.

"Un breve repaso a la historia de la electricidad durante el siglo XIX muestra que el concepto de campo fue la culminación de un programa de investigación destinado a superar una serie de problemas relativos al modelo de acción a distancia, como la transmisión de la interacción eléctrica a través del medio, así como la unificación de las diferentes formas de electricidad (voltaica, animal, electrostática, química, etc.) y magnetismo" (Furió y Guisasola, 1998, p. 512).

A continuación, se presentan algunos detalles sobre los fenómenos y problemas abordados, la manera en que se conceptualizaba la electricidad y las herramientas simbólicas y experimentales utilizadas. Usamos como fuentes principales Buchwald (2013b), Steinle (2013) y Wittaker (1951).

5.1. Fenómenos y problemas

Los científicos del siglo XIX, principalmente Faraday (1791-1867), Maxwell (1831-1879) y sus contemporáneos, investigaron diversos fenómenos relacionados con la carga eléctrica:

- *La naturaleza de la corriente eléctrica.* Se investigó la distinción entre corrientes en conductores y el concepto de "corriente de desplazamiento" introducido por Maxwell, quien estableció que "todas las corrientes son cerradas".
- *Carga en movimiento.* El descubrimiento de la relación entre electricidad y magnetismo por Oersted (1777-1851) llevó al desarrollo de la electrodinámica por Ampere (1775-1836). Heaviside (1850-1925) formuló la fuerza sobre una carga eléctrica en movimiento dentro de un campo magnético.
- *Conducción en soluciones y gases.* Las investigaciones en electrolitos y gases eventualmente condujeron al descubrimiento del electrón.
- *Inducción electromagnética.* El descubrimiento de Faraday reveló cómo un cambio en el flujo magnético induce corrientes eléctricas. Neumann (1798 -1895) formuló una teoría matemática de las corrientes inducidas, y Lenz (1804-1865.) determinó la dirección de estas corrientes.

5.2. Conceptualización y teorías

La conceptualización de la carga eléctrica experimentó una transformación fundamental durante el siglo XIX, evolucionando desde las teorías de fluidos hasta la teoría de campo electromagnético. Este proceso puede dividirse en cuatro etapas principales:

- *Transición de las teorías de fluidos a la electrodinámica (1800-1830).* A principios del siglo XIX, las explicaciones basadas en fluidos eléctricos continuaban dominando el pensamiento científico. La invención de la pila voltaica en 1800 permitió la producción continua de corriente eléctrica, facilitando nuevas investigaciones. El descubrimiento de Oersted en 1820, quien observó que una corriente eléctrica desviaba una aguja magnética, evidenció una conexión fundamental entre electricidad y magnetismo. Ampère desarrolló entre 1820 y 1827 una teoría matemática de las interacciones entre corrientes eléctricas, aunque su enfoque permanecía anclado en el paradigma de acción a distancia.
- *Las líneas de fuerza y la visión de campo de Faraday (1831-1855).* El descubrimiento de la inducción electromagnética por Faraday en 1831 revolucionó la comprensión de los fenómenos eléctricos. Faraday introdujo el concepto de líneas de fuerza como representación física real de las interacciones en el espacio, rechazando la acción a distancia en favor de una acción contigua. Sus experimentos demostraron la influencia de los materiales en las interacciones eléctricas, lo que le llevó a conceptualizar la carga eléctrica como origen de un estado particular del espacio circundante, no como una sustancia autónoma.
- *La formalización matemática de Maxwell (1855-1865).* Maxwell formalizó matemáticamente las ideas de Faraday, introduciendo la corriente de

desplazamiento para predecir ondas electromagnéticas. Concibió el campo electromagnético como una entidad física fundamental con existencia propia, formulando entre 1864 y 1873 el sistema de ecuaciones que unificó electricidad y magnetismo en una teoría coherente.

- *Consolidación y extensiones de la teoría electromagnética (1865-1900).* Hertz confirmó experimentalmente la existencia de ondas electromagnéticas entre 1886 y 1889, validando las predicciones de Maxwell. Heaviside y Gibbs expresaron las ecuaciones de Maxwell en la notación vectorial moderna. Lorentz desarrolló la teoría del electrón entre 1892 y 1895, mientras que J.J. Thomson estableció experimentalmente en 1897 la naturaleza corpuscular y la cuantización de la carga eléctrica con su descubrimiento del electrón.

Estos desarrollos, particularmente la síntesis de Maxwell, consolidaron una profunda transformación conceptual: la carga eléctrica dejó de ser vista primordialmente como una sustancia o fluido para entenderse como una propiedad fundamental definida por su interacción con el campo electromagnético. Fue el propio campo el que adquirió el estatus de entidad física fundamental, portadora de energía y momento, marcando un cambio paradigmático que sentó las bases para la física del siglo XX.

5.3. Herramientas simbólicas y experimentales

En el siglo XIX, se elaboraron diversos dispositivos y artefactos cruciales para el estudio de los fenómenos eléctricos y electromagnéticos. A continuación, se enumeran y describen brevemente algunos de los más importantes.

Representaciones simbólicas y ecuaciones

- Campo eléctrico (Faraday-Maxwell):
 - $E = F/q$ (definición a partir de la fuerza)
 - $E = k \cdot Q/r^2$ (para cargas puntuales)
- Ley de Gauss: $\oint E \cdot dA = Q/\epsilon_0$. Relaciona el flujo del campo eléctrico a través de una superficie cerrada con la carga contenida.
- Potencial eléctrico:
 - $V = k \cdot Q/r$ (para cargas puntuales)
 - $E = -\nabla V$ (relación campo-potencial)
- Ecuaciones de Maxwell (1861-1862):
 - $\nabla \cdot E = \rho/\epsilon_0$ (ley de Gauss)
 - $\nabla \times E = -\partial B/\partial t$ (ley de inducción de Faraday)
 - $\nabla \cdot B = 0$ (ausencia de monopolos magnéticos)
 - $\nabla \times B = \mu_0 J + \mu_0 \epsilon_0 \cdot \partial E / \partial t$ (ley de Ampère-Maxwell)

- Fuerza de Lorentz: $F = q(E + v \times B)$. Describe la fuerza ejercida sobre una carga en movimiento en presencia de campos eléctricos y magnéticos.

Herramientas experimentales

- Pila voltaica. Inventada por Volta (c. 1800), que permitió la producción de corriente eléctrica continua.
- Galvanómetro. Desarrollado tras el descubrimiento de Oersted (1820), sirvió para detectar y medir corrientes eléctricas.
- Electroimanes. Demostraron la relación entre electricidad y magnetismo.
- Bobinas de inducción. Instrumentos esenciales en los laboratorios de la segunda mitad del siglo XIX.

Estos dispositivos proporcionaron las herramientas necesarias para la investigación fundamental en electricidad y electromagnetismo, sentando las bases para numerosas aplicaciones tecnológicas.

6. SIGNIFICADO ATOMISTA-CORPUSCULAR DE LA ELECTRICIDAD (FINALES DEL SIGLO XIX Y PRINCIPIOS DEL XX)

El periodo entre finales del siglo XIX y principios del XX representó una transición crucial en la comprensión de la electricidad. Esta época estuvo marcada por el descubrimiento del electrón y el desarrollo de la teoría electrónica de la materia, lo que proporcionó una base fundamental para entender la naturaleza de la carga eléctrica (Darrigol, 2000; Whittaker, 1953).

6.1. Fenómenos y problemas

Las principales áreas de investigación durante este periodo fueron:

- Rayos catódicos: Los experimentos de Thomson que demostraron la existencia de los electrones como partículas con carga negativa, estableciendo el fundamento de la teoría electrónica.
- Naturaleza discreta de la carga eléctrica: La propuesta y confirmación de que la electricidad existe en cantidades discretas, no como un fluido continuo.
- Conducción en gases: Los estudios de ionización y comportamiento eléctrico en gases, que proporcionaron evidencias cruciales sobre la naturaleza particular de la carga.
- Efecto Zeeman: La división de líneas espectrales en campos magnéticos que estableció una conexión fundamental entre luz y electromagnetismo, explicada mediante la teoría electrónica.
- Efecto fotoeléctrico: La emisión de electrones por materiales expuestos a radiación electromagnética, que consolidó la visión corpuscular al demostrar la interacción discreta entre luz y materia.

6.2. Conceptualización y teorías

La conceptualización de la carga eléctrica experimentó una transformación fundamental: de fluido continuo a propiedad cuantizada inherente a partículas subatómicas.

Se estableció que la carga existe sólo en múltiplos enteros de la carga elemental, formando parte integral de la estructura atómica. Las propiedades eléctricas de la materia derivaban ahora de la distribución y comportamiento de estas partículas elementales. Paralelamente, persistieron modelos del éter que intentaban explicar fenómenos electromagnéticos mediante analogías mecánicas

El concepto de carga eléctrica experimentó una transformación fundamental durante este periodo:

- De fluido a partícula. Abandono definitivo de la teoría de fluidos eléctricos en favor de una concepción corpuscular.
- Establecimiento de la cuantización. Confirmación de que la carga eléctrica existe sólo en múltiplos enteros de la carga elemental.
- Incorporación a la estructura atómica. La carga eléctrica se estableció como propiedad fundamental de los constituyentes del átomo.
- Relación con la materia. Se comprendió que las propiedades eléctricas derivaban de la distribución y comportamiento de partículas cargadas elementales.
- Dualidad carga-partícula. Se reconoció que la carga eléctrica no existe como entidad independiente, sino como propiedad intrínseca de ciertas partículas.
- Modelos del éter. Muchos físicos desarrollaron modelos mecánicos del éter para explicar fenómenos electromagnéticos, atribuyendo un carácter rotatorio al magnetismo o representando la fuerza magnética como una velocidad lineal.

La revolución atomista-corpuscular de la electricidad no solo transformó la comprensión de este fenómeno específico, sino que estableció conexiones fundamentales entre diferentes ramas de la física anteriormente consideradas independientes. La concepción de la electricidad como propiedad inherente a partículas fundamentales proporcionó un marco teórico unificador. La teoría electrónica de la materia consolidó la relación entre electricidad y óptica (Darrigol, 2000). El descubrimiento del electrón permitió entender que la luz resultaba de oscilaciones de cargas eléctricas fundamentales. Simultáneamente, esta concepción corpuscular vinculó fenómenos termodinámicos con procesos eléctricos. La teoría de Drude-Lorentz explicó la conducción térmica y eléctrica como manifestaciones del mismo fenómeno: el movimiento de electrones libres. Además, la cuantización de la carga eléctrica proporcionó una explicación fundamental para las leyes de Faraday de la electrólisis, unificando conceptualmente química y electricidad, estableciendo un puente entre reacciones químicas macroscópicas y cargas eléctricas subatómicas (Kragh, 2001).

6.3. Herramientas simbólicas y experimentales

En este periodo se elaboraron diversas herramientas simbólicas y experimentales cruciales para el estudio de los fenómenos eléctricos y electromagnéticos.

Representaciones simbólicas y ecuaciones fundamentales

En este periodo se formularon varias ecuaciones y representaciones simbólicas clave que capturaron la nueva conceptualización atomista-corpuscular de la electricidad. Entre las más relevantes destacan:

- Carga elemental (e): Determinada experimentalmente por Millikan (1909) como $e = 1.602 \times 10^{-19}$ C, estableciendo que toda carga es un múltiplo entero de esta unidad fundamental: $q = n \cdot e$.
- Ecuación de la fuerza de Lorentz: $F = q(E + v \times B)$, reformulada para partículas discretas con carga q , representando la interacción fundamental entre cargas elementales y campos electromagnéticos.
- Ecuación de radiación de Larmor: $P = (q^2a^2)/(6\pi\epsilon_0c^3)$, que describe la potencia radiada por una carga acelerada, proporcionando la base teórica para comprender la emisión electromagnética desde una perspectiva corpuscular.

Herramientas experimentales

A finales del siglo XIX y principios del XX, se desarrollaron varios dispositivos y artefactos importantes para el estudio de los fenómenos eléctricos y electromagnéticos, muchos de ellos influenciados por la creciente visión atomista-corpuscular de la electricidad y los avances tecnológicos de la época. Algunos de los principales incluyen (Brenni, 2013):

- Tubos de rayos catódicos: Con mejoras significativas en el vacío, estos dispositivos permitieron a Thomson identificar el electrón y medir su relación carga/masa. El tubo de Crookes se convirtió en la herramienta fundamental para demostrar la naturaleza corpuscular de la electricidad.
- Bobinas de inducción potentes: Generaban altos voltajes necesarios para los experimentos con tubos de vacío. Al conectarse a estos tubos, permitieron estudiar descargas eléctricas en gases y fueron indispensables para el descubrimiento de los rayos X y la caracterización del comportamiento de las partículas cargadas.
- Electromagnetos: Los electromagnetos más potentes desarrollados en este periodo fueron esenciales para estudiar fenómenos como el efecto Zeeman, demostrando la influencia de campos magnéticos sobre la luz y revelando la naturaleza electromagnética de las radiaciones.
- Osciladores de Hertz: Desarrollados para producir y detectar ondas electromagnéticas, estos dispositivos confirmaron experimentalmente las predicciones de Maxwell y establecieron la relación entre electricidad, magnetismo y óptica, sentando las bases de la radiocomunicación.
- Tubos electrónicos (diodo y triodo): Representaron las primeras aplicaciones prácticas de la teoría electrónica. El diodo de Fleming (1904) y el triodo de De Forest (1906) aprovechaban el movimiento

controlado de electrones, marcando el nacimiento de la electrónica moderna y validando la comprensión corpuscular de la electricidad.

Estos dispositivos y artefactos permitieron a los científicos de finales del siglo XIX y principios del XX explorar la naturaleza fundamental de la electricidad y el electromagnetismo a un nivel sin precedentes, proporcionando evidencia crucial para la teoría electrónica de la materia y sentando las bases para la física moderna y la tecnología electrónica.

7. SIGNIFICADO EN TEORÍA CUÁNTICA DE CAMPOS

La Teoría Cuántica de Campos (TCC) es el marco teórico que unifica la mecánica cuántica con la relatividad especial. La carga eléctrica juega un papel fundamental en varios aspectos de esta teoría. Como fuentes documentales para los diferentes apartados hemos seleccionado Nair (2005) y Zee (2003).

7.1. Fenómenos y problemas

Entre los fenómenos físicos abordados por la TCC destacamos:

- Efecto Compton: La dispersión de fotones por electrones donde la longitud de onda del fotón aumenta debido a la transferencia de energía.
- Producción de pares electrón-positrón: Creación de pares partícula-antipartícula a partir de fotones energéticos.
- Correcciones radiativas al momento magnético del electrón: El valor observado del momento magnético del electrón difiere ligeramente del valor predicho por la mecánica cuántica (factor $g=2$), debido a interacciones con el campo electromagnético cuantizado.
- Polarización del vacío y apantallamiento: Fenómeno donde el vacío cuántico actúa como un medio dieléctrico que puede ser polarizado por campos electromagnéticos. Esto provoca que la carga efectiva observada de una partícula varíe con la distancia de observación, aumentando a distancias más cortas (o energías más altas).
- Efecto Aharonov-Bohm: Fenómeno donde partículas cargadas son afectadas por campos electromagnéticos incluso cuando viajan por regiones donde el campo es nulo, revelando el papel fundamental del potencial electromagnético en la teoría cuántica.

7.2. Conceptualización y teorías

En la TCC la carga eléctrica no es simplemente una propiedad de las partículas, sino una manifestación profunda de los principios de simetría que gobiernan las interacciones fundamentales. Específicamente:

- Carga como generador de simetría gauge: En la TCC, la carga eléctrica se interpreta como el generador de las transformaciones de simetría gauge U(1). Esta relación fundamental, establecida por el

teorema de Noether, explica por qué la carga eléctrica se conserva en todas las interacciones.

- Carga efectiva y renormalización: La TCC reconceptualiza la carga como una cantidad que "fluye" con la escala de energía. La carga eléctrica observable es resultado de un proceso de renormalización que maneja las divergencias cuánticas, permitiendo predicciones físicas precisas.
- Cuantización de la carga: La TCC proporciona varios mecanismos teóricos para explicar la ya conocida cuantización de la carga eléctrica, incluyendo la condición de cuantización de Dirac (relacionada con monopolos magnéticos) y teorías de gran unificación.
- Confinamiento de carga: Mecanismo teórico que explica por qué ciertas cargas (como la carga de color en QCD) nunca se observan aisladas, sino siempre en estados ligados neutros, ilustrando principios fundamentales sobre la naturaleza de las interacciones basadas en cargas.

La evolución histórica ilustra cómo el significado de la carga eléctrica ha transitado desde una propiedad atribuida a partículas discretas hacia un concepto integrado en la estructura matemática de las posibles configuraciones o estados de un sistema físico en TCC, reflejando una tendencia general en física teórica hacia explicaciones basadas en principios de simetría y estructuras algebraicas abstractas.

7.3. Herramientas simbólicas y experimentales

Indicamos las principales herramientas simbólicas y dispositivos experimentales introducidos en TCC.

Representaciones simbólicas y ecuaciones fundamentales

En la Teoría Cuántica de Campos, la carga eléctrica se expresa mediante formalismos matemáticos precisos que revelan su naturaleza fundamental. Entre las ecuaciones más importantes destacan:

- Lagrangiano de electrodinámica cuántica: $L = \Psi(i\hbar\gamma^\mu D_\mu - m)\Psi - (1/4)F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}$, con $D_\mu = \partial_\mu + ieA_\mu/\hbar$. Esta expresión codifica cómo la carga e determina la interacción entre fermiones y el campo electromagnético, manifestando la conservación de carga como consecuencia de la simetría gauge $U(1)$.
- Ecuación del grupo de renormalización: $\mu(\partial e/\partial\mu) = \beta(e)$, donde μ representa la escala de energía y $\beta(e)$ la función beta. Esta relación describe cómo la carga efectiva "fluye" con la escala de observación, aumentando a distancias más cortas debido a efectos cuánticos de polarización del vacío.

Estas formulaciones matemáticas representan la evolución conceptual de la carga eléctrica: desde una propiedad discreta de partículas hacia un parámetro dinámico integrado en la estructura fundamental de las interacciones cuánticas relativistas.

Dispositivos experimentales

La TCC es principalmente un marco teórico, y muchos de sus estudios sobre la carga eléctrica son conceptuales o matemáticos. Sin embargo, existen varios dispositivos experimentales que se han desarrollado para verificar sus predicciones:

- Sistemas integrados de aceleradores y detectores: Instalaciones experimentales como el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) que combinan tecnologías complementarias. Los aceleradores impulsan partículas cargadas a velocidades relativistas, mientras que los detectores asociados (cámaras de burbujas, detectores de silicio y calorímetros) registran sus trayectorias e interacciones.
- Trampas de Penning: Dispositivos que confinan partículas cargadas mediante campos electromagnéticos para estudios de precisión, como la medición del momento magnético del electrón predicho por la QED.
- Interferómetros cuánticos: Utilizados para verificar efectos como el Aharonov-Bohm, donde partículas cargadas muestran patrones de interferencia influenciados por potenciales electromagnéticos incluso en ausencia de campos.
- Sistemas de efecto Hall cuántico: Dispositivos que permiten estudiar la cuantización de la conductancia y fenómenos de carga fraccionaria en sistemas bidimensionales.

En el límite de bajas energías, las predicciones de la TCC se reducen a los resultados del electromagnetismo clásico.

8. HOLO SIGNIFICADO DE CARGA ELÉCTRICA

Nuestro análisis histórico-epistemológico del significado holístico de la carga eléctrica ha permitido construir un modelo de los principales sentidos o significados parciales que ha tomado la carga en diversos contextos históricos. Desde la perspectiva de la ecología de significados (Godino, 1994, Godino y Batanero, 1994) hemos identificado tanto el nicho ecológico como el papel que la carga eléctrica, en sus diversas variedades, ha desempeñado en la física como actividad humana y sistema de objetos culturales. La aproximación antropológica y pragmatista del EOS ayuda a describir la carga eléctrica como un constructo emergente de prácticas operativas y discursivas realizadas ante determinados fenómenos físicos, superando visiones reduccionistas al integrar aspectos situacionales-fenomenológicos, procedimentales y argumentativos.

El holosignificado de la carga (Figura 1) aporta una perspectiva complementaria sobre la historia y epistemología de la electricidad, útil para la planificación educativa en física. En esta reconstrucción no buscamos la mejor definición del concepto, sino indagar las distintas conceptualizaciones y su evolución. Como señala Doménech et al. (2003):

La cuestión no estriba en buscar una concepción correcta como punto de partida, sino en aceptar que los conocimientos son construcciones

tentativas destinadas a evolucionar. Se trata, en definitiva, de plantear la construcción de significados como el fruto de aproximaciones

sucesivas, sin renunciar a la exigencia básica de significatividad (p. 293).

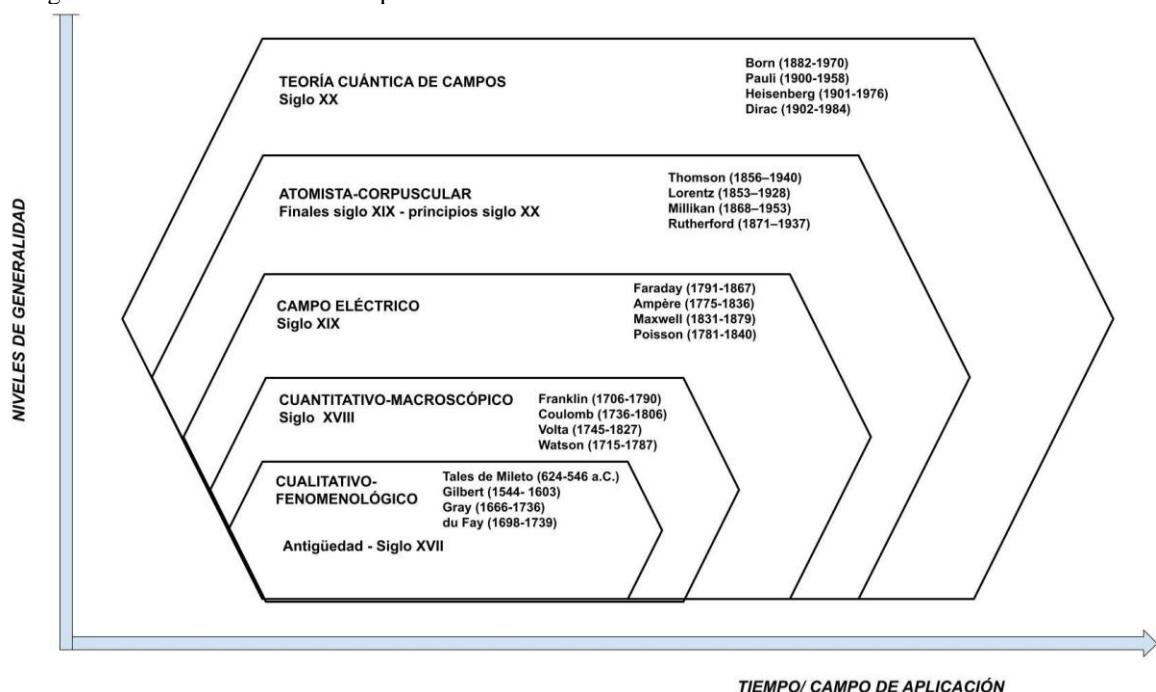


Figura 1 - Holosignificado del concepto de carga eléctrica.

¿Es posible identificar un rasgo común a los diferentes usos o significados pragmáticos de carga eléctrica desde un punto de vista epistemológico? Bunge (1973) define la carga eléctrica como una función que asigna un valor real a una propiedad de ciertos sistemas de objetos. Desde el punto de vista de la física teórica la carga eléctrica se representa mediante una función Q del conjunto producto cartesiano del conjunto Σ de sistemas materiales por el conjunto S de sistema de unidades concebibles en el conjunto R^+ de los números reales positivos: $Q: \Sigma \times S \rightarrow R^+$. En el caso de $\Sigma =$ electrones y $S =$ unidades electrostáticas en una escala métrica uniforme, la función carga asigna para cada σ en Σ : $Q(\sigma, esu) = e = 4.802 \times 10^{-10}$ (unidades electrostáticas).

Esta descripción matemática de la carga eléctrica es eficaz para expresar las relaciones con otras magnitudes y hacer previsiones, pero no refleja su naturaleza física, el mecanismo causal subyacente. Como afirma Feynman,

La física no es matemáticas, y las matemáticas no son física. Se ayudan mutuamente, pero en física hay que conocer la conexión de las palabras con el mundo real. Al final es necesario traducir lo hallado al lenguaje coloquial, a los pedazos de cobre y vidrio con los que uno va a realizar experimentos (Feynman, 2005, p. 61)

La naturaleza de la carga eléctrica es un misterio que aún no ha sido resuelto por la física de manera definitiva. Aunque existen modelos y teorías que describen cómo interactúan las partículas cargadas, no sabemos qué es la carga en sí misma. “En gran parte de la física, damos por sentado que la carga del protón y la del electrón son exactamente iguales y opuestas. La electrodinámica

cuántica por sí sola tampoco es capaz de explicar este sorprendente hecho” (Zee, 2003, p. 118)

En este trabajo hemos seleccionado cinco etapas o contextos histórico-culturales en las cuales identificamos las prácticas operativas y discursivas sobre la carga eléctrica que, de acuerdo con el EOS, consideramos como sentidos o significados parciales. Este modelo del significado global de la carga se puede desarrollar, bien distinguiendo otros contextos (como la mecánica cuántica no relativista y la cromodinámica cuántica), o ampliando en cada significado la descripción de los fenómenos, las conceptualizaciones, las teorías, y las herramientas materiales y simbólicas puestas en juego.

9. IMPLICACIONES EDUCATIVAS

El modelo ontosemiótico de significados de los conceptos matemáticos y científicos conlleva una visión pragmática-antropológica del conocimiento, ampliando su visión, frecuentemente reducida a lo conceptual y procedimental (Hiebert y Lefevre, 1986; McCormick, 1997). Los significados son entendidos en términos pragmatistas, esto es, de sistemas de prácticas, objetos y procesos. Esto tiene implicaciones claras para el diseño educativo instruccional en cualquier nivel ya que implica indagar en los tipos de situaciones problemas que motivan el uso de los conceptos en los diferentes contextos, así como las prácticas operativas y discursivas requeridas para su solución.

Los significados parciales se pueden entender como modelos de conocimiento científico que incluyen componentes fenomenológicos, conceptuales y procedimentales, apoyados en medios de expresión y artefactos técnicos. En el marco del EOS, la

reconstrucción del holosignificado de los objetos conceptuales debe ser previa a cualquier planteamiento educativo específico. Este análisis holístico permite abordar cuestiones relacionadas con: (1) las transformaciones y adaptaciones de los saberes científicos en diversos niveles educativos; (2) el aprendizaje, incluyendo dificultades y niveles de comprensión; y (3) el diseño de procesos instruccionales con máxima idoneidad didáctica según los contextos.

En el EOS, el aprendizaje se entiende como la progresiva apropiación de los significados institucionales implementados, que deben basarse en una planificación previa fundamentada. La adaptación ecológica de estos contenidos requiere partir de un significado global u holístico del contenido objeto de enseñanza, permitiendo así una selección representativa de los significados planificados y una evaluación idónea de los aprendizajes.

La reconstrucción holística del significado de la carga eléctrica puede ser útil para el diseño educativo en ciencias experimentales. El reconocimiento de distintos niveles de conocimiento desde una perspectiva histórico-cultural ayuda a comprender los significados que atribuyen estudiantes y profesores al concepto de carga (Guisasola et al., 2008; Furió, & Guisasola, 1998) y a planificar procesos de enseñanza coherentes según las capacidades cognitivas del alumnado. También contribuye a identificar y resolver los conflictos semióticos que surgen en los diferentes niveles educativos.

Esta perspectiva global puede ayudar a superar visiones parciales y sesgadas, como la que describen Stocklmayer y Treagust (1994) en libros de texto de física, donde persisten modelos anticuados que explican las corrientes eléctricas como fluidos de sustancias o partículas. Incluso en textos recientes, la corriente eléctrica se presenta mediante modelos antropomórficos o como electrones que circulan por conductores, sin considerar las limitaciones de estas metáforas frente a los fenómenos cuánticos y de física del estado sólido que realmente ocurren en las corrientes eléctricas.

10. REFERENCIAS

- Brenni, P. (2013). From workshop to factory: The evolutions of the instrument-making industry, 1950-1930. En In J. Z. Buchwald y R. Fox (Eds). *The Oxford handbook of the history of physics* (pp. 594-650) Oxford University Press
- Buchwald, J. Z. (2013a). Electricity and magnetism to Volta. En J. Z. Buchwald y R. Fox (Eds), *The Oxford handbook of the history of physics* (Chapter 14, pp. 432-442). Oxford University Press.
- Buchwald, J. Z. (2013b). Electrodynamics from Thomson and Maxwell to Hertz. En J. Z. Buchwald y R. Fox (Eds). *The Oxford handbook of the history of physics* (Chapter 19, pp. 432-442). Oxford University Press.
- Bunge, M. (1973). *Philosophy of physics*. Springer.
- Doménech, J. L., Gil-Pérez, D., Gras, A., Guisasola, J., Martínez-Torregrosa, J., Salinas, J., Trumper, R. y Valdés, P. (2003). La enseñanza de la energía: una propuesta de debate para un replanteamiento global. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 20(3), 285-311.
- Deng, Z. (2018). Pedagogical content knowledge reconceived: Bringing curriculum thinking into the conversation on teachers' content knowledge. *Teaching and Teacher Education* 72 (2018) 155-164. <https://doi.org/10.1016/j.tate.2017.11.021>
- Darrigol, O. (2000). *Electrodynamics from Ampère to Einstein*. Oxford University Press.
- Feather, N. (1968). *Electricity and matter*. Edinburgh University Press.
- Feynman, R. (2005). *El carácter de la ley física*. Tusquets Editores.
- Furió, C., y Guisasola, J. (1998). Difficulties in learning the concept of electric field. *Science Education*, 82(4), 511-526. [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-237X\(199807\)82:4%3C511::AID-SCE6%3E3.0.CO;2-E](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1098-237X(199807)82:4%3C511::AID-SCE6%3E3.0.CO;2-E)
- Gess-Newsome, J., Taylor, J. A., Carlson J., Gardner, A. I., Wilson, C. D. y Stuhlsatz, M. A. M. (2017). Teacher pedagogical content knowledge, practice, and student achievement, *International Journal of Science Education*, 1-20. <https://doi.org/10.1080/09500693.2016.1265158>
- Godino, J. D. (1994). Ecology of mathematical knowledge: An alternative vision of the popularization of mathematics. En A. Joseph, F. Mignot, F. Murat, B. Prum, & R. Rentschler (Eds.), *First European Congress of Mathematics* (vol. 3, pp. 150–156). Birkhauser.
- Godino, J. D. (2024). *Enfoque ontosemiótico en educación matemática. Fundamentos, herramientas y aplicaciones*. McGraw Hill-Aula Magna. <https://hdl.handle.net/10481/93596>
- Godino, J. D. Batanero, C. y Font, V. (2007). The ontosemiotic approach to research in mathematics education. *ZDM. The International Journal on Mathematics Education*, 39 (1-2), 127-135. <http://dx.doi.org/10.1007/s11858-006-0004-1>
- Guisasola, J., Zubimendi, J. L., Almudí, J. M., y Ceberio, M. (2008). Dificultades persistentes en el aprendizaje de la electricidad. Estrategias de razonamiento de los estudiantes al explicar fenómenos de carga eléctrica. *Enseñanza de las Ciencias*, 177-192.
- Hacking, I. (1992). ‘Style’ for historians and philosophers. *Studies in history and philosophy of science*, 23 (1), 1-20. [http://dx.doi.org/10.1016/0039-3681\(92\)90024-Z](http://dx.doi.org/10.1016/0039-3681(92)90024-Z)
- Heilbron, J. L. (1979). *Electricity in the 17th and 18th centuries. A study of early modern physics*. University of California Press.
- Hiebert, J. y Lefevre, P. (1986). Conceptual and procedural knowledge in mathematics: an introductory analysis. En Hiebert (Ed.) *Procedural and conceptual knowledge: The case of mathematics* (pp. 1–27). Lawrence Erlbaum Associates.

- Kragh, H. (2001). *Quantum generations: a history of physics in the twentieth century*. Princeton: Princeton University Press.
- McCormick, R. (1997). Conceptual and procedural knowledge. *International Journal of Technology and Design Education*, 7, 141–159. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1008819912213>
- Morin, E. (1992). *El método. Las ideas. Su hábitat, su vida, sus costumbres, su organización*. Cátedra.
- Nair, V. P. (2005). *Quantum field theory. A modern perspective*. Springer.
- Peirce, C. S. (1931-58). *Collected papers of Charles Sanders Peirce*, 8 vols. C. Hartshorne, P. Weiss, & A. W. Burks (Eds.). Harvard University Press.
- Rheinberger, H-J. (2010). *On historicizing epistemology. An essay*. Stanford University Press.
- Steinle, F. (2013). Electromagnetism and field physics. En J. Z. Buchwald & y R. Fox (Eds), *The Oxford handbook of the history of physics* (Chapter 18, pp. 533-570). Oxford University Press.
- Stocklmayer, S. M. y Treagust, D. F. (1994). A historical analysis of electric currents in textbooks: A century of influence on physics education. *Science & Education*, 3, 131-154
- Toulmin, S. (1977). *Human understanding*. Oxford University Press. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00486388>
- Whittaker, E. (1951). *A history of the theories of aether and electricity*. Vol. 1: The classical theories. Thomas Nelson and Son.
- Whittaker, E. (1953). *A history of the theories of aether and electricity*. Vol. 2: The modern theories 1900-1926. Thomas Nelson and Son.
- Wittgenstein, L. (1953). *Philosophical investigations*. Basil Blackwell Ltd.
- Zee, A. (2003). *Quantum field theory in a nutshell*. Princeton University Press.