

FÍSICA II: ELECTROMAGNETISMO

1. Introducción

1.1 El conocimiento científico y la interpretación de los fenómenos físicos

Un aspecto fundamental que debe tenerse en cuenta al considerar los fenómenos relacionados con la electricidad y el magnetismo es la forma como estos han sido descubiertos, interpretados y comprendidos a lo largo de la historia. Desde tiempos remotos, el ser humano ha observado que la naturaleza manifiesta comportamientos particularmente llamativos cuando se presentan fenómenos como el rayo, las auroras boreales o la atracción entre ciertos materiales. Inicialmente, estos hechos eran percibidos como acontecimientos extraordinarios, carentes de una explicación racional, y se interpretaban mediante el mito, la superstición o la tradición cultural.

Durante gran parte de la historia, no existía aún el concepto moderno de explicación causal ni un método sistemático de análisis racional de los fenómenos naturales. Los hechos simplemente se observaban y se aceptaban como dados, sin una comprensión clara de las razones por las cuales ocurrían. El tránsito desde estas interpretaciones míticas hacia explicaciones racionales constituye uno de los procesos más importantes en la historia del conocimiento humano y marca el surgimiento de la Ciencia como una forma particular de entender la realidad.

En este sentido la Ciencia puede definirse como un conjunto de conocimientos obtenidos mediante la observación sistemática de los fenómenos, el razonamiento lógico y la formulación de modelos teóricos que permiten deducir principios y leyes generales con capacidad predictiva y verificables experimentalmente. Su objetivo no se limita a describir la naturaleza, sino a interpretarla en términos causales, estableciendo relaciones coherentes entre los fenómenos observables y las estructuras teóricas que los explican.

El motor fundamental del conocimiento científico es la curiosidad: la capacidad de mirar los hechos cotidianos con una perspectiva distinta y preguntarse por las causas que los originan. Cuando los fenómenos se analizan desde un enfoque racional, causal y lógico, se hace posible inferir su comportamiento futuro bajo condiciones específicas. La Ciencia no ofrece certezas absolutas, pero sí estimaciones altamente confiables sobre cómo se comportará la naturaleza dentro de un marco bien definido. Esta capacidad predictiva es uno de los rasgos distintivos del conocimiento científico y la base de su utilidad práctica.

Si bien la Ciencia no constituye el único camino válido hacia el conocimiento, ha demostrado ser el método más preciso, consistente y eficaz para interpretar los fenómenos naturales observables. Su desarrollo ha permitido no solo una comprensión profunda de la naturaleza, sino también la creación de tecnologías que transforman radicalmente la vida humana. En este sentido, la Ciencia se convierte en el fundamento epistemológico sobre el cual se apoyan las disciplinas de la ingeniería.

1.2 Los fenómenos eléctricos y magnéticos como objeto de estudio científico

Los fenómenos eléctricos y magnéticos, aunque conocidos desde la antigüedad, comenzaron a ser comprendidos científicamente solo cuando se estableció la posibilidad de analizarlos en términos de causas, efectos y regularidades. El paso decisivo fue reconocer que estos fenómenos no eran hechos aislados o caprichosos, sino manifestaciones de leyes físicas subyacentes que podían ser descubiertas mediante la observación rigurosa y la experimentación controlada.

A medida que se desarrollaron métodos experimentales más precisos y se introdujo el lenguaje matemático como herramienta de modelado, fue posible formular teorías cada vez más generales y abstractas. Estas teorías no solo explicaban los fenómenos conocidos, sino que permitían predecir nuevos comportamientos y diseñar experimentos para verificarlos. El electromagnetismo es uno de los ejemplos más notables de este proceso de unificación teórica, al integrar fenómenos eléctricos, magnéticos y ópticos dentro de un mismo marco conceptual.

La posibilidad de modelar e interpretar los fenómenos eléctricos y magnéticos constituye hoy la base del desarrollo tecnológico contemporáneo. A partir del análisis de hechos físicos elementales, la Ciencia ha evolucionado hasta un punto en el cual es posible extraer una enorme cantidad de aplicaciones prácticas. Estas aplicaciones son las que hacen posible la electrónica moderna, desde los sistemas de comunicación hasta los dispositivos de procesamiento de información y control.

1.3 Ciencia, modelado y formación del ingeniero electrónico

Desde la perspectiva de la Ingeniería Electrónica, el conocimiento científico adquiere un valor particular en la medida en que permite construir modelos que describen el comportamiento de sistemas reales. Estos modelos, aunque idealizados, capturan los aspectos esenciales de los fenómenos físicos y permiten analizar, diseñar y optimizar dispositivos y circuitos electrónicos.

El ingeniero no se limita a observar la naturaleza, sino que la somete a condiciones controladas, apoyándose en leyes y principios derivados de teorías científicas bien establecidas. En este contexto, el estudio del electromagnetismo no constituye un ejercicio meramente teórico, sino una herramienta fundamental para comprender el funcionamiento de los sistemas electrónicos y desarrollar soluciones tecnológicas eficientes.

Así, la Ciencia actúa como un puente entre la observación de la naturaleza y la creación tecnológica, y el electromagnetismo se presenta como uno de los pilares conceptuales en la formación del ingeniero electrónico.

1.4 El Concepto de Ciencia

La Ciencia se define como un conjunto de conocimientos obtenidos mediante la observación y el razonamiento, sistemáticamente estructurados y de los que se deducen principios y leyes generales con capacidad predictiva y comprobables experimentalmente.

- Concepto de Ciencia (El motor del conocimiento: La curiosidad)
 - La Ciencia como conocimiento derivado de los hechos de la experiencia.

Ciencia

Investigar

Observar

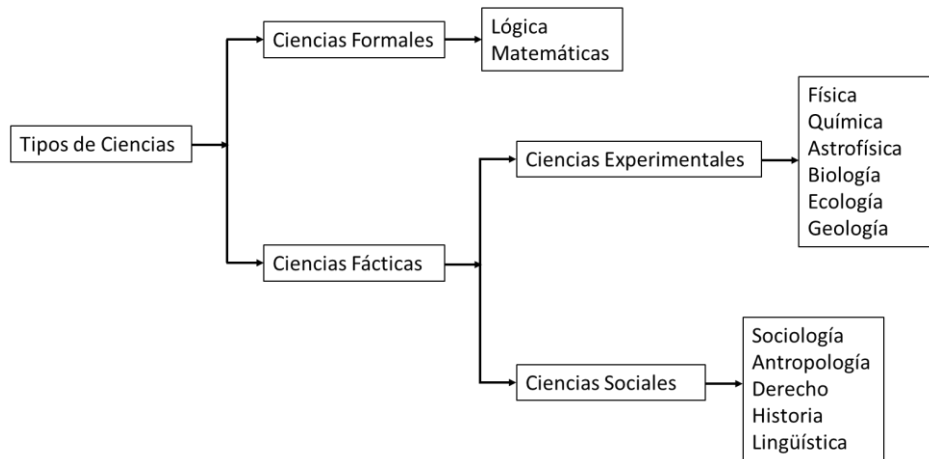
Analizar

Mirar las cosas cotidianas con ojos diferentes. Preguntar por el por qué se dan las cosas.

Cuando se miran las cosas con otros ojos, buscando la razón por la que puedan darse los fenómenos, es decir, buscando una explicación racional, causal y lógica, es posible predecir o inferir un evento en el futuro. La Ciencia permite saber qué va a suceder en el futuro dadas unas condiciones particulares, con un determinado grado de incertidumbre. No hay en principio una certeza total, pero sí una estimativo altamente probable de que las cosas sucedan como la Ciencia lo predice. Es decir, se estima el comportamiento futuro en un contexto particular limitado a unas condiciones específicas y concretas. Todo ello basado en el entendimiento de unos fenómenos y el conocimiento de unas leyes y principios soportados en una Teoría Científica.

La Ciencia no es el único camino válido hacia el conocimiento, pero sí es el que ha mostrado ser el más preciso, práctico y eficiente para inferir fenómenos naturales observables. Es el que ha permitido el desarrollo práctico de la tecnología y posee la interpretación más plausible de los fenómenos de la naturaleza.

- Lectura: Nueva Guía de la Ciencia (Introducción) - Isaac Asimov
- Lectura: Grecia, la doctrina de la demostración y la tragedia – Estanislao Zuleta
- Lectura: El mundo y sus demonios “Un dragón en el garaje” – Carl Sagan
- Tipos de Ciencias:
 - Ciencias Formales: (No estudian fenómenos experimentales, construyen básicamente modelos)
 - Lógica y matemática
 - Ciencias Fáticas: (Estudian hechos observables)
 - Ciencias Experimentales: Estudian los fenómenos observables de la naturaleza en términos de leyes físicas: geología, química, física, biología.
 - Ciencias Sociales o Ciencias Humanas: Son las disciplinas que estudian al ser humano en términos de cultura y sociedad: antropología, historia, psicología, sociología.

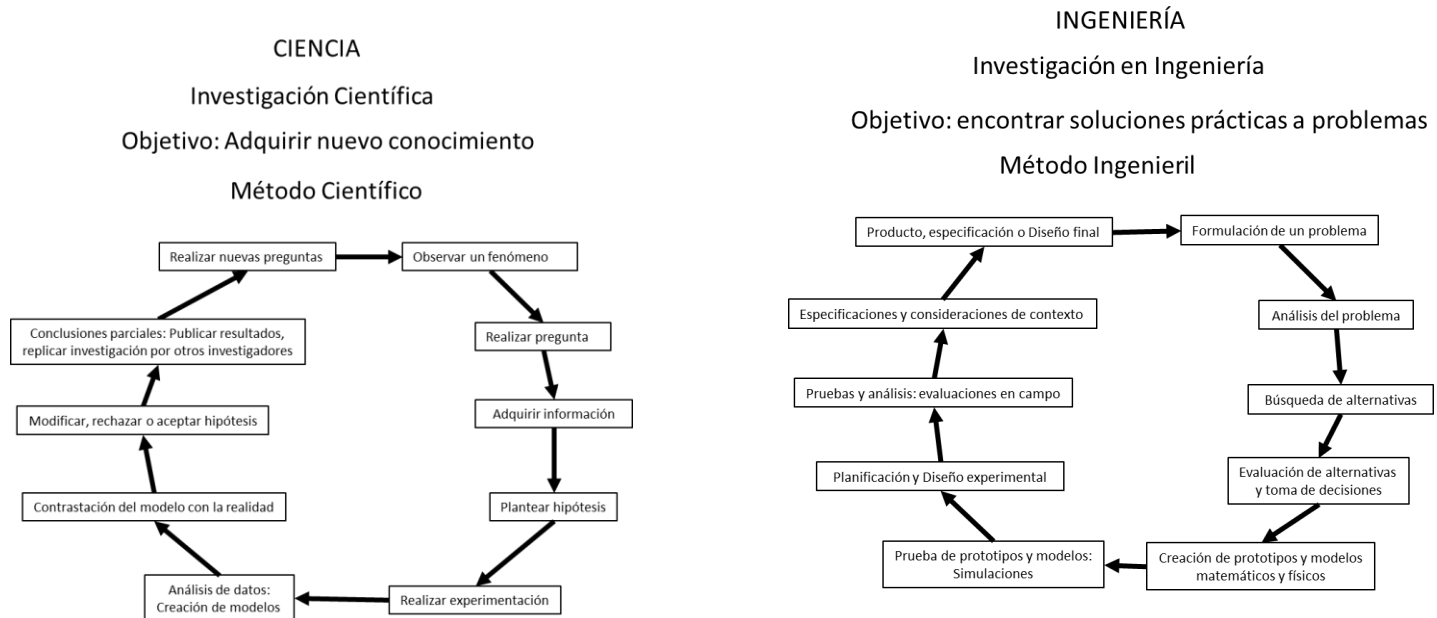


1.4.1 El Método Científico

- El Método Científico
 - Observación
 - Cuestionamiento
 - Hipótesis (Creación del Modelo Hipotético)
 - Experimento
 - Contrastación de resultados
 - Revisión del Modelo
- Construcción de Hipótesis
 - ¿Qué es y cómo se construye una hipótesis?
 - ¿Qué diferencia una hipótesis científica?
- Criterios estadísticos
 - Estadística: organización de datos que permiten inferir resultados estimados a partir de criterios probabilísticos.
 - Probabilidad: modelo que estima la certidumbre de que algún fenómeno en función de la relación entre el número de eventos favorables y el número de eventos posibles.
- Concepto de Modelo:
 - Modelo matemático: axiomas y teoremas
 - Modelo Físico: simulaciones e inferencias estadísticas
 - ¿Qué es un modelo estadístico?
- Rangos de validez: Inferencias
- Pensamiento Crítico
 - Lectura: Grecia: la Teoría de la Demostración y La Tragedia: Estanislao Zuleta

1.4.2 Comparación Método Científico Método Ingenieril

El método científico y el método ingenieril constituyen dos enfoques sistemáticos de investigación que, si bien comparten herramientas conceptuales y técnicas, difieren fundamentalmente en sus **objetivos, criterios de validación y productos finales**. Ambos métodos se retroalimentan de manera constante, pero responden a finalidades epistemológicas y prácticas distintas.



El **método científico** tiene como objetivo principal la **generación de nuevo conocimiento** acerca de los fenómenos naturales o sociales. Su propósito es formular explicaciones, modelos y teorías que describan, expliquen o predigan regularidades observables del mundo. Este método se estructura típicamente a partir de la observación de un fenómeno, la formulación de preguntas relevantes, la construcción de hipótesis, la obtención sistemática de datos mediante experimentación u observación controlada, y el análisis crítico de los resultados. La validación del conocimiento científico se basa en criterios como la coherencia lógica, la contrastación empírica, la reproducibilidad y la posibilidad de refutación, así como en la evaluación intersubjetiva por parte de la comunidad científica.

En este contexto, el método científico es esencialmente **explicativo y descriptivo**: busca aproximarse, de manera siempre provisional, a representaciones cada vez más precisas del funcionamiento de la naturaleza. Sus resultados no se evalúan principalmente por su utilidad inmediata, sino por su capacidad para ampliar el marco conceptual disponible y generar nuevas preguntas de investigación.

El **método ingenieril**, en cambio, se orienta fundamentalmente a la **resolución de problemas prácticos** mediante el diseño, desarrollo e implementación de soluciones técnicas concretas. Parte de una necesidad o restricción definida —frecuentemente asociada a condiciones económicas, sociales, tecnológicas o normativas— y utiliza conocimientos provenientes de las ciencias fácticas y formales para concebir artefactos, sistemas o procesos que satisfagan especificaciones dadas.

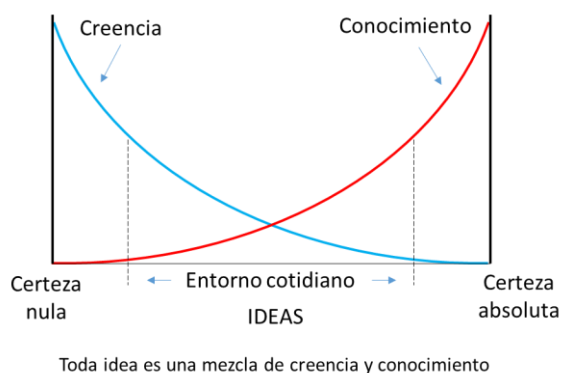
El proceso ingenieril incluye la formulación y análisis del problema, la generación y evaluación de alternativas, la toma de decisiones bajo restricciones múltiples, la creación de modelos y prototipos, la planificación y ejecución de pruebas, y la iteración sobre el diseño hasta alcanzar una solución funcionalmente aceptable. A diferencia del método científico, la validación en ingeniería se centra en **criterios de desempeño**, tales como eficiencia, confiabilidad, seguridad, costo y viabilidad, más que en la verdad o falsedad de una hipótesis.

Desde esta perspectiva, el método ingenieril es primordialmente **prescriptivo y constructivo**: no busca explicar cómo es el mundo, sino determinar cómo **debe ser un sistema** para cumplir un propósito específico. No obstante, el diseño ingenieril depende de manera crítica del conocimiento científico disponible, y frecuentemente genera, a su vez, nuevos problemas y preguntas que retroalimentan la investigación científica.

En síntesis, mientras que el método científico persigue la comprensión y modelización de la realidad mediante la formulación y contrastación de hipótesis, el método ingenieril se orienta a la aplicación de ese conocimiento para la creación de soluciones prácticas bajo restricciones concretas. Ambos métodos no constituyen dominios aislados, sino componentes complementarios de un mismo proceso de producción de conocimiento y tecnología.

1.4.3 Ideas, creencia y conocimiento

Toda idea humana puede entenderse como una combinación variable de **creencia** y **conocimiento**, entendidos no como categorías excluyentes, sino como dimensiones que coexisten en distintos grados dentro de cualquier contenido cognitivo. La proporción relativa entre ambos componentes determina el nivel de certeza objetiva, justificación racional y validez intersubjetiva atribuible a una idea.



Las **creencias** se caracterizan por estar fundamentadas principalmente en apreciaciones subjetivas, experiencias individuales, tradiciones culturales, intuiciones o disposiciones emocionales. Desde el punto de vista epistemológico, su rasgo distintivo es que **no requieren necesariamente evidencia empírica ni demostración lógica formal** para ser sostenidas por un sujeto. En consecuencia, las creencias no son, en general, susceptibles de verificación objetiva ni de contrastación sistemática, lo que limita su validez intersubjetiva. No obstante,

ello no implica que carezcan de significado o función cognitiva, ya que desempeñan un papel central en la interpretación del mundo y en la toma de decisiones en contextos de información incompleta.

El **conocimiento**, en contraste, se define como un conjunto de ideas respaldadas por **evidencia empírica, coherencia lógica interna o demostración formal**, lo que permite su evaluación independiente del sujeto que las sostiene. En el ámbito científico, el conocimiento se construye mediante procedimientos metodológicos explícitos —observación, medición, experimentación, formalización y razonamiento lógico— que posibilitan su verificación, refutación o revisión crítica por parte de una comunidad epistémica. De este modo, el conocimiento aspira a una objetividad operativa, aun cuando permanezca abierto a revisión en función de nueva evidencia o mejores modelos explicativos.

En el contexto de la vida cotidiana, la mayoría de las ideas no se sitúan en los extremos de una creencia puramente subjetiva ni de un conocimiento plenamente justificado, sino en una **región intermedia** donde ambos componentes se combinan. En esta zona, las decisiones prácticas y los juicios ordinarios se apoyan simultáneamente en información objetiva parcial y en supuestos no completamente demostrados. Esta condición intermedia refleja las limitaciones inherentes al conocimiento humano en entornos complejos y dinámicos.

Un **conocimiento absoluto**, entendido como certeza máxima dentro de un sistema formal bien definido, se encuentra principalmente en el dominio de las **ciencias formales**, como la lógica y la matemática. En estos campos, la verdad de las proposiciones se establece mediante demostraciones deductivas a partir de axiomas explícitos, y no depende de la experiencia empírica ni de condiciones contingentes del mundo físico. La certeza alcanzada es, por tanto, interna al sistema formal considerado.

Por el contrario, una **creencia absoluta**, desprovista de todo referente empírico o criterio racional de validación, puede dar lugar a construcciones cognitivas completamente desligadas de la realidad compartida. En tales casos, la certeza subjetiva puede ser máxima, mientras que la correspondencia con hechos objetivos es nula, como ocurre en ciertos estados delirantes o alucinatorios descritos en la psicopatología.

Desde esta perspectiva, el progreso del conocimiento humano no consiste en la eliminación total de la creencia, sino en la **reducción progresiva de su peso relativo** mediante la incorporación de evidencia, la formalización conceptual y la aplicación de mecanismos de validación. El avance intelectual puede entenderse así como un desplazamiento gradual desde regiones dominadas por la creencia hacia regiones dominadas por el conocimiento, sin que ninguno de estos componentes desaparezca por completo del proceso cognitivo.

2. Carga Eléctrica

2.1 Orígenes: las primeras percepciones de los fenómenos eléctricos y magnéticos

Mucho antes de que existiera una comprensión científica de la electricidad y el magnetismo, el ser humano ya había observado múltiples manifestaciones de estos fenómenos en la naturaleza. Sin embargo, en ausencia de un marco conceptual racional y de herramientas experimentales sistemáticas, tales manifestaciones eran interpretadas como hechos extraordinarios, misteriosos o incluso sobrenaturales. La explicación de estos fenómenos no se apoyaba en relaciones causales verificables, sino en narrativas míticas, religiosas o esotéricas.

Uno de los primeros registros históricos relacionados con la electricidad se encuentra en la antigua Grecia. La palabra *elektron* hacía referencia al ámbar, una resina fosilizada de origen vegetal. Se observó que, al frotar el ámbar con ciertos materiales, este adquiría la capacidad de atraer pequeños objetos livianos, como fragmentos de paja o polvo. Este comportamiento, hoy entendido como electrización por fricción, fue descrito por filósofos como Tales de Mileto (624 a. C.–546 a. C.), quien interpretó el fenómeno sin disponer aún de una distinción clara entre electricidad y magnetismo. En este contexto, se pensaba que el ámbar adquiría una especie de “fuerza vital” o propiedad especial inducida por el movimiento.

De manera paralela, se conocía la magnetita, un mineral natural con la capacidad de atraer el hierro. Este material fue hallado en la región de Magnesia, en Asia Menor, de donde proviene el término *magnetismo*. Al igual que en el caso del ámbar, la atracción ejercida por la magnetita era percibida como una propiedad intrínseca y enigmática del material, sin una explicación racional que permitiera comprender su origen o su alcance.

Además de estos efectos observables en materiales sólidos, la naturaleza ofrecía manifestaciones eléctricas de gran escala y espectacularidad. Fenómenos atmosféricos como el relámpago, el rayo y el trueno eran interpretados comúnmente como expresiones del poder divino o señales sobrenaturales. El fuego de San Telmo, una descarga luminosa visible en los mástiles de los barcos o en las chimeneas durante tormentas eléctricas, reforzaba la idea de fuerzas invisibles actuando sobre el mundo físico. Estos eventos, aunque hoy explicables en términos de ionización del aire y campos eléctricos intensos, eran percibidos como presagios o manifestaciones místicas.

Incluso en tiempos mucho más recientes, la incompreensión de los fenómenos eléctricos ha dado lugar a interpretaciones erróneas o explicaciones incompletas. El desastre del dirigible *Hindenburg*, ocurrido en 1937, fue durante años rodeado de especulación, antes de que se comprendiera adecuadamente el papel de la electricidad estática y la inflamabilidad del hidrógeno en la catástrofe.

Por otro lado, ciertos organismos vivos, como las anguilas eléctricas, eran capaces de producir descargas eléctricas perceptibles, lo cual reforzaba aún más la idea de que la electricidad era una propiedad misteriosa asociada a fuerzas ocultas de la naturaleza o incluso a capacidades sobrenaturales de algunos seres.

Estos ejemplos históricos muestran que los fenómenos eléctricos y magnéticos fueron inicialmente reconocidos por sus efectos visibles, pero interpretados desde marcos conceptuales ajenos al pensamiento científico moderno. Solo con el desarrollo gradual del método experimental, la formalización matemática y la noción de ley física fue posible abandonar estas explicaciones místicas y avanzar hacia una comprensión racional y sistemática del electromagnetismo.

2.2 De la interpretación mítica a la experimentación temprana

El tránsito desde la interpretación mítica de los fenómenos eléctricos y magnéticos hacia una comprensión racional no fue inmediato ni lineal. Durante siglos, estos fenómenos permanecieron en los márgenes del conocimiento sistemático, precisamente porque no parecían encajar en las explicaciones mecánicas simples que dominaban la física temprana. Sin embargo, a partir del Renacimiento y, con mayor fuerza, durante los siglos XVII y XVIII, comenzó a gestarse un cambio fundamental: la sustitución de la explicación simbólica por la **experimentación controlada** y la **observación sistemática**.

Uno de los primeros hitos en este proceso fue la obra de William Gilbert (Inglaterra, 1544–1603), quien en su tratado *De Magnete* distinguió claramente entre los fenómenos eléctricos asociados al ámbar y los fenómenos magnéticos propios de la magnetita. Gilbert introdujo una clasificación experimental de los materiales y estableció que la Tierra misma podía comportarse como un gran imán. Este paso fue crucial, ya que separó definitivamente la electricidad y el magnetismo de explicaciones animistas o místicas, ubicándolos dentro del ámbito de las propiedades físicas de la materia.

Posteriormente, el estudio de la electricidad adquirió un carácter más cuantitativo. Experimentos como los de Benjamin Franklin en el siglo XVIII, en particular su célebre demostración de la naturaleza eléctrica del rayo, consolidaron la idea de que los fenómenos atmosféricos y los efectos eléctricos observados en laboratorio obedecían a las mismas leyes. La electricidad dejó de ser un fenómeno curioso o anecdótico para convertirse en un objeto legítimo de investigación científica.

Este proceso se profundizó con los trabajos de Charles-Augustin de Coulomb (Francia, 1736–1806), quien introdujo la medición precisa de las fuerzas eléctricas mediante la balanza de torsión. Con ello, la electricidad pasó a formar parte de la física matemática, permitiendo formular leyes cuantitativas verificables experimentalmente. El magnetismo siguió una evolución similar, hasta que ambos campos, inicialmente estudiados de manera independiente, comenzaron a mostrar conexiones profundas.

La experimentación temprana no solo permitió describir los fenómenos, sino que estableció una nueva forma de aproximarse a la naturaleza: los fenómenos eléctricos y magnéticos podían reproducirse, medirse y modelarse, sentando las bases de una teoría unificada.

2.3 La ruptura epistemológica: del mito a la explicación científica

El paso de una explicación mítica a una explicación científica constituye una ruptura epistemológica fundamental en la historia del conocimiento. Mientras que el mito ofrece relatos cerrados, simbólicos y no verificables, la ciencia se basa en explicaciones abiertas, provisionales y sometidas a contraste experimental.

En el caso de la electricidad y el magnetismo, esta ruptura implicó abandonar la idea de fuerzas ocultas o voluntades invisibles y adoptar el principio de causalidad física. Los fenómenos dejaron de interpretarse como manifestaciones excepcionales y pasaron a entenderse como consecuencias necesarias de condiciones físicas específicas. La pregunta dejó de ser “¿qué significa este fenómeno?” para convertirse en “¿bajo qué condiciones ocurre y cómo puede reproducirse?”.

Esta transformación epistemológica fue acompañada por el desarrollo del método científico moderno, en el cual la observación, la formulación de hipótesis, la experimentación y la validación empírica se articulan de manera coherente. La electricidad y el magnetismo se convirtieron así en dominios ejemplares de este nuevo enfoque, precisamente por la dificultad inicial que implicaba comprenderlos sin recurrir a entidades metafísicas.

Para el ingeniero electrónico, esta ruptura no es solo un hecho histórico, sino una lección metodológica. La ingeniería se apoya en modelos científicos que, aunque abstractos, poseen un poder predictivo extraordinario. La confiabilidad de un sistema de comunicaciones, de un circuito o de un dispositivo electrónico no descansa en interpretaciones cualitativas, sino en leyes físicas formalizadas y contrastadas.

2.4 El surgimiento del concepto moderno de campo

La consolidación definitiva de la teoría electromagnética requirió un cambio conceptual aún más profundo: la introducción del **concepto de campo**. Hasta el siglo XIX, la física estaba dominada por la idea de acción a distancia, según la cual los cuerpos ejercían fuerzas unos sobre otros de manera directa e instantánea. Sin embargo, esta concepción resultaba insuficiente para explicar de forma coherente los fenómenos eléctricos y magnéticos.

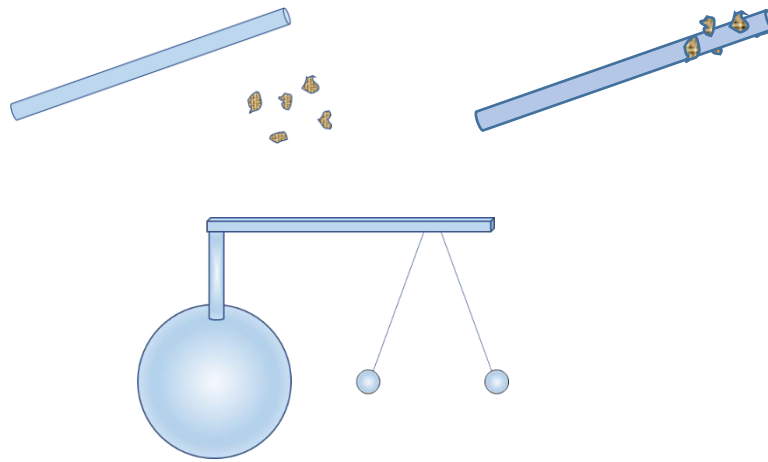
Michael Faraday (Inglaterra, 1791–1867) fue quien introdujo una nueva manera de pensar estos fenómenos, al proponer que las interacciones eléctricas y magnéticas no se producían
Ing. Esp. Mag. José Ignacio Castañeda Fandiño.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

directamente entre cargas o corrientes, sino a través de entidades físicas distribuidas en el espacio: los llamados campos eléctricos y magnéticos. Faraday, aunque carecía de una formulación matemática formal, comprendió que el espacio mismo adquiría propiedades físicas en presencia de cargas y corrientes.

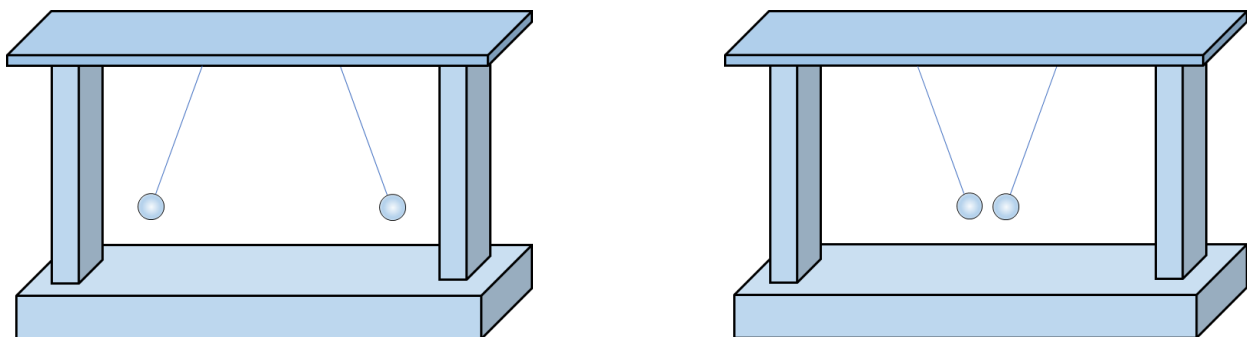
Este enfoque fue posteriormente formalizado por James Clerk Maxwell (Reino Unido, 1831–1879) quien unificó electricidad y magnetismo en un conjunto coherente de ecuaciones diferenciales. Las ecuaciones de Maxwell no solo describen cómo se generan y se relacionan los campos eléctricos y magnéticos, sino que predicen la existencia de ondas electromagnéticas que se propagan en el espacio, incluso en ausencia de medios materiales.

El concepto de campo constituye hoy uno de los pilares fundamentales de la física y de la ingeniería electrónica. A través de él es posible comprender la propagación de señales, el funcionamiento de antenas, la transmisión de energía y el comportamiento de los dispositivos electrónicos modernos. Más aún, permite establecer el puente conceptual entre la teoría de circuitos y la teoría de ondas, un aspecto central en la formación del ingeniero electrónico.

Pedazos de Papel



Experimento:



2.5 La electrificación y la evidencia experimental de dos tipos de carga

Uno de los primeros indicios claros de la existencia de interacciones eléctricas diferenciadas surge del fenómeno de **electrificación por frotamiento**, observado desde la antigüedad en materiales como el ámbar y, posteriormente, la ebonita. Al frotar estos materiales con telas secas, se observa que adquieren la capacidad de atraer pequeños objetos ligeros, como fragmentos de papel o fibras vegetales. Sin embargo, una comprensión más profunda del fenómeno requiere un experimento que permita identificar no solo la atracción, sino también la **repulsión eléctrica**, aspecto clave para el desarrollo del concepto de carga.

Para ello, se consideran dos pequeñas esferas ligeras, usualmente de médula vegetal o material conductor recubierto, suspendidas mediante hilos delgados y aislantes desde un soporte fijo. En su estado inicial, ambas esferas se encuentran eléctricamente neutras y cuelgan verticalmente, sin interacción apreciable entre ellas.

Si ambas esferas son puestas en contacto con una barra de ámbar previamente electrificada por frotamiento, se observa que, tras el contacto, las esferas se separan entre sí. Esta separación es consecuencia de una **fuerza de repulsión eléctrica**, que actúa entre las esferas cargadas de la misma manera. El equilibrio final se alcanza cuando dicha fuerza de repulsión se compensa con la componente horizontal de la tensión de los hilos.

El experimento se repite utilizando ahora una barra de ebonita electrificada de manera similar. Nuevamente, al cargar ambas esferas con la barra de ebonita, se observa un efecto de repulsión mutua. Este resultado indica que no es el material específico el que genera la repulsión, sino el hecho de que ambas esferas adquieren un mismo tipo de electrificación.

Un fenómeno diferente se presenta cuando una de las esferas se electrifica mediante una barra de ámbar y la otra mediante una barra de ebonita. En este caso, al aproximar las esferas, se observa una **fuerza de atracción eléctrica** que provoca su acercamiento. La coexistencia de atracción y repulsión, dependiendo de la forma de electrificación, constituye una evidencia experimental inequívoca de que existen **al menos dos tipos distintos de carga eléctrica**.

Estos resultados experimentales permiten enunciar dos principios fundamentales de la interacción eléctrica:

- Existe una fuerza de **repulsión** entre cuerpos que han sido electrificados de la misma manera.
- Existe una fuerza de **atracción** entre cuerpos que han sido electrificados de manera diferente.

La sistematización de estos fenómenos condujo a la introducción de las nociones de **carga positiva** y **carga negativa**, denominaciones que, si bien son convencionales, permiten

clasificar de forma consistente los efectos observados. La electrificación del ámbar fue asociada históricamente a uno de estos tipos de carga, mientras que la electrificación de la ebonita se asoció al tipo opuesto.

Este experimento, simple en su concepción, tiene profundas implicaciones conceptuales. En él se manifiesta por primera vez la idea de que la electricidad no es una propiedad vaga o cualitativa, sino una magnitud física susceptible de clasificación, medición y, posteriormente, formalización matemática. Para la ingeniería electrónica, esta distinción constituye el punto de partida de toda la teoría eléctrica, desde el análisis de circuitos hasta la descripción de campos y ondas electromagnéticas.

2.6 La hipótesis del fluido eléctrico y la convención de carga

La coexistencia de fenómenos de atracción y repulsión planteó tempranamente la necesidad de un modelo explicativo que permitiera organizar de manera coherente los resultados experimentales. En el siglo XVIII, Benjamin Franklin (USA, Filadelfia, 1706–1790) propuso una interpretación conceptual que, aunque hoy se reconoce como incompleta, resultó fundamental para el desarrollo de la teoría eléctrica: la **hipótesis del fluido eléctrico**.

Según Franklin, la electricidad podía entenderse como un fluido sutil e invisible capaz de desplazarse entre los cuerpos. En este modelo, los cuerpos en estado neutro poseían una cantidad “normal” de fluido eléctrico. La electrificación no correspondía a la creación o destrucción de dicho fluido, sino a su **redistribución**. Un cuerpo podía quedar electrificado por **exceso de fluido** o por **defecto de fluido**.

Franklin asoció de manera convencional el exceso de fluido eléctrico con la **carga positiva** y el defecto de fluido con la **carga negativa**. Esta asignación fue completamente arbitraria, pero extremadamente fecunda, ya que permitió establecer un sistema coherente de signos que aún se utiliza en la actualidad. Cabe señalar que, desde una perspectiva moderna, el movimiento real de portadores de carga en los conductores metálicos corresponde al desplazamiento de electrones, es decir, de cargas negativas, lo que implica que la elección de Franklin resultó ser opuesta al sentido físico predominante del transporte de carga. Sin embargo, esta circunstancia no invalida la consistencia formal de la convención adoptada.

La hipótesis del fluido permitió explicar de manera sencilla los resultados del experimento de las esferas suspendidas. Cuando ambas esferas son electrificadas por contacto con una barra de ámbar o de ebonita, adquieren ambas esferas un exceso o defecto similar de fluido, lo que da lugar a una fuerza de repulsión mutua. En cambio, cuando una esfera presenta exceso y la otra defecto, es decir una esfera es puesta en contacto con ebonita y la otra con ámbar, la diferencia de fluido entre ellas se manifiesta como una fuerza de atracción. En este marco conceptual, la interacción eléctrica surge como una tendencia natural del sistema a redistribuir el fluido hasta alcanzar un estado de equilibrio.

Más allá de sus limitaciones, el modelo de Franklin introdujo dos ideas de enorme trascendencia:

1. La **conservación de la carga**, entendida como la imposibilidad de crear o destruir electricidad, sino únicamente de transferirla.
2. La **clasificación binaria de la carga eléctrica**, base de toda la teoría electrostática posterior.

Estas nociones anticipan conceptos centrales de la física moderna. Aunque hoy se sabe que la electricidad no es un fluido continuo, sino que está asociada a partículas discretas —los electrones y otras cargas elementales—, la idea de Franklin constituye un primer intento exitoso de dotar a los fenómenos eléctricos de una estructura explicativa racional y cuantificable.

Desde la perspectiva de la física actual, los fenómenos de electrificación observados en materiales como el ámbar y la ebonita se explican en términos de **transferencia de electrones** entre cuerpos. Los electrones son partículas con carga eléctrica negativa que forman parte de la estructura atómica de la materia y que, en ciertos materiales, pueden desplazarse con relativa facilidad.

Cuando el ámbar se frota con determinados materiales, se produce una **pérdida de electrones** por parte del ámbar. Como consecuencia, el ámbar queda con un déficit de carga negativa, lo que en la convención establecida se interpreta como una **carga positiva**. En contraste, al frotar la ebonita, este material tiende a **captar electrones** del cuerpo con el que entra en contacto, quedando cargado negativamente debido al exceso de electrones adquiridos.

Este comportamiento diferencial se debe a la distinta afinidad electrónica de los materiales, propiedad que determina la facilidad con la que un material puede ceder o aceptar electrones. La serie triboeléctrica (producción de electricidad por frotamiento) organiza los materiales de acuerdo con esta tendencia, permitiendo predecir el signo de la carga adquirida tras un proceso de frotamiento.

Así, el fenómeno que Franklin interpretó en términos de exceso o defecto de un fluido eléctrico puede reinterpretarse hoy como un proceso de redistribución de electrones entre los cuerpos involucrados. La idea de fluido, aunque conceptualmente superada, capturaba de manera intuitiva un aspecto esencial del fenómeno: la electricidad no se crea ni se destruye, sino que se transfiere.

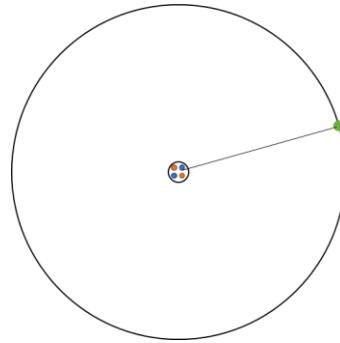
Modelo del Átomo:

$$m_e = 9,1 \times 10^{-31} \text{ Kg}$$

$$m_p = 1,67 \times 10^{-27} \text{ Kg}$$

$$m_n = 1,67 \times 10^{-27} \text{ Kg}$$

$$q_e = 1,6021 \times 10^{-19} \text{ C}$$



2.7 Consideraciones fundamentales sobre la carga eléctrica

Los procesos de electrificación descritos no implican la creación ni la destrucción de materia. Desde el punto de vista físico, la **transferencia de carga eléctrica** corresponde al desplazamiento de electrones entre los cuerpos involucrados, lo que implica que la **masa total del sistema permanece esencialmente constante**. Si bien los electrones poseen masa, la cantidad transferida en los procesos eléctricos macroscópicos es extremadamente pequeña, de modo que cualquier variación de masa resulta despreciable para los efectos prácticos de la ingeniería.

Este hecho se encuentra íntimamente ligado al **principio de conservación de la carga**, uno de los pilares de la física eléctrica, que establece que *la suma algebraica de todas las cargas eléctricas de un sistema cerrado permanece constante*. La electrificación de un cuerpo ocurre siempre a expensas de otro, reforzando la idea de que la carga no se genera de manera espontánea, sino que se redistribuye.

Por otra parte, la experiencia acumulada y la física moderna muestran que la carga eléctrica no es una magnitud continua, sino **cuantizada**. Toda cantidad de carga observable en cualquier sistema es siempre un múltiplo entero de la carga elemental, cuyo valor corresponde a la carga del electrón. Este carácter discreto de la carga, imperceptible a escala macroscópica, resulta fundamental para la comprensión del comportamiento microscópico de la materia y de los dispositivos electrónicos.

El modo en que la carga se distribuye y se desplaza en un material depende de su estructura interna. En los **conductores**, ciertos electrones poseen suficiente libertad de movimiento para desplazarse a través del material, dando lugar a lo que se denomina **banda de conducción**. En este contexto, el transporte de carga puede interpretarse tanto como el movimiento de electrones (carga negativa) como, de manera equivalente, como el desplazamiento efectivo de carga positiva, según la convención adoptada.

En contraste, los **aislantes** se caracterizan por mantener sus electrones fuertemente ligados a los átomos, lo que impide el flujo significativo de carga bajo condiciones normales. Esta diferencia entre conductores y aislantes explica por qué ciertos materiales pueden transportar corriente eléctrica mientras que otros solo pueden almacenar carga de manera localizada.

Finalmente, aun en ausencia de contacto directo, un cuerpo cargado puede provocar una redistribución de carga en otro cuerpo cercano. Este fenómeno, conocido como **inducción**, consiste en la generación de un desequilibrio de carga eléctrica debido a la influencia de un campo eléctrico externo. La inducción desempeña un papel central en numerosos dispositivos y fenómenos electromagnéticos, y será analizada con mayor profundidad en capítulos posteriores.

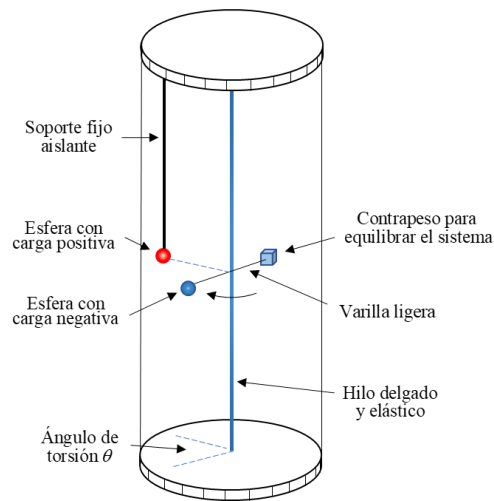
2.9 Fuerza eléctrica: Ley de Coulomb

La necesidad de cuantificar la interacción eléctrica surge de manera natural a partir de los experimentos de electrificación y de la evidencia empírica de atracción y repulsión entre cuerpos cargados. Si bien estos fenómenos habían sido observados desde la antigüedad, no fue sino hasta el siglo XVIII que se logró establecer una relación matemática precisa entre la fuerza eléctrica, la magnitud de las cargas y la distancia que las separa.

Este avance se debe principalmente a Charles-Augustin de Coulomb (Francia, 1736–1806), quien, mediante el uso de la **balanza de torsión**, logró medir fuerzas eléctricas extremadamente pequeñas con un alto grado de precisión. La balanza de torsión constituye uno de los primeros instrumentos diseñados específicamente para cuantificar interacciones eléctricas.

2.9.1 La balanza de torsión de Coulomb

El dispositivo experimental consiste esencialmente en una varilla ligera suspendida horizontalmente de un hilo muy delgado y elástico, generalmente de metal, capaz de torsionarse. En uno de los extremos de la varilla se fija una pequeña esfera conductora cargada eléctricamente, mientras que en el otro extremo puede colocarse un contrapeso para equilibrar el sistema. Una segunda esfera cargada, montada sobre un soporte fijo aislante, se aproxima a la esfera suspendida sin llegar a tocarla.



Al acercar ambas esferas, se manifiesta una **fuerza eléctrica de atracción o repulsión**, dependiendo del signo de las cargas. Esta fuerza provoca la rotación de la varilla, generando una torsión en el hilo. El ángulo de torsión resultante es proporcional al momento de la fuerza eléctrica ejercida, y puede medirse con precisión mediante un sistema de escala angular.

Dado que el hilo obedece a una ley elástica conocida, el par de torsión que se opone a la rotación es directamente proporcional al ángulo de giro. En el estado de equilibrio, el momento producido por la fuerza eléctrica se iguala al momento elástico del hilo, permitiendo así determinar cuantitativamente la magnitud de la fuerza eléctrica actuante.